

**NAMLU MODELLENMESİ VE BORLANMIŞ  
AISI 4140 NAMLU MALZEMESİNİN AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2015  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ**

**Uğur BOZALİ**

**NAMLU MODELLENMESİ VE BORLANMIŞ AISI 4140 NAMLU  
MALZEMESİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Uğur BOZALI**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır.**

**KARABÜK**

**Haziran 2015**

Uğur BOZALİ tarafından hazırlanan “NAMLU MODELLENMESİ VE BORLANMIŞ AISI 4140 NAMLU MALZEMESİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YAŞAR

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 17/06/2015

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Prof. Dr. Kerim ÇETİNKAYA(KBÜ)

Prof. Dr. Mustafa YAŞAR (KBÜ)

Yrd.Doç.Dr.Ali GÜNEN (MKÜ)

...../...../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nevin AYTEMİZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

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

Uğur BOZALİ

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **NAMLU MODELLENMESİ VE BORLANMIŞ AISI 4140 NAMLU MALZEMESİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Uğur BOZALİ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**Haziran 2015, 74 sayfa**

Bu çalışmada, 42CrMo4 çeliği namlu yüzeyi borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi kutu borlama metoduyla 850, 900, 950 °C sıcaklıklar ve 2, 4 ve 6 saat sürelerde EKabor II tozu kullanılarak yapılmıştır. Borlanmış numunelerin mikroyapıları, tabaka kalınlıkları ve derinliğe bağlı olarak sertlik değerleri ölçülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda borür tabakasının kalınlık ve sertlik değerleri süre ile sıcaklığın artışıyla beraber arttığı, borür tabakası kırılma tokluğu değerlerinin ise azaldığı tespit edilmiştir.

Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Zigana F tipi silah namlusunun elastik ve plastik gerinme, deformasyon, von-Mises analizleri yapılmıştır. Bu analizler sonucunda mermi çekirdeğinin namluyu terk edene kadarki geçen süre içerisinde tüm değerlerde artış gözlenmiştir. En fazla artış olan bölgeler patlamanın gerçekleştiği yerlerde meydana gelmiştir.

**Anahtar Sözcükler** : Borlama, mikroyapı, mekanik özellikler, gerilme, gerinim.

**Bilim Kodu** : 916.1.092

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **MODELLING A BURREL AND ANALYSING OF WEAR BEHAVIOURS OF BORONIZED AISI 4140 MATERIAL**

**Uğur BOZALİ**

**Karabük University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Industrial Design Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Mustafa YAŞAR**

**June 2015, 74 pages**

In this study, the bullet surface of the 42CrMo4(Ç4140) material has been subjected to boriding process under 850,900,950 °C for 2,4,6 with EKabor II. Boriding materials was experience doptical microscopy, SEM analysis and microhardness test for examing effect of temperture and time at boriding process on boride layer. As a result, thickness and hardness rates of boride layer increase while temperture and duration increase but the fracture toughness rate.

Analysis of elastic strain, plastic strain, deformation and Von-Misses of Zigana F type gun barrel has been done by using finite elements method. As a result of these analysises, an increase was observed in all values while bullets are leaving the barrel. The highest increase occurred at explosion point.

**Key Words** : Boron coating, microstructure, mechanical properties, strain, stress.  
**Science Code** : 916.1.092



## TEŐEKKÖR

Bu tez çalıřmasının planlanmasında, arařtırılmasında, yűrűtűlmesinde ve oluřumunda ilgi ve desteęini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandığım, yűnlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıřmamı bilimsel temeller ıřıęında űekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Mustafa YAŐAR'a sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Deneysel alıřmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen Mustafa Kemal Ŭniversitesi Teknoloji Fakűltesi, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali GŬNEN'e teőekkűrű bir borç bilirim.

