



**ÇELİK VE DÖKÜM KAM MİLLERİNİN PLAZMA
NİTRÜRLEME İŞLEMİ İLE TRİBOLOJİK VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Onur ÇOMAKLI

Doktora Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

2017

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

ÇELİK VE DÖKÜM KAM MİLLERİNİN PLAZMA NİTRÜRLEME
İŞLEMİ İLE TRIBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İYİLEŞTİRİLMESİ

Onur ÇOMAKLI

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

ERZURUM
2017

Her Hakkı Saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**ÇELİK VE DÖKÜM KAM MİLLERİNİN PLAZMA NİTRÜRLEME İŞLEMİ İLE
TRİBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Prof. Dr. Ayhan ÇELİK danışmanlığında, Onur ÇOMAKLI tarafından hazırlanan bu çalışma 28/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (..../....)** ile kabul edilmiştir.

Başkan :Prof.Dr. Ayhan ÇELİK
Üye :Prof.Dr. Mehmet KARAKAN
Üye :Doç.Dr. Ali Fatih YETİM
Üye :Doç.Dr. Yahya ALTUNPAK
Üye :Yrd.Doç.Dr. Zafer EKİNCİ

İmza :
İmza :
İmza :
İmza :
İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 24.../08.2017 tarih ve 34.../...34..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenmiştir.
Proje No: 0880.STZ.2015

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

ÇELİK VE DÖKÜM KAM MİLLERİNİN PLAZMA NİTRÜRLEME İŞLEMİ İLE TRIBOLOJİK VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Onur ÇOMAKLI

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

Kam milleri kendilerinden beklenen görevleri yerine getirirken, kamların yüzeyleri iç kısımlarına göre daha yüksek gerilme ve aşındırıcı kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu gerilme ve kuvvetler parçanın yüzey dayanım sınırını aşınca malzeme yüzeyinde aşınmalar başlamaktadır. Bu tip etkilere maruz kalan parçaların yüzey özelliklerini iyileştirilmesi gerekmektedir. Plazma ile nitrürleme yöntemi, bu tür problemlerin çözümünde kullanılan yöntemlerden birisidir.

Bu çalışmada, 31CrMoV9 nitrasyon çeliğinden üretilen ve gri dökme demirden dökülen kam millerinin kullanım ömürlerini artırmak için kam milleri yüzeyine plazma ile nitrürleme işlemi uygulanarak mekanik ve tribolojik özelliklerin artırılması hedeflenmiştir. Farklı işlem parametrelerde nitrürlenmiş kam mili malzemelerin yapısal, mekanik ve tribolojik özellikleri, sırasıyla XRD, SEM, 3D temassız profilometre, mikrosertlik, yorulma, pim-disk aşınma cihazlarıyla araştırılmıştır. Ayrıca yorulma test sonuçları sonlu elemanlar analizi sonuçları ile karşılaştırılmış, nitrürlenmiş çelik ve döküm kam millerinin sonlu eleman analizi yapılmıştır. Her iki kam milinde de en iyi sonuçlara gaz karışımındaki düşük azot oranı ve yüksek sürelerde yapılan nitrürleme işlemi ile ulaşılmıştır.

2017, 101 sayfa

Anahtar Kelimeler: Döküm, Nitrasyon Çeliği, Plazma ile Nitrürleme, Kam Mili, Aşınma, Yorulma

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

IMPROVEMENT OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF STEEL AND GREY CAST IRON CAMSHAFTS WITH PLASMA NITRIDING

Onur ÇOMAKLI

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Department of Construction and Manufacturing

Supervisor: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

The surface camshafts exposed to severe stresses and abrasive forces than are the interiors parts. As severe forces reach the limits of cam material's resistance, wear starts at the surface of the material. For these reasons, surface properties of materials which are subjected to such type effects should be improved. Plasma nitriding is a process used advanced surface modification techniques to solve these type problems.

In this study, it is aimed to increase the camshaft materials lifetime with performing plasma nitriding process on 31CrMoV9 nitriding steels and gray cast irons used as material for the camshaft manufacturing to improve mechanical and tribological properties. Structural, mechanical and tribological properties of the materials subjected to plasma nitriding with various process parameters were examined with XRD, SEM, 3D non-contact profilometer, microhardness, fatigue and pin-disc wear devices. Also, fatigue test results was compared with finite element analysis results and finite element analysis of nitrided steel and casting camshafts were analysed. Best results were obtained from plasma nitriding performed at low nitrogen content in the gas mixture and in high time periods.

2017, 101 pages

Keywords: Casting, Nitriding Steel, Plasma nitriding, Camshaft, Wear, Fatigue

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında yardımını, anlayışını, desteğini ve zamanını esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK ve hocam Sayın Doç. Dr. Ali Fatih YETİM'e gösterdikleri ilgi, sabır ve anlayıştan dolayı en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım esnasında katkı ve yardımları nedeniyle Sayın Yrd. Doç. Dr. Tuba YETİM'e, Sayın Doç. Dr. Fatih Yıldız'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Halim KOVACI'ya, Sayın Yrd. Doç. Dr. Özgü BAYRAK'a, Uzman Mustafa YAZICI'ya, Sayın Arş. Gör. Mevra ASLAN'a, Sayın Arş. Gör. Burak BOZKURT'a, Sayın Arş. Gör. Taha ACAR'a Sayın Arş. Gör. Burak HÜLAGÜ ve tezin hazırlanmasında emeği geçen tüm arkadaşlarıma içtenlikle teşekkür ederim.

Yapılan bu çalışmayı 0880.STZ.2015 no'lu proje kapsamında destekleyen Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığına teşekkürlerimi sunarım.

Bana hayatım boyunca destek olan aileme ve desteğini, sabrını, anlayışını her zaman yanımda hissettiğim sevgili eşim Mesude ÇOMAKLI'ya teşekkür ederim.

Onur ÇOMAKLI

Temmuz, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. Kam Millerinin Tarihçesi	8
2.2. Kam Mili	8
2.2.1. Kam milinin yapısı	8
2.3. Kam Mili Üretiminde Kullanılan Malzemeler	10
2.3.1. Küresel dökme demir	10
2.3.2. Temper dökme demir	10
2.3.3. Gri dökme demir	11
2.3.4. AISI 1040 çeliği	12
2.3.5. AISI 8620 çeliği	12
2.3.6. AISI 4140 çeliği	13
2.3.7. Nitrasyon çelikleri	13
2.3.7.a. 31CrMoV9 çeliği.....	13
2.4. Nitrüleme Yöntemleri	14
2.4.1. Gaz nitrüleme.....	14
2.4.2. Sıvı nitrüleme.....	15
2.4.3. Katı (Toz) nitrüleme.....	15
2.4.4. Plazma nitrüleme.....	15
2.4.4.a. Plazmanın tanımı	15
2.4.4.b. Plazmanın özellikleri.....	16
2.4.4.c. Elektrik boşlaması ile plazmanın elde edilmesi	17
2.4.4.d. Plazma ile nitrüleme işleminin uygulanması	18

2.4.4.e. Plazma ile nitrürleme sonrasında oluşan içyapılar	19
2.4.4.f. Plazma nitrürlemenin avantajları	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal.....	22
3.2. Çelik Kam Mili Üretimi	22
3.3. Döküm Kam Milinin Üretimi	24
3.4. Çelik ve Döküm Kam Millerinin Plazma Nitrürleme İşlemine Hazırlanması	25
3.5. Çelik ve Döküm Kam Millerine Deney Tablosuna Göre Plazma Nitrürleme İşleminin Uygulanması	26
3.6. XRD, SEM ve Optik Mikroskop Çalışmaları	28
3.7. Artık Gerilme Ölçümleri	30
3.8. Mikrosertlik ve Nanosertlik Ölçümleri	30
3.9. Aşınma Deneyleri.....	32
3.10. Yorulma Deneyleri	34
3.11. Yorulma Hasarının Sonlu Elemanlar Analizi.....	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	43
4.1. Çelik Kam Milinin Plazma Nitrürleme Davranışı.....	43
4.1.1. XRD analizi.....	43
4.1.2. Artık gerilme analizleri	44
4.1.3. Mikroyapı analizleri	46
4.1.4. Mikrosertlik incelemeleri	47
4.1.5. Sürtünme ve aşınma analizleri	50
4.1.6. Yorulma analizleri	61
4.1.7. İşlemsiz ve nitrürlenmiş çelik yorulma numunesi ve nitrürlenmiş çelik kam milinin sonlu elemanlar analizleri	66
4.2. Döküm Kam Milinin Plazma Nitrürleme Davranışı	69
4.2.1. XRD analizi.....	69
4.2.2. Artık gerilme analizleri	70
4.2.3. Mikroyapı analizleri	71
4.2.3. Mikrosertlik incelemeleri	73
4.2.4. Sürtünme ve Aşınma Analizleri	75
4.2.5. Yorulma analizleri	88

4.2.6. İşlemsiz ve nitrülenmiş döküm yorulma numunesi ve nitrülenmiş kam milinin sonlu elemanlar analizleri.....	91
5. SONUÇLAR.....	96
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	102



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

E	Elastisite modülü
GPa	Gigapascal
Kg	Kilogram
MPa	Megapascal
N	Newton
Pa	Pascal
R _a	Yüzey Pürüzlülüğü
s	Saniye
V	Gerilim
λ	Dalga boyu
μm	Mikrometre
ω	Geliş/ İncident Açısı
σ_{ak}	Akma Gerilmesi
ν	Poisson oranı

Kısaltmalar

3D	Üç Boyutlu
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al	Alüminyum
C	Karbon
Ce	Seryum
Co	Kobalt
Fe	Demir
HCl	Hidroklorik Asit
HNO ₃	Nitrik asit
HV	Vickers Sertlik Birimi
Mg	Magnezyum

Mn	Mangan
N	Çevrim Sayısı
S	Gerilme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
V	Vanadyum
XRD	X-Işını Difraktometresi
α	HMK Yapılı Demir Fazı
γ	YMK Yapılı Demir Nitrür Fazı
ε	HSP Yapılı Demir Nitrür Fazı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Dört pistonlu içten yanmalı motorun şematik görünümü	1
Şekil 1.2. Kam mekanizması	2
Şekil 1.3. İl Taccola'nın kam tasarımı	3
Şekil 2.1. Kam profillerinin genel yapısı	9
Şekil 2.2. Nitrürleme yöntemleri	14
Şekil 2.3. Maddenin dört hali.....	16
Şekil 2.4. Farklı boşalma tiplerinin gerilim-akım karakteristiği.	17
Şekil 2.5. Plazma ile nitrürleme işleminin mekanizması.....	19
Şekil 2.6. Plazma ile nitrürleme işleminde oluşan tabakaların şematik görünümü	20
Şekil 3.1. a-) Çelik ve b-) Gri döküm kam milleri c-) Nitrürleme öncesi kesilmiş d-) Çelik ve d-) Gri döküm kam millerinin tutucuya yerleştirilmesi	25
Şekil 3.2. Hassas kesme cihazı	26
Şekil 3.3. Plazma Nitrürleme ünitesinin şematik görünümü	28
Şekil 3.4. X-Işını Difraktometresi.....	29
Şekil 3.5. Taramalı elektron mikroskobu.....	29
Şekil 3.6. Mikrosertlik cihazı.....	31
Şekil 3.7. Mekanik Test Cihazı (UMT)	33
Şekil 3.8. Sürtünme ve aşınma test düzeneği.....	33
Şekil 3.9. 3D temassız profilometre.....	34
Şekil 3.10. Yorulma numunesi	35
Şekil 3.11. Döner eğilmeli yorulma cihazı	36
Şekil 3.12. a-) Yorulma modeli b-) Çelik ve c-) Döküm kam milli modelleri	37
Şekil 3.13. a-)Yorulma numunesi, b-) Çelik ve c-) Döküm kam milli modellerine uygulanan mesh işlemi.....	39
Şekil 3.14. a-) Yorulma numunesi, b-) Çelik ve c-) Döküm kam milli modelleri için analiz ortamları.....	40
Şekil 3.15.) a) Nitrürlenmiş malzemenin şematik gösterimi, b) yay modeli.....	41

Şekil 4.1. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik kam milinin XRD grafiği	43
Şekil 4.2. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik kam milinin farklı incident açılarında elde edilen artık gerilme değerleri	45
Şekil 4.3. Nitrürlenmiş çelik kam milinin kesit SEM görüntüleri	47
Şekil 4.4. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik kam milinin yüzey pürüzlülüğü	47
Şekil 4.5. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik kam milinin sertlik dağılımı olan azotun hızının artmasına neden olmuştur.	48
Şekil 4.6. Nitrürlenmiş çelik kam milinin mikrosertlik ölçümlerinin SEM kesit resimleri	49
Şekil 4.7. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik numunelerin kuru (yağsız) ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği	50
Şekil 4.8. İşlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H ₂ -%6N ₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş çelik numunelerin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği	51
Şekil 4.9. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik numunelerin kuru (yağsız) ortamdaki aşınma oranları	52
Şekil 4.10. İşlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H ₂ -%6N ₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş çelik numunelerin 500m’lik aşınma mesafedeki kuru (yağsız) ve yağlı ortamdaki aşınma oranları.....	53
Şekil 4.11. İşlemsiz ve nitrürlenmiş çelik numunelerin kuru ortamdaki 500m’lik aşınma mesafesinde aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri.....	57
Şekil 4.12. İşlemsiz ve nitrürlenmiş çelik numunelerin kuru ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri	59
Şekil 4.13. İşlemsiz ve nitrürlenmiş çelik numunelerin 500m’lik aşınma mesafelerinde kuru ve yağlı ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri	61
Şekil 4.14. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş çeliğinin S-N eğrileri	62
Şekil 4.15. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik numuneler için yorulma limiti ve difüzyon tabakası kalınlığı	63
Şekil 4.16. Nitrürlenmiş çelik numunesinin yorulma testi sonrası hasar yüzeyinin makro kırık karakteristiği	65

Şekil 4.17. İşlemsiz çelik numune için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri	66
Şekil 4.18. Nitrürlenmiş çelik için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri	67
Şekil 4.19. Nitrürlenmiş çelik kam mili için gerilme dağılımı	68
Şekil 4.20. Nitrürlenmiş çelik kam mili için ömür dağılımı	68
Şekil 4.21. Farklı gaz karışımı oranlarında nitrürlenmiş döküm kam milinin XRD grafiği	69
Şekil 4.22. Farklı işlem süresi ve gaz karışımı oranlarında nitrürlenmiş gri dökme demirin XRD grafiği	70
Şekil 4.23. Farklı şartlarda nitrürlenmiş gri dökme demirin farklı incident açılarında elde edilen artık gerilme değerleri	71
Şekil 4.24. Nitrürlenmiş Gri dökme demirin kesit SEM görüntüleri.....	72
Şekil 4.25. Farklı şartlarda nitrürlenmiş döküm kam milinin yüzey pürüzlülüğü	73
Şekil 4.26. Farklı şartlarda nitrürlenmiş Gri dökme demirin sertlik dağılımı	74
Şekil 4.27. Farklı gaz karışımlarından plazma ile nitrürlenmiş döküm numunelerin mikrosertlik ölçümlerinin SEM kesit resimleri.....	75
Şekil 4.28. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş döküm numunelerin kuru (yağsız) ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.....	76
Şekil 4.29. İşlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H ₂ -%6N ₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş gri dökme demirin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği.....	77
Şekil 4.30. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş Gri dökme demirin kuru (yağsız) ortamdaki aşınma oranları	78
Şekil 4.31. İşlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H ₂ -%6N ₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş Gri dökme demirin 500m’lik aşınma mesafedeki kuru (yağsız) ve yağlı ortamdaki aşınma oranları.....	79
Şekil 4.32. İşlemsiz ve nitrürlenmiş gri dökümün numunlerin kuru ortamdaki 500m’lik aşınma mesafesinde aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri.....	82
Şekil 4.33. İşlemsiz ve nitrürlenmiş gri döküm numunlerin kuru ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri	84

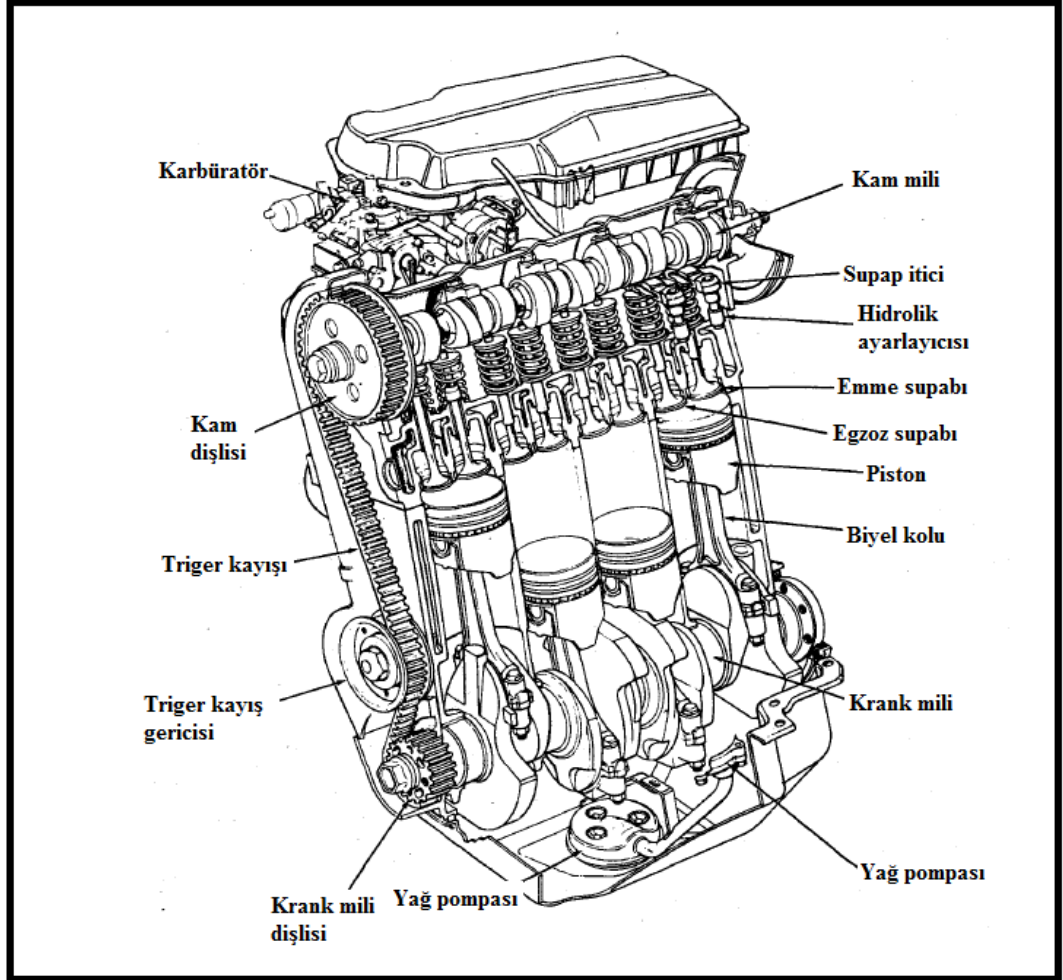
Şekil 4.34. İşlemsiz ve nitrülenmiş gri dökümün 500m'lik aşınma mesafelerinde kuru ve yağlı ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri	86
Şekil 4.35. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrülenmiş döküm numnelerin S-N eğrileri	88
Şekil 4.36. Farklı şartlarda nitrülenmiş döküm numuneler için yorulma limiti ve yüzey sertliği	89
Şekil 4.37. Farklı şartlarda nitrülenmiş döküm numuneler için yorulma limiti ve difüzyon tabakası kalınlığı	89
Şekil 4.38. Nitrülenmiş döküm numunesinin yorulma testi sonrası hasar yüzeyinin makro kırık karakteristiği	91
Şekil 4.39. İşlemsiz döküm için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri	92
Şekil 4.40. Nitrülenmiş döküm için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri	93
Şekil 4.41. Nitrülenmiş döküm kam mili için gerilme dağılımı	94
Şekil 4.42. Nitrülenmiş döküm kam mili için ömür dağılımı.....	95

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. 31CrMoV9 çeliği kam mili kimyasal kompozisyonu.....	22
Çizelge 3.2. Gri döküm kam mili kimyasal kompozisyonu.....	22
Çizelge 3.3. Kullanılan kam milleri için nitürleme şartları	27
Çizelge 3.4. Aşınma deney şartları	32
Çizelge 4.1. Farklı plazma nitürleme parametreleriyle beyaz ve difüzyon tabakaların, yüzey sertlik ve pürüzlülüğünün, kuru ve yağlı ortamda sürtünme katsayısının ve aşınma oranının değişimi	54
Çizelge 4.2. Farklı plazma nitürleme parametreleriyle beyaz ve difüzyon tabakaların, yüzey sertlik ve pürüzlülüğünün, kuru ve yağlı ortamda sürtünme katsayısının ve aşınma oranının değişimi	87

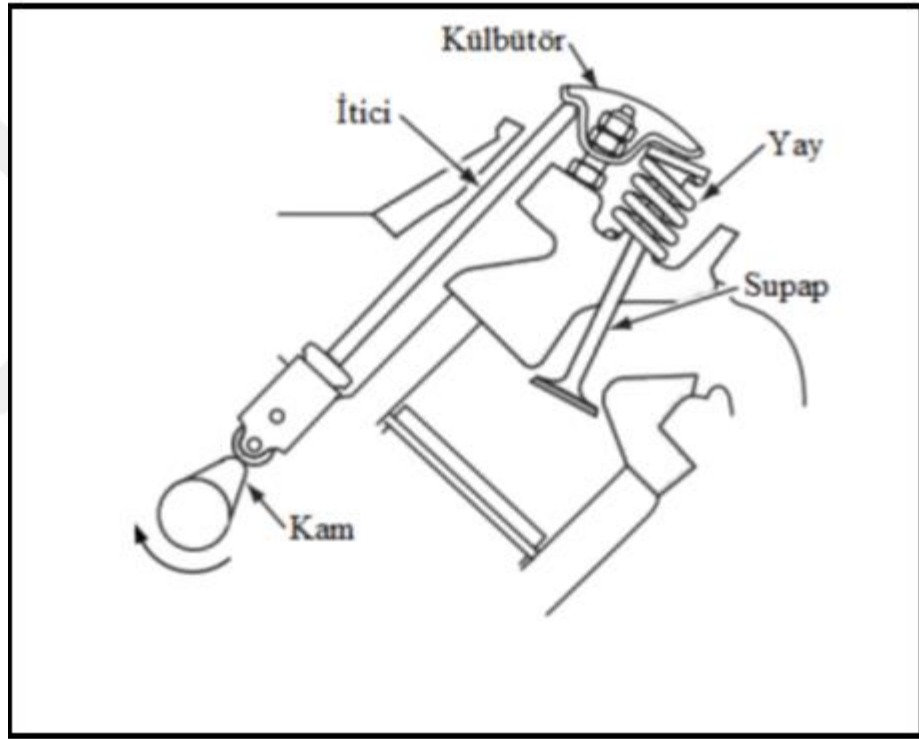
1. GİRİŞ

Yakıtın yakılması sonucu oluşan ısı enerjisini krank-biyel mekanizması yardımıyla hareket enerjisine çeviren motorlara içten yanmalı motorlar denir. Bu tip motorlarda ana mil olan krank miline bağlı pistonlar bulunmaktadır. Bu pistonların yüzeyine yanma sonucu elde edilmiş yüksek basınç ve sıcaklıktaki gazlar etki eder ve onları hareket geçirerek krank milinin dönmesini sağlamaktadır (Şekil 1.1). Bu mil de şansumana ve dolayısıyla tekerleklerle bağlı olduğundan araç hareket kazanmaya başlamaktadır.



Şekil 1.1. Dört pistonlu içten yanmalı motorun şematik görünümü

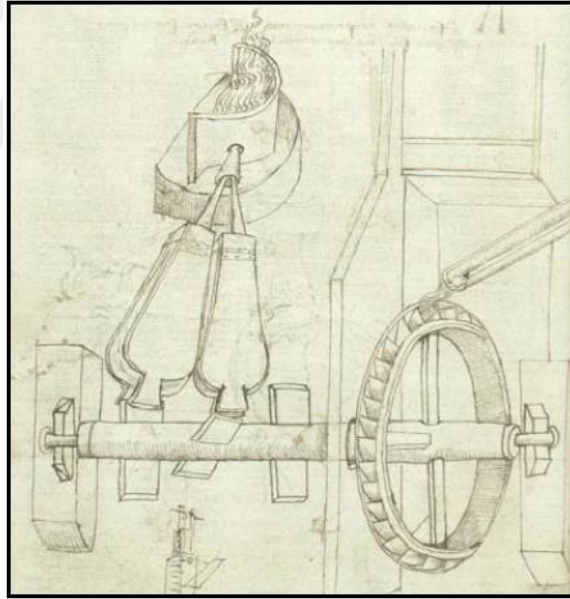
Yakıt, karbüratör veya yakıt enjeksiyonu sistemiyle belli bir oranda hava ile karıştırılarak yanma odası içine gönderilmektedir. Bu sırada karışım piston tarafından sıkıştırılarak buji yardımıyla ateşlenmektedir. Dizel motorlarda ise ateşleme buji yerine yüksek basınç altında sıkıştırmayla yapılmaktadır. Oluşan patlamayla piston yukarı aşağı hareket etmeye başlamaktadır. Daha sonra egzoz supabı aracılığı ile yanmanın ardından oluşan kirli gaz egzoz manifolduna ve oradan da egzozla yollanır ve dışarı atılmaktadır.



Şekil 1.2. Kam mekanizması (Arabacı vd 2012)

İçten yanmalı motorlarda emme kanalında bulunan akıt-hava karışımının silindir içerisine girişini sağlayan emme supabı ve yanmış egzoz gazının çıkışını silindir içerisinden egzoz kanalına iletimini ise sağlayan egzoz supapların hareketini sağlayan kam, Şekil 1.2’de şematik olarak görülmektedir. Kam, istenen hareketi doğrudan yüzey teması ile diğer mekanik parçaya ileten bir elemandır. Motorlarda kamlar bir mil üzerine konumlandırıldıklarından dolayı bu mil kam mili olarak adlandırılmaktadır (Taylor 1985; Ganesan 2012; Ferrari 2014).

İlk kam milleri, tarak şeklinde çıkıntıları olan basit şaftlardır. Bu tür kam milleri alternatif bir hareket elde etmek için kullanılmıştır. Avrupa’da kam milleriyle ilgili ilk dokümanlar 13. yüzyılda yaşamış olan mimar ve mühendis Fransız Villard de Honnecourt’un belgeleri arasında bulunmuştur. Daha sonra El-Cezeri kam milini ilk defa 1206 yılında otomatik su saatinde ve su kaldıracında kullanmıştır. Şekil 1.3’de şematik olarak gösterilen tahrikini kam milinden alan üfleme motorunu 14. Yüzylında İl Taccola tarafından tasarlanmıştır. 1588’lerde Agostino Ramelli tasarladığı su kaldırma makinasında pozitif kamlar kullanmıştır. Sonuç olarak, kam ve kam mili mekanizmalarının gerçek anlamdaki gelişimi 18. ve 19. yüzyıllarda metal bir mil üzerine yerleştirilmiş çok sayıda kam sayesinde döngüsel ve ardışık hareketler elde edilmesiyle olmuştur.



Şekil 1.3. İl Taccola’nın kam tasarımı (Meneghetti 2011)

Ayrıca bu tür miller özellikle müzik kutularının mekanizmalarında da kullanılmıştır. Günümüzde ise özellikle, kam düzenekleri patlamalı ve yanmalı motorlarda kullanılmaktadır (Müller 1987; Kerle 2009; Meneghetti 2011).

Geçmişte ve günümüzde kam milleri güç aktarma sistemleri için vazgeçilmez ve dayanıklı bileşendir. Yüksek yük taşıma kapasiteleri, çalışma hızları ve uzun hizmet ömürleri bu malzemelerin en önemli özelliklerindendir. Yüksek performanslı bir kam mili için yüksek dayanım ve uzun yorulma ömrü gerekmesinin yanı sıra aşınma ve korozyon direnci gibi ekstra özelliklere de bağlı olarak gerekli olmaktadır. Bu talepleri yerine getirmek amacıyla, kam milleri çeliklerden veya dökme demirlerden imal edilmektedir. Özellikle, dökme demirlerin çok geniş aralıkta değişen mukavemet, sertlik, korozyon direnci, kolay işlenebilme, titreşimleri yutma ve düşük maliyeti gibi özelliklerinden çeliklerin ise tek bir işlemle elde edilebilmesi, talaşlı imalat tekniğinde işleme kolaylığı, iyi mekanik dayanımı ve yüksek tokluğuna sahip olmalarından dolayı kam mili üretiminde kullanılmaktadır (Eyre *et al.* 1980; Sübütay *et al.* 2016; Brühl *et al.* 2016).

Kam milinin kamları ile külbütörler direkt temas halindedir. Kam mili külbütöre hareket verirken aşınmaya maruz kalabilmektedir. Meydana gelen aşınma, subapların daha az açılmasına, subapların sesli çalışmasına ve erken açılıp kapanmalarına neden olmaktadır. Sonuçta, subapların açılıp-kapanma zamanlamasındaki en ufak değişim kötü yanmaya, dolayısıyla motorun güçten düşmesine neden olur. Bu sebepten dolayı kam millerinde bulunan kam millerinin tribolojik özelliklerini yüzey işlemleriyle iyileştirilebileceği düşünülmüştür. Bununla ilgili bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. S.P. Brühl *et al.* (2016) 1045 çeliğinden üretilen kam millerine plazma ile nitrüleme ve nitrokarbürleme yöntemlerini uygulamışlardır. Plazma işlemleri sonrasında nitrürlenmiş kam millerinin tribolojik özelliklerinin hem işlemsiz kam milleri hem de nitrokarbürlenmiş kam millerine göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Selvan *et al.* (1997) lazer yüzey sertleştirme tekniğiyle kam mili malzemesi olarak kullanılan AISI 5135 çeliğinin yüzeyini sertleştirmişlerdir. Bu işlem sonrasında çelik malzemenin aşınma davranışını araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre malzemenin aşınma

dirençlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Dobrenizki *et al.* (2016) içten yanmalı motorun önemli parçalarından kam milleri ve külbütör arasındaki sürtünmesini azaltmak ve kullanım ömrünü artırmak için PVD kaplama yöntemi ile kam millerine DLC (elmas benzeri karbon) kaplamışlardır. Bu kaplamaların sürtünme ve aşınma değerlerini analiz etmişler ve bunun sonucunda sürtünme ve aşınmada azalma olduğunu ifade etmişlerdir. Pekgöz *et al.* (2013) kam mili üretiminde kullanılan AISI 8620 çeliği tuz banyosunda sıvı sementasyon yöntemiyle sertleştirilmiş, işlem öncesi ve sonrasındaki sertlik değişimleri incelenmiştir. Sementasyon işlemi sonucunda, yüzey sertliklerinin iki kattan daha fazla miktarda arttığı tespit edilmiştir. Yılmaz *vd* (2016) Küresel grafitli dökme demirin yorulma davranışlarına borlamanın etkisini araştırmışlardır. Buna göre borlama işlemi malzemenin yorulma ömrünü artırdığını görmüşlerdir.

Plazma ile nitrürleme işlemi difüzyon yoluyla yüzey sertleştirmede kullanılan yaygın metotlardan birisidir. Plazma nitrürleme yüzey işlemi makine elamanı üretiminde kullanılan çelik ve dökme demirlerin efektif olarak kullanılabilmesi ve kullanım ömrünün artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Nitrürleme işlemi sonrası yüzeyde oluşan beyaz tabaka ve altında oluşan difüzyon tabakası, malzemenin aşınma ve yorulma direncini artırmaktadır. Bu alanda yapılmış birçok çalışma, konunun önemini ortaya koymaktadır. Çelik *et al.* (2001) yaptıkları çalışmada 8620 çeliğinin yüzey sertliğini artırmak amacıyla plazmayla nitrürleme yöntemini kullanmışlardır. Mikrosertlik testi sonuçlarına göre nitrürlenmiş çeliğinin yüzey sertliği işlemsiz çeliğe göre üç kat artmıştır. Xi *et al.* (2008) plazma ile nitrürlemiş AISI 420 martensitik paslanmaz çeliğinin aşınma özelliklerini inceledikleri çalışmada, nitrürleme işlemi sonrası malzemedeki sertlik değerindeki artış sebebiyle yüksek aşınma direnci sergilediklerini ifade etmişlerdir. Yıldız *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada plazma nitrürleme işleminin, 316 L paslanmaz çeliğine beyaz ve difüzyon tabakası oluşturarak paslanmaz çeliğin yüzey sertliğini ve yorulma dayanımını artırmada çok etkili bir işlem olduğu ispatlamışlardır.

Bilimsel literatürde demir esaslı alaşımlara uygulanan plazma ile nitrürleme yönteminin parametrelerinin tribolojik ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini değerlendiren birçok

çalışma yapılmıştır. Fossati *et al.* (2006) yaptıkları çalışmada, AISI 316L paslanmaz çeliğine farklı işlem sürelerinde plazma ile nitrürleme işlemini uygulamışlardır. İşlem süresinin artmasıyla yüzey sertliğinin parabolik olarak büyüdüğünü belirtmişlerdir. Karamiş *et al.* (1991) ise nitrürlenmiş AISI H13 çeliğine nitrürleme süresinin aşınma direncine etkisini incelemişlerdir. Nitrürleme süresi artınca aşınma direncinin arttığını elde ettiği deneysel sonuçlarla ispatlamışlardır. Plazma ile nitrürlemede sıcaklığın etkisini etkisi çok önemlidir. Yetim *et al.* (2014) işlem sıcaklığının etkisini incelemek için plazma nitrürleme yöntemi ile farklı sıcaklıklarda 316L paslanmaz çelik numunelerini nitrürlemişlerdir. Plazma nitrürleme sonrasında, beyaz tabaka kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve sertliğini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, işlem sıcaklığının artmasıyla tabaka kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve sertliği doğru orantılı olarak arttığı tespit etmişlerdir. Ayrıca, 316L paslanmaz çeliğinin nitrürleme ile aşınma direncinin geliştiğini ve nitrürleme sıcaklığının artmasıyla aşınma direncinin arttığı gözlemlemişlerdir. Plazma ile nitrürleme işleminde nitrürleme sıcaklığının yorulma ömrü üzerine etkisi büyüktür. Şirin *et al.* (2008) AISI 4340 çeliğinin yorulma ömrü üzerine plazma nitrürlemenin etkisi araştırmışlar ve nitrürleme sıcaklığının yorulma ömrü üzerine etkisi analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarına göre, nitrürleme sıcaklığının 500°C'den 540°C'ye artmasıyla yorulma ömrünün de arttığını ifade etmişlerdir. R. Mohammadzadeh *et al.* (2014) AISI M2 takım plazma ile nitrürlemesinde gaz karışımının mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkisini görmek için 450°C sıcaklığında 8 saatlik işlem süresinde 25N₂–75H₂, 50N₂–50H₂ ve 75N₂–25H₂ gaz karışımlarında deneyler yapmışlardır. Plazma gaz karışımındaki azot oranı arttığında nitrür tabaka kalınlığının arttığını saptamışlardır. Nitrürleme işlemi sonrası, çeliğinin yüzey sertliği önemli ölçüde arttığını gözlemlemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünü ve en iyi aşınma direncini ise 25N₂–75H₂ gaz oranında plazma ile nitrürleme işleminde tespit etmişlerdir. A. Alsaran *et al.* (2002) gaz karışımının plazma ile nitrürlenmiş 5140 çeliğinin yorulma dayanımına etkisini incelemek için yorulma numunelerini farklı gaz karışımı oranlarında (0.05, 0.33 ve 3 N₂/H₂) plazma ile nitrürleyerek döner eğmeli yorulma cihazıyla deneyler yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, en yüksek yorulma dayanımını 0.33 N₂/H₂ gaz karışımı ile nitrürlenmiş numunelerde tespit etmişlerdir.

Sonlu elemanlar metodu, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir hassaslıkta çözüm arayan sayısal çözüm yöntemidir. Özellikle kam millerinin yorulma problemleri sonlu elemanlar yöntemi ile incelendiğinde, millerin dinamik yükleme altında modellenmekte ve elde edilen sayısal sonuçlardan yorulma davranışı hakkında bilgiler elde edilmektedir. Üstelik bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizi yöntemleri kullanılarak, parçaların güvenilirliğini arttırmaya ve teorik ile pratik arasındaki farkların azaltılmasına çalışılmıştır. Yıldız *et al.* (2011) nitrürlenmiş çelik yorulma numunelerinin hem deneysel hem de sonlu elemanlar metodu ile teorik olarak yorulma ömürlerini karşılaştırmışlardır. Deneysel olarak elde edilen değerler ile sonlu elemanlar analizinden elde edilen değerler birbirine yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.

Kam mili karmaşık geometriye sahip olmasına rağmen, sonlu elemanlar metodu ile herhangi bir deneysel test yapmaksızın kam milinin yorulma dayanımı hakkında bir ön bilgiye sahip olmak gerek maddi açıdan gerekse zaman kaybının önlenmesi açısından önemlidir (Patil 2013; Gönkan 2014).

Bu çalışmada, 31CrMoV9 nitrasyon çeliğinden ve gri dökme demirden üretilen kam millerinin mekanik ve tribolojik özelliklerinin geliştirilmesi için plazma ile nitrürleme işlemi uygulanmıştır. İlk aşamada, çelik kam millinin plazma ile nitrürleme işlemi 500°C işlem sıcaklığı, 4 saatlik işlem süresi ve %50N₂-%50H₂, %30N₂-%70H₂, %10N₂-%90H₂, %6N₂-%94H₂ gaz karışım oranlarında yapılmıştır. Döküm kam mili için seçilen nitrürleme parametreleri ise 500°C işlem sıcaklığı, 2 ve 4 saatlik işlem süresi ve %50N₂-%50H₂, %30N₂-%70H₂, %10N₂-%90H₂, %6N₂-%94H₂ gaz karışım oranlarıdır. Bu işlemlerden sonra mekanik özelliklerin tespit edilmesi için yorulma deneyleri ve mikro sertlik ölçümleri, tribolojik özelliklerin belirlenmesi için ise aşınma deneyleri yapılmıştır. Ayrıca yapısal özelliklerin tespit edilmesi için XRD ve SEM kullanılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kam Millerinin Tarihçesi

Günümüzde yaygın olarak kullanılan kam milleri önemli makine elemanlarından birisidir. Geçmişe gittiğimizde en eski belgelerde kam milleri testere, üfleç, çekiç gibi aletlerin çalışılmasında kullanılmıştır. Kamlar ilk kez M.Ö. 3. yüzyılda su gücüyle hareket ettirilen mekanik yapılarda görülmüştür. Sonra kam millerini Mezopotamya’da 1206 yılında Al-Jazari tarafından tanımlanmıştır. Al-Jazari kam millerini su çarkında, su saatinde ve otomatlarda kullanmıştır. Kam ve kam mili daha sonra, 14. yüzyılları başında Avrupa mekanizmalarında gözlemlenmiştir ve ilk dokümanlar mimar ve mühendis Fransız Villard de Honnecourt’un belgeleri arasında bulunmuştur. 14. Yüzyılın sonlarına İl Taccola tahrikini kam milinden alan üfleç motorunu imal etmiştir. 18 yüzyılına doğru gelindiğinde laterna ve müzik kutularının mekanizmasında kullanılan silindirik bir mil üzerine birçok kam yerleştirilmiş kam millerini görmek mümkündür. ilk kez 1902 yılında üstten eksantrik mili olan otomobil motorlarında kullanılmaya başlanılmıştır (Lehr 1981; Ifrah 2001; Wilson 2002; Meneghetti 2011).

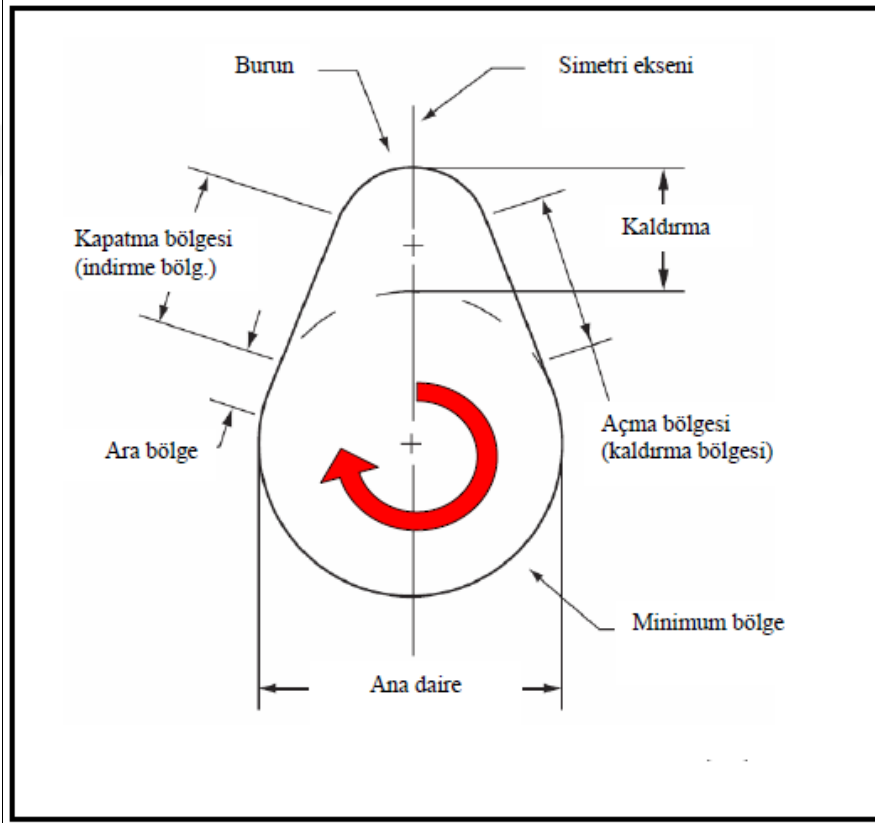
2.2. Kam Mili

Hareketini krank milinden alan supapları istenilen zamanda açma, istenilen zamanda kapatma ve supapları gerektiği kadar açık tutma görevlerini yerine getiren motor elemanıdır. Kam mili yukarıda belirtilen görevlerinin dışında üzerinde bulunan bir helis dişli yardımıyla distribütör ve yağ pompasını, özel bir kam vasıtasıyla da yakıt otomatini çalıştırmaktadır (Hammill 1998).

