



**PLAZMA NİTRÜRLEME VE İNDÜKSİYONLA  
SERTLEŞTİRİLMİŞ GGG60 MALZEMENİN  
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**2024  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**İsmail Aykut KARAMANLI**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**PLAZMA NİTRÜRLEME VE İNDÜKSİYONLA SERTLEŞTİRİLMİŞ  
GGG60 MALZEMENİN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**İsmail Aykut KARAMANLI**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Doktora Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Nisan 2024**

İsmail Aykut KARAMANLI tarafından hazırlanan “PLAZMA NİTRÜRLEME VE İNDÜKSİYONLA SERTLEŞTİRİLMİŞ GGG60 MALZEMENİN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Okan ÜNAL

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 25/04/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Mustafa Bahattin ÇELİK (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Harun ÇUĞ (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KOCABAŞ (ESTÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KARADEMİR (BARÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

İsmail Aykut KARAMANLI

## ÖZET

Doktora Tezi

### PLAZMA NİTRÜRLEME VE İNDÜKSİYONLA SERTLEŞTİRİLMİŞ GGG60 MALZEMENİN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

İsmail Aykut KARAMANLI

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Okan ÜNAL

Nisan 2024, 102 sayfa

Bu çalışmada, bir sfero dökme demir çeşidi olan GGG60'a plazma nitrüleme ve indüksiyonla sertleştirme yüzey modifikasyon işlemleri uygulanmıştır. Plazma nitrüleme için 400 °C, 450 °C ve 500 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklık; 0.5 saat, 2 saat ve 4 saat olmak üzere üç farklı nitrüleme süresi uygulanmıştır. İndüksiyonla sertleştirme ise 15 kW, 17 kW, 19 kW ve 21 kW olmak üzere 4 farklı indüksiyon gücü; 9 ve 11 saniye olmak üzere iki farklı indüksiyon süresi için uygulanmıştır. Numuneler kuru aşınma testlerine tabii tutulmuştur. Aşınma testleri ball-on-disk yöntemiyle, 40 Hz frekansta, 10N, 20N ve 30N olmak üzere 3 farklı yükte, 1 saat boyunca yapılmıştır. Aşınma testleri sırasında anlık olarak sürtünme katsayılarındaki değişimler de incelenmiştir. Numunelerin mikroyapıları SEM ve EDS ile araştırılmıştır. Aşınma izlerinin incelemesi ise SEM ve 3D yüzey profilometresi ile yapılmıştır. Ayrıca tüm numunelerden kesit alınıp sertlik ölçümleri yapılmıştır. Aşınma sonuçları hacim kaybı ve spesifik aşınma oranı açısından değerlendirilmiştir. Ardından bu parametreler için

optimizasyon yapılmıştır. Optimizasyon yöntemi olarak yüzey yanıt yöntemi (RSM) kullanılmıştır.

Sonuçlar, her iki yüzey modifikasyon işleminin de yüzey kalitesini olumsuz etkilediğini ve sürtünme katsayısını arttırdığını göstermiştir. Plazma nitrürleme sonrası yüzeyde bileşik tabaka, altında difüzyon bölgesi, en iç bölgede ise azot atomlarının ulaşamadığı çekirdek bölgesi olduğu görülmüştür. Bileşik tabaka ve difüzyon bölgesi kalınlıkları nitrasyon sıcaklığının ve süresindeki artışla birlikte artmıştır. İndüksiyonla sertleştirme sonrası yüzey ve yüzeye yakın bölgelerdeki grafit nodüllerinde çözünme olduğu bulunmuştur. İndüksiyon gücü ve süresindeki artışla çözünme de artmıştır.

Numunelerin sertlik sonuçları her iki yüzey sertleştirme işleminin de yüzey sertliklerini arttırdığını göstermiştir. Nitrürleme sıcaklığı ve süresindeki artış sertlikleri de arttırmıştır. İndüksiyon gücündeki ve süresindeki artış sertlikleri arttırmıştır. İndüksiyonla sertleştirme ile plazma nitrürlemeden daha yüksek sertliklere ulaşılmıştır. Tüm işlemler değerlendirildiğinde fazla aşınan numunelerin işlem görmeyen numuneler olduğu görülmüştür. Yüzey modifikasyon işlemleri hacim kaybını azaltmış, aşınma performansını arttırmıştır. Aşınma yükündeki artış ise hacim kaybını arttırmıştır. Spesifik aşınma oranı sonuçları incelendiğinde ise; en yüksek aşınma oranının işlem görmeyen numunede olduğu bulunmuştur. Plazma nitrürleme uygulanan numuneler için işlem süresi ve sıcaklığındaki artış aşınma oranını azaltmıştır. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler için de indüksiyon gücü ve süresindeki artışın aşınma oranını azalttığı bulunmuştur. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler, plazma nitrürleme uygulanan numunelerden daha düşük spesifik aşınma oranlarına sahiptir. Ayrıca aşınma yükü artışı spesifik aşınma oranını da arttırmıştır.

**Anahtar Sözcükler** : Sfero döküm, Plazma nitrürleme, İndüksiyonla sertleştirme, Aşınma, RSM

**Bilim Kodu** : 91421

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF PLASMA NITRIDING AND INDUCTION HARDENED GGG60 MATERIAL**

**İsmail Aykut KARAMANLI**

**Karabuk University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisors:**

**Assoc. Prof. Dr. Okan ÜNAL**

**April 2024, 102 pages**

In this study, plasma nitriding and induction hardening surface modification processes were applied to GGG60, a variety of ductile cast iron. Plasma nitriding was applied for 3 different temperatures (400°C, 450°C and 500°C) and 3 different nitriding times (half an hour, 2 hours and 4 hours). Induction hardening was applied for 4 different induction powers (15 kW, 17 kW, 19 kW and 21 kW) and 2 different induction times (9 and 11 seconds). The samples were subjected to dry wear tests. Abrasion tests were carried out with the ball-on-disc method, at a frequency of 40 Hz, at 3 different loads (10N, 20N and 30N) for 1 hour. Changes in the coefficient of friction were also analyzed instantaneously during the wear tests. The microstructures of the samples were investigated by SEM and EDS. The wear scars were analyzed by SEM and 3D surface profilometer. In addition, cross-sections were taken from all samples and hardness measurements were made. The wear results were evaluated regarding Volume loss and specific wear rate. Optimizations were then performed for these

parameters. Optimizations were performed using the surface response method (RSM).

The results showed that both surface modification processes negatively affected the surface quality and increased the friction coefficient. After plasma nitriding, it was observed that there was a compound layer on the surface, a diffusion zone below it, and a core zone in the innermost region where nitrogen atoms could not reach. The thickness of the compound layer and diffusion zone increased with the increase in nitriding temperature and time. After induction hardening, dissolution of graphite nodules on the surface and near the surface was found. Dissolution increased with the increase in induction power and duration.

The hardness results of the samples showed that both surface hardening processes increased the surface hardness. The increase in nitriding temperature and time also increased the hardness. The increase in induction power and duration increased the hardness. Higher hardnesses were achieved with induction hardening than plasma nitriding. When all the processes were evaluated, it was observed that the samples with excessive wear were the untreated samples. Surface modification processes reduced the volume loss and increased the wear performance. The increase in wear load increased the volume loss. When the specific wear rate results were analysed; it was found that the highest wear rate was in the untreated sample. For the plasma nitriding treated specimens, the increase in process time and temperature decreased the wear rate. For the induction hardened specimens, it was found that the increase in induction power and duration decreased the wear rate. Induction hardened specimens have lower specific wear rates than plasma nitrided specimens. In addition, the increase in wear load also increased the specific wear rate.

**Key Words** : Spheroidal cast iron, Plasma nitriding, Induction hardening,  
Wear, RSM

**Science Code** : 91421

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Okan ÜNAL'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Numune üretim aşamalarında desteklerini esirgemeyen Volkan Döküm Firması çalıőanlarına ve DÖKSAN Isıl İşlem Firması çalıőanlarına teşekkür ederim.

Tez alıőması boyunca laboratuvar imkanlarından yararlanmamı sağlayan sayın Prof. Dr. Sabri GÖK hocama ve Doç. Dr. Yılmaz KÜÇÜK hocama teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	5
LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
BÖLÜM 3 .....	16
GENEL BİLGİLER .....	16
3.1. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER.....	16
3.2. NİTRÜRLEME İŞLEMİ.....	17
3.2.1. Çeliklerde Nitrürleme ile Oluşan Yüzey Katmanları .....	17
3.2.2. Nitrürleme Yöntemleri.....	18
3.2.2.1. Sıvı Nitrürleme.....	18
3.2.2.2. Gaz Nitrürleme.....	18
3.2.2.3. Plazma Nitrürleme .....	18
3.3. İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİ .....	20
3.4. AŞINMA TÜRLERİ .....	23
3.4.1. Abrasif Aşınma.....	23
3.4.2. Eroziv Aşınma.....	24

	<b><u>Sayfa</u></b>
3.4.3. Kavitasyon Aşınması .....	25
3.4.4. Adeziv Aşınma .....	26
3.4.5. Korozif Aşınma .....	26
3.4.6. Oksidatif Aşınma .....	27
3.4.7. Yorulma Aşınması .....	27
3.5. YÜZEY YANIT YÖNTEMİ.....	28
BÖLÜM 4 .....	29
MATERYAL VE METOT .....	29
4.1. MATERYAL.....	29
4.1.1. Numune Hazırlama.....	29
4.1.2. Isıl İşlem .....	31
4.1.2.1. Plazma Nitrüleme .....	31
4.1.2.2. İndüksiyonla Sertleştirme .....	32
4.2. METOT .....	33
4.2.1. Aşınma Deneyleri .....	33
4.2.2. Numune Hazırlama .....	34
4.2.3. Mikrosertlik Ölçümleri .....	35
4.2.4. Aşınmış Yüzeylerin ve Mikroyapının İncelenmesi .....	36
4.2.5. İstatistiksel Modelleme ve Optimizasyon.....	37
BÖLÜM 5 .....	40
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	40
5.1. MİKROYAPI ANALİZLERİ.....	40
5.2. SERTLİK SONUÇLARI.....	45
5.3. AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI.....	47
5.3.1. Sürtünme Katsayısı Değişimi .....	47
5.3.2. Aşınma Sonuçları.....	52
5.3.2.1. Plazma Nitrüleme Sonuçları .....	53
5.3.2.2. İndüksiyonla Sertleştirme Sonuçları .....	60
5.4. OPTİMİZASYON SONUÇLARI .....	68
5.4.1. Plazma Nitrüleme İşlem Parametrelerinin Optimizasyon Sonuçları.....	68

**Sayfa**

5.4.2. İndüksiyonla Sertleştirme İşlem Parametrelerinin Optimizasyon Sonuçları .....	77
BÖLÜM 6 .....	84
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	84
KAYNAKLAR .....	90
ÖZGEÇMİŞ .....	102



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.	Plazma nitrüleme mekanizması..... 19
Şekil 3.2.	İndüksiyonla sertleştirme mekanizması . .... 21
Şekil 3.3.	Aşınma Mekanizmalarının Şematik Gösterimi ..... 24
Şekil 3.4.	Erozif aşınma mekanizmaları ..... 25
Şekil 3.5.	Yorulma aşınması mekanizmasının şematik gösterimi ..... 28
Şekil 4.1.	Döküm çubukların üretim aşamaları. .... 30
Şekil 4.2.	Aşınma diski imalat teknik resmi. .... 30
Şekil 4.3.	GGG60 çekme numunesine uygulanan çekme testi (a), gerilme-uzama grafiği (b). .... 31
Şekil 4.4.	Plazma nitrüleme uygulanan numuneler ve işlem görmemiş numune. .... 32
Şekil 4.5.	İndüksiyon uygulanan numuneler ve işlem görmemiş numune. .... 33
Şekil 4.6.	Aşınma test cihazı..... 34
Şekil 4.7.	Numunelerin bakalite alınması işlemi. .... 35
Şekil 4.8.	2D yüzey profili (a), 3D yüzey profili (b), 30N yükleme ile aşındırılmış ..... 36
Şekil 5.1.	İşlem görmemiş numune (a) ImageJ ile ferrit-perlit-grafit yapılarının belirlenmesi (b), ferrit-perlit-grafit yapılarının detaylı gösterimi (c). 41
Şekil 5.2.	400-2 (a), 500-2 (b) ve 500-4 (c) kesitlerinin SEM ve EDS sonuçları. .... 42
Şekil 5.3.	Plazma nitrülemeden sonrasında elde edilen bileşik tabaka kalınlıkları. .... 43
Şekil 5.4.	17-9, 17-11 ve 21-11 numunelerinin yüzey bölgelerinin ve yüzeyden 1 mm derinliğindeki bölgelerin SEM görüntüleri. .... 44
Şekil 5.5.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin kesit derinliğine göre sertlik değişimleri. .... 45
Şekil 5.6.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin kesit derinliğine göre sertlik değişimleri. .... 46
Şekil 5.7.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin sürtünme katsayısı değişimleri. .... 48
Şekil 5.8.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin ortalama sürtünme katsayıları. .... 49

Şekil 5.9.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre sürtünme .....	49
Şekil 5.10.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin sürtünme katsayısı değişimleri. ....	51
Şekil 5.11.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin ortalama sürtünme katsayıları. ....	51
Şekil 5.12.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre sürtünme katsayısı değişimleri. ....	52
Şekil 5.13.	Farklı sıcaklıklarda plazma nitrüleme uygulanan numunelerin yüzey profilleri. ....	53
Şekil 5.14.	Farklı sürelerde plazma nitrüleme uygulanan numunelerin yüzey profilleri. ....	54
Şekil 5.15.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre yüzey profili değişimi. ....	54
Şekil 5.16.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin hacim kayıpları.....	55
Şekil 5.17.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre hacim kaybı değişimleri. ....	56
Şekil 5.18.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin spesifik aşınma oranları. ....	57
Şekil 5.19.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre spesifik aşınma oranları. ....	58
Şekil 5.20.	Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri. ....	59
Şekil 5.21.	Farklı indüksiyon güçleri uygulanan numunelerin yüzey profilleri. ..	61
Şekil 5.22.	Farklı indüksiyon süreleri uygulanan numunelerin yüzey profilleri. .	61
Şekil 5.23.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre yüzey profili değişimi. ....	62
Şekil 5.24.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin hacim kayıpları... ..	62
Şekil 5.25.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre hacim kaybı değişimleri. ....	63
Şekil 5.26.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin spesifik aşınma oranları.....	64
Şekil 5.27.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre spesifik aşınma oranları. ....	65
Şekil 5.28.	İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri. ....	67
Şekil 5.29.	Hacim kaybı için $\lambda$ değerinin Box-Cox dönüşümü öncesi (a) ve dönüşümden sonraki değişimi (b). ....	69
Şekil 5.30.	Plazma nitrüleme optimizasyon eğrileri.....	73

## **Sayfa**

Şekil 5.31.	10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan plazma nitrürleme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre hacim kaybı değişimleri. ....	75
Şekil 5.32.	10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan plazma nitrürleme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre spesifik aşınma oranı değişimleri. ....	76
Şekil 5.33.	İndüksiyonla sertleştirme optimizasyon eğrileri. ....	81
Şekil 5.34.	10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan indüksiyonla sertleştirme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre hacim kaybı değişimleri. ....	82
Şekil 5.35.	10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan indüksiyonla sertleştirme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre spesifik aşınma oranı değişimleri.....	83

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 4.1. GGG60'ın Kimyasal Bileşimi (%). .....	30
Çizelge 4.2. Plazma nitrüleme parametreleri. ....	32
Çizelge 4.3. İndüksiyon Parametreleri.....	33
Çizelge 4.4. Tungsten karbür (WC) aşındırıcı bilye özellikleri.....	34
Çizelge 4.5. Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin RSM ile deney tasarımı ve girdi parametreleri. ....	39
Çizelge 4.6. İndüksiyonla serleştirme uygulanan numunelerin RSM ile deney tasarımı ve girdi parametreleri.....	39
Çizelge 5.1. İşlem görmemiş numunenin mikroyapı özellikleri.....	41
Çizelge 5.2. Plazma nitrüleme RSM deney tasarımı ve girdi parametreleri. ....	70
Çizelge 5.3. Hacim kaybı ANOVA sonuçları. ....	71
Çizelge 5.4. Spesifik aşınma oranı ANOVA sonuçları. ....	71
Çizelge 5.5. Model detayları.....	71
Çizelge 5.6. Plazma nitrüleme optimizasyon sonuçları. ....	72
Çizelge 5.7. İndüksiyonla sertleştirme RSM deney tasarımı ve girdi parametreleri. ....	78
Çizelge 5.8. Hacim kaybı ANOVA sonuçları. ....	78
Çizelge 5.9. Spesifik aşınma oranı ANOVA sonuçları. ....	79
Çizelge 5.10. Model detayları.....	79
Çizelge 5.11. İndüksiyonla sertleştirme optimizasyon sonuçları. ....	80

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

°C	: Selsiyus derece
μ	: Mikron
μm	: Mikrometre
λ	: Doğruluk oranı
A	: Aşınma alanı
F	: Aşınma yükü
g	: Gram
HV	: Mikrovikers
Hz	: Hertz
kg	: Kilogram
kHz	: Kiloherz
kW	: Kilowatt
L	: Aşınma iz boyu
m	: Metre
mbar	: Milibar
mm	: Milimetre
mm <sup>2</sup>	: Milimetre-kare
MPa	: Mega paskal
N	: Newton
Nm	: Newton-metre
s	: Saniye
S	: Toplam kayma mesafesi
V	: Aşınma hacmi
W	: Spesifik aşınma oranı

## KISALTMALAR

3D	:	Üç boyutlu
AISI	:	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ANOVA	:	Analysis of variance (varyans analizi)
ASTM	:	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
BBD	:	Box–Behnken Design (Box–Behnken tasarımı)
CDD	:	Central composite design (merkezi kompozit tasarımı)
CSP	:	Conventional shot peening (geleneksel bilyalı dövme)
DD	:	Dökme demir
DIN	:	Deutsche Institute für Normunge (Alman Standartlar Enstitüsü)
EDS	:	Energy-dispersive X-ray spectroscopy (enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi)
EN	:	European Norm (Avrupa Normu)
FEM	:	Finite Element Method (sonlu elemanlar yöntemi)
GDD	:	Gri dökme demir
ISO	:	International Organization for Standardization (Uluslararası Standart Organizasyonu)
KGDD	:	Küresel grafitli dökme demir
LSM	:	Laser surface melting (lazer yüzey ergitme)
MFD	:	Maksimum ferret diameter (en büyük ferret çapı)
PN	:	Plazma nitrüleme
ppm	:	Parts per million (Milyonda bir birim)
QPQ	:	Quech-polish-quech (söndür-cilala-söndür adında özel bir yöntem)
RP	:	Re-peening (yeniden dövme)
RSM	:	Response surface methodology (yüzey yanıt yöntemi)
SCIH	:	Spot continual induction hardening (noktasal sürekli indüksiyon sertleştirme)
SEM	:	Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu)
SF	:	Shape factor (şekil faktörü)

- SP : Shot peening (bilyalı dövme)  
SSP : Severe shot peening (aşırı bilyalı dövme)



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Malzemelerin kullanım alanları mekanik özelliklerine göre farklılaşmaktadır. Bu farklılaşma doğru yönetildiğinde birçok alanda dönüm noktası yenilikleri beraberinde getirmiştir. Sanayi devriminden sonra metalürjiye ağırlık veren toplumlar ilerlemiş ve refaha kavuşmuşlardır. Özellikle metal malzemeler bu ilerlemede büyük pay sahibidir. Metallerin dayanım, tokluk, sertlik gibi özelliklerinin iyileştirilmesinde geleneksel olarak alaşımlama, yumuşama veya ergime sıcaklığına kadar ısıtıp farklı hızlarda soğutarak mikroyapısını değiştirme, ısıl işlem uygulama, dövme gibi yöntemler kullanılmaktadır. Fakat metallere özellikle demir bazlı malzemelere ihtiyacın ve beklentilerin artmasıyla yeni yöntemler araştırılmış ve geliştirilmiştir.

Çelik ve dökme demir gibi temel olarak demir-karbon alaşımlı yapılara çeşitli ısıl işlemler uygulanarak mikroyapıları ve mekanik özellikleri değiştirilebilmektedir. Bu işlemler temel olarak iki gruba türe ayrılabilir. İlk olarak tavlama, normalizasyon tavlama, ıslah gibi malzemenin ısıtılıp farklı hızlarda ve kademelerde soğutulmasıyla elde edilen, iç yapının tamamını değiştiren ısıl işlemlerdir. İkinci tür ise sementasyon, nitrürleme, borlama, kromaj gibi malzemenin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerini sertleştirmeyi amaçlayan ısıl işlemlerdir. Bir çeliğin sertleşebilirliğini en çok etkileyen özellik yapısında bulunan karbon oranıdır. Karbon oranı arttıkça çeliğin sertleşebilirliği de artmaktadır. Ayrıca çeliğin yapısında bulunan krom, mangan, silisyum, vanadyum, nikel gibi elementlerinde sertlik artırıcı etkisi vardır [1]. Malzemelerin dış (kabuk) bölgesinin dayanımı arttırması için sert olması, iç kısımlarının ise gerekli tokluğu sağlayabilmesi için yumuşak kalması istenmektedir.

Çelikler demir ve karbonun belli oranlarda birbiri içinde çözünmesiyle elde edilen yapılardır. Bir demir-karbon (Fe-C) yapısında karbon (C) oranı en fazla %2 ise bu

yapılara çelik, %2'den fazlaysa bu yapılara ise dökme demirler (DD) adı verilmektedir. Dökme demirler ise üretim tekniklerine ve içerdikleri karbon ve diğer alaşım elementlerinin oranlarına göre küresel grafitli dökme demir (nodüler dökme demir, sfero dökme demir, KGDD), gri dökme demir (GDD) gibi isimler alabilmektedir [2]. Çalışmada araştırılan malzeme türü olan KGDD'ler, adlandırmasını içinde bulunan küresel biçimli grafit yapılarından almaktadır. KGDD'ler yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci sağlaması, geniş kullanım alanı, boşluklu yapısı sayesinde aynı hacimdeki diğer dökme demir türlerinden daha hafif olmasıyla oldukça tercih edilmektedir [3,4]. Ayrıca KGDD'ler ısıtılma işlem uyumluluğunun yüksek olmasıyla diğer muadil malzemelerden ayrılmaktadır.

Küresel grafitli dökme demirler aks, krank mili, volan, yataklama elemanları, dişli çarklar [5] gibi otomotiv parçaları, raylı sistem elemanları [6], iş ve tarım makineleri endüstrisi, konstrüksiyon elemanı imalatı [7] gibi oldukça çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. KGDD'lerin tercih sebeplerinden biri de yağlayıcılığının yüksek olmasıdır. KGDD'lerin gözenekli yapısı yağlayıcı kullanılan ortamda yağ moleküllerini tutmakta ve temas yüzeylerinde ekstra yağlama sağlamaktadır. Bu da parça kullanım ömrünü arttırırken yedek parça ihtiyacını, dolayısıyla maliyetleri azaltmaktadır [5]. Bu yüzden volanlarda, yağlamalı yataklarda, aks ve millerde sıklıkla tercih edilebilmektedir. Ayrıca boşluklu yapısı sayesinde yüksek titreşim sönümleme özelliği sağlamaktadır [8].

Küresel grafitli dökme demirler üstün özelliklere sahip olmalarına rağmen, kullanım alanlarına göre mekanik özelliklerinin yetersiz kalması ve yapısal kusurların fazla olması nedeniyle çeşitli ısıtılma işlemleri ile kullanılabilir. Sertliği ve mukavemeti arttırmak için sertleştirme ve temperleme yöntemleri özellikle aşınma direncini arttırmak için öztemperleme, yüzeyi sertleştirmek için indüksiyon, nitrürleme, sementasyon, lazerle sertleştirme gibi ısıtılma işlemleri uygulanmaktadır. Sünekliği ve tokluğu geliştirmek için ise normalizasyon, tavlama gibi ısıtılma işlemleri uygulanmaktadır. KGDD'lerin ısıtılma işlemi modifikasyonundan sonra yapısında istenmeyen iç gerilmeler oluşabilmekte ve ek bir işleme ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu iç gerilmelerin giderilmesi için düşük sıcaklıklarda gerilim giderme tavlama yapılmaktadır [9].

İndüksiyonla sertleştirme KGDD’de sıklıkla kullanılan ısıtma işlemleridir. Bu işlemde sıcaklık ve derinlik kontrolünün kolay olması ve maliyetinin az oluşu tercih edilebilirliğini arttırmaktadır. Fakat indüksiyonla sertleştirilecek KGDD’nin mikroyapısının ve bileşiminin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Mekanik özelliklerdeki değişimler mikroyapıya ve bileşime göre değişiklik göstermektedir. Mikroyapıda perlitik yapıların fazla olması indüksiyonla sertleştirme işleminin mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemesini sağlamaktadır. Ferrit yapılarının fazla olması ise indüksiyonla sertleştirmenin mekanik özellikleri olumsuz etkilemesine neden olmaktadır. Bu durum malzemenin yüksek hızlarda soğutulması, böylece perlit miktarının arttırılmasıyla giderilebilmektedir. Ayrıca döküm yapısında bulunan silisyum (Si), perlit oluşumunu olumsuz etkileyebilmektedir, bundan dolayı indüksiyonla sertleştirilecek dökme demirlerde silisyum içeriğini daha düşük tutmak gereklidir [10,11]. İndüksiyonla sertleştirmede sertleşme miktarı, kasa (penetrasyon) derinliği ve ısıdan etkilenmiş bölgenin optimize edilmesi işlemin başarısı için önemli parametrelerdir. Malzeme türüne göre en uygun işlem parametrelerinin bilinmesi ve seçilmesi parça kullanım ömrünü arttıracak, işlem sürelerinden tasarruf ve ekonomik kazanç sağlayacaktır. Çalışmada incelenen ısıtma işlemlerinden biri indüksiyonla sertleştirmedir.

En çok tercih edilen yüzey sertleştirme işlemlerinden biri de nitrürlemedir. Nitrürleme; çeliğin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinin düşük sıcaklıklarda (<590 °C), difüzyon yoluyla azot bakımından zenginleştirilmesi işlemidir. Difüzyonla birlikte yüzeyde sert ve kırılğan demir-nitrür ( $Fe_4N$ ,  $Fe_2N$ ) tabakaları oluşur. Düşük sıcaklıklarda işleme izin vermesi uygulanan parçalardaki deformasyon tehlikesini azaltır. Fakat geleneksel gaz nitrürleme işlemlerinin çok uzun sürmesi yeni nitrürleme yöntemlerinin araştırılmasına ve geliştirmesine neden olmuştur. Çalışmada incelenen diğer bir nitrürleme ısıtma işlemi türü olan plazma nitrürleme (PN) ise nitrürleme süresini oldukça kısaltmasıyla diğer nitrürleme türlerinden olumlu olarak ayrılmaktadır. PN; metalik yüzeylere, vakum basıncında, amonyak veya  $N_2-H_2$  ortamında, düşük sıcaklıklarda azot difüzyonu işlemidir. Deformasyon riskinin düşük olması ile ek yüzey işlemlerine gerek duymaması, işlem süresinin kısa olması, tüm dış yüzeyde homojen bir tabaka oluşabilmesi, ısıtma verimliliğinin yüksek olması, diğer nitrürleme yöntemlerine göre daha sert ve daha az kırılğan dış yüzeyler elde edilmesine imkân vermesi PN’nin

olumlu yönleridir. Olumsuz yönleri ise; ilk yatırım maliyetlerinin ve işlem maliyetlerinin yüksek oluşudur [1]. PN'nin olumlu yönlerine rağmen işlem maliyetlerinin fazlalığı kullanım alanını kısıtlamaktadır. Nitrürleme sıcaklığı ve işlem süresinin, istenilen sertlik ve nitrürleme derinliğine göre optimizasyonunun yapılması işlem maliyetlerinde azalmayı da sağlayacaktır.

En çok kullanılan KGDD'lerden olan GGG-60'ın kritik yüklemelere maruz kalan krank mili, kam mili, dişli sistemleri, volan gibi otomotiv parçalarda sıklıkla malzeme olarak kullanılmaktadır. Parçaların oldukça kritik olması GGG60'ın mekanik özelliklerinin ve uygulanan ısı işlemlere göre bu özelliklerin değişiminin incelenmesini zorunlu kılmaktadır. Literatürde GGG-60'a uygulanan işlemlerin ve parametrelerinin mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkilerinin araştırılması konusunda eksiklikler görülmüştür. Çalışmada GGG-60'a plazma nitrürleme ve indüksiyonla sertleştirme ısı işlemleri uygulanarak karşılaştırmalı incelemesi gerçekleştirilmektedir. Malzemenin farklı ısı işlemler ve ısı işlem şartları altında; aşınma ve korozyon performansları, sertlik ve iç yapı değişimleri incelenmektedir. Çalışmanın amacı; sfero döküm parçaların imalat prosesinde, işlem basamağı olarak bulunan indüksiyonla sertleştirme ile bu işleme alternatif olarak önerilen plazma nitrürlemenin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve iki yüzey modifikasyonu işleminin de üstün taraflarının ortaya konulmasıdır. İndüksiyonla sertleştirme farklı güç (kW) ve indüksiyon süreleri (s) için, plazma nitrürleme ise farklı sıcaklık (°C) ve nitrasyon süreleri için gerçekleştirilmiştir. Böylece hem yöntemlerin birbirinden üstünlükleri incelenirken hem de yöntemlerin mekanik özelliklere göre kendi içindeki optimizasyonları da yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasının amaçlarından biri de ileride yapılacak olan akademik ve endüstriyel çalışmalar için kaynaklık edebilecek bir araştırma olmasıdır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

Çalışmada kullanılan sfero (küresel) dökme demir malzemesiyle ilgili pek çok araştırma mevcuttur. Bu araştırmalar genellikle ham ya da çeşitli işlemler uygulanan sfero döküm numunelerin içyapı ve mekanik özelliklerindeki farklılaşma, yorulma, aşınma, korozyon direnci gibi özelliklerinin belirlenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu konuda yapılan bir çalışmada köpek kemiği şeklinde hazırlanan numuneler oda sıcaklığında ve tam değişken yüklem koşullarında, 120 Hz ve 20 kHz olmak üzere; iki farklı frekans için yorulma deneyleri yapılmıştır. Yorulma başlangıcının döküm kusurlarından başladığı bulunmuştur. Ayrıca düşük ve yüksek frekansta yapılan deney sonuçlarının birbirleriyle uyumlu oldukları ve birbirleri yerine kullanılacakları ifade edilmiştir [12]. Diğer bir çalışmada ise GGG40.3'e, tam değişken yüklem koşulunda, 0° ile 180° arasında değişen açılarda burulma-yorulma deneyleri yapılmıştır. Yorulma çatlak oluşumu ve ilerleyişinin burulma açısına göre değişiklik gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca deneyler sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile de kanıtlanmıştır [13]. Sfero dökümün burulma-yorulması, basma ve burulma kuvvetleri beraber uygulanarak da değerlendirilmiştir. Sonuçlar benzer şekildedir, ayrıca çatlak uzunluğundaki ilerlemenin orantısız olarak büyüdüğü, bileşke olarak uygulanan kuvvetlerin yorulmayı arttırdığı bulunmuştur [14]. Sfero döküm malzemeler kimyasal bileşimindeki değişimlere göre mekanik özellikler bakımından da farklılaşmaktadır. Bu değişimler özellikle ferritik yapı elde edilmesi amacıyla, bileşime bakır ve nikel eklenerek sağlanabilmektedir [15]. GGG40.3, GGG70, GGG80 ve GGG90 malzemelerinin yorulma dayanımları karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. En iyi yorulma dayanımı GGG90'dan üretilmiş numunelerle elde edilmiştir [15]. Yapılan çalışmada kullanılan numuneler GGG60 malzemesinden üretilmiş olup, mikroyapı olarak bahsedilen numunelerle benzerlikler göstermektedir.

Yorulma ve yorulma çatlağı başlama mekanizmasının anlaşılması malzeme, dolayısıyla parça ömrünün tayininde önemli yer tutmaktadır. Sfero döküm gibi içinde tam olarak homojen dağılım göstermeyen küresel grafit yapılar bulunan malzemelerde ise bu durum daha da önemli hale gelmektedir. GS51 sfero dökümden üretilmiş numunelere; bir ultrasonik yorulma cihazıyla, tam değişken yükleme koşullarında, 20 kHz frekansta, yüksek çevrim koşulları için yorulma deneyleri uygulanmıştır. Yüksek çevrimlerde numunelerde ciddi sıcaklık artışı yaşandığı görülmüştür. Çatlağın grafit yapıdan veya yüzey altı boşluklardan başladığı ve yine bu yapılar üzerinden ilerlediği sonucuna varılmıştır [16].

Malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde ısı işlemler [17], yüzeylerin kaplanması [18] ve bilyeli dövme, UNSM (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification) gibi yüzey modifikasyon yöntemleri [19] ile bu yöntemlerin beraber uygulandığı kombinasyonlar sıklıkla tercih edilmektedir, [20]. Özellikle dökme demirlerin gözenekli yapıları, grafitlerin homojen dağılmaması ve boyut farkları gibi etmenler yüzey modifikasyon işlemlerini zorunlu hale getirmektedir. Sfero dökme demire uygulanan yüzey modifikasyonu işlemlerinden biri tungsten inert gaz (TIG) ile yüzeyin ergitilmesi ve hızlıca soğutulmasıyla grafit yapının çözünmesidir [5,21]. Grafit yapısının çözünmesiyle beraber daha homojen bir dış katman elde edilmiştir. Ferrit-perlitten oluşan yapının martenzitik dönüşüme uğradığı; grafit nodüllerin ise çözüldüğü ve ferrit, sementit ve iğne yapılı östenite dönüştüğü görülmüştür. Malzeme sertliği ve aşınma direnci ise üç kattan fazla artmıştır [21]. TIG ile ergitme işleminin ardından yapılan kombine işlemler mekanik özelliklerdeki iyileşmeyi arttırabilmektedir. Sfero döküm yapıların nitrülenmesi ve borlanmasıyla yüzeyde bulunan nodüller grafit yapılar bileşik tabaka oluşmasına engel olmakta ve malzeme özelliklerindeki iyileşmenin önüne geçmektedir [5]. TIG ile ergitme gibi bir yüzey modifikasyonu işleminden sonra uygulanan borlama ve plazma nitrüleme işlem kombinasyonunun kesintisiz bir bileşik nitrür katmanı ve bor katmanı oluşturduğu bulunmuştur. Bu da yapılan işlemlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini arttırmıştır [5]. Keza grafit nodüllerin ergitilmesinde daha etkili bir yöntem olan lazer ile ergitmeyle (LSM) daha ince ve homojen yapılar elde edilmiştir. Sertlik dört kattan fazla artarken, aşınma direnci işlem görmemiş numuneye göre 110 kat artış göstermiştir [22]. Diğer bir çalışmada ise plazma yüzey ergitme, plazma yüzey

alaşım, temperleme ve tavlama işlemlerinin kombinasyonları GGG60 malzemesine uygulanmış ve korozyon dirençleri araştırılmıştır. İşlemler sonucunda grafit nodüllerinin ortadan kalktığı, bunun yerine ince bir ötektik dendritik mikroyapı oluştuğu görülmüştür. Korozyon direnci tüm ısı işlemlerinin kombinasyonlarında artmakla birlikte, en iyi sonuç plazma yüzey alaşım ve temperleme işlemlerinin beraber uygulandığı durumda elde edilmiştir [23]. Ghaini vd. tarafından yapılan çalışmada ise lazer ergitme parametrelerinin optimize edilmesiyle yüzey yapısı ile sertlik ve penetrasyon derinliğinin en iyi olduğu şartlar araştırılmıştır. Lazer gücü, odak mesafesi, işlem paterni ve lazer dalga boyu optimize edilerek; sertlikte üç kattan fazla artış, 0,80 mm'ye varan kasa derinliği ve homojen yüzey morfolojisi elde edilmiştir. En iyi yüzey özelliklerinin karbürlerin ergidiği, ancak grafit yumrularının tam olarak eriyemediği durumda elde edildiği bulunmuştur [24]. Bunun yanında yüzeydeki grafit yapının yok olmasının olumsuz yanları da vardır. Grafit yapının çevresinde oluşan gözenekler malzemenin yağlama özelliğini iyileştirdiği bilinmektedir [5]. Yağlama etkisinin azalması krank mili, volan, yataklama elemanı, dişli çarklar gibi yağlanmaya ihtiyaç duyulan malzemelerin dayanımlarını ve kullanım ömürlerini olumsuz etkileyebilmektedir [5,25,26]. Bundan dolayı istenilen yüzey özelliklerinin korunarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi, sfero dökümden üretilen bileşenler için önemlidir. Bu sorun ısı işlemler, yüzey kaplamalar veya bu yöntemlerin beraber uygulanmasıyla giderilmeye çalışılmıştır.

Sfero dökümün yüzey modifikasyonu için kullanılan yöntemlerden birisi yüzeyin başka bir malzeme ile kaplanmasıdır [15,18,27]. Borlama ve temperlemenin hibrit bir şekilde uygulandığı boro-temperleme işlemi farklı sıcaklıklar ve süreler için sfero döküm numunelere uygulanmış ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Borlama 900 °C'de, 1-3 saat arasında değişen sıcaklıklarda yapılmış; ardından numuneler dört farklı sıcaklıkta, birer saat temperlenmiştir. Temperleme sıcaklığı arttıkça öztemperlenmiş ferritik yapının perlitik yapıya dönüştüğü görülmüştür. Sertlikler tüm koşullar için artış göstermiştir. Sertliğin borlama süresinden çok temperleme sıcaklığına bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Boro-temperlemenin genel olarak mukavemeti arttırdığı, fakat borlama sıcaklığının ve temperleme süresinin arttırılmasının mukavemeti azaltabileceği görülmüştür. Optimum mekanik özellikler 1-3 saat borlanan ve ardından 250 ile 350 °C arasında 1 saat temperlenen numunelerde elde edilmiştir [27].

Borlanmış yüzeyi etkileyen diğer bir faktör ise borlama karışımının bileşimidir. Kul vd. GGG60'ı 950 °C sabit sıcaklıkta, 4 saat boyunca, farklı derişimlerde borlama karışımlarıyla kaplamamıştır. Karışımındaki derişimin kaplama kalınlığını etkilediği bulunmuş ve en iyi borlama karışım oranı belirlenmiştir [28]. Kaplama işlemleri sfero döküm malzemelerin aşınma dirençlerini büyük oranda arttırmaktadır. GGG40'ın elektro kaplama yöntemiyle Ni-SiC kompoziti ile kaplanmasıyla sertliği 170 HV'den 1050 HV'ye yükselmiş, aşınma direnci ise kaplama derişimine bağlı olarak büyük oranda artmıştır [29].

Stokes vd. tarafından yapılan çalışmada, 800 °C ve 900 °C'de östenit faza dönüştürülmüş, 390 °C ve 260 °C'de öztemperlenmiş sünek dökme demirin yorulma performansı araştırılmıştır. Numunelere farklı genlik ve yükte 3 noktadan eğme yorma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; çatlak yüzeyde veya yüzeyin hemen altında bulunan gözeneklerde veya grafit yapının çevresinde başlamıştır. Isıl işlemler sonucu ötektik karbür yapısında azalma, kalıntı östenitte de artış görülmüştür. Malzemenin yapısında daha yumuşak bir yapı olan östenitin artmasıyla yorulma dayanımı azalmış, çatlak ilerleme hızı ise artmıştır [30].