Deneysel çalıřmalardan dolayı yardımlarını esirgemeyen Trabzon Silah Fabrikası (TİSAŐ) yűneticilerine, Ayrıca Sema Nur ERDEM'e ve Murat ALEMDAROęLU'na teőekkűrlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tűm kalbimle teőekkűr ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
BORLAMA İŞLEMLERİ.....	3
2.1. BORLAMA İŞLEMİ .....	3
2.1.1. Borlama İşleminin Avantajları .....	3
2.1.2. Borlama İşleminin Dezavantajları.....	3
2.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ.....	4
2.2.1. Katı Ortamda Borlama .....	4
2.2.2. Toz Ortamda Borlama .....	5
2.2.3. Macun İle Borlama .....	5
2.3. BORÜRLERİN ÖZELLİKLERİ .....	7
2.3.1. Fe <sub>2</sub> B ve FeB fazlarının özellikleri .....	7
2.4. BORÜR TABAKASI.....	8
2.4.1. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği .....	8

2.4.2. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması .....	8
2.4.3. Borür Tabakası Çeşitleri.....	10
2.5. BORÜR TABAKASININ MEKANİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ .....	13
2.5.1. Sertlik .....	13
2.5.2. Kırılma Tokluğu.....	14
BÖLÜM 3 .....	15
AŞINMA .....	15
3.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ .....	15
3.2. AŞINMA ÇEŞİTLERİ .....	16
3.2.1. Adhesiv Aşınma .....	16
3.2.2. Abrasif Aşınma.....	18
3.3. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER .....	20
3.4. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI .....	21
3.4.1. Ağırlık Farkı Metodu.....	21
3.4.2. Kalınlık Farkı Metodu .....	21
3.4.3. İz Değişimi Metodu.....	21
3.4.4. Rasyoizotoplar İle Ölçme.....	22
3.4.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu .....	22
3.5. AŞINMA DENEY METODU .....	22
3.6. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEY CİHAZLARI .....	23
3.6.1. Düzlem Üzeri Çubuk (Pin On Flat) Deney Cihazı.....	24
3.6.2. Ball On Flat Aşınma Deney Cihazı.....	25
3.6.3. Ball On Disk Deney Cihazı .....	26
BÖLÜM 4 .....	27
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	27
4.1. AISI 4140 ÇELİĞİ.....	27
4.2. MİKROYAPI İNCELEMELERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLANMASI VE MİKROYAPI ÇALIŞMALARI.....	29

4.3. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZLERİ.....	29
4.4. OPTİK MİKROSKOBİ İNCELEMELERİ VE BORÜR TABAKASI KALINLIK ÖLÇÜMLERİ .....	30
4.5. BORÜR TABAKASININ SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN YAPILMASI.....	31
4.6. EDX ANALİZLERİ.....	31
4.7. XRD ANALİZİ .....	31
4.8. AŞINMA DENEYİ.....	32
BÖLÜM 5 .....	34
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	34
5.1. METALOGRAFİK İNCELEMELER .....	34
5.2. TABAKA KALINLIKLARI VE MİKROSERTLİK SONUÇLARI.....	36
5.3. XRD SONUÇLARI .....	38
5.4. AŞINMA DENEY SONUÇLARI .....	39
5.4.1. Borür Tabakalarının Sürtünme Katsayısı .....	40
5.4.2. Borür Tabakalarının Aşınma Oranı .....	41
5.4.3. Borlanmış AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki Sem Mikroyapı ve Profilometre Görüntüleri .....	42
BÖLÜM 6 .....	52
SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....	52
6.1.SONLU ELEMANLAR YÖNETİMİ.....	52
6.2.MALZEME ÖZELLİKLERİ .....	54
6.2.1.AISI 4140 Çeliğinin Mekanik Özellikleri .....	54
6.3. SİLAHTA KULLANILAN BARUTUN ÖZELLİKLERİ .....	55
6.4. ZİGANA F TİPİ NAMLU MODELİ.....	55
6.5. MERMİ-KOVAN ÖZELLİKLERİ.....	56

6.6. SINIR ŞARTLARI.....	56
6.6.1. Yer Çekimi İvmesi .....	56
6.6.2. Basıncın Etki Edeceği Yer .....	57
6.7. AĞ UYGULAMASI(MESH) .....	57
6.7.1. Kovanın İç Kısmında Meydana Gelen Basıncın Zamana Bağlı Grafiği .....	58
6.8. ANALİZLER .....	59
6.8.1. Namluda Meydana Gelen Elastik Gerinmeler.....	59
6.8.2. Mermide Meydana Gelen Toplam İvmelenme .....	60
6.8.3. Namluda Meydana Gelen Gerilmeler.....	60
6.8.4. Namluda Meydana Gelen Plastik Gerinmeler.....	62
6.8.5. Mermi Çekirdeğinin Aldığı Yol .....	62
6.8.6. Namluda Meydana Gelen Sıcaklık Dağılımı.....	63
6.8.7. Bor Kaplanmış Namluda Meydana Gelen Sıcaklık Dağılımı .....	64
BÖLÜM 7 .....	65
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR .....	67
EK AÇIKLAMALAR A .....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	74