2.2.1. Kam milinin yapısı

Kamın profili geometrisi ve kısımları Şekil 2.1’de görülmektedir. Şekile göre, kam milinin üst eğrisel kısmı supap iticisini kaldırma ve indirme hareketinin verildiği bölge

olarak adlandırılmaktadır. Buraya kam burnu, açma ve kapama bölgesi de dahildir. Bu bölgeler hızdaki ve süre açısındaki farklılıklardan dolayı farklı kaldırma oranlarına sahiptir ve krank milinin dönüş açısı derecesiyle hesaplanır. Ara bölgede kam mili profili açma bölgesiyle kapama bölgesi arasındaki orta noktadadır. Açma bölgesi, kaldırma işleminin başladığı yer olarak açıklanır, kaldırma işlemi kam burnuna kadar devam eder. Kapatma bölgesi, kam burnundan aşağı doğru olan bölgedir. Kam burnu, kam profili üzerindeki en üst noktadır ve bu noktada valfler maksimum açılma durumdadır. Valfler kapama konumuna geçmeden öne mümkün olduğu kadar bu noktada tutulur. Ana daire veya minimum bölge olarak adlandırılan kısım, profilin en alt bölümüdür ve bu bölgede valfler kapalı durumdadır. Bu bölge tüm valf ayarlarının yapıldığı noktadır (Rothbart 2004; Karamış 2010).



Şekil 2.1. Kam profillerinin genel yapısı (Karamış 2010)

2.3. Kam Mili Üretiminde Kullanılan Malzemeler

2.3.1. Küresel dökme demir

Küresel grafitli dökme demir, dokusu içerisindeki grafitleri küresel şekilde olan demir-karbon döküm malzemedir. Sıvı demire bir miktar magnezyum (Mg) ve seryum (Ce) ilavesiyle grafitler yaprak yerine küresel olarak katılarak yüksek dayanım özelliklerinde bir malzemeye dönüşür. Dökme demir türleri içerisinde bu malzeme, en tok ve dayanıklı olanıdır. Dökme demir kırılmandır. Küresel grafitli dökme demir diğer dökme demirlere göre daha sünektir. Dökme demirin iyi bilinen dökülebilirlik, işlenebilirlik, yüklenme kapasitesi ve üretim özellikleri gibi özelliklerine ilave olarak küresel grafitli dökme demirlerde geniş mukavemet aralıkları, aşınma direnci, yorulma direnci, tokluk ve süneklik özellikleri vardır. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri oldukça iyidir. Talaşlı imalat işçiliği kolaydır. Ayrıca korozyona karşı da dayanıklıdır. Küresel grafitli dökme demirin kullanım alanları aşağıda sıralanabilir;

- **Otomotiv:** Diferansiyel dişli kutuları, Kam milleri
- **Madencilik ve Metalürji:** Kırıcı gövdeler, Alüminyum ve Kurşun Ergitme Potoları, Sıcak Hadde Merdaneleri
- **Makine:** Hidrolik Presler, Silindirler, Dişliler
- **Tarım:** Traktör Parçaları, Pedallar, Transmisyon Kutuları
- **İnşaat:** Yağmur Suyu Izgaraları ve Bakım Rögarı Kapama Elemanları, Vinç Parçaları, Karıştırıcılar, Yol ve İnşaat makineleri
- **Kimya:** Valfler, Pompalar, Plastik Karıştırıcılar
- **Güç:** Kompresör Gövde Ve Kafaları, Brülör Gövdeleri, Isıya Dayanıklı Fırın Parçaları (Yavuz 2006; Nobuki 2008).

2.3.2. Temper dökme demir

Düşük Si (%1'den az) miktarı ve hızlı soğuma şartlarında karbonun önemli bir kısmı grafit yerine, sementit olarak bulunur. Bu dökme demirin kırık yüzeyi beyaz

görüldüğünden, beyaz dökme demir denir. Beyaz dökme demir, yapısında bulunan fazla miktardaki sementit nedeniyle çok sert ve kırılgandırlar. Taşlama dışında işlenemezler. Beyaz dökme demirleri işlenebilir hale getirmek için dökme demir içerisindeki sementit fazı ısıtma işlemi ile küresel hale getirilir. Bu işlem 900°C’de tavlama ile yapılır, bu esnada karbon küçük küresel kümelerde toplanırken matris kullanılan ısıtma işlemi pratiğine göre ferrit veya perlitten oluşmaktadır. Döküm ve ısıtma işlemleri tamamlandıktan sonra temper dökme demire soğuk işleme şekli verilebilir ve sünekliği ise iyidir. Temper dökme demir, düşük silis miktarı sayesinde, düşük sıcaklık ortamlarında diğer küresel dökme demirlerden daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Temper dökme demirin kullanım alanlarına baktığımızda, diferansiyel kutusu, kam mili gibi otomotiv parçaları yanında, çekiç, ingiliz anahtarı ve mengene gibi ufak el aletlerinde de tercih edildiğini görmekteyiz (Michalski 2000; Bayrakceken 2006).

2.3.3. Gri dökme demir

Gri dökme demirler, Fe-C-Si alaşımı olup, ötektik sıcaklığında östenitin katı eriyik olarak içerebileceğinden fazla karbonu olan alaşımlardır. Katılaştıktan sonra bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest grafit yaprakları (lamel-pul) hâlinde bulunan bir dökme demir çeşididir. Bu dökme demirlere gri denmesinin nedeni; kırılma yüzeylerindeki gri görünümüdür. Gri dökme demirde yapıda bileşik halde bulunan karbon %0,8’den daha düşüktür, kalan karbon grafit yaprakları şeklindedir. Gri dökme demirlerin çekme mukavemeti, sertliği ve mikroyapısı; kimyasal kompozisyon, kalıp karakteristiği, katılma sonrası soğuma hızı gibi pek çok faktöre bağlıdır. Ana yapıyı ve grafit oluşumunu kontrol etmek amacıyla bakır, krom, molibden ve nikel gibi elementler eklenir. Bu elementler aynı zamanda bazı solüsyonlara karşı korozyon dayanımını artırır. Mekanik mukavemetlerini iyileştirmek amacıyla gri dökme demirler ısıtma işlemine tabi tutulur. Hızlı soğutma sonucunda oluşan sertliği düşürmek ve tokluğu yükseltmek amacıyla temperleme ısıtma işlemi gereklidir. Gri dökme demirin kullanılma sahası, dökümü yapılan diğer metal ve alaşımlardan daha geniştir. İnce şekillerdeki parçaların dökümlerine elverişlidir. Mekanik dayanımı iyi olan gri dökme demirin dökülerek şekillendirilmesi de ucuzdur. İşlenmesi kolaydır. Gri dökme demirler makina

parçaları ve otomotiv endüstrisinde kullanılır. Otomotiv parçalarından fren balatası, debriyaj balatası, şaft kaması ve kam mili, yüksek sıcaklıkta çalışan fırın parçaları, cam kalıpları, ingot, ergitme potaları, basınçlı veya basınçsız ortamlarda çalışmak için farklı tiplerde boru valf, flanş, bağlantı parçaları, gri dökme demir parçalara örnek olarak verilebilir (Zhijun 1999; Sübütay 2016).

2.3.4. AISI 1040 çeliği

Çelik, bir demir (Fe) karbon (C) alaşımıdır. Genelde yapısında %2'den daha az karbon içeren alaşımlardır. Eğer, Mn, Si gibi alaşım elementlerinin bir veya ikisinin çeliğin içindeki değerleri Mn %1.60 ve Si %0.50 değerini geçmiyor ve kimyasal bileşiminde başka herhangi bir alaşım elementinin en az belirli bir miktarda bulunması isteniyorsa, bu çelikler sade karbonlu (alaşımsız) çelikler sınıfına girer. AISI 1040 çeliği ise %0,25 - 0,55 karbon içeren çeliklerdir. Bu çelik ısıtıl işlemlere oldukça yatkındırlar. Dayanımları az C'lu çeliklere göre daha iyidir. Süneklilikleri ise az C'lu çeliklere yakındır. AISI 1040 çeliği gerilmiş pimi, kam milli, krank mili, saplamalar, anahtarlar, kalıp setleri, otomobil, motor ve aparat yapımındaki zorlamalı parçalarda, transmisyon millerinde, raylarda ve dişlilerde kullanılır (Ipek ve Selçuk 2005).

2.3.5. AISI 8620 çeliği

AISI 8620 çeliği bir sementasyon çeliğidir. Sementasyon çelikleri, yüzeyde sert ve aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise daha yumuşak ve tok özelliklerin istendiği, değişik ve darbeli zorlamalar dayanıklı parçaların imalinde kullanılmaktadır. Sementasyon çeliklerinin işlenmesi kolaydır ve bu malzeme iç kısımları kolayca işlenebilir. Yüzeyde aynı sertliği verebilecek olan takım çeliklerinden daha ucuzdur. Sertleştirme işleminden sonra ortaya çıkan çarpılmalar oldukça azdır. AISI 8620 çeliği, çok fazla zorlanan, makine ve otomobillerde dişli çark, pim, kam mili, şalter kovanı ve benzeri parçalarda kullanılmaktadır (Pekgöz 2013).

2.3.6. AISI 4140 çeliği

AISI 4140 çeliği bir ıslah çeliğidir. Kimyasal bileşimleri özellikle karbon miktarı bakımından sertleştirilmeye elverişli olan ve ıslah işlemi sonunda belirli yükler altında yüksek tokluk özelliği göstermektedir. 4140 çeliği, ıslah işlemi sonunda kazandıkları üstün mekanik özelliklerden dolayı, çeşitli makina ve motor parçalar, dövme parçalar; çeşitli civata somun ve saplamalar, krank milleri, akslar, kumanda ve tahrik parçaları, piston kolları, çeşitli miller, dişliler gibi parçaların imalatında olmak üzere geniş bir alanda kullanılır (Kırgezen 2015).

2.3.7. Nitrasyon çelikleri

Nitrasyon çelikleri, %0,30-0,40 oranında karbon içeren Fe-Cr-Mo-V alaşımlarıdır. Nitrür oluşturuşu alaşımlar elementleri içerdiklerinden, nitrasyon kabiliyeti çok iyi olan malzemelerdir. Bu malzemelerin nitrasyon kabiliyeti yüksek olduğu için yorulmaya ve yüksek yüklere maruz kalan çeliklerde daha derin nitrürleme derinliğı elde etmek mümkündür. Nitrürleme işlemi; sertleştirme, tavlama ve mekanik cilalama işlemlerinden sonra 500-550°C arasında uygulanır. Bu işlemin avantajı yüzey sertleştirme ve normal sertleştirmede görülen ve termal darbeler nedeniyle meydana gelen bozulma tehlikelerini engellemesidir. Bu malzemeler, nitrürleme işleminden sonra aktif yüzeylerin hassasça cilalanması ”taşlama ve düzleştirme” dışındaki diğerk makine işlemleri olmadan doğrudan serviste kullanılır (Sharma 2003).

2.3.7.a. 31CrMoV9 çeliği

Yüksek tokluk, yüksek mukavemet ve iyi aşınma direncine sahip olduğu için geniş kullanım alanına sahiptir. Örneğın otomobillerde kam ve krank milleri, dişliler ve fren disk kampanaları bu çelikten üretildiğinde daha iyi sonuç vermektedir. Bunun yanında 31CrMoV9 çeliği ekstruderler, bağlantı çubukları, silindirler, şaftlar, kılavuzlar, doğrultma makaraları, diş ölçerler yapımında da kullanılır. 31CrMoV9 çeliğinin kullanım alanını genişleten bir başka sebep ise, bu malzemenin diğerk çelik gurublarına

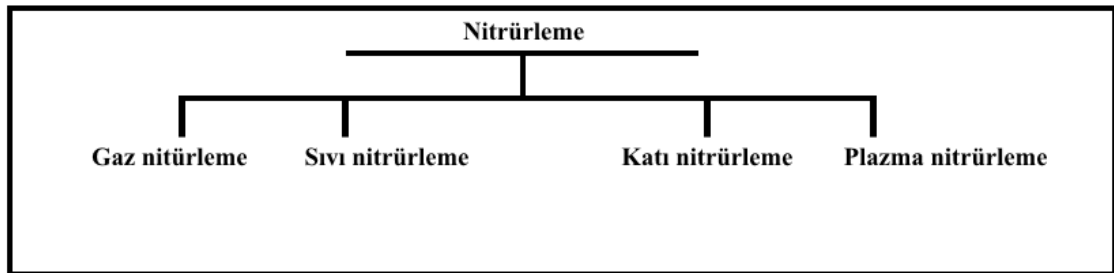
göre nitrasyon kabiliyetinin yüksek olmasından dolayı, nitrasyon işleminden sonra malzemenin yüzeyinde yüksek bir yüzey sertliğine, aşınma mukavemetine, yüksek yorulma mukavemetine ve düşük yorulma çentik hassasiyetine sahip olabilmesidir (Trausmuth 2009).

2.4. Nitrürleme Yöntemleri

Gaz nitrürleme, tuz banyosunda sıvı nitrürleme, katı nitrürleme ve plazma nitrürleme olmak üzere dört farklı nitrürleme yöntemi vardır (Şekil 2.2);

2.4.1. Gaz nitrürleme

Gaz nitrürleme yöntemi amonyak gazı içerisinde gerçekleşir. Bu yöntem 510-550°C sıcaklık aralığında azot gazının ayrışmasıyla açığa çıkan azot atomlarının malzeme içerisinde yayılmasıyla gerçekleşir. Nitrürlenecek malzeme işlem sıcaklığına yavaş yavaş fırın içerisinde ısıtılıp daha sonra aynı yavaşlıkta soğutulmaktadır. Bu yöntemde işlem süreleri 12 saatten başlayarak 180 saate kadar süren işlem süreleri söz konusu olup bu sürenin uzun yapılması durumunda malzemenin iç yapısının aşırı temperleme etkisiyle yumuşamaya neden olmaktadır. Bu yüzden malzemenin ıslahından önce ıslah sıcaklığının doğru seçilmesine dikkat edilmelidir. Nitrasyon işlemi sonucu sertlikteki artış tüm nitrürleme yöntemlerinde olduğu gibi yüzeyde yüzeye yakın bölgelerde oluşmuş nitrür fazlarından dolayıdır (Önder 2013).



Şekil 2.2. Nitrürleme yöntemleri

2.4.2. Sıvı nitrürleme

İşlem tuz banyosunda gerçekleşir. Siyanürlü tuzda $570\pm 10^{\circ}\text{C}$ 'de gerçekleşen işlemde, yüzeye azot atomu yayındırılır. Tuzun ısı iletiminin yüksek olması nedeniyle, parça yüzeyi kısa sürede ısınır. Fakat ilave edilen çözelti kimyasal ve ısıl olarak denge sağlamaktadır. Katkı maddeleri kullanılarak yapılan tuz nitrürasyonu çeşitli avantajlar sağlar. Bütün sıvı nitrürleme işlemleri alt kritik sıcaklıkta gerçekleştirilir. Bu sıcaklıkta yapılan işlem, azotun kimyasal difüzyonuna dayanır. Nitrürleme süreleri, uygulanabileceği malzemeler ve elde edilebilen kabuk derinlikleri gaz nitrürlemesi için olanlarla aynıdır. Sıvı nitrürlemenin gaz nitrürlemeye göre avantajı işlemin daha kolay yapılmasıdır. Ayrıca sıvı nitrürlemede parçaların boyutsal kararlılığı korunur ve diğer yüksek sıcaklık difüzyon işlemlerine göre yüzeye daha fazla azot yedirilir. Sıvı nitrürleme ucuzdur ve verimliliği yüksek bir yöntemdir. Sıvı nitrürleme yöntemi temel olarak yüzeylerin aşınma direncini geliştirmek ve yorulma dayanım sınırını arttırmak için uygulanmaktadır. Çoğu çelik için aynı zamanda korozyon direncini de artırır (Selçuk 2014).

2.4.3. Katı (Toz) nitrürleme

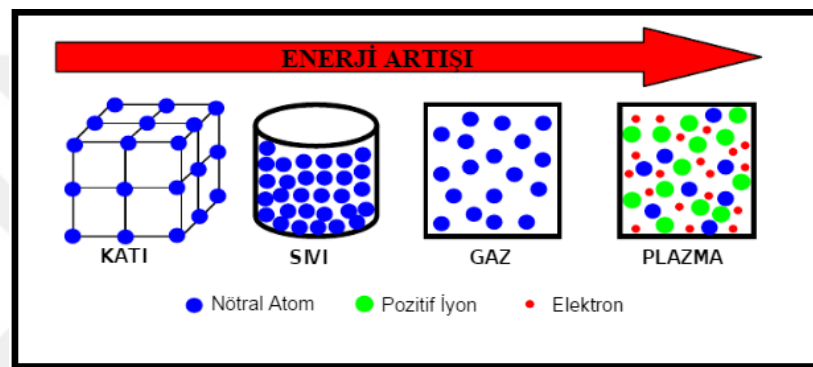
Katı ortamda nitrürleme katı ortamda nitrürleme, kutu sementasyonuna benzer şekilde gerçekleştirilir. Bu yöntemde parçalar bir kutu içerisine nitrasyon tozlarıyla birlikte konarak $520-570^{\circ}\text{C}$ nitrürleme işlemi gerçekleştirilir. Parça yüzeyinde pullanma ve kabarmasından dolayı süre sınırlaması vardır.

2.4.4. Plazma nitrürleme

2.4.4.a. Plazmanın tanımı

Plazma maddenin dördüncü hali olup birçok yüzey işlemi yönteminde kullanılmaktadır. Katı bir cisimde cismi oluşturan moleküllerin hareketi çok azdır, moleküllerin ortalama kinetik enerjisi artırıldığında cisim ilk önce sıvıya, sonra da gaza dönüşür. Eğer gaz

halinden sonra da ısı, ışınım ve elektriksel boşalma ile enerji ile devam edilirse iyonlaşma başlayabilir, bir elektron çekirdek çekiminden kurtulur ve serbest bir elektron uzayı meydana getirerek maddeye yeni bir şekil kazandırır. Atom bir elektronu eksilmiştir ve net bir pozitif yüke sahip olmuş olacaktır. Yeterince ısıtılmış gaz içinde iyonlaşma defalarca tekrarlanır ve serbest elektron ve iyon bulutları oluşmaya başlar. Fakat bazı atomlar nötr kalmaya devam eder. Oluşan bu iyon, elektron ve nötr atom karışımı, plazma olarak tanımlanır (Yetim 2009).



Şekil 2.3. Maddenin dört hali

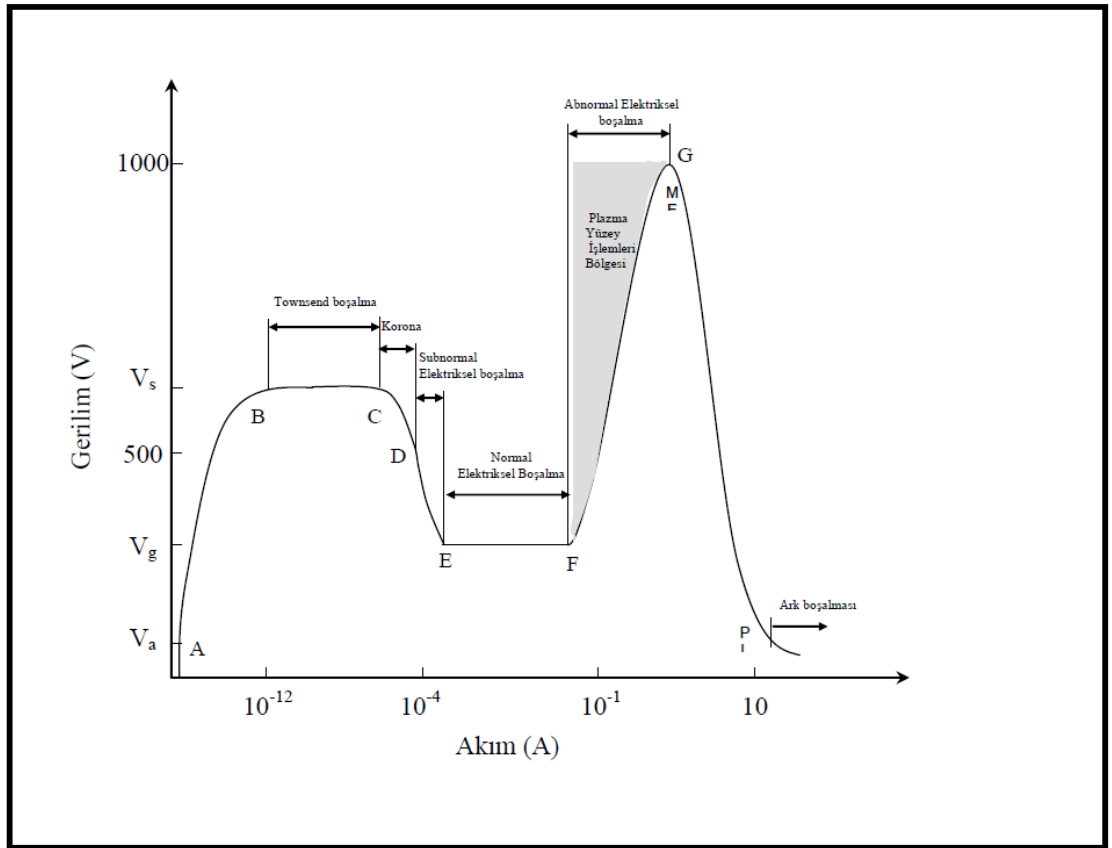
2.4.4.b. Plazmanın özellikleri

Maddenin diğer üç haline göre plazmanın kendine özgü özellikleri vardır (Şekil 2.3). Bu özellikler aşağıda sıralanmaktadır;

- Yüksek sıcaklıklarda ya da yüksek basınç altında oluşabilir.
- Plazma dış ortama karşı elektiri olarak nötr'dür.
- Plazma içerisinde iyonizasyon, disosyasyon ve bunların tersi olan rekombinasyon olayları sürekli olarak meydana gelmektedir.
- Plazma rotasyon simetrik bir yapıya sahiptir.
- Plazma iyi ısı ve elektrik iletkenidir.
- Plazma yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir.
- Plazmaya elektrik ve manyetik alanla tesir edilebilir.

2.4.4.c. Elektrik boşlaması ile plazmanın elde edilmesi

Plazma, maddenin dört temel halinden biri olan, içerisinde nötral atom, iyon, elektron, foton veya molekül bulunduran bir karışımdır. Plazmayı oluşturmak için birçok metot vardır. Bunlar arasında en önemlisi elektriki boşalmadır. Elektriki boşalma mekanizması, bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar olduğu anda, uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik boşalması oluşur ve bu iki iletken plaka arasında bir elektrik akımı akışı olarak meydana gelmektedir. Akan akımın şiddetine göre oluşan elektrik boşalma sistemleri gruplandırılabilir. Şekil 2.4’de gaz boşalma bölgeleri ve elektrik arkı boşalma alanları ve tiplerinin voltaj-akım karakteristiği belirtilmiştir.



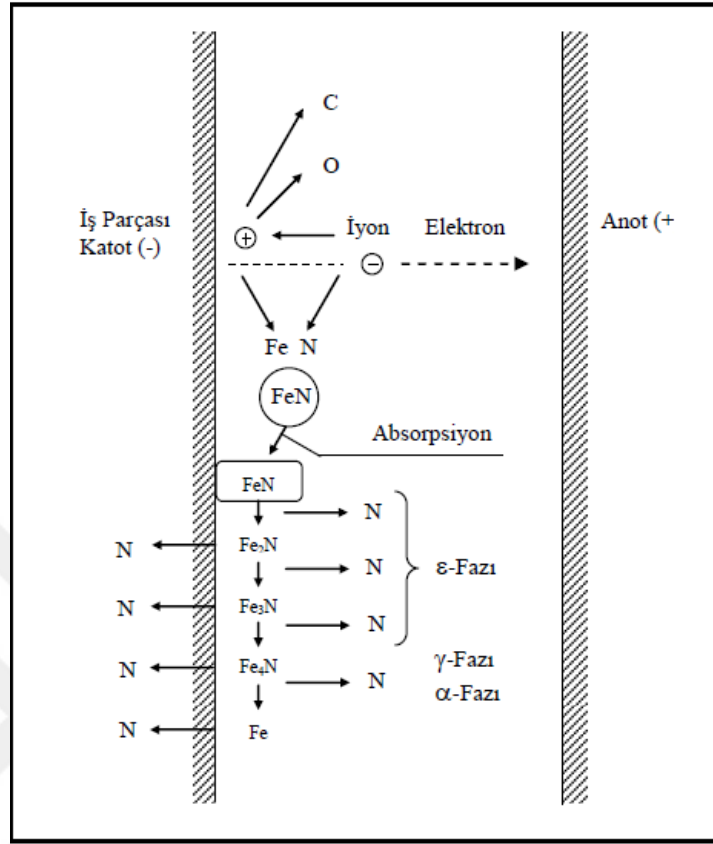
Şekil 2.4. Farklı boşalma tiplerinin gerilim-akım karakteristiği (Yetim 2009).

2.4.4.d. Plazma ile nitrürleme işleminin uygulanması

Plazma nitrürleme vakum ortamında ve 400-560°C sıcaklık aralığında uygulanan bir nitrürleme yöntemidir. İyon ile nitrürleme metal yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar sonucu gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgelerde sert ikinci faz parçacıklarının (nitrürlerin) oluşmasına neden olmaktadır. Bunun gerçekleşmesi için gerekli azot (N_2) gazı, azot hidrojen (N_2-H_2) karışımı gazın elektrik enerjisiyle iyonlarına ayrıştırılması sonucu oluşmaktadır. Sert parçacıkların meydana gelmesi için gereken ısı aktivasyon enerjisi ise iyonların metal yüzeyini bombardımanı sonucu açığa çıkmaktadır. Yüzey işlemi katoda yerleştirilmiş olan numuneye gaz iyonlarının ulaşması ile başlar ve aşağıda belirtilen adımlara ile devam eder;

- Elektriksel boşalma şartları altında azot gazı iyonize olması,
- Azot iyonları elektrostatik alana doğru ivmelenmesi,
- Katoda bağlı iş parçasının iyonlar ile bombardımana uğratılması
- Yüzeye iyonların çarpmasıyla yüksek sıcaklıklar oluşması ve buharlaşmanın meydana gelmesi, bunun neticesinde iş parçası yüzeyindeki demir ve diğer alaşım elemanları, metalik olmayan element atomları (karbon, oksijen, azot) ile elektronlar yüzeyden uzaklaşması (saçılma)
- Saçılan demir atomları ile yüksek enerjili azot atomları, yüzey dolayında FeN şeklinde birleşip metal yüzeyinde birikmesi (yoğunlaşma) ve yüzeyde kinetik enerjinin boşalması ve yüzey katmanında ısı ortaya çıkması,
- FeN sıcak metal yüzeyinde kararsızdır ve kararlı diğer nitrür fazlara (Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N) dönüşmesi (Şekil 2.5),
- Dönüşüm sırasında serbest kalan azot atomları iş parçası içine yayılır veya bu atomların plazmaya geri dönmektedir.

Plazma ile nitrürleme sıcaklık, işlem süresi gaz karışımı oranı gibi parametrelere bağlı olarak beyaz ve difüzyon tabakaları oluşmaktadır (Karadeniz 1990).

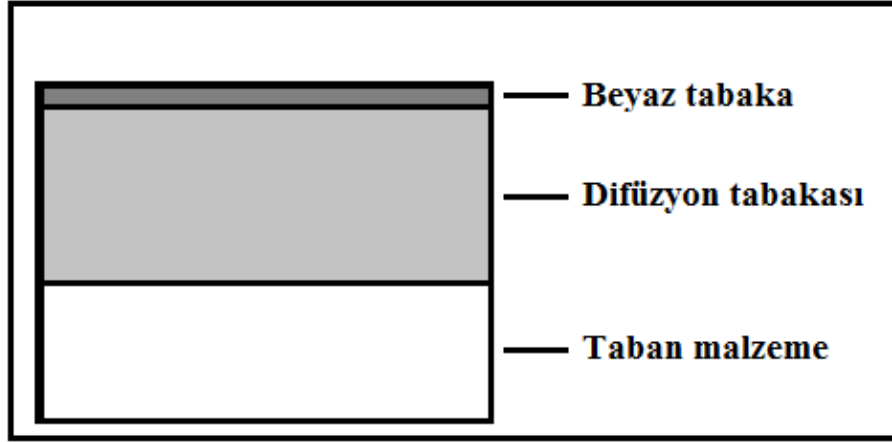


Şekil 2.5. Plazma ile nitrüleme işleminin mekanizması (Yetim 2009)

2.4.4.e. Plazma ile nitrüleme sonrasında oluşan içyapılar

- **Beyaz Tabaka**

En üstte bulunan bu tabaka, demir nitrürler içermektedir. Dağlama işleminden etkilenmediğinden beyaz tabaka olarak adlandırılmıştır. Bu tabakanın özellikleri nitrür yapısının homojenliğine ve kalınlığına bağlı olarak değişir. Eğer beyaz tabakanın yapısında γ ve ϵ fazlarının biri oluşmuşsa bu tabakanın mekanik özelliklerin daha iyi olduğu görülmüştür. Fakat γ ve ϵ fazları birlikte oluşuyorsa farklı kafes yapıları dolayısıyla iç gerilmeler artarak gevrek kırılmaya olan eğilim büyüyecektir. Ayrıca beyaz tabaka kalınlığı işlem parametrelerine bağlı olarak büyürse beyaz tabakanın sünekliği de azalacaktır.



Şekil 2.6. Plazma ile nitrüleme işleminde oluşan tabakaların şematik görünümü

- **Difüzyon tabakası**

Beyaz tabakanın altındaki difüzyon tabakası azot yoğunluğu ve sertliği beyaz tabakaya göre az olan bölgedir (Şekil 2.6). Nitrüleme işlemi esnasında N atomları yüksek enerjili bölgeler olan tane sınırlarında difüze olur. Bu bölgede, malzeme içerisindeki karbon yeniden dağılmaya başlar üstelik nitrür fazlarının çökmesi, artık gerilmelerin dağılması gibi olaylar meydana gelmektedir. Difüzyon bölgesinde malzeme yapısında bulunan Cr, Mo, Al gibi alaşım elementleri azot atomlarıyla reaksiyona girip birleşerek sertleşme işlemi gerçekleşmektedir.

2.4.4.f. Plazma nitrülemenin avantajları

Plazma nitrülemenin diğer yöntemlere göre avantajlarını sıralayacak olursak:

- Beyaz tabaka kontrolü,
- İşlemin kolay olması,
- Seri imalatta çok yüksek tekrarlanabilirliğin olması,
- Malzemelerin 0.7 mm derinliğe kadar nitrülenebilmesi,
- Malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Diğer nitrüleme metotlarına göre yüzey pürüzlülüğünün daha az olması,

- Temiz bir işlem olması nedeni ile iş parçası üzerinde kalıntıların olmaması,
- Demir esaslı tüm malzemelere uygulanabilme,
- Çevreyi kirletmemesi (Yazıcı 2013).



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada, 31CrMoV9 çeliğinden ve gri dökme demirden üretilen kam milleri kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de ve Çizelge 3.2’de kimyasal bileşimi verilen Şekil 3.1’deki kam milleri 0880.STZ.2015 kodlu SAN-TEZ projesi kapsamında Sivas ESTAS Eksantrik San. Tic. A.S. Döküm Fabrikasında üretilmiştir.

Çizelge 3.1. 31CrMoV9 çeliği kam mili kimyasal kompozisyonu

% C	% Si	% Mn	% Al	% P	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
0,35	0,37	0,53	0,11	0,015	1,72	0,19	0,019	0,06

Çizelge 3.2. Gri döküm kam mili kimyasal kompozisyonu

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% Ni	% Cu
3,25	1,95	0,35	0,017	0,025	0,43	0,27	0,14	0,54

3.2. Çelik Kam Mili Üretimi

Çelik kam millerinin üretimi hazırlanan operasyon takip listesi parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sırası aşağıdaki gibidir:

- **Malzemenin Kontrolü:** Üretimi yapılan 31CrMoV9 nitrasyon çeliği malzemenin kimyasal analizi, yüzey kalitesi gibi parametreler kontrol edilmiştir.
- **Ön Boyun Kesilmesi:** Kesilen ham malzeme sehpa üzerine konulup, boy ölçüsüne göre switch ayarı yapılmış ve testere laması ile ön boy kesme işlemi tamamlanmıştır.

- **Tam Boyun Kesilmesi:** Ön boyu kesilen malzeme sehpa üzerine yerleştirilip, boy ölçüsüne göre switch ayarı yapılmış ve testere laması ile tam boy kesme işlemi yapılmıştır.
- **Ara Dalmanın Yapılması:** Tam boy kesme işleminin ardından malzeme ara dalma işlemi yapılmıştır.
- **Yatak Çaplarının Ön Taşlanması:** Taşlanan yatağın genişliğine ve malzemeye göre taş seçimi yapılmış, iş parçasının delikleri hava ile temizlenmiş, kerye taşlanacak yatağa göre uygun bir yerden iş parçasına bağlanmış, tezgâh puntaları yağlanmış, iş parçası tezgâha kerye takılan kısım ise ayna tarafına dayama yapılacak şekilde bağlanmış ve yatak çaplarının ön taşlanması tamamlanmıştır.
- **Baş Taraf Dişlinin Açılması:** İş parçası ayna ile punta arasına alınıp parça sıkıştırılarak, torna tezgâhları için kater merkez ayarı yapılmış ve baş taraf dişlinin açılması ile işlem tamamlanmıştır.
- **Arka Taraf Dişlinin Açılması:** İş parçası ayna ile punta arasına alınıp parça sıkıştırılarak, torna tezgâhları için kater merkez ayarı yapılmış ve arka taraf dişlinin açılması ile işlem tamamlanmıştır.
- **Pim Deliğinin Delinmesi:** İş parçası ayna ile punta arasına alınıp parça sıkıştırılarak, torna tezgâhları için kater merkez ayarı yapılmış ve pim deliğinin açılması ile işlem tamamlanmıştır.
- **Kam Freze İşlemlerinin Yapılması:** Tezgaha profil yükleme işlemi yapılmış ve uygun kam freze karyesi kullanılmış, kam genişliğine ve malzemeye göre taş seçimi, yatak ayarı ve kam freze işlemi yapılmıştır.
- **Kam Çaplarının Ön Taşlanması:** Tezgaha profil yükleme işlemi yapılmış ve uygun kam freze karyesi kullanılmış, kam genişliğine ve malzemeye göre taş seçimi, yatak ayarı ve kam çaplarının ön taşlama işlemi yapılmıştır.
- **Yatak Çaplarının 2. Ön Taşlanması:** Yatağın genişliğine ve malzemeye göre taş seçimi yapılmış, iş parçasının delikleri hava ile temizlenmiş, kerye taşlanarak yatağa göre uygun bir yerden iş parçasına bağlanmış, tezgâh puntaları yağlanmış, iş parçası tezgâha kerye takılan kısım ayna tarafına dayama yapılacak şekilde bağlanmış ve yatak çaplarının ön taşlanması tamamlanmıştır.
- **Kam Çaplarının İnce Taşlanması:** Tezgaha profil yükleme işlemi yapılmış ve uygun kam freze karyesi kullanılmış, kam genişliğine ve malzemeye göre taş seçimi,

yatak ayarı ve kam çaplarının ince taşlama işlemi yapılmıştır.

➤ **Kamlara Süper-Finiş İşlemlerinin Yapılması:** Tüm işlemlerin yapılmasının ardından kamlara profil resminde belirlenen ölçümlerde süper-finiş işlemleri yapılmıştır.

3.3. Döküm Kam Milinin retimi

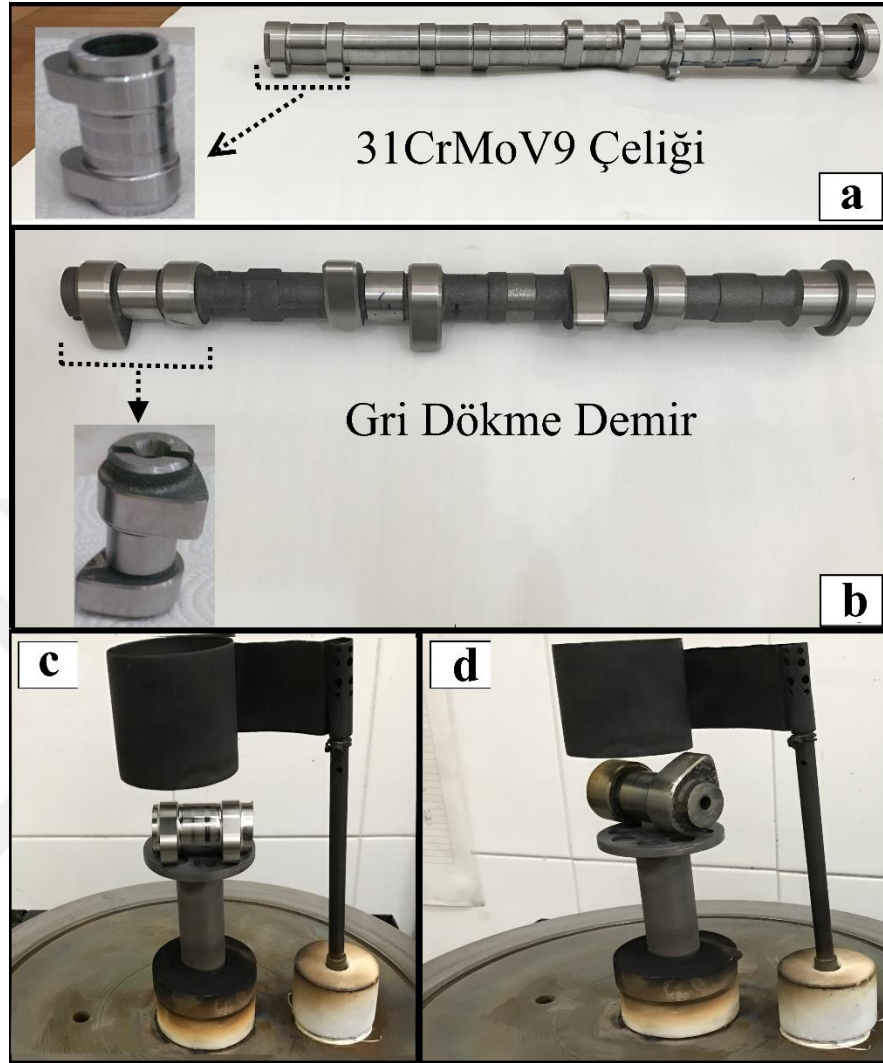
Üretilmiş olan döküm kam mili modelleri ile kam millerinin dökümü gerçekleştirilmiştir. Döküm kam mili üretilirken sırası ile kalıp kumu hazırlanmış, kalıplama işlemi yapılmış, döküm işlemi gerçekleştirilip kalıp bozma işlemi sonunda kumlama işlemi yapılmıştır. Sonra yolluk besleyici kesimi yapılarak kaba ve ince taşlama işlemi uygulanmıştır. Son olarak göz kontrolü ile döküm hataları-taşlama hataları kontrol edilmiştir.

➤ Kam millerinin dökümünde kullanılan kalıp kumu Eirich mikserde ESTAş D/ITL/004 Nolu Kum Hazırlama Talimatına göre hazırlanarak kum testleri yapılmıştır.

➤ Hazırlanan kalıp kumlarının kalıplaması HWS presinde ESTAş D/ITL/005 Nolu Kalıplama Talimatına göre yapılmıştır. Preslenen kalıbın sertliği shormetre cihazı ile ölçülerek sertliğin 80-90 shore olması sağlanmıştır.

➤ Ergitme işlemi indüksiyon ocaklarında D/ITL/001-002'ye göre yapılmıştır. Metal analizi spektrometre ve Atas Termal Analiz cihazı ile beraber yapılmıştır. 1460-1480°C aralığındaki metal döküm potasına alınırken aşılama yapılmış ve döküm hattına geçilmiştir. Kam millerinin dökümü 1400-1420°C metal sıcaklığında yapılmıştır. Kam milleri için kalıp doldurma hızı 12- 13 kg/s olacak şekilde 6 kalıp dökülmüştür. Döküm sırasında potadaki sıvı metalin sıcaklığı termokupl ile kontrol edilerek 1410±10°C aralığında olması sağlanmıştır.

➤ Kam milleri kalıptan çıkarıldıktan sonra temizleme makinesinde temizlenmiştir. Kam millerinin yolluk ve besleyicileri kesilerek ayrılmıştır. Kam milleri üzerinde kalan yolluk ve besleyici kalıntıları taşlanmıştır. Millerden kesit alınarak sertlik ve mikro yapı kontrolü yapılmıştır.



Şekil 3.1. a-) Çelik ve b-) Gri döküm kam milleri c-) Nitrürleme öncesi kesilmiş Çelik ve d-) Gri döküm kam millerinin tutucuya yerleştirilmesi

3.4. Çelik ve Döküm Kam Millerinin Plazma Nitrürleme İşlemine Hazırlanması

Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilen çelik ve döküm kam milleri Şekil 3.2’de gösterilen hassas kesme cihazı ile kesilmiştir. Kesilen kam milleri ilk önce alkol ile temizlenmiş ve tutucuya yerleştirilerek ortam vakum pompası vasıtasıyla 2,5 Pa basınca kadar vakumlama işlemi yapılmıştır. İyon nitrürleme işlemine başlamadan önce numuneler üzerinde bulunabilecek kirlilikleri gidermek amacıyla 400V gerilim altında 15 dakika süre ile ortama H_2 gazı verilerek bir ön saçılma işlemi yapılmıştır.