İndüksiyonla sertleştirme dökme demirler, orta karbonlu çelikler gibi hareket ileten; mil, aks, dişliler gibi komponentlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. İndüksiyonla sertleştirme sonucu oluşan sert kabuk malzemenin darbe dayanımını ciddi oranda arttırabilmektedir. Fakat indüksiyon derinliğinin fazla artışıyla iç bölgelerde yaşanan martenzitik dönüşümler darbe dayanımını olumsuz da etkileyebilmektedir [31]. Gao vd. EA4T'den üretilen demiryolu akslarında sertleştirme yöntemi olarak kullanılan derin haddelemenin yerine indüksiyonla sertleştirmeyi önermiştir. İndüksiyonla sertleştirilen aksların hasara bağlı yorulma dayanımları işlem görmemiş numuneye göre %61 iyileşmiştir. İyileşmenin temel nedeni kalıntı gerilemedeki artışla açıklanmıştır. İndüksiyonla sertleştirmenin akslar için alternatif bir sertleştirme yöntemi olduğu görülmüştür [32]. Diğer bir çalışmada ise yüksek hızlı demiryolu aks malzemesi olarak kullanılan indüksiyonla sertleştirilmiş SiC'nin hasara bağlı yorulma davranışı araştırılmıştır. İndüksiyonla sertleştirme ve ardından yapılan temperleme ısıl işlemlerinin yüzey sertliğini 2 kattan fazla arttırdığı, yorulma çatlaklarının hasarlı yüzeylerden başladığı

ve çatlakların birleşmesiyle kırılma oluşmuştur. Hasar büyüklüğü ve derinliği artışıyla yorulma ömründe ciddi azalışlar belirlenmiştir [33].

Araştırmaların yoğunlaştığı noktalardan biri de ısıtma işlem parametrelerinin korozyon direncine etkisidir. Xu vd. 316 paslanmaz çeliği ve GGG60'ın korozyon direncini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Numuneler 520 °C'de, 100 saat, tuzlu su çözeltisinde korozyona maruz bırakılmıştır. Numunelerin yüzeyleri incelendiğinde; 316 paslanmaz çeliğin yüzeyinde çok ince bir oksit katmanı olduğu ve yapısında bulunan kromun korozyona uğrayarak tükendiği görülmüştür. GGG60 numunelerin yüzeylerinde ise kalın, gevşek oksit tabakaları oluşmuş, tabakanın bileşimi ise  $Fe_2O_3$  ve  $Fe_3O_4$  biçimindedir. GGG60'ın korozyon direncinin, 316 paslanmaz çeliğinden çok daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu farkın temel nedeni oluşan oksit yapılarının farklı olması ile ilişkilendirilebilir [34]. Liang ise, PN'nin AISI 304 paslanmaz çeliğinin korozyon direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Nitrüleme işlemleri  $NH_3$  ortamında 300 Pa basınçta, 350-540 °C arasında değişen sıcaklıklarda, her şart için dörder saat uygulanmıştır. Korozyon direnci ise %3,5 NaCl solüsyonunda, elektrokimyasal polarizasyon ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar üst katmanların korozyon direnci alt katmanlara göre daha iyi olduğunu göstermiştir. 420-450 °C işlem aralığında 7-12 µm kalınlığında nitrülenmiş katmanlar elde edilirken, 400 °C'den düşük sıcaklıklarda ise iki µm gibi oldukça ince nitrür katmanı elde edilmiştir. 465 °C'de 2 saat plazma nitrüleme uygulanmış numunelerde ise, nitrülenmiş katman kalınlığı 20 µm'ye ulaşmıştır. Plazma nitrülenmiş östenitik paslanmaz çeliğin derinliği ve sertliğinin işlem sıcaklığına bağlı olduğu ve yüzey sertliğinin PN ile 450°C için işlem görmemiş numuneye göre 6-7 kat artırılabilir olduğu bulunmuştur. Krom nitrür çökmesinin sonucunda nitrülenmiş tabakanın korozyon direncinin azalmıştır [35]. AISI 420 paslanmaz çeliğine 440-520 °C arasında değişen sıcaklıklarda 6 saat aktif elek yöntemiyle plazma nitrüleme işlemi uygulanmıştır. Nitrülenmiş katman kalınlığının ve yüzey pürüzlülüğünün nitrüleme sıcaklığı artışı ile arttığı bulunmuştur. Numunelerin aşınma deneyleri; kuru kayma koşullarında, 10N yük, 15 cm/s kayma hızında ve 900 saniye boyunca yapılmıştır. Korozyon deneyleri ise %3,5 NaCl çözeltisinde, standart bir üç elektrot sistemiyle yapılmıştır. Sonuçlar aktif elek plazma nitrülemenin AISI 420 paslanmaz çeliğin sertliğini, aşınma direncini ve korozyon özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir [36].

Çalışmada araştırılan yöntemlerden biri olan PN geleneksel nitrüleme yöntemlerine göre işlem süresinin kısa, azot difüzyonunun daha hızlı ve nitrülenmiş katman kalınlığının daha fazla olmasıyla tercih edilen yüzey modifikasyon işlemlerindedir [37,38]. PN işleminde yüzey morfolojisini ve mekanik özellikleri etkileyen en önemli faktörler işlem sıcaklığı ve işlem süresidir [39]. PN işleminde azot atomları malzemenin yüzeyinde veya yüzeye yakın bölgelerinde bulunan diğer atomlarla bileşik yaparak nitrür katmanları oluşturmaktadır. Böylece malzemenin iç kısımları yumuşak ve sünek kalırken, yüzeyde daha sert bir dış katman elde edilmektedir [40]. Soleimani vd. tarafından yapılan çalışmada temperlenmiş soğuk iş takım çeliğine 450-550 °C arasında değişen sıcaklıklarda ve 3-9 saat arasında değişen sürelerde plazma nitrüleme uygulanmıştır. İşlemlerden sonra numunelerin mikroyapıları, sertlikleri ve yorulmaları incelenmiştir. Yorulma deneyleri bir döner eğme yorulma test cihazında, 97 Hz frekansta ve tam değişken yükleme koşulları için,  $10^6$  çevrime kadar yapılmıştır. Elde edilen katman kalınlığının 2-7 µm arasında değiştiği, işlenmemiş numunede 336 HV olan sertliğin 550 HV'ye kadar yükseldiği görülmüştür. Plazma nitrüleme uygulanan tüm numunelerin yorulma mukavemetleri artış göstermekle birlikte, en iyi yorulma performansı 550 °C'de, 6 saat işlem gören numunelerde elde edilmiştir [41].

Gök ve Alkan tarafından yapılan çalışmada PN ön işlemi uygulanan ve çeşitli malzemelerle (PVD, CrN, TiN ve AlTiN) kaplanan AISI 4140'ın korozyon ve tribokorozyon davranışı incelenmiştir. 450 °C ve 6 saat nitrülenen numunelerde 25-50 µm kalınlığında nitrür katmanları elde edilmiştir. Tribo-korozyon testleri doğal deniz suyunda potansiyodinamik polarizasyon yöntemiyle yapılmıştır. Korozyon ve tribokorozyon testleri 5N yük altında, 1 saat boyunca, alümina bilyeyle; ball-on-disk yöntemiyle yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kaplamadan önce PN uygulaması korozyon direncini arttırmaktadır. En iyi korozyon direnci ise PN'nin ardından TiN kaplama işlemiyle elde edilmiştir [42]. Diğer bir çalışmada ise saf titanyumun ve Ti-6Al-4V titanyum alaşımına değişen uygulanan PN işleminin mikroyapıya ve çizilme direncine etkisi incelenmiştir. Her bir numuneye 20 saat PN uygulandıktan sonra, bu işleme ek olarak 76 ve 156 saat arasında değişiklik gösteren ek PN uygulamaları yapılmıştır. Numunelerin yüzeylerinde; TiN ve Ti<sub>2</sub>N olmak üzere iki farklı nitrülenmiş yapıya rastlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PN süresinin artması sadece Ti-6Al-4V numunelerin nitrülenmiş katman kalınlığını da arttırmaktadır.

Ayrıca TiN yapısı yoğun olan numunelerde, Ti<sub>2</sub>N yapısı yoğun olan numunelere göre çatlama ve kırılma olasılığının daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu da işlem süresinin ve sıcaklığının mikroyapıyı etkilediği ve doğru seçilmesi gerektiğini göstermektedir [43]. Ayrıca kırılma çatlaklarının nitrürlenmiş bileşik tabakadan başladığı bilinmektedir. Malzemede korunması beklenen sünek iç yapının ise çatlakları durdurucu etkisi olduğu görülmüştür [44].

Malzemenin mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerden birisi de nitrüleme ortamıdır. Eş sıcaklık ve işlem süresi koşulları için; N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> karışımı ortamında PN uygulanan numuneler, saf azot ortamında PN uygulanan numunelere göre daha yüksek sertlik sergilemiştir, bu fark azot-hidrojen karışımı kullanıldığında difüzyon hızının artmasından kaynaklanmaktadır [45]. Fakat difüzyon hızının artması yüzey kalitesinin bozulmasına ve yüzey pürüzlülüğünün artmasına da neden olabilmektedir [46]. Dalcin vd. 18MnCrSiMo6-4 numunelerine üç farklı N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> derişimi ve sürede PN uygulamıştır. N<sub>2</sub> derişiminin ve işlem süresinin artmasıyla; bileşik katman kalınlığının, kasa derinliğinin de arttığı bulunmuştur. Ayrıca işlem süresine göre değişiklikler olmaklar beraber N<sub>2</sub> derişiminin artmasıyla yüzey sertliği de artmaktadır. Çalışmanın eksik yanı ise %76-24 oranlı N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> derişiminden yüksek değerler için ölçümlerin yapılmamış olmasıdır [47].

Plazma nitrürlenmenin, başka yöntemlerle beraber kullanılarak etkisi ve başarısı arttırılabilmektedir. Shen vd. AISI 304 numunelere PN'den önce bir ön bilyalı dövme (SP) işlemini uygulamıştır. SP ve PN işlemlerinin kombine bir şekilde uygulanması difüzyon derinliğini ve sertliği ciddi oranda arttırmıştır. Numunelerin korozyon direnci incelendiğinde ise 480 °C'nin altında PN uygulanan numunelerde bir iyileşme görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklarda PN uygulanan numunelerin korozyon dirençleri ise CrN oluşumunun artışı nedeniyle azalmıştır [48]. Ünal vd. tarafından yapılan çalışmada ise Ti-6Al-4V alaşımına geleneksel bilyalı dövme (CSP), şiddetli bilyeli dövme (SSP) ve yüzey kusurlarını azaltmak amacıyla yeniden dövme (RP) işlemleri uygulanmıştır. Ayrıca numunelere düşük sıcaklıklarda PN uygulanmış ve ardından yorulma deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tüm koşullar için bilyalı dövmenin yorulma direncini arttırdığını, fakat PN'nin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde oluşan TiN ve Ti<sub>2</sub>N yapılarının etkisiyle, türü fark etmeksizin bilyalı dövme

uygulanen numunelere göre, yorulma direncini azalttığını ortaya çıkartmıştır [49]. CSP, SSP ve PN'nin mekanik özelliklere ve yorulmaya etkisi karşılaştırıldığında ise en kötü performansın PN ile elde edildiği görülmüştür [50]. Diğer bir çalışmada ise SSP, PN'nin etkisini arttırmak için kullanılmıştır. SSP ile yüzeydeki tane boyutunda incelmeler olmuş, böylece PN etkisi ve penetrasyon derinliği artmıştır [51]. Ayrıca PN'den önce SP uygulanmasıyla plastik deformasyonlar oluşturulup malzemenin çizilme direncinin artırılabilmesi de mümkündür [52]. PN işleminin diğer yüzey modifikasyon işlemleriyle birlikte uygulanması nitrürlemenin sınırlı kalan etkisini arttırabilir, PN süresini kısaltabilir ve ısı işlem maliyetlerini azaltabilir.

Çalışmada kullanılan malzeme türü olan sfero dökümün PN'in etkisinin araştırılması konusunda eksiklikler olmakla birlikte birkaç öncü çalışma mevcuttur. Zhao vd. 520 °C'de, 4 saat PN uygulanmış D6510 (GGG60 muadili) sfero dökümünün aşınma yorulması davranışını incelemiştir. Aşınma yorulması deneyleri bir eğimli kayma yorulma test cihazıyla, farklı yüklemeler altında gerçekleştirilmiştir. PN'nin yüzey sertliğini üç kattan fazla arttırdığı, çatlak ve kırık oluşumunun ise uygulanan teğetsel yüke göre değişiklik gösterdiği bulunmuştur [53]. Bir başka çalışmada ise FCD70 (GGG70 muadili) sfero döküme PN uygulanması ve ardından TiN kaplanmasıyla yüzey modifikasyonlarındaki ve mekanik özelliklerdeki değişimler araştırılmıştır. PN işlemleri; darbeli PN sistemiyle, 550 °C'de, 10 saat uygulanmıştır. Ardından numuneler TiN kaplanmıştır. İşlenmemiş numunelerin sertlikleri 350 HV, işlem görmüş numunelerin sertlikleri ise yüzeyde 750 HV kadar ölçülmüştür. Sertlik değerleri yüzeyin 15 µm altında ise 550 HV'ye kadar düşmüştür. TiN kaplama ile daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Ayrıca PN sırasında oluşan demir-nitrür katmanının, kaplamanın yapışmasını zorlaştırdığı bulunmuştur. TiN kaplama mekanik olarak uyumlu olmayan seramik oluşumlarından dolayı yorulma dayanımını azaltabilmektedir [54]. PN uygulandıktan sonra kaplama yapılması gereken durumlarda kaplama parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir [55]. Dökme demirlerin PN'nin elektrolitik plazma nitrürleme (EPN) ve plazma iyon nitrürleme (PIN) gibi türleri ile yapılan çalışmalar da vardır [56,57]. Nie vd. çalışmasında EPN uygulanan G3500 dökme demiri ile S0050A dökme çeliğinin aşınma davranışını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Nitrürleme işlemleri 400-600 °C arasında değişen sıcaklıklarda, 3-10 dakika arasında değişen sürelerde yapılmıştır. Aşınma deneyleri

hem kuru hem de yağlayıcı ortamda, pin-on-disk yöntemiyle, 5N yük ve 200 m kayma mesafesi şartlarında gerçekleştirilmiştir. Sertliklerin her iki numune için de iki kattan fazla arttığı görülmüştür. EPN işleminin malzeme ve aşınma türü fark etmeksizin tüm koşullar için aşınma direncini önemli ölçüde arttırdığı bulunmuştur. Ayrıca yapısında bulunan grafitlerin etkisiyle G3500 dökme demirinin çok daha yüksek aşınma direnci gösterdiği görülmüştür [56]. PIN ile yüzeyi işlenen gri dökme demirin yüzey yapısı ve kavitasyon erozyon direnci incelendiğinde ise; PIN ile işlenen numunelerde, yüzey sertliğinde yaklaşık %45,2'lik bir artış görülmüştür. Nitrürlenmenin etkisiyle grafit yapısında pul şeklinde büyümeler görülmüştür. Kavitasyon erozyon deneylerinin sonuçları incelendiğinde ise; üst kısımlarında pullanma görülen işlenmiş numunelerin kavitasyon erozyon direncini düşürdüğü bulunmuştur [57].

Numune hammadde, üretim ve maliyetleri, deney süreleri, görüntüleme ve analizlerde yaşanan zorluklar gibi durumlar en az numune ve deney adetiyle en doğru sonuçlara ulaşma amacıyla yapılan çalışmaları arttırmıştır [58]. Bu amaçla pek çok modelleme, nümerik analiz, deneysel ve nümerik analizlerin beraber uygulanıp değerlendirildiği çalışma yapılmıştır [59–61]. Demiryolu aks malzemesi olarak kullanılan S38C'ye indüksiyonla sertleştirme ve ardından temperleme ısıl işlemleri uygulanmıştır. Böylece dış katmanda sertleşmeyle beraber tokluk artışı sağlanmıştır. Ardından malzemenin yorulma dayanımının belirlenmesi ve kullanım ömrünün hesaplanması için üç noktalı çatlak büyüme oranı yorulma deneyleri yapılmıştır. Çatlak büyüme oranları, çevrim sayısı, çatlak uzunlukları yardımıyla; stres yoğunluk faktörleri hesaplanmıştır. Ardından elde edilen verilerle tren ve yol tarafından üretilen kuvvetler, titreşimler ve rezonans durumları birleştirilerek bir bilgisayar programıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Malzemenin yorulma davranışının ve kalan ömür tahmininin "Standart Paris's" modeline uygun olduğu görülmüştür [59]. Yine S38C üzerine yapılan bir başka çalışmada indüksiyonla sertleştirilen numunelere çizik ve çentikler oluşturulmuş ve yorulma davranışları incelenmiştir. Sonuçlar yorulma çatlaklarının hasarlı bölgelerden başlayıp yayıldığı ortaya koymuştur. Çatlaklar ise adyabatik kayma bantları şeklinde yayılım göstermiştir [62]. Bu durum malzemelerin yüzey kalitesinin; yorulma dayanımı, mekanik özellikleri ve kullanım ömrü üzerindeki etkisini net bir biçimde ortaya koymaktadır [63]. Numunelerin mikroyapı analizleri

yapıldığında mekanik özelliklerdeki değişimin, malzemelerin iç yapısındaki dönüşümlerden ve kalıntı gerilme birikimlerinden kaynaklandığı anlaşılmıştır. İşlem görmeyen numunelerde yoğun miktarda bulunan ferrit yapıları ısıtma işlemlerinin etkisiyle perlitik dönüşümlere uğramakta ve daha sert dış katmanlar oluşturmaktadır. Keza ısıtma işlemiyle oluşan sıcaklık değişimleri yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde kalıntı basma gerilmeleri oluşturur. Bu da dışı daha sert ve darbeye karşı dayanıklı, içi ise daha yumuşak ve yorulma çatlaklarının ilerlemesini engelleyebilecek, daha tok yapılar elde etmeyi sağlamaktadır [63]. Bir başka çalışmada ise aksel burulmaya maruz kalan sfero dökme demirin yorulma ömrü hem deneysel hem de nümerik olarak araştırılmıştır. Yorulma ömrünün; grafit yapının şekli ve dağılımına, yapısal boşlukların boyut ve dağılımına göre oldukça değişiklik gösterdiği bulunmuştur. Yapısal kusurlarda dikkate alınarak yeni bir modelleme oluşturulmuştur. Yeni oluşturulan model, mevcut modellere göre çok daha doğru bir yorulma ömrü tahmini yapılmasını sağlamıştır [61]. Nümerik çalışmaların yoğunlaştığı bir diğer konu ise ısıtma işlemleri gibi mukavemet artırıcı yöntemlerin modellenmesidir. 42CrMo çeliğine uygulanan noktasal sürekli indüksiyon sertleştirme (SCIH) işleminin modellenmesi ve martenzitik dönüşümünün tahmin edilmesi üzerinde çalışılmıştır. Sonuçlar dönüşüm plastisite katsayısının doğru tahmin edilmesinin, kalıntı gerilme tahmininin doğruluğunu arttırdığı ve martenzitik dönüşümün etkisinin de tahmin edilmesini de sağladığı bulunmuştur [60]. İndüksiyonla sertleştirme işleminin tahmin edilmesinde bir başka yöntemde kalıntı gerilme ve sertleştirme derinliğine dayalı bir modelleme yapılmıştır. Diğer bir çalışmada; AISI 4140 çeliği için elastisite modülü ve poisson oranının sıcaklığa bağlı fonksiyonu oluşturulmuş ve farklı koşullar için FEM analizleri yapılmıştır. Özellikle ısıtma işlemi sonucunda oluşan kalıntı gerilmelerin malzemenin mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır [64].

Yao vd. 40CrNi çeliğinin 800 °C'de 8 saat plazma nitrürlenmesiyle elde edilen yüzey morfolojisi sonuçlarından yararlanarak bir termodinamik model geliştirmiştir. Termodinamik model nitrürlenmenin sıcaklığa bağlı olarak yüzeyde oluşturduğu nanokristalizasyon mekanizmasını gerçeğe yakın bir biçimde tahmin edebilmektedir [65]. Areitioaurtena vd. ise 42CrMo4 silindirlerin indüksiyonla sertleştirilmesiyle oluşan sertlik dağılımını, katman boyutunu, şeklini tahmin eden yarı analitik bir model üstünde çalışmıştır. İndüksiyonla sertleştirme işlemine tabii tutulan numunelerin ısı

değişimleri hassas termal kameralarla ölçülerek, bu veriler ile modelleme oluşturulmuştur. Modelleme oluşturulurken indüksiyon frekansı, ısı iletim katsayısı, numune boyutları göz önünde bulundurulmuştur. Nümerik çalışmalar deneysel sonuçlarla da doğrulanmıştır; modelin sıcaklık parametresinde ortalama %3,2'lik bir hata ile tahminde bulunduğu görülmüştür [66]. Diğer bir çalışmada ise 42CrMo4 silindirelerin indüksiyonla sertleştirilmesiyle oluşan mikroyapıların, sertliklerin ve kalıntı gerilme dağılımlarının tahmin edilmesi için bir model geliştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ve nümerik analizlerin yüzeye yakın bölgeler için oldukça tutarlı olduğu bulunmuştur [67,68].

Son yıllarda malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için yapılan çalışmaların optimum yüzey işlem parametrelerinin belirlenebilmesi konusunda yoğunlaştığı açıkça görülmektedir [69,70]. Bu durumda sfero döküm GGG60'ın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılan yöntemlerden olan plazma nitrürleme ve indüksiyonla sertleştirme ısıl işlemleri ve parametrelerinin karşılaştırmalı bir şekilde incelenmesinin önemi daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

## BÖLÜM 3

### GENEL BİLGİLER

#### 3.1. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demirin (KGDD) ilk ortaya çıkışı; 1940'lı yıllarda aşınma dayanımı yüksek olan beyaz dökme demirin krom yerine başka bir alaşım ile üretilmesinin araştırılmasıyla olmuştur. Bu araştırmalar sonucunda magnezyum katkılı GG28 KGDD elde edilmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen KGDD'nin çekme dayanımının gri dökme demirden daha iyi olduğu bulunmuştur. Günümüzde KGDD'ler otomotiv, tarım ve iş makineleri, konstrüksiyon elemanları, çeşitli makine aksamları gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [8]. Yapılan çalışmalar küresel grafitli dökme demirin döküm ve işleme kolaylığı; aşınma, korozyon, çekme ve darbe dayanımı, üretim maliyeti gibi özelliklerinin diğer dökme demir ve çelik türlerinden üstün olduğunu göstermiştir [71].

Küresel grafitli dökme demirler DIN 1694 normuna uygun olarak minimum çekme dayanımına göre isimlendirilmektedir [8]. Örneğin; GGG50'nin minimum çekme dayanımı  $500 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Mekanik özelliklerdeki değişimlerle beraber iç yapıda da değişimler görülebilmektedir. GGG40'ın iç yapısı ferritten oluşurken, GGG50 ve GGG60 ferritik-perlitik yapıdan oluşmaktadır. GGG70 ve GGG80 ise perlitik iç yapıdan oluşmaktadır [8]. KGDD'ler aks, krank mili, volan, yataklama elemanı, dişli çarklar gibi otomotiv parçaları [5], raylı sistem elemanları [6], iş ve tarım makineleri endüstrisi, konstrüksiyon elemanı imalatı [7] gibi oldukça çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. KGDD'lerin tercih sebeplerinden biri de yağlayıcılığının yüksek olmasıdır. KGDD'lerin gözenekli yapısı yağlayıcı ortamda yağ moleküllerini tutmakta ve temas halindeki parçalara ekstra yağlama sağlamaktadır. Bu da parça kullanım ömrünü arttırırken yedek parça ihtiyacını, dolayısıyla maliyetleri azaltmaktadır [5]. Bu yüzden volanlarda, yağlamalı yataklarda, aks ve millerde sıklıkla

tercih edilebilmektedir. Ayrıca boşluklu yapısı sayesinde yüksek titreşim sönümleme özelliği sağlamaktadır [8]. Bu özelliklerinin yanında işlenebilme kolaylığı, işlem sonrası iyi yüzey kaliteleri elde edilebilmesi, aşınma dayanımının iyi olması, ısı işleme uygunluğu, parça ağırlığının muadil malzemelere göre daha az oluşu, üretim maliyetinin azlığı ve kolaylığı KGDD'lerin tercih sebepleri arasında sayılmaktadır [8].

## 3.2. NİTRÜRLEME İŞLEMİ

Genel anlamda nitrürleme işlemi azot molekülü içeren ortam ve sıcaklığın etkisiyle azot içeren bileşikler oluşturma işlemidir [72]. Çalışmada kullanılan malzeme GGG60 olduğu için nitrürlemenin çelikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Nitrürleme; karbon çelikleri, takım çelikleri, düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler gibi çok çeşitli çeliklere uygulanabilmektedir [72].

### 3.2.1. Çeliklerde Nitrürleme ile Oluşan Yüzey Katmanları

Genel olarak nitrürlenmiş yüzeylerde; bileşik (beyaz) tabaka ve difüzyon bölgesi olmak üzere iki katman oluşur. Bu katmanlardan ilki olan bileşik katman  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N ve  $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N fazlarından oluşmaktadır [72,73]. Azot oranının fazla olduğu nitrürleme ortamlarında yüzeyde  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>-N<sub>3</sub> oluşumu hızlı ve fazla olurken, yüzeyden iç katmanlara doğru  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>-N<sub>3</sub> oluşumu yerini  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N'ne bırakmaktadır ve  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>-N<sub>3</sub> miktarı giderek azalmaktadır. Ağırlıklı olarak  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>-N<sub>3</sub> katmanından oluşan yüzeylerin aşınma dayanımları artarken darbe dayanımları bir miktar azalabilmektedir.  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N'nin varlığı ise darbe dayanımını bir miktar arttırabilmektedir. Fakat  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N varlığı kırılabilirliği arttırdığı için yapıda yüksek miktarlarda bulunması istenmemektedir [72].

Difüzyon bölgesi ise esas olarak alaşım elementlerinin nitrürlenmesiyle oluşur. Difüzyon bölgesi işlemde etkilenen iç katmanların sertliğini arttırmakta ve yorulma ömrünün iyileştirilmesinde önemli rol üstlenmektedir [72,74]. Bu katmanın oluşumunda içeri doğru difüze olan azotun alaşım elementleriyle bileşik yapması etkilidir [72,75].

### **3.2.2. Nitrürleme Yöntemleri**

#### **3.2.2.1. Sıvı Nitrürleme**

Bu işlem, siyanür veya siyanat içeren erimiş tuz banyosunda; 510-580 °C'de gerçekleştirilir. Tuz bileşimi %60-70 sodyum bazlı, %30-40 potasyum bazlıdır. Tuzun yapısında karbon atomu bulunmasına karşın, işlem sıcaklığının düşük olması karbürizasyona engel olmakta ve nitrürlemeye imkân sağlamaktadır [72].

#### **3.2.2.2. Gaz Nitrürleme**

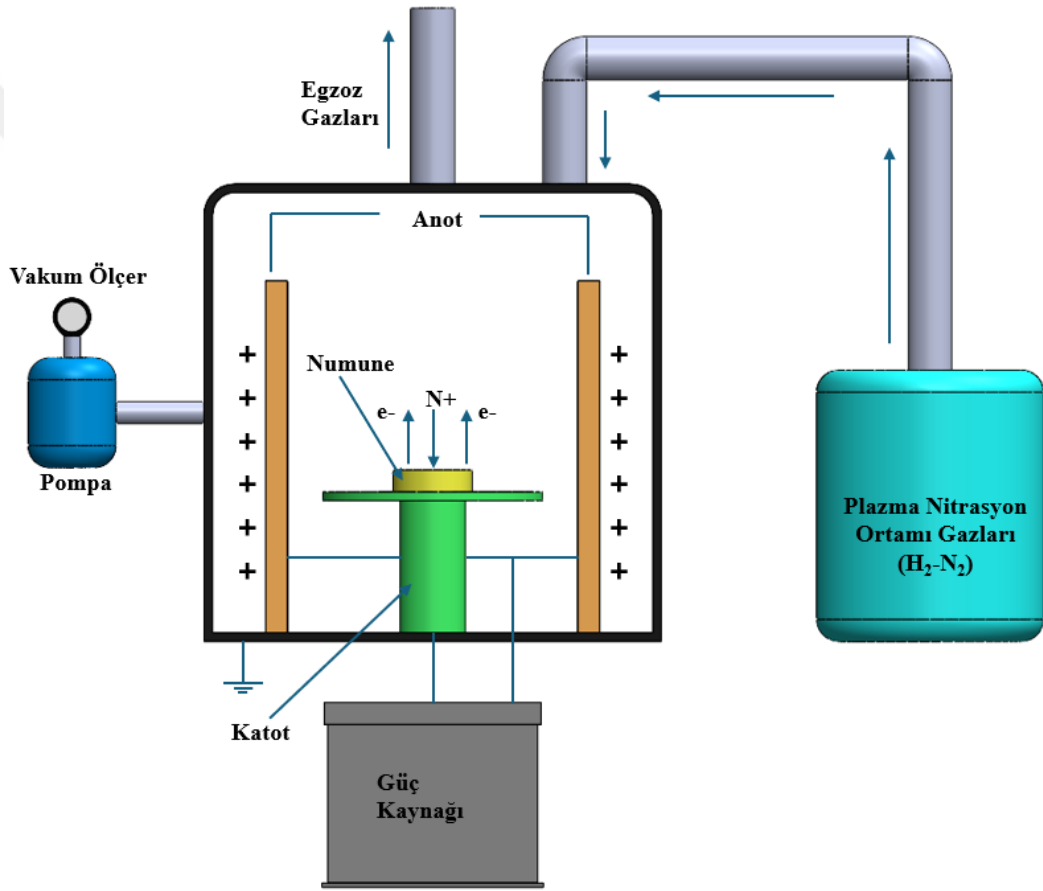
Bu yöntemde nitrürleme sıcaklığı 500-565 °C aralığında olup, östenit oluşum sıcaklığının altındadır. Nitrürlenecek parçaların oksitlenmesinin engellenmesi amacıyla nitrürleme ortamının havasının boşaltılması (vakum ortamı) gerekmektedir. İşlem ortama kurutulmuş amonyak gazının verilmesiyle gerçekleşir. Amonyak, atomik formda azota ayrışır. Atomik formdaki azot, demir atomları ve alaşım elementleriyle bileşik oluşturarak farklı nitrür yapıları meydana getirmektedir [72,76,77].

Tek aşamalı ve iki aşamalı (Floer yöntemi) olmak üzere iki türü vardır. Tek aşamalı yöntemde; sıcaklık 500-530 °C aralığında ve amonyağın ayrışması %15-30 arasındadır. Oluşan beyaz katmanın kalınlığı 0,05 mm kadardır ve bu tabaka yüzeyin kırılma hızına neden olabilmektedir [72]. Floer yöntemi ise 500-510 °C'de 15-20 saat boyunca ilk aşama işlemi uygulanmaktadır. Sonrasında ise ikinci aşama işlemi olarak sıcaklık 550 °C'ye çıkartılıp amonyak ayrışması hızlandırılmaktadır. İkinci aşama işlemi ilk aşama işleminin yaklaşık iki katı kadar sürmektedir. Bu yöntemde amonyağın ayrışma derecesi %65-85 aralığına kadar çıkabilmektedir. Floer yönteminin en önemli avantajı kırılma hızı tabaka kalınlığının azaltılabilmesine imkân sağlamasıdır. Buna karşın difüzyon derinliği artırılabilir [72,75,78].

#### **3.2.2.3. Plazma Nitrürleme**

Maddenin dördüncü hali kabul edilen plazma gaz atomlarının; ısı, radyasyon veya elektrik deşarjı yoluyla iyonlaştırılması işlemidir. PN işlemi için kontrollü vakum

ortamında, iş parçasının yüzeyine atomik boyutta azot verilmektedir. Yüksek voltajlı elektrik enerjisi, azot atomlarını hızlandırır ve böylece plazma oluşur. Oluşan iyon bombardımanı iş parçasını ısıtır, yüzeylerini temizler ve nitrülenmesini sağlar [72,77]. Demir bazlı malzemelerin plazma nitrülenmesinde öncelikle azotun iş parçası yüzeyiyle etkileşimi sonucunda FeN oluşur. Bu nitrür fazı kararsız yapıdadır ve  $\gamma'$ -fazı nitrürlere ve  $\epsilon$ -fazı nitrürlere dönüşür. Böylece bileşik tabaka oluşur. Azotun çekirdek (core) bölgesine doğru yayılmasıyla ise difüzyon bölgesi oluşur [72]. Plazma nitrüleme mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Plazma nitrüleme mekanizması.

Plazma nitrüleme işlemi etkileyen çeşitli parametreler vardır. Bunlar; nitrüleyici gaz karışımı, nitrüleme sıcaklığı, nitrüleme süresi, ortam basıncı ve plazma gücü olarak sıralanabilir [72]. PN'de genellikle %25  $N_2$ -%75  $H_2$  karışımı kullanılmaktadır. Karışımındaki azot oranı %50'ye çıkarıldığında nitrüleme hızı da artmaktadır. Fakat azot miktarındaki aşırı artış bileşik tabaka kalınlığının artmasına neden olmaktadır [72,79]. PN sıcaklığı özellikle nitrüleme derinliğinde önemli rol oynar. PN sıcaklığı

350-580 °C aralığında olmalıdır. Bu sıcaklık alaşımlı çeliklerde karbon çeliklerine göre daha düşüktür [72].

Plazma nitrürlemenin diğer yöntemlere göre bazı avantajları vardır. Bunlar;

1. İşlem süresinin azalması,
2. Çarpılmaların ve boyutsal değişikliklerin azalması,
3. İşlem sonrasında ek bir işleme gerek duyulmaması ve böylece üretim maliyetlerinin azaltılabilmesi,
4. Karmaşık geometrili yüzeylerde de etkili olması,
5. Oksitlenmeyi önleyebilmesi ve yüzey temizleme etkisinin olması olarak sıralanabilir [72,80–82].

Plazma nitrürlemenin dezavantajlı yönleri ise;

1. Nitelikli iş gücüne ve tecrübeye ihtiyaç duyulması,
2. Isıl işlem fırınının kapasitesinin yüksek tonajlı ve büyük ebatlı parçalar için yetersiz kalması,
3. Sıcaklık dağılımının parça şekli ve boyutlarına bağlı olarak değişmesi ve küçük parçalarda aşırı ısınma görülebilmesi,
4. Ark oluşumu nedeniyle yüzey hasarı yaşanabilmesi

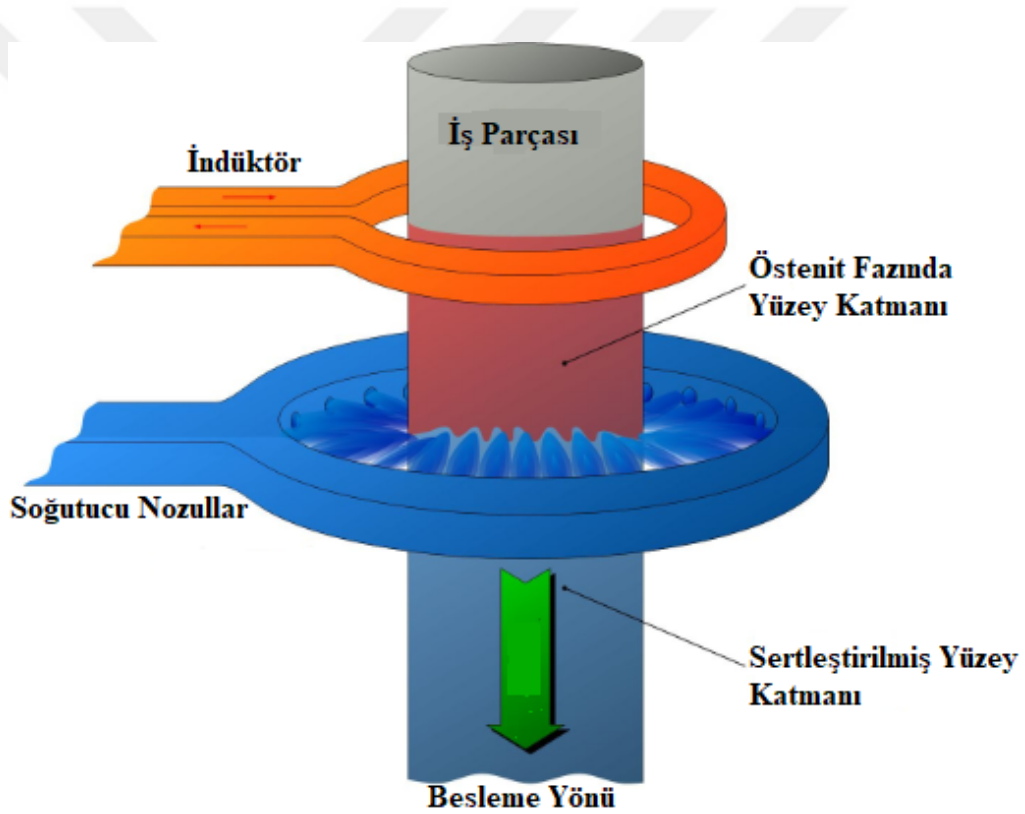
olarak sıralanabilir [72,83]. Ayrıca ülkemiz için düşünüldüğünde PN gün geçtikçe kullanım alanları artan, fakat geleneksel yöntemlere göre daha maliyetli bir yöntem olduğu ifade edilebilir.

### **3.3. İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMİ**

İndüksiyonla sertleştirmede parça yüzeyinde ince bir tabaka hızla sertleştirme sıcaklığına (östenit fazı oluşana kadar) ısıtıldığı ve ani soğutulma ile yüzeyinin sertleştirildiği bir işlemdir [84]. Yalnızca yüzeyin kısa süre içerisinde ısıtılması ve çekirdek ısınması olmadan ani soğutulması, sertliğin yalnızca yüzey bölgesinde artmasını sağlamaktadır. Böylece iç yapının sünekliliği korunarak, hem sertliği artırılmış hem de tokluğu korunmuş yapılar elde edilebilmektedir. Birim zamanda verilen ısı miktarı artırılarak sertlik ve sertleşen bölge derinliği artırılabilir. Ancak çok fazla ısı verilmesi soğuma hızını düşürmekte, bu da bir miktar çekirdek

sertleşmesine neden olabilmektedir [1]. İndüksiyonla sertleştirme mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 3.2’de verilmiştir.

İndüksiyonla sertleştirmede en önemli kavramlardan biri, sertleştirilen derinlik miktarını ifade eden kasa derinliğidir. Daha az kasa derinliği yüksek frekansta, düşük enerji ve yüksek güç yoğunluğunda elde edilirken; kasa derinliği artışı frekansın azaltılması ve enerji miktarının artırılmasıyla elde edilir. İş parçası kalınlığı ve iş parçasının maruz kaldığı yükler arttıkça kasa derinliğinin de artırılması gereklidir. İndüksiyonla sertleştirmede sertliği ve kasa derinliğini etkileyen parametreler; indüksiyon frekansı, indüksiyon gücü, indüksiyon hızı, soğutma ortamı ve sıcaklığı ile enerji yoğunluğu olarak sıralanabilir [84].



Şekil 3.2. İndüksiyonla sertleştirme mekanizması [85].

İndüksiyonla yüzey sertleştirmenin çeşitli üstünlükleri mevcuttur. Bunlar;

1. Isıtma ve soğutma işlemleri yeterince hızlı yapılırsa çekirdekte yapı değişimi yaşanmaz. Böylece yüksek çekirdek dayanımı ve süneklik elde edilebilir.
2. Malzemenin yalnızca bir bölgesinin sertleştirilmesi, difüzyonla sertleştirmeye göre daha kolaydır. Yalnızca sertleştirilmek istenen bölge ısıtılarak istenilen sertlik verilebilir.

3. İşlemin kısa sürede uygulanabilir olması, işlem hızını arttırmakta ve yöntemi ekonomik hale getirmektedir.
4. İşlemin otonom sistemlerle kontrol edilmesi sertliğin ve sertlik derinliğinin kontrolünü kolaylaştırmaktadır [1].

İndüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin avantajlarının yanında dezavantajları da vardır;

1. Tesis maliyeti fazladır.
2. Düşük kalınlıklı parçalarda çekirdek sertleşmesi ve düzeyde ergimeler görülebilmektedir.
3. Birim zamanda verilmesi gereken enerji fazladır.
4. Karmaşık şekilli parçalarda yüzeye istenilen kadar yaklaşılamamakta, yeterli ısı iletimi sağlanamayarak yüzeyde homojen bir sertlik dağılımı elde edilememektedir.
5. Nitelikli iş gücüne ihtiyaç vardır.
6. Numune yüzeylerinde oksitlenmeler görülebilmektedir.
7. İndüksiyonla sertleştirmede elde edilen sertlik değerleri iş parçasının yapısında bulunan karbon miktarına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Düşük karbonlu çeliklerde difüzyonla sertleştirme yöntemleriyle (nitürleme, sementasyon, borlama vb.) ulaşılabilen sertlik değerlerine ulaşamamaktadır.
8. Yüksek oranda karbon içeren çeliklerin indüksiyonla sertleştirilmesinde ise çatlak oluşumu riski fazladır [1].

İndüksiyonla ısıtmadan sonra soğutma işlemi genellikle su ile yapılmaktadır. Gerilme oluşumunun ve gerilmeye bağlı çatlak oluşumunun önüne geçilebilmesi için soğutma 50-60 °C sıcaklıkta su, tuz, ya da yağ banyosu ile de yapılabilir. Genellikle sertleştirmeden sonra, gerilim gidermek ve kalıntı östenitik yapıyı kübik martenzite dönüştürmek için 150-200 °C'de menevişleme yapılmaktadır [1]. İndüksiyonla sertleştirme kam mili, krank mili, dişliler, kamalı göbek gibi özellikle aşınmaya direnç göstermesi istenilen parçaların sertleştirilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir [86].

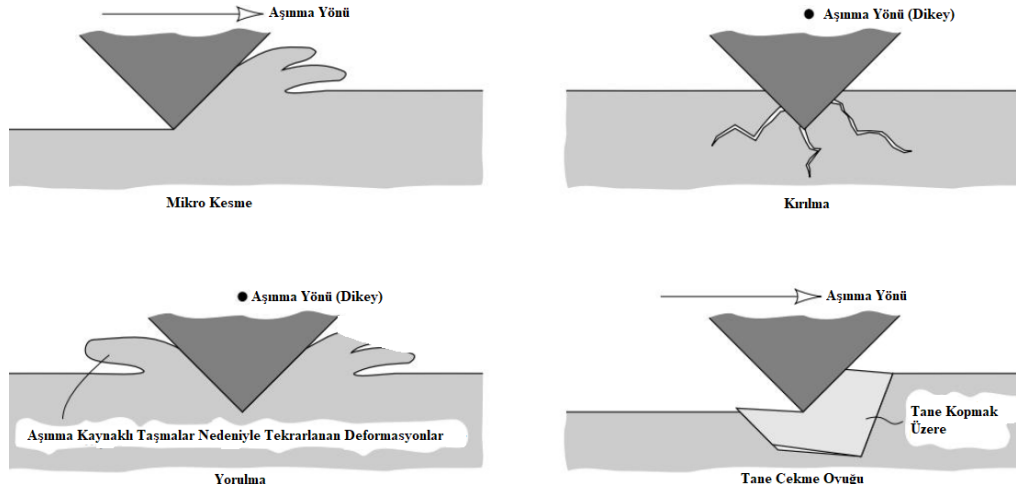
### 3.4. AŞINMA TÜRLERİ

Aşınma temas halindeki yüzeyden malzemenin kopartılarak uzaklaştırılmasıdır [87]. Aşınmayı ortaya çıkartan temel etken sürtünme kuvvetidir. Sürtünme kuvveti; temas yüzeyinin azaltılması, temas yüzeyleri arasında yağlayıcıların kullanılması, temas yüzeyleri pürüzlülüklerinin iyileştirilmesi gibi yöntemlerle azaltılmakla beraber asla yok edilememektedir. Aşınan yüzeylerde hasarlar oluşmakta, aşınma yorulması görülebilmekte ve parça ömrü azalmaktadır. Parça ve makine ömrünün arttırılabilmesi için ise kaplamalar ve yüzey modifikasyon işlemleri en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Aşınma türünün doğru belirlenmesi alınması gereken önlemin seçilebilmesinde ve etkinliğinde önemli rol oynamaktadır [88]. Aşınma türleri;

1. Abrasif aşınma,
2. Eroziv aşınma,
3. Kaviteleşme aşınması,
4. Adebiv aşınma,
5. Koroziv aşınma,
6. Oksidatif aşınma ve
7. Yorulma aşınması olarak sınıflandırılabilir [89].

#### 3.4.1. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma katı bir parçanın veya daha büyük sertlikteki bir başka cisimle aşındırılması işlemidir. Abrasif aşınma aşınan ve aşındıran arasındaki sertlik farklarına göre mikro kesme, kırılma, yorulma ve tane çekme oyuğu şeklinde olabilmektedir. Bu aşınma mekanizmalarından mikro kesme; sert ve pürüzlü yapıdaki aşındırıcının daha yumuşak olan parçayı aşındırdığı durumda görülmektedir. Kırılma tipi aşınma ise aşınan malzemenin kırılma yapıda (seramik vb.) olmasıyla ortaya çıkan bir aşınma mekanizmasıdır. Sünek bir malzeme küt bir cisim tarafından aşındırıldığında ise mikro kesme oluşum ihtimali düşüktür. Bu durumda aşınan yüzey tekrar tekrar deforme olur ve yorulma tipi aşınma oluşur. Tane çekme oyuğu türü aşınma ise taneler arası bağları zayıf seramiklerde görülür. Bu aşınma mekanizmasında tanenin tamamı dökülerek aşınır [89]. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.



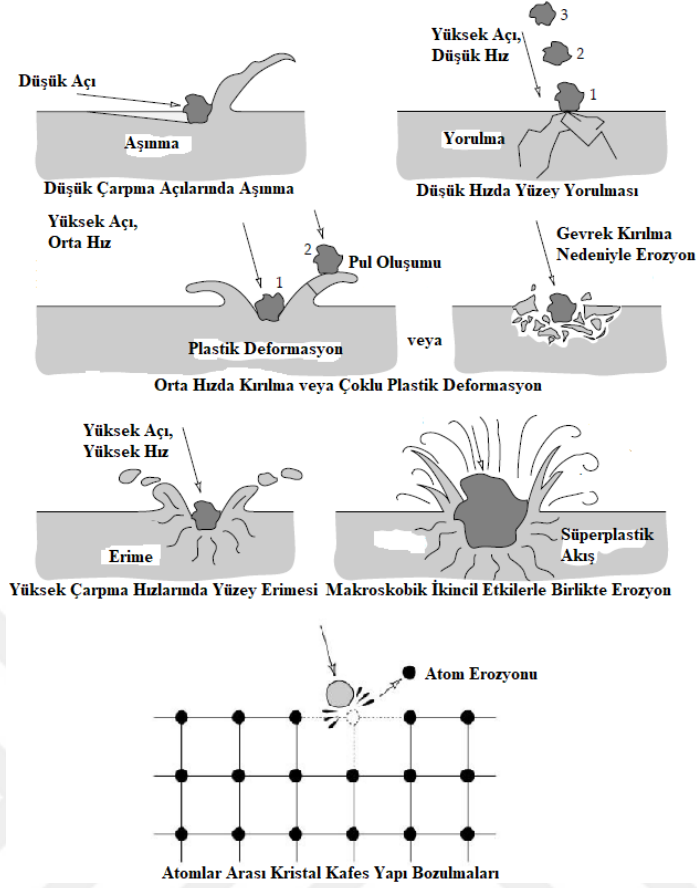
Şekil 3.3. Aşınma Mekanizmalarının Şematik Gösterimi [89].

### 3.4.2. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, katı veya sıvı parçacıkların bir nesnenin yüzeyine çarpmasıyla oluşan aşınma türüdür. Eroziyon aşınma hızı ve miktarı; aşındırıcı parçacıkların malzemesi, çarpma açısı, darbe hızı gibi birçok parametreye göre değişmektedir. Aşındırıcı parçacıklar sert katılardan oluşuyorsa aşınma mekanizması abrasif aşınmayla benzerlik gösterir. Sıvı parçacıkların aşındırıcı olduğu durumlarda ise aşınma darbeler şeklinde tekrarlanan gerilmeler sonucunda oluşur. Eroziyon aşınmada aşınma mekanizmaları; aşındırıcının hızına ve çarpma açısına, sertlikler arasındaki farka göre değişiklikler göstermektedir [89]. Eroziyon aşınma mekanizmaları;

1. Düşük çarpma açılarında aşınma,
2. Düşük hızlarda yüzey yorulması,
3. Orta hızlarda kırılma ve plastik deformasyon,
4. Yüksek çarpma hızlarında yüzey erimesi,
5. Makroskobik ikincil etkilerle birlikte erozyon,
6. Atomik etkilerle kristal kafes yapılarında meydana gelen deformasyonlar

olarak sınıflandırılabilir [89]. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Eroziv aşınma mekanizmaları [89].

### 3.4.3. Kaviteasyon Aşınması

Kaviteasyon, akışkanlar dinamiğinde, özellikle düşük basınç bölgelerinin varlığında meydana gelen, buhar boşluklarının veya kabarcıkların oluşumuna ve ardından çökmesine yol açan bir olgudur [90]. Akışkanın dinamik viskozitesi, yoğunluğu ve bulk modülü gibi faktörlerden etkilenen karmaşık bir yapısı vardır [91]. Kaviteasyon oluşumu, pompalar ve hidrolik ekipmanlar gibi çeşitli sistemlerin aşınmaya karşı dayanımını azaltan etkiler oluşturabilmektedir [92,93]. Aşınma, kaviteasyona maruz kalan yüzeyde delik ve çukurların oluşumuyla ilerlemektedir. Kaviteasyon aşınması makine bileşenlerinin çalışma koşullarını sınırlayan ve oluştuğu takdirde tüm makine bileşenlerine zarar verebilecek bir aşınma türüdür [89].

Kaviteasyon, akışkanla temas halindeki katı bir yüzey üzerinde döngüsel olarak kabarcık oluşumu ve çökme şeklinde meydana gelmektedir. Kabarcık oluşumu düşük basınçlı sıvı içerisinde çözünmüş gazların ortama salınmasıyla meydana

gelmektedir. Özellikle sıvının akışı sırasında geometrideki basıncı etkileyen değişimler ve keskin kenarlar ve köşeler kavitasyonu daha olası hale getirir [89].

#### **3.4.4. Adeziv Aşınma**

Adeziv aşınma sürtünen iki yüzeyin birbirine yapıştığında ortaya çıkan ve sürtünen yüzeyler arasında malzeme geçişine neden olup yüzeylerde büyük hasarlar oluşturabilen bir aşınma türüdür [94]. Bu aşınma türünde yapışma etkisi sürtünme katsayısını arttırarak sürtünen yüzeylerdeki deformasyonları derinleştirmektedir. Özellikle metaller adeziv aşınma eğilimindedirler. Sürtünen metal yüzeylerin adeziv aşınmasının önüne geçilebilmesi için yağlayıcılar kullanılmaktadır [89].

Adeziv aşınma mekanizması incelendiğinde; temas eden gövdelerin yüzey pürüzlülüklerinin ve sertliklerinin artmasıyla yapışmanın azaldığı görülmüştür. Adeziv aşınma kademeli yumuşatma, yapışma, plastik deformasyon, düşük çevrimli yorulma ve gerinimin neden olduğu martenzitik dönüşüm gibi aşınma bölümlerinden oluşabilmektedir [95–97]. Adeziv aşınma; sürtünme aşınmasını, erozyon aşınmasını, yorulma aşınmasını, abrasif aşınmayı ve korozyon aşınmasını kapsayan karmaşık yapıllı bir aşınma türüdür [98].

#### **3.4.5. Koroziif Aşınma**

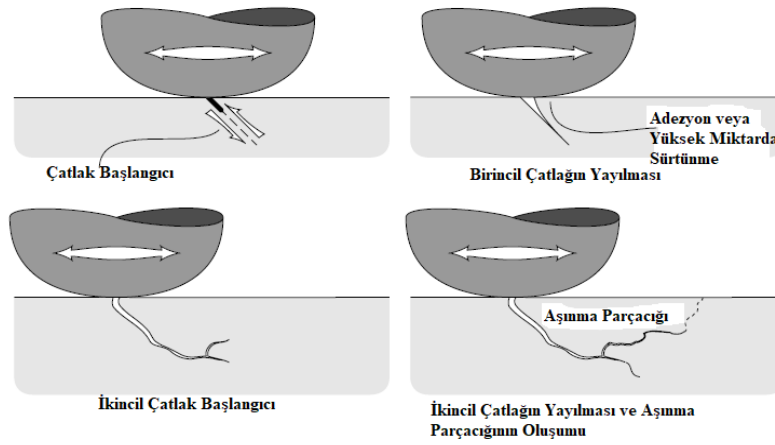
Korozyon aşınması, sıvı ile temas halindeki malzeme yüzeyinin kimyasal etkiler sonucu zamanla aşınmasıdır. Bu türdeki aşınma mekanizmaları; genellikle sürtünme, kimyasal reaksiyonlar ve malzeme yüzeyinin çevresel etkenlerle etkileşiminin birleşimiyle ortaya çıkmaktadır [99]. Koroziif aşınma hem mekanik aşınmayı hem de kimyasal korozyon mekanizmalarını içeren çok yönlü bir aşınma türüdür [100]. Mekanik ve elektrokimyasal süreçlerin ortak etkisi nedeniyle bir malzemenin yüzey hasarına uğraması ve bu durumun giderek artan malzeme kaybına yol açması durumunda ortaya çıkar [101]. Mekanik aşınma ve korozyon birbirlerini hızlandıran ve beraber ilerleyen iki olgudur [102].

### 3.4.6. Oksidatif Aşınma

Oksidatif aşınma; kuru ve yağlanmamış metallerin hava ve oksijenle teması sonucunda aşınmasıdır. Oksijen kuru kayma şeklinde aşınan metal yüzeylerle birleşerek oksit tabakaları oluşturmaktadır. Yüzeyde biriken metal oksitler daha kırılgan bir yapı oluşturarak aşınmayı hızlandırmaktadır [89]. Özellikle sıcaklık artışının oksitlenmeyi arttırdığı ve buna bağlı olarak aşınmayı da arttırdığı görülmüştür. Sıcaklık artışından önce hafif aşınma görülen yüzeylerde, birkaç yüz derecelik sıcaklık artışıyla şiddetli abrazif aşınma görülebilmektedir [103]. Özellikle çeliklerin sıcak haddelenmesinde, boruların sıcak çekilmesinde, çalışan dökme demir fren bloklarında ısı etkisiyle oksidasyon görülmektedir. Oksidatif aşınma, kimyasallar yardımıyla hava ile metalin temasının kesilmesiyle önlenebilmektedir [89].

### 3.4.7. Yorulma Aşınması

Birbirleriyle temas halinde olan, çok iyi yağlanmış yüzeylerde dahi yüzey pürüzleri kaynaklı sürtünme ve aşınmalar oluşmaktadır. Sürtünme ve yüzey deformasyonları kaynaklı gerilmelerin çok sayıda tekrarlanmasıyla yorulma çatlakları oluşur ve çatlakların etrafında aşınma parçalanmaları görülür. Bu durum yorulma aşınması olarak tanımlanmaktadır. Yorulma aşınmasında; kaymanın neden olduğu gerilme sürtünen malzemelerin tane yapılarını bozarak yeni dislokasyonlar oluşturur. Orijinal tane yapısının bozulması plastik deformasyonu artırır. Yeni dislokasyon oluşumu ise yüksek enerjili yüzey bölgeleri oluşmasına neden olur. Bu enerji birikimleri mikro çatlaklara neden olur. Mikro çatlaklar birleşerek makro çatlaklara, makro çatlaklar ise kırılmalara neden olabilmektedir [89]. Yorulma aşınması oluşum mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Yorulma aşınması mekanizmasının şematik gösterimi [89].

### 3.5. YÜZEY YANIT YÖNTEMİ

Makine-imalat sektörü için bir durumun, malzemenin, işlemin vb. en dayanıklı, en iyi, en uygun maliyetli koşullarını ve çalışma şartlarını bulmak oldukça önemlidir. En az deney sayısı ile en doğru sonuçlara ulaşmak ve optimum koşulların belirlenebilmesi; üretim maliyetlerinde azalmayı, parça ömründe artışı, işçilik ve zaman tasarrufunu sağlamaktadır. Optimizasyon matris sistemleri kullanılıp matematiksel bir model oluşturularak yapılmaktadır. Fuzzy mantık yöntemi, Taguchi yöntemi, yapay sinir ağları yöntemi gibi çeşitli optimizasyon yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerin en çok kullanılanlarından biri de “Yüzey Yanıt Yöntemi (*Response Surface Methodology RSM*)” ’dir [104]. RSM, mühendislik problemlerinin modellenmesinde ve analizinde etkili sonuçlar veren bir yöntemdir. Bu yöntem, birden fazla etken ile bu etkenlerin oluşturduğu sonuçlar arasında matematiksel ve istatistiksel temelli ilişkiler kurmaktadır [105]. RSM, istatistiksel yöntemlerden yararlanarak, bağımsız değişkenler ile yanıt değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirler ve deneysel veriyi matematiksel bir modele dönüştürür [106]. Ayrıca oluşturduğu tahmin fonksiyonuyla gerçekleştirilmemiş deneyleri gerçeğe en yakın şekilde tahmin edilmesine olanak sağlar [104].

Model oluşturmak için “Merkezi Kompozit Tasarımı (*Central Composite Design, CCD*)” ve “Box–Behnken Tasarımı (*Box–Behnken Design, BBD*)” olmak üzere iki farklı yöntem kullanılabilir. CCD’de daha fazla deneye ihtiyaç duyulurken, BBD daha az deneyle optimizasyon yapmaya imkân veren bir yöntemdir [104].

## BÖLÜM 4

### MATERYAL VE METOT

#### 4.1. MATERYAL

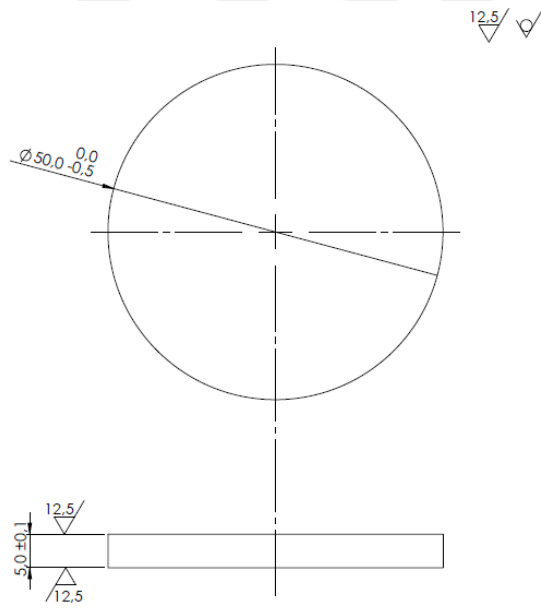
##### 4.1.1. Numune Hazırlama

Çalışmada kullanılan numunelerin elde edildiği malzeme bir KGDD olan GGG60'tır. Numunelerin elde edildiği çubuklar kum kalıplama yöntemiyle, döküm yapılarak elde edilmiştir. Döküm için iki adet, 400 mm boyunda ve 50 mm çapında silindirik ahşap kalıp üretilmiştir. Ahşap kalıplar kuma döküm (Şekil 4.1) için hazırlanmıştır. Döküm işlemleri 500 kg kapasiteli, orta frekanslı, 450 kW gücündeki Inductotherm marka elektrikli bir indüksiyon ocağında; ön ısıtma yapılmadan gerçekleştirilmiştir. 130 kg pik demir, 140 kg hurda çelik, 4 kg bakır, 6 kg silisyum, 3,5 kg magnezyum, 5,5 kg karbon ve 0,5 kg 75FeSi aşısı 1410 °C'ye kadar ergitilmiştir. Ergiyen alaşım potaya alınıp kalıba dökülerek, parça soğuduktan sonra kalıptan çıkarılmış ve yüzeylerindeki kalıntılar kumlama ile temizlenmiştir. Besleme ve çıkıcı kısımları dökümden ayrılmış, böylece döküm çubukların üretimi tamamlanmıştır. Döküm işleminin aşamaları Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Çubuklar CNC ile işlenerek ve 49,5 mm çapında ve 5 mm kalınlığında diskler elde edilmiştir. Disklerin 50 mm'den 49,5 mm'ye düşürülmesinin nedeni döküm açısının parça çapının 0,5 mm kadar azaltmasıdır. Disk yüzeylerinde Ra12,5 kaba taşlama yapılmıştır. Disklerin imalat teknik resmi Şekil 4.2'de verilmiştir. Numunelerin kimyasal bileşimi bir optik spektrometreyle analiz edilmiş olup GGG60'ın kimyasal bileşimi Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Döküm çubukların üretim aşamaları.



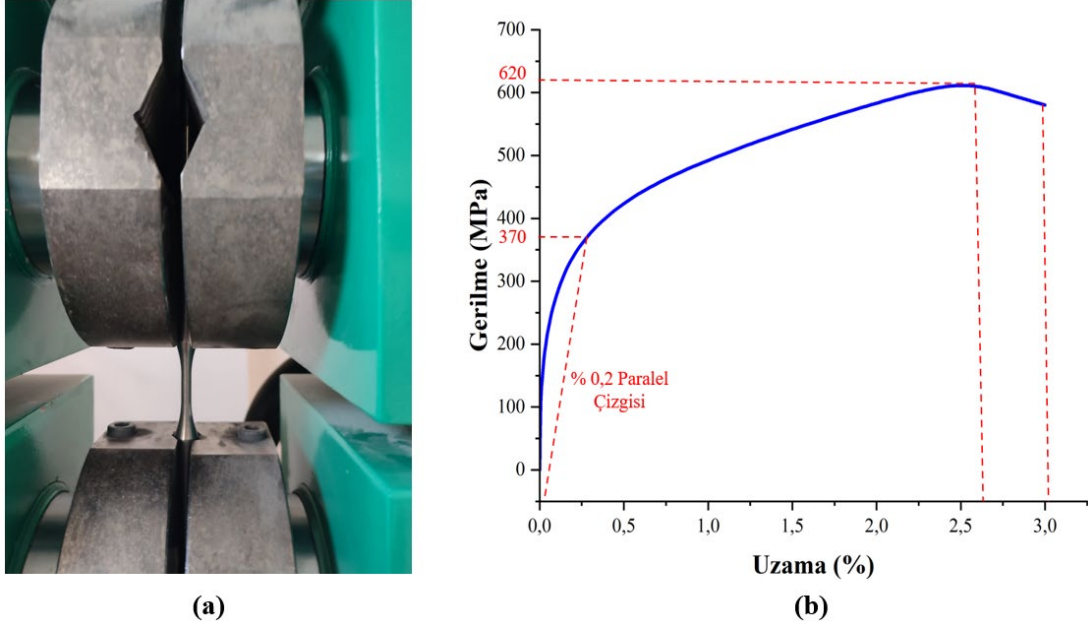
Şekil 4.2. Aşınma diski imalat teknik resmi.

Çizelge 4.1. GGG60'ın Kimyasal Bileşimi (%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Fe
3,80	2,52	0,291	0,035	0,007	0,01	0,53	0,043	Dengede

GGG60'ın standartlara uygunluğunun ve mukavemetinin doğrulanabilmesi amacıyla üç adet çekme numunesi üretilmiş olup ve EN ISO 6892-1 standardına göre çekme

testleri yapılmış ve gerilme-uzama grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.3'te çekme testi (a) ve gerilme-uzama grafiği (b) görülmektedir. GGG60'ın akma mukavemeti 370 MPa, çekme mukavemeti 620 MPa bulunmuş, uzama oranı ise %3 olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar GGG60'tan istenen mukavemet özelliklerini karşılamaktadır [107].



Şekil 4.3. GGG60 çekme numunesine uygulanan çekme testi (a), gerilme-uzama grafiği (b).

#### 4.1.2. Isıl İşlem

Çalışmada bir grup aşınma diskine farklı koşullarda plazma nitrüleme (PN) uygulanırken; diğer bir grup aşınma diskine ise yine farklı koşullarda indüksiyonla sertleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır.

##### 4.1.2.1. Plazma Nitrüleme

Plazma nitrüleme işlemi özel üretim çan tipi bir plazma nitrüleme fırınında yapılmıştır. PN işlemleri 500 mbar vakum basıncı altında, %70 H<sub>2</sub> – %30 N<sub>2</sub> ortamında gerçekleştirilmiştir. İşlemler üç farklı sıcaklıkta ve üç farklı süreyle uygulanmış olup işlem parametrelerinin detayları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Her işlemin sonunda numuneler PN fırınının içinde kontrollü olarak ortam sıcaklığına kadar soğutulmuştur.

Her numune işlem parametrelerine göre kısa bir kod ile isimlendirilmiştir. Örneğin 500-2; 500 °C sıcaklıkta, 2 saat boyunca PN uygulanan numuneyi ifade etmektedir. PN uygulanan numuneler ve işlem görmemiş numune Şekil 4.4'te görülmektedir.

Çizelge 4.2. Plazma nitrürleme parametreleri.

PN Parametreleri									
Sıcaklık (°C)	400	400	400	450	450	450	500	500	500
İşlem Süresi (h)	0,5	2	4	0,5	2	4	0,5	2	4
Numune Kodu	400-05	400-2	400-4	450-05	450-2	450-4	500-05	500-2	500-4



Şekil 4.4. Plazma nitrürleme uygulanan numuneler ve işlem görmemiş numune.

#### 4.1.2.2. İndüksiyonla Sertleştirme

İndüksiyonla sertleştirme işlemi Inductoterm firmasının üretmiş olduğu Ultrascan yüksek frekans indüksiyonla sertleştirme makinesi (PLC kontrollü) ile 100 kHz frekansla, değişken güç ve işlem süresinde (Çizelge 4.3) gerçekleştirilmiştir. Numuneler yine PN'de olduğu gibi kısa kodlamalarla isimlendirilmiştir. Örneğin; 17-11 numunesine 17 kW güçte 11 saniye boyunca indüksiyonla sertleştirme işlemi uygulanmıştır. İşlemin hemen ardından su verilerek soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra tüm numunelere 200 °C sıcaklıkta, 1 saat boyunca

gerilim giderme tavlama uygulanmış; ardından tavlama fırını içerisinde ortam sıcaklığına kadar soğutulmuştur. İndüksiyonla sertleştirilen ve işlem görmeyen numuneler Şekil 4.5'te gösterilmiştir. İşlem sonrasında numune yüzeylerinde oksitlenmeler gözlemlendiği için, aşınma deneylerinden önce bu oksitlenmeler etanol ile temizlenmiştir.

Çizelge 4.3. İndüksiyon Parametreleri

İndüksiyon Parametreleri								
Güç (kW)	15	15	17	17	19	19	21	21
İşlem Süresi (sn)	9	11	9	11	9	11	9	11
Numune Kodu	15-9	15-11	17-9	17-11	19-9	19-11	21-9	21-11

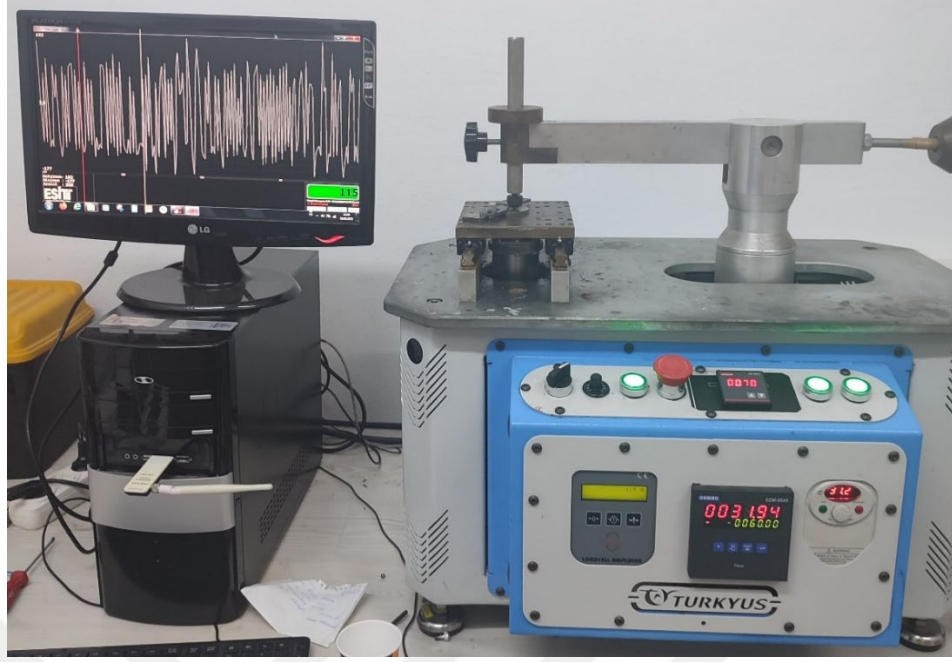


Şekil 4.5. İndüksiyon uygulanan numuneler ve işlem görmemiş numune.

## 4.2. METOT

### 4.2.1. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri Turkyus marka ball-on-disk prensibiyle çalışan ve lineer aşındırma yapan bir kuru aşınma test cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Aşınma test cihazı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Cihaz aşınma izlerini oluştururken aynı anda sürtünme katsayısındaki değişimi de ölçebilmekte ve anlık olarak monitörize edebilmektedir. Aşındırıcı olarak; 6 mm çapında, ISO 3290 G10 standartına uygun kalitede tungsten karbür (WC) bilyeler kullanılmıştır. Bilye özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.6. Aşınma test cihazı.

Çizelge 4.4. Tungsten karbür (WC) aşındırıcı bilye özellikleri.

Çap (mm)	Sertlik (HV)	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Tolerans (µm)
6	1800	14,947	± 1

Deneylerden önce numuneler etanol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Her bir deney; 40 Hz frekansta, 1 saat boyunca yapılmıştır. Deneyler 10N, 20N ve 30N olmak üzere 3 farklı yükleme koşulu için yapılmıştır. Her bir numune üzerinde farklı yükleme koşulları için birer tane aşınma izi oluşturulmuştur. İz boyu 6 mm ve işlem bitiminde aşındırıcı bilyanın katettiği toplam mesafe 28.8 m'dir. Her işlemden sonra aşındırıcı bilya bir miktar döndürülmüş olup temas yüzeyi etanol ile temizlenip kurutulmuştur. Yirmi deneyde bir ise bilye yenisi ile değiştirilmiştir.

#### 4.2.2. Numune Hazırlama

Bakalite alma işlemi için numuneler; elmas diskli, abrasif kesme cihazıyla uygun boyutlarda, elmas testere ile kesilmiştir. Ardından numuneler soğutma sıvısının yüzeyden uzaklaştırılması ve oksitlenmenin engellenebilmesi için etanol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Numuneler ikişerli olarak bakalite (Şekil 4.7) alınmıştır.



Şekil 4.7. Numunelerin bakalite alınması işlemi.

Bakalite alınan numunelerin üzerindeki bakalit numune yüzeyine ulaşana kadar 60 numara zımpara ile Metkon zımparalama-parlatma cihazıyla zımparalanmıştır. Ardından yüzey kalitesinin iyileştirilmesi adına 60-120-400-800 ve 1000 numara zımparalarla da aynı işlem tekrarlanmıştır. Zımparalama işleminden sonra yine aynı cihazla parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işlemi 3  $\mu$  elmas solüsyonla gerçekleştirilmiştir. Ardından numuneler etanol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur.

#### 4.2.3. Mikrosertlik Ölçümleri

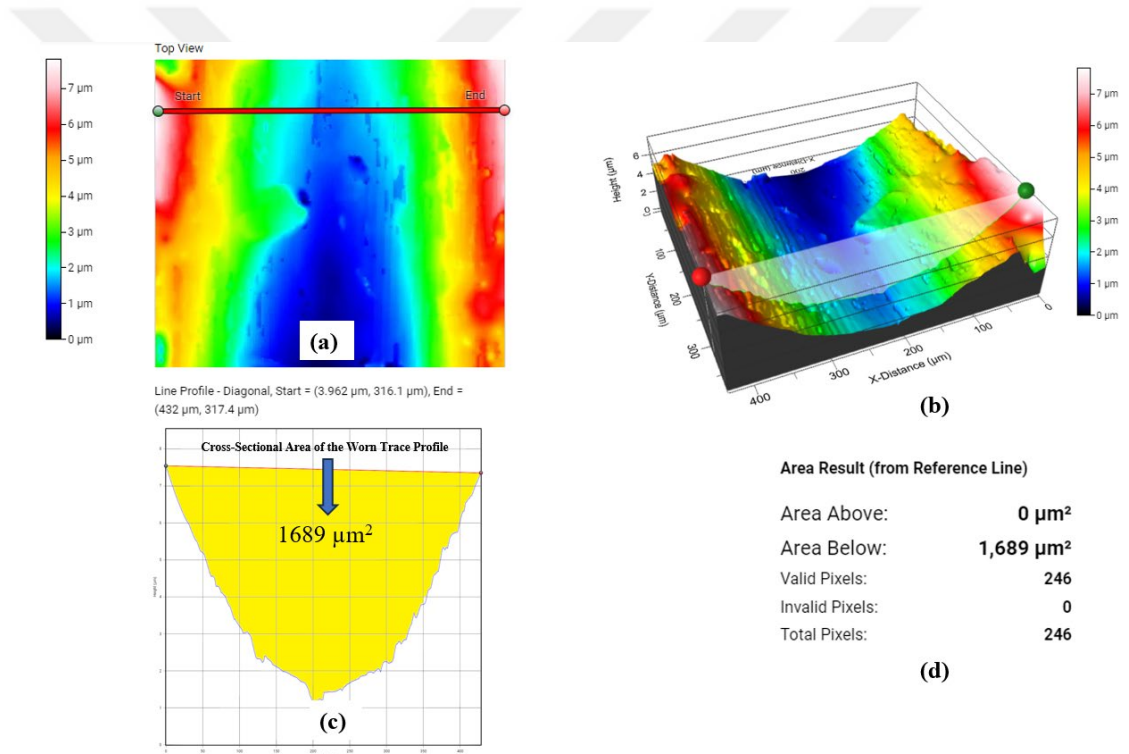
Mikrosertlik ölçümleri; kesit boyunca, piramit uçlu Vickers mikrosertlik cihazıyla (Metkon brand DUROLINE-M model Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 200 g yük ve 15 saniye bekleme süresinde ölçülmüştür. Ölçümler bir hat halinde ardışık olarak yapılmış olup, plazma nitrürleme numuneleri için bu aralık 50  $\mu\text{m}$ 'dir. İndüksiyonla sertleştirme numunelerinin sertlikleri ise 100  $\mu\text{m}$ 'lik aralıklarla ölçülmüştür. Tüm ölçümler, numunelerin dış yüzeylerinden başlanarak, işlem yapılmamış numunede elde edilen sertlik değerlerine ulaşılana kadar derinlikler arttırılarak devam ettirilmiştir.

Sertlik ölçümlerinden sonra ölçüm ucunun oluşturduğu izlerden kurtulmak amacıyla zımparalama-parlatma ve temizleme-kurutma işlemleri tekrarlandı. Tüm numuneler

%3'lük nital çözeltiyle, 5 dakika boyunca dağlandı. Ardından yüzeyler etanolle temizlenmiş ve kurutulmuştur.

#### 4.2.4. Aşınmış Yüzeylerin ve Mikroyapının İncelenmesi

Aşınma izleri ilk olarak bir üç boyutlu profilometre cihazıyla (Filmetrics, Profilm 3D, USA) incelenmiştir. Elde edilen üç boyutlu iz profilleriyle aşınma hacimleri, spesifik aşınma oranları araştırılmıştır. Aşınma alanları aynı aşınma çizgisi üzerindeki üç ayrı noktanın alanlarının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. 3D profilometre ile aşınma hacminin hesaplanması Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8. 2D yüzey profili (a), 3D yüzey profili (b), 30N yükleme ile aşındırılmış 450-05 numunesinin aşınma izinin kesit profili (c) ve aşınma izinin kesit alanı (d).

Hacim kaybı Eşitlik (4.1) kullanılarak hesaplanmıştır [108].

$$V=AL \quad (4.1)$$

burada;  $V$  aşınma hacmini ( $m^3$ ),  $A$  aşınan yüzeyin kesit alanını ( $m^2$ ),  $L$  aşınma iz boyudur ( $m$ ).

Spesifik aşınma oranı ise Eşitlik (2) kullanılarak hesaplanmıştır [108].

$$w = \frac{V}{FS} \quad (4.2)$$

burada;  $w$  spesifik aşınma oranı,  $V$  aşınma hacmi ( $m^3$ ),  $S$  toplam kayma mesafesi (m) ve  $F$  (N) aşınma yükünü ifade etmektedir.

Aşınma izleri, aşınma karakteristiği ve mikroyapı TESCAN marka MAIA3 XMU model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendi. Ayrıca yapı boyunca oluşan atomsal değişimler EDS ile ölçülmüştür. Ferrit, perlit ve grafit oranları ASTM E2567-11 standartına göre ImageJ programı yardımıyla hesaplanmıştır. Yine grafitin en büyük çapını ifade eden en büyük ferret çapı (MFD) ImageJ kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil faktörü (SF), Eşitlik 4.3 kullanılarak bulunmuştur [109]. Aynı çaplı referans daire ile alanlar oranlanıp (Eşitlik 4.4 ve Eşitlik 4.5) grafit parçalarının nodülerliği bulunmuştur. Bu işlem farklı bölgelerde bulunan toplam üç grafit parçacığı için tekrarlanmış olup ortalaması hesaplanmıştır.

$$\text{Referans Dairenin Alanı} = \frac{\pi(\text{En Büyük Feret Çapı})^2}{4} \quad (4.3)$$

$$\text{Şekil Faktörü (SF)} = \frac{\text{Grafit Nodül Alanı}}{\text{Referans Dairenin Alanı}} \quad (4.4)$$

$$\text{Grafitin Nodülerliği (\%)} = SF \times 100 \quad (4.5)$$

#### 4.2.5. İstatistiksel Modelleme ve Optimizasyon

Optimizasyon işlemleri RSM kullanılarak yapılmıştır. Plazma nitrürleme için sıcaklık, işlem süresi, aşınma yükü olmak üzere üç bağımsız girdi parametresi bulunmaktadır. İndüksiyonla sertleştirme işlemi için ise; indüksiyon gücü, indüksiyon süresi ve aşınma yükü olmak üzere üç bağımsız girdi parametresi vardır. Çıktı parametreleri her iki işlem için de ortak olup; aşınma hacmi ve spesifik aşınma oranıdır. Optimizasyonun amacı aşınma hacmi ve spesifik aşınma oranının en düşük olduğu koşulların

belirlenmesidir. Böylece GGG60'tan üretilen, indüksiyonla sertleştirme ve plazma nitrüleme uygulanan parçalar ve ekipmanlar için aşınmaya en dayanıklı koşullar belirlenebilecektir. RSM için deney tasarımı MiniTab programı kullanılarak tasarlanmıştır. Modellemede kullanılan giriş parametreleri Eşitlik 4.6'daki gibi ifade edilebilir [110];

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_m) \quad (4.6)$$

burada;  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$  ve  $y$  sırasıyla giriş ve çıkış değişkenlerini temsil etmektedir. RSM'de temel prensip girdiler ve çıktılar arasında korelasyon kurulmasıdır. Bu da bir ikinci dereceden denklem (Eşitlik 7) modellemesiyle sağlanır [110];

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j \geq i}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (4.7)$$

burada;  $i$  doğrusal katsayısı,  $j$  ikinci derece katsayısı,  $b$  regresyon katsayısını,  $m$  parametre sayısını ve  $\varepsilon$  yanıtta tanımlanan hatayı ifade etmektedir. Çalışmada üç faktörlü Box-Behnken deney tasarımı kullanılmış olup tasarıma uygun olarak 15 deney seçilmiştir. Normalite testi ile sonuçların dağılımları incelenmiş, normal dağılmayan PN uygulanan numunelerin spesifik aşınma oranı sonuçları için Box-Cox dönüşümü yapılmıştır. Diğer sonuçların normal dağılım gösterdiği görülmüştür. Ayrıca varyans analizi (ANOVA) ile parametrelerin etki oranları belirlenmiştir. Tüm istatistik işlemleri %95 güven aralığı için yapılmıştır. PN uygulanan numuneler için deney tasarımı ve girdi parametrelerinin düzenlenmiş hali Çizelge 4.5'te görülmektedir. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler için deney tasarımı ve girdi parametreleri ise Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5. Plazma nitürleme uygulanan numunelerin RSM ile deney tasarımı ve girdi parametreleri.