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Konveksiyonel borlama sırasında borür tabakasının a) Oluşum mekanizması, b) Çekirdeklenme ve c) <001> oryantasyonunda büyüme ..9	
Şekil 2.2. FeB ve Fe <sub>2</sub> B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi . . . . .	10
Şekil 2.3. Borür tabakasının sınıflandırılması . . . . .	11
Şekil 2.4. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması . . . . .	13
Şekil 3.1. Aşınma zaman ilişkisi . . . . .	16
Şekil 3.2. Adhesiv aşınma . . . . .	17
Şekil 3.3. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması . . . . .	19
Şekil 3.4. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması . . . . .	19
Şekil 3.5. Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler . . . . .	23
Şekil 3.6. Lastik tekerli abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü . . . . .	24
Şekil 3.7. Abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü . . . . .	24
Şekil 3.8. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü . . . . .	25
Şekil 3.9. Ball on Flat deney cihazı . . . . .	25
Şekil 3.10. Ball on Disk deney cihazı . . . . .	26
Şekil 4.1. Sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırını. . . . .	28
Şekil 4.2. Metkon metacut-M250 marka hassas kesme cihazı. . . . .	29

Şekil 4.3. Scanning elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analiz cihazı. ....	30
Şekil 4.4. Bilgisayar kontrollü optik mikroskop. ....	30
Şekil 4.5. Mikrosertlik ölçüm cihazı. ....	31
Şekil 4.6. Bilgisayar kontrollü XRD analiz ünitesinin görünümü. ....	32
Şekil 4.7. TURKYUS marka karşıt hareketli aşınma cihazı. ....	32
Şekil 4.8. Yüzey profilometre cihazı. ....	33
Şekil 5.1. 850°C de Ekabor 2 tozu ile borlanmış AISI 4140 çeliğinin optik görüntüsü a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat. ....	34
Şekil 5.2. 900°C’de Ekabor 2 tozu ile borlanmış AISI 4140 çeliğinin a) 2 saat optik, b) 4 saat, SEM c) 6 saat optik görüntüsü. ....	35
Şekil 5.3. 950°C de Ekabor 2 tozu ile borlanmış AISI 4140 çeliğinin optik görüntüsü a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat. ....	35
Şekil 5.4. Borlanmış numunelerin XRD grafikleri a) 850 °C de 2 saat b) 900 °C de 2 saat c) 900 °C de 4 saat d) 950 °C de 4 saat. ....	38
Şekil 5.5. Aşınma mekanizması şematik resmi [47]. ....	39
Şekil 5.6. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 850°C de 4 saatte 5N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri. ....	42
Şekil 5.7. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 850°C de 4 saatte 10N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri. ....	43
Şekil 5.8. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 850°C de 4 saatte 15N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri. ....	43
Şekil 5.9. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 900°C de 6 saatte 5N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri. ....	44
Şekil 5.10. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 900°C de 6 saatte 15N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri. ....	44

Şekil 5.11. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 950°C de 4 saatte 10N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri.....	45
Şekil 5.12. Numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan EDX analizleri a)850°C-15N b)900°C-5N c)900°C-15N d)950°C-5N. ....	46
Şekil 5.13. Ekobar 2 tozu ile 850°C’de 10N’luk yük altında 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.....	47
Şekil 5.14. Ekobar 2 tozu ile 900°C’de 10N’luk yük altında 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.....	48
Şekil 5.15. Ekobar 2 tozu ile 950°C’de 15N’luk yük altında 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.....	48
Şekil 5.16. Ekobar 2 tozu ile 850°C’de 10N’luk yük altında 6 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.....	49
Şekil 5.17. Ekobar 2 tozu ile 850°C’de 15N’luk yük altında 6 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.....	49
Şekil 5.18. Ekobar 2 tozu ile 900°C’de 15N’luk yük altında 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.....	49
Şekil 6.1. Kovan içerisindeki patlama modeli. ....	53
Şekil 6.2. Zigana F Tipi Namlu Modeli. ....	55
Şekil 6.3. Sınır Koşulları.....	57
Şekil 6.4. Modelin Mesh Örülmüş Hali. ....	57
Şekil 6.5. Kovanın iç kısmında meydana gelen basınç-zaman grafiği [43].....	58
Şekil 6.6. Namluda meydana gelen elastik gerinmeler. ....	59
Şekil 6.7. Mermide meydana gelen toplam ivmelenme.....	60
Şekil 6.8. Namluda meydana gelen von-mises gerilmeleri.....	61
Şekil 6.9. Namluda meydana gelen plastik gerinmeler.....	62
Şekil 6.10. Mermi çekirdeğinin aldığı yol. ....	62



## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 4.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi . . . . .	18
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 4140 çelik malzemenin kimyasal bileşimi . . . . .	27
Çizelge 6.1. Borlama işlemi sonrası işleme parametrelerine bağlı olarak yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlıkları ve mikro sertlik değerleri . . . . .	37
Çizelge 6.2. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri . . . . .	41
Çizelge 6.3. Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma hacim kaybı değerleri (mm <sup>3</sup> ) . . . . .	42
Çizelge 7.1. AISI 4140 Çeliğinin Mekanik Özellikleri . . . . .	54
Çizelge 7.2. AISI 4140 Çeliğinin Termal Özellikleri . . . . .	54
Çizelge 7.3. Silahta Kullanılan Barutun Özellikleri . . . . .	55
Çizelge 7.4. Mermi-Kovan Özellikleri . . . . .	56

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	: Sulfürik Asit
Creş	: Krom Eşdeğerliği
Nieş	: Nikel Eşdeğerliği
Cr	: Krom
Ni	: Nikel
B	: Bor
Si	: Silisyum
µm	: Mikrometre
D	: Tabaka Kalınlığı
R	: Gaz Sabiti
H	: E-Ee ile açıklanan aşırı potansiyel
Ee	: Denge Potansiyeli erf(z)
D	: Difüzyon Katsayısı
Do	: Frekans Faktörü
Q	: Aktivasyon Enerjisi
°C	: Santigrat derece
K	: Kelvin
NaCl	: Sodyum Klorür
HCl	: Hidroklorik Asit
SiC	: Silisyumkarbür
mV	: Milivolt
nA	: Nanoamper
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	: Fosforik Asit
Ti	: Titanyum
Sn	: Kalay
P	: Fosfor
Wa	: Aşınma Oranı (mm <sup>3</sup> )
G	: Ağırlık kaybı (gr)

- M : Yükleme Ağırlığı (N)  
S : Aşınma Yolu (mm)  
d : Malzeme yoğunluğu (gr/cm<sup>3</sup>)

## **KISALTMALAR**

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
- ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Topluluğu)
- DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
- EDS : Electron Diffraction Scanning (Elektron Difraksiyon Taraması)
- SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
- XRD : X-Ray Diffraction (X-ışınları difraksiyon)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Sonlu Elemanlar Metodu mühendislikte karşılaşılan bir çok karmaşık problemlerde çözüm elde etmek için kullanılan nümerik bir yöntemdir. Gerilme analizindeki sürekli, süreksiz, doğrusal veya doğrusal olmayan problemler, ısı transferi, sıvı akışı ve elektromanyetizma problemleri Sonlu Elemanlar Metodu ile incelenebilir ve çözümlenebilirler. Modern Sonlu Elemanlar Metodu başlangıcı, bazı araştırmacıların esnek çubukları kullanarak modelledikleri 1900' lü yılların başlarına dayanır. Literatürde, Courant (1943) Sonlu Elemanlar Metodunu geliştiren ilk kişi olarak bilinmektedir. 1940'lı yılların başında yayınladığı bir makalede, Courant, bölgesel sürekli lineer yaklaşım kullanarak bir burulma problemi için çözüm üretmiştir [3].