Şekil 3.2. Hassas kesme cihazı

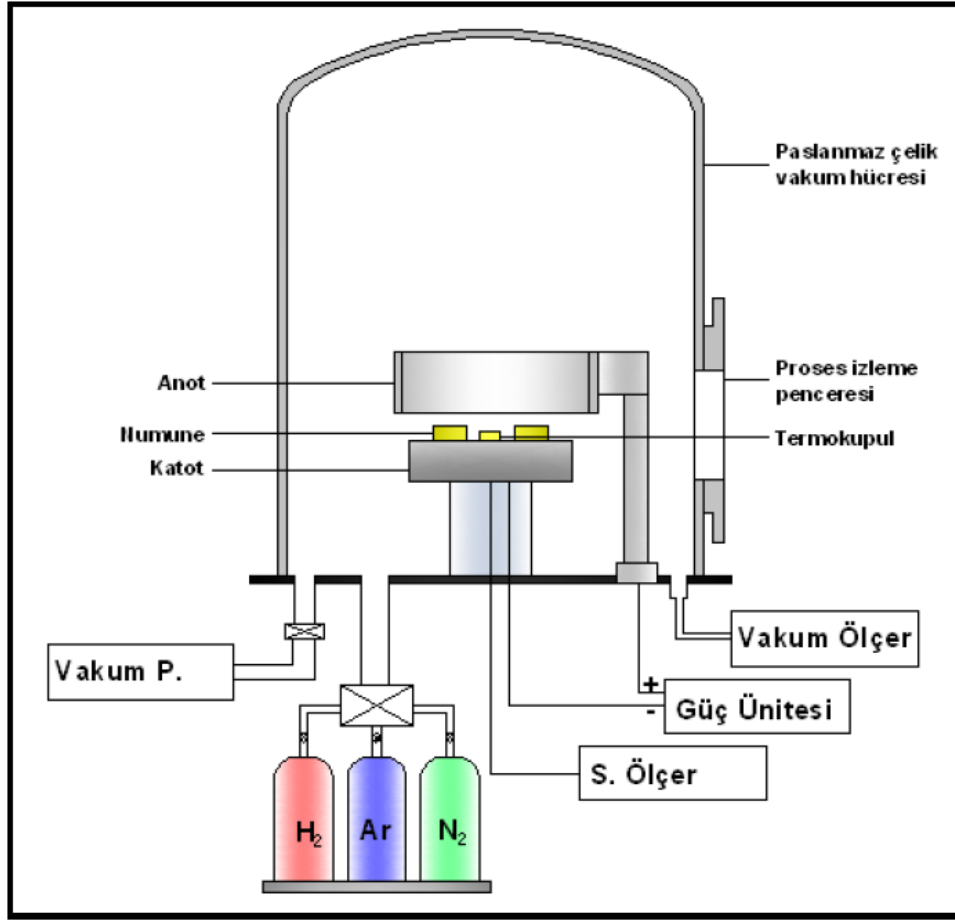
3.5. Çelik ve Döküm Kam Millerine Deney Tablosuna Göre Plazma Nitrürleme İşleminin Uygulanması

Plazma ile nitrürleme işlemi, Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilen laboratuvar tipi plazma nitrürleme deney düzeneğinde yapılmıştır. Nitrürleme için hazır hale getirilen 31CrMoV9 nitrasyon çeliğinden üretilen ve gri dökme demirden dökülen kam milleri için Çizelge 3.3’de bulunan deney tablosundaki nitrürleme parametrelerine göre işlem gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzeyleri işlem görecektir şekilde katoda yerleştirilmiş ve vakum odasının basıncı vakum pompası vasıtasıyla 2,5 Pa değerine düşürülmüştür. Daha sonra numune yüzeylerini temizlemek amacıyla ortama 5×10^2 Pa basınç değerine kadar H_2 gazı verilmiş ve bunun akabinde de numuneler H_2 atmosferinde 500V gerilim uygulanarak 15 dakika süre ile sputtering (saçılma) işlemine tabi tutulmuştur. Saçılma işleminden sonra ortam basıncı tekrar 2,5 Pa değerine kadar düşürülmüştür. Bu aşamadan sonra ortama deneyin gerçekleştirileceği basınç değeri olan 5×10^2 Pa basınç değerine kadar istenilen gaz karışım oranları ile hidrojen ve azot gazı verilerek ortam basıncı iğne vanalar kullanılarak sabitlenmiştir.

Çizelge 3.3. Kullanılan kam milleri için nitrürleme şartları

MALZEME TİPİ	NİTRÜRLEME SICAKLIĞI (°C)	NİTRÜRLEME SÜRESİ (saat)	GAZ KARIŞIM ORANI
31CrMoV9 çeliği	500	4	%50 H ₂ + %50 N ₂
31CrMoV9 çeliği	500	4	%70 H ₂ + %30 N ₂
31CrMoV9 çeliği	500	4	%80 H ₂ + %20 N ₂
31CrMoV9 çeliği	500	4	%90 H ₂ + %10 N ₂
31CrMoV9 çeliği	500	4	%94 H ₂ + %6 N ₂
Gri Dökme Demir	500	2	%50 H ₂ + %50 N ₂
Gri Dökme Demir	500	2	%70 H ₂ + %30 N ₂
Gri Dökme Demir	500	2	%90 H ₂ + %10 N ₂
Gri Dökme Demir	500	4	%90 H ₂ + %10 N ₂
Gri Dökme Demir	500	4	%94 H ₂ + %6 N ₂

Ortam basıncı iğne vanalar yardımı ile 500 Pa'a sabitlenmiştir. Elektriksel boşalma güç ünitesinin açılmasıyla başlanmıştır. Numune sıcaklığı deney planına göre belirlenen değere gelinceye kadar uygulanan gerilim artırılmıştır. Numune tutucu üzerine yerleştirilen numuneler arasındaki simetri nedeniyle ortadaki bir numuneden alınan sıcaklık değeri bütün numuneler içinde aynı kabul edilmiştir. Belirlenen sıcaklığa ulaşır ulaşmaz, nitrürleme işlem zamanı başlatılmıştır. Deney sona erdikten sonra vakum ortamında numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur.



Şekil 3.3. Plazma Nitrüleme ünitesinin şematik görünümü

3.6. XRD, SEM ve Optik Mikroskop Çalışmaları

İşlemsiz ve plazma ile nitrülenmiş çelik ve döküm kam millerinden kontrol parçaları kesilmiştir. Kesilmiş parçaların yüzeyinde oluşan fazlar $\lambda=1.790300\text{\AA}$ dalga boyuna sahip Co-K α kullanılarak GNR Explorer XRD cihazı vasıtasıyla belirlenmiştir (Şekil 3.4). Elde edilen sonuçlardan Match-2 programı ile fazların kimyasal kompozisyonları tespit edilmiştir. Kesilmiş parçaların kesit görüntüleri, aşınma izleri ve yorulmaya tabi tutulmuş numunelerin çatlak başlangıcı ve kırılma şekilleri Şekil 3.5’de gösterilen FEI Quanta 250 SEM (taramalı elektron mikroskobu) vasıtasıyla incelenmiştir. Yorulma testi sonrası elde edilen yorulma kırığı görüntüleri Zeiss optik mikroskobu ile incelenmiştir.



Şekil 3.4. X-Işını Difraktometresi

Nitrüleme sonrası işlem görmüş kam milleri hassas kesme sonrasında kesit görüntülerinden beyaz tabakanın gözlemlenebilmesi için 3 birim gliserin, 2 birim HCl ve 1 birim HNO_3 'den oluşan solüsyon kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu

3.7. Artık Gerilme Ölçümleri

Artık gerilme ölçümleri, XRD-GNR-Explorer X-ışını kırınım ölçer (XRD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Artık gerilme ölçümü yapılırken, XRD cihazında kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu ve yansıma açıları bilindiğinden, Bragg kanunu kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) tespit edilmektedir. Düzlemler arası mesafe (d)'ye karşılık $\sin^2\omega$ grafiği çizildiğinde eğrinin eğiminin gerilme ile orantılı olduğu ifade edilmiştir (Kovacı 2016). Kullanılan XRD cihazının yazılımı bu esasa dayanarak doğrudan artık gerilme değerlerini vermektedir.

3.8. Mikrosertlik ve Nanosertlik Ölçümleri

İşlemsiz ve nitrülenmiş numunelerin yüzey sertliklerini tespit edebilmek için 10 gram yük altında ve 15 sn yükleme süresinde Şekil 3.6'da şematik olarak gösterilen Shimadzu mikrosertlik cihazı ile sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Nitrülenmiş numunelerin difüzyon tabakası kalınlığını belirlemek için de mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri en dış kısımdan başlamak üzere numune merkezine doğru belirli mesafelerden ölçümler alınmıştır. Yüzeye yakın ölçülen ilk sertlik değeri yüzey sertliği olarak kabul edilirken, merkeze doğru çekirdek malzeme sertliğine ulaşılan kadar gidilen mesafe difüzyon derinliği olarak kaydedilmiştir. İşlemsiz ve nitrülenmiş numunelerin elastisite modülü ölçümleri için Şekil 3.7'de gösterilen Bruker UMT mekanik test cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Mikrosertlik cihazı



Şekil 3.7. Mekanik Test Cihazı (UMT)

3.9. Aşınma Deneyleri

Aşınma testleri öncesinde aşınmaya maruz bırakılacak nitrürlenmiş numuneler, kam milleri üzerindeki kamların düz yüzeyleri hassas kesme ile kesilerek elde edilmiştir. Daha sonra bu numunelerin tribolojik özellikleri Bruker UMT tribotester cihazı vasıtasıyla incelenmiştir (Şekil 3.8).

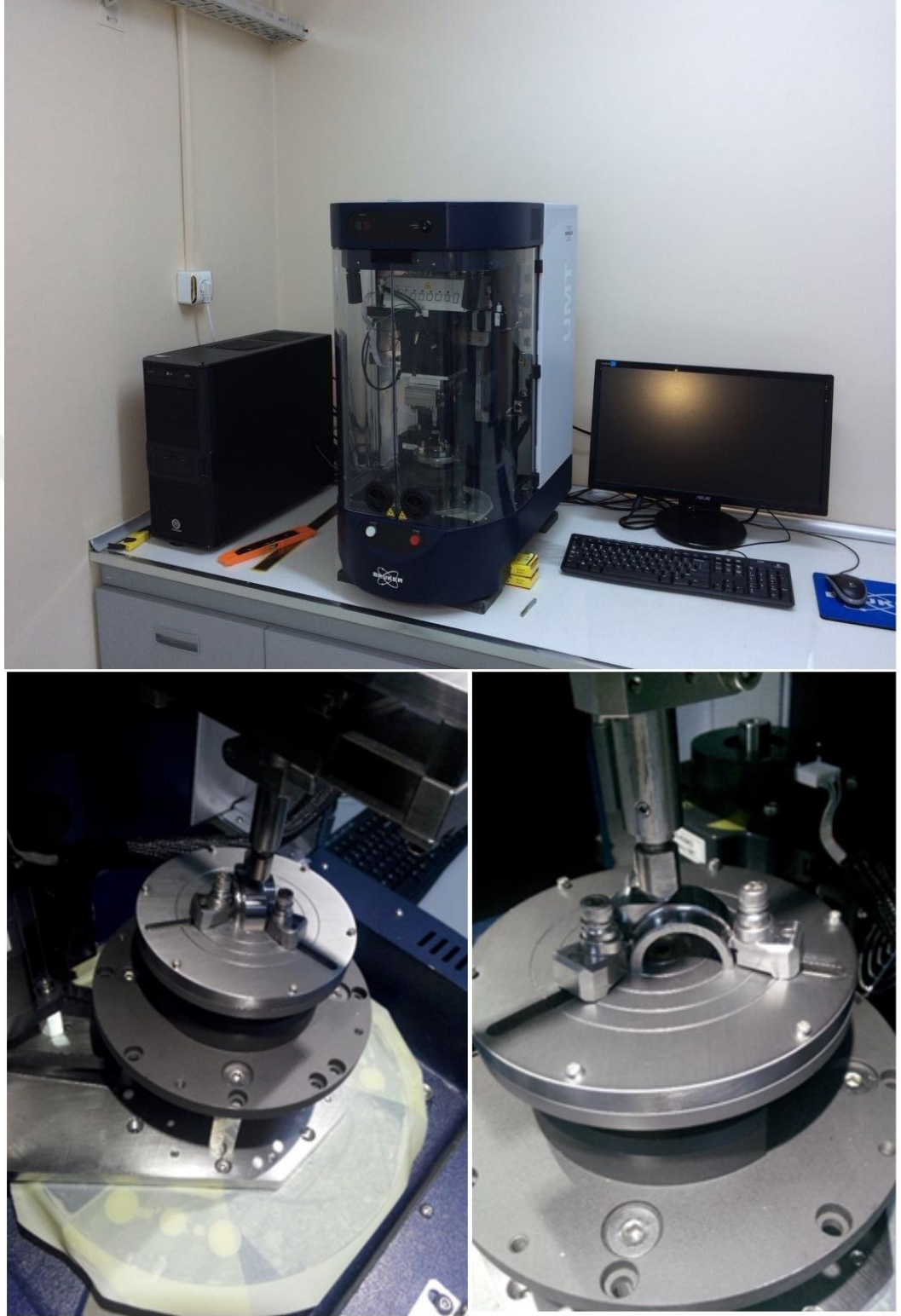
Aşındırılacak numuneler Şekil 3.8’de aşınma cihazına bağlanarak 6 mm çapında tungsten karbür bilyeye karşı kuru ve yağlı ortam şartlarında aşındırılmıştır. Uygulanan aşınma deney şartları Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Yapılan deneyler esnasında sürtünme katsayısı, cihaz tarafından otomatik olarak alınmıştır. Test sonrasında aşınmış numuneler 3D Temassız Profilometresi ile aşınma hacimleri belirlenmiştir (Şekil 3.9). Kaplamanın aşınma oranı aşağıdaki eşitlikler vasıtasıyla belirlenmiştir.

$$\text{Aşınma oranı} = \frac{\text{Aşınan hacim}}{\text{Uygulanan yük} * \text{Aşınma mesafesi}} \quad (3.1)$$

Çizelge 3.4. Aşınma deney şartları

Deney Şartları	Uygulanan yük	Aşındırma Mesafesi	Aşındırma Hızı	Sıcaklık	Nem
Kuru	30N	100m	5.22 mdak ⁻¹	20±2°C	%50±5
	30N	500m	5.22 mdak ⁻¹	20±2°C	%50±5
Yağ	30N	100m	5.22 mdak ⁻¹	20±2°C	%50±5
	30N	500m	5.22 mdak ⁻¹	20±2°C	%50±5



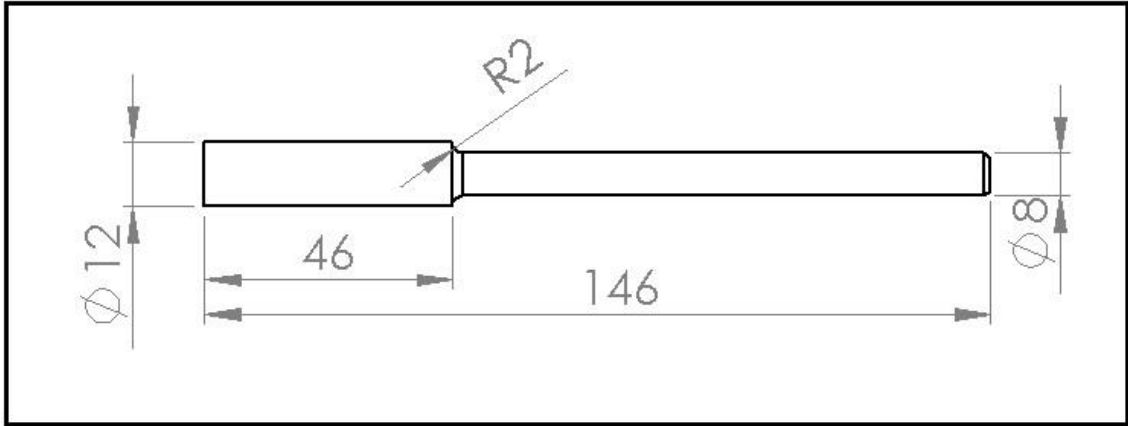
Şekil 3.8. Sürtünme ve Aşınma Test Düzeneği



Şekil 3.9. 3D temassız Profilometre

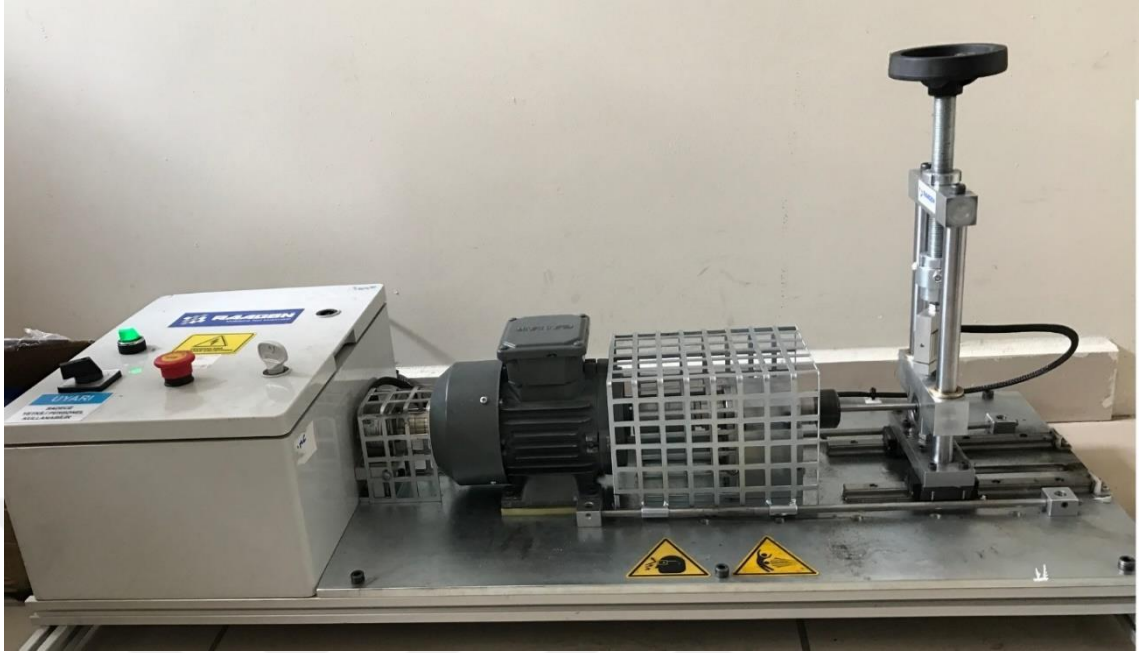
3.10. Yorulma Deneyleri

Şekil 3.10’da boyutları verilen ve yorulma düzeneğini imal eden firma tarafından önerilen standart numune ölçümleri kullanılmıştır. CNC tezgâhında imal edilen numunelerin yüzeylerine ayrıca polisaj uygulanmıştır.



Şekil 3.10. Yorulma Numunesi

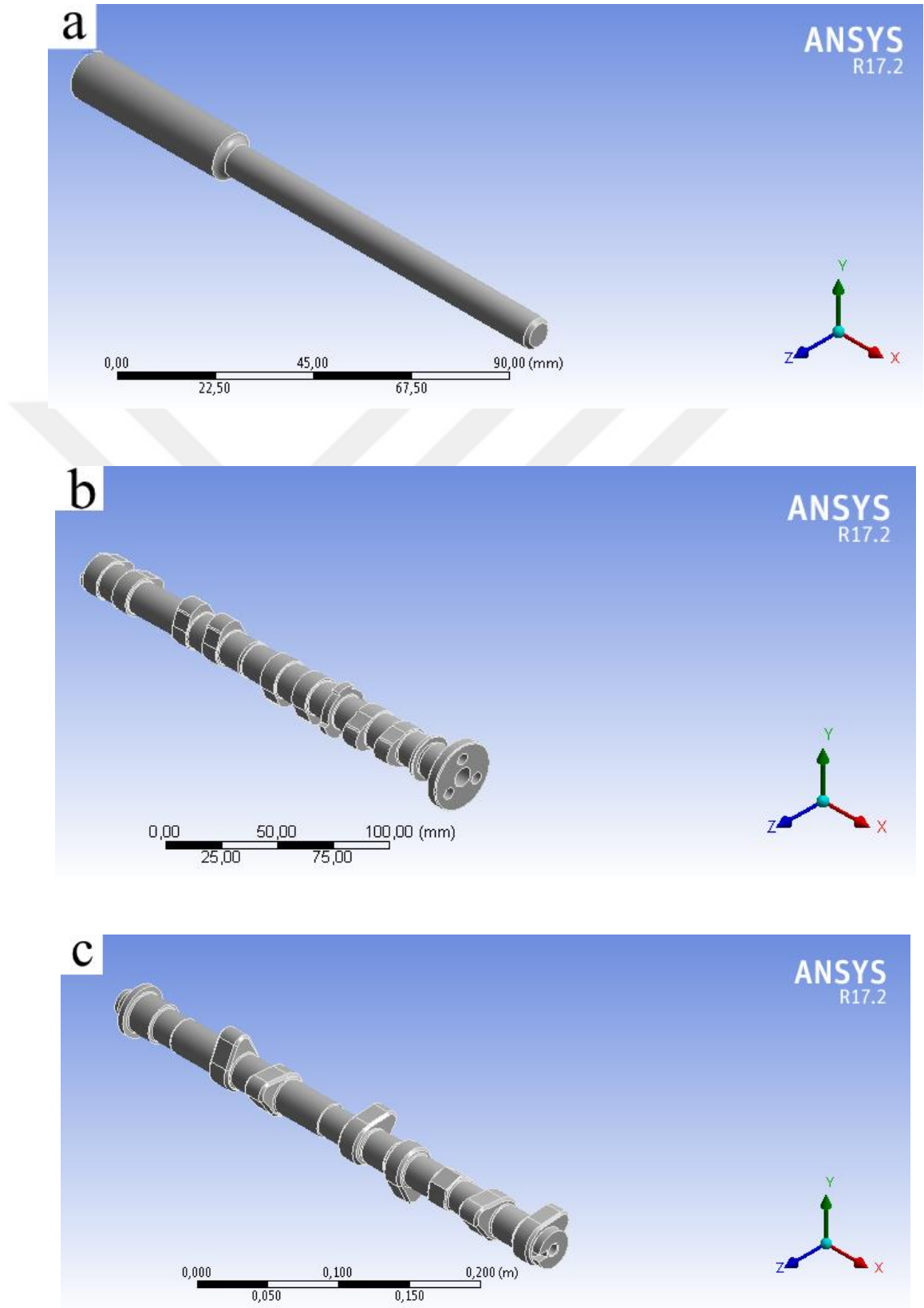
Yorulma dayanımını belirlemek için Şekil 3.11’de gösterilen Raagen marka döner eğilmeli yorulma cihazı kullanılmıştır. Bu tür yorulma cihazlarında, numune bir ucundan tutturulup, diğer ucuna kuvvet uygulanarak döndürülür. Böylece, silindirik numune üzerinde bir değişken eğilme gerilmesi meydana getirilir. Numuneler cihaza yerleştirilerek, verilen yükte kırılma olup olmadığı araştırılmıştır. Kırılma çevrim sayısı yorulma cihazı tarafından kaydedilmekte ve kırılma anında sistem otomatik olarak kapanmaktadır. Tüm deneyler oda sıcaklığında 2400 devir/dakika dönme hızında yapılmıştır. S-N eğrilerini oluşturmak için sonuçlara bi-lineer tip S-N eğrisi uygulanmıştır. Bu yöntemde S-N eğrisi lineer ve yatay olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Lineer kısım S-N diyagramında yatay kısmı içermeyen kırılmanın oluşmadığı en yüksek gerilme değerine kadar uzanan kısımdır. Lineer kısımda 5 gerilme seviyesi belirlenerek, her bir gerilme seviyesinde 2 tekrar yapılmıştır. Yatay kısım için ise Staircase metodu kullanılmıştır. Bu kısımda 4 numune denenerek yorulma sınırı belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Döner Eğilmeli Yorulma Cihazı

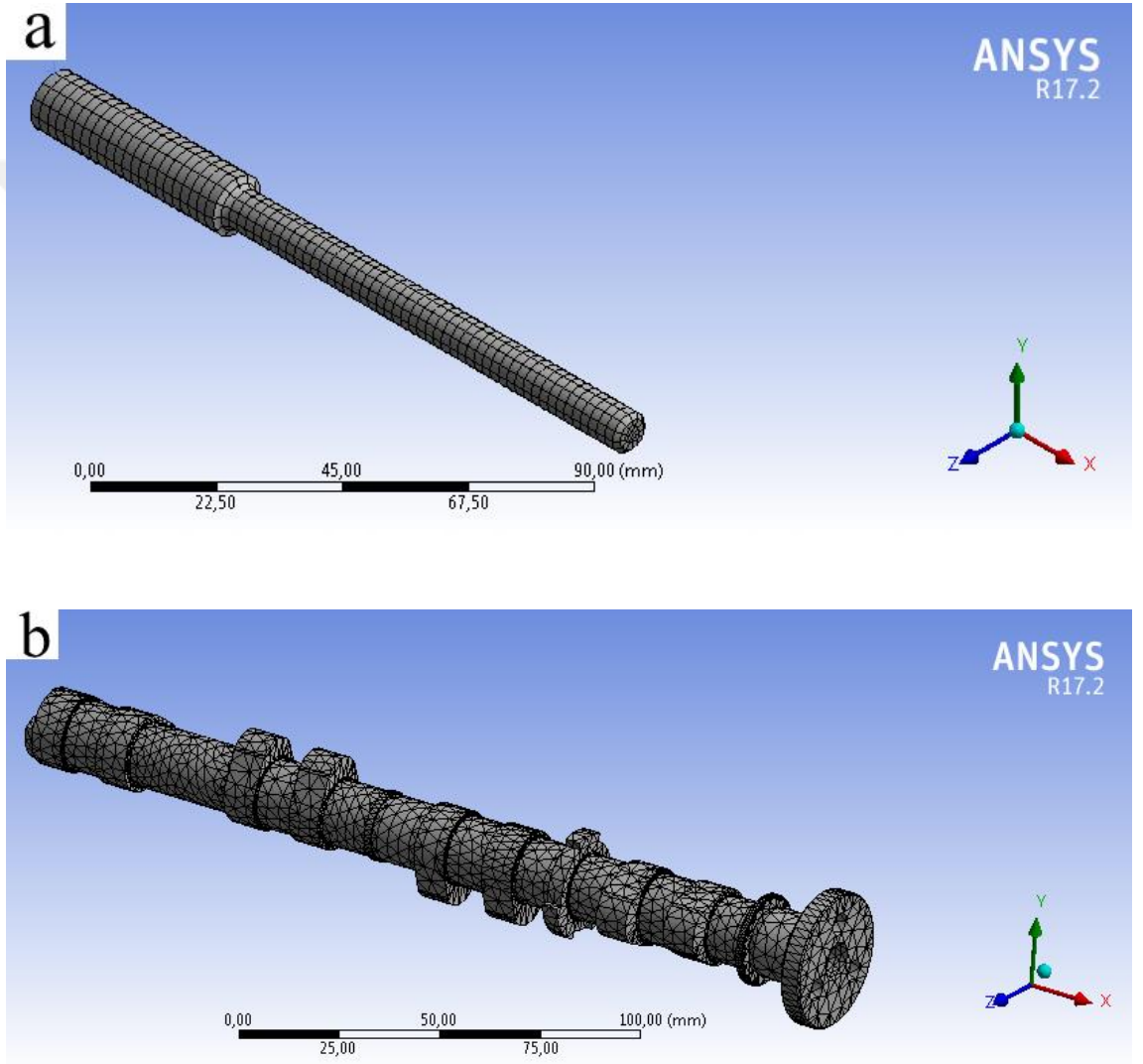
3.11. Yorulma Hasarının Sonlu Elemanlar Analizi

Kam milleri günümüzde güç aktarma sistemleri için vazgeçilmez ve dayanıklı parçalardır. Bu kam millerinin en önemli özellikleri yüksek yük taşıma kapasiteleri, çalışma hızları ve uzun hizmet ömürleridir. Yüksek performanslı bir kam mili için aşınmaya ve korozyona karşı dirençli olmanın yanı sıra yüksek dayanım ve uzun yorulma ömürlü olması da gerekmektedir. Özellikle yorulma hasarı dışarıdan gözlemlenebilecek bir şekilde önemli bir şekil değişimi yapmadığından ve uyarı vermeden elastik limitin altındaki gerilmelerde malzemenin ani olarak göçmesi nedeniyle tehlikelidir. Dolayısı ile yorulmaya dirençli malzemelerin geliştirilmesi ve uygun tasarımların yapılabilmesi çok büyük önem arz etmektedir. Bu bağlamda sonlu eleman yöntemi ile herhangi bir deneysel test yapmaksızın bir makine elemanın yüzeyinde oluşan gerilme analizi ve yorulma ömrü hakkında bir ön bilgiye sahip olmak, gerek maddi açıdan gerekse zaman kaybının önlenmesi açısından önemlidir.

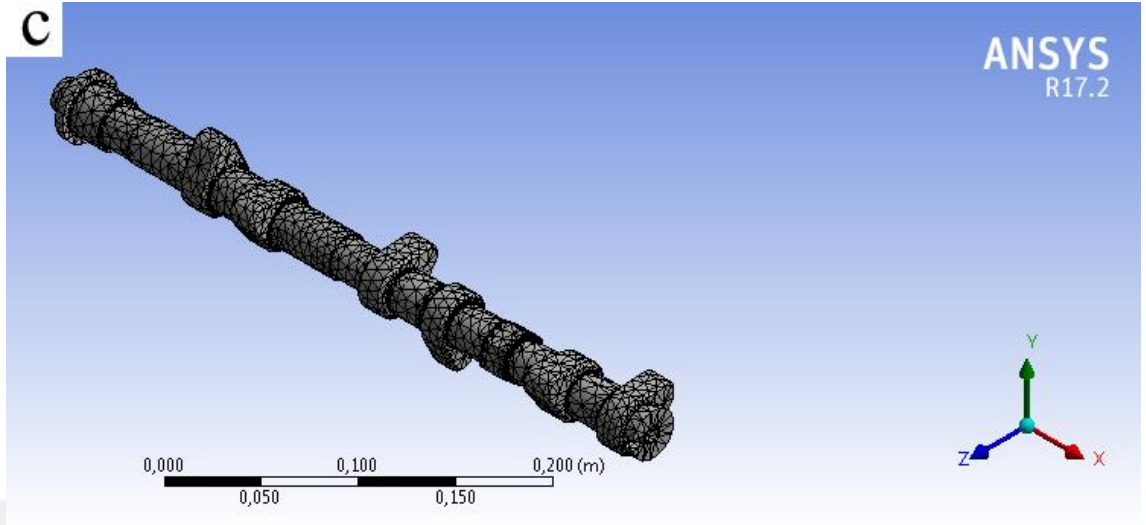


Şekil 3.12. a-) Yorulma modeli b-) Çelik ve c-) Döküm kam milli modelleri

Bu çalışmada, işlemsiz ve nitrürlenmiş 31CrMoV9 nitrasyon çeliği ve gri dökme demirin düz yorulma ömrü, ANSYS-Workbench ticari paket programı kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen teorik ömür sonuçları deneysel olarak belirlenen ömür değerleri ile kıyaslanmıştır, ayrıca teorik olarak çelik ve döküm kam millerinin yorulma analizleri yapılmıştır.

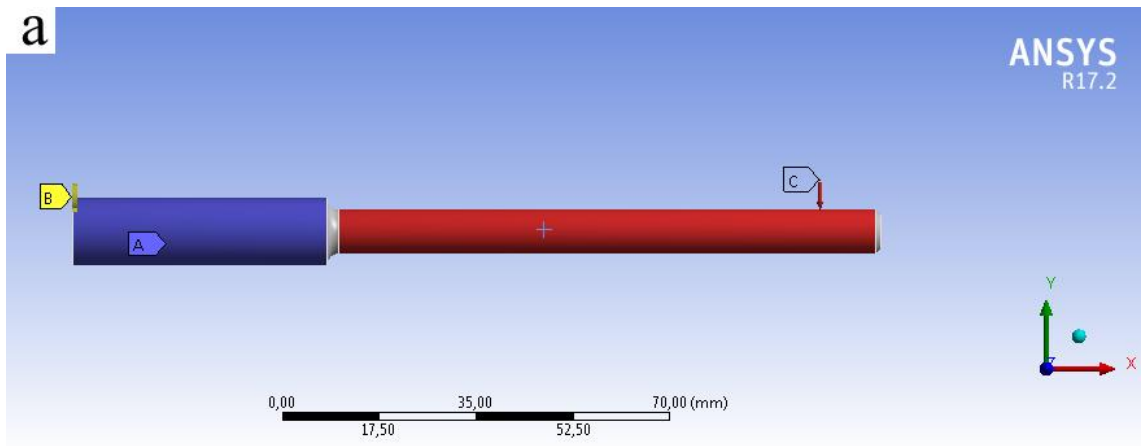


Şekil 3.13. (devam)

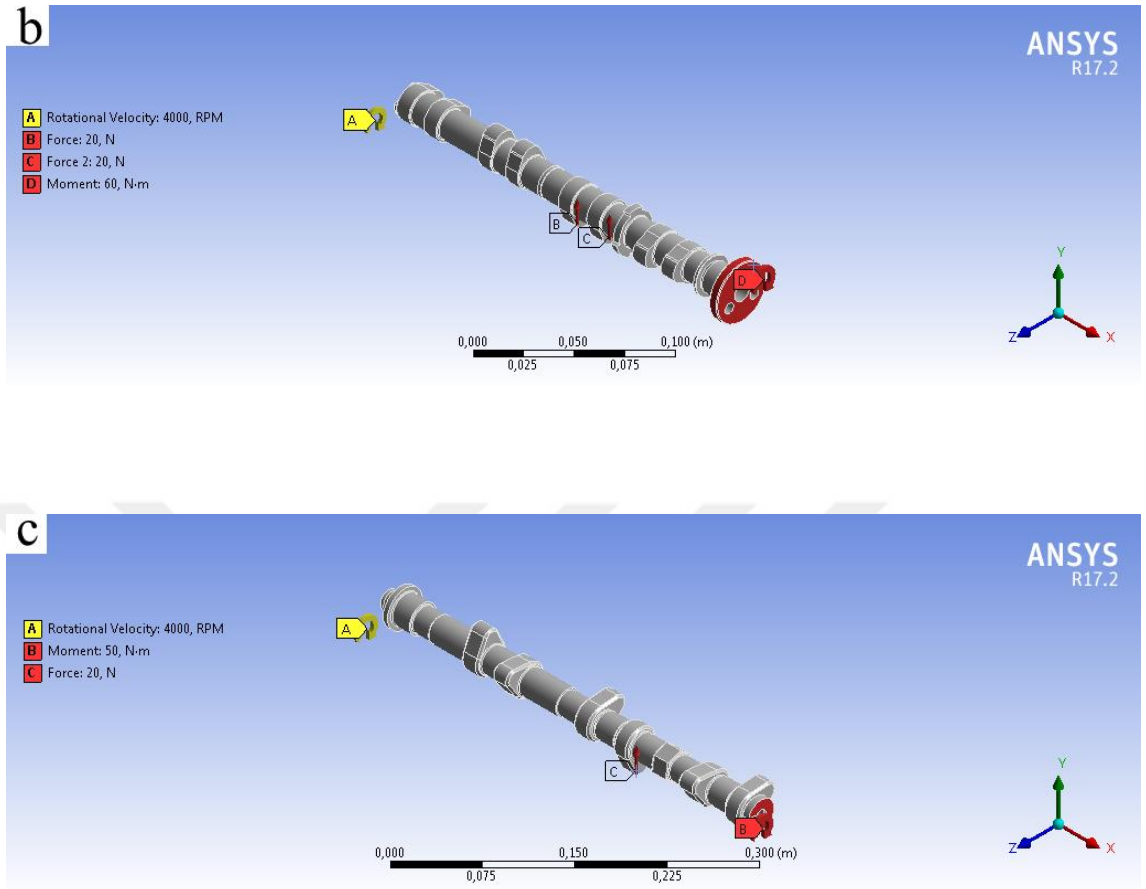


Şekil 3.13. a-)Yorulma numunesi, b-) Çelik ve c-) Döküm kam milli modellerine uygulanan mesh işlemi

Şekil 3.12’de üç boyutlu olarak çizilen yorulma numunesi (3.12.a), çelik ve döküm kam milleri modelleri (3.12.b ve 3.12.c) gösterilmiştir. Model üzerinde oluşturulan mesh detayları Şekil 3.13’de belirtilmiştir. Analizi yapılan yorulma numunesi, çelik ve döküm kam milleri modelleri için sınır koşulları Şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.14. (devam)



Şekil 3.14. a-) Yorulma numunesi, b-) Çelik ve c-) Döküm kam milli modelleri için analiz ortamları

Yorulma numunesi silindirik olarak mesnetlenip sadece dönme hareketine izin verilmiştir. 2000 rpm’lik dönme hareketi esnasında numune uç kısmına (–) y-ekseni yönünde yükle yapılmıştır (Şekil 3.14a). Ayrıca çelik ve döküm kam mili x-ekseni etrafında saat yönünde 4000 rpm’lik dönme hareketine, 60Nm’lik torka ve kam yüzeylerine 20N’luk yüklere maruz bırakılmıştır (Şekil 3.14b ve Şekil 3.14c). Yorulma analizleri için ANSYS-Workbench programı içerisinde bulunan yorulma modülünde (fatigue tool) yükleme tipi olarak “tam değişken”, ortalama gerilme teorisi olarak “Soderberg” yaklaşımı kullanılmıştır.

$$K_{\text{toplam}} = K_{\text{taban}} + K_{\text{tabaka}} \quad (3.2)$$

$$E_{\text{toplam}} \cdot A_{\text{toplam}} = \frac{E_{\text{tabaka}} \cdot A_{\text{tabaka}}}{L} + \frac{E_{\text{taban}} \cdot A_{\text{taban}}}{L} \quad (3.3)$$

$$E_{\text{toplam}} = \frac{E_{\text{tabaka}} \cdot A_{\text{tabaka}} + E_{\text{taban}} \cdot A_{\text{taban}}}{A_{\text{toplam}}} \quad (3.4)$$

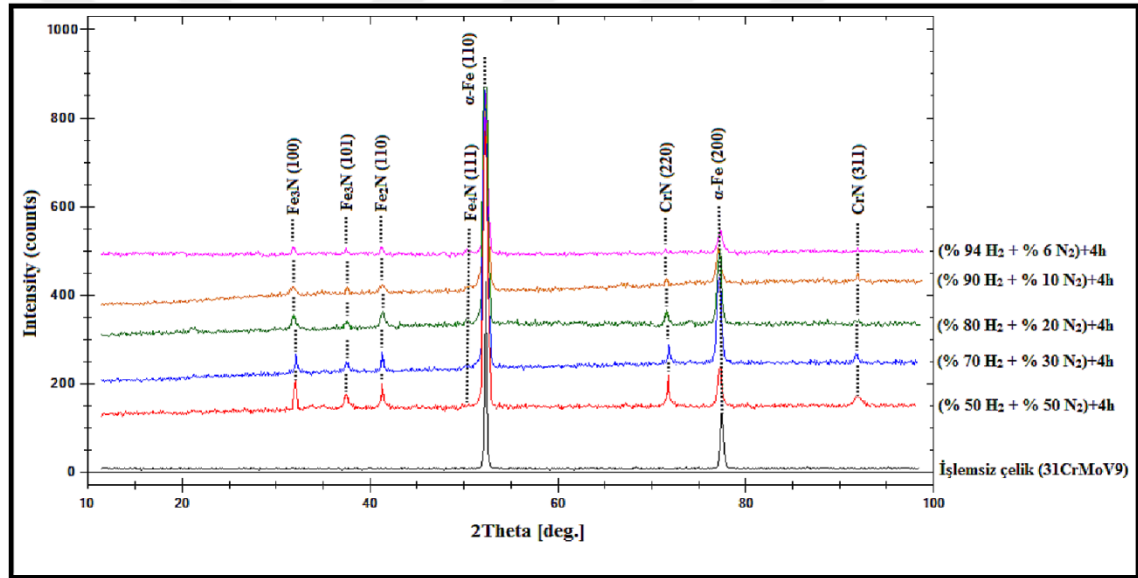
Eşitliklerdeki E_{Toplam} ve A_{Toplam} yüzey işlemi uygulanmış malzemenin elastisite modülünü ve kesit alanını, E_{Tabaka} ve A_{Tabaka} nitrür tabakasına ait elastisite modülünü ve kesit alanını, E_{Taban} ve A_{Taban} taban malzemeye ait elastisite modülünü ve kesit alanını göstermektedir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Çelik Kam Milinin Plazma Nitrürleme Davranışı

4.1.1. XRD analizi

Şekil 4.1’de işlem görmemiş ve farklı gaz karışımlarında plazma ile nitrürlenmiş çelik kam millerinin XRD analizleri verilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik kam milinin XRD grafiği

İşlem yapılmamış çelik kam mili için yapı tamamen α -Fe (ferrit demir) fazından oluşurken, yalnızca ferrit demir pikleri gözlemlenmiştir. Nitrürleme işlemi sonrası, 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde ve %50 H₂-%50 N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş çelik kam millerinin yapısında sert bir yapıya sahip olan nitrür fazlarının (Fe₃N, Fe₂N, Fe₄N, CrN) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1). Plazma ile nitrürleme işleminde azot atomları çelik içerisindeki alaşım elementleri ile reaksiyona girmek için ferrit kafesi içerisine doğru hareket etmektedir ve azot atomlarının yarıçapı nitrasyon çeliğinin yapısındaki demir atomunun yarıçapından küçük olmasından dolayı demir atomlarının

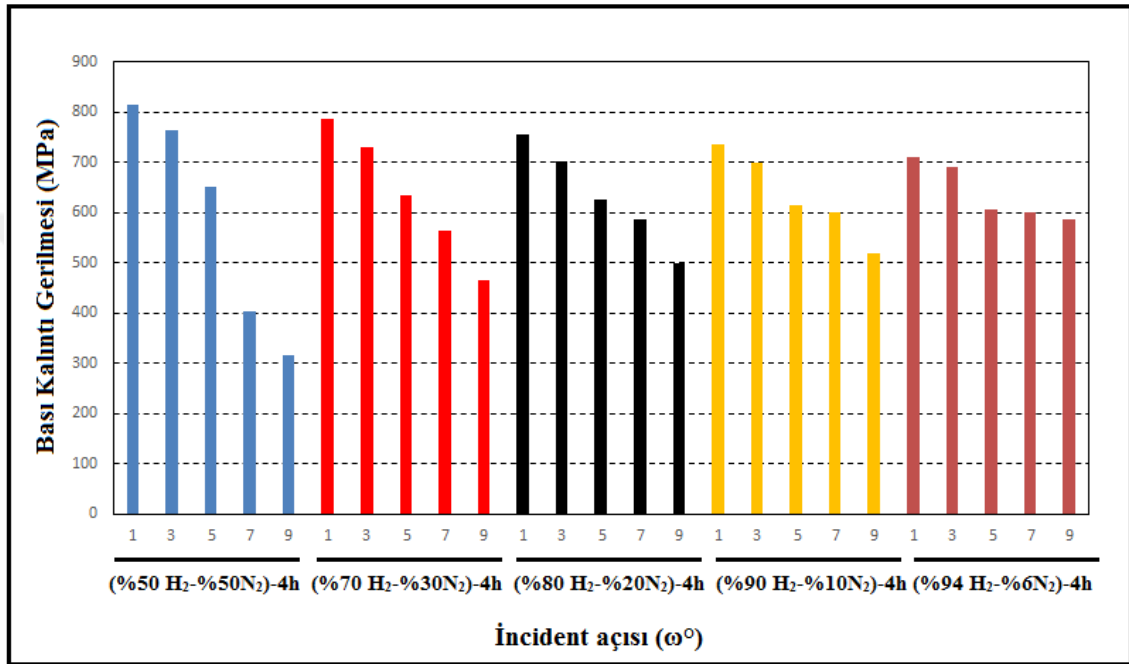
arasına girerek yapı içerisinde arayer katı çözelti oluşturmasıyla sert nitrür fazları meydana getirmektedir (Çelik 1996; Yazıcı 2013). Ayrıca, gaz karışımındaki hidrojen oranının artmasıyla nitrür piklerinin yoğunluğu da azalmıştır. Ayrıca %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş çelik kam millerinde CrN(311) pikinin tamamen kaybolduğu görülmüştür.