Deney Numarası	A	B	C	PN Sıcaklığı (°C)	PN Süresi (Saat)	Aşınma Yüğü (N)
1	-1	0	-1	400	2	10
2	0	0	0	450	2	20
3	0	-1	1	450	0,5	30
4	0	0	0	450	2	20
5	-1	-1	0	400	0,5	20
6	1	-1	0	500	0,5	20
7	0	-1	-1	450	0,5	10
8	0	1	-1	450	4	10
9	-1	0	1	400	2	30
10	1	0	1	500	2	30
11	0	0	0	450	2	20
12	-1	1	0	400	4	20
13	0	1	1	450	4	30
14	1	1	0	500	4	20
15	1	0	-1	500	2	10

Çizelge 4.6. İndüksiyonla serleştirme uygulanan numunelerin RSM ile deney tasarımı ve girdi parametreleri.

Deney Numarası	A	B	C	İndüksiyon Gücü (kW)	İndüksiyon Süresi (Saniye)	Aşınma Yüğü (N)
1	-1	0	-1	15	9	10
2	0	0	0	17	9	20
3	0	-1	1	19	9	30
4	0	0	0	21	9	10
5	-1	-1	0	15	9	20
6	1	-1	0	17	9	30
7	0	-1	-1	19	9	10
8	0	1	-1	21	11	20
9	-1	0	1	15	11	30
10	1	0	1	17	11	10
11	0	0	0	19	11	20
12	-1	1	0	21	11	30
13	0	1	1	15	11	10
14	1	1	0	17	11	20
15	1	0	-1	19	11	30

## BÖLÜM 5

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada SEM ve EDS analizleri ile elde edilen mikroyapı değişimleri, 3D profilometre ve SEM ile araştırılan aşınma karakteristikleri incelendi. Sürtünme katsayısındaki değişimlerin ısıtıl işlem parametrelerine ve aşınma yüküne göre değerlendirilmesi yapıldı. Sertlik değişimleri hem ısıtıl işlem türüne hem de ısıtıl işlem parametrelerindeki değişime göre değerlendirildi. Aşınma hacimleri ve spesifik aşınma oranları her bir şart için incelendi. Aşınma verilerinin istatistiksel analizleri ve optimizasyonları yapılarak farklı yükleme koşullarına göre optimum ısıtıl işlem koşulları belirlendi.

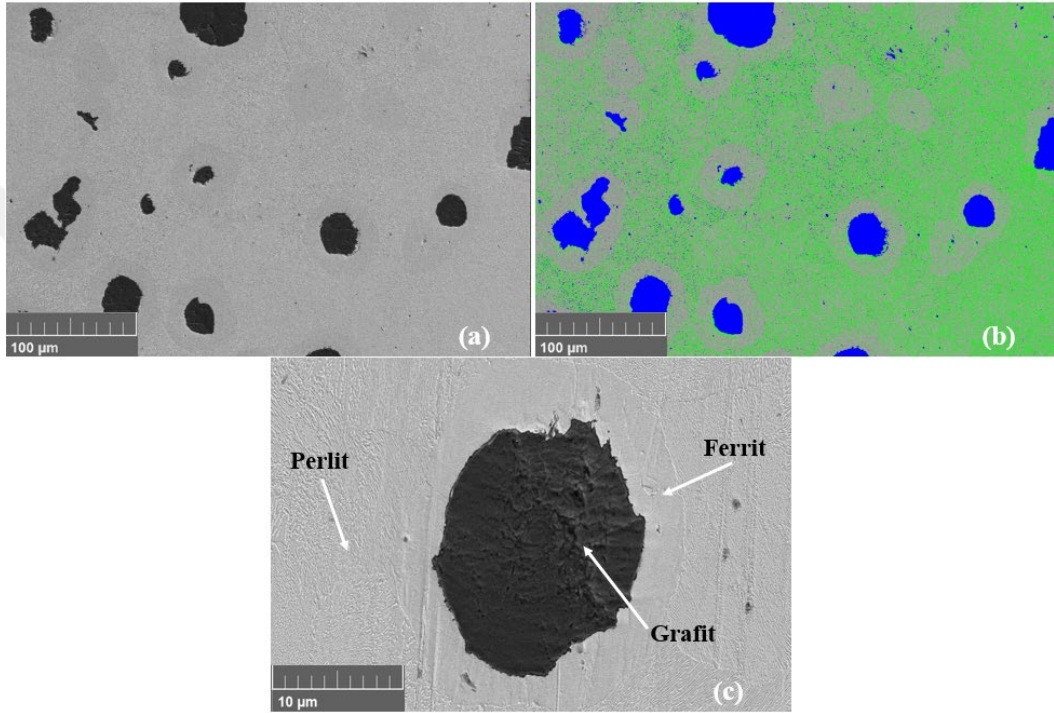
#### 5.1. MİKROYAPI ANALİZLERİ

İşlem görmemiş numunenin perlit, ferrit ve grafit oranları ImageJ ile hesaplandı. İşlem görmemiş numunenin SEM görüntüsü Şekil 5.1 (a)'da görülmektedir. ImageJ ile ferrit, perlit ve grafit yapıları ise Şekil 5.1 (b)'de görülmektedir. Burada mavi renk ile gösterilen yapılar grafit, genellikle grafitlerin çevresinde yoğunlaşmış, gri renk ile gösterilen yapılar ferrit, lamelli (dikenli) bir yapıda bulunan yeşil renk ile gösterilen yapılar ise perlit yapılarını ifade etmektedir.

Ferrit, perlit ve grafit alanları hesaplandığında; mikroyapının yaklaşık %25,11'inin ferrit, %60,63'ünün perlit, %14,26'sının grafitten oluştuğu bulunmuştur. Ortalama grafit çapı 38,77  $\mu\text{m}$  hesaplanmıştır. Grafit yapılarının ortalama nodülerliği %88,14 ve  $\text{mm}^2$ 'ye düşen grafit sayısı 141'dir. İşlem görmemiş numunenin mikroyapı özellikleri Çizelge 5.1'de görülmektedir.

Çizelge 5.1. İşlem görmemiş numunenin mikroyapı özellikleri.

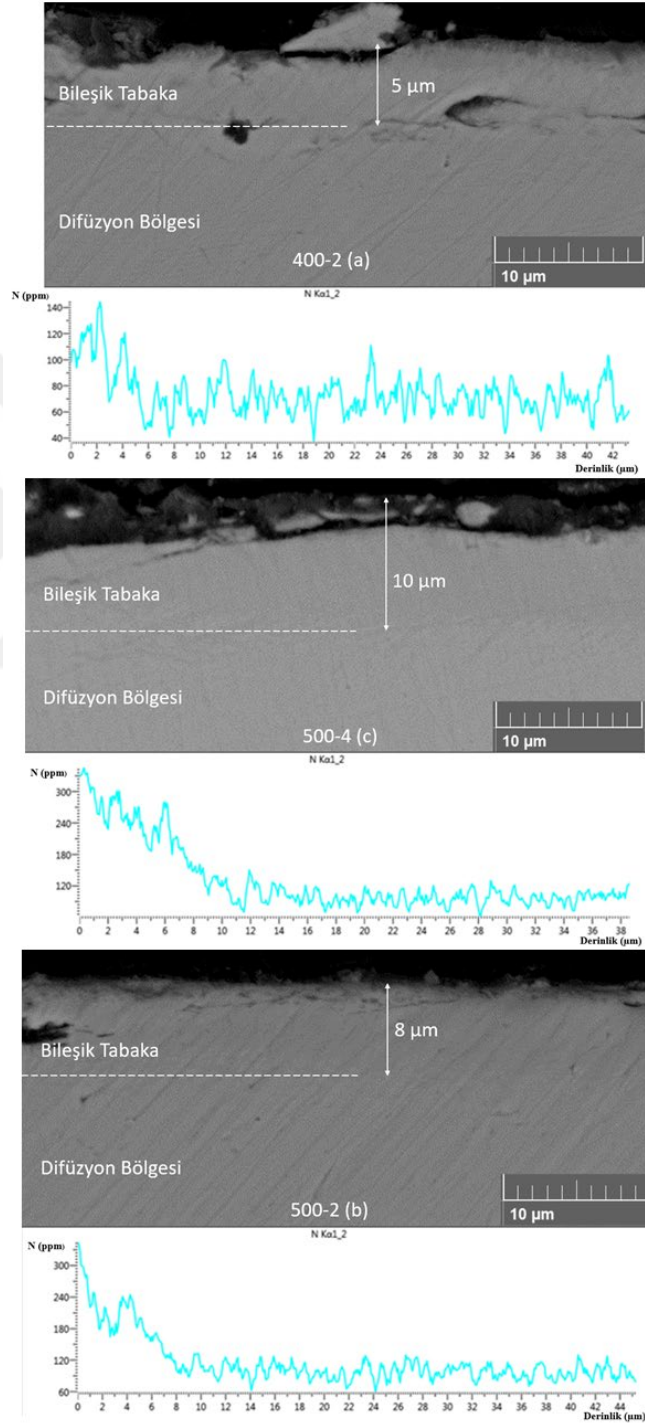
Özellikler	
Ferrit (%)	25,11
Perlit (%)	60,63
Grafit (%)	14,26
Ortalama Grafit Çapı ( $\mu\text{m}$ )	38,77
Grafitlerin Nodülerliği (%)	88,14
Grafit Sayısı (adet/ $\text{mm}^2$ )	141



Şekil 5.1. İşlem görmemiş numune (a) ImageJ ile ferrit-perlit-grafit yapılarının belirlenmesi (b), ferrit-perlit-grafit yapılarının detaylı gösterimi (c).

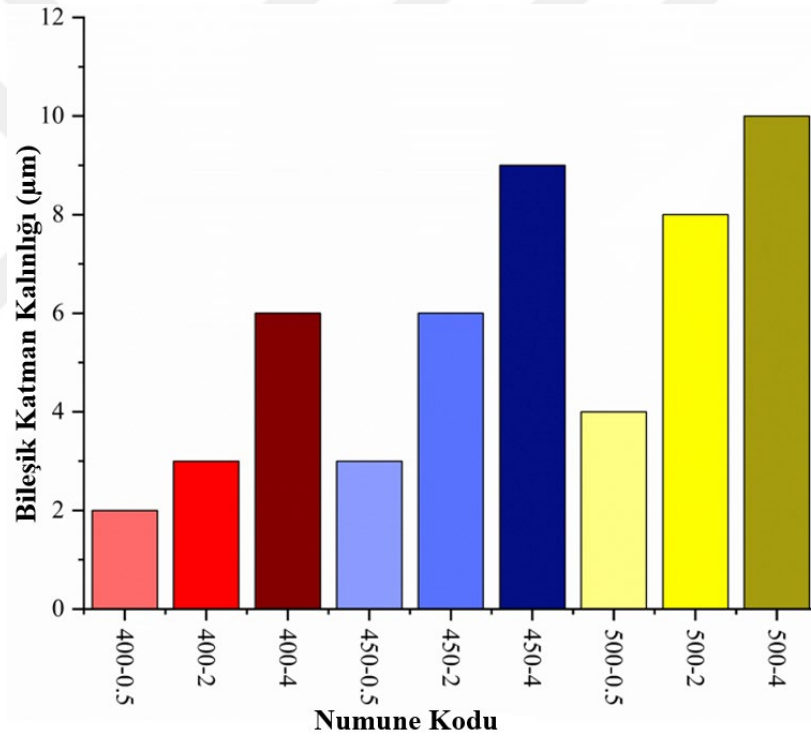
Plazma nitrüleme uygulanan numunelerde dıştan içe sırasıyla; bileşik tabaka, difüzyon bölgesi ve azot atomlarının ulaşamadığı çekirdek tabakası oluşmaktadır. PN işlemi sonrası elde edilen penetrasyon derinliğinin belirli bir seviyeye kadar işlem sıcaklığı ve süresindeki artışla arttığı bilinmektedir [41,111]. Nitrüleme derinliğinin artması kesit boyunca mikrosertliği de arttırmaktadır. Bu artış ise aşınma performansını etkilemektedir [112]. PN sonrasında alınan kesitler SEM ile incelendiğinde, beklenildiği gibi; en dış katmanda daha koyu renkli bir bileşik tabaka, hemen altında bir difüzyon bölgesi, en alt katman olarak ise nitrür tabakasının ulaşamadığı bir çekirdek tabakası olduğu görülmüştür. SEM ve EDS sonuçları incelendiğinde (Şekil 5.2) 400 °C’de, 2 saat PN uygulanan numunenin (a) nitrürlemeden etkilenen bölge derinliği 5  $\mu\text{m}$  iken, 500 °C’de, 2 saat PN uygulanan

numunenin (b) 8  $\mu\text{m}$ , 500  $^{\circ}\text{C}$ 'de, 4 saat PN uygulanan numunenin ise (c) 10  $\mu\text{m}$  olduğu bulundu. Sıcaklık artışı ile azot difüzyon hızı da atmaktadır. Elde edilen sonuçlar hem bileşik tabakanın hem de difüzyon bölgesinin kalınlığının sıcaklık ve zamandaki artışla birlikte arttığını göstermiştir.



Şekil 5.2. 400-2 (a), 500-2 (b) ve 500-4 (c) kesitlerinin SEM ve EDS sonuçları.

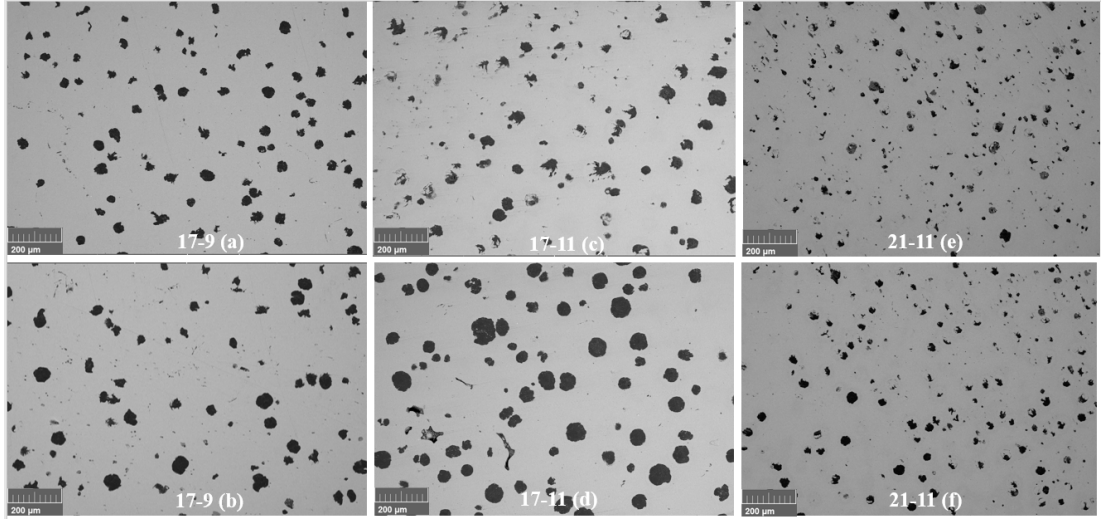
Numunelerin, EDS analizleriyle elde edilen bileşik tabaka kalınlıkları Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Burada bileşik tabaka kalınlığının hem sıcaklık hem de PN süresi artışıyla arttığı görülmektedir. En az bileşik tabaka kalınlığı 400-0,5 numunesinde elde edilirken, en fazla bileşik tabaka kalınlığı 500-4 numunesinde bulunmuştur. Özellikle PN süresi artışının nitrürleme derinliği artışında oldukça etkilidir. Sonuçlara paralel olarak Dalcin vd. DIN 18MnCrSiMo6-4 numunelere PN uyguladığı çalışmada eş sıcaklıklar ve PN ortamı için PN süresi artışının bileşik tabaka ve difüzyon bölgesi kalınlığını arttırdığını bulmuştur [47]. Keza işlem sıcaklığının artırılmasının da hem bileşik tabakanın hem de difüzyon bölgesinin kalınlığını arttırdığı çeşitli çalışmalarda kanıtlanmıştır [36,40,113].



Şekil 5.3. Plazma nitrürlemeden sonrasında elde edilen bileşik tabaka kalınlıkları.

İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin kesit görüntüleri incelendiğinde ise indüksiyonun grafit nodüllerini yok ettiği bulunmuştur. Şekil 5.4'te indüksiyonla sertleştirilen numunelerin kesit görüntüleri verilmiştir. Burada üst taraftaki görüntüler yüzeye yakın bölgelerden, alt taraftaki görüntüler ise yüzeyden 1 mm derinliğindeki bölgelerden elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; indüksiyonla sertleştirmenin yüzeye yakın bölgelerdeki grafit nodülleri ergittiği ve çaplarını azalttığı görülmüştür.

Yüzeyden derinlere gidildikçe ergimeler azalmakta ve nodül çapı artmaktadır. 17 kW güçle indüksiyon uygulanan 17-9 (a) ve 17-11 (c) numuneleri karşılaştırıldığında ise daha uzun süre indüksiyon uygulanan 17-11 numunesinin yüzeye yakın bölgelerdeki grafit sayılarının daha az olduğu bulunmuştur. Keza yüzeye yakın kısımlarda bulunan grafitlerin şekillerinin dairesel olmadığı, nodülerliğinin bozulduğu ve çaplarının küçüldüğü görülmüştür. Bu durum da indüksiyon süresindeki artışın yüzeye yakın kısımlarda bulunan grafitlerin ergimesini arttırdığını, çözünen karbonun yapıya dağıldığını ve daha homojen bir yapı elde edilmesini sağladığı göstermektedir. Smoljan vd. tarafından yapılan çalışmada indüksiyonla sertleştirmenin grafit nodüllerinin çözünmesini sağladığı, böylece matristeki karbon oranının arttığı ifade edilmiştir [114].

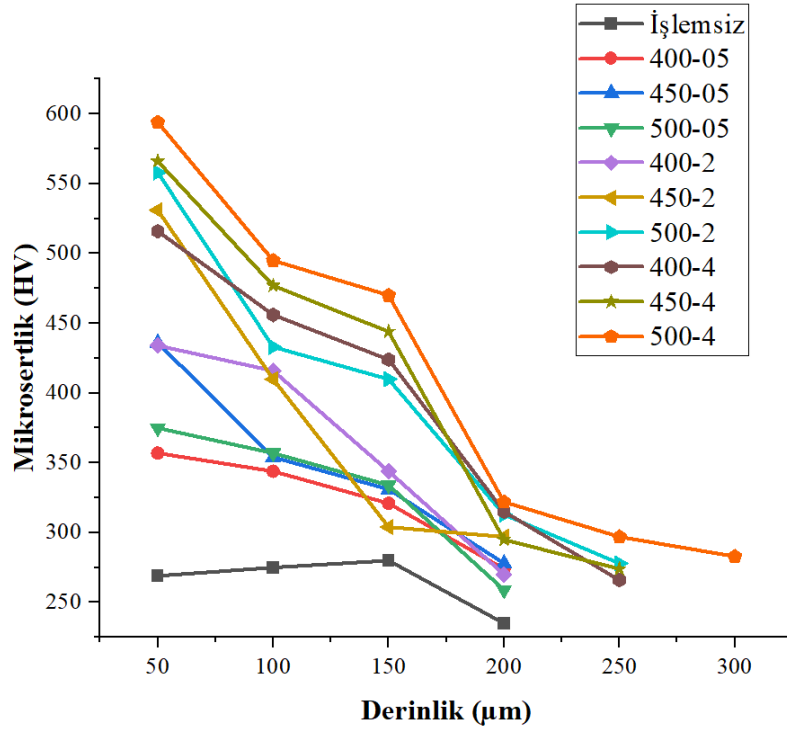


Şekil 5.4. 17-9, 17-11 ve 21-11 numunelerinin yüzey bölgelerinin ve yüzeyden 1 mm derinliğindeki bölgelerin SEM görüntüleri.

21-11 (e) incelendiğinde grafit sayısının diğer numunelere göre daha fazladır. 21-11 (f) incelendiğinde ise indüksiyondan etkilenen bölge derinliğini de arttırdığı görülmüştür. Böylece hem indüksiyon gücündeki hem de işlem süresindeki artışın grafit ergimesini arttırdığı, daha homojen bir yapı oluşmasını sağladığı bulunmuştur. Chen vd. küresel dökme demire uygulanan lazer ile ergitmenin grafit çaplarının azalmasını sağladığını ve küçük çaplı grafitleri yap ettiğini ifade etmektedir. Burada yüksek ısı etkisiyle grafit yapı ergiyerek, karbona dönüşmüştür [115]. İndüksiyonla sertleştirme işleminde lazer ile ergitmede olduğu gibi yüksek ısı etkisiyle grafit nodülleri çözünmektedir.

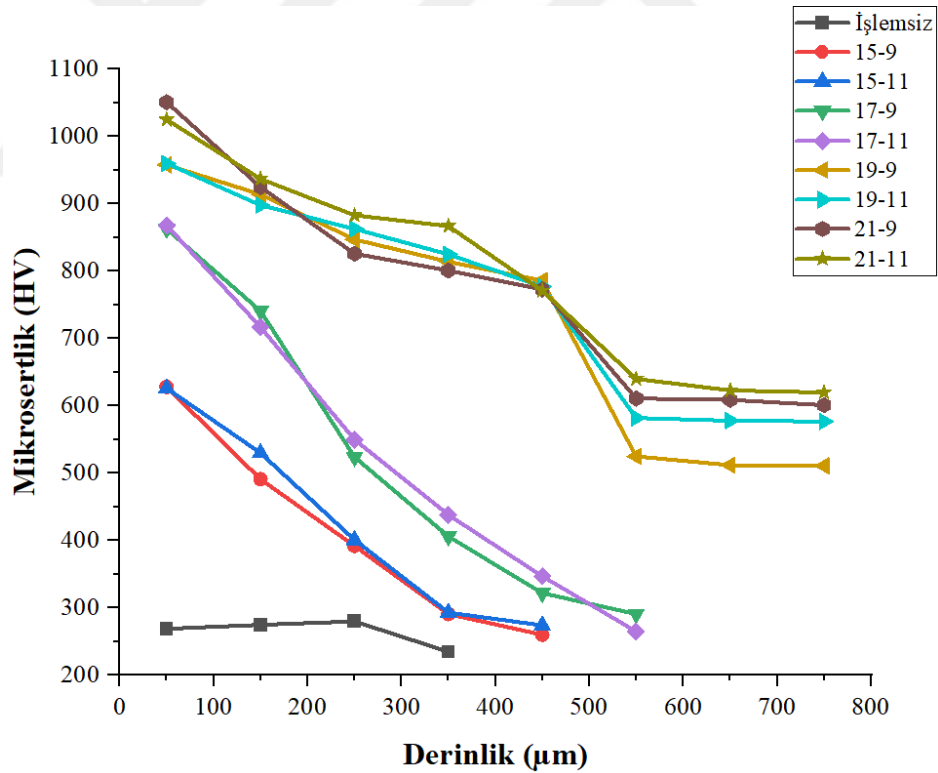
## 5.2. SERTLİK SONUÇLARI

Plazma nitrürleme uygulanan numunelerin derinliğe bağlı mikrosertlik değişimleri Şekil 5.5'te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek sertlik 592 HV<sub>0.2</sub> ile 500-4 numunesinde elde edilmiştir. En az sertlik ise işlem görmemiş numunede (235 HV<sub>0.2</sub>) görüldü. PN uygulanan numunelerde sertlik artışının 100-300 µm arasında değişen derinliklere inebildiği bulunmuştur. Bu da penetrasyon derinliğini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde sıcaklık ve PN süresi artışıyla sertlik değerleri de arttığı görülmüştür. Sertliklerin hem sıcaklığın hem de PN süresi artışı ile arttığı çeşitli çalışmalarda kanıtlanmıştır [36,47,112,116]. Riazi vd. 17-4 PH paslanmaz çeliği üzerine yaptıkları araştırmada PN'nin hem çekirdek sertliklerini hem de yüzey sertliklerini arttırdığını bulmuşlardır. Ayrıca hem sıcaklık artışının hem de PN süresi artışının sertliği büyük oranda arttırdığını kanıtlamışlardır [116]. Diğer bir çalışmada, 400-600 °C arasında 1-4 saat PN uygulanan AISI 4140 numunelerin sertlik değerlerinin sıcaklık ve işlem süresi artışı ile arttığı görülmüştür [111]. Keza Liu vd. bir nitrokarbürleme yöntemi olan QPQ (Quech-Polish-Quech) yöntemi uygulanan numunelerde her koşul için işlem süresi artışının sertliği arttırdığını bulmuştur [112].



Şekil 5.5. Plazma nitrürleme uygulanan numunelerin kesit derinliğine göre sertlik değişimleri.

İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin derinliğe bağlı mikrosertlik değişimleri Şekil 5.6'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde indüksiyonla sertleştirilmiş numunelerin hepsinin, işlem parametresi fark etmeksizin işlem görmemiş numuneden daha sert olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni indüksiyonla sertleştirmeyele beraber grafit yapılarının çözünmesi ve matristeki karbon oranının artmasıdır [114]. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin yüzey sertliklerinin üç değer aralığında yoğunlaşmaktadır. En düşük sertliklerin yaklaşık 650 HV<sub>0.2</sub> yüzey sertliği ile 15-9 ve 15-11 numunelerine aittir. Sertlik derinliği incelendiğinde de 450 µm ile en düşük derinlikler bu numunelerde görülmektedir. 17-9 ve 17-11 numuneleri ise yaklaşık 875 HV<sub>0.2</sub> yüzey sertliğine sahiptir. Bu numuneler için kasa derinlikleri ise 550 µm'ye yükselmektedir. 15 kW ve 17 kW indüksiyon gücüyle işlem uygulanan numunelerin sertlikleri incelendiğinde indüksiyon gücündeki artışın sertlikleri ve sertlik derinliklerini de arttırdığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5.6. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin kesit derinliğine göre sertlik değişimleri.

19-9 ve 19-11 numuneleri 950 HV<sub>0.2</sub> yüzey sertliğine ulaşmaktadır. Bu numunelerde diğer numunelerden farklı olarak kesitin tamamında sertleşme görülmüştür. Bu da

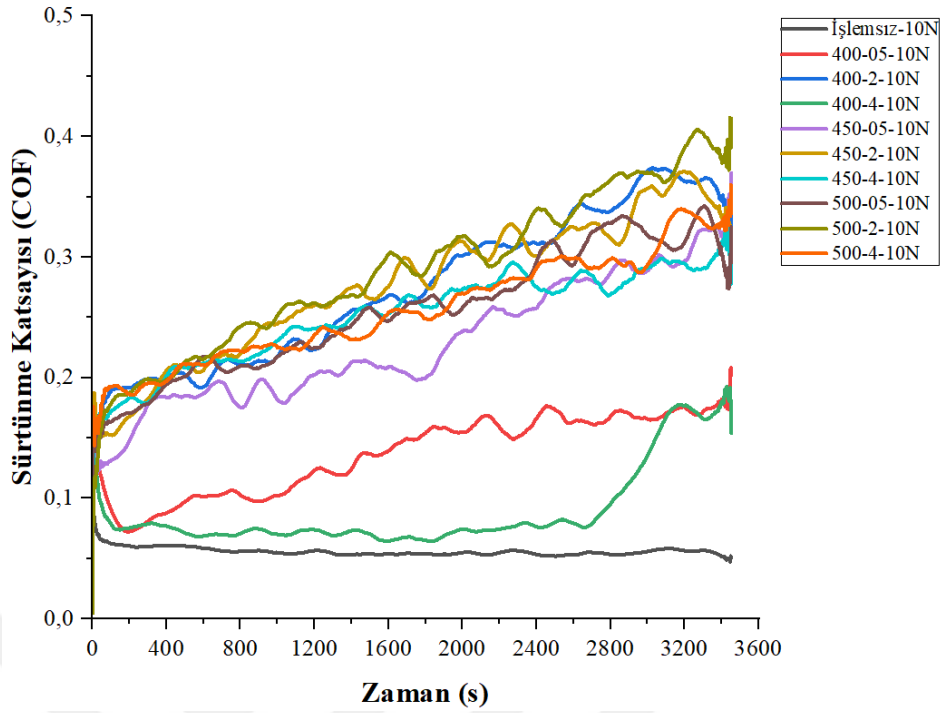
çekirdek sertleşmesi yaşandığını göstermektedir. 19-9 numunesi için çekirdek sertliği yaklaşık 500 HV<sub>0.2</sub>'iken, 19-11 numunesi için çekirdek sertliği 600 HV<sub>0.2</sub> kadardır. Bu da indüksiyon süresi artışının sertliği arttırdığını göstermektedir. 21-9 ve 21-11 numunelerinin yüzey sertliğinin 1050 HV<sub>0.2</sub> kadardır. Tüm numuneler incelendiğinde indüksiyon gücü artışının sertlik değerlerini arttırdığı açıkça görülmektedir. 21 kW güçle sertleştirilmiş numunelerde, 19 kW güçle sertleştirilmiş numunelerde olduğu gibi çekirdek sertleşmesi görülmüştür. Bu numuneler için çekirdek sertlikleri 630 HV<sub>0.2</sub> kadar olup; 21-11 numunesinin çekirdek sertliği, 21-9 numunesine göre az bir miktar daha fazla ölçülmüştür.

Samiuddin vd. tarafından yapılan çalışmada hem indüksiyon gücündeki hem de indüksiyon süresindeki artışın yüzey sertliklerini arttırdığı bulunmuştur. İndüksiyon gücündeki ve süresindeki değişim mikroyapı değişimini hızlandırmış ve arttırmıştır. Bu artışın sonucu olarak sertlik değerlerinde de artış görülmüştür [117]. Ancak indüksiyon gücü ve süresinin fazla artırılması malzemede erimeye yol açmakta ve sertlikleri düşürebilmektedir. Bu koşullarda parametrelerin optimizasyonu önemli hale gelmektedir. Palaniradja vd. AISI 4140 üzerine yaptığı çalışmada; indüksiyon parametrelerini Taguchi yöntemiyle optimizasyonunu yapmıştır [118].

### **5.3. AŞINMA DENEYLERİ SONUÇLARI**

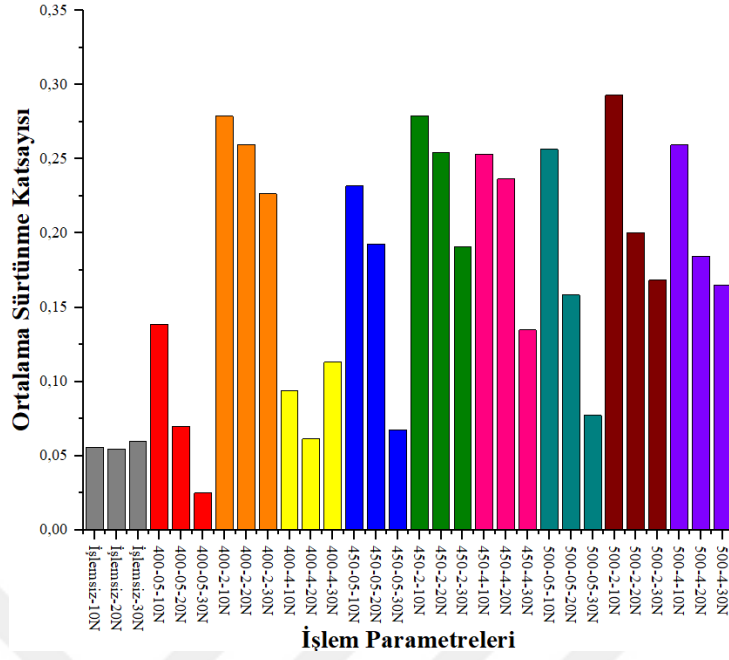
#### **5.3.1. Sürtünme Katsayısı Değişimi**

Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin 10N yükleme koşulu için zamana göre sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 5.7'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; genel olarak PN'nin sürtünme katsayısını arttırdığı belirlenmiştir. En iyi sürtünme katsayısı işlem görmeyen numunede elde edilirken, en kötü sürtünme katsayısı değerleri 500-2 ve 500-4 numunelerinde elde edilmiştir. Bu durum yüzeyde biriken nitrür tabakasının yüzey kalitesini bozmasıyla açıklanabilir [119]. Aşınma süresinin artmasıyla ise sürtünme katsayısının da arttığı görülmüştür. Bu durumun nedeni ise aşınma süresinin artmasıyla aşınmanın hızlanması, aşınma izinin genişlemesi ve temas yüzeyinin artmasıyla ilgilidir [120].

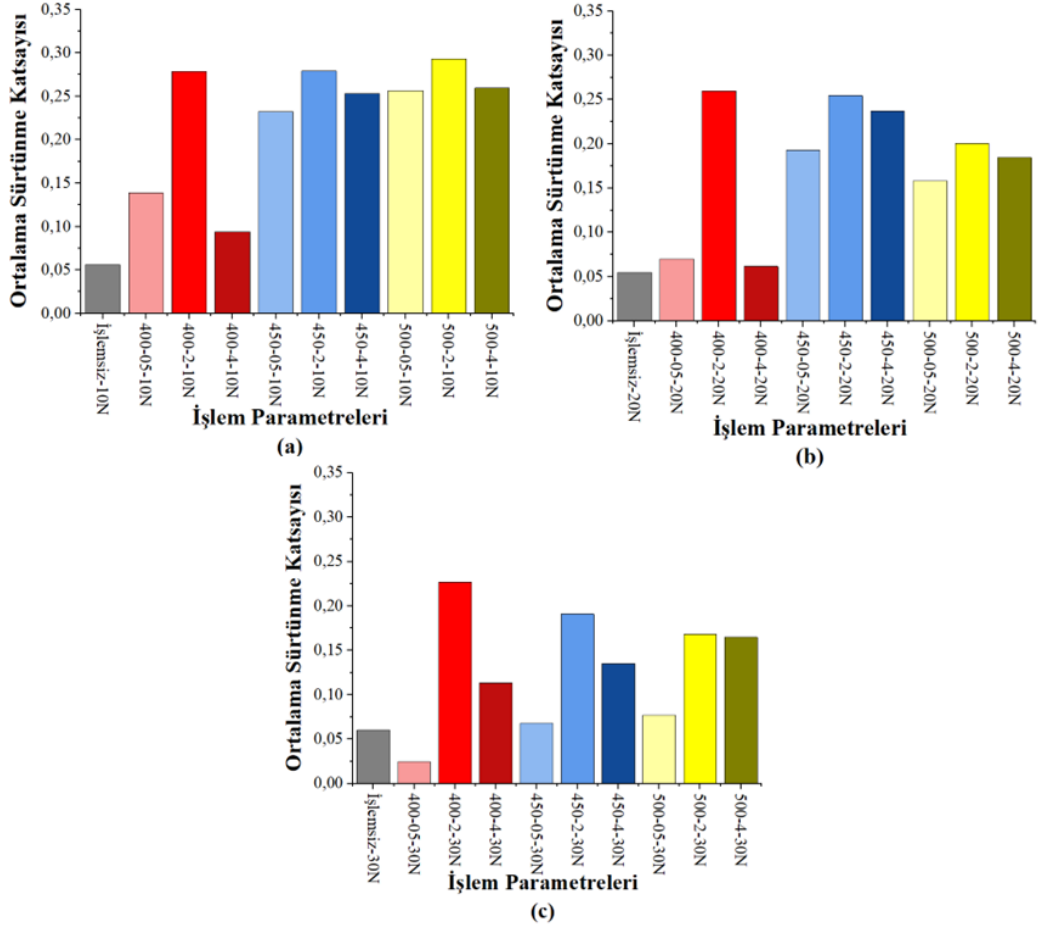


Şekil 5.7. Plazma nitrülleme uygulanan numunelerin sürtünme katsayısı değişimleri.

Şekil 5.8’de PN uygulanan numunelerin tüm şartlar için ortalama sürtünme katsayıları verilmiştir. Şekil 5.9’da ise aşınma yüküne göre sürtünme katsayıları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; genel olarak aşınma yükünün artışıyla sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür. 500-4 numunesine 10N yüküyle aşındırma uygulandığında ortalama 0,27 sürtünme katsayısı elde edilirken; 20N için bu değer 0,20’ye, 30N için ise 0,18’e düşmektedir. Yük artışıyla sürtünme katsayısında görülen bu düşüş aşınma yükünün artışıyla plastik deformasyon etkisinin artması ve aşınan yüzeylerdeki pürüzlerin düzleşerek daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesiyle ilişkilidir [120].

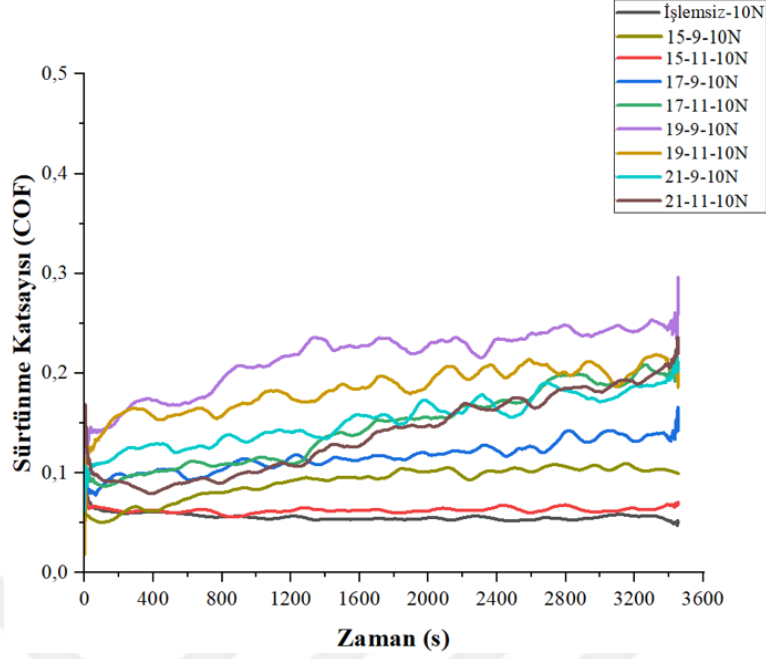


Şekil 5.8. Plazma nitrileme uygulanan numunelerin ortalama sürtünme katsayıları.

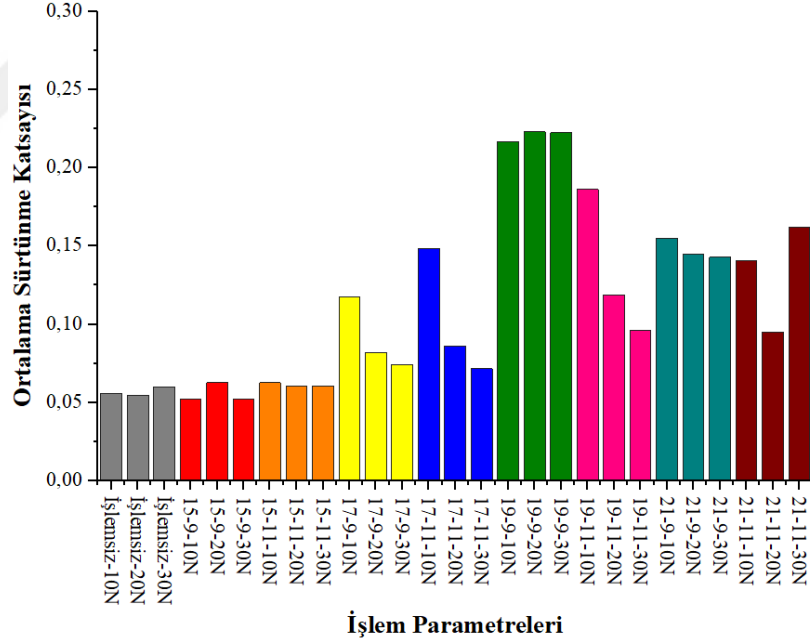


Şekil 5.9. Plazma nitrileme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre sürtünme katsayısı değişimleri.

İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma sürecindeki sürtünme katsayısı değişimleri Şekil 5.10'da verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde genel olarak indüksiyonla sertleştirmenin, PN için de olduğu gibi sürtünme katsayısını arttırdığı belirlenmiştir. En iyi sürtünme katsayısı değerleri işlem görmeyen numunede ve 15 kW indüksiyon gücü uygulanan numunelerde elde edilmiştir. 17 kW güçle indüksiyon uygulanan numunelerde sürtünme katsayısı artarken, en fazla sürtünme katsayısı değerleri 19 kW ve 21 kW güçle indüksiyon uygulanan numunelerde elde edilmiştir. İndüksiyon gücünün artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının artmasının nedeni; yüksek indüksiyon gücünün yüzeyde kısmi ergime ve deformasyonlara neden olmasıdır. Sheng vd. tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklıklara neden olan uygulamaların, sürtünme katsayısını arttırabildiği bulunmuştur [121]. Yine yapılan bir başka çalışmada indüksiyonla sertleştirilen numunelerin sürtünme katsayısının arttığı, ayrıca indüksiyon hızındaki azalışla, diğer bir ifadeyle güç yoğunluğundaki artışla birlikte sürtünme katsayısındaki artışın da arttığı ifade edilmiştir [122]. İndüksiyon sonunda uygulanan su soğutmanın etkisiyle numune yüzeyinde korozif alanlar oluşmaktadır. Yüzeylerin temizlenmesine karşın numune yüzeyinde mikro düzeyde korozyon alanları kalabilmektedir. Ayrıca sertleştirme işlemi artık gerilmelere neden olarak yüzey kalitesini ve bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir [123]. Bu da sürtünme katsayısını arttırabilmektedir. Ayrıca ani soğutmanın yüzey kalitesini bozduğu ve yüzeyde mikro çukurlar oluşturabildiği de bilinmektedir [124]. Aşınma süresinin artmasıyla ise sürtünme katsayısında da küçük artışlar görülmüştür. Bu durumun nedeni; yine PN'de olduğu gibi aşınma süresinin artmasıyla aşınmanın hızlanması, aşınma izinin genişlemesi ve temas yüzeyinin artmasıyla açıklanabilir [120,125].



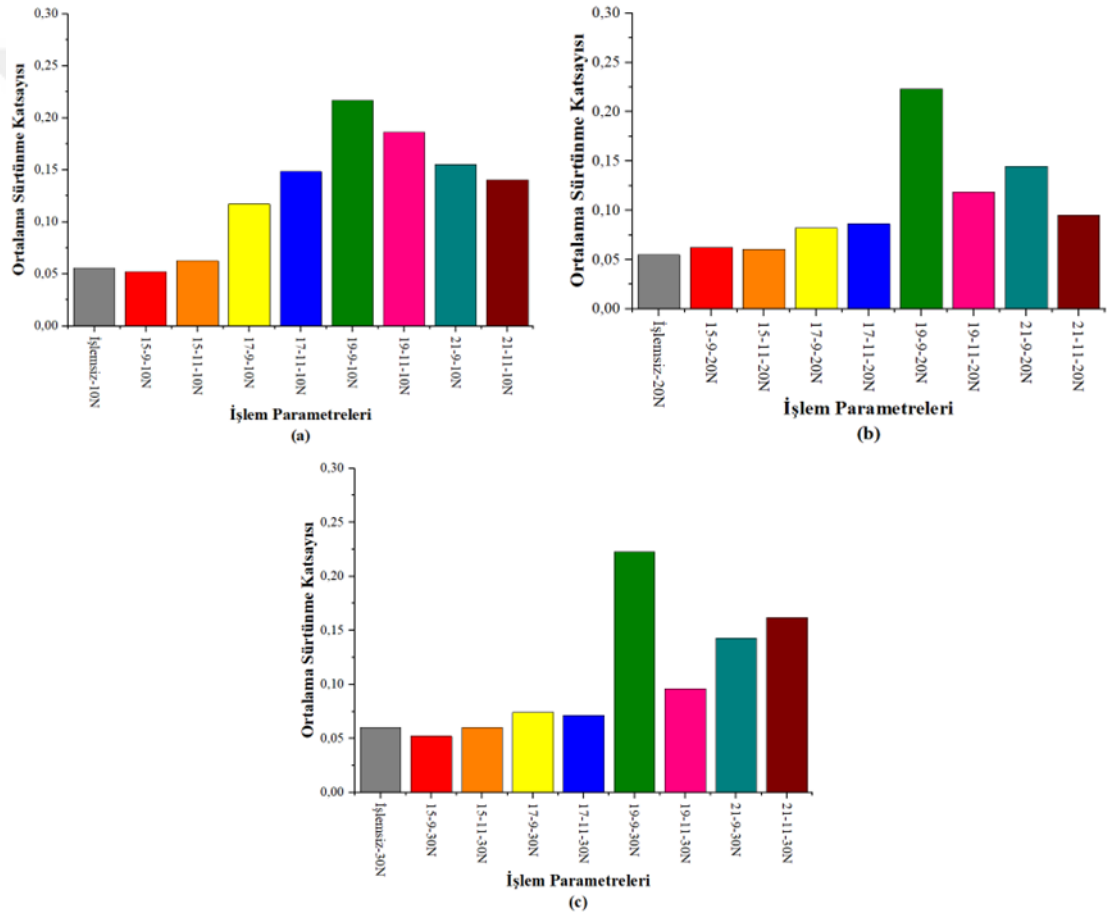
Şekil 5.10. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin sürtünme katsayısı değişimleri.



Şekil 5.11. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin ortalama sürtünme katsayıları.

Şekil 5.11’de indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin tüm şartlar için ortalama sürtünme katsayıları verilmiştir. Şekil 5.12’de ise aşınma yüküne göre sürtünme katsayıları görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde; genel olarak aşınma yükünün artışıyla sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür. 17-9 numunesine 10N yükü ile aşındırma uygulandığında ortalama 0,13 sürtünme katsayısı elde edilirken; 20N

için bu değer 0,09'ye, 30N için ise 0,07'ye düşmektedir. Yük artışıyla sürtünme katsayısında görülen bu düşüş aşınma yükünün artışına bağlı olarak plastik deformasyon etkisinin artması ve aşınan yüzeylerdeki pürüzlerin düzleşerek daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmesiyle ilişkilidir [120]. İndüksiyonla sertleştirme ile PN'ye göre daha düşük sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Bunun temel nedeni indüksiyonla sertleştirmede yüzeyde bileşik faz oluşumu olmaması, sertleştirmenin martenzitik dönüşümle sağlanmasıdır. İndüksiyon süresinin ise sürtünme katsayısı değişimi üzerinde anlamlı bir etkisi bulunamamıştır.



Şekil 5.12. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre sürtünme katsayısı değişimleri.

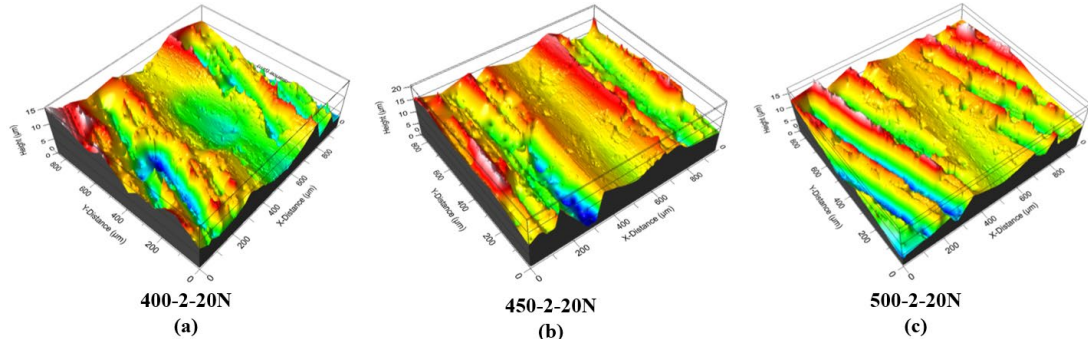
### 5.3.2. Aşınma Sonuçları

Aşınma izleri, SEM ve 3D yüzey profilometresi ile araştırıldı. Elde edilen sonuçlarla hem aşınma karakteri hem de aşınma miktarları belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar

aşınma yükü, PN parametreleri ve indüksiyonla sertleştirme parametrelerine göre değerlendirilmiştir.

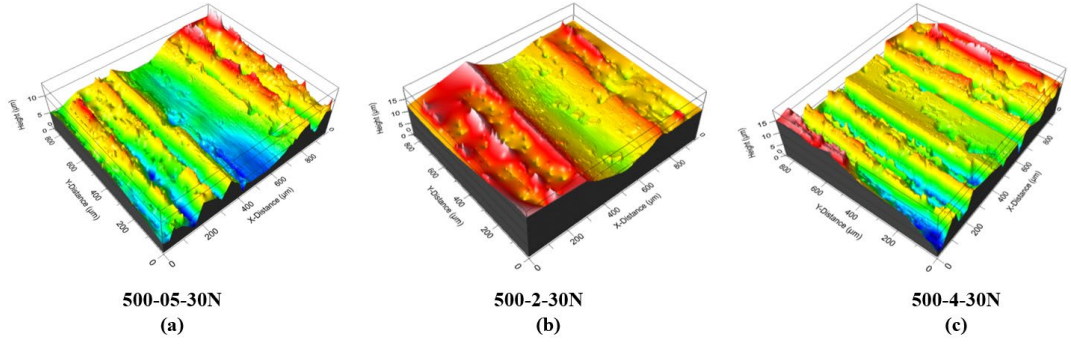
### 5.3.2.1. Plazma Nitrüleme Sonuçları

Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin ve işlem görmeyen numunelerin aşınma izlerinin 3D yüzey profilleri incelendiğinde; aynı aşınma yükleri için en fazla aşınma derinliği ve genişliğinin işlem görmeyen numunelerde görülmüştür. PN uygulanan numunelerin işlem sıcaklık artışının aşınmayı azalttığı görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda, 2 saat PN uygulanan ve 20N yüküyle aşındırılan numunelerin 3D yüzey profilleri Şekil 5.13'te görülmektedir. 400 °C'de PN uygulanan numunenin aşınma derinliğinin ve çapının 450 °C ve 500 °C'de PN uygulanan numunelerden daha fazla olduğu bulunmuştur. En az aşınma derinliği ve çapı ise 500 °C'de PN uygulanan numunede görülmüştür.



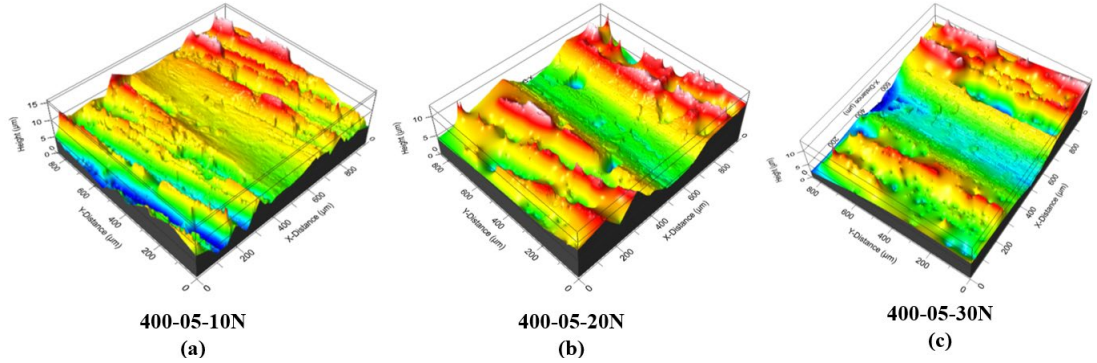
Şekil 5.13. Farklı sıcaklıklarda plazma nitrüleme uygulanan numunelerin yüzey profilleri.

Şekil 5.14'te ise PN sürelerinin eş koşullar için karşılaştırılması yapılmıştır. En fazla aşınma yarım saat PN uygulanan numunede görülmüştür. Numunede oluşan aşınma oldukça derindir. Ayrıca aşınma yüzeyine denk gelen grafit parçacıkları aşınma etkisiyle koptuğu, grafit yuvalarında derin boşluklar oluştuğu belirlenmiştir. En az aşınma ise 500 °C'de PN uygulanan numunede görülmüştür. Bu numunede işleme izleri azaldığı; dar ve derinliği az bir aşınma izi oluştuğu tespit edilmiştir. PN süresindeki artışın aşınmayı azalttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 5.14. Farklı sürelerde plazma nitrüleme uygulanan numunelerin yüzey profilleri.

Şekil 5.15'te aşınma yüküne göre yüzey profili değişimleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; aşınma yükü artışının aşınmayı arttırdığı görülmektedir. Tüm sonuçlar sertlik sonuçları ile uyumludur. Sertlik artışıyla aşınma derinliği ve genişliği azalmaktadır. Bu durum yüzeyde oluşan sert bileşik tabaka ve bu tabakanın altında yer alan difüzyon bölgesinin aşınmayı zorlaştırmasıyla açıklanabilir.

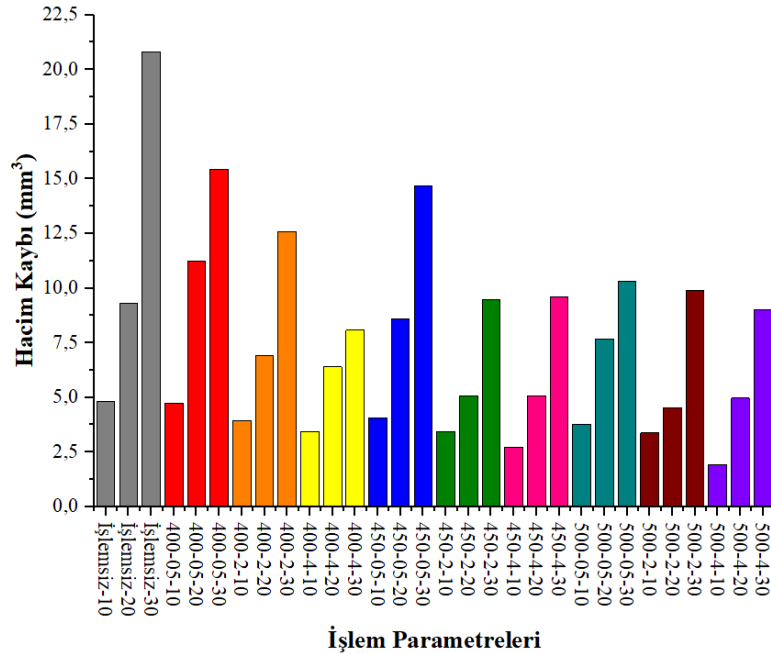


Şekil 5.15. Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre yüzey profili değişimi.

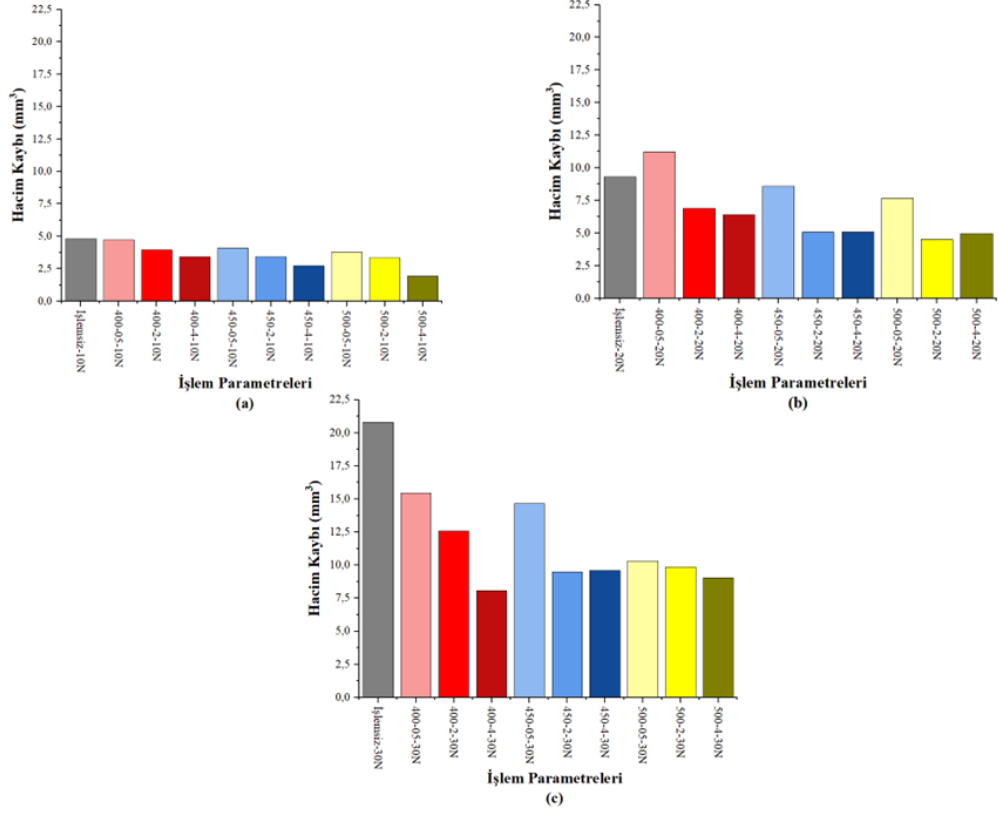
Hacim kaybı sonuçları (Şekil 5.16) incelendiğinde her yüklem koşulu için en fazla aşınan numunelerin yüzey profilometresi sonuçlarına paralel olarak, işlem görmeyen numuneler olduğu görülmüştür. Numunelere PN uygulanmasıyla aşınmaya karşı dirençleri artmaktadır. Bu durum yüzey sertliklerinin artışıyla ilişkilidir [56,126]. 400 °C'de PN uygulanan tüm numuneler için hacim kaybı PN süresinin artmasıyla giderek azalmıştır. Bu durum nitrülemeden etkilenen katman kalınlığının işlem süresi ile artmasıyla açıklanabilir. Katman kalınlığı artışı daha sert iç yapı oluşturmaktadır. Bu da aşınmayı daha zor bir hale getirmektedir. 450-05 numunesini de 400-05 numunesiyle benzer hacim kaybına uğradığı bulunmuştur. Bu durum ise 450-05

numunesi üzerinde oluşan bileşik tabaka kalınlığının ve difüzyon bölgesinin 400-05 ile benzer kalınlıkta olmasındandır. Aşındırıcı bilya her iki numune için de bileşik tabaka ve difüzyon bölgesini kolaylıkla aşındırmış ve çekirdek bölgesine ulaşmıştır. 500-05 numunesinde ise sıcaklık artışının etkiyle daha kalın bir bileşik tabaka ve difüzyon bölgesi oluştuğu görülmüştür. 4 saat PN uygulanan numuneler ile 450-2 ve 500-4 numunelerinin aşınma kayıplarının birbirine benzer olduğu belirlenmiştir. Bu durum bileşik tabakanın ve difüzyon bölgesinin kalınlığının artmasıyla aşınmanın çekirdek bölgesine ulaşamamasıyla ilişkilidir.

Sonuçlar genel olarak incelendiğinde ise hem sıcaklık hem de işlem süresindeki artışla hacim kaybı azalmaktadır. Sonuçlar sertlik sonuçlarıyla da paralellikler göstermektedir. Ali vd. tarafından çalışmada PN uygulanan ve uygulanmayan Ti-6Al-4V numunelerin aşınma performansları karşılaştırıldığında PN'nin hacim kaybını azaltarak aşınma performansını iyileştirdiği bulunmuştur. Ayrıca PN süresindeki artışın yine hacim kaybını azaltarak, sertlik artışıyla beraber aşınma performansını iyileştirdiği ifade edilmiştir [127]. Şekil 5.17'de ise aşınma yüküne göre hacim kaybındaki değişimler görülmektedir. Aşınma yükü artışıyla ise her koşul için hacim kaybı artmaktadır. Bu durum normal kuvvetin artışına bağlı olarak, temas yüzeyi basıncının da artmasıyla ilişkilidir [113].

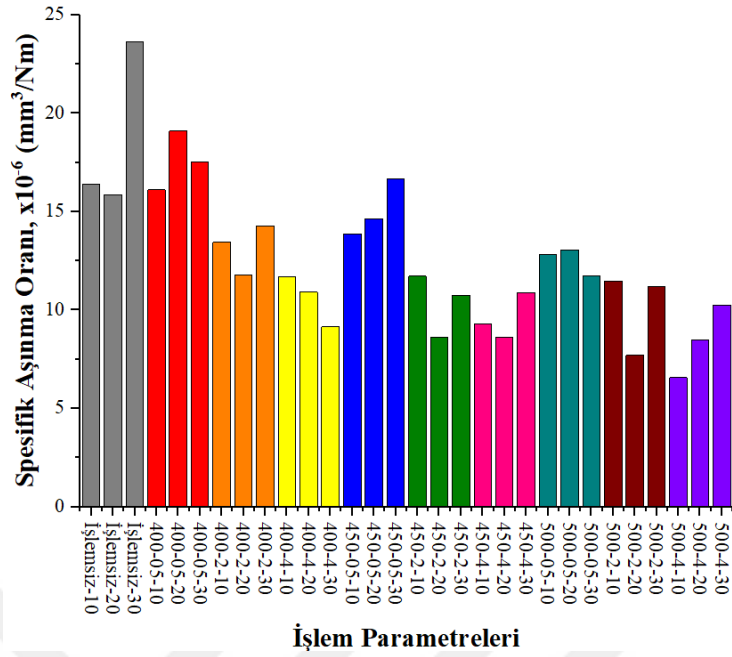


Şekil 5.16. Plazma nitrülleme uygulanan numunelerin hacim kayıpları.



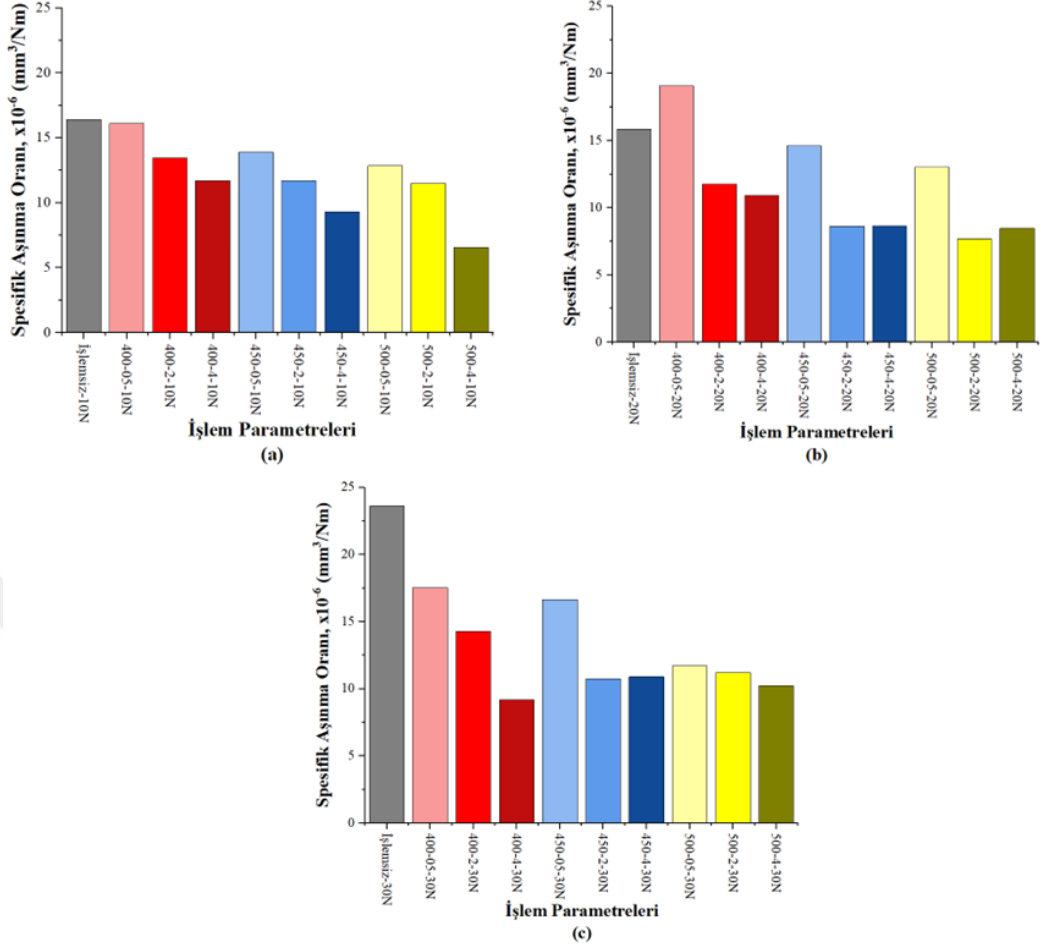
Şekil 5.17. Plazma nitrürleme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre hacim kaybı değişimleri.

Spesifik aşınma oranı sonuçları (Şekil 5.18) incelendiğinde en fazla aşınma oranına sahip numunelerin, işlem görmemiş numuneler olduğu görülmüştür. 30 dakika PN uygulanan numunelerde aşınma oranının işlem görmeyen numunelerden daha az olduğu; fakat diğer numunelerden daha fazla olduğu bulundu. Bu durumun nedeni çok ince oluşan bileşik tabakanın kolayca aşınması ve aşındırıcı bilyanın daha az sertlikte olan alt tabakalara daha kolay ulaşmasıdır.



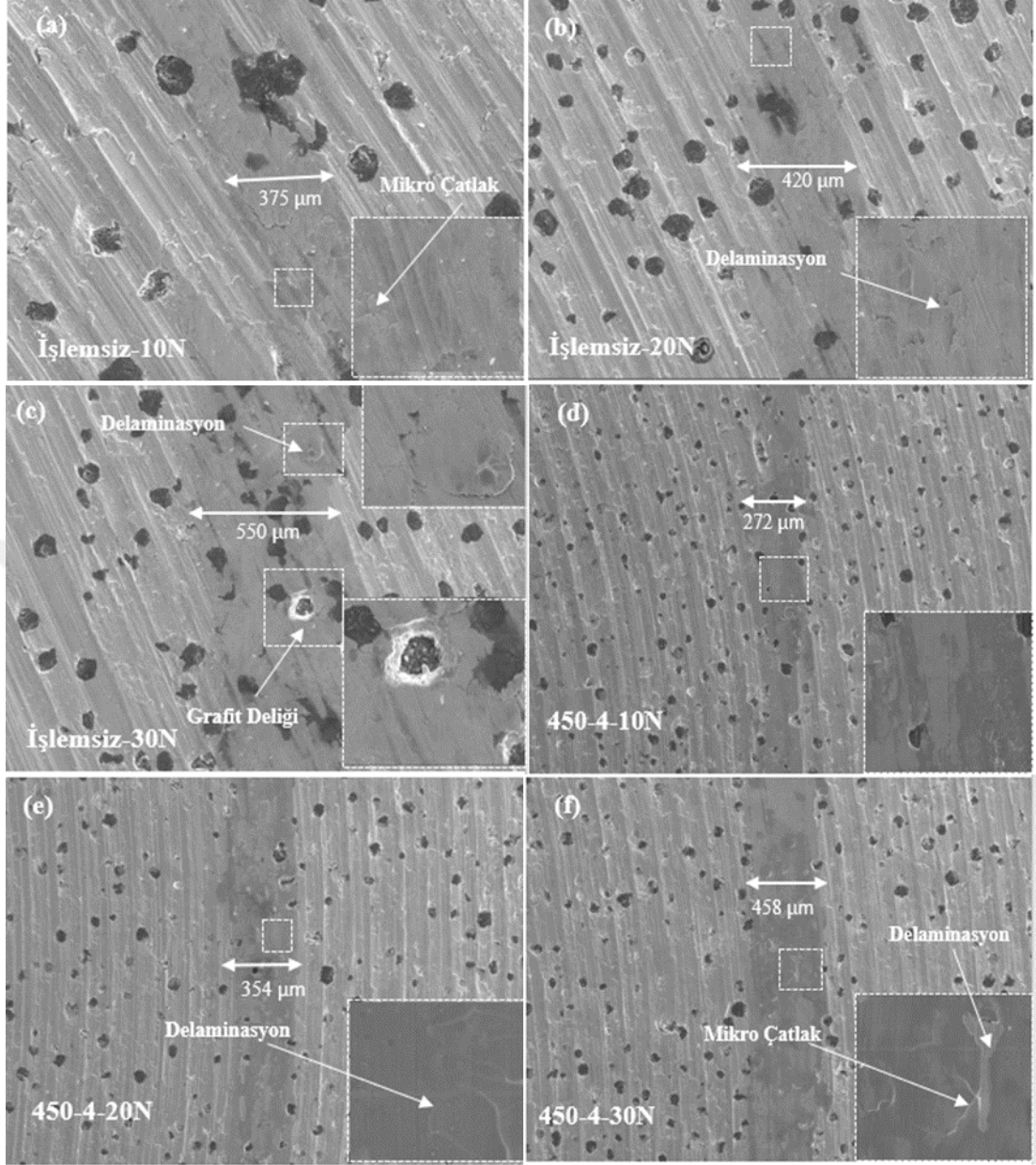
Şekil 5.18. Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin spesifik aşınma oranları.

Şekil 5.19’da aşınma yüklerine göre aşınma oranı değişim grafikleri görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde aynı sürelerde PN uygulanan numuneler için sıcaklık artışının aşınma oranını azalttığı belirlendi. Sıcaklık artışıyla bileşik tabaka ve difüzyon bölgesinin kalınlığının artması bu durumu ortaya çıkarabilir. Daha sert olan bu bölgeler aşınmayı zorlaştırdığı ve aşınma oranını düşürdüğü söylenebilir. Aynı sıcaklıktaki PN uygulanan numunelerde ise PN süresindeki artışın aşınma oranını azalttığı bulundu. Bu durumun temel nedeni yine nitrüleme etkisiyle sertleşen katman kalınlığının artması ve aşınmanın zorlaşmasıdır. Hem sıcaklık hem de PN süresinin yüksek olduğu durumlarda, eş yükleme koşulları için aşınma oranı sonuçları birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu durum aşınma derinliğinin sertleşen bölge içinde kalması ve çekirdek bölgesine ulaşamamasıyla ilgilidir. Aşınma oranı sonuçları genel olarak incelendiğinde aşınma oranı azalışının yüzey ve alt katmanlarının setliğiyle paralel olarak değiştiği görüldü. Bu durum daha önce yapılmış çalışmalarla uyumludur [128,129].



Şekil 5.19. Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre spesifik aşınma oranları.

Yüzey sertliğindeki artışın aşınma direncini arttırdığı bilinmektedir. Ancak sertlik artışıyla birlikte kırılabilirlik de artmaktadır. Ayrıca sertliğin artması aşınan yüzey alanını da azaltmaktadır [120]. Şekil 5.20 incelendiğinde aşınma izi genişliğinin işlem görmeyen numunede en fazla olduğu görülmektedir. Aşınma izi genişlikleri 3D profillerden ve ImageJ yazılımı yardımıyla SEM görüntüleri üzerinden hesaplanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde deformasyon miktarının yine işlem görmeyen numunede en fazla olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca aşınma davranışının yaygın olarak plastik deformasyon şeklinde olduğu ve delaminasyonlar (soyulmalar, kavlamalar) görüldüğü bulunmuştur. PN uygulanan numunelerde ise sertlik artışının etkisiyle aşınma izi genişliği ve deformasyonlar azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.20. Plazma nitrüleme uygulanan numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri.

Aşınma çatlakları ve deformasyonların grafitlerin çevresinde (Şekil 5.20 (c)) yoğunlaştığı görülmektedir. Grafit yapıları bazı bölgelerde kopmuş ve bu boşluklar çevresinde deformasyonlar daha artmıştır. Aşınma yükünün artışıyla temas basıncı artmış ve her koşul için deformasyon da artmıştır. 10N aşınma yükü uygulanan işlem görmeyen numunede aşınma mikro çatlaklarının oluştuğu, bu mikro çatlakların birleşerek delaminasyon oluşturduğu görüldü. 20N ve 30N aşınma yüklerinde ise yük artışıyla delaminasyon alanının arttığı görülmüştür. PN uygulanan numunede 10N aşınma yükü uygulandığında (Şekil 5.20 (d)) mikro çatlak oluşumunun kısıtlı kaldığı,

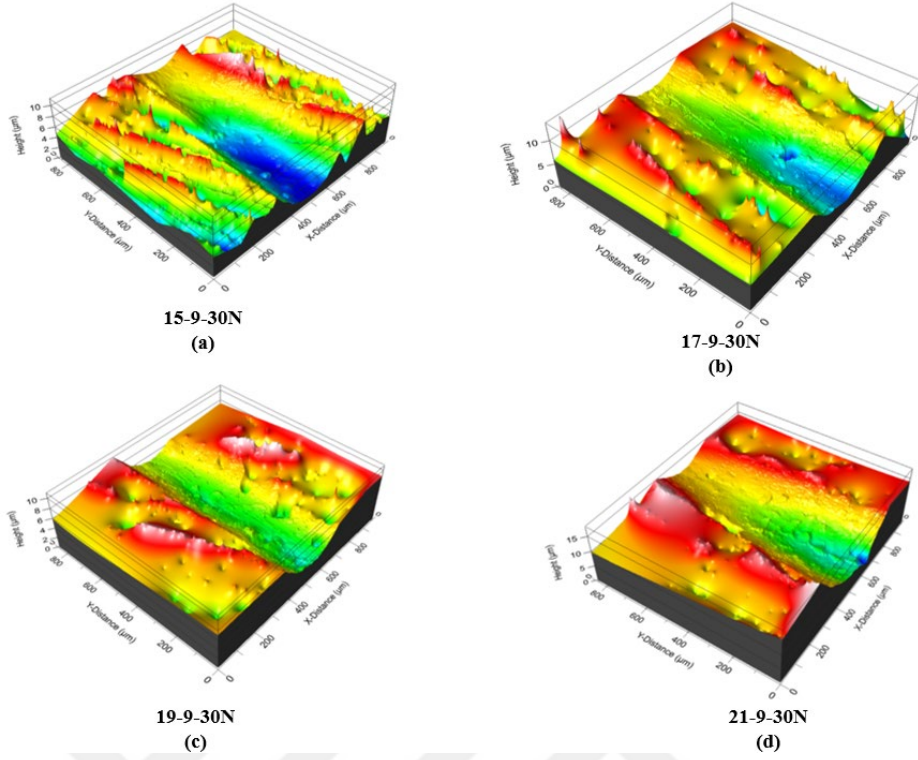
20N aşınma yükü uygulandığında (Şekil 5.20 (e)) delaminasyon başlangıcı olduğu, 30N aşınma yükü uygulandığında ise (Şekil 5.20 (f)) kısmi delaminasyonlara rastlanmıştır. Ayrıca delaminasyonların çevresinde mikro çatlak oluşumlarının arttığı gözlemlendi. PN uygulanan numunelerde delaminasyon aşınması daha yaygın olarak görüldü. PN'nin yüzeyde oluşturduğu sert tabakanın etkisiyle aşınma genişliği azalmıştır. Aşınma genişliğinin azalması temas yüzeyinin de azalması anlamına gelmektedir. Temas yüzeyinin azalmasıyla aşındırıcı bilyanın aşınma yüzeyine uyguladığı temas yüzey basıncı göreceli olarak artmıştır. Temas yüzey basıncının artmasıyla delaminasyonların da arttırmaktadır. Ayrıca sertlik artışı kırılma artışı da beraberinde getirmektedir. Kara vd. soğuk iş takım çelikleri üzerine yaptığı araştırmada temas yüzey basıncının ve sertliğe bağlı kırılmanın artmasının delaminasyonu arttırdığını ifade etmişlerdir [120].

### **5.3.2.2. İndüksiyonla Sertleştirme Sonuçları**

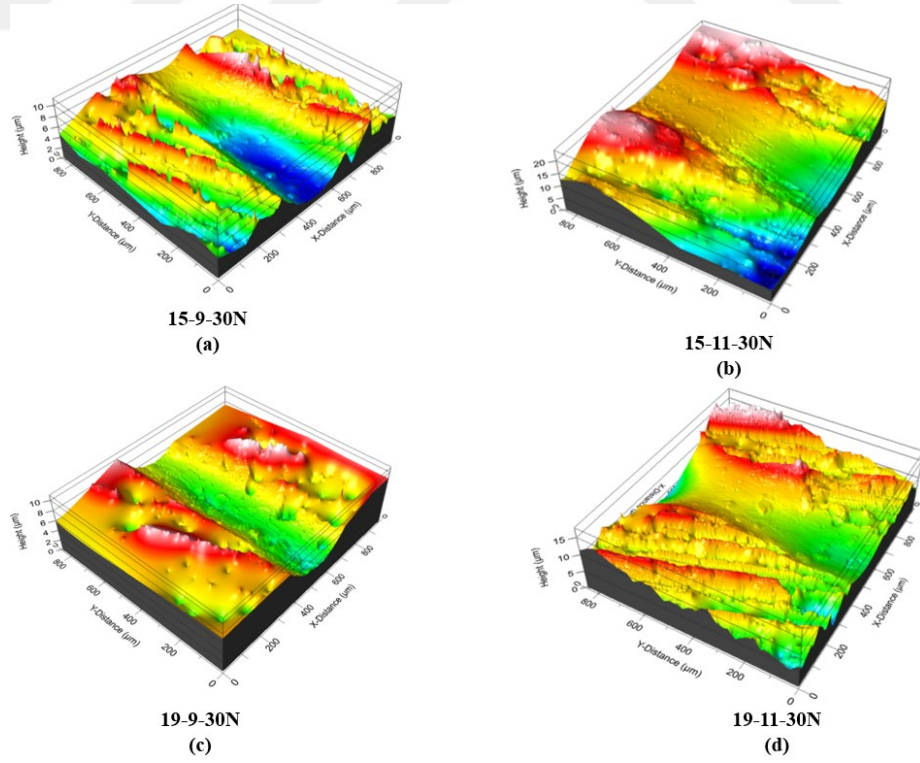
İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin ve işlem görmeyen numunelerin aşınma izlerinin 3D yüzey profilleri incelendiğinde; aynı aşınma yükleri için en fazla aşınma derinliği ve genişliği işlem görmeyen numunelerde bulundu. İndüksiyonla sertleştirmenin de PN'de olduğu gibi aşınmayı azaltıcı etkisi olduğu görülmüştür.

Şekil 5.21'de 9 saniye indüksiyon süresi ve 30N aşındırma yüklemesi koşulları için indüksiyon gücüne göre aşınma profilindeki değişimler görülmektedir. Buna göre en fazla aşınma derinliği ve genişliği 15 kW güçle indüksiyon uygulanan numunede görüldü. En az aşınma derinliği ve genişliği ise 21 kW güçle indüksiyon uygulanan numunede elde edilmiştir. Eş koşullar için indüksiyon gücü artışının aşınma derinliğini ve genişliğini azalttığı görülmektedir.

Şekil 5.22'de ise indüksiyon süresinin aşınma performansına etkisi gösterilmektedir. 30N aşındırma yüklemesi altında hem 15 kW hem de 19 kW güçle indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin yüzey profilleri incelendiğinde; indüksiyon süresindeki artış, aşınma derinliğini azalttığı bulunmuştur.