Endüstride makine üretimi için kullanılan malzemelerin seçimi kadar bu malzemelere uygulanan yüzey işlemleri de büyük önem taşımaktadır. Türkiye'nin sahip olduğu en önemli yer altı kaynaklarından birisi bor rezervleridir. Bor ve türevlerinin endüstride kullanım alanları oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Bor ve bor bileşiklerin kullanım alanlarına uygun en iyi örnekler borlama gibi termokimyasal difüzyon işlemleridir. Termokimyasal difüzyon prosesi ile yapılan bir yüzey işlemi olan "Borlama" (Boronizing), malzeme yüzeyinde istenen yüksek sertlik, düşük sürtünme katsayısıyla yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci ve iyi oksidasyon direnci sağlayan en elverişli yüzey sertleştirme işlemlerinden biridir [1]. Borür tabakası sahip olduğu yüksek sertlik değerini, 900-1000°C'ye ulaşan sıcaklıklarda dahi koruyabilmektedir [2].

Günümüzde metal yüzeylerinin dış ortamların etkilerinden korunması, kullanımları sırasında maruz kaldıkları korozyon, yorulma, aşınma ve sürtünme etkilerini en aza indirmek amacıyla çok geniş çeşitlilikte yüzey alaşımlandırma işlemleri uygulanmaktadır. Malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde en

kolay ve en ekonomik yöntemlerin başında yüzey sertleştirme işlemleri gelir. Bu yöntemler malzeme yüzeyinin sert, mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı olmasını; matris kısmının da enerjiyi absorbe ederek tok kalmasını sağlar. Yüzey sertleştirme işlemlerinin başında endüstride geniş uygulama alanı olan borlama işlemi gelir [49].

Bu çalışmanın amacı, AISI 4140 kalite çelikten hazırlanan orijinal numunelere farklı süre ve sıcaklıklarda uygulanan borlama ısıl işlemi sonrasında, mikroyapı, sertlik ve borlama ısıl işlemi sonrası korozif aşınma davranışlarının incelenmesidir. Ayrıca sonlu elemanlar yöntemiyle Zigana F tipi silah namlusunun gerilme analizleri ve deformasyon analizleri yapılmıştır.

## BÖLÜM 2

### BORLAMA İŞLEMLERİ

#### 2.1. BORLAMA İŞLEMİ

Borlama, Alman Endüstri Standardı DIN 17014'e göre "termokimyasal işlem yoluyla iş parçasının yüzeyinin bor atomlarıyla zenginleştirilmesi" olarak tarif edilen termodifüzyonel yüzey işlemidir. Yani borlama, termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal latisin içerisine yayınması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır [4].

##### 2.1.1. Borlama İşleminin Avantajları

- a) Borlamanın avantajları özetlenir ise:
- b) Yüksek sıcaklıklarda borür tabakası sertliğini korur,
- c) Borlama, demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon dayanımını gerek alkali ortam gerekse seyreltik asit çözeltisi içerisinde korur ve bu özelliği sayesinde endüstride geniş bir uygulama alanı bulur,
- d) Borlanmış yüzeyin oksidasyon direnci 850 °C'ye kadar etkili olur,
- e) Oksitleyici ve korozif ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır.

##### 2.1.2. Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlamanın dezavantajları şöyle sıralanabilir:

- a) Borür tabakası darbeli yüklere karşı dayanıksızdır,
- b) Borlama işleminin, gaz sementasyon ve plazma nitrürasyon işlemlerine göre, işletme giderleri daha fazladır ve uygulanması daha zordur,

- c) Karbürleşmiş veya nitrürleşmiş çeliklere göre, borlanmış alaşımlı çeliklerde temas yorulma dayanımı (pullanma dayanımı) düşüktür,
- d) İşlem sonucunda malzemenin boyutlarında, borlama tabakasında %5-25'i kadar hacim genişlemesi olduğu için değişimler olur [5].

## **2.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ**

### **2.2.1. Katı Ortamda Borlama**

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 850-1000°C sıcaklıklarda 2-10 saat bekletilmesi ile yapılan işlemdir. Kuru sementasyona benzeyen bu yöntem soygaz atmosferinde yapılabildiği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal, atmosferde de yapılabilir. Sistem ucuzdur. Özel teçhizat ve teknik gerektirmez [5]. Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflandırılarak satılmaktadır [7].

Ekabor 1: Tozdur. Optimum tabaka kalınlığının elde edilmesinde kullanılır. Yüzey pürüzlülüğü açısından yüksek kaliteye erişilir ve genel maksatlı demir ve çelik malzemelerde kullanılır.