4.1.2. Artık gerilme analizleri

Artık (kalıntı) gerilmeleri teorik olarak hesaplamak oldukça zordur, fakat deneysel olarak ölçümü nispeten kolaydır. Artık gerilmelerin ölçülmesinde birçok metot kullanılmaktadır. Bunların içinde en yaygın ve pratik olanı X-ray diffraction yöntemi, numunede hasar oluşturmadan artık gerilmeleri belirleyen bir yöntemdir. Bu yöntemle artık gerilme ölçümünde kullanılan kırınım metotları, temel olarak kristal yapıya sahip bir malzemeye X ışınları gönderilmesiyle, maksimum şiddetin elde edildiği açının ölçülmesine dayanır. Bu açılardan, Bragg kanununa göre kırınım düzlemlerindeki düzlemler arası mesafe belirlenmektedir. Uygulanan işlemler sonucu meydana gelen kristalografik deformasyonlar gerilme olmayan duruma kıyasla kafes düzlemleri arasındaki mesafenin değişmesine neden olur. Bası artık gerilmelerinde poisson oranı etkisinden dolayı gerilme yönüne dik yöndeki düzlemlerde boşluk azalmasına, yatay düzlemlerdeki boşluğun ise artmasına neden olurken, çeki artık gerilmelerinde ise tam tersi bir durum gözlemlenmektedir. Bu yöntemle artık gerilme ölçümü yapılırken, XRD cihazında kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu ve yansıma açıları bilindiğinden, Bragg kanunu kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) tespit edilebilir. Düzlemler arası mesafe (d)'ye karşılık $\sin^2\omega$ grafiği çizildiğinde eğrinin eğiminin gerilme ile orantılı olduğu belirtilmiştir. Kullanılan XRD cihazının yazılımı bu esasa dayanarak doğrudan artık gerilme değerlerini otomatik olarak vermektedir.

Plazma ile nitrürlenmiş malzemelerin difüzyon bölgesinde arayer azot atomlarının kristal kafesini genişletmesi ve nitrür çökeltilerinin meydana gelmesinden dolayı bası kalıntı gerilmeleri oluşmaktadır. Meydana gelen bası kalıntı (artık) gerilmelerinin difüzyon etkisinden iç kısımlara doğru azaldığı bilimsel literatürde yapılan birçok

çalışmada açıklanmıştır (Taş 2010; Kovacı 2016). Düşük derecedeki incident açıları yüzeye yakın bölgedeki kalıntı gerilme değerlerini verirken, bu açı değeri arttıkça yüzeyden daha derin kısımlara doğru kalıntı gerilme değerleri de elde edilmiştir. Bu yüzden farklı incident açılarıyla (ω) X ışınları yüzeye gönderilmiştir.

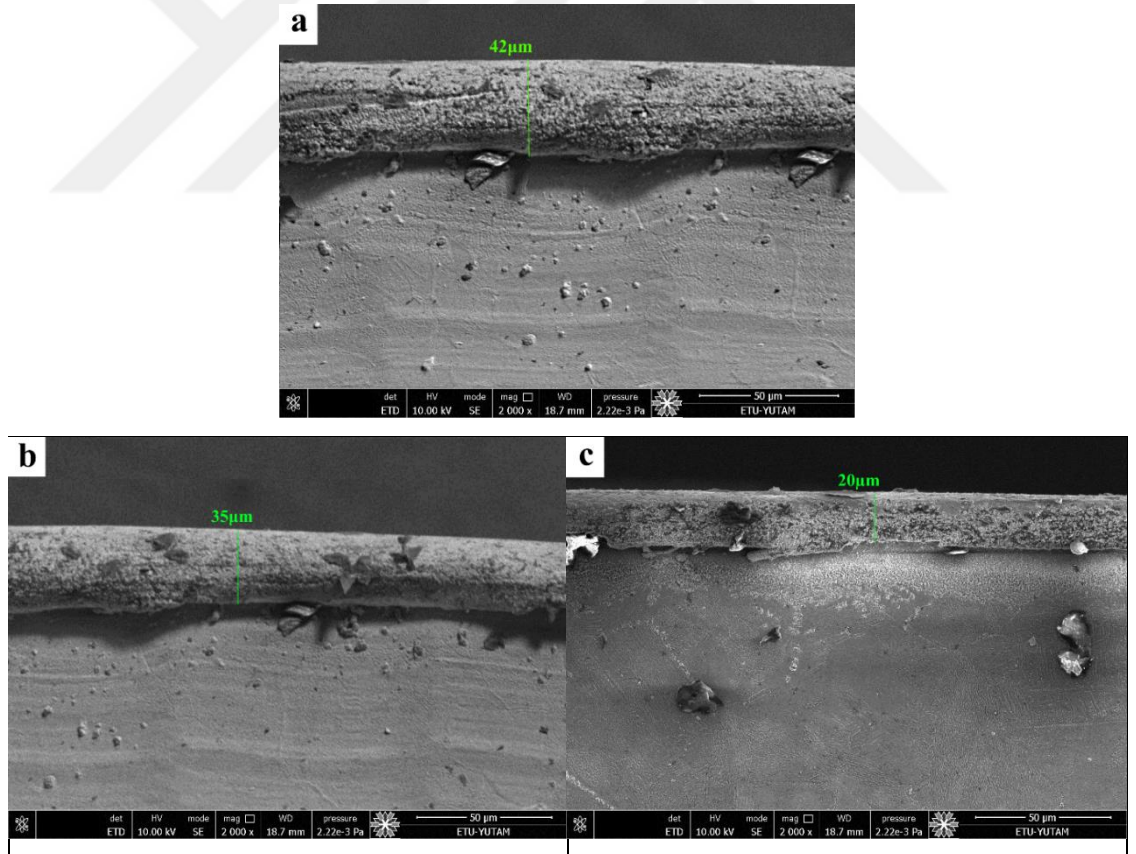


Şekil 4.2. Farklı şartlarda nitrülenmiş çelik kam milinin farklı incident açılarında elde edilen artık gerilme değerleri

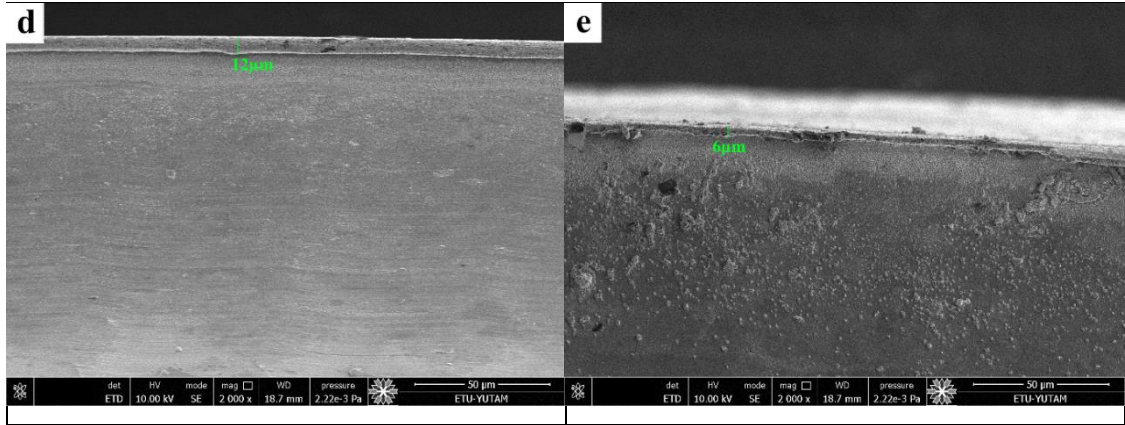
Şekil 4.2’de farklı işlem şartlarında plazma ile nitrülenmiş çelik kam millerinin farklı incident açılarda elde edilmiş bası kalıntı gerilme değerleri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde ve %50 H₂-%50 N₂ gaz karışımında nitrülenmiş çelik kam millerinin yüzeye yakın bölgelerdeki bası artık gerilme değerlerinin diğer şartlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ancak aynı sıcaklık ve sürede gaz karışımındaki hidrojen gazı miktarı artırıldığında artık gerilme değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha derinlerdeki bası artık gerilme değerlerini tespit etmek için ise yüksek incident açılarda ölçüm yapılmıştır. Bu sonuçlara göre, yüksek incident açılarda ($\omega=7^\circ, \omega=9^\circ$) elde edilen bası kalıntı gerilmelerinin en yüksek değerleri %94 H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrülenmiş kam millerinde görülmüştür.

4.1.3. Mikroyapı analizleri

Şekil 4.3’de işlemsiz ve farklı gaz karışımı oranlarında plazma ile nitrürlenmiş çelik kam millerinin kesit SEM resimleri görülmektedir. Nitrürleme işlemi sonrasında, çelik malzemenin yüzeyinde taban malzeme ile belirgin bir çizgi ile ayrılmış, homojen bir kalınlığa sahip modifiye tabakanın oluşumu gözlenmektedir. Kesit resimleri incelendiğinde en kalın beyaz tabaka %50H₂-%50N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik kam millerinde elde edilmiştir. Gaz karışımındaki azot yoğunluğunun artışı beyaz tabaka içerisinde oluşan faz yoğunluğunun artmasına ve tabaka kalınlığının da büyümesine neden olmuştur. Gaz karışımındaki azot oranı düştükçe beyaz tabakanın kalınlığı da azalmıştır.



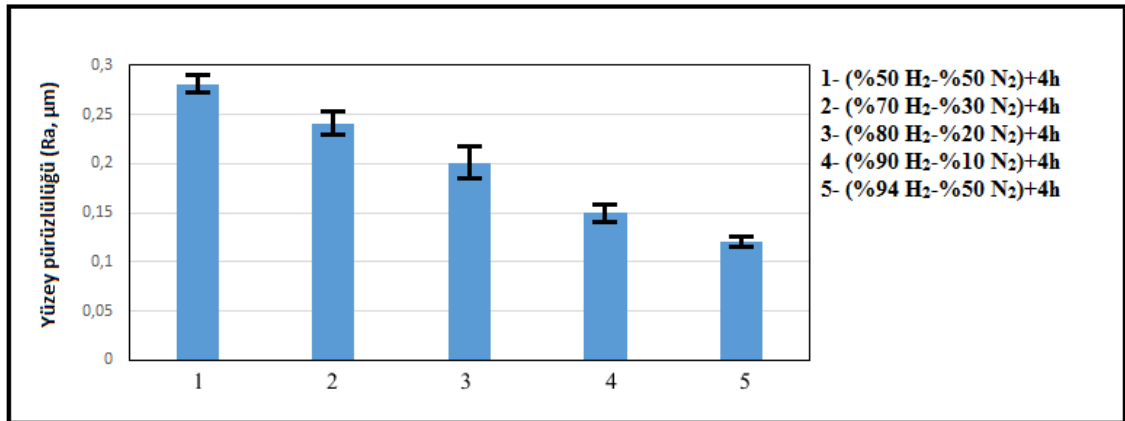
Şekil 4.3. (devam)



Şekil 4.3. Nitrürlenmiş çelik kam milinin kesit SEM görüntüleri

a) %50 H₂ + %50 N₂ b) %70 H₂ + %30 N₂ c) %80 H₂ + %20 N₂ d) %90 H₂ + %10 N₂ e) %94 H₂ + %6 N₂

Ayrıca en düşük tabaka kalınlığı %94H₂-%6N₂ gaz karışımında plazma ile nitrürlenmiş çelik kam milinden elde edilmiştir. Şekil 4.4’de gaz karışımındaki azot oranı artışı ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri %50 H₂ + %50 N₂ gaz karışımında ölçülürken, en düşük pürüzlülük değeri %94 H₂ + %6 N₂ gaz karışımı ile nitrürlenmiş kam milinden elde edilmiştir.



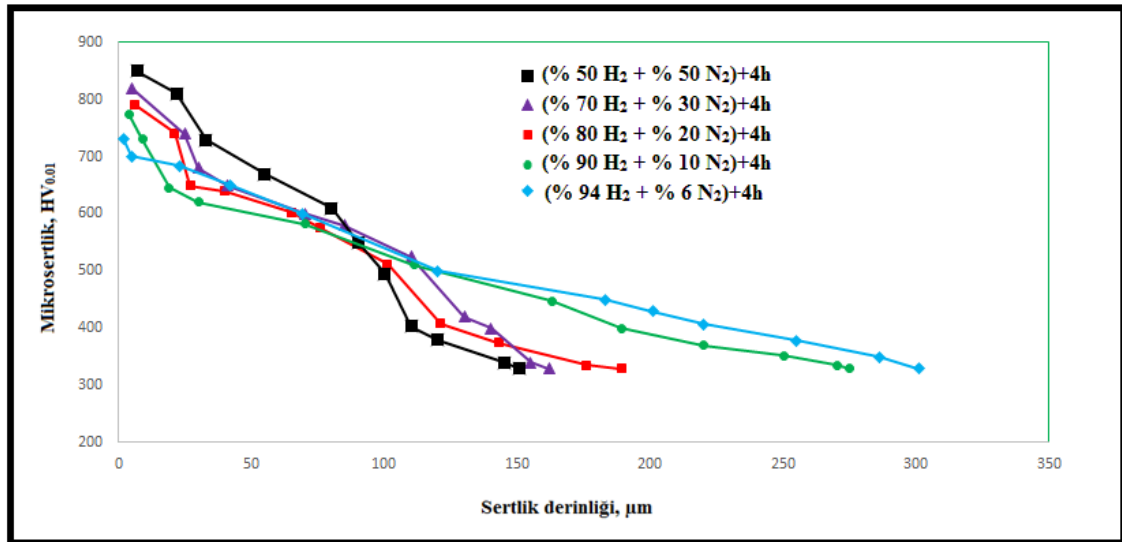
Şekil 4.4. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik kam milinin yüzey pürüzlülüğü

4.1.4. Mikrosertlik incelemeleri

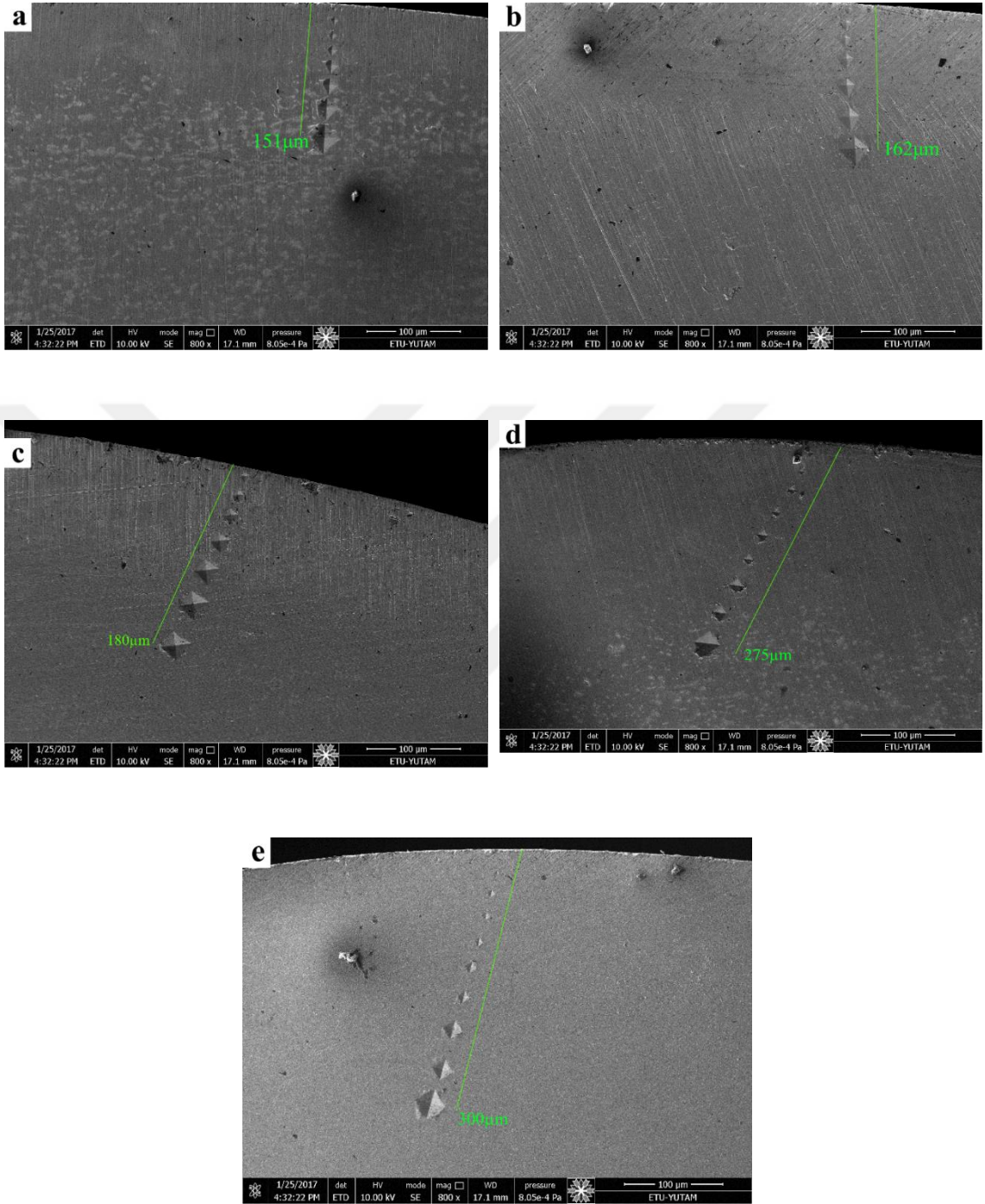
Plazma ile nitrüleme sonucu elde edilen sertlik değerleri taban malzeme sertliğine ve işlem sonucu oluşan tabakanın kalınlığına bağlıdır. Gaz karışımındaki azot miktarı

arttıkça sertlik değerlerinde artış görülmüştür (Çizelge 4.1). İşlem görmemiş nitrürlenmiş çelik kam milinin yüzey sertliği 300-330 HV0.01 olarak tespit edilmişken, plazma ile nitrürlenmiş kam millerinde oldukça yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.

Şekil 4.5’de işlemsiz ve farklı gaz karışımı oranlarında plazma ile nitrürlenmiş çelik kam milinin sertlik dağılımı gösterilirken Şekil 4.6’de ise nitrürlenmiş malzemelerin difüzyon tabaka kalınlığını tespit etmek için mikrosertlik izlerinin SEM resimleri verilmiştir. Şekil 4.5’deki sertlik dağılımları, Şekil 4.6’daki SEM kesit resimleri birlikte değerlendirildiğinde nitrürlenmiş çelik numunelerde oluşan difüzyon derinlikleri hakkında bilgiler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en düşük difüzyon derinliği %50H₂-%50N₂ gaz karışımında gözlenmesine karşın en yüksek difüzyon derinliği ise %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş çelik kam millerinde ölçülmüştür. Bunun nedeni ise gaz karışımındaki hidrojen miktarının artmasıyla daha yüksek voltajın uygulanmasıdır. Uygulanan gerilim miktarının artması iyonize olan gaz miktarının, iyonların kinetik enerjisinin ve iyonize olan azotun hızının artmasına neden olmuştur. Bunun neticesinde beyaz tabaka kalınlığı azalırken difüzyon derinliği artmıştır (Alsaran 2002).



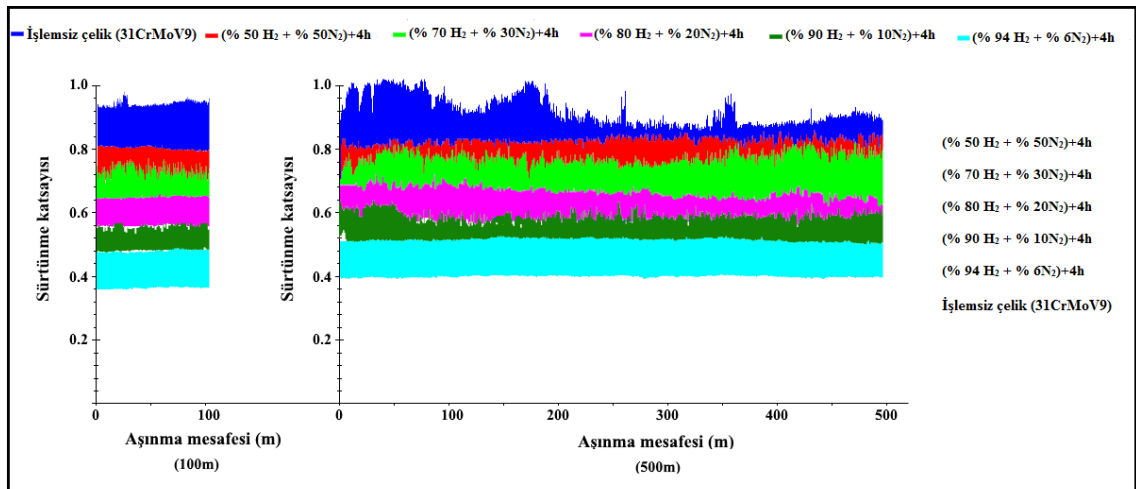
Şekil 4.5. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik kam milinin sertlik dağılımı olan azotun hızının artmasına neden olmuştur.



Şekil 4.6. Nitrürlenmiş çelik kam milinin mikrosertlik ölçümlerinin SEM kesit resimleri
a) %50 H₂ + %50 N₂ b) %70 H₂ + %30 N₂ c) %80 H₂ + %20 N₂ d) %90 H₂ + %10 N₂ e) %94 H₂ + %6 N₂

4.1.5. Sürtünme ve aşınma analizleri

Nitrülenmemiş ve farklı işlem parametrelerinde plazma ile nitrülenmiş çelik kam millerinden kesilmiş numunelere uygulanan aşınma test sonuçları Çizelge 4.1’de belirtilmiştir. Bu testler hem kuru (yağsız) şartlarda hem de yağlı ortamda yapılmıştır. Kuru şartlarda yapılan testlerde sürtünme katsayısı-zaman grafikleri incelendiğinde, testin başlangıcında sürtünme katsayısının hızla arttığı görülmektedir. Bunun sebebi, sürtünme testi başlangıcında, aşındırıcı bilye ile çelik numune yüzeyindeki pürüzlülüklerinin üst noktasının temas etmesiyle, temas yükünün yüksek, yüzey alanının ise çok düşük olmasıdır. Bu ilk temas esnasında oluşan Hertzian teması nedeniyle sürtünme katsayısının değeri artmakta, daha sonra temas eden yüzeylerin birbirine alışması sonucu, azalan pürüzlülükle kararlı hale gelmektedir (Çomaklı 2013). Şekil 4.7’de gösterildiği gibi yağsız ortamda 30N’luk yük altında 100 m’lik ve 500 m’lik mesafeler sonucunda nitrülenmemiş çelik numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0.83 ve 0.90 iken %50H₂-%50N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrülenmiş çelik numunelerde sürtünme katsayıları azalarak 0.70 ve 0.75 olarak ölçülmüştür.

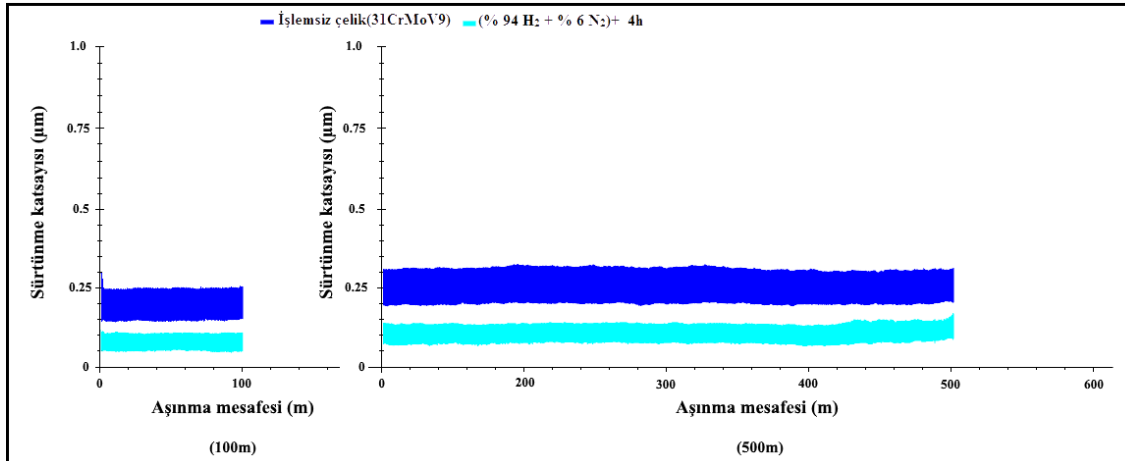


Şekil 4.7. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrülenmiş çelik numunelerin kuru(yağsız) ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği

Nitrülenmiş çelik numunelerde, yüzey sertliğinin artışı adezyon oluşum ihtimalinin

azalmasına sebep olmuştur. Bu yüzden, nitrürlenmiş numunelerde artan yüzey sertliği ile birlikte sürtünme katsayısında da azalma gözlemlenmiştir. Şekil 4.7 incelendiğinde nitrürlenmiş çelik numunelerde gaz karışımındaki hidrojen miktarının artmasıyla numunelerin sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir. Ayrıca en düşük sürtünme katsayısı gaz karışımındaki hidrojen miktarı %94 olduğunda durumda görülmüştür. Burada yüzey pürüzlülüğü önemli bir rol oynamaktadır. Çünkü en düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek yüzey sertliği %94H₂-%6N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik numunelerden elde edilmiştir.

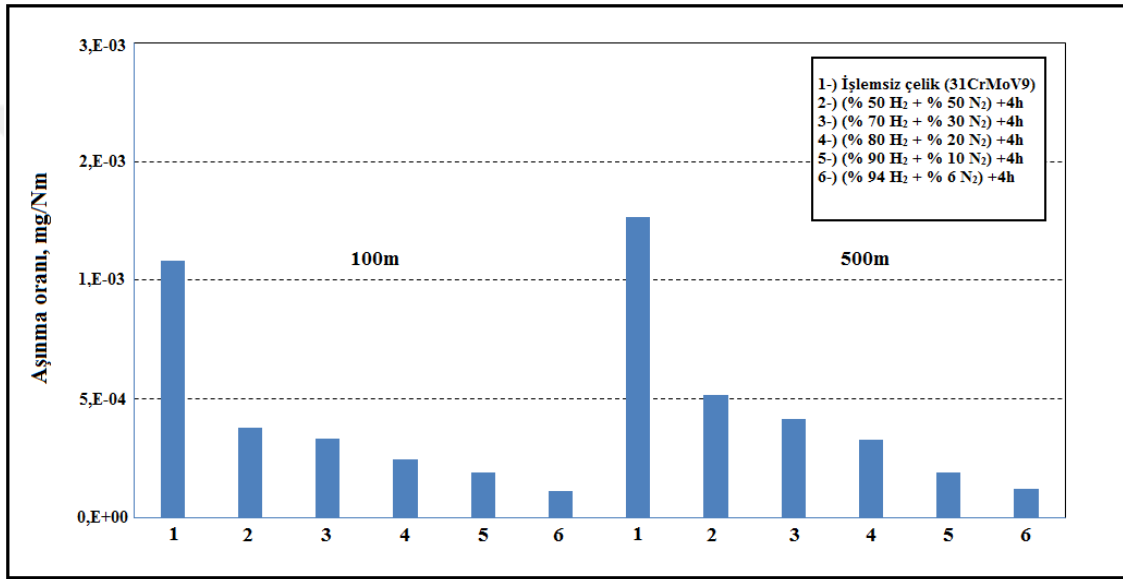
Yağlı ortamın sürtünme katsayısına etkisini incelemek için nitrülenmemiş ve %94H₂-%6N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik numunelerde 100 ve 500 m'lik aşınma mesafelerinde 30 N yükte aşınma testleri yapılmıştır. Şekil 4.8'da görüldüğü gibi yağlı ortamda yapılan deneylerde sürtünme katsayısı aynı koşullardaki kuru deneye göre oldukça düşmüştür. Bunun sebebi aşınma testi esnasında bir biri ile temas halinde bulunan katı yüzeyler arasında belirgin bir fiziksel özelliklere sahip bir yağ filmi oluşmasından dolayı sürtünmede belirgin bir şekilde sürtünme katsayılarının düşmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.8. İşlemsiz ve 500°C'de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş çelik numunelerin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği

Şekil 4.9'da 100 m ve 500 m'lik aşınma mesafesi sonrası işlemsiz ve farklı işlem

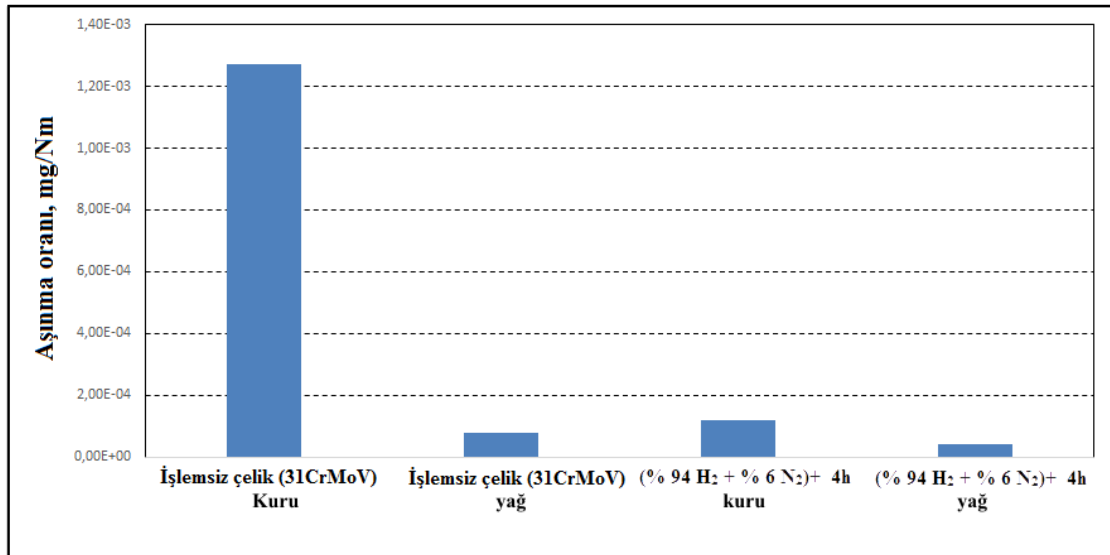
şartlarında nitrülenmiş çelik numunenin kuru ortamdaki aşınma oranları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi nitrüleme işlemi sonucunda nitrülenmemiş çeliğe göre oldukça düşük aşınma oranı değerleri elde edilmiştir. En yüksek aşınma oranı işlemsiz çelik numune için elde edilmiş olup nitrüleme işlemi sonrasında aşınma oranında düşüş tespit edilmiştir. En düşük aşınma oranı 500°C’de 4 saatte %94H₂-%6N₂ gaz karışımında plazma ile nitrülenmiş çelik numunelerde görülmüştür.



Şekil 4.9. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrülenmiş çelik numunelerin kuru (yağsız) ortamdaki aşınma oranları

Aynı sıcaklık ve sürede %50H₂-%50N₂ gaz karışımında nitrülenmiş numunenin yüzey sertliği yüksek olmasına karşın aşınma oranı nispeten yüksek olarak gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi, ise 500°C’de %50H₂-%50N₂ gaz karışımı 4 saatlik nitrüleme sonrası yapıda oluşan nitrür yapının sertliğinin yüksek olmasından dolayı test esnasında nitrür tabakanın kırılması ve abrazif etki göstermesine bağlanmaktadır. Abrazif aşınma sırasında gevrek ve kırılgan bir davranış sergilemektedirler. Numune yüzeyine batan aşındırıcı malzeme bu gevreklik nedeniyle hem önündeki alanı hem de yan kısımlardaki alanları zorlamaktadır. Bu zorlama sırasında takviye miktarı yüksek olduğunda azalan matris alınının uygulanan zorlamaya karşı koyamaması ve gevrek davranış nedeniyle aşınmada artış meydana gelmesidir (Podgornik 1998). Aşınan yüzeyde çizikler daha

ince ve derinliği az, ancak çevredeki zorlamalara bağlı olarak kütleli kopmaları meydana gelmektedir. Ancak, gaz karışımındaki azot miktarının azalmasıyla aşınma oranlarının orantılı olarak azaldığı tespit edilmiştir ve grafikten yüzey sertliğinin aşınma oranı üzerine önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür (Mohammadzadeh 2014). Bunun sebebi, yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısı olmaktadır (Mohammadzadeh 2014). Bunun sebebi, yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısı azaldıkça nitrürlenmiş çelik numunelerin aşınma oranlarının da düşmesidir. Bu sonuçlara göre, düşük yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısından dolayı en yüksek aşınma direnci %94H₂-%6N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik numunelerden elde edilmiştir.



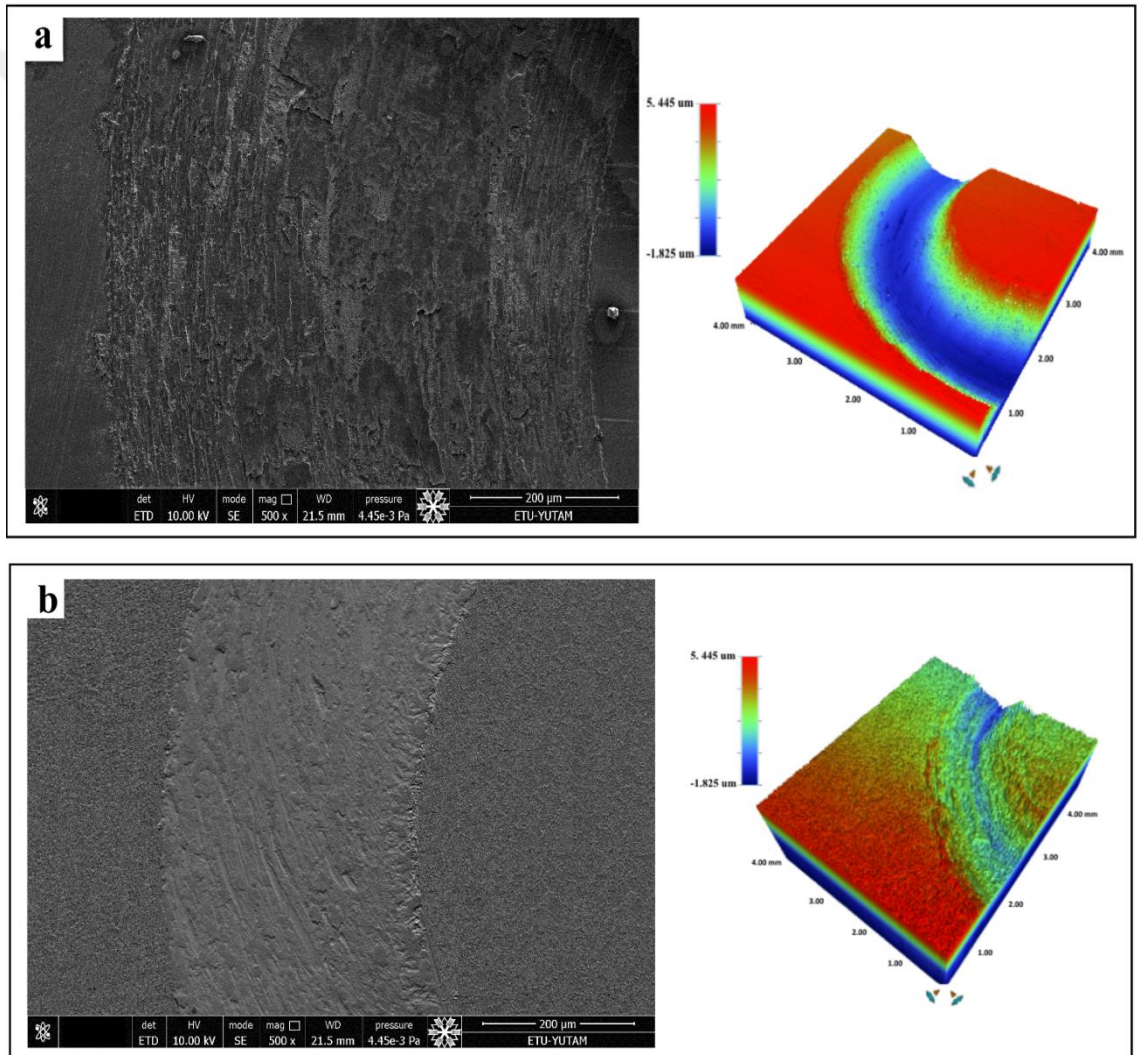
Şekil 4.10. İşlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş çelik numunelerin 500m’lik aşınma mesafedeki kuru (yağsız) ve yağlı ortamdaki aşınma oranları

Yağlı ortamın aşınma oranına etkisini görmek için işlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş çelik numunelere hem kuru hem de yağlı ortamda 500m’lik aşınma mesafesinde aşınma testlerine tabi tutularak

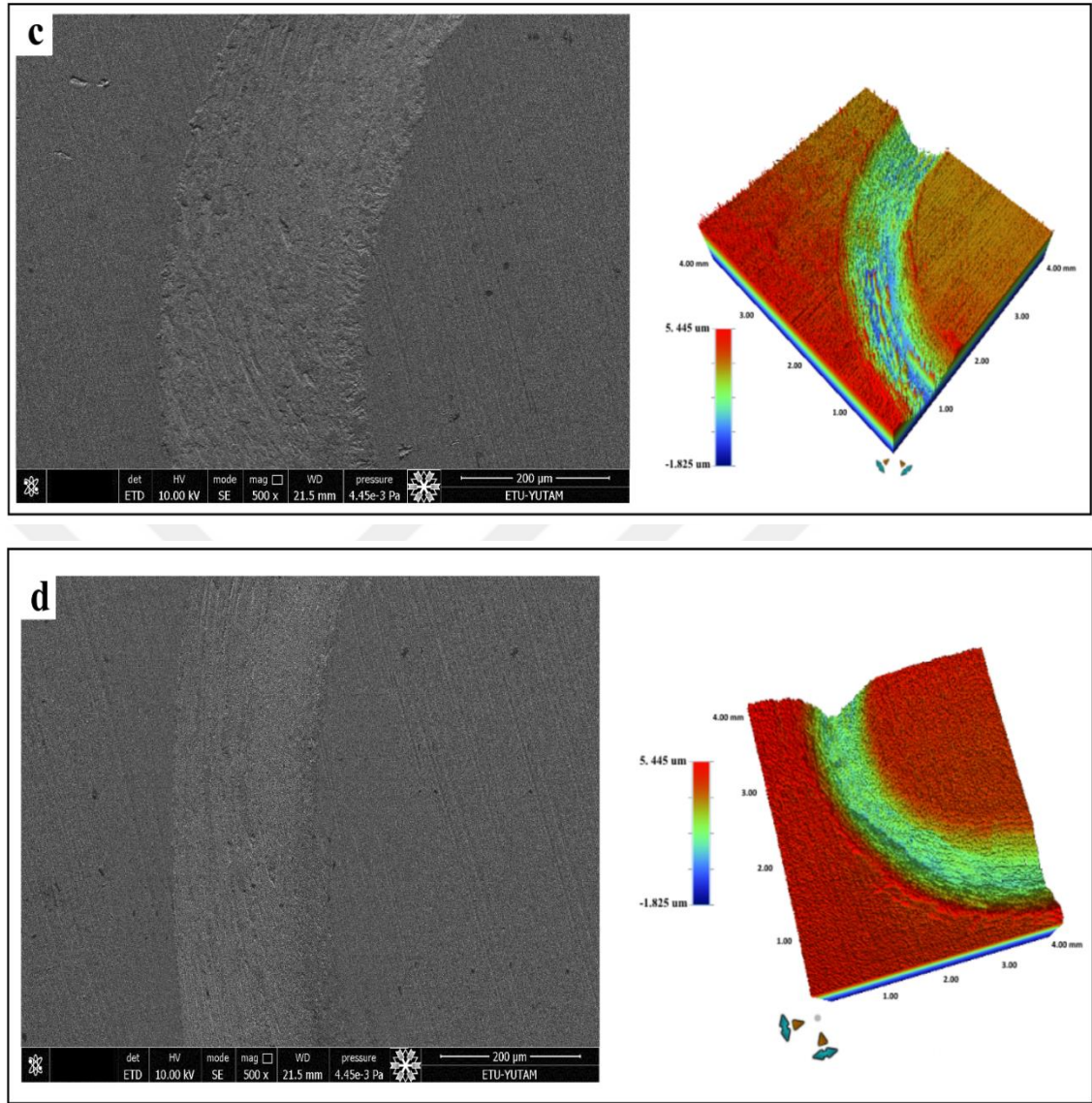
Çizelge 4.1. Farklı plazma nitrürleme parametreleriyle beyaz ve difüzyon tabakaların, yüzey sertlik ve pürüzlülüğünün, kuru ve yağlı ortamda sürtünme katsayısının ve aşınma oranının değişimi