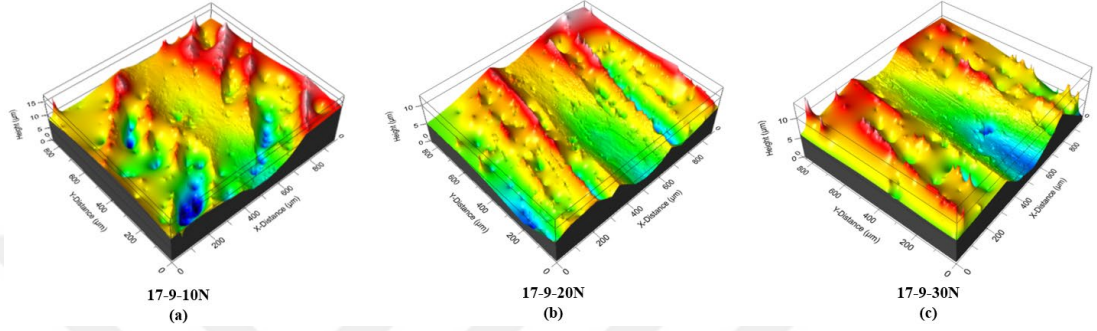


Şekil 5.21. Farklı indüksiyon güçleri uygulanan numunelerin yüzey profilleri.

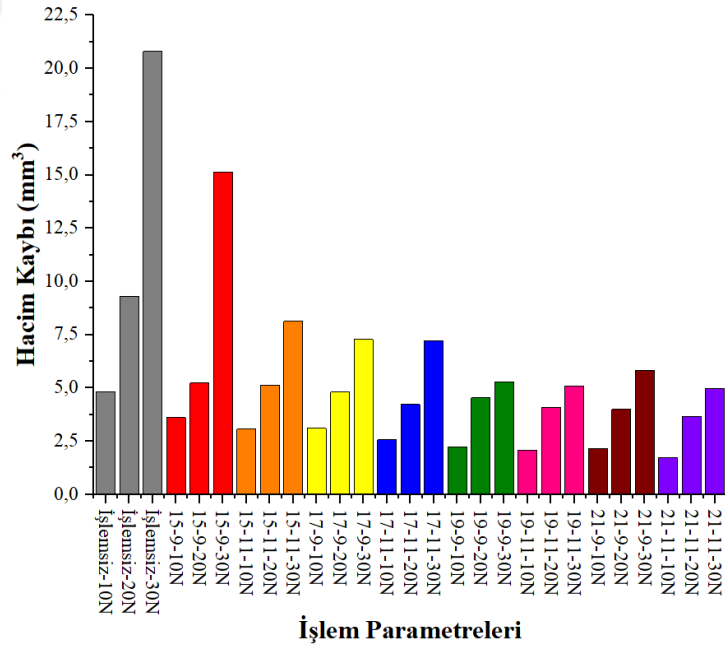


Şekil 5.22. Farklı indüksiyon süreleri uygulanan numunelerin yüzey profilleri.

Şekil 5.23'te, 17-9 numunesinin aşınma yükü değişiminin yüzey profili üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; aşınma yükündeki artış yüzeydeki tepeleri, çukurları ve bozuklukları azaltmaktadır. Yükün artmasıyla temas basıncı da artmakta, aşınma hızlanmaktadır. Böylece daha derin ve geniş aşınma izleri oluşmaktadır.



Şekil 5.23. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre yüzey profili değişimi.

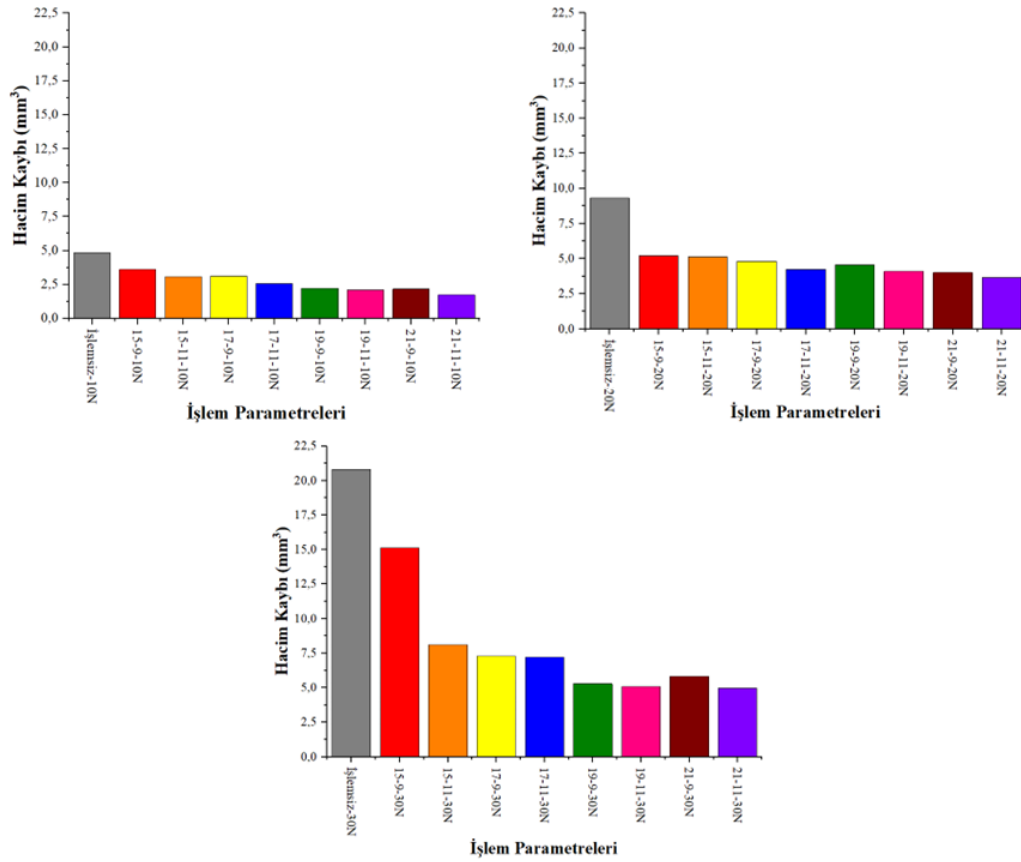


Şekil 5.24. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin hacim kayıpları.

Hacim kaybı sonuçları (Şekil 5.24) incelendiğinde her koşul için en fazla aşınan numunelerin PN'de de olduğu gibi, yükleme koşulu fark etmeksizin işlem görmeyen numuneler olduğu görülmüştür. 30N aşınma yükü koşulu için işlem görmemiş

numunede yaklaşık 22 mm<sup>3</sup> hacim kaybı yaşanırken; indüksiyonla sertleştirilen numuneler için bu değer kademeli olarak azaldığı belirlendi. 30N yükleme için 21-11 numunesinin hacim kaybı 5 mm<sup>3</sup>'ten daha azdır. Bu da indüksiyonla sertleştirme ile aşınma hacminde dört kattan fazla azalma sağlanabildiğini göstermektedir. Bu iyileşme numunelere indüksiyonla sertleştirme uygulanmasıyla iç yapıdaki grafitlerin çözünmesi, matristeki karbon oranındaki artış; buna bağlı olarak yüzey ve iç bölgelerdeki sertliklerdeki artış ile açıklanabilir [114]. Ayrıca aşınma yükündeki artış hacim kaybını da arttırmaktadır. Yük artışıyla temas yüzeyi basıncı artmakta, aşınma kolaylaşmaktadır [130].

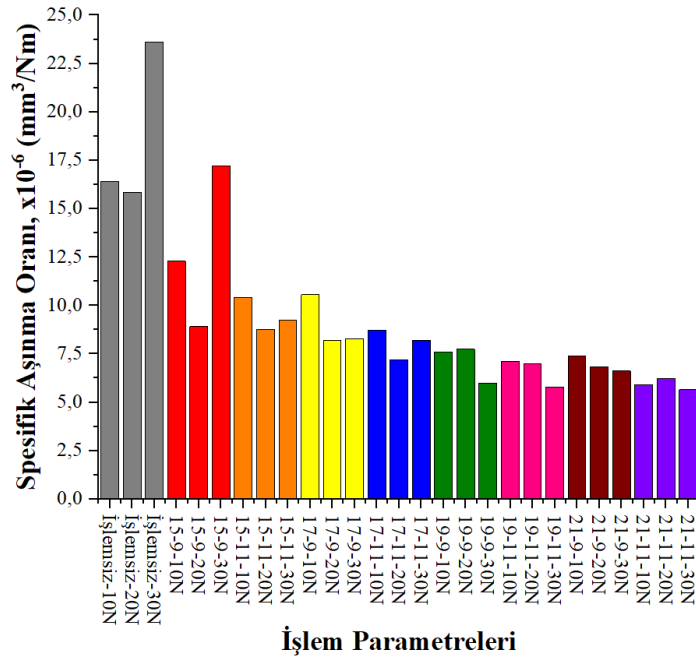
Şekil 5.25 incelediğinde ise indüksiyon gücündeki ve indüksiyon süresindeki artışla aşınma zorlaştığı ve hacim kayıpları azaldığı görülmektedir. Hem güçteki hem de süredeki artış indüksiyon yoğunluğunu arttırmıştır. İndüksiyon yoğunluğundaki artış grafit çözünmesini arttırmış, dolayısıyla sertliği de arttırmıştır. Bu da aşınmayı zorlaştırmıştır.



Şekil 5.25. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre hacim kaybı değişimleri.

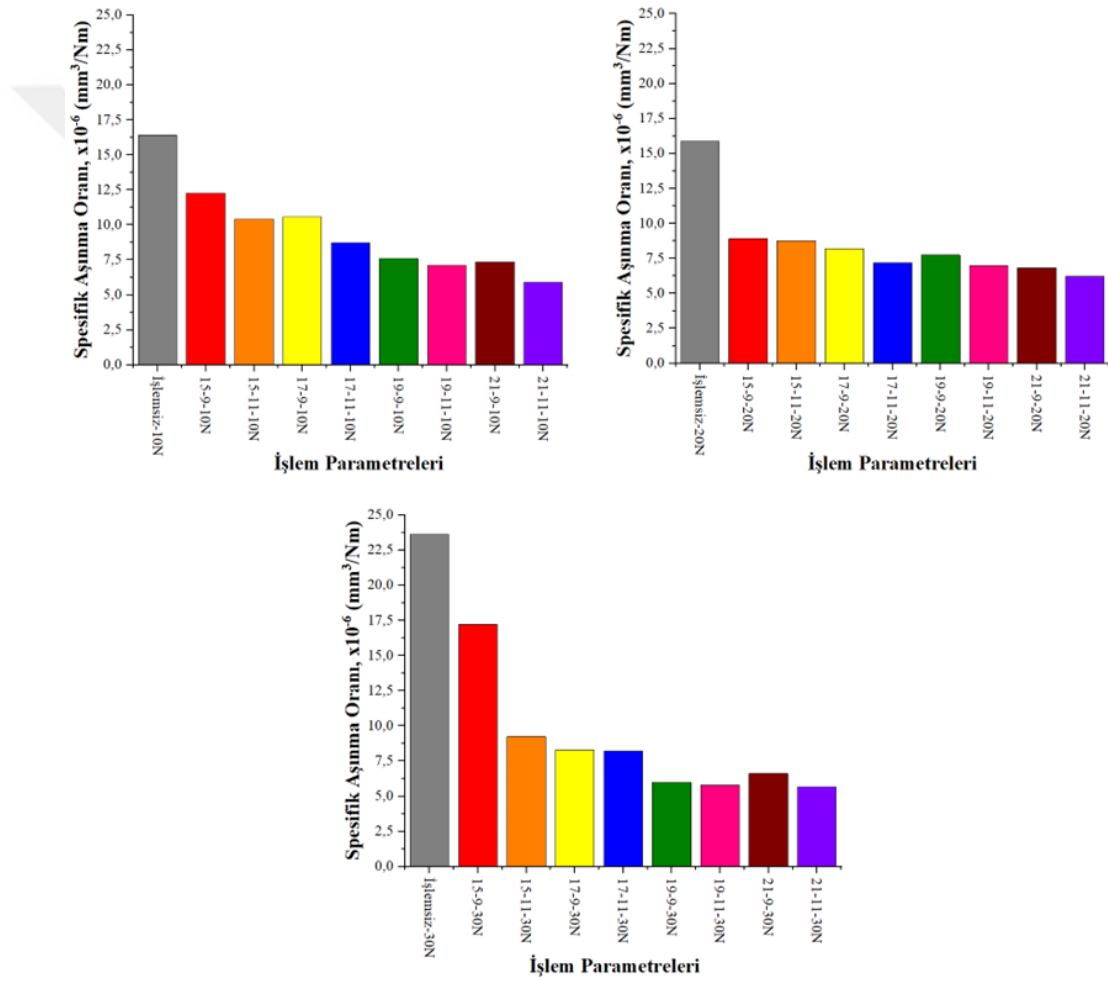
Aynı yükleme koşulları için indüksiyonla sertleştirilen numunelerin hacim kayıpları 30N yüklemeye aşındırmaya tabii tutulan 15-9 numunesi dışında orantılı olarak azalmaktadır. 15-9 numunesinin hacim kaybı ise diğer numunelerle karşılaştırıldığında oldukça fazladır. Bu farklılaşmasının temel nedeni sertlik derinliğinin az oluşu ve çekirdek sertleşmesinin yaşanmamasıdır. Bu numunede aşındırıcı bilya sertleşen tabakayı tamamen aşındırmış ve daha yumuşak olan çekirdek bölgesine ulaşmıştır.

Totik vd., indüksiyonla sertleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin kuru aşınma performansını araştırdıkları çalışmada; indüksiyon süresinin artırılmasıyla yüzey sertliğinin ve sertlik derinliğinin arttığını bulmuşlardır. Sertlik artışına bağlı olarak aşınma miktarı da azalmıştır [131]. Aswad vd. ise indüksiyonla sertleştirmede yüzey sertliğinin güç yoğunluğuna bağlı olduğunu bulmuştur. İndüksiyon hızı ve yoğunluğunun artmasıyla sıcaklık da artmaktadır ve sıcaklık artış miktarı mikroyapıyı etkilemektedir [132]. Benzer olarak Karaca vd. GGG60'ın öztemperlemesi sonrası uygulanan indüksiyonun yüzey sertliğini arttırdığını bulmuşlardır. Ayrıca numunelerde çekirdek sertleşmesi de görülmüştür. Numuneler aşınmaya tabii tutulduklarında ise öztemperleme sonrasında indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin daha iyi aşınma performansı gösterdiği bulunmuştur [133].



Şekil 5.26. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin spesifik aşınma oranları.

Spesifik aşınma oranı sonuçları (Şekil 5.26) incelendiğinde en fazla aşınma oranına sahip numunelerin, işlem görmemiş numuneler olduğu görülmüştür. Aşınma oranlarının sertliklere paralel olarak indüksiyon gücü ve süresi arttıkça azaldığı bulunmuştur. Yine hacim kaybı sonuçlarında da olduğu gibi 30N aşınma yüklemesi uygulanan 15-9 numunesinin diğer indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerden daha yüksek bir spesifik aşınma oranına sahiptir. Bunun nedeni aşınmanın sertleşen tabakaları aşarak daha yumuşak çekirdek bölgesine ulaşmasıdır.



Şekil 5.27. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre spesifik aşınma oranları.

Şekil 5.27’de indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma yüküne göre spesifik aşınma oranı değişim grafikleri görülmektedir. Sonuçlar incelendiğinde aynı sürelerde indüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler için sıcaklık artışının aşınma

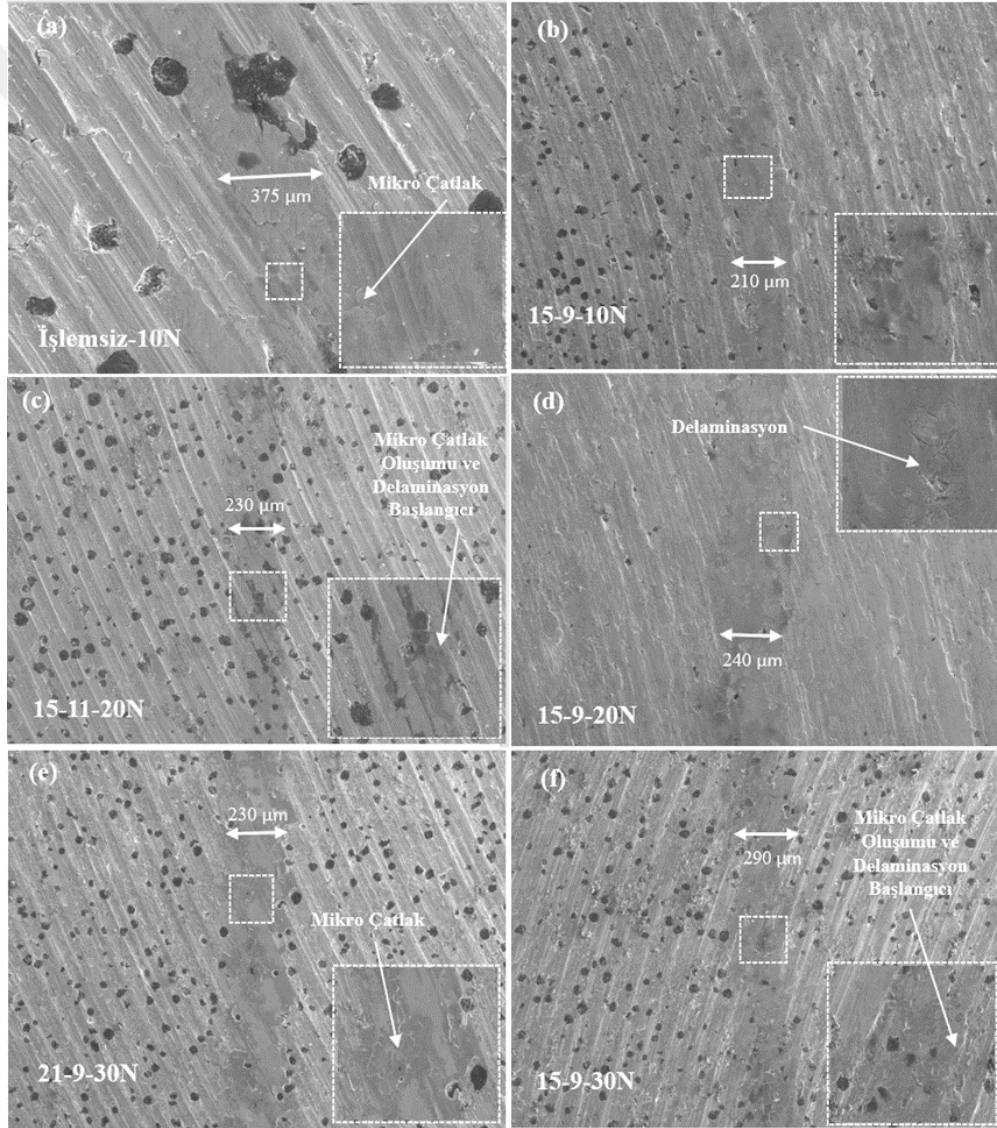
oranını genel olarak azalttığı belirlenmiştir. Daha sert olan bu bölgeler aşınmayı zorlaştırmış ve aşınma oranını düşürmüştür. Aynı güçte indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerde ise indüksiyon süresindeki artışın aşınma oranını azalttığı bulunmuştur. Bu durumun temel nedeni yine indüksiyon yoğunluğundaki artışla sertliğin de artması ve aşınmanın zorlaşmasıdır. İndüksiyon gücünün yüksek olduğu durumlarda, eş yükleme koşulları için aşınma oranı sonuçları birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu durum PN sonuçlarında da olduğu gibi, aşınma derinliğinin sertleşen bölge içinde kalması ve çekirdek bölgesine ulaşamamasıyla ilgilidir. Aşınma oranı sonuçları genel olarak incelendiğinde aşınma oranı azalışının yüzey ve alt katmanlarının sertliğiyle paralel olarak değiştiği görülmüştür.

Sonuçlara paralel olarak, indüksiyonla nokta sertleştirme uygulanan gri dökme demirlerin aşınma performansları üzerine bir araştırmada indüksiyon yoğunluğundaki azalmanın sertliği azalttığı ve aşınma oranını arttırdığı bulunmuştur [134]. Yine diğer bir çalışmada farklı sürelerde indüksiyonla sertleştirme uygulanan AISI 4140'ın aşınma performansının araştırıldı. Elde edilen sonuçlara göre; indüksiyon süresindeki artış aşınma oranını düşürmektedir [131].

Şekil 5.28'de indüksiyonla sertleştirilmiş numunelerin aşınma izlerinin SEM görüntüleri görülmektedir. Aşınma izi genişlikleri yine 3D profillerden ve ImageJ yazılımı yardımıyla SEM görüntüleri üzerinden alındı. İşlem görmeyen numunelerde en az aşınma 10N aşınma yükü ile elde edilmiştir. Bu durum için iz genişliği 375  $\mu\text{m}$  kadardır (Şekil 5.28 (a)). Yüzeyde mikro çatlaklar ve delaminasyonların olduğu görülmüştür. İndüksiyonla sertleştirme numunelerinin iz genişlikleri incelendiği zaman indüksiyon şartları ve yükleme koşulu fark etmeksizin daha az iz genişlikleri oluşmaktadır. Ayrıca aşınan yüzeylerde mikro çatlak oluşumu, deformasyonlar ve delaminasyonlar azalmaktadır. 10N aşınma yükü uygulanan 15-9 numunesinin aşınma iz genişliği (Şekil 5.28 (b)) ise 210  $\mu\text{m}$ 'ye düşmekte, mikro çatlaklar azalmaktadır. Bu da indüksiyonla sertleştirmenin aşınmayı azalttığını göstermektedir [122,124,131]. 20N aşınma yükü uygulanan 15-9 (Şekil 5.28 (c)) numunesinde ise aşınma genişliği 240  $\mu\text{m}$ 'ye çıkmaktadır. Benzer biçimde 30N aşınma yükü uygulanan 15-9 (Şekil 5.28 (f)) numunesinin iz genişliği ise 290  $\mu\text{m}$ 'ye yükselmektedir. Aynı numune için aşınma

yükü arttıkça iz genişliği de artmaktadır. Bu da aşınma yükündeki artışın aşınmayı arttırdığının ve hızlandığının bir başka kanıtıdır.

20N aşınma yükü uygulanan 15-9 ve 15-11 numuneleri (Şekil 5.28 (c) ve (d)) incelendiğinde; iz genişliğinin 15-11 numunesinde daha az olduğu bulundu. Ayrıca bu numunedeki mikro çatlak ve deformasyon oluşumu daha azdır. Bu da indüksiyon süresindeki artışın aşınmayı azalttığını göstermektedir [131]. Azalış süre artışıyla indüksiyon derinliğinin, dolayısıyla sertliklerin artışıyla açıklanabilir [31]. Sonuçlar sertlik ve aşınma hacim kaybı sonuçlarını destekler niteliktedir.



Şekil 5.28. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin aşınma izi SEM görüntüleri.

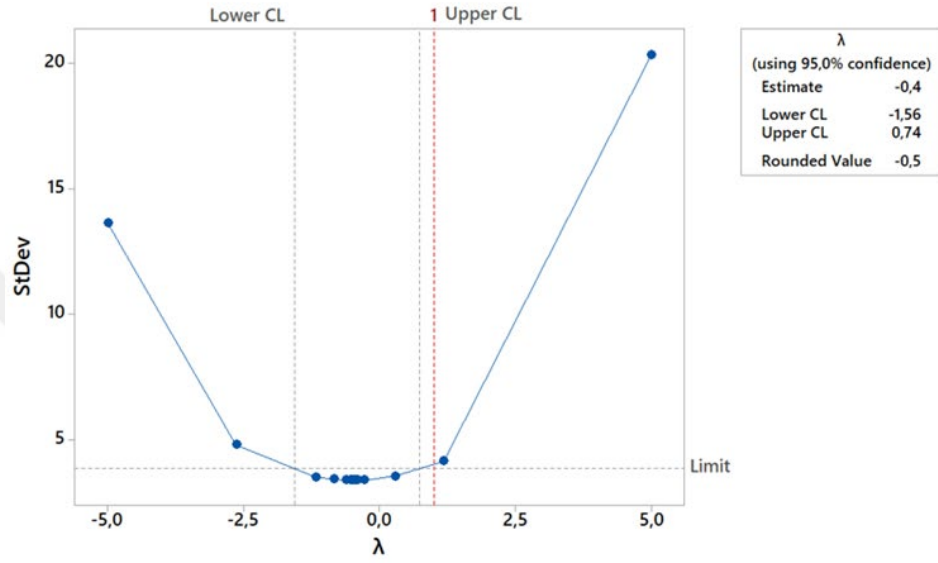
İndüksiyon gücündeki artış aşınma izi genişliğini, dolayısıyla aşınma miktarını azaltmaktadır. 30N yükleme için 21-9 numunesinin iz genişliği 230  $\mu\text{m}$  kadardır (Şekil 5.28 (e)). Aynı aşınma yükü ve indüksiyon süresi koşulları uygulanan 15-9 numunesinin iz genişliği ise 290  $\mu\text{m}$ 'dir. İndüksiyon gücü arttıkça aşınma iz genişliği ve hacim kaybı azalmaktadır [132]. Bununla birlikte aşınan yüzeylerdeki çatlak oluşumları ve deformasyonlarda da ciddi azalmalar görüldü. Cao vd. indüksiyonla sertleştirilmiş GCr15'in aşınma performansını inceledikleri çalışmalarında indüksiyonla sertleştirilenin aşınma direncini iyileştirdiğini bulmuşlardır. Ayrıca aşınma yükü artışıyla kaba aşınma ve pullanmanın arttığını ifade etmişlerdir [130]. Slatter vd. yaptıkları çalışmada indüksiyonla sertleştirilmiş grafitli demirin darbeli aşınma direncini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda 2 mm derinliğe kadar sertleştirilen numunelerin, sertliklerinde artışla beraber yara genişlikleri ve derinliklerinde azalmalar, dolayısıyla aşınma dirençlerinde iyileşmeler görüldü. Fakat 3 mm derinliğe kadar sertleştirilen numunelerde kısmen yara genişliği ve derinliğinde artışlarda oluşmaktadır. Mikro yapı incelemelerinde bunun nedeni indüksiyon yoğunluğundaki aşırı artış ile martenzitik tane boyutu büyümesi olarak bulundu [31]. Yapılan çalışma ile literatür uyumludur. İndüksiyon aşırı yoğunluğundaki artış yüzey kalitesini bozmakta, tane yapısını değiştirmekte ve daha düşük dayanımlara ve mali kayıplara neden olmaktadır [31,124]. İndüksiyon işlem parametrelerinin optimizasyonunun yapılması kayıpların önüne geçilebilmesi adına önemlidir.

## **5.4. OPTİMİZASYON SONUÇLARI**

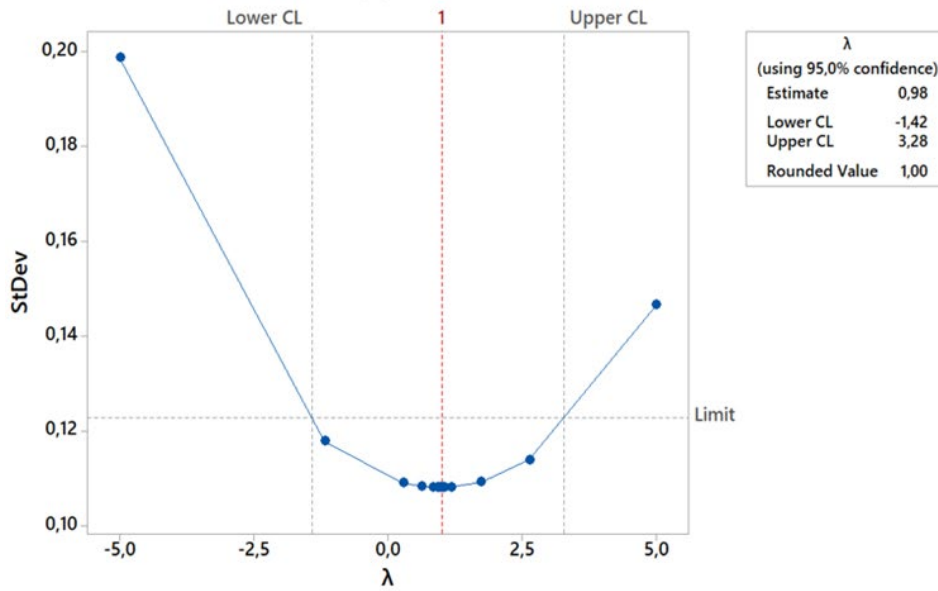
### **5.4.1. Plazma Nitürleme İşlem Parametrelerinin Optimizasyon Sonuçları**

Optimizasyon işlemi PN sıcaklığı, işlem süresi ve aşınma yükü değişiminin; hacim kaybı ve spesifik aşınma oranına etkisini belirlemek amacıyla yapıldı. Optimizasyon işleminde kullanılan deney tasarımı ve değişkenler Çizelge 5.2'de verildi. Değişkenliklerin etki oranları ve anlamlılıkları ANOVA ile analiz edildi. Model oluşturulurken %95 ( $p>0,05$ ) güven aralığından küçük değerler istatistiksel olarak anlamsız olduğu değerlendirildi. RSM modellemesinde bir faktörün model üzerinde etkili olduğunun kabul edilmesi için p değerinin 0,05'ten küçük olması gerekmektedir [135,136]. Regresyon analizleri incelenmesi sonucunda hacim kaybı için

modellemenin sonuçları temsil edebilme yeteneğini ifade eden “true scale,  $\lambda$ ” değeri üst ve alt sınır değerlerinin dışında kalmaktadır. Bu değer  $\lambda=1$ ’e ne kadar yakın olursa modelleme ile o kadar gerçeğe yakın değerler elde edilmektedir.  $\lambda$  değerini gerçek değerlere yaklaştırabilmek amacıyla hacim kaybı sonuçlarına Box-Cox dönüşümü yapıldı. Dönüşüm öncesi ve sonrası  $\lambda$  değerleri Şekil 5.29’da görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 5.29. Hacim kaybı için  $\lambda$  değerinin Box-Cox dönüşümü öncesi (a) ve dönüşümden sonraki değişimi (b).

Box-Cox dönüşümü öncesi  $\lambda = -0,4$  iken dönüşüm sonrası  $\lambda = 0,98$  olmuştur. Spesifik aşınma oranı için ise  $\lambda = 1$  alt ve üst sınırların içinde olduğu için transformasyona ihtiyaç duyulmamıştır.

Çizelge 5.2. Plazma nitrürleme RSM deney tasarımı ve girdi parametreleri.

Test No	A	B	C	Sıcaklık (°C)	İşlem Süresi (Saat)	Aşınma Yükü (N)	Hacim Kaybı (mm <sup>3</sup> )	Spesifik Aşınma Oranı ((10 <sup>-6</sup> mm <sup>3</sup> )/Nm)
1	-1	0	-1	400	2	10	3,948	13,45
2	0	0	0	450	2	20	5,0646	8,63
3	0	-1	1	450	0,5	30	14,664	16,65
4	0	0	0	450	2	20	5,0646	8,63
5	-1	-1	0	400	0,5	20	11,214	19,10
6	1	-1	0	500	0,5	20	7,662	13,05
7	0	-1	-1	450	0,5	10	4,0746	13,88
8	0	1	-1	450	4	10	2,7312	9,30
9	-1	0	1	400	2	30	12,582	14,29
10	1	0	1	500	2	30	9,876	11,21
11	0	0	0	450	2	20	5,0646	8,63
12	-1	1	0	400	4	20	6,408	10,91
13	0	1	1	450	4	30	9,6	10,90
14	1	1	0	500	4	20	4,968	8,46
15	1	0	-1	500	2	10	3,3672	11,47

Hacim kaybı için ANOVA sonuçları Çizelge 5.3'te verildi. Çizelge 5.3 incelendiğinde PN sıcaklığının, işlem süresinin ve aşınma yükünün modellemeye etkili olduğu görüldü. Dağılım ve F değerlerine göre hacim için en etkili parametre %70,66 ile aşınma yüküdür. Aşınma yükü artışı temas basıncını arttırmıştır, basınç artışıyla plastik deformasyonda artmış ve aşınmada hızlanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'yi doğrular niteliktedir. Sıcaklığın hacim kaybı üzerindeki etkisi %11,55 iken PN işlem süresinin hacim kaybı üzerine etkisi %4,46 hesaplandı.

Çizelge 5.3. Plazma nitrüleme hacim kaybı ANOVA sonuçları.

Hacim Kaybı (mm <sup>3</sup> )					
	DF	Seq SS	F Değeri	Dağılım (%)	P Değeri
<b>Model</b>	9	186,371	62,73	99,12	0,000
<b>Lineer</b>	3	163,143	161,16	86,77	0,000
<b>A-Sıcaklık</b>	1	8,567	23,98	4,46	0,004
<b>B-İşlem Süresi</b>	1	21,723	73,24	11,55	0,000
<b>C-Aşınma Yüğü</b>	1	132,853	386,25	70,66	0,000
<b>Kareler</b>	3	17,99	18,17	9,57	0,004
<b>A<sup>2</sup></b>	1	2,874	13,22	1,53	0,015
<b>B<sup>2</sup></b>	1	8,957	30,52	4,76	0,003
<b>C<sup>2</sup></b>	1	6,159	18,66	3,28	0,008
<b>2- Yönlü Etkileşim</b>	3	5,237	5,29	2,79	0,052
<b>A*B</b>	1	0,98	2,97	0,52	0,145
<b>A*C</b>	1	1,129	3,42	0,60	0,124
<b>B*C</b>	1	3,128	9,48	1,66	0,028
<b>Hata</b>	5	1,65	---	0,88	---
<b>Toplam</b>	14	188,022	---	100	---

Spesifik aşınma oranı için ANOVA sonuçları Çizelge 5.4'te verildi. Spesifik aşınma oranı üzerinde en etkili parametre %42,85 ile PN süresi olarak bulundu. Sıcaklığın spesifik aşınma oranı üzerindeki etkisi %16,28 olarak hesaplandı. Aşınma yükünün spesifik aşınma oranı üzerindeki etkisi ise %2,17'dir.

Çizelge 5.4. Plazma nitrüleme spesifik aşınma oranı ANOVA sonuçları.

Spesifik Aşınma Oranı (x10 <sup>-6</sup> (mm <sup>3</sup> /Nm))					
	DF	Seq SS	F Değeri	Dağılım (%)	P Değeri
<b>Model</b>	9	136,444	16,38	96,72	0,003
<b>Lineer</b>	3	86,470	32,68	61,29	0,001
<b>A-Sıcaklık</b>	1	22,960	22,87	16,28	0,005
<b>B-İşlem Süresi</b>	1	60,448	72,05	42,85	0,000
<b>C-Aşınma Yüğü</b>	1	3,062	3,11	2,17	0,138
<b>Kareler</b>	3	46,695	16,82	33,10	0,005
<b>A<sup>2</sup></b>	1	11,702	17,39	8,29	0,009
<b>B<sup>2</sup></b>	1	21,799	26,29	15,45	0,004
<b>C<sup>2</sup></b>	1	13,195	14,25	9,35	0,013
<b>2- Yönlü Etkileşim</b>	3	3,279	1,18	2,32	0,405
<b>A*B</b>	1	2,778	3,00	1,97	0,144
<b>A*C</b>	1	0,299	0,32	0,21	0,594
<b>B*C</b>	1	0,202	0,22	0,14	0,660
<b>Hata</b>	5	4,628	---	3,28	---
<b>Toplam</b>	14	141,073	---	100	---

Çizelge 5.5. Model detayları.

	S	R <sup>2</sup> (%)	Adj. R <sup>2</sup> (%)	Pred. R <sup>2</sup> (%)
<b>Hacim Kaybı (mm<sup>3</sup>)</b>	0,5745	99,12	97,54	85,96
<b>Spesifik Aşınma Oranı ((10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>)/Nm)</b>	0,9621	96,72	90,81	47,31

Modelin R<sup>2</sup> değerleri (Çizelge 5.5) hacim kaybı için %99,12 iken, spesifik aşınma oranı için %96.72'dir. Modelin tahmin yeteneği ise (Adj. R<sup>2</sup>) hacim kaybı için %85,96 iken, spesifik aşınma oranı için %47,31 olarak hesaplandı. RSM tarafından oluşturulan hacim kaybı tahmin denklemi Eşitlik 5.1'de, spesifik aşınma oranı tahmin denklemi ise Eşitlik 5.2'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Hacim Kaybı} = & 97,9 - 0,403xA - 5,01xB + 0,476xC + 0,000435xA^2 \\ & + 0,553xB^2 + 0,01292xC^2 + 0,00563xAxB - 0,001063xAxC \\ & - 0,0503xBxC \end{aligned} \quad (5.1)$$

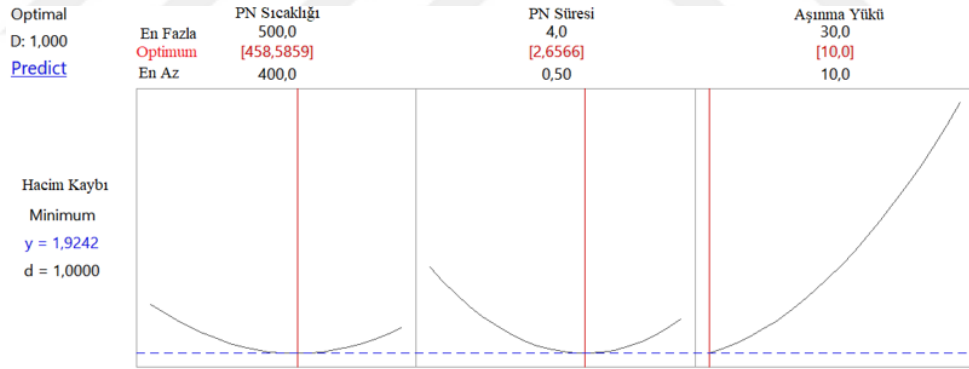
$$\begin{aligned} \text{Spesifik Aşınma Oranı} = & 210,5 - 0,795*A - 9,53xB - 0,421xC \\ & + 0,000835xA^2 + 0,860xB^2 + 0,01890xC^2 \\ & + 0,00948xAxB - 0,000547xAxC - 0,0128xBxC \end{aligned} \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.1 kullanılarak daha önce ölçümleri yapılan 500-4 numunesinin 30N aşınma yükü altındaki hacim kaybı 9,21 mm<sup>3</sup> olarak hesaplandı. 500-4 için deneysel yöntemlerle bulunan değer ise 9,024 mm<sup>3</sup>'tür. Bu durumda oluşturulan model %2,11 gibi küçük bir hata ile sonucu tahmin edebilmektedir. Eşitlik 5.2 kullanılarak hesaplanan 500-4 numunesinin 30N aşınma yükü altındaki spesifik aşınma oranı ise 10,246 (10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>)/Nm'dir. Aynı şartlar için deneysel yöntemlerle bulunan değer ise 11,1836 (10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>)/Nm'dir. Spesifik aşınma oranı için hata %9.14'tür. Model üzerinden oluşturulan tahminlerle deneysel yöntemlerle bulunan değerler birbirlerine oldukça yakındır. Bu da güçlü bir model oluşturulduğunu ve bu modelleme sayesinde RSM ile optimizasyonun temel amacı olan az miktarda yapılan deneyle en iyi sonuçların elde edilebileceği kanıtlanmıştır.

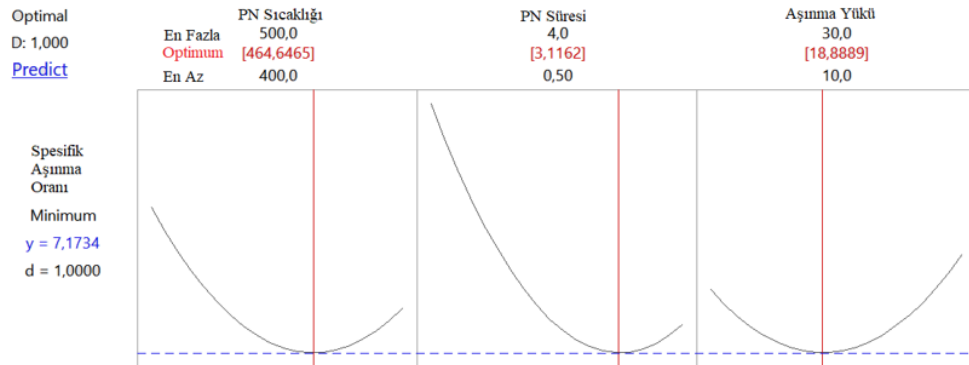
Çizelge 5.6. Plazma nitrüleme optimizasyon sonuçları.