Ekabor 2: Granüllüdür. Yüzey pürüzlülüğü açısından çok yüksek kaliteye sahiptir. Düşük alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor 3: Granüllüdür. Ekabor 2'den daha iri taneli olup yüzey kalitesi daha iyidir. Yüksek alaşımlı çelikler için kullanılır.

Ekabor HM: Sert metallere borlanması için özel olarak üretilmiştir.

Ekabor Pasta: Macun şeklinde olup metalik malzemelerin borlanması istenen bölgelerine sürülerek uygulanır.



### **2.2.2. Toz Ortamda Borlama**

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800-1000 °C sıcaklıklarda 4-10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı çelik saç kutu içine konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırına konur ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Bir süre bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağırlığı ile durmalıdır [8].

### **2.2.3. Macun İle Borlama**

Pasta (Macun) borlama yöntemi ise kutu borlamanın zor ve pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Karmaşık şekilli parçaların tamamen veya kısmen seri bir şekilde borlanabilmesi büyük bir avantajdır. Hazırlanan borlayıcı karışım yani pasta, malzemenin üzerine sürülerek veya püskürtülerek 1–2 mm civarında kalınlıkta tabaka oluşturulmakta ve fırına konmadan kurutulmaktadır. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama tamamlanmış olur [8].

### **2.2.4. Sıvı Borlama**

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, is parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900-1100 °C sıcaklıkta ve 2-9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850 °C'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkansız hale gelecektir. Sıvı ortamda borlama tuz eriği içinde elektrolitli veya elektrolitsiz (daldırma) ve derişik çözeltide olmak üzere yapılabilir [9].

#### **2.2.4.1. Daldırma Yöntemi**

Elektrolizsiz ergitilmiş tuz eriyiği veya normal sıvı ortam borlaması olarak da adlandırılır. Bu yöntem genelde B<sub>4</sub>C'in katı fazı ile sıvı sodyum klorit (NaCl) denibarettir. Bu da boraksın viskozite azaltma yöntemleriyle elektrolit olarak erimesi esasına dayanır. Ortamın esas bileşemi boraks olup, aktivatör olarak B<sub>4</sub>C, SiC, Zr, B vs. kullanılır. Klorürlerin karışımı veya klorürler ile floritlerin karışımına bor karbür ilavesi ile ya da erimiş boraks banyolarına bor karbür ilave edilerek yapılır. Daldırma yöntemi ucuz ve fazla ihtisas istemez. Fakat termal şok, borlamadan sonra parçanın temizlenmesi, büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanmaması, metodun kötü yönleridir. Çalışma sıcaklığı 800-1000 °C ve borlama süresi 2 ila 6 saat arasında değişmektedir [9].

#### **2.2.4.2. Elektroliz yöntemi**

Yüksek sıcaklıkta tuz banyosu, elektrolit iş parçası katot ve grafit çubuk anot olarak işlem gerçekleştirilir. Tuz banyosu ise ergitilmiş boraktır. Bu yöntem laboratuvar çalışmalarında gayet iyi sonuçlar vermiştir. Ancak ergimiş boraksın viskozitesinin çok yüksek olması, endüstriyel uygulamalarda sıcaklığın homojenliğini engeller yani boraks eriğinin yüksek viskozitesi 850 °C'nin altında borlamayı pratik olarak imkansız kılar. 850 °C'nin üzerinde ise banyodaki düzgün sıcaklık dağılımı oldukça güçleşir [9].

#### **2.2.4.3. Derişik Çözeltide Borlama**

Boraks ve borasitli anhidriti içeren derişik ortamlarda yüksek frekanslı ısıtma ile deneyler yapılmıştır. Belli bir bor difüzyonu sağlandığı halde birleşik tabakalar elde edilememiştir. Boraks ve borasidi anhidriti içeren derişik miktarlı çözeltilerde yapılan deneyler kapalı borür tabakası vermemiş ve 1000 °C'de 10 dakika süre ile 0,1 A/cm<sup>2</sup> ve 450 kHz frekans ile doymuş boraks çözeltisinde tabakalar elde edilmiştir. Bu yöntem esnasında açığa çıkan bor halojenleri ilgili (uygun) asit oluşumları altında su ile kuvvetli reaksiyona girerler. Bu sebeple derişik çözeltide borlama başarılı olmamıştır [9].