Nitrürleme parametreleri			Beyaz tabaka [μm]	Difüzyon tabakası [μm]	Yüzey sertliği, H _{0.01}	Yüzey pürüzlülüğü R _a , [μm]	Sürtünme katsayısı 100m Kuru ortam	Sürtünme katsayısı 500m Kuru ortam	Aşınma oranı (mg/Nm) 100m Kuru ortam	Aşınma oranı (mg/Nm) 500m Kuru ortam	Sürtünme katsayısı 500m Yağlı ortam	Aşınma oranı (mg/Nm) 500m Yağlı ortam
Sıcaklık [°C]	Zaman [h]	Gaz karışımı										
500	4	50% N ₂ + 50% H ₂	40-43	145-155	874-878	0.25–0.30	0.76-0.80	0.79-0.81	0,00042	0,00051	0.19-0.20	0,000033
500	4	30% N ₂ + 70% H ₂	34-37	167-180	820-835	0.23–0.25	0.63-0.70	0.69-0.71	0,00034	0,00043	0.17-0.19	0,000030
500	4	20% N ₂ + 80% H ₂	18-22	195-200	790-793	0.18–0.20	0.60-0.65	0.61-63	0,00024	0,00033	0.16-0.17	0,000025
500	4	10% N ₂ + 90% H ₂	11-14	270-285	774-777	0.14–0.16	0.53-0.56	0.57-0.61	0,00019	0,00022	0.13-0.15	0,000022
500	4	6% N ₂ + 94% H ₂	5-6	301-305	731-735	0,10-0,13	0.40-0.47	0.44-0.50	0,00011	0,00012	0.1-0.12	0,000020
İşlemsiz 31CrMoV9 çeliği			-	-	330	0.06–0.08	0.83-0.87	0.85-0.90	0,00108	0,00137	0.20-0.22	0,000050

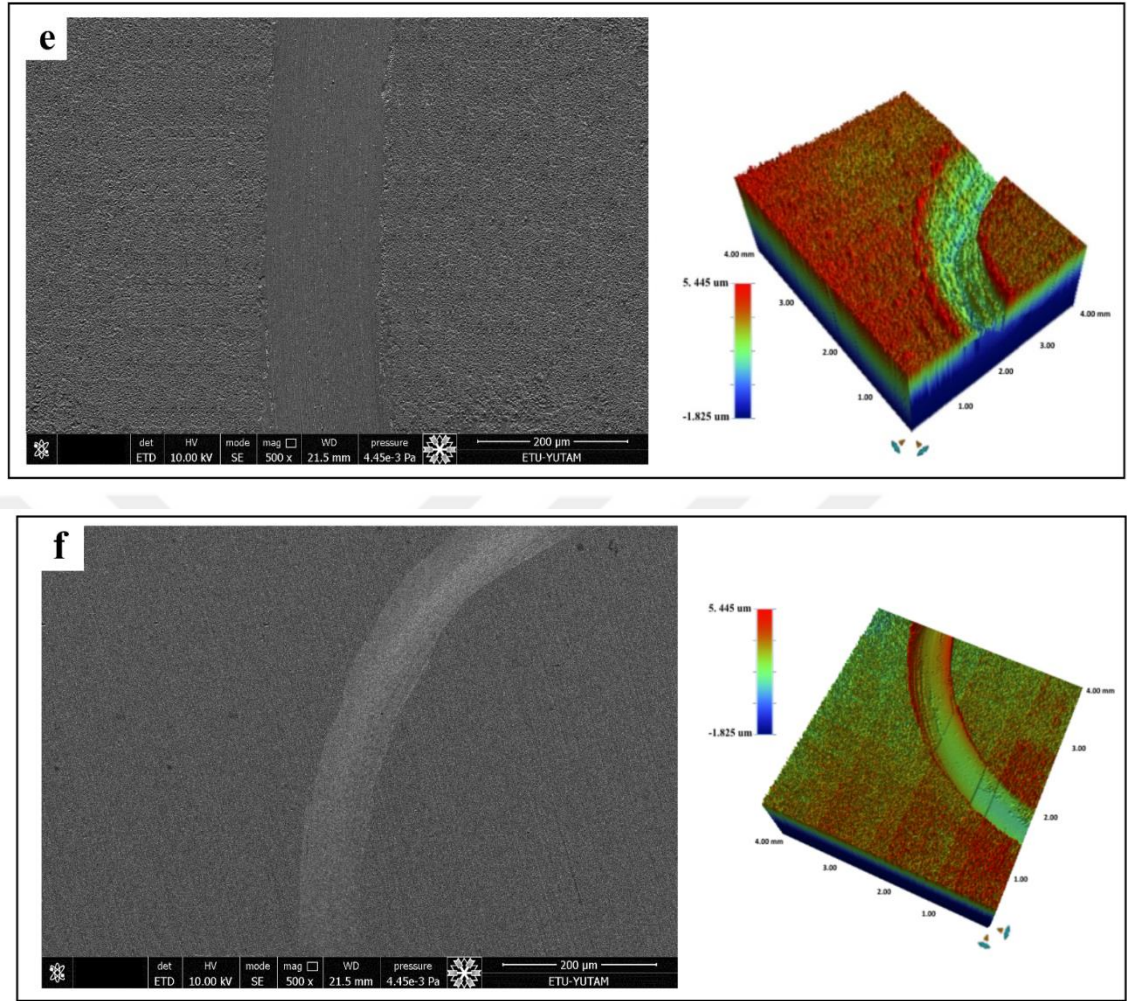
Şekil 4.10’da görüldüğü gibi kıyaslama yapılmıştır. Kuru ortamlarda yapının deneylerde çelik numunenin aşınma direncinde uygulanan plazma nitrüleme işlemi ile yaklaşık 6 kat bir artış olduğu (Şekil 4.10) gözlemlenmiştir. Ancak, hem işlemsiz hem de 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımı oranında nitrülenmiş çelik numuneler yağlı ortamda aşındırıldığında, aşınma da o denli az olmaktadır. Bu nedenle numuneler yağlandığında numunelerin gözenekleri yağ ile dolduğundan kendinden yağlamalı yatak gibi davranış sergilediği düşünülmektedir.



Şekil 4.11. (devam)



Şekil 4.11. (devam)

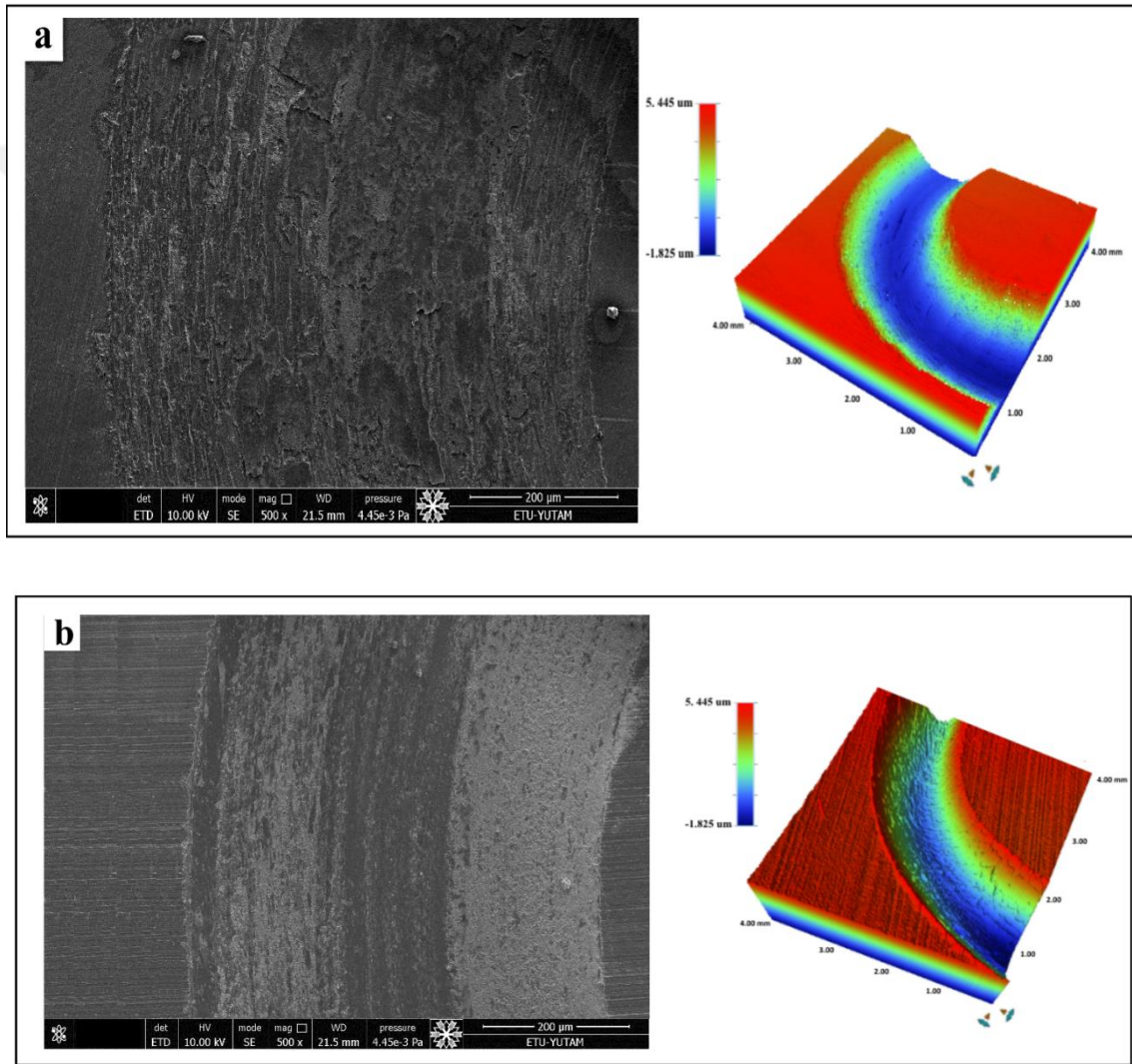


Şekil 4.11. İşlemsiz ve nitrülenmiş çelik numunelerin kuru ortamdaki 500m’lik aşınma mesafesinde aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri

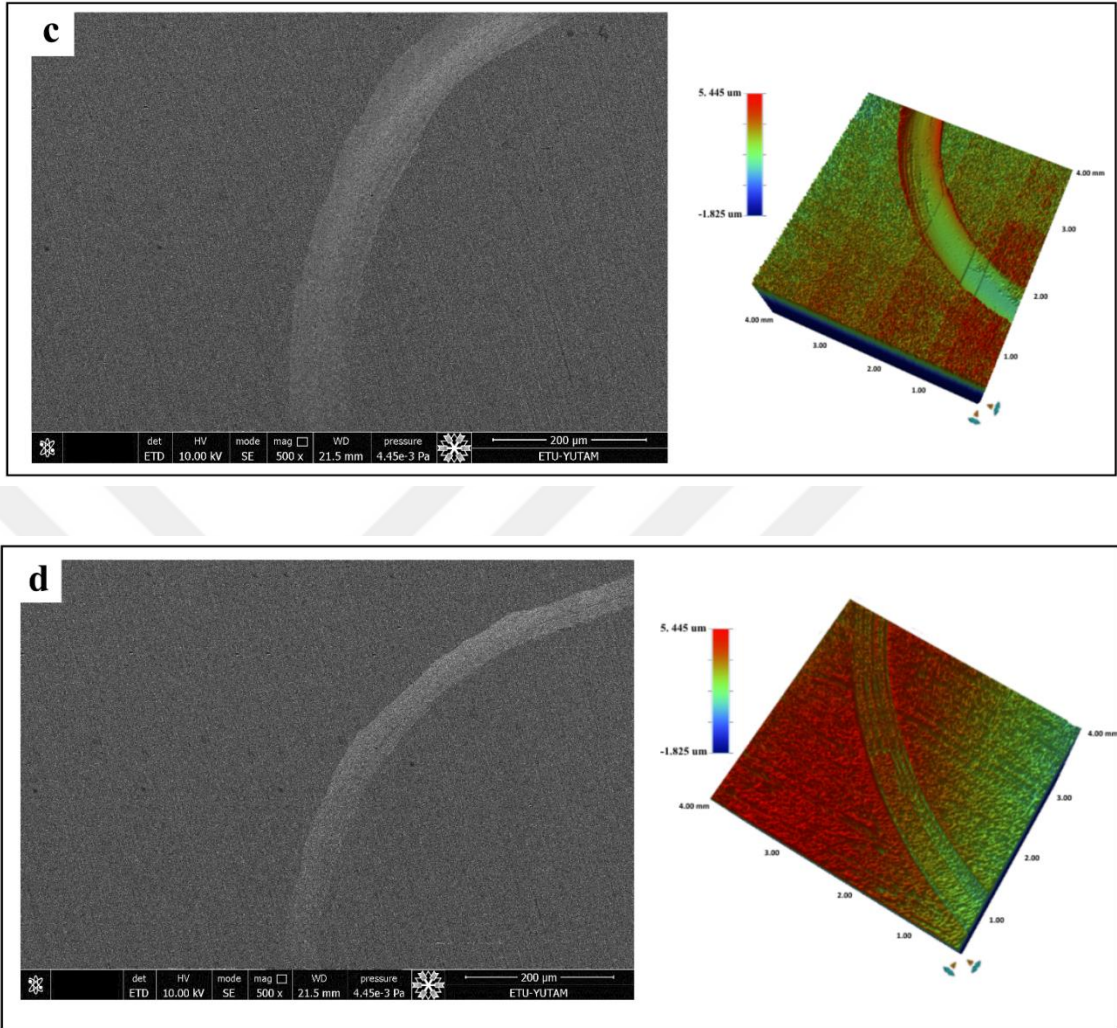
a) İşlemsiz çelik b) %50 H₂ + %50 N₂ 4 saat c) %70 H₂ + %30 N₂ d) %80 H₂ + %20 N₂ e) %90 H₂ + %10 N₂ f) %94 H₂ + %6 N₂

Şekil 4.11’de farklı şartlarda nitrülenmiş numunelerin 500 m’lik mesafede aşınma testi sonrası SEM ve 3D resimleri verilmiştir. Aşınmış yüzey görüntüleri incelendiğinde, işlemsiz ve nitrülenmiş çeliğin farklı aşınma davranışları sergilediği görülmektedir. Nitrülenmiş numunelerin aşınma davranışı adeziv aşınma şeklindedir. Bunun neticesinde aşınma izi oldukça geniş ve derindir. Nitrürlenmenin çelik numunenin aşınması üzerindeki rolü aşınma esnasında yük altındaki numunenin plastik deforme olmasına karşı koymak ve yüzey kimyasını değiştirerek temas eden yüzeyler arasındaki adezyon oluşum ihtimalini azaltmaktır. Nitrürlenme işlemi sonrası işlem parametrelerine bağlı olarak sertliğin artışı ve sürtünme katsayısının düşmesi nitrülenmiş numunelerin

aşınma oranının düşmesindeki en önemli nedenlerindedir. Aşınma testi sonrası, gaz karışımındaki azot oranının azalmasıyla nitrürlenmiş numunelerin aşınma iz genişliği daralmış ve aşınma derinliği azalmıştır. En dar aşınma izi ve en düşük aşınma derinliği %94H₂-%6N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik numunelerde görülmüştür.



Şekil 4.12. (devam)

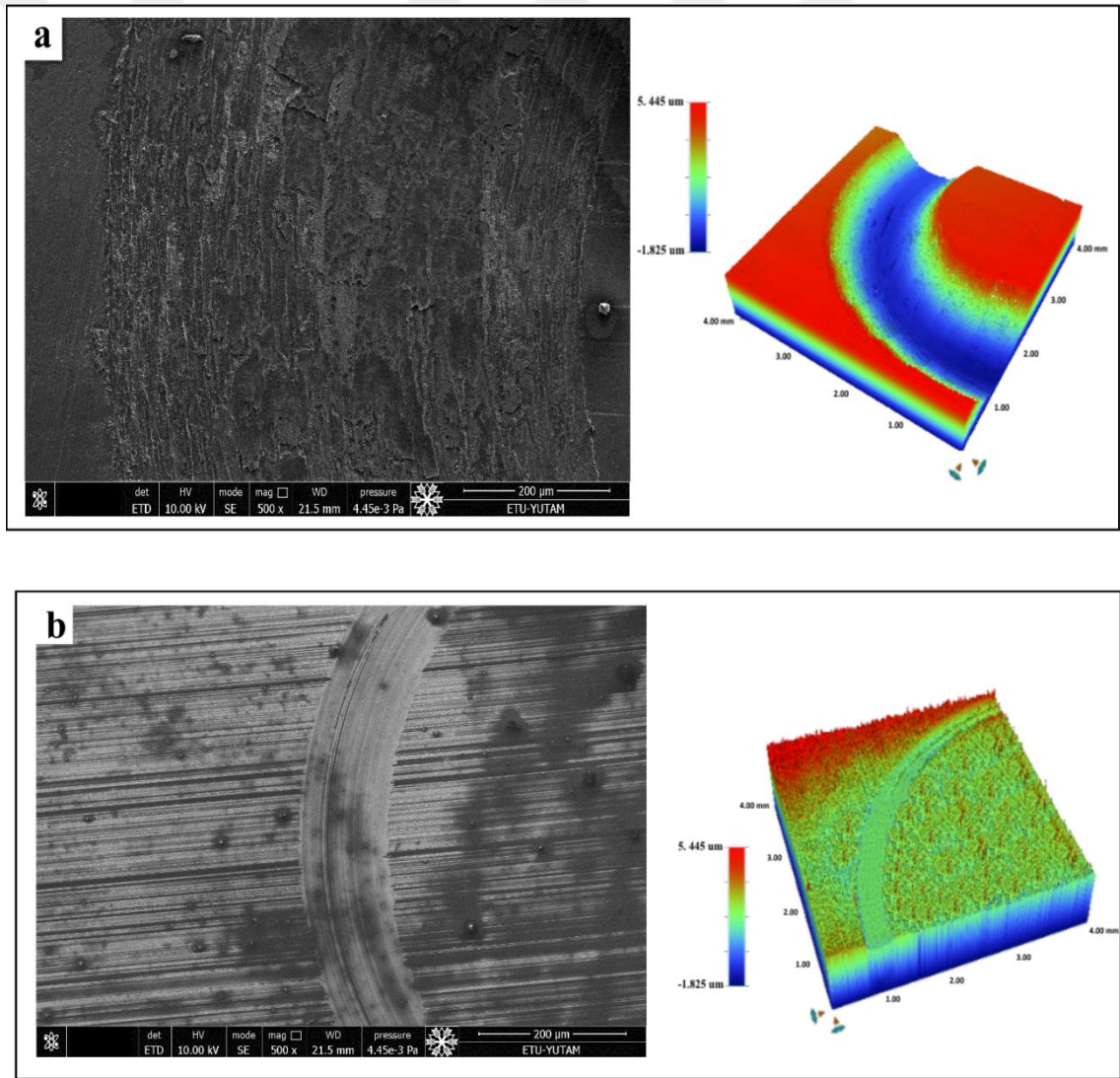


Şekil 4.12. İşlemsiz ve nitrülenmiş çelik numunelerin kuru ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri

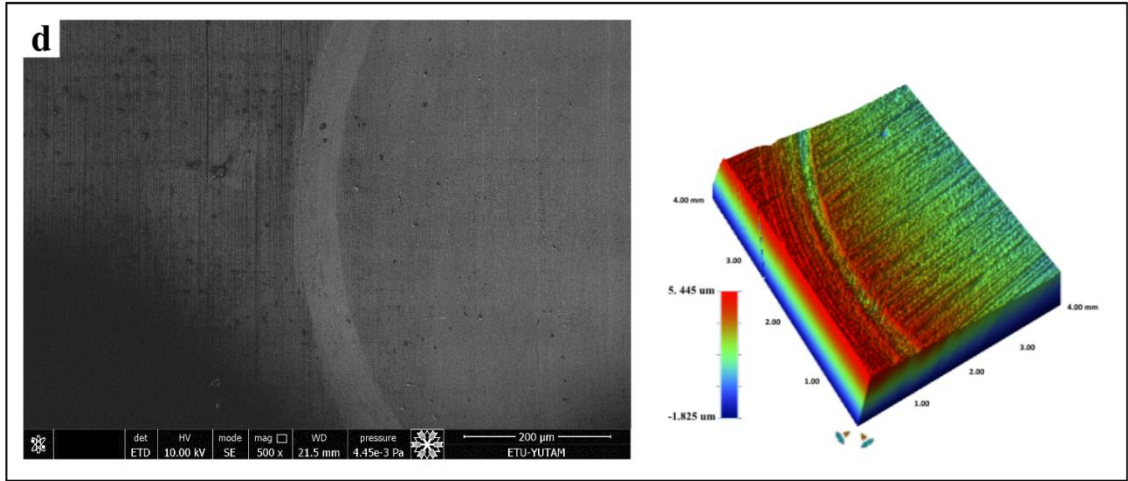
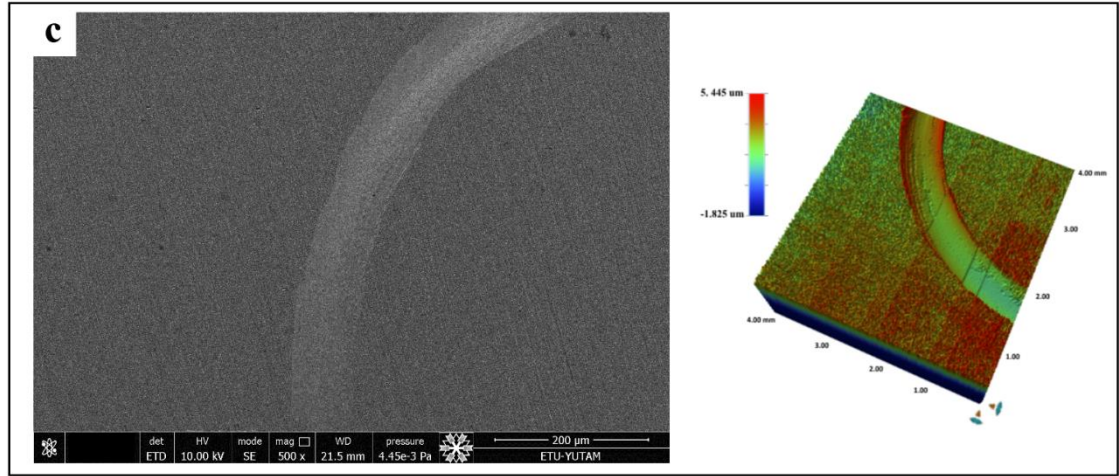
a) işlemsiz-500 m b) işlemsiz-100 m c) %94 H₂ + %6 N₂ -500m, d) %94 H₂ + %6 N₂ -100 m

Şekil 4.12’de ise işlemsiz ve %94H₂-%6N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrülenmiş çelik numunelerin 30N’luk yük altında kuru ortamdaki 100m’lik ve 500m’lik aşınma mesafelerinde aşınma işlemi sonrası aşınma iz resimleri verilmiştir. Hem işlemsiz hemde plazma ile nitrülenmiş çelik numunelerin 100m’lik aşınma mesafesi sonrası aşınma iz genişlikleri ve aşınma derinliği 500m’lik mesafeye göre düşüktür, çünkü 100m’lik aşınma mesafesinde yüzeyler daha az sürede aşınma maruz kalmışlardır.

Nitrülenmemiş ve 500°C’de %94 H₂ + %6 N₂ gaz karışımında 4 satlik işlem süresinde plazma ile nitrülenmiş çelik numuneler 500m’lik aşınma mesafesinde hem kuru (yağsız) hemde yağlı ortamlar da aşındırıldıktan sonra aşınma izlerinin SEM resimleri alınıp Şekil 4.13’de verilmiştir. Yağlı ortamda numunelerin aşınma iz genişlikleri kuru ortamdaki testlere göre daha dar aşınma derinliğinin ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yağlı ortamda yapılan deneylerde sürtünme katsayısı kuru ortama göre çok düşük olmasından ve temas eden yüzeyler arasında yağ filmin oluşmasından dolayı daha dar aşınma izleri gözlemlenmiştir.



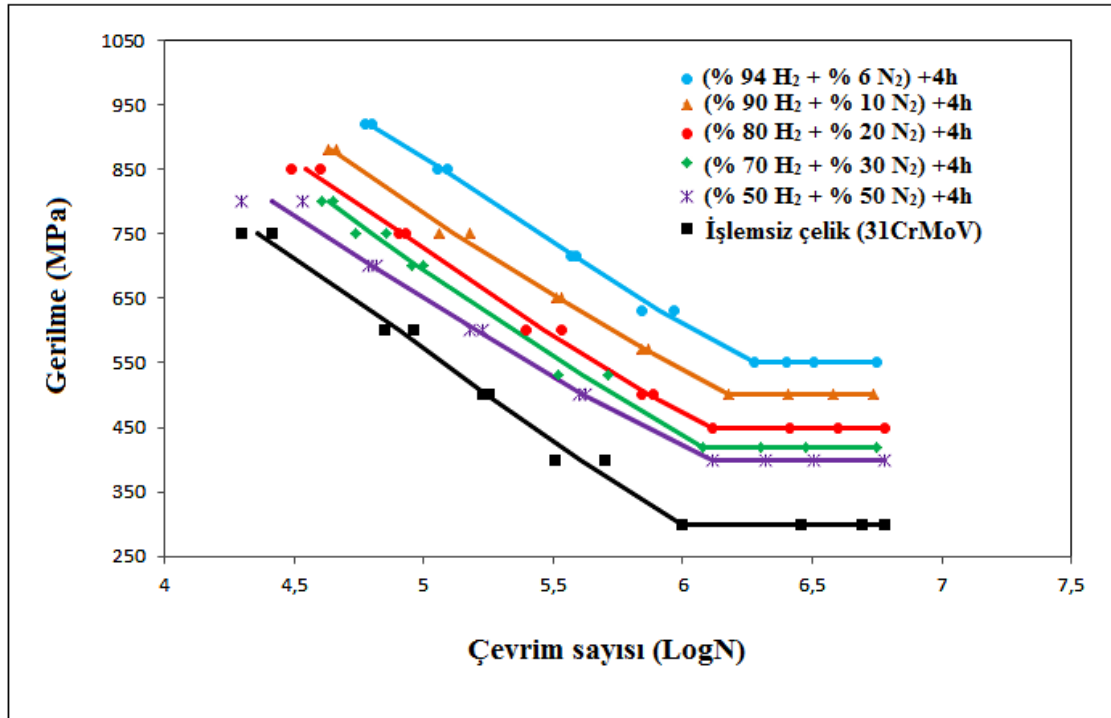
Şekil 4.13. (devam)



Şekil 4.13. İşlemsiz ve nitrürlenmiş çelik numunelerin 500m’lik aşınma mesafelerinde kuru ve yağlı ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri
a) işlemsiz-kuru b) işlemsiz-yag c) %94 H₂ + %6 N₂ -kuru, d) %94 H₂ + %6 N₂ 4 saat-yag

4.1.6. Yorulma analizleri

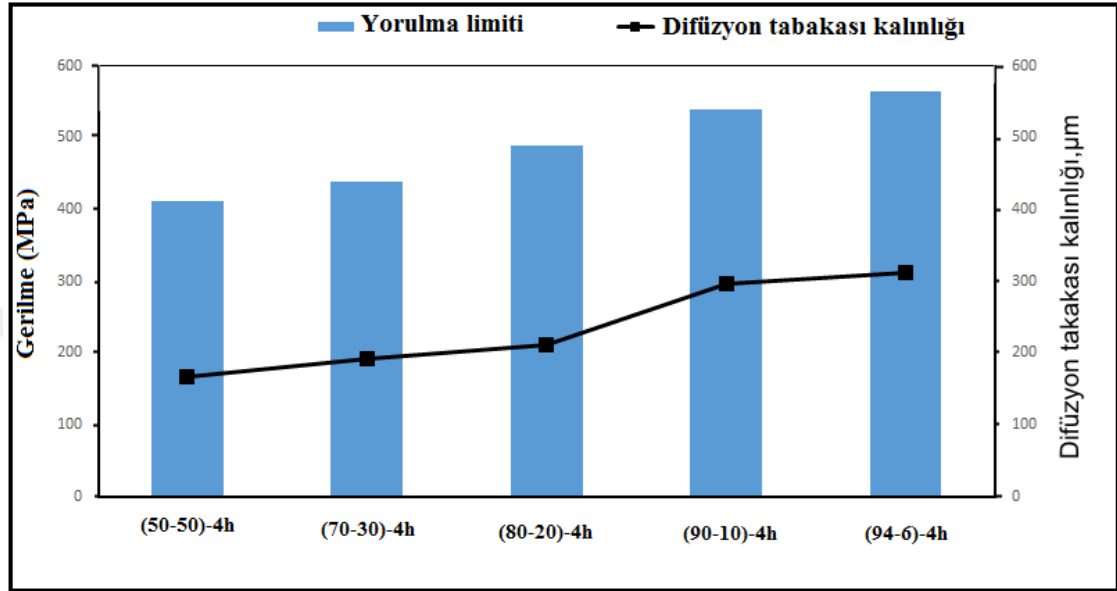
İşlemsiz ve plazma ile nitrürlenmiş numunelerin yorulma dayanımını belirlemek için bi-lineer tip S-N eğrisi uygulanmıştır. S-N eğrisi lineer ve yatay olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Lineer kısım, S-N diyagramında yatay kısmı içermeyen kırılmanın oluşmadığı en yüksek gerilme değerine kadar uzanan kısımdır. Lineer kısımda 5 gerilme seviyesi belirlenerek, her bir gerilme seviyesinde 2 tekrar yapılmıştır. Yatay kısım için ise Staircase metodu kullanılmıştır. Bu kısımda 4 numune denenerek yorulma sınırı belirlenmiştir.



Şekil 4.14. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrülenmiş çeliğin S-N eğrileri

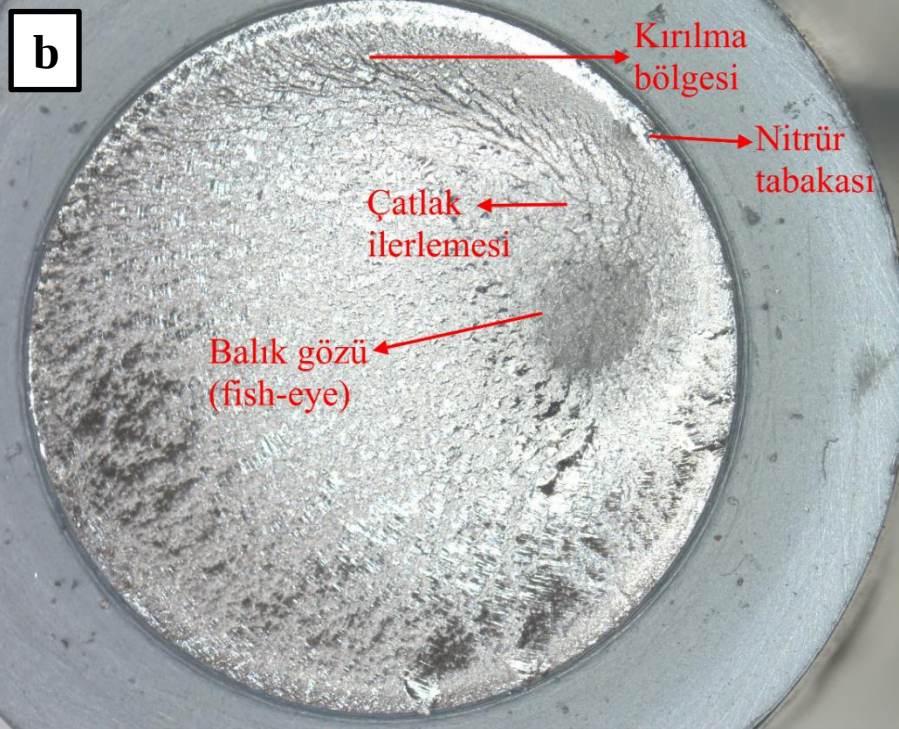
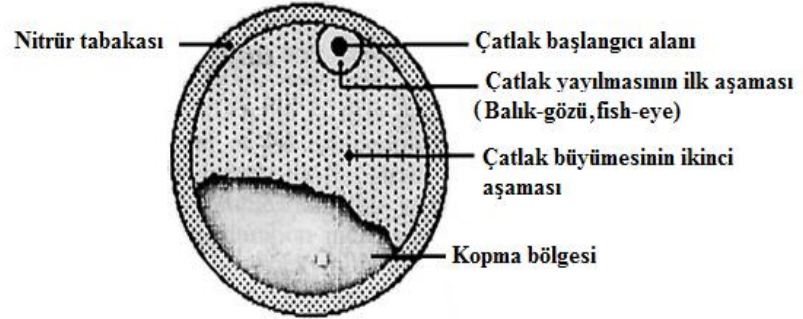
Belirlenen deney planına göre çizilen, işlem görmemiş ve plazma ile nitrülenmiş 31CrMoV9 nitrasyon çeliğinin S-N grafiği Şekil 4.14’de verilmiştir. Plazma ile nitrülenmiş numunelerin tamamında yorulma ömründe artış elde edilmiştir. Yorulma özelliklerindeki bu iyileşme nitrüleme işlemi sonrası elde edilen yüksek sertlik ve bası artık gerilmelerinin yorulma çatlak başlangıcını geciktirmesi ile ilişkilendirilebilir. Bunun nedeni, plazma ile nitrüleme sonucu metal nitrürlerin çökmesi ve γ -Fe fazı içerisinde azotun yeniden dağılması sonucu yüzeyde bası artık gerilmelerinin oluşmasıdır. Oluşan bası gerilmeleri malzemenin yorulma dayanımını artırır. Plazma ile nitrüleme sonucu oluşan difüzyon tabakası bası artık gerilmeleri içerir. Çökelen nitrürlerin oluşumu dislokasyon hareketini engeller ve böylece kayma bantlarının nitrürlenmiş tabakaya doğru hareketi engellenmiş olur. Hem bası artık gerilmelerin hem de yüzey sertliğinin artışı malzemenin yorulma ömrünün artmasına neden olur (Çelik 1995; Ashrafizadeh 2003). Eğriler incelendiğinde gaz oranındaki hidrojen oranı ile paralel olarak numunelerin yorulma dayanımında önemli artışlar olmuştur. Bu artışın Şekil 4.15’de görüldüğü gibi gaz karışımındaki hidrojen artışıyla birlikte artan difüzyon tabakası ile ilgili olduğu söylenebilir. Bunun sebebi ise bası artık gerilmesi içeren

difüzyon tabakası kalınlığının yüksek olmasındandır. Burada en yüksek yorulma dayanımı %94 H₂-%6 N₂ gaz oranında nitrürlenmiş numunelerden elde edilmiştir.

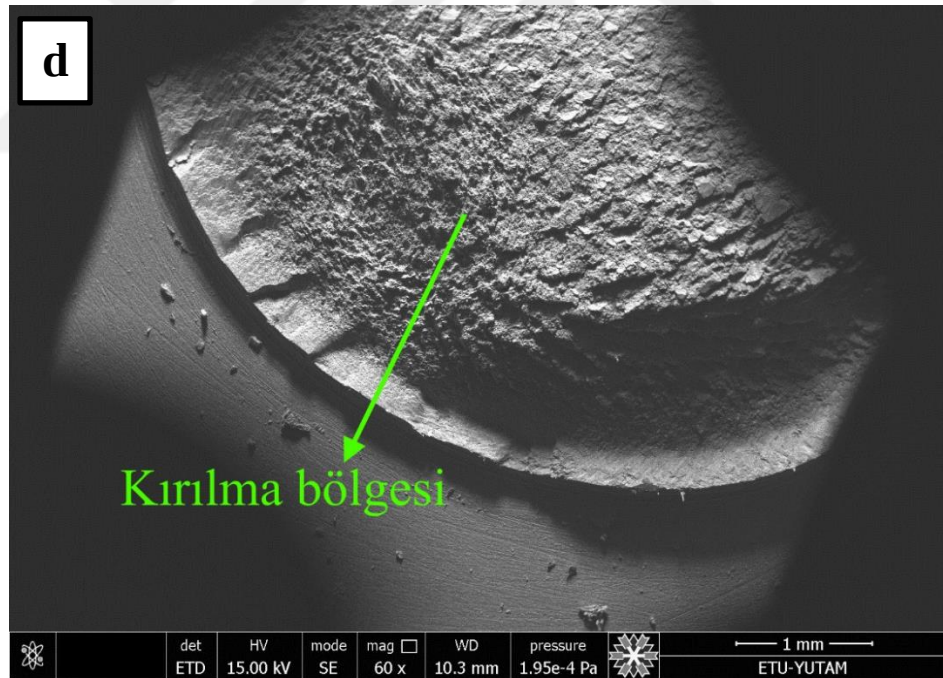
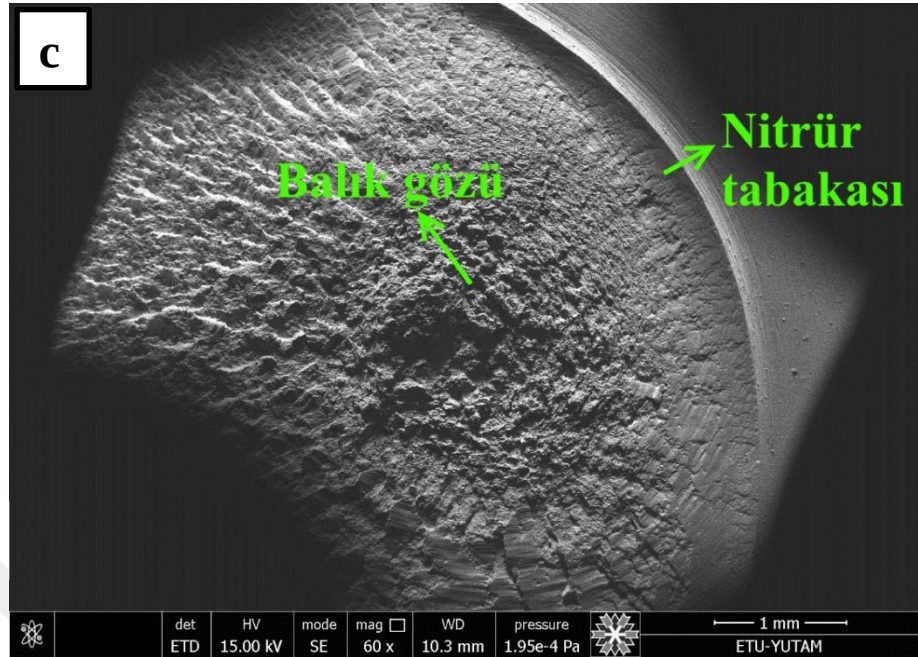


Şekil 4.15. Farklı şartlarda nitrürlenmiş çelik numuneler için yorulma limiti ve difüzyon tabakası kalınlığı

Şekil 4.16'da %94 H₂-%6 N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik numunenin yorulma hasarı sonrasında kırılmış yüzeydeki çatlak başlangıcının, çatlak ilerlemesinin ve kırılma bölgesinin yüzey resimleri verilmiştir. Şekil 4.16.a'da kırılmış yüzeyin şematiği ve Şekil 4.16.b'de ise kırılmış yüzeyin optik görüntüsü gösterilmiştir. Şekil 4.16.c'deki SEM mikrografik ise tipik balık gözü kırılma oluşumunu göstermektedir. Bunun sebebi nitrürleme işlemi sonrası yüzeyde ve yüzey derinliğinde sert bir tabakanın olmasından dolayıdır. Çatlak ilerlemesi Şekil 4.16.d'de görüldüğü gibi transgranüler klivaj kırılma şeklinde ilerlemiştir. Daha sonra yorulma çatlakların belirli bir periyotta ilerlemiş ve uygulanan yük nedeniyle kesitin yükü taşıyamayıp ani bir şekilde kırılmıştır. Şekil 4.16.e'de ani kırılma bölge gösterilmiştir.

a

Şekil 4.16. (devam)



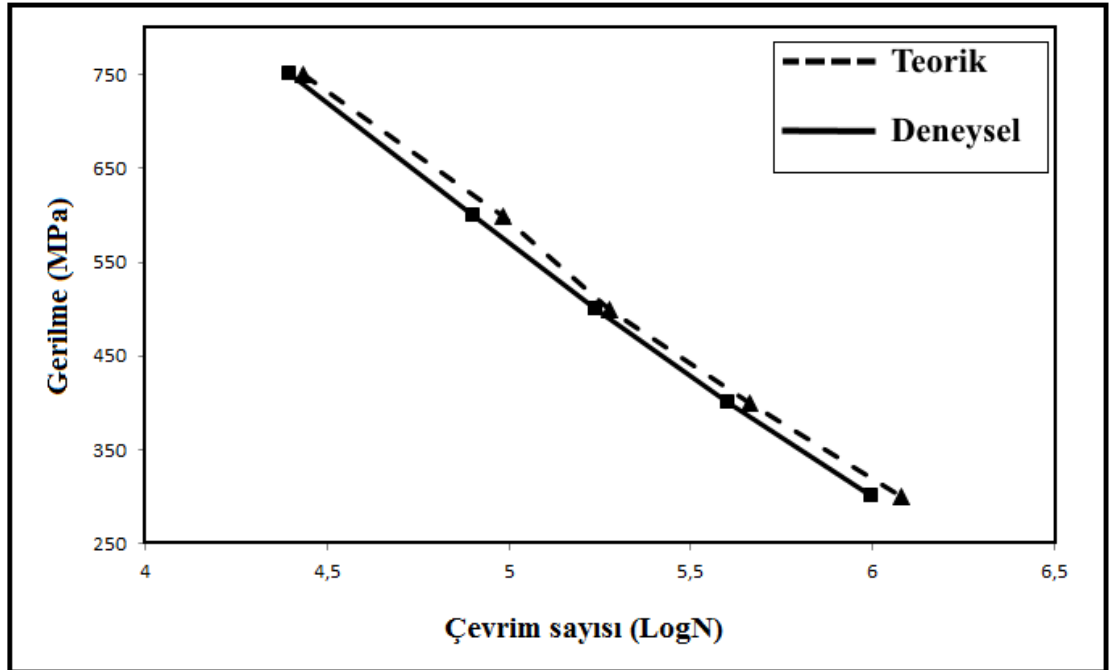
Şekil 4.16. Nitrülenmiş çelik numunesinin yorulma testi sonrası hasar yüzeyinin makro kırık karakteristiği

a-) Kenar yüzeyinin çatlak başlangıcıyla yorulma kırığının şematik gösterimi **b-)** Kenar yüzeyinin çatlak başlangıcıyla yorulma kırığının optik resmi **c-)** Nitrülenmiş numunede yorulma hasarı sonucu oluşan balıkgözünün (fish-eye) SEM mikrograфіі **d-)** Yorulma hasarı sonrası nitrülenmiş numune yüzeyindeki çatlak ilerlemesinin SEM mikrograфіі **e-)** Yorulma hasarı sonrası nitrülenmiş numune yüzeyindeki kırılma bölgesinin SEM mikrograфіі (632 MPa, 7×10^5 çevrim)

4.1.7. İşlemsiz ve nitrürlenmiş çelik yorulma numunesi ve nitrürlenmiş çelik kam milinin sonlu elemanlar analizleri

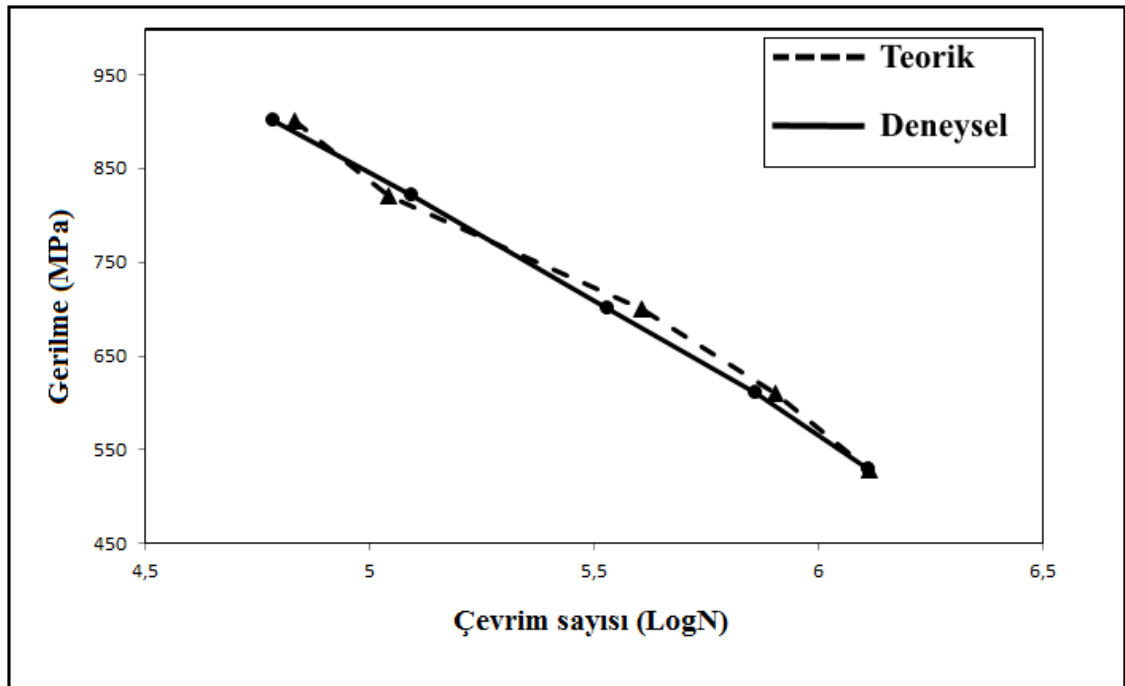
İşlemsiz 31CrMoV9 nitrasyon çeliğinin yorulma modeli Şekil 3.8’de verilmiştir. Nitrasyon çeliğine ait özellikler olan, elastisite modülü $E=198$ GPa, poisson oranı $\nu=0.3$ ve akma mukavemeti $\sigma_{ak}=550$ MPa değerleri, yorulma numunesi ve kam milinin malzeme özellikleri olarak girilmiştir. Bu çeliğin düzlem yorulma ömür değerleri olarak yorulma deneyleri sonucunda elde edilen değerler girilmiştir. Yorulma analizinde ortalama gerilme teorisi olarak Soderberg yaklaşımı seçilmiştir.