	Sıcaklık (°C)	İşlem Süresi (Saat)	Aşınma Yükü (N)
<b>Hacim Kaybı için Optimizasyon Sonuçları</b>			
Optimum parametreler	459	2,66	10
10N aşınma yükü için optimum parametreler	459	2,66	10
20N aşınma yükü için optimum parametreler	468	3,05	20
30N aşınma yükü için optimum parametreler	478	3,47	30
<b>Spesifik Aşınma Oranı için Optimizasyon Sonuçları</b>			
Optimum parametreler	465	3,12	18,89
10N aşınma yükü için optimum parametreler	462	3,08	10
20N aşınma yükü için optimum parametreler	465	3,12	20
30N aşınma yükü için optimum parametreler	468	3,19	30

Optimizasyon sonuçları incelendiğinde (Çizelge 5.6) en az hacim kaybının 459 °C’de, 2,66 saat PN uygulanan numunelere 10N normal yük altında elde edildiği görüldü. Hacim kaybı için optimizasyon eğrileri Şekil 5.30 (a)’da görülmektedir. Normal yükün azalmasıyla hacim kaybının azalması temas basıncındaki azalmanın doğal bir sonudur. Temas basıncının azalması aşınma etkisini de en aza indirmektedir. Özellikle PN süresinin 2,66 saattin yukarısına çıkmaması 10N’lik aşınma yükü altındaki bilyanın nitrürlemeden etkilenen ve sertleşen katmanları aşındıramadığını ve çekirdek bölgesine ulaşmadığını göstermektedir. Aşınma yükü 20N’ye çıktığında en az hacim kaybının 468 °C ve 3,05 saat PN süresi koşullarına çıktığı görüldü. Bu durum aşınma yükü artışıyla aşınmanın derinleşmesi ve hızlanmasıyla açıklanabilir. Aşınma yükü 30N çıkarıldığında ise en az hacim kaybının 478 °C’de 3,47 saat PN uygulanmasıyla elde edildiği bulundu. Bu durum yine aşınmanın, aşınma yükü artışıyla artmasıyla ilişkilidir. PN sıcaklığının ve süresinin artışı hem sertliği hem de nitrasyon derinliğini arttırmaktadır. Bu durum aşınmayı zorlaştırmakta ve daha az hacim kaybı sağlamaktadır.



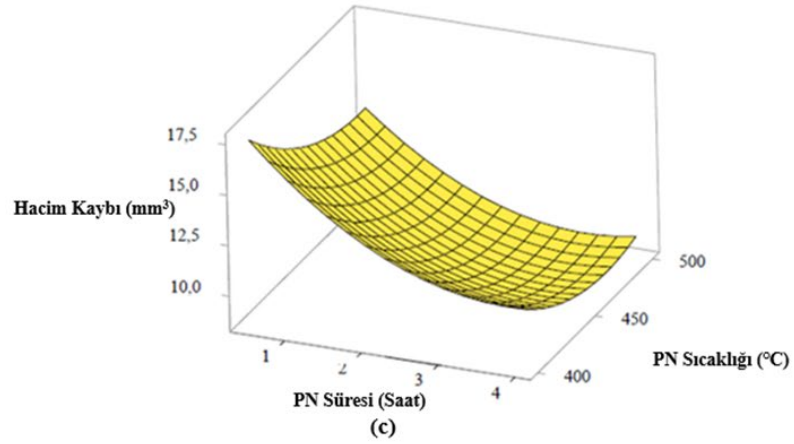
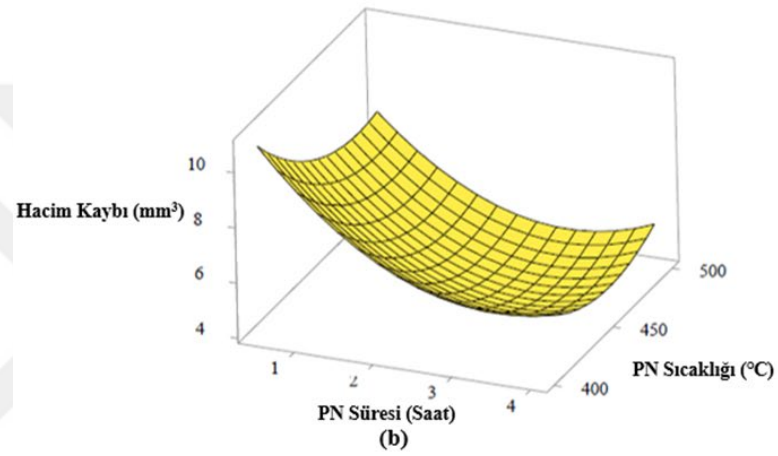
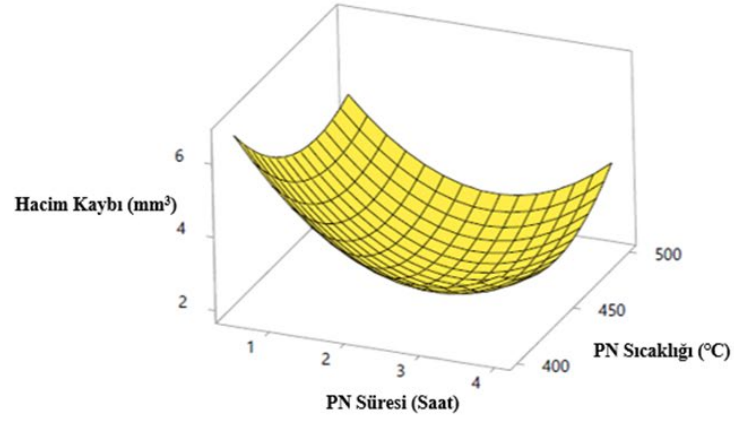
(a)



(b)

Şekil 5.30. Plazma nitrürleme optimizasyon eğrileri.

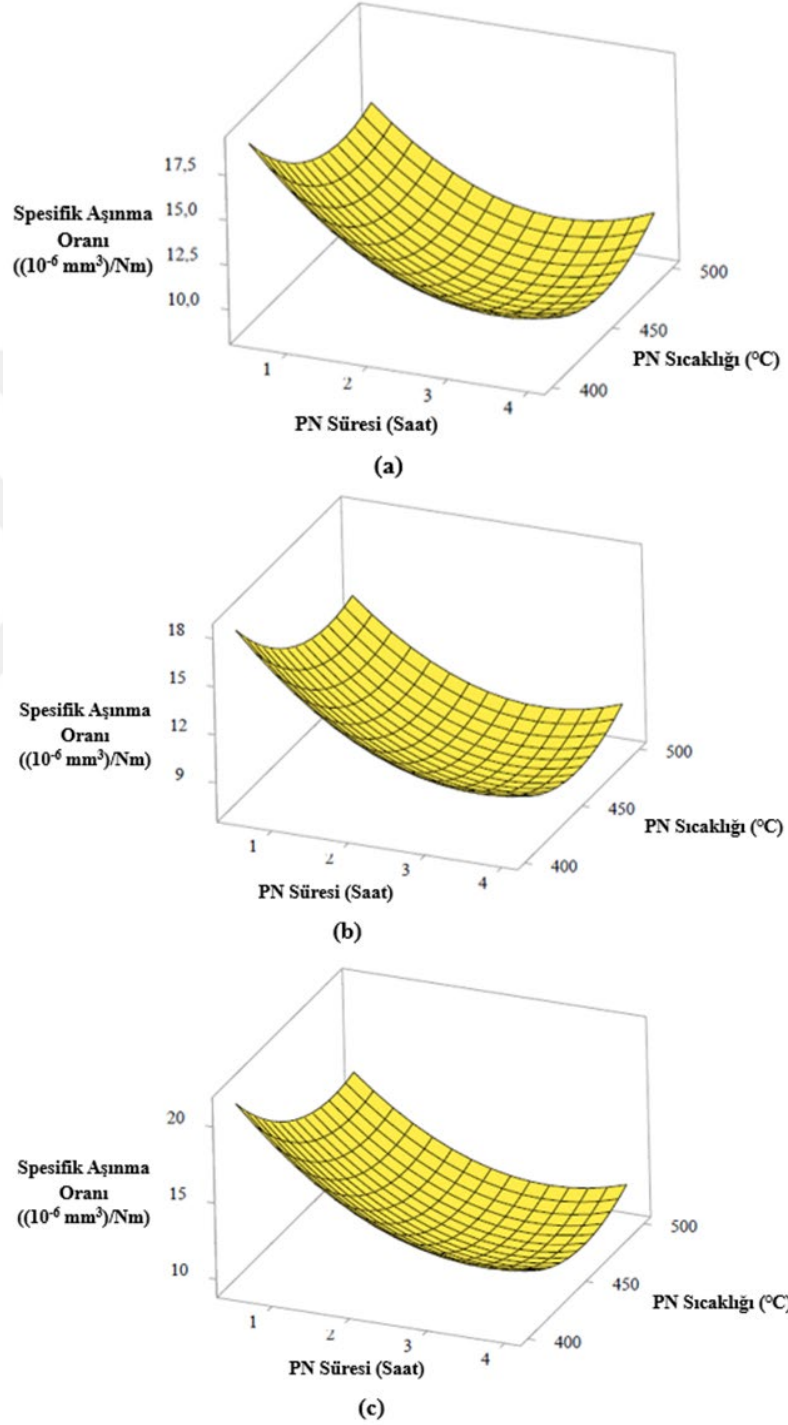
Sonuçlar genel olarak incelendiğinde; PN işlem süresinin yük artışıyla daha fazla arttığı açıkça görülmektedir. Bu da PN işlem süresinin hacim kaybı üzerinde daha büyük bir etkisi olduğunu kanıtlamaktadır. Optimizasyon sonuçları ve daha önce yapılan çalışmalar da bu durumu desteklemektedir [127,137]. Optimizasyon sonucu elde edilen, her bir yükleme koşulu için hacim kaybının sıcaklık ve işlem süresine göre değişimleri Şekil 5.31’de görülmektedir. Aşınma yüklerine göre hacim kayıplarının değişimi incelendiğinde, sıcaklık ve işlem süresi değişiminin etkisinin 10N için sınırlı olduğu görülmüştür. Bu durum nitrürlenmiş tabakanın tamamen aşınmaması ve çekirdek tabakaya ulaşamaması ile açıklanabilir. Aşınma yükünün artmasıyla sıcaklığın ve işlem süresinin hacim kaybına etkisinin arttığı tespit edildi. 20N ve 30N yüklemeler için sıcaklık ve işlem süresindeki artışın hacim kaybını önemli ölçüde azalttığı bulundu.



Şekil 5.31. 10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan plazma nitrüleme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre hacim kaybı değişimleri.

Spesifik aşınma oranı optimizasyon sonuçlarına göre (Çizelge 5.6) en az aşınma oranı; 18,89N aşınma yükü altında, 465 °C’de 3,12 saat PN uygulanmasıyla elde edilmektedir. Spesifik aşınma oranı için optimizasyon eğrileri Şekil 30 (b)’de görülmektedir. 10N aşınma için en az spesifik aşınma oranı 462 °C ve 3,02 saat işlem

parametreleriyle elde edilmektedir. 30N aşınma oranı için ise bu değerler 468 °C ve 3,18 saate çıkmaktadır. Farklı aşınma yükleri için elde edilen spesifik aşınma oranındaki değişimler Şekil 5.32’te görülmektedir.



Şekil 5.32. 10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan plazma nitrüleme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre spesifik aşınma oranı değişimleri.

Yük artışıyla en az spesifik aşınma oranı elde edildiği değerlerin yine hacim kaybına paralel olarak sıcaklık ve PN işlem süresinin artışıyla artmakta, fakat bu değişimler hacim kaybı değişimlerine göre daha sınırlı kalmaktadır. Bu durumun nedeni hacim kaybı ile yükteki değişimin paralel olmasıdır. Spesifik aşınma oranı sonuçları analiz edildiğinde; sıcaklık ve işlem süresinin yaklaşık 470 °C'ye ve 3 saate kadar artmasının, aşınma yükünden bağımsız olarak aşınma oranını azalttığı bulundu. Daha yüksek sıcaklık ve işlem süresi için spesifik aşınma oranındaki küçük artışların nedeni, sürtünme katsayısının artmasıyla birlikte artan sürtünme kuvvetinin aşınmayı arttırması olarak açıklanabilir.

#### **5.4.2. İndüksiyonla Sertleştirme İşlem Parametrelerinin Optimizasyon Sonuçları**

İndüksiyonla sertleştirme için optimizasyon işlemi; indüksiyon gücü, işlem süresi ve aşınma yükü değişiminin; hacim kaybı ve spesifik aşınma oranına etkisini belirlemek amacıyla yapıldı. Optimizasyon işleminde kullanılan deney tasarımı ve değişkenler Çizelge 5.7'de verildi. Değişkenliklerin etki oranları ve anlamlılıkları ANOVA ile analiz edildi. Model oluşturulurken %95 ( $p>0,05$ ) güven aralığından küçük değerler istatistiksel olarak anlamsız olduğu değerlendirildi. Hacim kaybı ve spesifik aşınma oranı için  $\lambda$  optimum değere ( $\lambda=1$ ) oldukça yakın bulundu. Bu yüzden Box-Cox dönüşümüne gerek yoktur.

Hacim kaybı için ANOVA sonuçları Çizelge 5.8'de verildi. Çizelge 5.8 incelendiğinde; indüksiyonla sertleştirme gücünün ve aşınma yükünün modellemede etkili olduğu görüldü. İşlem süresi ise istatistiksel olarak anlamsız ( $p>0,05$ ) bulundu. Dağılım ve F değerlerine göre hacim kaybı için en etkili parametre %82,23 ile aşınma yüküdür. Aşınma yükü artışı temas basıncını arttırmıştır, basınç artışıyla plastik deformasyonda artmış ve aşınma hacim kaybı da artış göstermiştir. İndüksiyon gücünün hacim kaybı üzerindeki etkisi ise %9,52 olarak hesaplandı. İndüksiyon gücü artışıyla indüksiyon yoğunluğu arttırmıştır. Yoğunluk artışı sertliği ve sertlik derinliğini arttırmış, mikroyapı değişimlerini hızlandırmıştır. Ayrıca indüksiyon gücü ve aşınma yükünün hacim kaybına beraber etkisi ise %3,78'dir.

Çizelge 5.7. İndüksiyonla sertleştirme RSM deney tasarımı ve girdi parametreleri.

Test No	A	B	C	İndüksiyon Gücü (kW)	İşlem Süresi (s)	Aşınma Yüğü (N)	Hacim Kaybı (mm <sup>3</sup> )	Spesifik Aşınma Oranı ((10 <sup>-6</sup> mm <sup>3</sup> )/Nm)
1	1	0	1	15	9	10	3,6060	12,2829
2	-1	-1	0	17	9	20	4,8084	8,1893
3	0	0	0	19	9	30	5,2884	6,0045
4	0	0	0	21	9	10	2,1648	7,3739
5	-1	0	1	15	9	20	5,2272	8,9026
6	-1	1	0	17	9	30	7,2840	8,2704
7	-1	0	-1	19	9	10	2,2314	7,6007
8	0	1	-1	21	11	20	3,6576	6,2294
9	1	-1	0	15	11	30	8,1240	9,2241
10	0	0	0	17	11	10	2,5638	8,7329
11	1	1	0	19	11	20	4,0956	6,9753
12	0	-1	1	21	11	30	4,9746	5,6482
13	0	1	1	15	11	10	3,0594	10,4211
14	0	-1	-1	17	11	20	4,2258	7,1971
15	1	0	-1	19	11	30	5,1024	5,7934

Çizelge 5.8. İndüksiyonla sertleştirme hacim kaybı ANOVA sonuçları.

Hacim Kaybı (mm <sup>3</sup> )					
	DF	Seq SS	F Değeri	Dağılım (%)	P Değeri
Model	8	39,8898	32,5	97,74	0,000
Lineer	3	37,6001	70,09	92,13	0,000
A-İndüksiyon Gücü	1	3,8861	49,98	9,52	0,000
B-İşlem Süresi	1	0,1557	0,05	0,38	0,826
C-Aşınma Yüğü	1	33,5583	140,5	82,23	0,000
Kareler	2	0,4237	2,05	1,04	0,21
A <sup>2</sup>	1	0,4213	2,11	1,03	0,196
C <sup>2</sup>	1	0,0024	1,42	0,01	0,279
2- Yönlü Etkileşim	3	1,866	4,05	4,57	0,068
A*B	1	0,2383	2,03	0,58	0,204
A*C	1	1,541	10,21	3,78	0,019
B*C	1	0,0867	0,57	0,21	0,481
Hata	6	0,9206	---	2,26	---
Toplam	14	40,8105	---	100	---

Spesifik aşınma oranı için ANOVA sonuçları Çizelge 5.9’da verildi. Çizelge 5.9 incelendiğinde; indüksiyonla sertleştirme gücünün ve aşınma yükünün modellemede etkili olduğu görüldü. İşlem süresi ise istatistiksel olarak anlamsız ( $p>0,05$ ) bulundu. Dağılım ve F değerlerine göre aşınma oranı için en etkili parametre %66,95 ile indüksiyon gücüdür. Aşınma yükünün aşınma oranı üzerindeki etkisi ise %15,35 olarak hesaplandı. Sonuçlar hacim kaybı sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.

Çizelge 5.9. İndüksiyonla sertleştirme spesifik aşınma oranı ANOVA sonuçları.

Spesifik Aşınma Oranı ( $\times 10^{-6}$ (mm <sup>3</sup> /Nm))					
	DF	Seq SS	F Değeri	Dağılım (%)	P Değeri
<b>Model</b>	8	43,775	10,72	93,46	0,005
<b>Lineer</b>	3	39,7345	22,26	84,83	0,001
<b>A-İndüksiyon Gücü</b>	1	31,3571	44,81	66,95	0,001
<b>B-İşlem Süresi</b>	1	1,1873	0,11	2,53	0,749
<b>C-Aşınma Yüğü</b>	1	7,1901	12,01	15,35	0,013
<b>Kareler</b>	2	3,2013	2,86	6,83	0,134
<b>A<sup>2</sup></b>	1	2,3087	2,13	4,93	0,194
<b>C<sup>2</sup></b>	1	0,8927	2,8	1,91	0,145
<b>2- Yönlü Etkileşim</b>	3	0,8391	0,55	1,79	0,668
<b>A*B</b>	1	0,6921	1,34	1,48	0,291
<b>A*C</b>	1	0,1441	0,27	0,31	0,625
<b>B*C</b>	1	0,003	0,01	0,01	0,941
<b>Hata</b>	6	3,0639	---	6,54	---
<b>Toplam</b>	14	48,8389	---	100	---

Çizelge 5.10. Model detayları.

	S	R <sup>2</sup> (%)	Adj. R <sup>2</sup> (%)	Pred. R <sup>2</sup> (%)
<b>Hacim Kaybı (mm<sup>3</sup>)</b>	0,3917	97,74	94,74	85,86
<b>Spesifik Aşınma Oranı ((10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>)/Nm)</b>	0,7146	93,46	84,47	58,03

Modelin R<sup>2</sup> değerleri (Çizelge 5.10) hacim kaybı için %97,74 iken, spesifik aşınma oranı için %93,46'dır. Modelin tahmin yeteneği ise (Adj. R<sup>2</sup>) hacim kaybı için %85,86 iken, spesifik aşınma oranı için %58,03 olarak hesaplandı. RSM tarafından oluşturulan hacim kaybı tahmin denklemi Eşitlik 5.3'te, spesifik aşınma oranı tahmin denklemi ise Eşitlik 5.4'te verildi.

$$\begin{aligned} \text{Hacim Kaybı} = & 31 - 2,46xA - 1,82xB + 0,658xC + 0,0417xA^2 \\ & + 0,00354xC^2 + 0,1159xAxB - 0,02815xAxC \\ & - 0,0117xBxC \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Spesifik Aşınma Oranı} = & 76,6 - 4,93xA - 3,12xB - 0,286xC \\ & + 0,0764xA^2 + 0,00907xC^2 + 0,172xAxB \\ & - 0,0083xAxC - 0,0022xBxC \end{aligned} \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.3 kullanılarak daha önce ölçümleri yapılan 21-9 numunesinin 30N aşınma yükü altındaki hacim kaybı 5,29 mm<sup>3</sup> olarak hesaplanmıştır. 21-9 için deneysel yöntemlerle bulunan değer ise 5,82 mm<sup>3</sup>'tür. Bu durumda oluşturulan model %9,11 hata ile sonucu tahmin edebilmektedir. 21-9 numunesinin 30N aşınma yükü altındaki

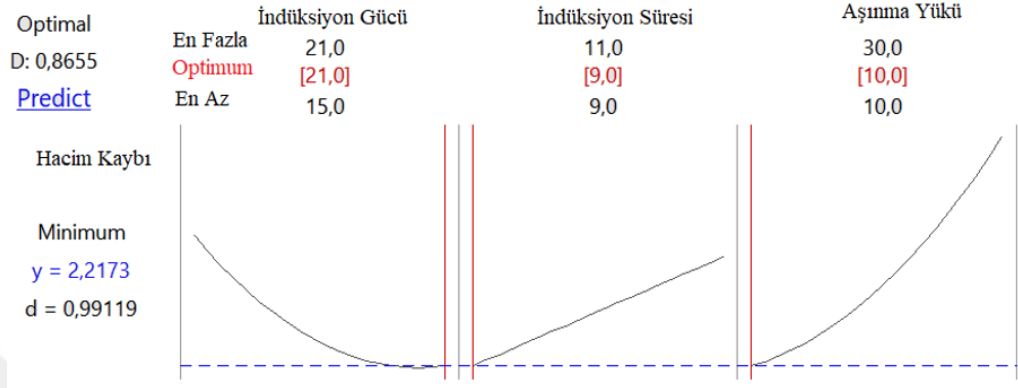
spesifik aşınma oranı ise Eşitlik 5.4 kullanılarak  $4,96 (10^{-6} \text{ mm}^3)/\text{Nm}$  hesaplanmıştır. Aynı şartlar için deneysel yöntemlerle bulunan değer ise  $6,61 (10^{-6} \text{ mm}^3)/\text{Nm}$ 'dir. Spesifik aşınma oranı için hata %24,9'dur. 15-9 numunesi için ise spesifik aşınma oranı %7.68 hatayla tahmin edilmektedir. Hacim kaybı için modelin tahmin yeteneği kabul edilebilir düzeydedir. Fakat spesifik aşınma oranı için modelin tahmin yeteneği bir miktar azalmıştır. Modelin tahmin yeteneğinin PN'e göre düşmesinin nedeni deneysel sonuçlara göre etkisi açıkça görülen işlem süresinin istatistiksel olarak anlamsız ( $p>0,05$ ) çıkmasıdır. Karşılaştırması yapılan indüksiyon süreleri arasındaki fark artırılarak daha anlamlı modellemeler oluşturulabilir. Bu çalışmada indüksiyon süresinin birbirine yakın seçilmesinin nedeni 9 saniyeden daha az indüksiyon süreleri için sertliklerin ve sertlik derinliklerinin yetersiz kalması, 11 saniyeden fazla indüksiyon süreleri için ise numunelerde ergimeler olmasıdır. Parça kalınlığı artırılarak veya parça geometrisi değiştirilerek indüksiyon süreleri artırılabilir.

Çizelge 5.11. İndüksiyonla sertleştirme optimizasyon sonuçları.

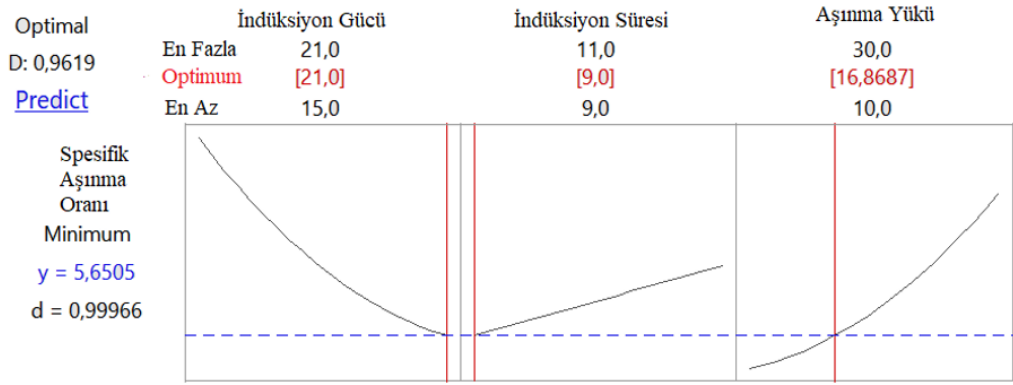
	İndüksiyon Gücü (kW)	İşlem Süresi (s)	Aşınma Yüğü (N)
<b>Hacim Kaybı için Optimizasyon Sonuçları</b>			
Optimum parametreler	21	9	10
10N aşınma yüğü için optimum parametreler	21	9	10
20N aşınma yüğü için optimum parametreler	21	9	20
30N aşınma yüğü için optimum parametreler	21	9	30
<b>Spesifik Aşınma Oranı için Optimizasyon Sonuçları</b>			
Optimum parametreler	21	9	16,87
10N aşınma yüğü için optimum parametreler	21	9	10
20N aşınma yüğü için optimum parametreler	21	9	20
30N aşınma yüğü için optimum parametreler	21	9	30

Optimizasyon sonuçları incelendiğinde (Çizelge 5.11) en az hacim kaybının 21 kW indüksiyon gücünde, 9 saniye indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelere 10N normal yük altında elde edildiği görüldü. Hacim kaybı için optimizasyon eğrileri Şekil 5.33 (a)'da görülmektedir. PN'de olduğu gibi normal yükün azalmasıyla azalan temas basıncının etkisiyle hacim kaybı da azalmıştır [138]. Aşınma yüğü fark etmeksizin 21 kW indüksiyon gücü uygulanan numuneler daha iyi aşınma performansı gösterdi. Bunun nedeni indüksiyon gücündeki artışın sertlik ve sertlikten etkilenen bölge derinliğini arttırmasıdır [132]. Optimizasyon sonuçları en iyi aşınma performansının 9 saniye indüksiyon uygulanan numunelerde olduğu görülmektedir. Fakat modelde bu parametre karşılaştırılan değerlerin birbirine oldukça yakın olması nedeniyle

istatistiksel olarak anlamsız çıkmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlar ve yapılan diğer çalışmalar indüksiyon süresindeki artışın aşınma performansını iyileştirdiğini göstermektedir [114,117,131].



(a)



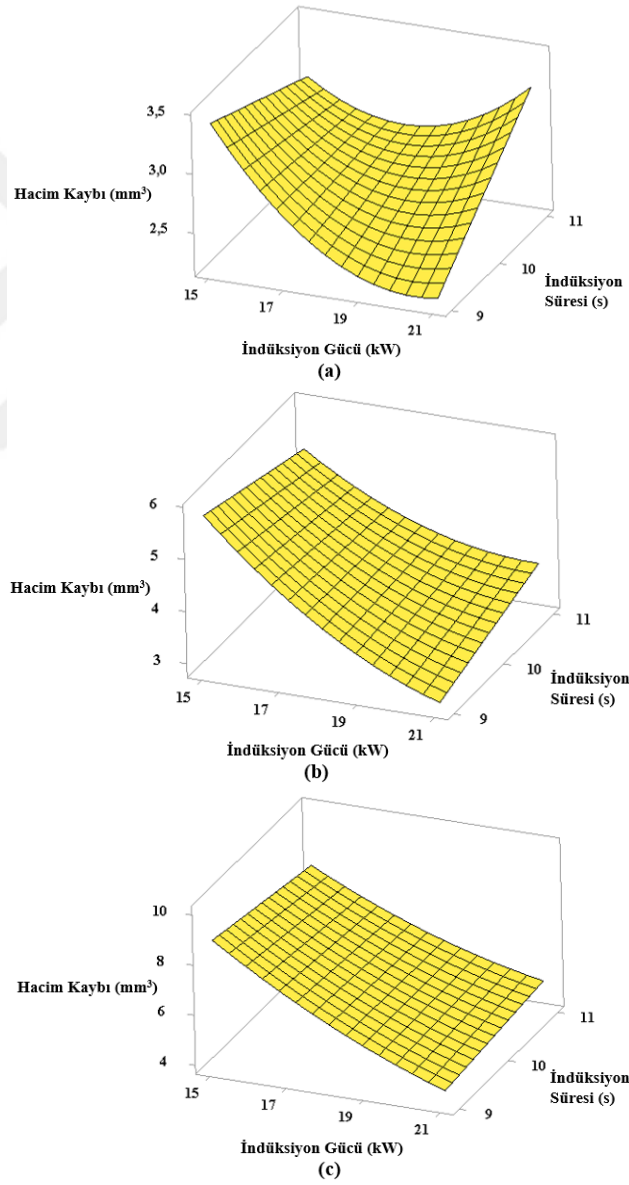
(b)

Şekil 5.33. İndüksiyonla sertleştirme optimizasyon eğrileri.

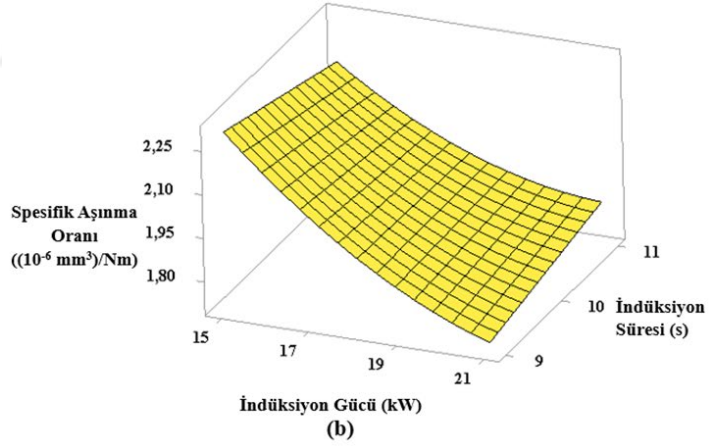
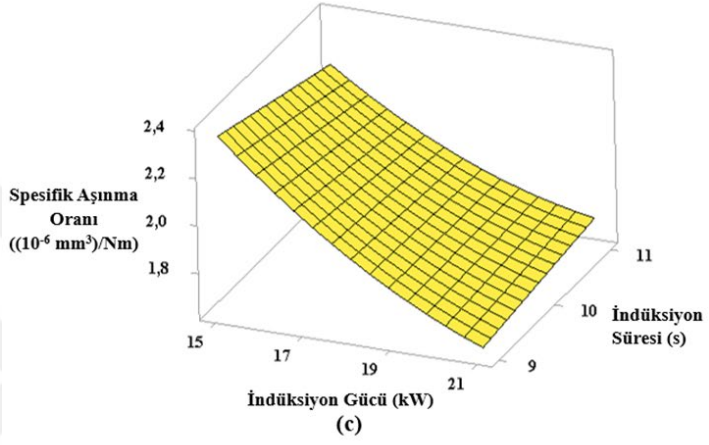
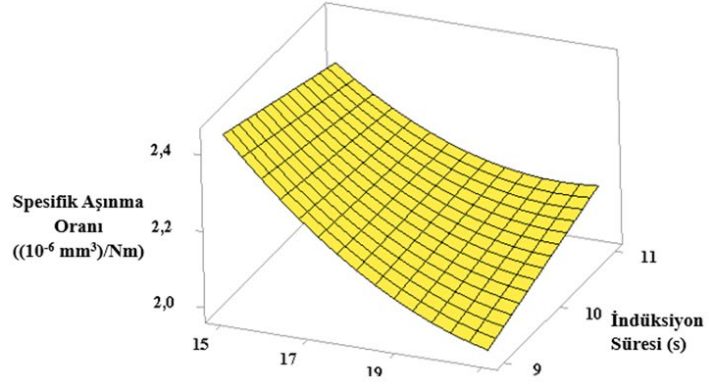
Farklı aşınma yükleri için hacim kaybındaki değişimler Şekil 5.34'te görülmektedir. Buna göre indüksiyon gücünün artmasıyla aşınma oranı düşmektedir. Keza indüksiyon gücü artışıyla indüksiyon süresinin hacim kaybı üzerindeki etkisi de azalmaktadır. Aşınma yükü artışıyla ise hacim kaybı da artmaktadır.

Spesifik aşınma oranı optimizasyon sonuçlarına göre (Çizelge 5.11) en az aşınma oranı; 16,87N aşınma yükü altında, 21 kW indüksiyon gücü ve 9 saniye indüksiyon süresi uygulanmasıyla elde edilmektedir. Hacim kaybı için optimizasyon eğrileri Şekil 5.33 (b)'de görülmektedir. Yine hacim kaybı sonuçlarında da olduğu gibi normal yükün azalmasıyla azalan temas basıncının etkisiyle spesifik aşınma oranı da azalmıştır. Aşınma yükü fark etmeksizin 21 kW indüksiyon gücü uygulanan

numuneler daha iyi aşınma oranı performansını gösterdi. Bunun nedeni yine hacim kaybı sonuçlarında da olduğu gibi indüksiyon gücündeki artışın sertlik ve sertlikten etkilenen bölge derinliğini arttırmasıdır. Optimizasyon sonuçları spesifik aşınma oranı için de en iyi aşınma performansının 9 saniye indüksiyon uygulanan numunelerde olduğu görülmektedir. İşlem süresi artışının aşınma oranını düşürmesi beklenirken, optimizasyon sonuçlarının bunu yansıtmamasının nedeni işlem süresinin model için istatistiksel olarak anlamsız ( $p>0,05$ ) bulunmasıdır. Farklı aşınma yükleri için elde edilen spesifik aşınma oranındaki değişimler Şekil 5.35'te görülmektedir.



Şekil 5.34. 10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan indüksiyonla sertleştirme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre hacim kaybı değişimleri.



Şekil 5.35. 10N (a), 20N (b) ve 30N (c) aşınma yükü uygulanan indüksiyonla sertleştirme numunelerinin işlem süresi ve sıcaklığa göre spesifik aşınma oranı değişimleri.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; krank mili, kam mili, dişli sistemleri, volan gibi kritik otomotiv parçaların malzemesi olan GGG60'a uygulanan yüzey modifikasyon işlemlerinin aşınma performansına etkisi araştırıldı. GGG60 çubuklar kum kalıba döküm yöntemiyle üretildi. Aşınma numuneleri, döküm çubuklardan CNC ile işlenerek üretildi. Malzemenin mikroyapısı incelendiğinde; ana yapının perlitten oluştuğu, dağınık şekilde küresel grafit yapılarının olduğu ve özellikle grafitlerin çevresinde yoğunlaşmış ferrit yapıları görüldü. Yüzey modifikasyon işlemi olarak plazma nitrürleme ve indüksiyonla sertleştirme kullanıldı. Numunelere 400 °C, 450 °C ve 500 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık; yarım saat, 2 saat ve 4 saat olmak üzere üç farklı sürede plazma nitrürleme uygulandı. İndüksiyonla sertleştirme ise 15 kW, 17 kW, 19 kW ve 21 kW olmak üzere dört farklı güçte; 9 ve 11 saniye olmak üzere iki farklı süre için uygulandı. Ayrıca her numune için sertlik değişimleri araştırıldı. Aşınma deneyleri ise her koşul için 10N, 20N ve 30N aşınma yükünde, 1 saat süre için yapıldı. Aşınma karakteristikleri ve miktarları SEM, EDS ve 3D yüzey profilometresiyle incelendi. Elde edilen sonuçlarla hacim kayıpları ve spesifik aşınma oranları belirlendi. Sonuçların RSM kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır. Deney sonuçları ve öneriler aşağıdaki gibidir:

1. Her iki yöntemde işlem parametreleri fark etmeksizin aşınma performansında iyileşme sağlandığı tespit edildi. Aşınma performanslarındaki iyileşme yüzey sertliklerindeki ve sertlik derinliklerindeki artışla orantılı olarak artmaktadır.
2. Plazma nitrürleme uygulanan numune kesitleri SEM ve EDS ile incelendiğinde; yüzey bölgesinde bileşik tabaka, bileşik tabakanın altında bir difüzyon bölgesi, en altta ise azot atomlarının ulaşamadığı çekirdek

bölgesinin bulunduğu görüldü. Nitrürleme sıcaklığının ve süresinin artmasıyla bileşik tabakanın ve difüzyon bölgesinin kalınlığı da artmaktadır. Numuneye difüze olan azot atomlarının matristeki demir ile nitrür bileşikleri oluşturmasıyla daha sert yapılar oluştuğu tespit edildi.

3. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerin kesitleri SEM ile incelendiğinde; indüksiyonun numune yüzeyindeki ve yüzeye yakın bölgelerdeki grafit nodüllerini ergittiği ve matristeki karbon miktarının arttığı bulundu. İndüksiyon gücündeki ve süresindeki artış ergimeyi de arttırmıştır. Matriste artan karbon oranı ve ani sıcaklık artış ve azalışlarının etkisiyle mikroyapıda meydana gelen değişiklikler sertlikleri arttırmıştır.
4. En düşük sertlik yüksek sertlik işlem görmemiş numunede bulundu. Plazma nitrürleme uygulanan numunelerde en yüksek yüzey sertliği 500-4 numunesinde elde edildi. Plazma nitrürleme uygulanan numunelerin sertlik artışının 100-300 µm arasında değişen derinliklere kadar inebildiği bulundu. Difüzyon bölge derinliğini gösteren bu değer plazma nitrürleme sıcaklığının ve süresinin artmasıyla orantılı olarak artmıştır.
5. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler için en düşük yüzey sertliği 15 kW güçle işlem yapılan numune yüzeylerinde görüldü. 15-9 numunesi için sertlik derinliği ise 450 µm kadardır. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler işlem parametresi fark etmeksizin daha yüksek yüzey sertliği ve derinliklere ulaştı. En yüksek yüzey sertlikleri ise 21 kW güçle indüksiyon uygulanan numunelerde görüldü. İndüksiyon gücündeki ve süresindeki artış sertlik ve sertlik derinliğini arttırmaktadır. Ayrıca 19 ve 21 kW güçle indüksiyon uygulanan numunelerde çekirdek sertleşmesi görüldü.
6. Hem plazma nitrürleme hem de indüksiyonla sertleştirme sürtünme katsayısını arttırmıştır. Plazma nitrürleme uygulanan numuneler için bu durumun nedeni yüzeyde biriken nitrür bileşiklerinin yüzey kalitesini bozup, yüzey pürüzlülüğünü arttırmasıdır. Plazma nitrürleme sıcaklığı ve süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan

numunelerde görülen yüzey pürüzlülüğü artışının nedeni ise indüksiyonun oluşturduğu ani sıcaklık artışının yüzey kalitesini bozması, ani su soğutma işleminin ise yüzeyde mikro çukurlar oluşturmasıdır. Ayrıca ani sıcaklık değişimleri yüzey gerilmeleri ve mikro çatlaklar oluşturabilmektedir. Daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilebilmesi için kademeli soğutma yapılabilir. Ayrıca bu çalışmada olduğu çoğu zaman soğutucu olarak su kullanılmaktadır. Soğutucu olarak farklı sıvılar, çözeltiler ve gazlar kullanılabilir. Aşınma yükü artışı ise yüzeydeki bozuk bölgelerin daha hızlı aşınmasını sağlayıp sürtünme katsayısını azaltmaktadır.