Yorulma modelinde 5 farklı yük kullanılmış ve elde edilen ömür değerleri deneysel olarak elde edilen ömür değerleriyle kıyaslanmıştır. Şekil 4.17’de gözlemlendiği gibi deneysel olarak elde edilen ömür değerleri ile sonlu elmanlar analizinden elde edilen ömür değerleri karşılaştırıldığında kabul edilebilir ölçüde birbirine yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 4.17. İşlemsiz çelik numune için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri

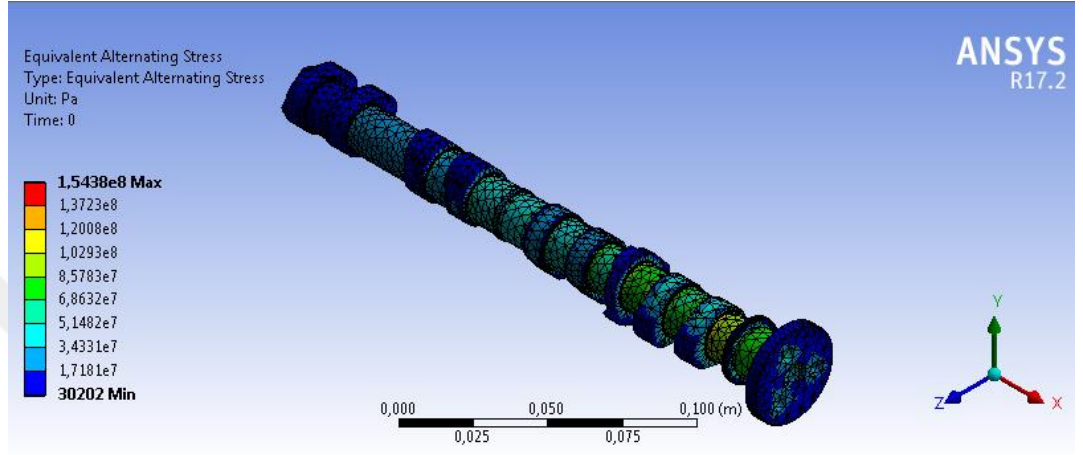
Bu çalışmada %94 H₂-%6 N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik numunenin yorulma ömrünü sonlu elemanlar yöntemiyle bulmak için Guagliano and Vergani (1997) tarafından tavsiye edilen yay modeli kullanılmıştır. Nitrürlenmiş çelik numuneye ait elastisite modülü olan 200 GPa değeri Eşitlik 3.4 yardımıyla hesaplanmıştır. Bu eşitlikte kullanılan 300µm'lik kalınlıktaki nitrür tabakasına ait elastisite modülü 234 GPa olarak, işlemsiz çelik numune için ise 198 GPa'lık değer kullanılmıştır. Ayrıca bu eşitlikte kullanılan elastisite modülü değerleri nano sertlik testi ile ölçülmüştür. S-N eğrisi değerleri olarak ta %94 H₂-%6 N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik numunenin yorulma ömür değerleri (Şekil 4.14) girilmiştir. Şekil 4.18.'de deneysel ve sonlu elamanlar analizinden elde edilen ömür değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre deneysel olarak elde edilen değerler ile sonlu elmanlar analizinden elde edilen değerler birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, Guagliano and Vergani (1997) tarafından tavsiye edilen yaklaşımın ve modelin olumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.18. Nitrürlenmiş çelik için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri

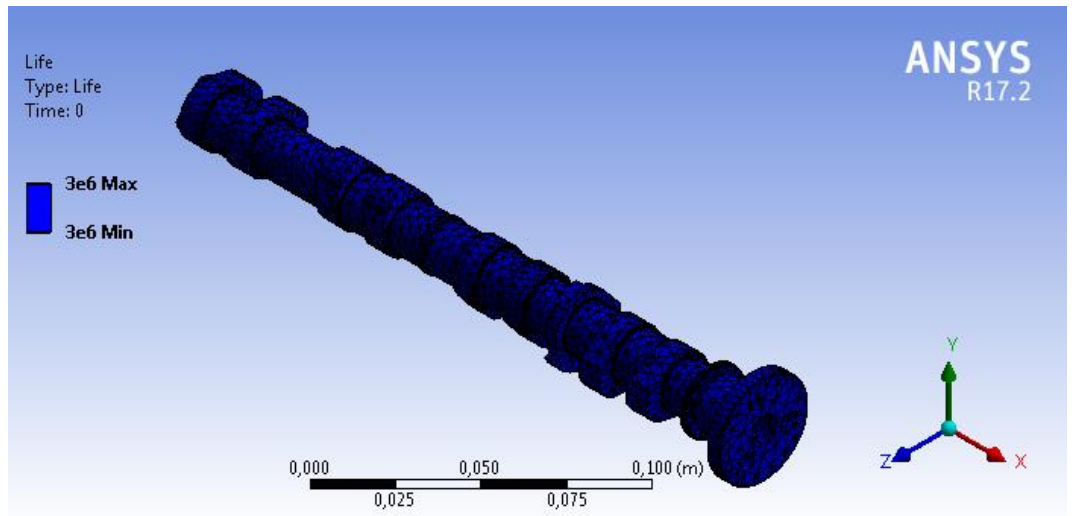
%94H₂-%6N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik kam miline

60Nm’lık tork ve kam mili üzerindeki kamlara 20N’luk yükleme kullanılarak gerçekleştirilen yorulma analiz sonrası elde edilen gerilme dağılımları Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Nitrürlenmiş çelik kam mili için gerilme dağılımı

Kam mili üzerindeki gerilme dağılımı incelendiğinde maksimum gerilmenin (154 MPa) tahrik noktası yani torkun uygulandığı bölgeye yakın yerlerde oluştuğu görülmüştür. Buna paralel olarak Şekil 4.20’de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 3 milyon çevrim sonrasında kam milinin herhangi bir hasara uğramayacağı görülmektedir.

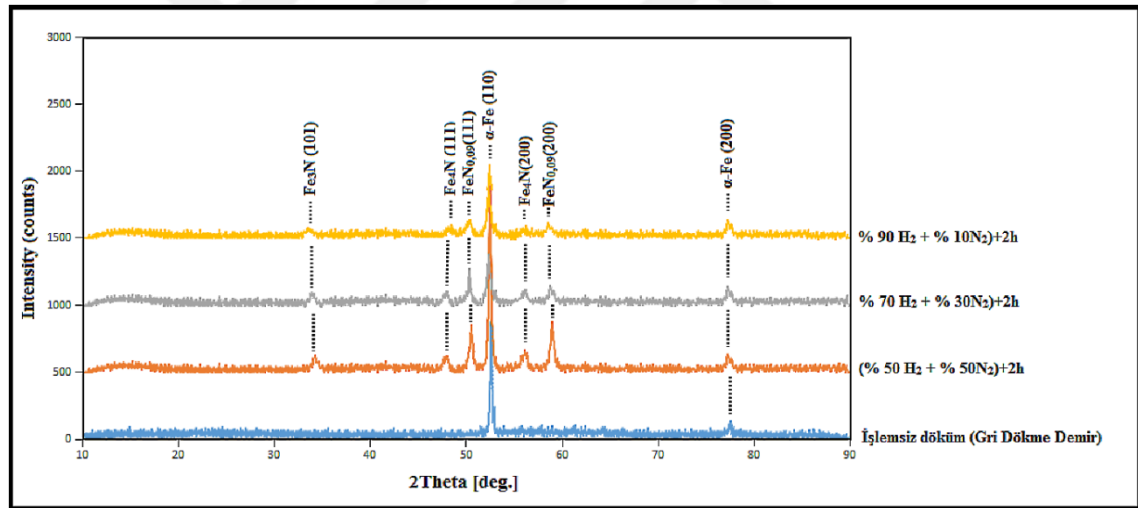


Şekil 4.20. Nitrürlenmiş çelik kam mili için ömür dağılımı

4.2. Döküm Kam Milinin Plazma Nitrürleme Davranışı

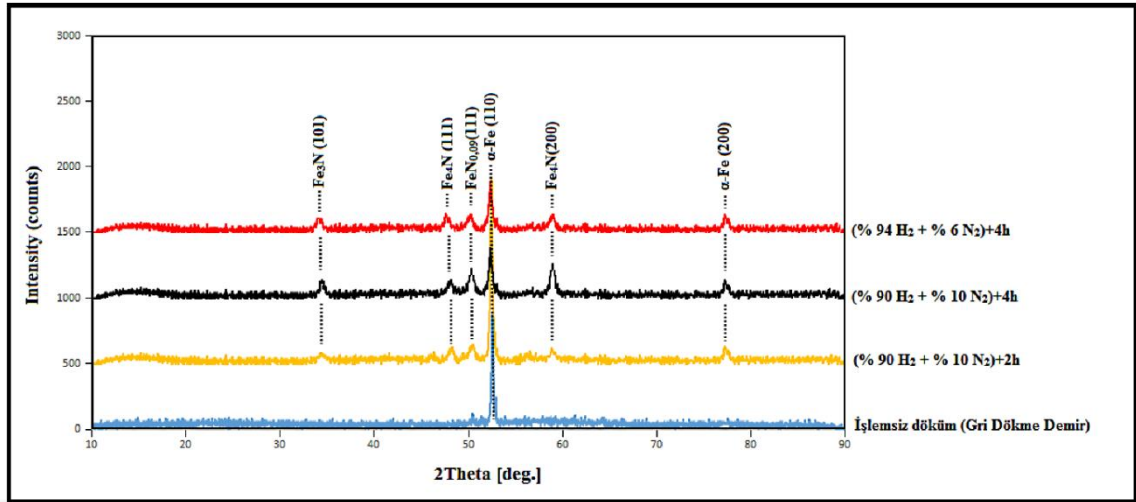
4.2.1. XRD analizi

İşlem yapılmamış ve farklı parametrelerde nitrürlenmiş gri döküm kam millerine ait karşılaştırılmalı XRD sonuçları Şekil 4.21 ve 4.22’de gösterilmiştir. 500°C’de %90H₂-%10N₂ gaz karışımında, 2 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş döküm kam milinde Fe₃N, Fe₄N ve FeN_{0,09} fazları oluşurken, aynı sıcaklık ve işlem süresinde gaz karışımındaki azot miktarının artmasıyla bu fazların yoğunluğunun da arttığı görülmüştür (Şekil 4.21). Ayrıca en yüksek faz yoğunluğu %50 H₂-%50 N₂ gaz karışımında gözlemlenmiştir.



Şekil 4.21. Farklı gaz karışımı oranlarında nitrürlenmiş döküm kam milinin XRD grafiği

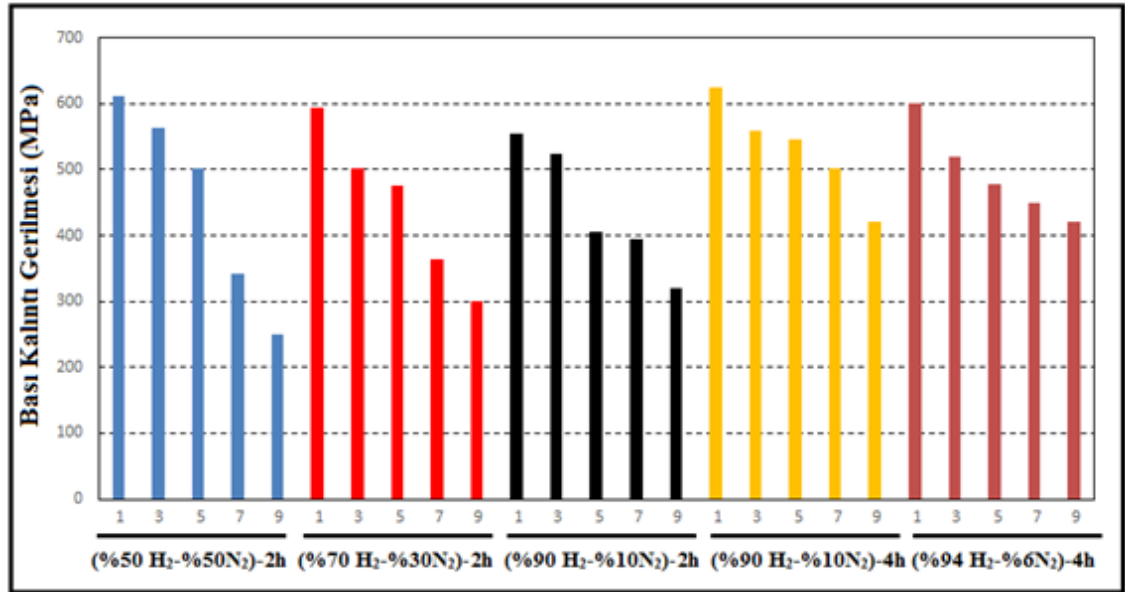
Şekil 4.22’de görüldüğü gibi %90 H₂-%10 N₂’da gaz karışımında 2 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş kam milinde oluşan demir piklerin yoğunluğu, işlem süresinin 4 saate çıkarılmasıyla artmıştır. Ancak aynı işlem süresi ve sıcaklıkta gaz karışımındaki hidrojen miktarı %90’dan %94’e çıkarıldığında ise bu demir nitrür piklerinin yoğunluğunun tekrar azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.22. Farklı işlem süresi ve gaz karışımı oranlarında nitrülenmiş gri dökme demirin XRD grafiği

4.2.2. Artık gerilme analizleri

Plazma ile nitrülenmiş malzemelerin yük altında davranışlarını etkileyen önemli özelliklerinden biri içerdikleri kalıntı gerilmelerdir. Kalıntı gerilmelerin niteliği ve büyüklüğü nitrülemenin sertliği, aşınma ve yorulma üzerinde çok etkilidir. Beyaz ve difüzyon tabakaların içerdiği kalıntı gerilmeleri ölçmeye yönelik değişik teknikler vardır. Bu teknikler içerisinde en yaygın kullanılanlardan bir tanesi x-ışınları kırınımıdır (XRD). Şekil 4.23’de farklı şartlarda nitrülenmiş döküm kam millerinin farklı incident açılarda elde edilmiş artık (kalıntı) gerilme değerleri gösterilmiştir. Yukarıdaki bölümde (4.1.b) belirtildiği gibi düşük incident açı değerlerinde ($\omega=1^\circ$, $\omega=3^\circ$, $\omega=5^\circ$) yüzey ve yüzeye yakın bölgelerdeki kalıntı gerilmeleri ölçülürken, açı değeri arttığında daha derinlerdeki kalıntı gerilmeleri değerleri de elde edilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi işlem süresinin artmasıyla kalıntı gerilme değerleri artmıştır, ancak gaz karışımındaki azot miktarının %50’den %90’lara düşmesiyle bu gerilme değerlerinin de düştüğü gözlemlenmiştir.

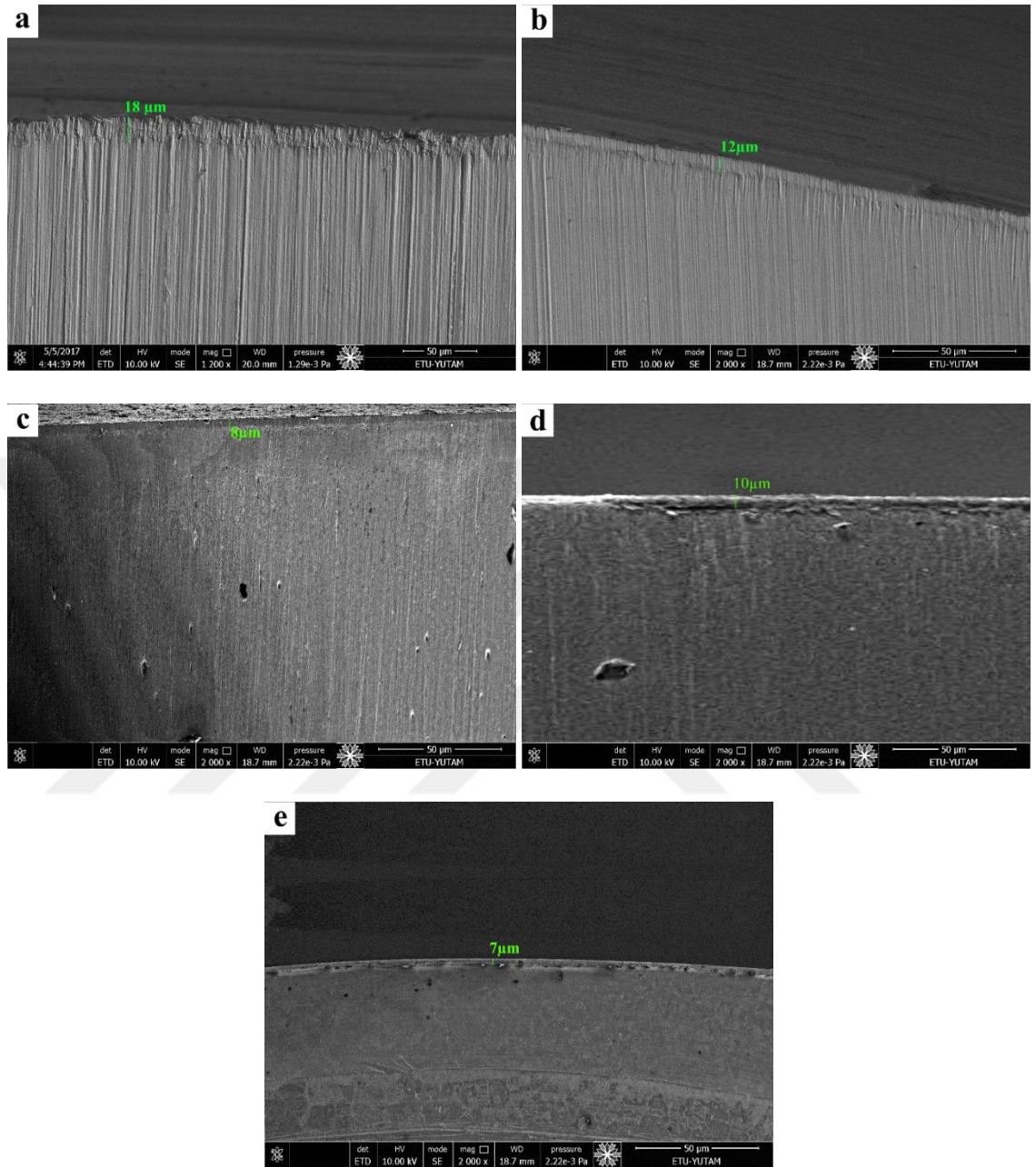


Şekil 4.23. Farklı şartlarda nitrülenmiş gri dökme demirin farklı incident açılarındaki elde edilen artık gerilme değerleri

Diğer taraftan, daha derinlerdeki artık gerilmelerin durumu öğrenmek için yüksek incident açı değerlerinde ($\omega=7^\circ$, $\omega=9^\circ$) kalıntı gerilme değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak daha derinlerde en yüksek kalıntı gerilme değerleri 500°C 'de %94 H₂-%6 N₂'da gaz karışımında 4 saatlik işlem süresinde nitrülenmiş döküm kam millerinde gözlenmiştir.

4.2.3. Mikroyapı analizleri

Şekil 4.24'de, döküm kam miline yapılan nitrüleme işlemlerinin kesit-SEM görüntüleri verilmektedir. Deneyde her bir kam mili numunesi 500°C 'de 2 ve 4 saat nitrüleme işlemine tabii tutulmuştur. Gaz karışım oranları ise %50 H₂-%50 N₂, %70 H₂-%30 N₂ ve %90 H₂-%10 N₂'de yapılmıştır. Nitrüleme işlemi sonrası yüzeyde oluşan tabakada mikroyapı olarak işlem parametrelerine göre farklılıklar görülmektedir. Şekil 4.24a'da görüldüğü gibi 2 saatte %50 H₂-%50 N₂ gaz karışımında nitrülenmiş gri dökme demirin en dış yüzeyinde 18µm kalınlığında beyaz tabaka oluşmuştur.

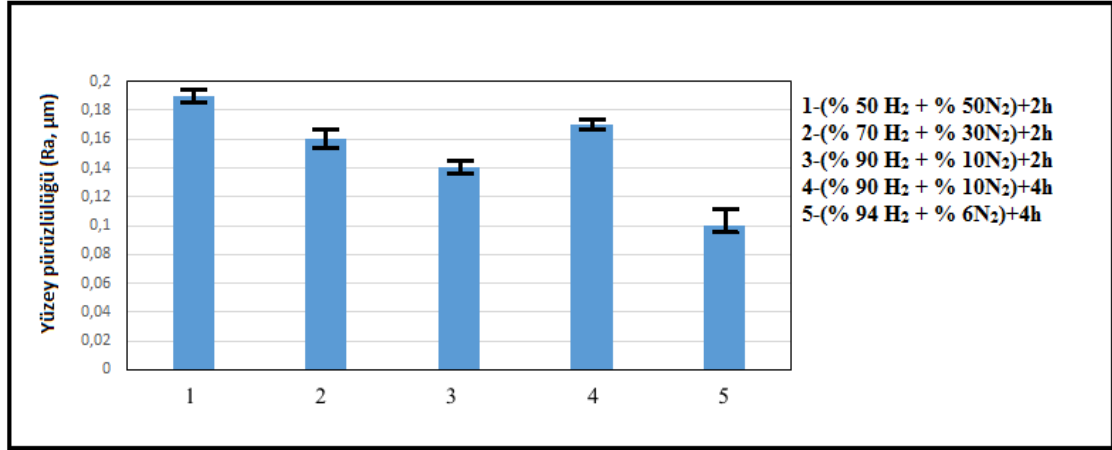


Şekil 4.24. Nitrülenmiş Gri dökme demirin kesit SEM görüntüleri

a) 500°C- (%50 H₂ + %50 N₂)-2h b) %70 H₂ + %30 N₂ -2h c) %90 H₂ + %10 N₂ -2h d) %90 H₂ + %10 N₂ -4h e) %94 H₂ + %6 N₂ -4h

Gaz karışımındaki azot gaz oranı %50'dan %30'a azaltıldığında beyaz tabaka kalınlığı 12μm olurken (Şekil 4.24b) bu oran %10 olduğunda ise beyaz tabaka 8-10 μm kalınlığa düştüğü gözlenmiştir (Şekil 4.24c). Resimlerden de görüldüğü gibi %50 H₂-%50 N₂ gaz karışımında nitrüleme süresi 2 saatten 4 saate yükseltilmesiyle numune yüzeyinde oluşan

beyaz tabakasının kalınlığı da $10\mu\text{m}$ 'e yükselmiştir.



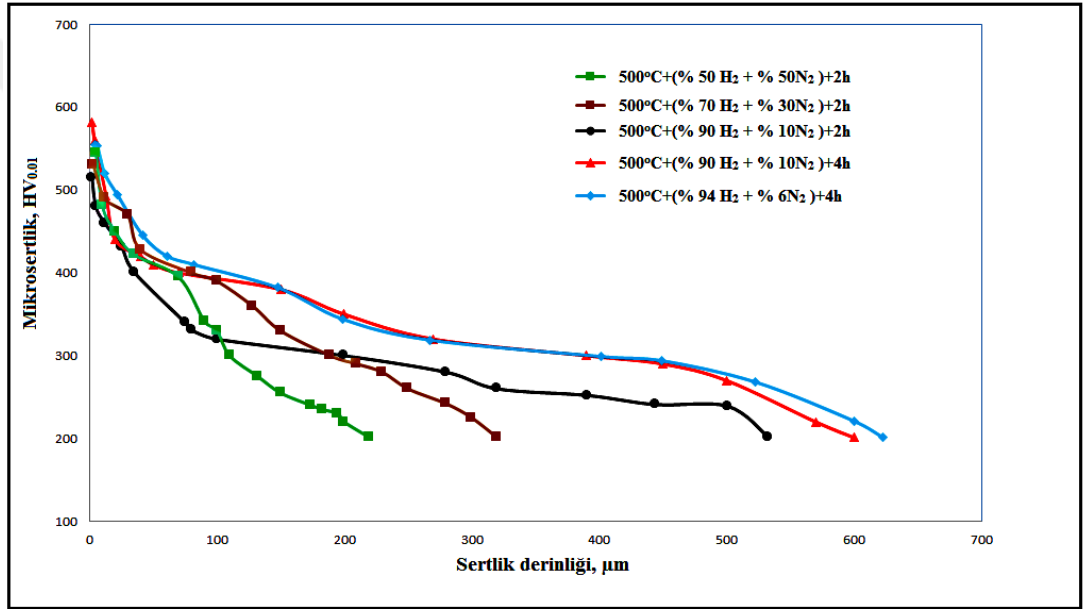
Şekil 4.25. Farklı şartlarda nitrülenmiş döküm kam milinin yüzey pürüzlülüğü

Şekil 4.25’de farklı parametrelerde plazma ile nitrülenmiş gri dökme demirin yüzey pürüzlülükleri belirtilmiştir. En yüksek pürüzlülüğü 2 saatlik işlem süresinde %50 H₂-%50 N₂ gaz karışımında elde edilirken gaz karışımındaki azot miktarının azalmasıyla yüzey pürüzlülüğü de azalmıştır. Ayrıca en düşük yüzey pürüzlülüğü ise %94 H₂-%6 N₂ gaz karışımında 4 saatlik işlem süresinde gözlemlenmiştir.

4.2.3. Mikrosertlik incelemeleri

Nitrülenmemiş, farklı işlem parametrelerinde plazma ile nitrülenmiş gri döküm kam millerine ait mikrosertlik değerleri, işlem sonrası elde edilen difüzyon tabaka kalınlıkları ve tribolojik test sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Nitrülenmemiş dökümün kam milinin sertliği 200-205 HV_{0,01} olarak ölçülürken, plazma ile nitrüleme sonucunda sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. En düşük yüzey sertlik değeri (540- 550 HV_{0,01}) 2 saatlik işlem süresinde %90 H₂-%10 N₂ gaz karışımında elde edilirken en yüksek sertlik değerine ise (582-587 HV_{0,01}) 500°C 4 saatlik işlem süresi ve %90 H₂-%10 N₂ gaz karışımı sonunda ulaşılmıştır. Plazma ile nitrüleme işlemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri işlem görmemiş numunelerle karşılaştırıldığında, işlem parametrelerine bağlı olarak 2 ile 4 kat artmıştır. İşlem süresi ve gaz karışımındaki

azot (N_2) oranı arttıkça sertlik değeri de artmaktadır. Şekil 4.26’da farklı şartlarda plazma ile nitrülenmiş döküm kam millerinin sertlik dağılımları gösterilmiştir. Ölçülen tabaka sertliğinin taban malzemeden etkilenmemesi için, nitrülenmiş yüzey mekanik olarak uzaklaştırılıp parlatıldıktan sonra sertlik ölçümleri numune kesitinden alınmıştır. Yapılan sertlik ölçümlerinde, yüzeye yakın ölçülen ilk sertlik değeri yüzey sertliği olarak kabul edilirken, merkeze doğru taban malzeme sertliğine ulaşılan kadar gidilen mesafe difüzyon derinliği olarak kaydedilmiştir.

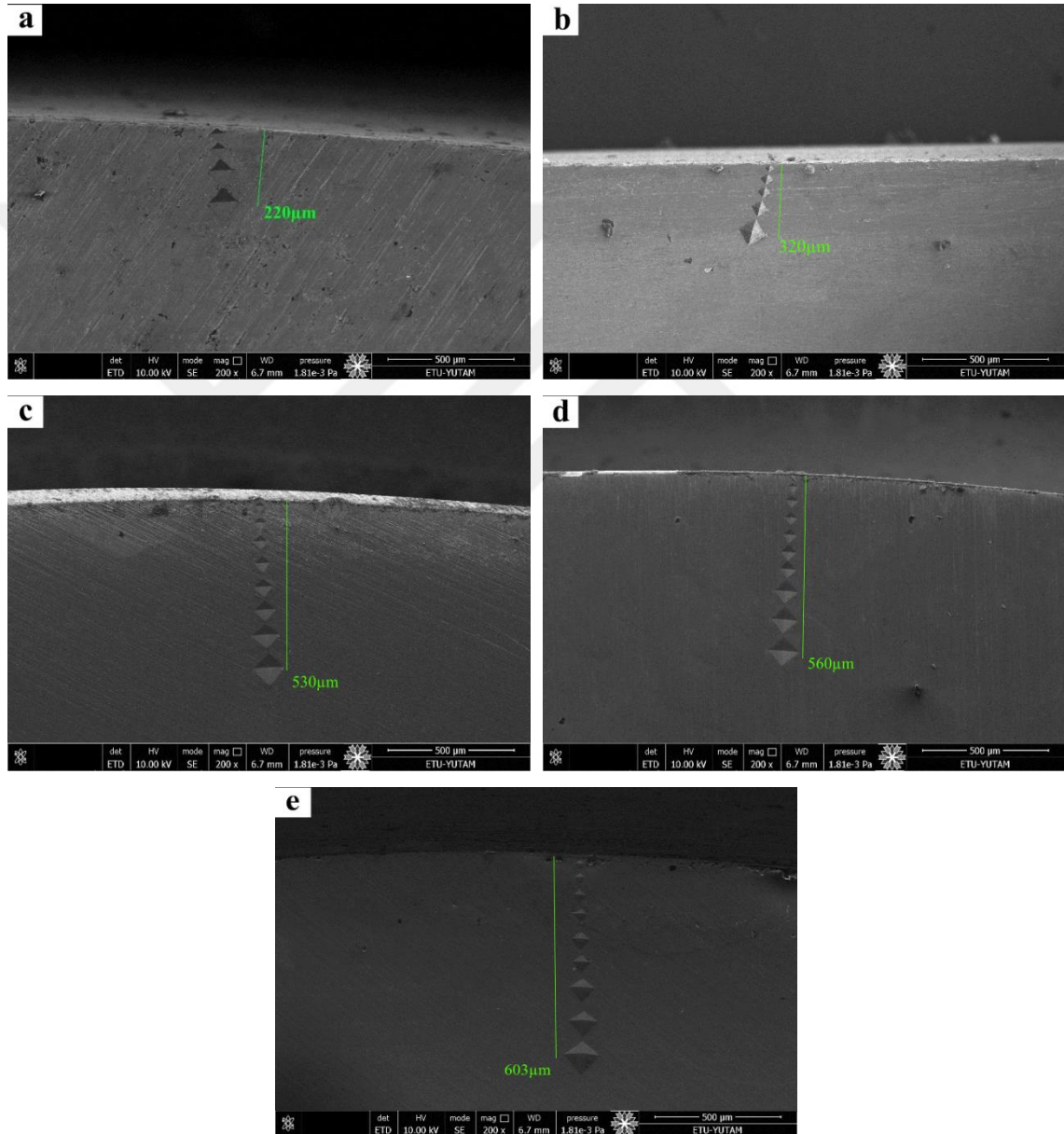


Şekil 4.26. Farklı şartlarda nitrülenmiş Gri dökme demirin sertlik dağılımı

Nitrülenmiş döküm kam milinin sertlik dağılımları mikrosertlik ölçümlerinin SEM kesit resimleri (Şekil 4.27) ile birlikte değerlendirildiğinde en düşük yüzey derinliği 500°C’de 2 saatlik işlem süresinde %50 H_2 -%50 N_2 gaz karışımında yaklaşık olarak 220 μm olarak tespit edilmiştir. Buna karşın en yüksek difüzyon derinliği ise 500°C’de 2 saatlik işlem süresinde %94 H_2 -%6 N_2 gaz karışımında 300 μm civarında gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise gaz karışımındaki hidrojen miktarının artmasıyla daha yüksek gerilim uygulanmasındandır.

Uygulanan gerilim miktarının artması iyonize olan gaz miktarının, iyonların kinetik

enerjisinin ve iyonize olan azotun hızının artmasına sebep olmuştur. Bunun neticesinde difüzyon derinliği de artmıştır. Ayrıca işlem süresiyle difüzyon derinliğinin doğru orantılı olduğu hem Şekil 4.26'daki sertlik dağılımı grafiğinde hem de Şekil 4.27'deki SEM resimlerinde görülmektedir.

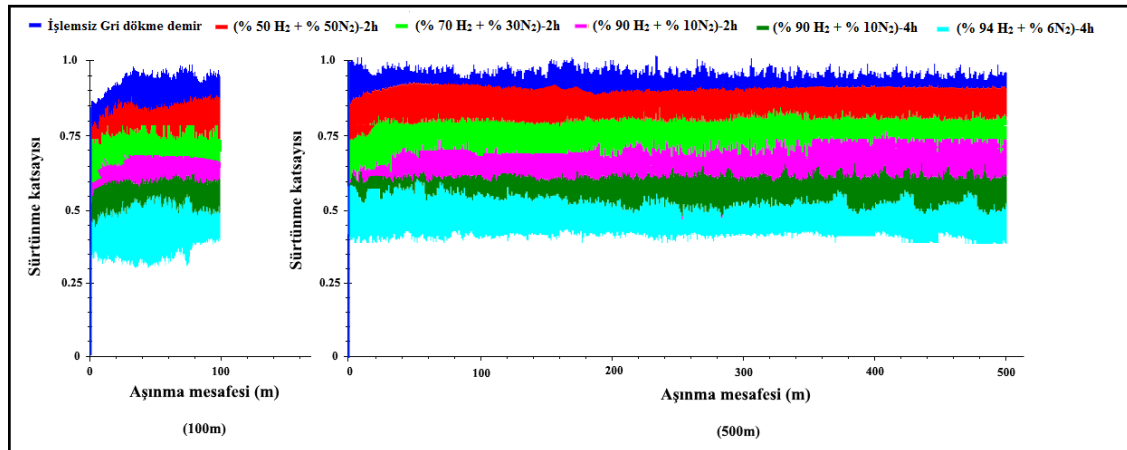


Şekil 4.27. Farklı gaz karışımlarından plazma ile nitrülenmiş döküm numunelerin mikrosertlik ölçümlerinin SEM kesit resimleri

a) %50 H₂ + %50 N₂, 2 saat b) %70 H₂ + %30 N₂, 2 saat c) %90 H₂ + %10 N₂, 2 saat d) %90 H₂ + %10 N₂, 4 saat e) %94 H₂ + %6 N₂, 4 saat

4.2.4. Sürtünme ve Aşınma Analizleri

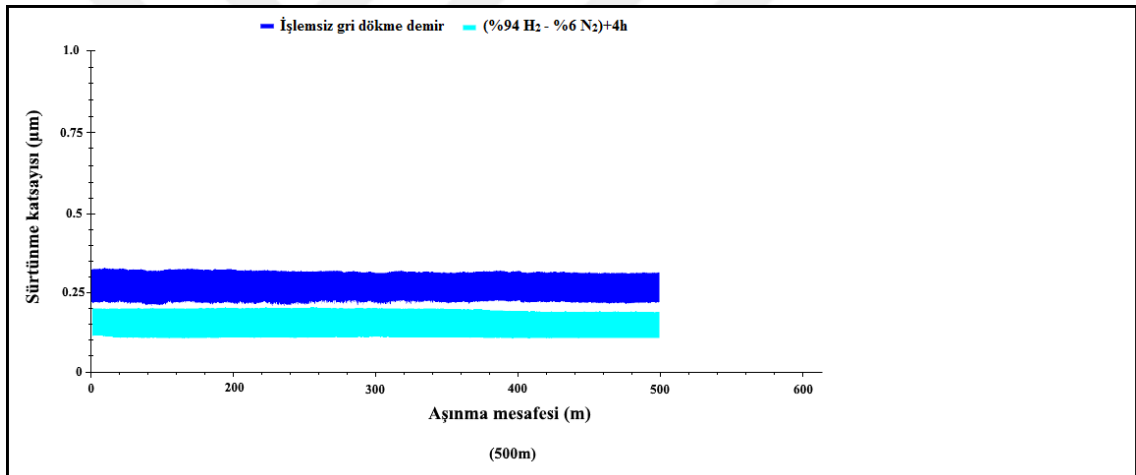
İşlemsiz ve 500°C’de farklı işlem sıcaklığı ve gaz karışımı oranlarında plazma ile nitrürlenmiş döküm kam millerinden kesilen numuneler kuru (yağsız) ortamda 30 N’luk yük altında 100 m ve 500 m’lik mesafelerde aşındırıldıktan sonraki ortalama sürtünme katsayılarının grafikleri Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Ortalama sürtünme katsayıları kıyaslandığında 500 m’lik mesafede hem işlemsiz hem de işlemlili numuneler daha fazla sürede aşındığından sürtünme katsayıları da daha yüksek değerlerde görülmüştür. Çünkü daha fazla abrazif aşınmaya maruz kalmıştır. İşlemsiz gri dökme demirin hem 100 m hem de 500 m’lik aşınma mesafesi sonrası ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,88 ve 0,90 iken numuneler 500°C’de 2 saatlik işlem sıcaklığında %50 H₂ + %50 N₂ gaz karışımında nitrürlendikten sonraki numunelerin ortalama sürtünme katsayıları sırasıyla 0,8 ve 0,83 civarlarında olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise nitrürlenme işlemi sonrası XRD ve mikrosertlik sonuçlarında da görüldüğü gibi malzeme yüzeyinde α -Fe’e göre daha sert nitrür faz yapılarının oluşmasından dolayıdır. İşlemsiz malzemenin yüzey sertliğinin düşük olmasından dolayı malzemenin partikülleri kırılmıştır ve neticede oluşan bu partiküller sürtünme katsayısını artırmıştır.



Şekil 4.28. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş döküm numunelerin kuru(yağsız) ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği

Aynı sıcaklıkta ve aynı sürede gaz karışımındaki hidrojen oranının artmasıyla ortalama

sürtünme katsayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu ise hidrojen oranının artmasıyla pürüzlülük değerlerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. 500°C’de %90 H₂ + %10 N₂ gaz karışımında 2 saatlik işlem süresi 4 saate çıkarıldığında sürtünme katsayısında düşme görülmüştür. Burada yüzey pürüzlülüğü işlem süresiyle birlikte artmasına rağmen yüzey sertliğinin artmasından dolayı yüzeyde daha az partiller oluşmuştur dolayısıyla ortalama sürtünme katsayısı da düşmüştür. Çizelge 4.2’de belirtildiği üzere en düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek yüzey sertliği 500°C’de %90 H₂ + %10 N₂ gaz karışımında 4 saatlik işlem süresinde plazma ile nitrürlenmiş numunelerden elde edilmiştir. Bunun neticesinde en düşük sürtünme katsayısı bu şartlarda nitrürlenmiş numunelerden alınmıştır.

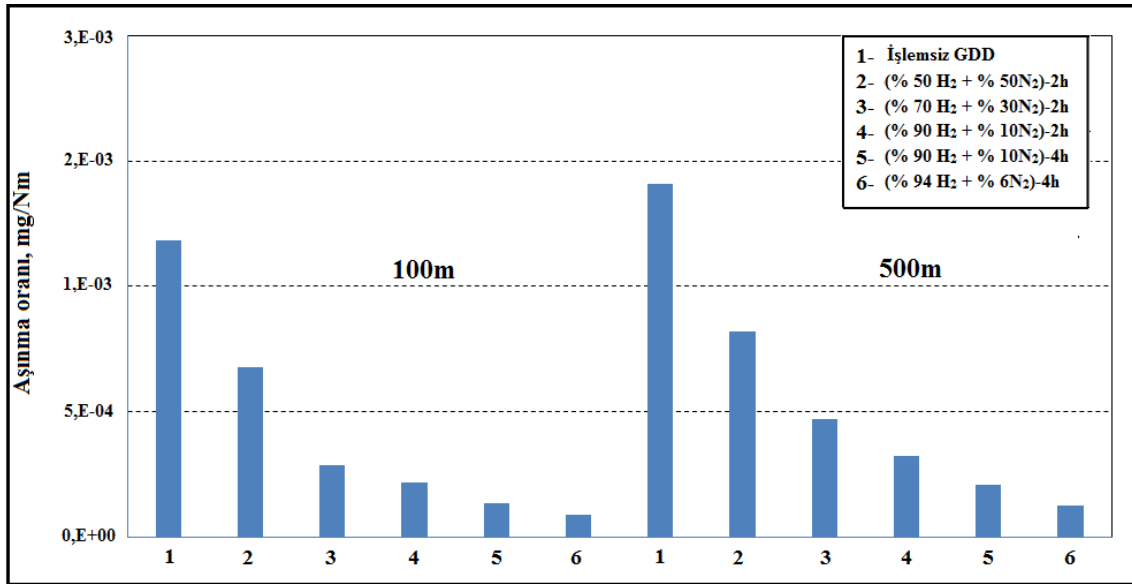


Şekil 4.29. İşlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş gri dökme demirin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısı-mesafe grafiği

İşlemsiz ve 500°C’de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş döküm numunenin pin-on-disk aşınma test cihazında 30 N yükte, 500 m’lik aşınma mesafesinde yağlı ortamda aşındırılarak ortalama sürtünme katsayıları Şekil 4.29’da belirtilmiştir. Kuru ortamdaki 500 m aşındırıldığında işlemsiz döküm numunenin ortalama sürtünme katsayısı 0.9, nitrürlenmiş (%94H₂-%6N₂ -4h) dökümün 0.49, yağlı ortamda ise sürtünme katsayıları sırasıyla, 0.26 ,0.10 olarak saptanmıştır. Sürtünme ve aşınma mekanizmaları birbirine karşı hareketli iki yüzey arasında fiziksel etkiye dayalıdır. Bu iki yüzey arasında oluşan yağlayıcı bir film, bu iki katı yüzey

arasında beraber hareket ederek sürtünmeyi azaltmaktadır. Bundan dolayı yağlı ortamda ortalama sürtünme katsayılarının yağsız (kuru) ortama göre oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir.

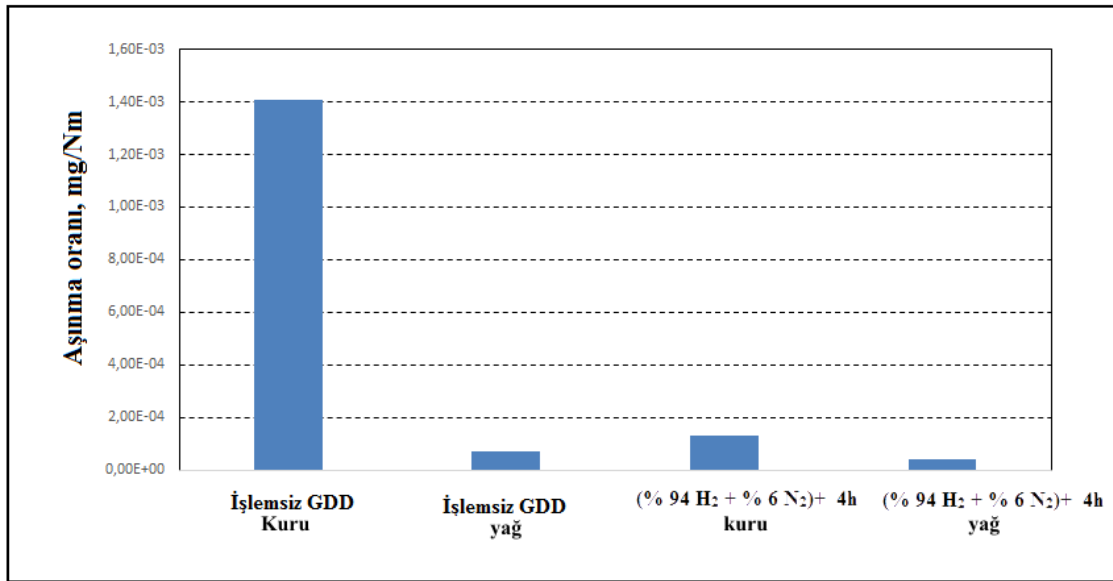
30N'luk yük altında kuru ortamda farklı aşınma mesafelerinde aşınma testine tabi tutulan işlemsiz ve farklı işlem parametrelerinde nitrürlenmiş gri dökme demirin hesaplanan aşınma oranları Çizelge 4.2'de ve Şekil 4.30'da verilmiştir. Döküm kam milinin aşınma direncinin nitrüleme işlemi ile 2-6 kat arasında arttığı tespit edilmiştir. Genel olarak yüksek hidrojen miktarı ve işlem sürelerinde nitrürlenmiş numunelerde aşınma oranının, düşük hidrojen miktarı ve işlem süresinde nitrürlenmiş olan numunelere göre düşük çıktığı, ancak işlem görmemiş numunelere göre ise arttığı gözlemlenmiştir. Gaz karışımındaki hidrojen miktarı ve işlem süresinin artıkça yüzey pürüzlülüğünün ve ortalama sürtünme katsayısının azalması aşınma miktarının azalmasına neden olmuştur. En iyi aşınma direnci 500°C'de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş numunelerden elde edilmiştir.



Şekil 4.30. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş Gri dökme demirin kuru (yağsız) ortamdaki aşınma oranları

Şekil 4.31'de işlem görmemiş ve 500°C'de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz

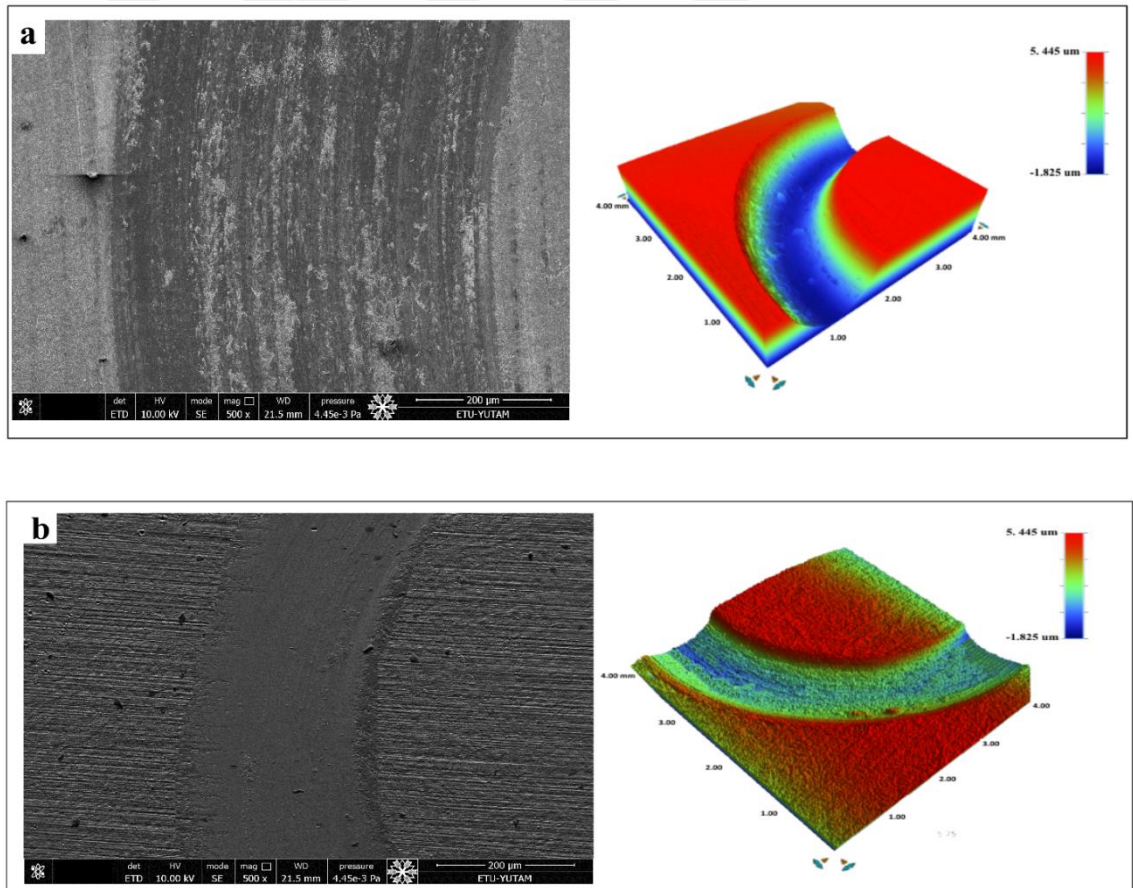
karışımında nitrürlenmiş döküm numunesinin 30N'luk yük altında 500m'lik aşınma mesafesinde hem kuru (yağsız) hem de yağlı ortamdaki aşınma oranları verilmiştir. Kuru ortamda işlemsiz numunenin aşınma oranında çok yüksektir. Plazma nitrürleme işlemi ile aşınma oranında büyük miktarda azalma sağlanmıştır. Ayrıca, yağlı ortamda her iki numunenin de (işlemsiz ve nitrürlenmiş) aşınma oranları oldukça düşüktür. Yağlı aşınma şartlarında yağ, metalik yüzeyler arasında kayma gerilmesi küçük olan bir film tabakası oluşturmaktadır. Film tabakası, başlangıçta yüzeyi çepeçevre kaplamasa da metalin metale temasını önleyerek sürtünmelerini azaltmaktadır. Ayrıca, yüzeyler arasında pürüz teması da çok nadirdir. Bu durum aşınmaya karşı önemli ölçüde avantaj sağlamaktadır.



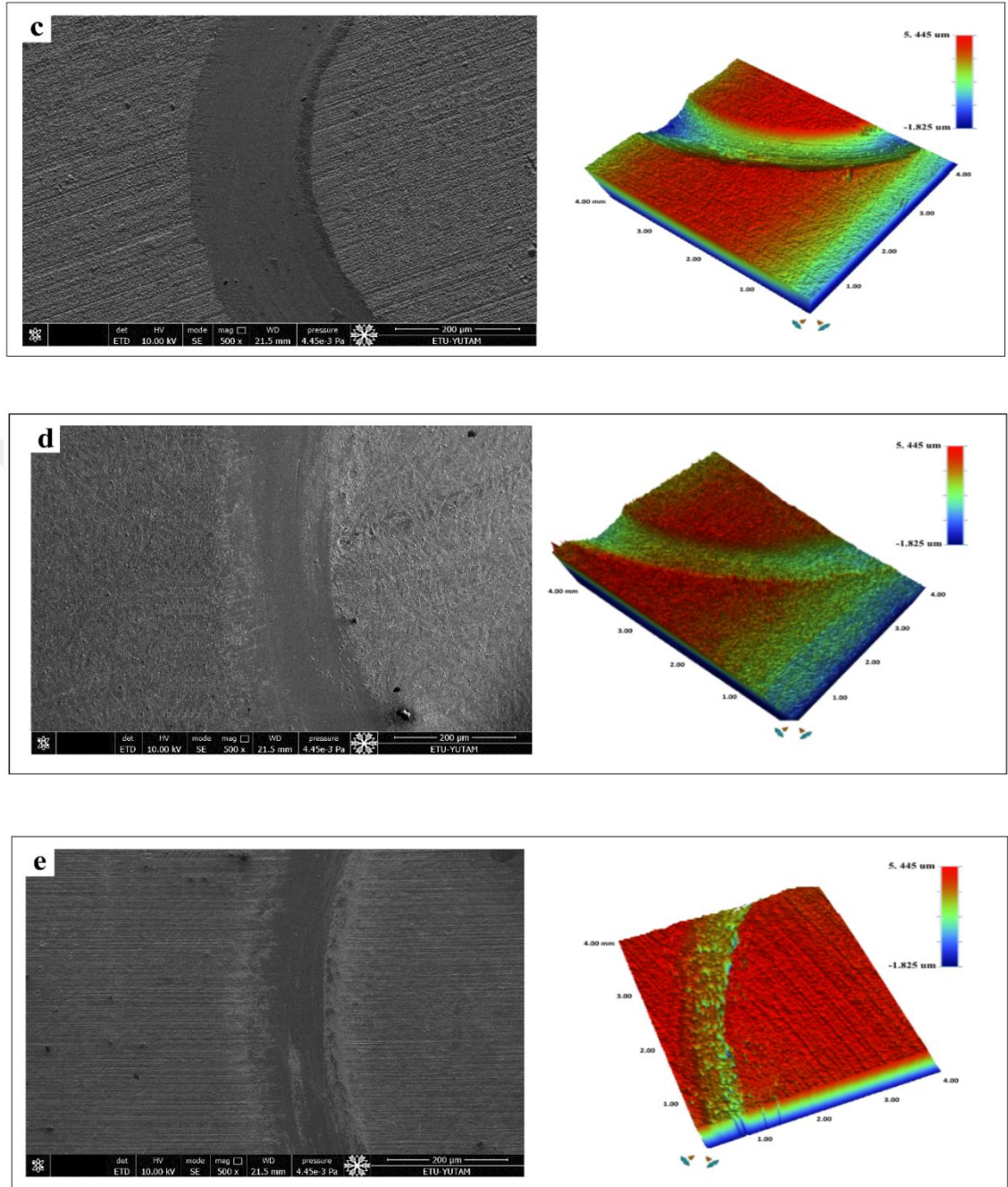
Şekil 4.31. İşlemsiz ve 500°C'de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımı oranında nitrürlenmiş Gri dökme demirin 500m'lik aşınma mesafedeki kuru (yağsız) ve yağlı ortamdaki aşınma oranları

Aşınma testi sonrası, Şekil 4.32'de işlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş döküm numunenin SEM ve 3D görüntüleri verilmiştir. Aşınma izleri incelendiğinde, Şekil 4.32.a'da görülen kaba ve derin aşınma çizgileri, şiddetli aşınma karakteristiklerine sahip olan işlem görmemiş numunede önemli miktarda plastik deformasyon olduğunu belirtmektedir. Plazma ile nitrürlenmemiş aşınma yüzeyinde şiddetli çizikler

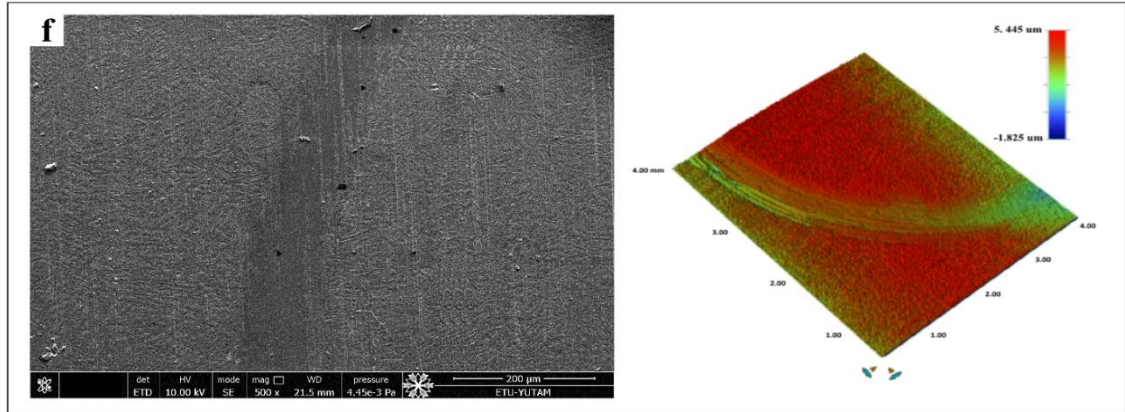
görülmektedir. Bu çiziklerin oluşumunun nedeni yüzeyden kopan sert parçacıkların abrasif aşınma yapmasıdır. Aynı zamanda yoğun bir şekilde alt yüzey çatlakları ile kesme gerilmesi oluşmaktadır. 500°C’de 2 saatlik işlem sıcaklığında %50 H₂ + %50 N₂ gaz karışımında plazma ile nitrürlendikten sonra aşınma izlerinde hem derinlik hemde genişlik olarak azalma görülmüştür (Şekil 4.32.b). Bu durum, nitrürlenmiş döküm numunelerin yüzeyinde oluşan sert nitrür tabakasının plastik deformasyon miktarını azalttığını ve böylece düşük bir temas alanına sebep olduğunu göstermektedir. Böylelikle, aşındırıcı bilye ile nitrürlenmiş numune yüzeyinin temas noktalarında adeziv aşınmaya sebep olan mikro kaynak oluşumu da engellenmiş olmaktadır. Gri dökümün aşınma davranışının belirlenmesinde sürtünme katsayısı çok önemli bir etkiye sahiptir.



Şekil 4.32. (devam)



Şekil 4.32. (devam)



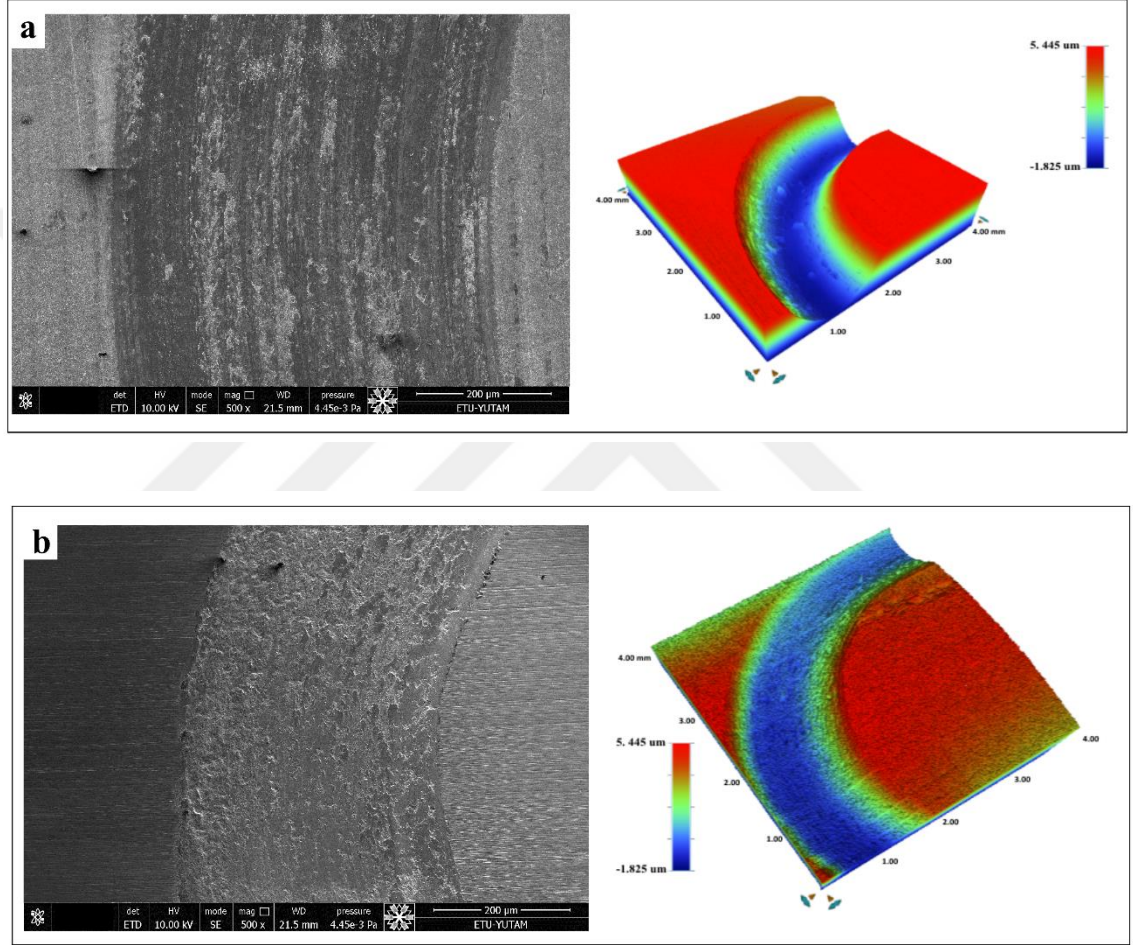
Şekil 4.32. İşlemsiz ve nitrürlenmiş gri dökümün numunlerin kuru ortamdaki 500m'lik aşınma mesafesinde aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri

a) İşlemsiz döküm b) %50 H₂ + %50 N₂ , 2 saat c) %70 H₂ + %30 N₂ ,2 saat d) %90 H₂ + %10 N₂ 2 saat ,e) %90 H₂ + %10 N₂ ,4 saat f) %94 H₂ + %6 N₂ 4 saat

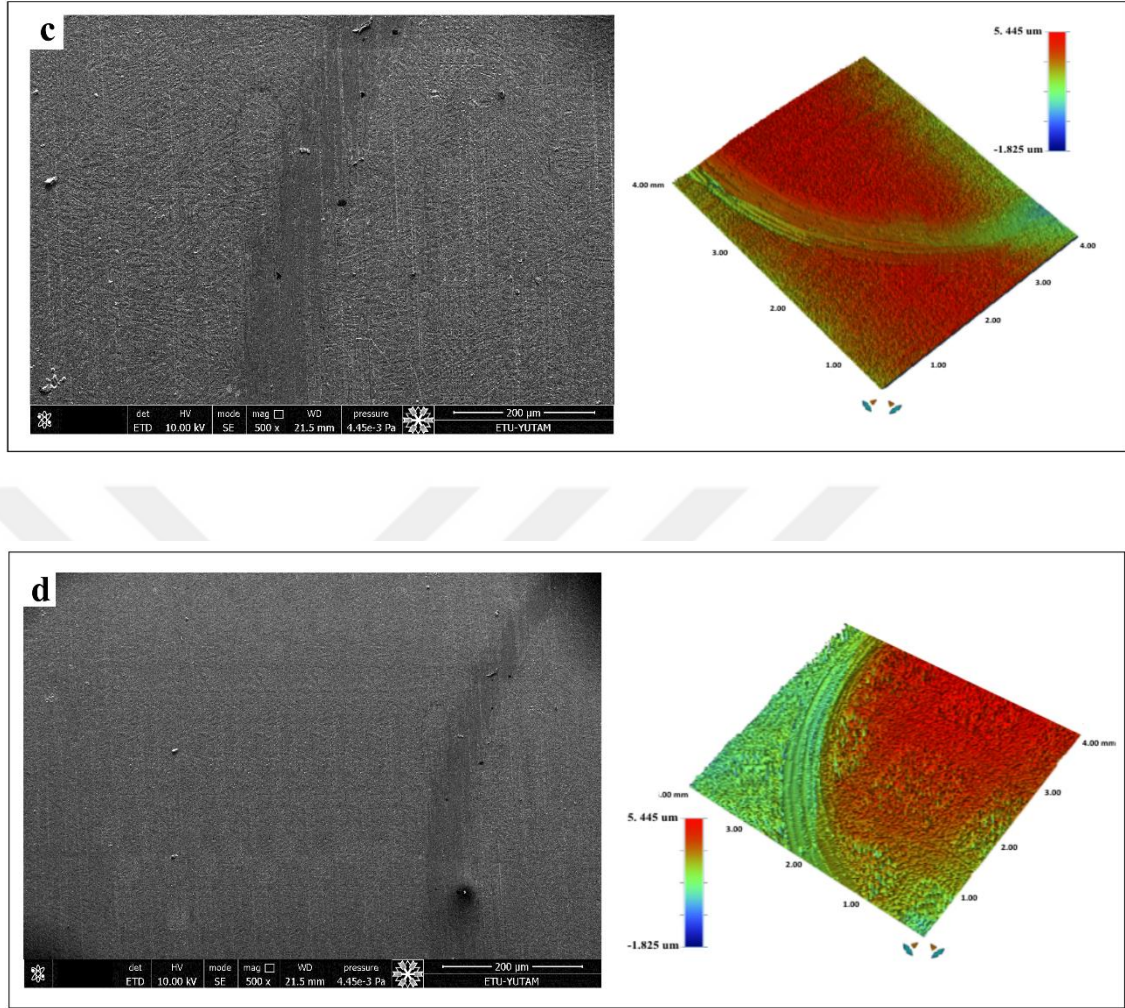
Gaz karışımındaki hidrojen miktarı arttıkça sürtünme katsayısı azalmış, buna karşın yüzey sertliğinin azalmasına rağmen aşınma direnci önemli ölçüde artmıştır. Böylece aşınma iz genişliği ve derinliği azalmıştır (Şekil 4.32.c ve Şekil 4.32.d). Ayrıca 500°C'de %90 H₂ + %10 N₂ gaz karışımında 2 saatlik işlem süresi 4 saate çıkarıldığında aşınma iz genişliği ve derinliği biraz daha azalmıştır (Şekil 4.32.e). Çünkü yeterince yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı, adezyon ve yüzeyin plastik deformasyona uğrama ihtimalini azaltmıştır. Şekil 4.32.f.'de görüldüğü gibi en düşük aşınma iz çapı ve derinliği 500°C'de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş numunelerde tespit edilmiştir.

İşlemsiz ve 500°C'de 4 saatlik işlem süresinde %94H₂-%6N₂ gaz karışımlarında plazma ile nitrürlenmiş döküm numunenin 30N'luk yük altında kuru ortamda 100m'lik ve 500m'lik mesafelerde aşındırıldıktan sonra aşınma iz görüntülerin SEM ve 3D resimleri Şekil 4.33'de gösterilmiştir. En geniş aşınma iz genişliği ve derinliği işlemsiz numunelerde elde edilmiştir. Bu durumun aşınma testi sırasında transfer olmuş aşınma ürünlerinin aşındırıcı bilye ile numune arasındaki sürtünme hareketinden dolayı plastik deformasyona uğraması sonucu olduğu düşünülebilir. Ayrıca aşındırıcı bilye ile numune arasında kopan aşınma ürünleri, aşınma parçaları bilyenin kayma hareketi ile birlikte gri dökme demirin yüzeyi üzerinde abrasif kanallar oluşumuna neden olmuştur.

Nitrüleme işlemi sonrası hem 100 m'lik hem de 500 m'lik aşınma mesafesi sonrası bu genişlik ve derinlik azalmıştır. Diğer taraftan, 100 m'lik aşınma iz genişliğinin 500 m'lik yük ile aşındırılmış numunelerin iz genişliğine göre oldukça dar ve batma derinliğinin yüzeysel olduğu gözlemlenmiştir.



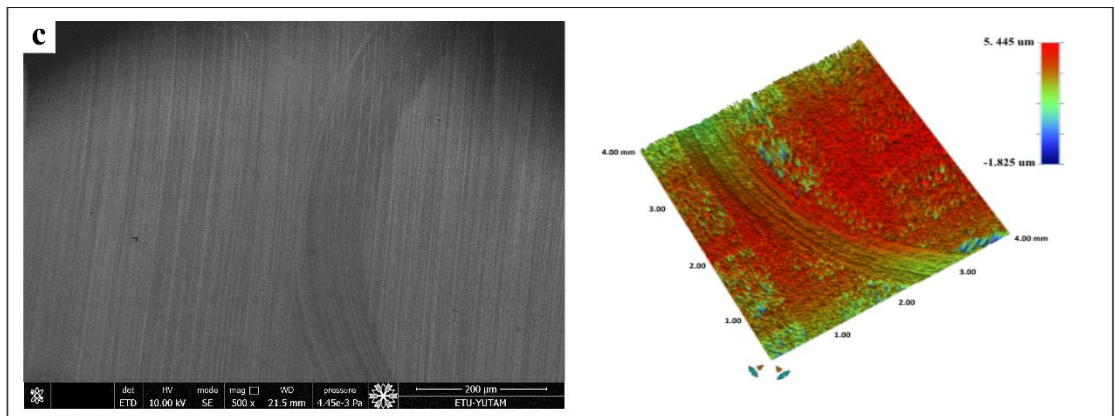
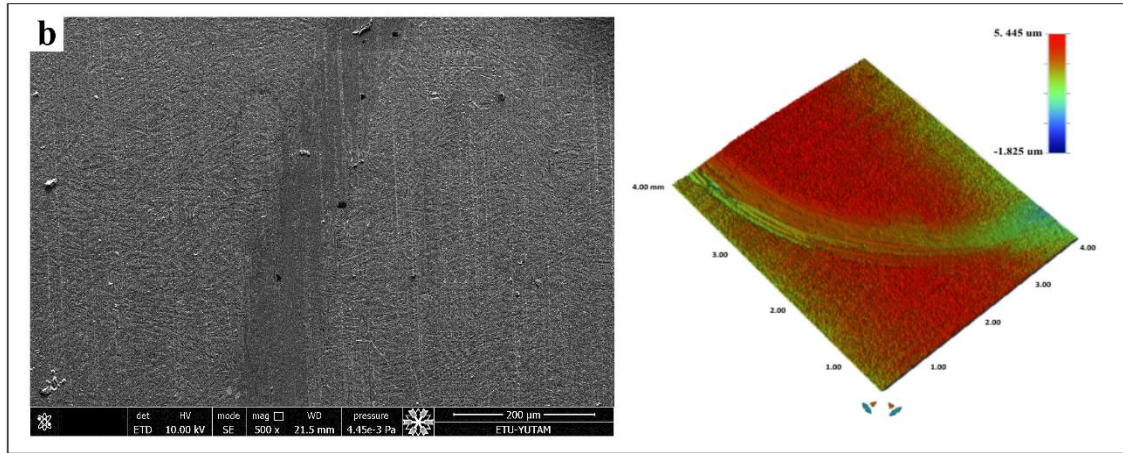
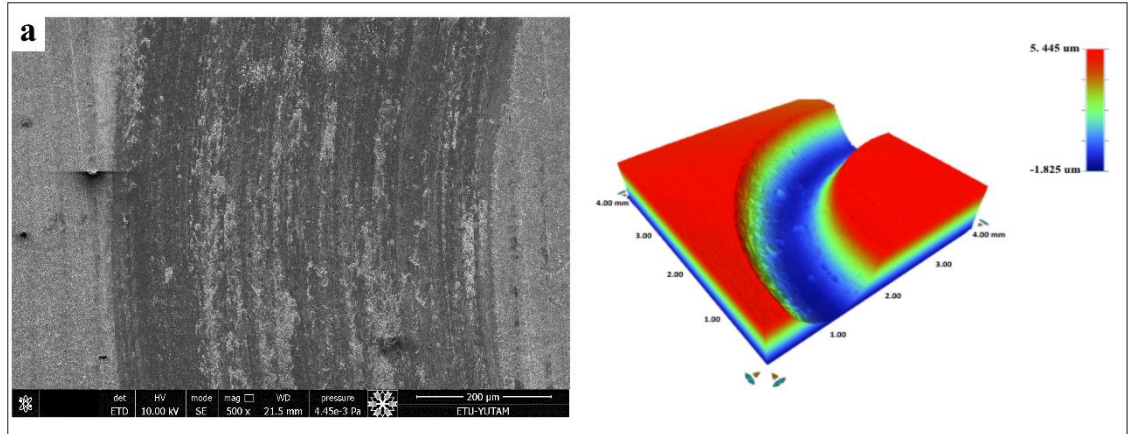
Şekil 4.33. (devam)



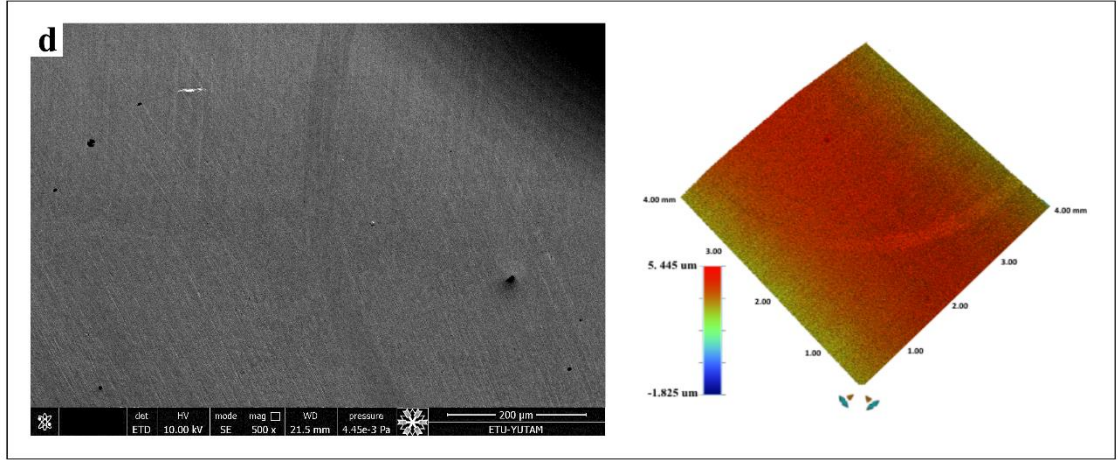
Şekil 4.33. İşlemsiz ve nitrülenmiş gri döküm numunlerin kuru ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri

a) işlemsiz-500m b) işlemsiz-100m c) %94 H₂ + %6 N₂ 4 saat-500m, d) %94 H₂ + %6 N₂ 4 saat-100m

Şekil 4.34’de işlemsiz ve 500°C’de %94 H₂ + %6 N₂ gaz karışımında 4 satlik işlem süresinde plazma ile nitrülenmiş gri dökme demir numuneler 500m’lik aşınma mesafesinde hem kuru (yağsız) hemde yağlı ortamlarda aşındırıldıktan sonra aşınma izlerinin SEM resimleri gösterilmiştir. Şekil 4.34’de görüldüğü gibi en düşük aşınma izi ve derinliği nitrülenmiş hem nitrüleme işleminin aşınma direncine olumlu yönde etkisi hem de yağlı ortamda aşınma testi esnasında yağın iç sürtünme direncinin düşük olmasından dolayı nitrülenmiş gri dökme demirlerde gözlemlenmiştir.