7. Hacim kaybı sonuçları incelendiğinde; en fazla aşınmanın işlem görmeyen numunede olduğu görüldü. Hem plazma nitrüleme hem de indüksiyonla sertleştirme aşınmayı azaltmıştır. Plazma nitrüleme uygulanan numuneler için işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla aşınma miktarı azalmıştır. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler için ise işlem gücü ve süresinin artmasıyla hacim kaybı azalmıştır. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerde plazma nitrüleme uygulanan numunelerden daha az hacim kaybı görüldü. Sonuçlar sertlik sonuçlarıyla paralellik göstermektedir. Sertlik artışı aşınmayı zorlaştırmaktadır.
8. Spesifik aşınma oranı sonuçları incelendiğinde ise; en yüksek aşınma oranının işlem görmeyen numunede olduğu bulundu. Plazma nitrüleme uygulanan numuneler için işlem süresi ve sıcaklığındaki artış aşınma oranını azaltmıştır. Keza indüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler için de indüksiyon gücü ve süresindeki artışın aşınma oranını azalttığı bulundu. İndüksiyonla sertleştirme uygulanan numuneler, plazma nitrüleme uygulanan numunelerden daha düşük spesifik aşınma oranlarına sahiptir. Ayrıca aşınma yükü artışı spesifik aşınma oranını da arttırmıştır.
9. Aşınma izi SEM görüntüleri incelendiğinde; en geniş aşınma 30N aşınma yükü uygulanan izinin işlem görmemiş numunede olduğu bulundu. Aşınma izi genişlikleri de sertlik değerleriyle orantılıdır. Buna bağlı olarak eş yükleme koşulları için indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelerde daha azdır.

Aşınma yükündeki artış ise iz genişliğini arttırmıştır. Ayrıca işlem görmeyen numunenin aşınan yüzeylerinde mikro çatlak ve delaminasyon (soyulma) oluşumları vardır. Aşınma yükü artışı mikro çatlak ve delaminasyonları arttırmıştır. Sertlik artışı ise bu oluşumları azaltmaktadır.

10. Aşınma için en iyi koşulların belirlenmesi amacıyla hem plazma nitrüleme hem de indüksiyonla sertleştirme uygulanan numunelere yüzey yanıt yöntemi kullanılarak optimizasyon yapıldı. Plazma nitrüleme için girdi parametreleri; nitrasyon sıcaklığı, süresi ve aşınma yüküdür. İndüksiyonla sertleştirme için girdi parametreleri ise; indüksiyon gücü, süresi ve aşınma yüküdür. Her iki yüzey işlemi için çıktı parametreleri ise hacim kaybı ve spesifik aşınma oranıdır. Optimizasyonla çıktı parametreleri en aza indirgenmeye çalışıldı. Her bir yükleme koşulu için de optimum parametreler belirlendi. Ayrıca yüzey yanıt yöntemi bilinmeyen deney sonuçlarının da tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır.
11. Model daha önce ölçümleri yapılan 21-9 numunesinin 30N aşınma yükü altındaki hacim kaybını %9,11 hatayla tahmin edebilmiştir. Bu numune için spesifik aşınma oranı ise %24,9 hatayla tahmin edilebilmiştir. 15-9 numunesi için ise spesifik aşınma oranı %7.68 hatayla tahmin edilebilmiştir. Hacim kaybı için modelin tahmin yeteneği kabul edilebilir düzeydedir. Fakat spesifik aşınma oranı için modelin tahmin yeteneği bir miktar azalmıştır. Modelin tahmin yeteneğinin plazma nitrüleme modeline göre azalmasının nedeni deneysel sonuçlara göre etkisi açıkça görülen işlem süresinin istatistiksel olarak anlamsız ( $p>0,05$ ) çıkmasıdır. Karşılaştırması yapılan indüksiyon süreleri arasındaki fark arttırılarak daha anlamlı modellemeler oluşturulabilir. Bu çalışmada indüksiyon süresinin birbirine yakın seçilmesinin nedeni 9 saniyeden daha az indüksiyon süreleri için sertliklerin ve sertlik derinliklerinin yetersiz kalması, 11 saniyeden fazla indüksiyon süreleri için ise numunelerde ergimeler olmasıdır. Parça kalınlığı arttırılarak veya parça geometrisi değiştirilerek indüksiyon süreleri arttırılabilir.

12. İndüksiyonla sertleştirme optimizasyon sonuçları incelendiğinde; en az hacim kaybının 21 kW indüksiyon gücünde, 9 saniye işlem uygulanan numunelerin 10N normal yük altında aşınmaya tabii tutulduğunda elde edildiği görüldü. Plazma nitrüleme sonuçlarında da olduğu gibi aşınma yükünün azalmasıyla azalan temas basıncının etkisiyle hacim kaybı da azalmıştır. Aşınma yükü fark etmeksizin 21 kW indüksiyon gücü uygulanan numuneler daha iyi aşınma performansı gösterdi. Bunun nedeni indüksiyon gücündeki artışın sertlik ve sertlikten etkilenen bölge derinliğini arttırmasıdır. Hacim kaybı üzerinde etkili parametre aşınma yüküdür. Aşınma yükü artışı temas basıncını arttırmıştır, basınç artışıyla plastik deformasyonda artmış ve hacim kaybı da artış göstermiştir. İndüksiyon gücü artışıyla indüksiyon yoğunluğu arttırmıştır. Yoğunluk artışı sertliği ve sertlik derinliğini arttırmış, mikroyapı değişimlerini hızlandırmıştır. Spesifik aşınma oranı için de indüksiyonla gücünün ve aşınma yükünün modellemede etkili olduğu görüldü. Spesifik aşınma oranı için etkili parametre indüksiyon gücüdür. Optimizasyon sonuçlarına göre en iyi aşınma performansının 9 saniye indüksiyon uygulanan numunelerde olduğu görülmektedir. Fakat modelde indüksiyon süresi karşılaştırılan değerlerin birbirine oldukça yakın olması nedeniyle istatistiksel olarak anlamsız çıkmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlar ve yapılan diğer çalışmalar indüksiyon süresindeki artışın aşınma performansını iyileştirdiğini göstermektedir.
13. İndüksiyonla sertleştirme plazma nitrülemeye göre daha maliyetsiz bir işlemdir. Çok daha kısa sürelerde daha yüksek sertliklere ve sertlik derinliklerine, dolayısıyla daha iyi bir aşınma performansına ulaşılabilmektedir. Seri üretim için çok daha uygun bir yöntemdir. Bu yönüyle indüksiyonla sertleştirme plazma nitrülemeye göre daha tercih edilebilir.
14. Plazma nitrüleme sırasında iş parçasında çarpılma ve boyut değişikliği yaşanmamaktadır. Ayrıca ısı işlem ve soğuma fırın içerisinde kontrollü ortamda gerçekleştirildiği için parça yüzeylerinde oksitlenme görülmemektedir. Ek olarak plazma nitrülemenin yüzey temizleme özelliği de bulunmaktadır. Böylece ek bir yüzey işlemine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu da üretim maliyetlerini azaltabilmektedir. İndüksiyonla sertleştirmede ise anlık

yüksek ısınma ve soğumalar yüzeyde bozulmalara yol açmakta, iş parçasında yüzey gerilmeleri ve çarpılmalar oluşabilmektedir. Ayrıca özellikle suyla yapılan soğutmalar yüzeylerde oksit oluşturabilmektedir. Bu da son bir bitirme işlemine ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır ve üretim maliyetlerini arttırabilmektedir. Kritik parçalarda hassas yüzey kalitesi istenmesi plazma nitrülemeyi tercih sebebi yapabilir.

15. Plazma nitrüleme fırın kapasitesinin yeterli olması koşuluyla her türlü geometrideki parçaya başarıyla uygulanabilmektedir. İşlem parametrelerinin daha kolay kontrol edilebilmesi ile sertlikler ve nitrasyon derinlikleri hassas olarak ayarlanabilmektedir. İndüksiyonla sertleştirme ise karmaşık şekilli parçalara uygulanamamaktadır. Ayrıca çok ince parçalarda ergimelere, yüzey ve yapıda bozulmalara neden olabilmektedir. Bu yönüyle plazma nitrüleme karmaşık ve küçük parçalar için tercih sebebidir.
16. İndüksiyonla sertleşme işleminde indüksiyon yoğunluğunun fazla olmasıyla çekirdek sertleşmesi görülebilmektedir. Bu bazı durumlarda istenilen bir özelliktir, fakat süneklikte ve toklukta bir miktar azalışa neden olabilir. Plazma nitrülemeye ise azot atomları çekirdeğe kadar ulaşamamaktadır. Böylece sünekliğin korunmasını sağlamaktadır. Bu da aşınma dayanımının yanında sünekliğin önemli olduğu uygulamalar için plazma nitrülemeyi daha kullanılabilir kılmaktadır.
17. İndüksiyonla sertleştirme yüksek karbon oranına sahip metaller için yüksek sertlik sağlayabilmektedir. Fakat düşük karbonlu metallerde yeterli sertliği sağlayamamaktadır. Düşük karbonlu metallerin yüzey sertliklerinin arttırılmasında plazma nitrüleme daha iyi sonuçlar verebilmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Topbař, M. A., "Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı", *Prestij Yayıncılık, İstanbul*, 28–80 (1998).
2. Callister Jr, W. D., "Materials Science and Engineering - An Introduction (5th ed.)", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, (2000).
3. Lin, S. C., Lui, T.-S., Chen, L.-H., ve Song, J.-M., "Effect of pearlite on the vibration-fracture behavior of spheroidal graphite cast irons under resonant conditions", *Metallurgical And Materials Transactions A*, 33A: 2623–2634 (2002).
4. Labrecque, C. ve Gagne, M., "Ductile iron: Fifty years of continuous development", *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37 (5): 343–378 (1998).
5. Karamış, M. B. ve Yıldızlı, K., "Surface modification of nodular cast iron: A comparative study on graphite elimination", *Materials Science And Engineering: A*, 527 (20): 5225–5229 (2010).
6. Šamec, B., Potrč, I., ve Šraml, M., "Low cycle fatigue of nodular cast iron used for railway brake discs", *Engineering Failure Analysis*, 18 (6): 1424–1434 (2011).
7. Yavuz, K., "GGG-70 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İşlenebilirliklerinin Araştırılması", *Gazi Üniversitesi*, (2006).
8. İzgiz, S., "Küresel Grafitli Dökme Demir", *SEGEM Sınai Eğitim Ve Gelistirme Merkezi Yayınları*, Ankara, 14–22 (1988).
9. Walton, C. F., "1. Walton, C. F., "Introduction to Heat Treating of Cast Irons", ASM International, ASM Handbook., 4: 667–669 (1991). Introduction to Heat Treating of Cast Irons", *ASM International, ASM Handbook.*, 4: 667–669 (1991).
10. Torun, O., "Dökme demirlerde indüksiyonla yüzey sertleştirme", *Osman Gazi Üniversitesi*, Eskişehir, (1995).
11. Boyer, H. E. ve Gall, T. L., "Metals handbook; desk edition", (1985).

12. Vaško, A., Vaško, M., Belan, J., ve Tillová, E., "Comparison of fatigue properties of nodular cast iron at low and high frequency cyclic loading", *Procedia Engineering*, 177: 576–581 (2017).
13. Kachit, M., Courbon, J., Boulnat, X., Adrien, J., ve Verdu, C., "Non-symmetrical fatigue life of nodular graphite cast iron under non-proportional multi-axial cyclic loading", *International Journal Of Fatigue*, 125: 128–137 (2019).
14. Kachit, M. ve Verdu, C., "Cracking behavior in nodular graphite cast iron under non-proportional cyclic loading", *International Journal Of Fatigue*, 140: 105840 (2020).
15. Bleicher, C., Kaufmann, H., ve Melz, T., "Assessment of service loads and material influence on the lifetime of thick-walled nodular cast iron components", *International Journal Of Fatigue*, 147: 106171 (2021).
16. Xue, H. Q., Bayraktar, E., ve Bathias, C., "Damage initiation mechanism of a nodular cast iron under the very high cycle fatigue regime", *International Journal Of Computational Materials Science And Surface Engineering*, 1 (6): 635–649 (2007).
17. Thompson, S. W., Parthasarathi, V., ve Findley, K. O., "A comparison of bending-fatigue properties of surface-induction-hardened SAE 1045 bar steels with and without vanadium and the influence of comparable low-temperature induction-tempering and furnace-tempering treatments", *Materials Science And Engineering: A*, 807: 140812 (2021).
18. Sen, U., Sen, S., ve Yilmaz, F., "Structural characterization of boride layer on boronized ductile irons", *Surface And Coatings Technology*, 176 (2): 222–228 (2004).
19. Unal, O., Maleki, E., Karademir, I., Husem, F., Efe, Y., ve Das, T., "Effects of conventional shot peening, severe shot peening, re-shot peening and precised grinding operations on fatigue performance of AISI 1050 railway axle steel", *International Journal Of Fatigue*, 155: 106613 (2022).
20. Zlatanović, M. ve Münz, W. D., "Wear resistance of plasma-nitrided and sputter-ion-plated hobs", *Surface And Coatings Technology*, 41 (1): 17–30 (1990).
21. Abboud, J. H., "Microstructure and erosion characteristic of nodular cast iron surface modified by tungsten inert gas", *Materials & Design*, 35: 677–684 (2012).
22. Alabeedi, K. F., Abboud, J. H., ve Benyounis, K. Y., "Microstructure and erosion resistance enhancement of nodular cast iron by laser melting", *Wear*, 266 (9–10): 925–933 (2009).

23. Cheng, X., Hu, S., Song, W., ve Xiong, X., "Improvement in corrosion resistance of a nodular cast iron surface modified by plasma beam treatment", *Applied Surface Science*, 286: 334–343 (2013).
24. Ghaini, F. M., Ameri, M. H., ve Torkamany, M. J., "Surface transformation hardening of ductile cast iron by a 600w fiber laser", *Optik*, 203: 163758 (2020).
25. Khameneh, M. J. ve Azadi, M., "Evaluation of high-cycle bending fatigue and fracture behaviors in EN-GJS700-2 ductile cast iron of crankshafts", *Engineering Failure Analysis*, 85: 189–200 (2018).
26. Zhan, K., Zhang, Y., Bao, L., Yang, Z., Zhao, B., ve Ji, V., "Surface characteristic and wear resistance of QT-700-2 nodular cast iron after laser quenching combing with shot peening treatment", *Surface And Coatings Technology*, 423: 127589 (2021).
27. Kayali, Y., Taktak, S., Ulu, S., ve Yalcin, Y., "Investigation of mechanical properties of boro-tempered ductile iron", *Materials And Design*, 31 (4): 1799–1803 (2010).
28. Kul, M., Oskay, K. O., Temizkan, A., Karaca, B., Kumruoğlu, L. C., ve Topçu, B., "Effect of boronizing composition on boride layer of boronized GGG-60 ductile cast iron", *Vacuum*, 126: 80–83 (2016).
29. Aal, A. A., Ibrahim, K. M., ve Hamid, Z. A., "Enhancement of wear resistance of ductile cast iron by Ni-SiC composite coating", *Wear*, 260 (9–10): 1070–1075 (2006).
30. Stokes, B., Gao, N., ve Reed, P. A. S., "Effects of graphite nodules on crack growth behaviour of austempered ductile iron", *Materials Science And Engineering: A*, 445: 374–385 (2007).
31. Slatter, T., Lewis, R., ve Jones, A. H., "The influence of induction hardening on the impact wear resistance of compacted graphite iron (CGI)", *Wear*, 270 (3–4): 302–311 (2011).
32. Gao, J.-W., Han, R.-P., Zhu, S.-P., Zhao, H., Correia, J. A. F. O., ve Wang, Q., "Influence of induction hardening on the damage tolerance of EA4T railway axles", *Engineering Failure Analysis*, 143: 106916 (2023).
33. Gao, J.-W., Yu, M.-H., Liao, D., Zhu, S.-P., Zhu, Z.-Y., ve Han, J., "Foreign object damage tolerance and fatigue analysis of induction hardened S38C axles", *Materials & Design*, 202: 109488 (2021).
34. Xu, H., Wang, Y., Li, N., Ling, C., Liu, Q., ve Tang, Z., "Corrosion performance of 316 stainless steel and nodular cast iron 600-3 in molten Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>-NaNO<sub>3</sub>-KNO<sub>3</sub> salt", *Journal Of Energy Storage*, 57: 106231 (2023).

35. Liang, W., "Surface modification of AISI 304 austenitic stainless steel by plasma nitriding", *Applied Surface Science*, 211 (1–4): 308–314 (2003).
36. Li, Y., He, Y., Xiu, J., Wang, W., Zhu, Y., ve Hu, B., "Wear and corrosion properties of AISI 420 martensitic stainless steel treated by active screen plasma nitriding", *Surface And Coatings Technology*, 329: 184–192 (2017).
37. Musil, J., Vlček, J., ve Růžicka, M., "Recent progress in plasma nitriding", *Vacuum*, 59 (4): 940–951 (2000).
38. Ashrafizadeh, F., "Influence of plasma and gas nitriding on fatigue resistance of plain carbon (Ck45) steel", *Surface And Coatings Technology*, 174–175: 1196–1200 (2003).
39. Karamiş, M. B., "An investigation of the properties and wear behaviour of plasma-nitrided hot-working steel (H13)", *Wear*, 150 (1–2): 331–342 (1991).
40. Wang, Q., Zhang, L., ve Shen, H., "Microstructure analysis of plasma nitrided cast/forged CoCrMo alloys", *Surface And Coatings Technology*, 205 (7): 2654–2660 (2010).
41. Soleimani, S. M. Y., Mashreghi, A. R., Ghasemi, S. S., ve Moshrefifar, M., "The effect of plasma nitriding on the fatigue behavior of DIN 1.2210 cold work tool steel", *Materials And Design*, 35: 87–92 (2012).
42. Alkan, S. ve Gök, M. S., "Influence of plasma nitriding pre-treatment on the corrosion and tribocorrosion behaviours of PVD CrN, TiN and AlTiN coated AISI 4140 steel in seawater", *Lubrication Science*, 34 (2): 67–83 (2022).
43. Faré, S., Lecis, N., Vedani, M., Silipigni, A., ve Favoino, P., "Properties of nitrided layers formed during plasma nitriding of commercially pure Ti and Ti-6Al-4V alloy", *Surface And Coatings Technology*, 206 (8–9): 2287–2292 (2012).
44. Farokhzadeh, K., Edrisy, A., Pigott, G., ve Lidster, P., "Scratch resistance analysis of plasma-nitrided Ti-6Al-4V alloy", *Wear*, 302 (1–2): 845–853 (2013).
45. Mubarak Ali, M. ve Raman, S. G. S., "Effect of plasma nitriding environment and time on plain fatigue and fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4V", *Tribology Letters*, 38 (3): 291–299 (2010).
46. Mubarak Ali, M., Ganesh Sundara Raman, S., Pathak, S. D., ve Gnanamoorthy, R., "Influence of plasma nitriding on fretting wear behaviour of Ti-6Al-4V", *Tribology International*, 43 (1–2): 152–160 (2010).

47. Dalcin, R. L., Oliveira, L. F., Diehl, I. L., Dias, V. W., ve Rocha, A. da S., "Response of a DIN 18MnCrSiMo6-4 continuous cooling bainitic steel to plasma nitriding with a nitrogen rich gas composition", *Materials Research*, 23: (2020).
48. Shen, L., Wang, L., Wang, Y., ve Wang, C., "Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening", *Surface And Coatings Technology*, 204 (20): 3222–3227 (2010).
49. Unal, O., Maleki, E., ve Varol, R., "Effect of severe shot peening and ultra-low temperature plasma nitriding on Ti-6Al-4V alloy", *Vacuum*, 150: 69–78 (2018).
50. Ozturk, M., Husem, F., Karademir, I., Maleki, E., Amanov, A., ve Unal, O., "Fatigue crack growth rate of AISI 4140 low alloy steel treated via shot peening and plasma nitriding", *Vacuum*, 207: 111552 (2023).
51. Unal, O., Maleki, E., ve Varol, R., "Plasma nitriding of gradient structured AISI 304 at low temperature: Shot peening as a catalyst treatment", *Vacuum*, 164: 194–197 (2019).
52. Farokhzadeh, K., Qian, J., ve Edrissy, A., "Effect of SPD surface layer on plasma nitriding of Ti-6Al-4V alloy", *Materials Science And Engineering A*, 589: 199–208 (2014).
53. Zhao, C., Zha, W., Zhang, J., ve Nie, X., "Surface fatigue cracking of plasma nitrided cast iron D6510 under cyclic inclined contact stresses", *International Journal Of Fatigue*, 124: 10–14 (2019).
54. Cassar, G., Avelar-Batista Wilson, J. C., Banfield, S., Housden, J., Fenech, M., Matthews, A., ve Leyland, A., "Evaluating the effects of plasma diffusion processing and duplex diffusion/PVD-coating on the fatigue performance of Ti-6Al-4V alloy", *International Journal Of Fatigue*, 33 (9): 1313–1323 (2011).
55. Jeong, J. J., Jeong, B. Y., Kim, M. H., ve Lee, C., "Characterization of TiN coatings on the plasma nitrided spheroidal graphitic cast iron substrates", *Surface And Coatings Technology*, 150 (1): 24–30 (2002).
56. Nie, X., Wang, L., Yao, Z. C., Zhang, L., ve Cheng, F., "Sliding wear behaviour of electrolytic plasma nitrided cast iron and steel", *Surface And Coatings Technology*, 200 (5–6): 1745–1750 (2005).
57. Park, I.-C., Lee, H.-K., ve Kim, S.-J., "Microstructure and cavitation damage characteristics of surface treated gray cast iron by plasma ion nitriding", *Applied Surface Science*, 477: 147–153 (2019).

58. Jeyaprakash, N., Yang, C. H., Duraiselvam, M., Prabu, G., Tseng, S. P., ve Raj Kumar, D., "Investigation of high temperature wear performance on laser processed nodular iron using optimization technique", *Results In Physics*, 15: 102585 (2019).
59. Hu, Y., Qin, Q., Wu, S., Zhao, X., ve Wang, W., "Fatigue resistance and remaining life assessment of induction-hardened S38C steel railway axles", *International Journal Of Fatigue*, 144: 106068 (2021).
60. Zhong, H., Wang, Z., Gan, J., Wang, X., Yang, Y., He, J., Wei, T., ve Qin, X., "Numerical simulation of martensitic transformation plasticity of 42CrMo steel based on spot continual induction hardening model", *Surface And Coatings Technology*, 385: 125428 (2020).
61. Costa, N., Machado, N., ve Silva, F. S., "A new method for prediction of nodular cast iron fatigue limit", *International Journal Of Fatigue*, 32 (7): 988–995 (2010).
62. Gao, J.-W., Pan, X.-N., Han, J., Zhu, S.-P., Liao, D., Li, Y.-B., ve Dai, G.-Z., "Influence of artificial defects on fatigue strength of induction hardened S38C axles", *International Journal Of Fatigue*, 139: 105746 (2020).
63. Zhang, H., Wu, S., Ao, N., Zhang, J., Li, H., Zhou, L., Xu, P., ve Su, Y., "Fatigue crack non-propagation behavior of a gradient steel structure from induction hardened railway axles", *International Journal Of Fatigue*, 166: 107296 (2023).
64. Mühl, F., Damon, J., Dietrich, S., ve Schulze, V., "Simulation of induction hardening: Simulative sensitivity analysis with respect to material parameters and the surface layer state", *Computational Materials Science*, 184: 109916 (2020).
65. Yao, J. W., Yan, F. Y., Yan, M. F., Zhang, Y. X., Huang, D. M., ve Xu, Y. M., "The mechanism of surface nanocrystallization during plasma nitriding", *Applied Surface Science*, 488: 462–467 (2019).
66. Areitioaurtena, M., Segurajauregi, U., Urresti, I., Fisk, M., ve Ukar, E., "Predicting the induction hardened case in 42CrMo4 cylinders", *Procedia CIRP*, 87: 545–550 (2020).
67. Areitioaurtena, M., Segurajauregi, U., Fisk, M., Cabello, M. J., ve Ukar, E., "Numerical and experimental investigation of residual stresses during the induction hardening of 42CrMo4 steel", *European Journal Of Mechanics-A/Solids*, 96: 104766 (2022).
68. Areitioaurtena, M., Segurajauregi, U., Fisk, M., Cabello, M. J., ve Ukar, E., "Numerical and experimental investigation on the residual stresses generated by scanning induction hardening", *Procedia CIRP*, 108: 827–832 (2022).

69. Gao, K. ve Qin, X., "Effect of feed path on the spot continual induction hardening for different curved surfaces of AISI 1045 steel", *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 115: 104632 (2020).
70. Tong, D., Gu, J., ve Yang, F., "Numerical simulation on induction heat treatment process of a shaft part: Involving induction hardening and tempering", *Journal Of Materials Processing Technology*, 262: 277–289 (2018).
71. Sevgi, E. ve Çulha, O., "Isıl İşlem Şartlarının Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 23 (69): 1033–1048 (2021).
72. Aghajani, H. ve Behrangi, S., "Plasma nitriding of steels", First. Baskı, *Springer*, 3–7 (2017).
73. Jacobs, H., Rechenbach, D., ve Zachwieja, U., "Structure determination of  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N and  $\epsilon$ -Fe<sub>3</sub>N", *Journal Of Alloys And Compounds*, 227 (1): 10–17 (1995).
74. Howes, M. A. H. ve Totten, G. E., "Steel heat treatment handbook", *Marcel Dekker*, (1997).
75. Krauss, G., "Steels: heat treatment and processing principles", (1989).
76. Davis, J. R., "Surface hardening of steels: understanding the basics", *ASM International*, (2002).
77. Chandler, H., "Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels", *ASM International*, (1994).
78. Önder, K. G., "Gaz nitrürlemede işlem parametrelerinin 34CrAlNi7 çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü(Turkey)*, Sakarya, (2013).
79. Prabhudev, K. H., "Handbook of Heat treatment of steels", *Tata McGraw Hill*, New Delhi, (1988).
80. Rembges, W. ve Oppel, W., "Process control of plasma nitriding and plasma nitrocarburizing in industry", *Surface And Coatings Technology*, 59 (1–3): 129–134 (1993).
81. Xia, Y., Wang, S., Zhou, F., Wang, H., Lin, Y., ve Xu, T., "Tribological properties of plasma nitrided stainless steel against SAE52100 steel under ionic liquid lubrication condition", *Tribology International*, 39 (7): 635–640 (2006).
82. Camps, E., Becerril, F., Muhl, S., Alvarez-Fregoso, O., ve Villagrán, M., "Microwave plasma characteristics in steel nitriding process", *Thin Solid Films*, 373 (1–2): 293–298 (2000).

83. Sun, Y. ve Haruman, E., "Effect of carbon addition on low-temperature plasma nitriding characteristics of austenitic stainless steel", *Vacuum*, 81 (1): 114–119 (2006).
84. Totten, G. E., "Steel heat treatment: equipment and process design", *CRC Press*, (2006).
85. Internet: TECS, "Induction hardening of steel (surface hardening)", <https://www.tec-science.com/material-science/heat-treatment-steel/induction-hardening-surface-hardening/>.
86. Totten, G. E., "Steel heat treatment: metallurgy and technologies", Second Ed. Baskı, *CRC Press*, 781 (2006).
87. Yıldız, T. ve Gür, A. K., "Aşınma Sistemleri", *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4 (2): 86–91 (2006).
88. Ludema, K. C. ve Ajayi, L., "Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology", *CRC Press*, (2018).
89. Stachowiak, G. ve Batchelor, A. W., "Engineering tribology", First. Baskı, *Butterworth-Heinemann*, 483–593 (2013).
90. Singhal, A. K., Athavale, M. M., Li, H., ve Jiang, Y., "Mathematical basis and validation of the full cavitation model", *J. Fluids Eng.*, 124 (3): 617–624 (2002).
91. Chao, Q., Xu, Z., Tao, J., Liu, C., ve Zhai, J., "Cavitation in a high-speed aviation axial piston pump over a wide range of fluid temperatures", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part A: Journal Of Power And Energy*, 236 (4): 727–737 (2022).
92. Yin, F., Nie, S., Xiao, S., ve Hou, W., "Numerical and experimental study of cavitation performance in sea water hydraulic axial piston pump", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part I: Journal Of Systems And Control Engineering*, 230 (8): 716–735 (2016).
93. Geng, L., Chen, J., De La Torre, O., ve Escaler, X., "Numerical simulation of cavitation erosion aggressiveness induced by unsteady cloud cavitation", *Applied Sciences*, 10 (15): 5184 (2020).
94. Daure, J. L., Carrington, M. J., McCartney, D. G., Stewart, D. A., ve Shipway, P. H., "Measurement of friction in galling testing—an example of its use in characterising the galling behaviour of hardfacings at ambient and elevated temperature", *Wear*, 476: 203736 (2021).
95. Aghababaei, R., Warner, D. H., ve Molinari, J.-F., "Critical length scale controls adhesive wear mechanisms", *Nature Communications*, 7 (1): 11816 (2016).

96. Kumagai, K., Nomura, N., Ono, T., Hotta, M., ve Chiba, A., "Dry friction and wear behavior of forged Co–29Cr–6Mo alloy without Ni and C additions for implant applications", *Materials Transactions*, 46 (7): 1578–1587 (2005).
97. Liu, J., Notbohm, J. K., Carpick, R. W., ve Turner, K. T., "Method for characterizing nanoscale wear of atomic force microscope tips", *ACS Nano*, 4 (7): 3763–3772 (2010).
98. Li, Y., Wang, X., Yang, S., Hou, L., Wei, Y., Zhang, Z., ve Yang, X., "Investigation on wear behavior of cryogenically treated Ti-6Al-4V titanium alloy under dry and wet conditions", *Materials*, 12 (18): 2850 (2019).
99. Maleque, A., Cetin, S. Y., Masjuki, H. H., ve Hamdani, A., "Wear simulation of automotive engine component materials under biodiesel", *Journal Of Mechanical Engineering And Sciences*, 9167–9174 (2022).
100. Ajibola, O. O. ve Oloruntoba, D. T., "Wear and corrosion of cast Al alloy piston with and without brake oil", *Indian Journal Of Materials Science*, 2015: (2015).
101. López, A., Bayón, R., Pagano, F., Igartua, A., Arredondo, A., Arana, J. L., ve González, J. J., "Tribocorrosion behaviour of mooring high strength low alloy steels in synthetic seawater", *Wear*, 338: 1–10 (2015).
102. Li, P., Huang, X., ve Kong, D., "Corrosive wear and electrochemical corrosion performances of arc sprayed Al coating in 3.5% NaCl solution", *Anti-Corrosion Methods And Materials*, 68 (2): 95–104 (2021).
103. Archard, J. F. ve Hirst, W., "The wear of metals under unlubricated conditions", *Proceedings Of The Royal Society Of London. Series A. Mathematical And Physical Sciences*, 236 (1206): 397–410 (1956).
104. Myers, R. H., Montgomery, D. C., ve Anderson-Cook, C. M., "Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments", 3. Baskı, *John Wiley & Sons*, (2016).
105. Kamiloğlu, H. A. ve Turan, H., "Estimation of shear strength parameters of a high plasticity clayey soil stabilized with lime at different curing temperatures using Response Surface Methodology (RSM)", *Pamukkale University Journal Of Engineering Sciences*, 27 (6): 711–717 (2021).
106. Gönen, S., Ertürk, B., Tüccar, E., Taygun, M. E., ve Küçükbayrak, S., "Elektrospinning Parametrelerinin Jelatin/Biyoaktif Cam Nanolif Yapısı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi", *Anadolu University Journal Of Science And Technology A-Applied Sciences And Engineering*, 16 (2): 135–144 (2015).

107. de Oliveira Fernandes, D., Anflor, C. T. M., Goulart, J. N. V., ve Baranoğlu, B., "Nodular Cast Iron GGG40, 60, 70 Mechanical Characterization from Bars and Blocks Obtained from Brazilian Foundry", *Metals*, 12 (7): 1115 (2022).
108. Küçük, Y., Altaş, E., ve Topcu, M. E., "A comparative analysis of the effect of laser surface treatment on the dry sliding wear behavior of ductile cast irons with different microstructures", *Optik*, 274: 170540 (2023).
109. Prakash, P., Mytri, V. D., ve Hiremath, P. S., "Digital microstructure analysis system for testing and quantifying the ductile cast iron", *International Journal Of Computer Applications*, 19 (3): 22–27 (2011).
110. Wang, K. ve Lam, F., "Quadratic RSM models of processing parameters for three-layer oriented flakeboards", *Wood And Fiber Science*, 173–186 (1999).
111. Riazi, H., Ashrafizadeh, F., Hosseini, S. R., ve Ghomashchi, R., "Influence of simultaneous aging and plasma nitriding on fatigue performance of 17-4 PH stainless steel", *Materials Science And Engineering A*, 703: 262–269 (2017).
112. Kovacı, H., Baran, Ö., Yetim, A. F., Bozkurt, Y. B., Kara, L., ve Çelik, A., "The friction and wear performance of DLC coatings deposited on plasma nitrided AISI 4140 steel by magnetron sputtering under air and vacuum conditions", *Surface And Coatings Technology*, 349: 969–979 (2018).
113. Wang, Q., Huang, C., ve Zhang, L., "Microstructure and Tribological Properties of Plasma Nitriding Cast CoCrMo Alloy", *Journal Of Materials Science And Technology*, 28 (1): 60–66 (2012).
114. Smoljan, B., Cajner, F., ve Landek, D., "An Analysis of Induction Hardening of Ferritic Ductile Iron", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 11 (3): 278–282 (2002).
115. Chen, Y., Gan, C. H., Wang, L. X., Yu, G., ve Kaplan, A., "Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd:YAG laser beam with two-dimensional array distribution", *Applied Surface Science*, 245 (1–4): 316–321 (2005).
116. Riazi, H., Ashrafizadeh, F., Hosseini, S. R., ve Ghomashchi, R., "Influence of simultaneous aging and plasma nitriding on fatigue performance of 17-4 PH stainless steel", *Materials Science And Engineering: A*, 703: 262–269 (2017).
117. Muhammad Samiuddin, Jinglong, L., Muzamil, M., Siddiqui, M. A., Naseem, S., ve Jiangtao, X., "A Study of Induction Hardening Parameters for the DIN 42CrMo4 Alloy through Its Microhardness, Corrosion Resistance, and Microstructure Examination", *Physics Of Metals And Metallography*, 122 (11): 1121–1131 (2021).
118. Palaniradja, K., Alagumurthi, N., ve Soundararajan, V., "Hardness and Case Depth Analysis Through Optimization Techniques in Surface Hardening Processes", *The Open Materials Science Journal*, 4 (1): 38–63 (2010).

119. Kang, J., Wang, M., Yue, W., Fu, Z., Zhu, L., She, D., ve Wang, C., "Tribological behavior of titanium alloy treated by nitriding and surface texturing composite technology", *Materials*, 12 (2): 301 (2019).
120. Kara, F., Küçük, Y., Özbek, O., Özbek, N. A., Gök, M. S., Altaş, E., ve Uygur, İ., "Effect of cryogenic treatment on wear behavior of Slepner cold work tool steel", *Tribology International*, 180: 108301 (2023).
121. Sheng, S., Zhou, H., Wang, X., Qiao, Y., Yuan, H., Chen, J., Yang, L., Wang, D., Liu, Z., Zou, J., Zheng, Z., ve Li, J., "Friction and Wear Behaviors of Fe-19Cr-15Mn-0.66N Steel at High Temperature", *Coatings*, 11 (11): 1285 (2021).
122. Autay, R., Kchaou, M., ve Dammak, F., "Friction and wear behaviour of induction hardened ISO 42CrMo4 low-alloy steel under reciprocating sliding conditions", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part J: Journal Of Engineering Tribology*, 229 (2): 115–125 (2015).
123. Dong, J., Epp, J., Rocha, A. da S., Nunes, R. M., ve Zoch, H. W., "Investigation of the Influence Factors on Distortion in Induction-Hardened Steel Shafts Manufactured from Cold-Drawn Rod", *Metallurgical And Materials Transactions A*, 47 (2): 877–888 (2016).
124. Hájek, J., Rot, D., ve Jiřinec, J., "Distortion in Induction-Hardened Cylindrical Part", *Defect And Diffusion Forum*, 395: 30–44 (2019).
125. Toktaş, G., Toktaş, A., ve Duran, M. C., "Investigating the wear behaviour of induction hardened 100Cr6 steel", *Sakarya University Journal Of Science*, 22 (5): 1174–1180 (2018).
126. Mindivan, H., "Effects of combined diffusion treatments on the wear behaviour of hardox 400 steel", *Procedia Engineering*, 68: 710–715 (2013).
127. Mubarak Ali, M., Ganesh Sundara Raman, S., Pathak, S. D., ve Gnanamoorthy, R., "Fretting wear behaviour of plasma nitrided Ti-6Al-4V fretted against unnitrided Ti-6Al-4V and alumina counterbodies", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 62: 59–64 (2009).
128. Feldshtein, E., Devojno, O., Wojciechowski, S., Kardapolava, M., ve Kasiakova, I., "On the microstructure, microhardness and wear behavior of gray cast iron surface layer after laser strengthening", *Materials*, 15 (3): 1075 (2022).
129. Agunsoye, J. O., Bello, S. A., Awe, I. O., Yekinni, A. A., Adeyemo, R. G., ve Ologunagba, A. O., "Effects of Graphite Additions and Heat Treatment on the Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of 13% Chromium White Iron", *Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering*, 2 (04): 270 (2014).

130. Cao, Y. J., Sun, J. Q., Ma, F., Chen, Y. Y., Cheng, X. Z., Gao, X., ve Xie, K., "Effect of the microstructure and residual stress on tribological behavior of induction hardened GCr15 steel", *Tribology International*, 115: 108–115 (2017).
131. Totik, Y., Sadeler, R., Altun, H., ve Gavgali, M., "The effects of induction hardening on wear properties of AISI 4140 steel in dry sliding conditions", *Materials & Design*, 24 (1): 25–30 (2003).
132. Aswad, M. F., Mohammed, A. J., ve Faraj, S. R., "Induction Surface Hardening: a review", *Journal Of Physics: Conference Series*, 1973 (1): 012087 (2021).
133. Karaca, B. ve Şımşır, M., "The Effects of Austempering and Induction Hardening on the Wear Properties of Camshaft Made of Ductile Cast Iron", *Acta Physica Polonica A*, 131 (3): 448–453 (2017).
134. Qin, X., Gao, K., Wang, Z., ve Chen, X., "Effect of Spot Continual Induction Hardening on the Tribological Performance of Grey Cast Iron with Curved Surface", *Tribology Transactions*, 61 (1): 185–193 (2018).
135. Temiz, A., "The Effects of Process Parameters on Tensile Characteristics and Printing Time for Masked Stereolithography Components, Analyzed Using the Response Surface Method", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 1–10 (2023).
136. Simsek, S. ve Uslu, S., "Determination of a diesel engine operating parameters powered with canola, safflower and waste vegetable oil based biodiesel combination using response surface methodology (RSM)", *Fuel*, 270: 117496 (2020).
137. She, D., Liu, S., Kang, J., Yue, W., Zhu, L., Wang, C., Wang, H., Ma, G., ve Zhong, L., "Abrasive Wear Resistance of Plasma-Nitrided Ti Enhanced by Ultrasonic Surface Rolling Processing Pre-Treatment", *Materials*, 12 (19): 3260 (2019).
138. Meng, Y., Deng, J., Lu, Y., Wang, S., Wu, J., ve Sun, W., "Fabrication of AlTiN coatings deposited on the ultrasonic rolling textured substrates for improving coatings adhesion strength", *Applied Surface Science*, 550: 149394 (2021).

## ÖZGEÇMİŞ

İsmail Aykut KARAMANLI, ilk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladı. Daha sonra Ankara TOKİ Anadolu Lisesi’ni bitirdi. 2009 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Programı’nda öğrenime başlayıp 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı ve 2018 yılında mezun oldu. 2021 yılında Yozgat Bozok Üniversitesi Sorgun MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü’nde öğretim görevlisi olarak göreve başladı. Halen Yozgat Bozok Üniversitesi Sorgun MYO Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü’nde öğretim görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.