Şekil 4.34. (devam)



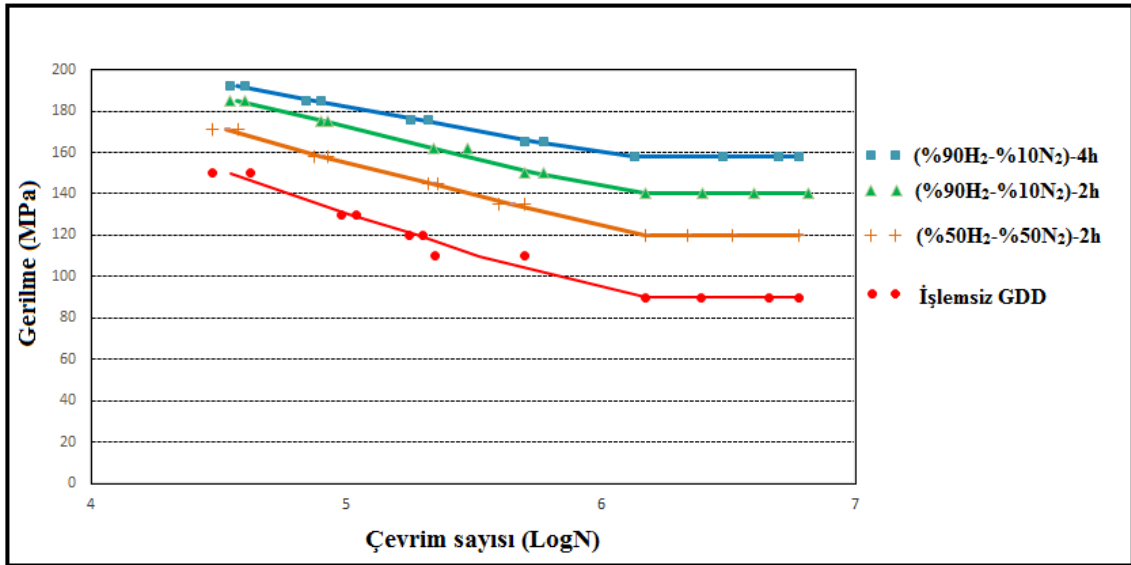
Şekil 4.34. İşlemsiz ve nitrülenmiş gri dökümün 500m’lik aşınma mesafelerinde kuru ve yağlı ortamdaki aşınma testi sonrası aşınma izlerinin SEM ve 3D resimleri
a) işlemsiz-kuru b) işlemsiz-yağ c) %94 H₂ + %6 N₂ 4 saat-kuru, d) %94 H₂ + %6 N₂ 4 saat-yağ

Çizelge 4.2. Farklı plazma nitrüleme parametreleriyle beyaz ve difüzyon tabakaların, yüzey sertlik ve pürüzlülüğünün, kuru ve yağlı ortamda sürtünme katsayısının ve aşınma oranının değişimi

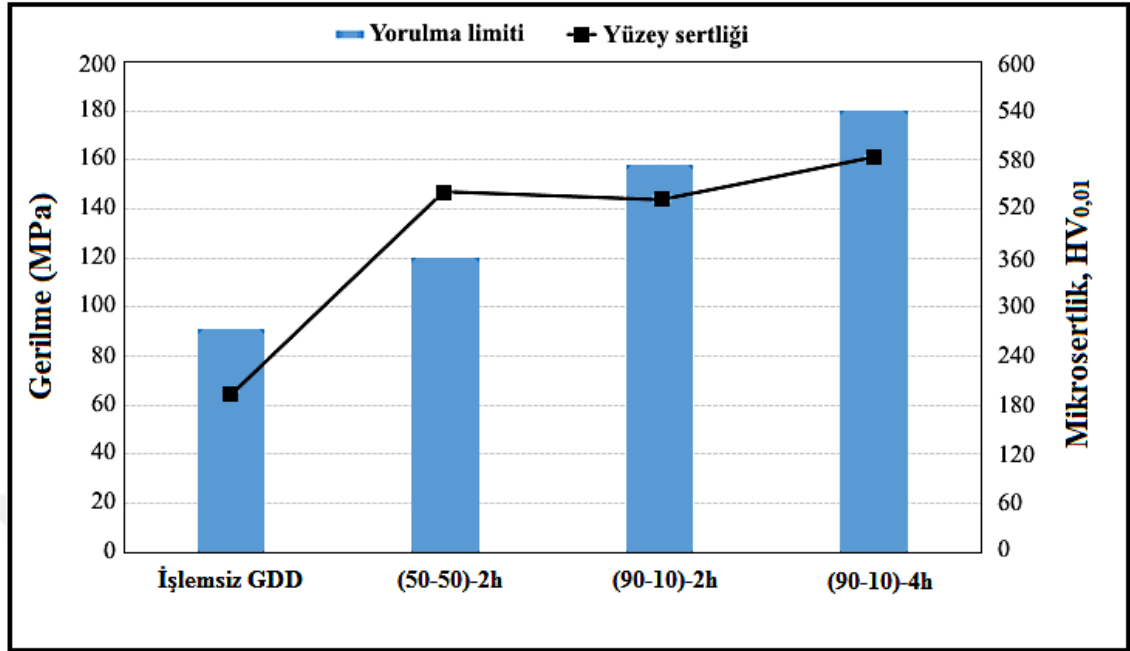
Nitrüleme parametreleri			Beyaz tabaka [μm]	Difüzyon tabakası [μm]	Yüzey sertliği, H _{0.01}	Yüzey pürüzlülüğü R _a , [μm]	Sürtünme katsayısı 100m Kuru ortam	Sürtünme katsayısı 500m Kuru ortam	Aşınma oranı (mg/Nm) 100m Kuru ortam	Aşınma oranı (mg/Nm) 500m Kuru ortam	Sürtünme katsayısı 500m Yağlı ortam	Aşınma oranı (mg/Nm) 500m Yağlı ortam
Sıcaklık [°C]	Zaman [h]	Gaz karışımı										
500	2	50% N ₂ + 50% H ₂	18-20	220-240	540-550	0.18–0.20	0.78-0.82	0.81-0.85	0,00062	0,00081	0.20-0.21	0,000029
500	2	30% N ₂ + 70% H ₂	12-15	310-330	528-534	0.15–0.17	0.63-0.70	0.72-0.74	0,00028	0,00046	0.18-0.20	0,000027
500	2	10% N ₂ + 90% H ₂	8-10	525-532	512-517	0.13-0.15	0.52-0.56	0.58-0.61	0,00021	0,00032	0.17-0.18	0,000025
500	4	10% N ₂ + 90% H ₂	10-11	565-582	582-587	0.16–0.18	0.47-0.50	0.53-0.56	0,00013	0,00021	0.14-0.15	0,000022
500	4	6% N ₂ + 94% H ₂	7-9	601-605	555-560	0,09-0,10	0.40-0.47	0.44-0.50	0,00009	0,00013	0.10-0.15	0,000023
İşlemsiz Gri dökme demir			-	-	201-210	0.05–0.06	0.85-0.90	0.89-0.92	0,00118	0,00141	0.25-0.28	0,000054

4.2.5. Yorulma analizleri

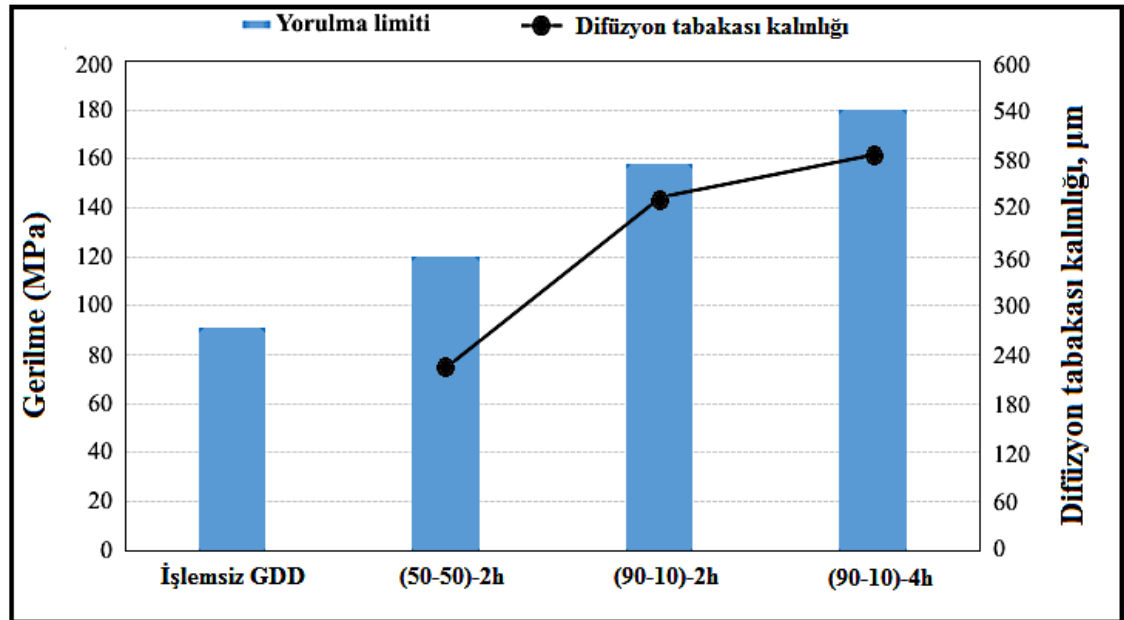
Şekil 4.35’de işlem görmemiş ve plazma ile nitrürlenmiş gri dökme demirin S-N eğrileri gösterilmiştir. Grafiğe göre işlemsiz gri dökme demirin yorulma limiti 90 MPa civarındadır. %50H₂-%50N₂ gaz karışımında, 2 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş döküm numunelerin yorulma limitleri 120 MPa civarına çıkmıştır. Bunun nedeni nitrürlenmiş numunede artık gerilme oluşmuş olup, bu gerilmenin parçanın yorulma ömrünü de artırdığı bilinmektedir. Çünkü nitrürlenme ile oluşan difüzyon tabakası bası artık gerilmeleri içerir. Çökelen nitrürlerin oluşumu dislokasyon hareketini engeller ve böylece kayma bantlarının nitrürlenmiş tabakaya doğru hareketi engellenmiş olur. Hem bası artık gerilmelerin hem de yüzey sertliğinin artışı malzemenin yorulma ömrünün artmasına neden olur (Şekil 4.23 ve Şekil 4.36). Ayrıca aynı sıcaklık ve sürede gaz karışımındaki hidrojen gazının miktarı %50’den %90’a çıktığında yorulma limitinin de 158 MPa’ya arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi oluşan difüzyon tabakasının kalınlığının artmasından dolayıdır (Şekil 4.37). Ayrıca, 500°C’de %90H₂-%10N₂ gaz karışımında 4 saatlik işlem süresinde plazma ile nitrürlendikten sonra yorulma ömrü, hem difüzyon tabaka kalınlığı hem de yüzey sertliğinin artışıyla artmıştır.



Şekil 4.35. İşlemsiz ve farklı şartlarda nitrürlenmiş döküm numnelerin S-N eğrileri



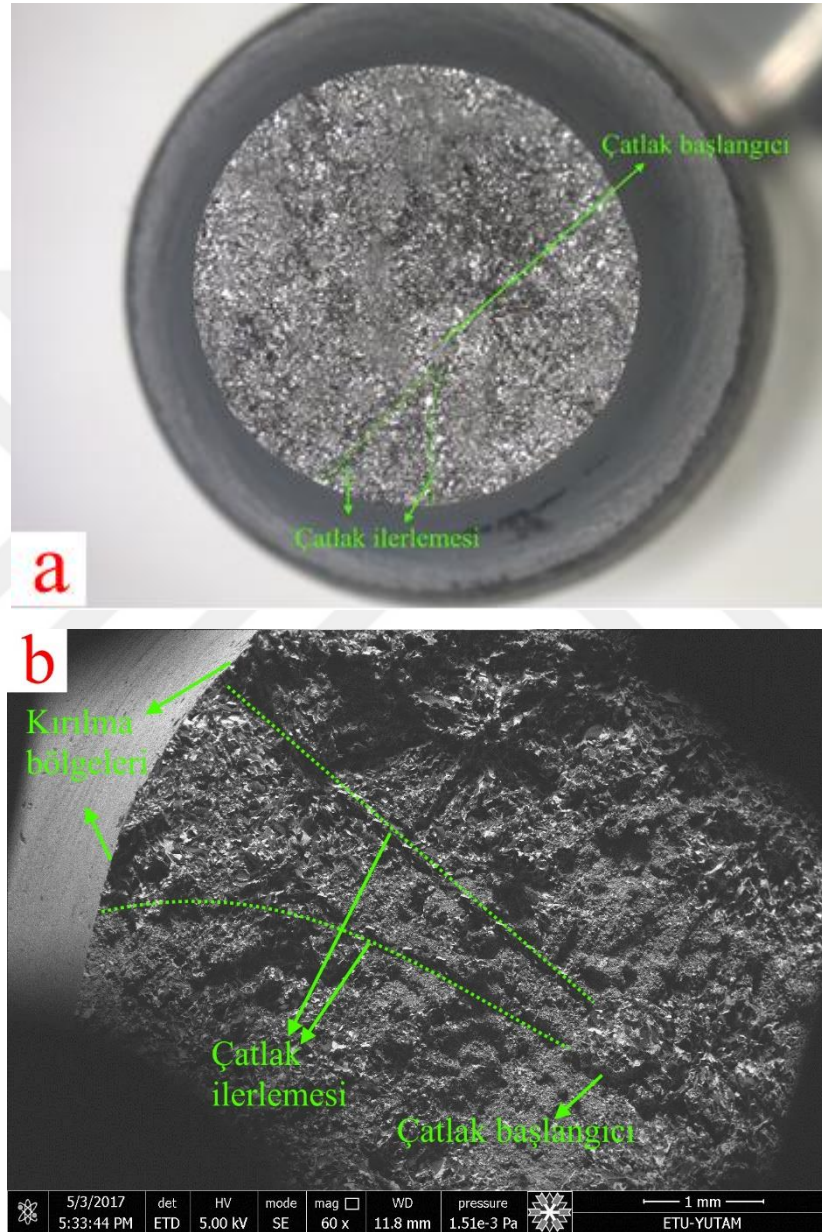
Şekil 4.36. Farklı şartlarda nitrürlenmiş döküm numuneler için yorulma limiti ve yüzey sertliği



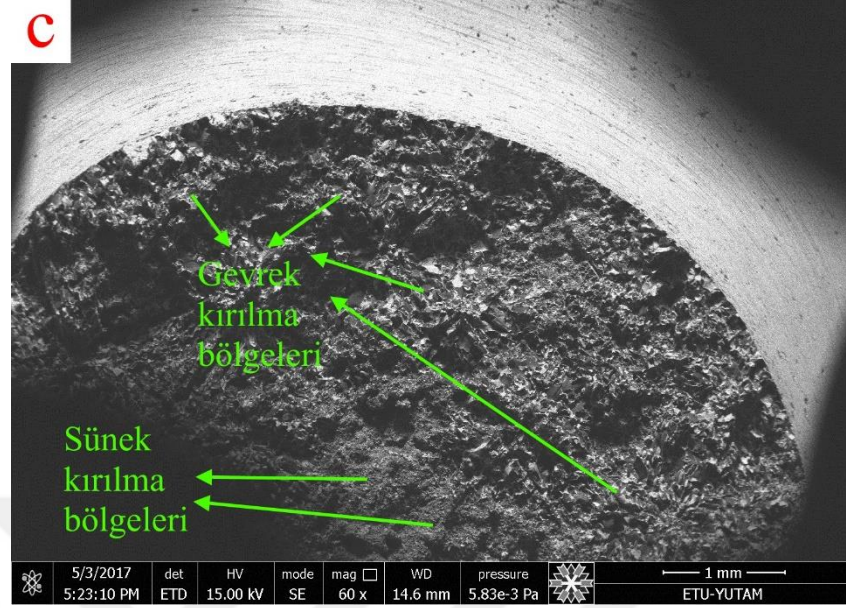
Şekil 4.37. Farklı şartlarda nitrürlenmiş döküm numuneler için yorulma limiti ve difüzyon tabakası kalınlığı

Şekil 4.38'de %90H₂-%10N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş

döküm numunelerinin 150 MPa gerilme altında 6×10^5 çevrimde kırıldıktan sonra yorulma hasar görüntüleri belirtilmiştir. Yorulma hasar yüzeyindeki çatlak başlangıcı ve çatlağın ilerlemesi Şekil 4.38.a ve 4.38.b’de net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.38. (devam)



Şekil 4.38. Nitrürlenmiş döküm numunesinin yorulma testi sonrası hasar yüzeyinin makro kırık karakteristiği

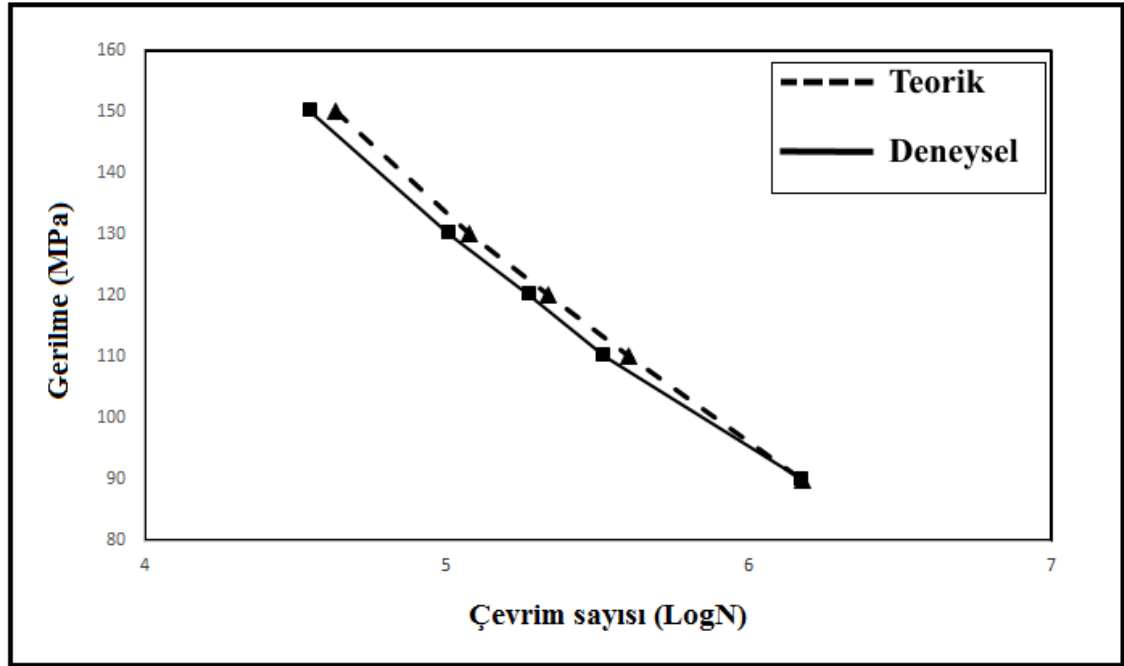
a-) Yorulma hasarının optik yüzey görünümü **b-)** Yorulma hasarı sonrası nitrürlenmiş numune yüzeyinde oluşmuş çatlak başlangıcının, çatlak ilerlemesinin ve kırılma bölgelerinin SEM mikrografisi **c-)** Yorulma hasarı sonrası nitrürlenmiş numune yüzeyinde oluşmuş kırılma bölgelerinin SEM mikrografisi (165 MPa, 6×10^5 çevrim)

Nitrüleme işlemi sonrasında yüzeyde sert bir tabaka olduğu için çatlak iç kısımda başlamıştır. Çatlak başladıktan sonra ilerleyerek Şekil 4.38.b’de görüldüğü gibi bir çok bölge kırılmıştır. Ayrıca, ilgili şekillerden de görüleceği üzere, kırılma yüzeyinde gevrek ve sünek bölgelerin olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, malzemenin karışık tip (gevrek-sünek) kırılma davranışı gösterdiğini kanıtlamaktadır (Şekil 4.38.c).

4.2.6. İşlemsiz ve nitrürlenmiş döküm yorulma numunesi ve nitrürlenmiş kam milinin sonlu elemanlar analizleri

Nitrülenmemiş gri dökme demirin yorulma modeli Şekil 4.39’da verilmiştir. Gri dökme demire ait özellikler olan, elastisite modülü $E=120$ GPa, poisson oranı $\nu=0.26$ ve akma mukavemeti $\sigma_{ak}=200$ MPa değerleri, yorulma numunesinin malzeme özellikleri olarak girilmiştir. Bu gri dökme demirinin düzlem yorulma ömür değerleri olarak yorulma deneyleri sonucunda elde edilen değerler girilmiştir. Yorulma analizinde ortalama gerilme teorisi olarak Soderberg yaklaşımı seçilmiştir. Yorulma modelinde 5

farklı yük kullanılmış ve elde edilen ömür değerleri deneysel olarak elde edilen ömür değerleriyle kıyaslanmıştır.

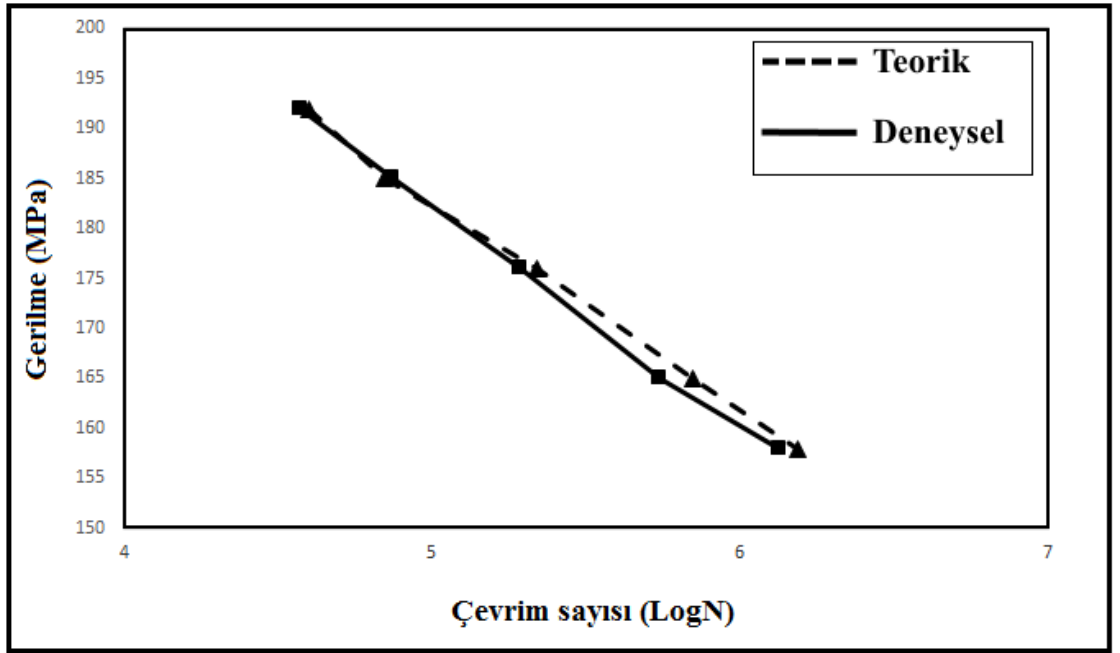


Şekil 4.39. İşlemsiz döküm için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri

Şekil 4.39'te deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen ömür değerleri görülmektedir. Elde edilen sonuçlara göre eğrilerin birbirine yakın olması, teorik değerlerin deneysel değerlere yakın olduğunu göstermektedir.

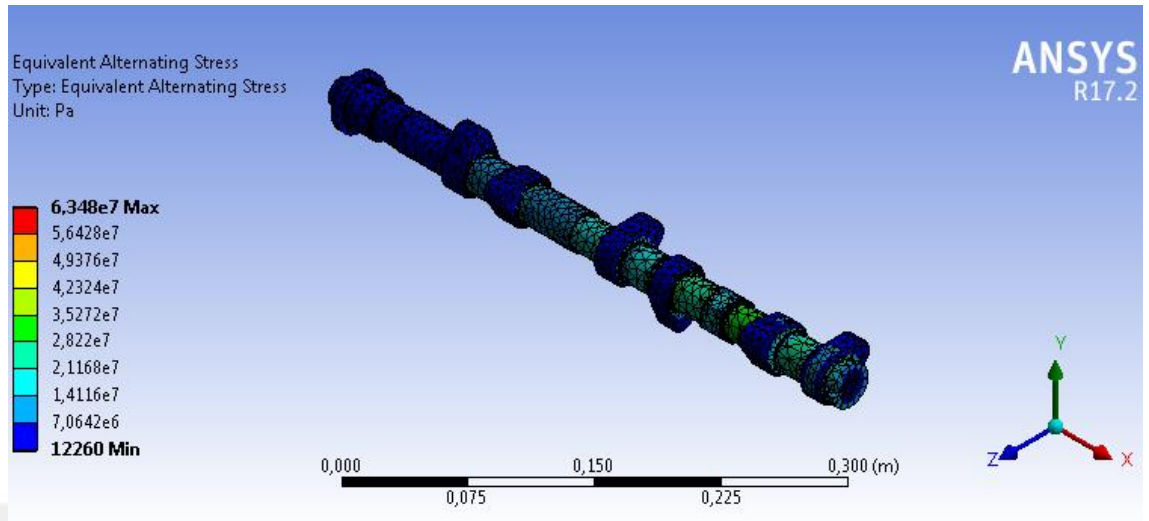
%90H₂-%10N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrülenmiş gri dökme demirin düz yorulma ömrünü sonlu elemanlar yöntemiyle belirleyebilmek için Guagliano ang Vergani (1997) tarafından önerilen yay modeli (Şekil 3.11) kullanılmıştır. Nitrülenmiş numuneye ait özellikler Eşitlik 3.5 yardımıyla hesaplanmış olup, buna ait özellikler olan elastisite modülü E=132 GPa, poisson oranı $\nu=0.28$ ve akma mukavemeti $\sigma_{ak}=220$ MPa değerleri, yorulma numunesine ait malzeme özelliği olarak girilmiştir. Bu eşitlikte kullanılan 600 μ m'lik kalınlıktaki nitrür tabakasına ait elastisite modülü 207 GPa olarak işlemsiz çelik numune için ise 120 GPa'lık değer kullanılmıştır. Ayrıca bu eşitlikte kullanılan elastisite modülü değerleri nano sertlik testi

ile ölçülmüştür. S-N eğrisi değerleri olarak ta %90 H₂-%10 N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrülenmiş döküm numunenin yorulma ömür değerleri girilmiştir. Şekil 4.40'da sonlu elemanlar analizi sonrası elde edilen ömür değerleri ile düz yorulma deneyleri sonrası elde edilmiş olan ömür değerleri karşılaştırılmıştır.



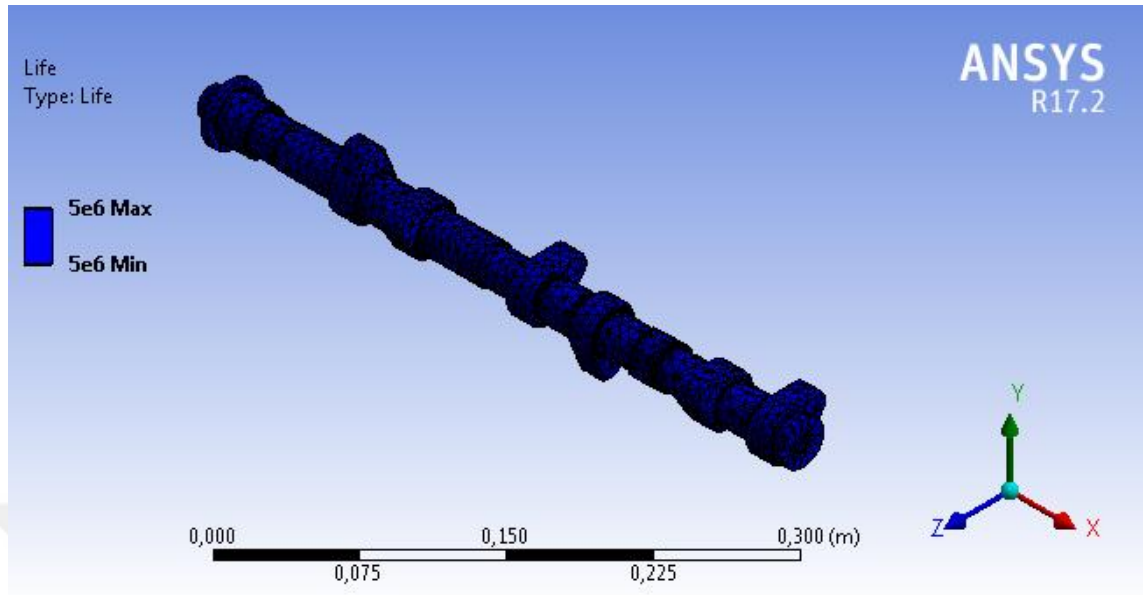
Şekil 4.40. Nitrülenmiş döküm için deneysel ve teorik olarak elde edilen S-N eğrileri

Şekilde görüldüğü gibi yorulma deneyi sonrası elde edilen sonuçlar ile sonlu elmanlar analizinden elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Bunun sonucunda Guagliano and Vergani (1997) tarafından önerilen yaklaşımın ve oluşturulan modelin olumlu sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.



Şekil 4.41. Nitrürlenmiş döküm kam mili için gerilme dağılımı

Şekil 4.41’de $\%90\text{H}_2$ - $\%10\text{N}_2$ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik kam miline 4000rpm’lik dönme hızı, 60Nm’lık tork ve kam mili üzerindeki kamlara 20N’luk yükleme kullanılarak gerçekleştirilen yorulma analiz sonrası elde edilen gerilme dağılımları belirtilmiştir. Kam mili üzerindeki gerilme dağılımı incelendiğinde maksimum gerilme değeri 63 MPa olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.42’de görüldüğü gibi yaklaşık olarak 5 milyon çevrim sonrasında kam milinin herhangi bir hasara uğramadığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre $\%90\text{H}_2$ - $\%10\text{N}_2$ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik kam mili belirtilen şartlarda hasara uğramadan güvenilir bir şekilde çalışabileceği söylenebilir.



Şekil 4.42. Nitrülenmiş döküm kam mili için ömür dağılımı

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada döküm ve çelik kam milleri farklı işlem şartlarında plazma ile nitrürleme işlemi sonrası yapısal, mekanik ve tribolojik özellikler incelenerek elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

• Çelik kam mili

- Plazma ile nitrürleme işlemi sonrası çelik kam mili yüzeyinde gaz karışımı oranına bağlı olarak beyaz tabaka içerisinde Fe_3N , Fe_2N , Fe_4N ve CrN fazları görülmüştür. Gaz karışımındaki hidrojen oranının artmasıyla nitrür piklerinin yoğunluğu da azalmıştır. Ayrıca $\%94\text{H}_2$ - $\%6\text{N}_2$ gaz karışımında nitrürlenmiş çelik numunedeki $\text{CrN}(311)$ piki tamamen kaybolduğu gözlemlenmiştir.
- Nitrürleme işlemi sonrasında çelik malzemelerde bası artık gerilmeleri meydana gelmiştir. Bu gerilme değerlerini tespit etmek için farklı incident açılarda testler yapılmıştır. Yüzeye yakın yerlerdeki bası artık gerilme değerlerini tespit etmek için düşük incident açılarda ölçümler alınmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre, bası artık gerilme değerlerinin gaz karışımındaki azot miktarının düşmesiyle azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, daha derinlerdeki bası artık gerilme değerlerini tespit etmek için ise yüksek incident açılarda ölçüm yapılmıştır. Bu sonuçlara göre, yüksek incident açılarda ($\omega=7^\circ, \omega=9^\circ$) elde edilen bası kalıntı gerilmelerinin en yüksek değerleri $\%94\text{H}_2$ - $\%6\text{N}_2$ gaz karışımında nitrürlenmiş numunelerde görülmüştür.
- Plazma ile nitrürlenmiş çelik kam millerinde beyaz ve difüzyon tabakalar oluşmuştur. En yüksek beyaz tabaka kalınlığı ve en düşük difüzyon derinliği $\%50\text{H}_2$ - $\%50\text{N}_2$ gaz karışımında nitrürlenmiş kam millerinde elde edilirken en düşük beyaz tabaka kalınlığı ve en yüksek difüzyon derinliği ise $\%94\text{H}_2$ - $\%6\text{N}_2$ gaz karışımında nitrürlenmiş kam millerinde görülmüştür.
- İşlemsiz çelik kam milinin yüzey sertliği 300-330 HV0.01 olarak ölçülürken, plazma ile nitrürlenmiş kam millerinde oldukça yüksek sertlik değerleri tespit edilmiştir. En yüksek yüzey sertliği (878 HV0.01) $\%50\text{H}_2$ - $\%50\text{N}_2$ gaz karışımında nitrürlenmiş kam millerinden elde edilmiştir.

- Tribolojik özellikler dikkate alındığında, işlemsiz çelik numuneye göre aşınma direnci artmış, sürtünme katsayısı ise düşmüştür. Ayrıca, en yüksek aşınma direnci ve en düşük sürtünme katsayısı %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş kam millerinde görülmüştür.
- Yorulma direnci; nitrüleme sonrası işlemsiz çelik numuneye göre artmıştır. Gaz karışımındaki azot miktarının azalmasıyla yorulma direnci artmıştır ve en iyi yorulma direnci %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş kam millerinde gözlemlenmiştir.
- Deneysel ve sonlu elamanlar analizinden elde edilen yorulma ömür değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre deneysel olarak elde edilen değerler ile sonlu elmanlar analizinden elde edilen değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bunun neticesinde, %94H₂-%6N₂ gaz karışımında, 4 saatlik işlem süresinde nitrürlenmiş çelik kam milinin yorulma analizi sonlu elemanlar yöntemiyle yapılmıştır. Yaklaşık olarak 3 milyon çevrim sonrasında kam milinin herhangi bir hasara uğramadığı tespit edilmiştir.

• Döküm kam mili

- Gri dökme demirin plazma ile nitrülenmesi sonucu malzeme yüzeyinde Fe₃N, Fe₄N ve FeN_{0,09} fazlarından oluşan beyaz tabaka, altında ise arayer azot atomları ile zenginleştirilmiş difüzyon tabakası oluşmuştur.
- Plazma nitrülenmiş numunelerde yapılan artık gerilme ölçümleri sonrasında, yüzeyde bası tipi artık gerilmelerinin oluştuğu ve gaz karışımındaki azot miktarının azalmasına bağlı olarak elde edilen artık gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Buna karşın malzeme yüzeyinden iç kısımlarına doğru bu gerilme değerlerinin gaz karışımındaki azot miktarının azalmasıyla arttığı sonucuna varılmıştır.
- Nitrüleme işlemi sonrası SEM kesit resimleri incelendiğinde en kalın beyaz tabaka %50H₂-%50N₂ gaz karışımında nitrülenmiş döküm numunelerde elde edilmiştir. Gaz karışımındaki azot yoğunluğunun yüksek olması beyaz tabaka içerisinde oluşan faz yoğunluğunun artmasına ve tabaka kalınlığının da büyümesine neden olmuştur. En ince tabaka kalınlığı ise %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrülenmiş döküm kam millerinde gözlemlenmiştir.

- Sertlik ölçümleri en dış kısımdan başlamak üzere numune merkezine doğru mesafelerden ölçümler alınmıştır. Yüzeye yakın ölçülen ilk sertlik değeri yüzey sertliği olarak kabul edilirken, merkeze doğru çekirdek malzeme sertliğine ulaşılan kadar gidilen mesafe difüzyon derinliği olarak kaydedilmektedir. Bu sonuçlara göre en yüksek difüzyon derinliği yine %94H₂-%6N₂ gaz karışımında elde edilmiştir. Bunun nedeni ise gaz karışımındaki hidrojen miktarının artmasıyla daha yüksek gerilim uygulanmasıdır. Uygulanan gerilim miktarının artması iyonize olan gaz miktarının, iyonların kinetik enerjisinin ve iyonize olan azotun hızının artmasına neden olmuştur. Bunun neticesinde beyaz tabaka kalınlığı azalırken difüzyon derinliği de artmıştır.
- Plazma ile nitrüleme sonrası döküm kam millerinin aşınma dirençlerinde hem 100m hemde 500m'lik aşınma mesafeleri sonrasında 3-4 kat arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yüzey sertliğinin aşınma oranı üzerine önemli etkiye sahip olduğu görülmesine rağmen burada önemli iki parametre yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısıdır. Sonuçlara göre düşük yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısından dolayı en yüksek aşınma direnci %94H₂-%6N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş döküm kam millerinde tespit edilmiştir.
- Yorulma deneyi sonucunda plazma ile nitrürlenmiş döküm numunelerin yorulma dayanımları işlemsiz numenlere göre 2-3 kat artmıştır. Bunu sebebi, nitrüleme ile oluşan difüzyon tabakasının bası artık gerilmelerini içermesindendir. Çökelen nitrürlerin oluşumu dislokasyon hareketini engeller ve böylece kayma bantlarının nitrürlenmiş tabakaya doğru hareketi engellenmiş olur. Hem bası artık gerilmelerin hem de yüzey sertliğinin artışı malzemenin yorulma ömrünün artmasına neden olur. Ayrıca aynı sıcaklık ve sürede gaz karışımındaki hidrojen gazının miktarı %50'den %90'a çıktığında yorulma dayanımı da artmıştır. Bunun sebebi oluşan difüzyon tabakasının kalınlığının artmasından dolayıdır.
- Sonlu elemanlar analizi sonrası elde edilen ömür değerleri ile düz yorulma deneyleri sonrası elde edilmiş olan ömür değerleri karşılaştırıldığında yorulma eğrileri birbirine yakın çıkmıştır. Bu yüzden %90H₂-%10N₂ gaz karışımında nitrürlenmiş kam mili 4000 rpm'lik dönme hızında 60Nm'lik tork ve kam yüzeylerine 20N'luk yükler altında sonlu elemanlar analiz yapılmış ve malzemenin herhangi bir hasara uğramadığı tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alsaran, A., Karakan, M., Çelik, A., 2002, The investigation of mechanical properties of ion-nitrided AISI 5140 low-alloy steel, *Materials Characterization*, 48, 323–327.
- Arabacı, E., İcingür, Y., Uyumaz, A., 2012. Su Enjeksiyonu ile Egzoz Isısı Geri Kazanımlı Altı Zamanlı Motor İçin Kam Tasarımı. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4, 11-23.
- Ashrafizadeh, F., 2003, Influence of plasma and gas nitriding on fatigue resistance of plain carbon (Ck45) steel. *Surface and Coatings Technology*, 173 –174, 1196–1200.
- Bayrakceken, H., 2006, Fracture analysis of a camshaft made from nodular cast iron. *Engineering Failure Analysis*, 13, 1240–1245.
- Brühl, S., P., Cabo, A., 2016, Tribological behaviour of nitrided and nitrocarburized carbon steel used to produce engine parts. *Industrial Lubrication and Tribology*, 68, 125–133.
- Çelik, A., Efeoğlu, İ., Şakar, G., 2001, Microstructure and structural behavior of ion-nitrided AISI 8620 steel. *Materials Characterization*, 46, 39-44.
- Çelik, A., Karadeniz, A., 1995, Improvement of the fatigue strength of AISI 4140 steel by an ion nitriding process. *Surface and Coatings Technology*, 72, 169-173.
- Çelik, A., Karadeniz, S., 1996, Investigation of compound layer formed during ion nitriding of AISI 4140 steel, *Surface and Coating Technology*, 80, 283-286.
- Çomaklı, O., 2013, *TiO₂ Kaplanmış CP-Ti Biyomalzemenin Yapısal Ve Tribolojik Özelliklerin İncelenmesi*, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (2013).
- Dobrenizki, L., Tremmel, S., Wartzack, S., Hoffmann, D.C., Brögelmann, T., Bobzin, K.N., Bagcivan, N., Musayev, Y., Hosenfeldt, T., 2016, Efficiency improvement in automobile bucket tappet/camshaft contacts by DLC coatings – Influence of engine oil, temperature and camshaft speed. *Surface & Coatings Technology*, 308, 360–373
- Eyre, T. S., Crawley, B., 1980, Camshaft and cam follower Materials. *Tribology International*, 13, 147-152.
- Fosatti, A., Borgioli, F., Galvanetto, E., Bacci, T., 2006, Glow-discharge nitriding of AISI 316L austenitic stainless steel: influence of treatment time, *Surface & Coatings Technology*, 200, 3511 – 3517.
- Ganesan, V. 2012. *Internal combustion engines*, McGraw Hill Education, India.
- Guagliano, M., Vergani, L., 1997, Effect of nitriding on low-cycle fatigue properties. *International journal of fatigue*, 19(1), 67-73.
- Günkan, F.M., 2014, *İçten Yanmalı Motorlarda Çevrim Atlatma Mekanizması Ve Tahrik sisteminin Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hammill, D., 1998, *How to Choose Camshafts & Time Them for Maximum Power*, Veloce Publishing Limited, England.
- Ifrah, G., 2001, *The universal history of computing*. J. Wiley and sons.
- Ipek, R., Selcuk, B., 2005, The dry wear profile of cam shaft. *Journal of Materials*

- Processing Technology, 168(3), 373-376.
- Karadeniz, S., 1990. Plazma Tekniği. TMMOB, MMO, Yayın no:137, Ankara.
- Karamış, M.B., 2010, Metal Matrisli Kompozitlerin Kam Malzemesi olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Karamış, M.B., 1991, An investigation of the properties and wear behaviour of plasma-nitrided hot-working steel (H13), *Wear*, 150, 331-342.
- Kerle H., Mauersberger K. A Contribution to the History of Cam Mechanisms. International Symposium on History of Machines and Mechanisms, 2009.
- Kırgezen, H., Gün, T., Kılıç, F., 2015, Kam Mili Üretiminde Kullanılan AISI 4140 Çeliği ve Gri Dökme Demirlerde Mangan Fosfat Kaplanmanın Korozyon Davranışına Etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 1-7.
- Kovacı, H., Yetim, A.F., Baran, Ö., Çelik A., 2016, Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 2-Variable amplitude loading and load interactions, *Materials Science & Engineering A* 672, 265–275.
- Lehr, A., 1981, *De geschiedenis van het astronomisch kunstuurwerk: zijn techniek en muziek*. Den Haag: Nijhoff.
- Meneghetti U., Maggiore A. (2011). *Antique Applications of Cam Mechanisms*, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México.
- Michalski, J., Marszałek, J., Kubiak, K., 2000, An experimental study of diesel engine cam and follower wear with particular reference to the properties of the materials. *Wear*, 240(1), 168-179.
- Mohammadzadeh, R., Akbari, A., Drouet, M., 2014, Microstructure and wear properties of AISI M2 tool steel on RF plasma nitriding at different N₂-H₂ gas compositions, *Surface & Coatings Technology*, 258, 566–573.
- Müller, J., 1987, the history of Cams and Cam Mechanisms. *Proc. 7th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms*, Spain.
- Nobuki, T., Hatate, M., & Shiota, T., 2008, Mechanical characteristics of spheroidal graphite cast irons containing Ni and Mn with mixed ferrite and bainitic ferrite microstructure. *International Journal of Cast Metals Research*, 21(1-4), 31-38.
- Önder, G. K., 2013, Gaz nitrürlemede işlem parametrelerinin 34CrAlNi7 çeliğinin mekanik özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Patil, S., Patil, S.F., Karuppanan, S., 2013, Modal and Fatigue Analysis of a Camshaft using FEA, *International Journal of Applied Engineering Research*, 8, 1685-1694.
- Pekgöz, B., Sarıdemir, S., Uygur, İ., Aslan, Y., 2013, Sementasyon İşleminin Farklı Çeliklerin Mikroyapı ve Sertlik Değerlerine Etkileri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10, 19-24.
- Podgornik, B., Vižintin, J., Leskovšek, V., 1998, Tribological properties of plasma and pulse plasma nitrided AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 108, 454-460.
- Rothbart, A., 2004, *Cam Design Handbook*. McGRAW-HILL, USA, 529-542.
- Selçuk, N., 2014, Toprak işleme tarım makinelerinde kullanılan 5630 kalite çeliğinin aşınma direncinin değişik yüzey prosesleri ile iyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

- Selvan, S. J., Subramanian, K., Nath, A. K., 1999, Effect of laser surface hardening on En18 (AISI 5135) steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 91, 29–36.
- Sharma R.C., 2003, Principles of heat treatment of steels. New Age International, India, 250-251.
- Sübütay, H., Şimşir, M., Aydın, M., Karaca, B., 2016, Kam mili üretiminde kullanılan gri dökme demir ve sfero dökme demirlerde çil oluşumunun mekanik özelliklere etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22, 1-7.
- Şirin, S. Y., Şirin, K., Kaluç, E., 2008, Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel, *Materials Characterization*, 59, 351-358.
- Taş, S., 2010, Çeliklerde X-ışınları Yöntemi İle Artık Östenit Ve İndentasyon Yöntemi İle Artık Gerilme Tayini, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2010).
- Taylor, C.F., 1985. The Internal-combustion Engine in Theory and Practice: Combustion, Fuels, Materials, Design, The M.I.T. (Massachusetts institute of Technology) Press, England.
- Trausmuth, A., Godor, I., Stoschka, M., 2009, Comparative Studies of Hardened Surface Layers Under Contact. September 23–26, Montanuniversität Leoben/Austria, 263.
- Wilson, A., 2002, Machines, power and the ancient economy. *The Journal of Roman Studies*, 92, 1-32.
- Xi, Y., Liu, D., Han, D., 2008, Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature. *Surface and Coatings Technology*, 202, 2577-2583.
- Yavuz, K., 2006, GGG-70 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yazıcı, M., 316L Paslanmaz çeliğinin S-fazının Yapısal, Elektriksel, Manyetik Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (2013).
- Yetim, A.F., 2009, Biyomalzeme olarak kullanılan AISI 316L paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımının plazma ile nitrürleme davranışı, Ti-DLC ince film kaplama ile karşılaştırılması, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Yetim, A.F., Yazıcı, M., 2014, Wear resistance and non-magnetic layer formation on 316L implant material with plasma nitriding, *Journal of Bionic engineering*, 11, 620-629.
- Yıldız, F., Yetim, A.F., Alsaran, A., Çelik, A., Kaymaz, İ., 2011, Fretting fatigue properties of plasma nitrided AISI 316L stainless steel: Experiments and finite element analysis, *Tribology International*, 44, 1979-1986.
- Yılmaz, Y., Kayalı, Y., Toptaş, M., 2016, Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışlarına Bortemperleme Isıl İşleminin Etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 13, 31-38.
- Zhijun, Z., 1999, Analysis on Causes of Early Stage Surface Pitting on Grey Cast Iron Camshaft. *Heat Treatment of Metals*, 10, 013.

ÖZGEÇMİŞ

17 Ocak 1987 yılında İzmir Bornova’da doğdu. İlköğrenimini, orta ve lise öğrenimini ise Erzurum’da tamamladı. 2005 yılında girdiği Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2010 yılında mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2013 yılında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı ve aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora öğrenimine başladı.

2012 yılı Haziran ayında Erzincan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2015 yılı Mayıs ayından itibaren 35. maddeye göre doktora eğitimini tamamlamak için 2 yıl süre ile Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevliliği kadrosuna görevlendirilmiştir.