### **2.2.5. Gaz borlama**

Bor kaynağı olarak kullanılan bor halojenleri, diboran ve organik bor bileşiklerinin ısı etkileriyle parçalanması sonucu gaz haline getirilen bor kaynağının kapalı paslanmaz çelik potadaki numune üzerine püskürtülmesi ile yapılır [18].

### **2.2.6. Plazma Borlama**

$B_2H_6-H_2$  ve  $BCl_3-H_2Ar$ 'un karışımları plazma borlama işleminde başarılı bir şekilde kullanılır. Bahsedilen  $B_2H_6-H_2$  gaz karışımı bir paket veya sıvı ortam borlama prosesi ile mümkün olmayan  $600\text{ }^\circ\text{C}$  gibi düşük sıcaklıklarda çeşitli çelikler üzerinde borlu tabaka üretmek için kullanılmaktadır [10].

## **2.3. BORÜRLERİN ÖZELLİKLERİ**

Bor, periyodik tabloda birçok elementle bileşik oluşturmaktadır. Borür bileşiklerinin çoğu kuvvetli kovalent bağ yapısına sahip olduklarından ergime sıcaklık dereceleri, elastisite modülleri ve sertlikleri oldukça yüksektir. Borürlerin oluşumu büyük ölçüde bileşik yaptığı atomla arasındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasal etkiye bağlıdır. Diğer seramik bileşiklere göre borürlerin termal genişleme katsayıları orta seviyede, ısı iletkenlik katsayıları ve termal şok dirençleri ise oldukça yüksek seviyelerdedir. Borürlerin çoğunun elektriksel dirençleri, diğer seramik bileşiklere göre daha iyi elektriksel iletkenliğe sahiptir. Kristal yapıları ve latis parametreleri benzer olan borürler katı eriyik oluşturabilmektedir [11].

### **2.3.1. Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının özellikleri**

Difüzyon yönüne bağlı olarak, kolonsal yapı sergileyen tek fazlı Fe<sub>2</sub>B fazı, çift fazlı Fe<sub>2</sub>B+FeB fazlarına göre daha çok tercih edilmektedir. Gerçekte FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamakta ve çoğu zaman bu gerilmeler sebebiyle, iki faz arasında çatlaklar oluşabilmektedir [4]. Bu etki mekanik zorlamalar altında borür tabakasının tabakaların kalkmasına neden olmaktadır. Ayrıca termal şok veya mekanik etkiler altında da ayrılmalar ve tabaka halinde kalkmalar meydana

gelmektedir. Bu sebeple, minimum FeB içeriğine sahip kaplama tabakaları elde edilmeye çalışılmaktadır [6]. Genellikle, borür tabakalarının tribolojik özelliklerinin belirlenmesinde mikroyapıya bağlı olarak açıklamalar yapılmaktadır. Çift fazlı FeB+Fe<sub>2</sub>B tabakası, tek fazlı Fe<sub>2</sub>B tabakasına göre iyi özelliklere sahip değildir. Çift fazlı tabakalarda yüzeyin hemen altında porozite oluşumu mümkün olmaktadır.

## **2.4. BORÜR TABAKASI**

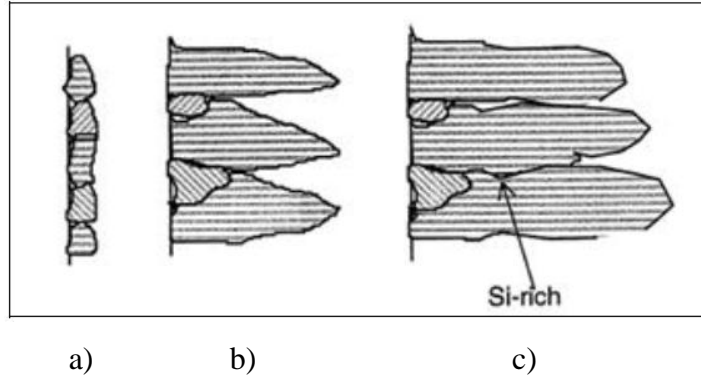
### **2.4.1. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği**

Metallere uygulanan yüzey işlemlerinin birçoğu, alaşım elementinin malzemenin yüzeyine yayınma esasına dayanmaktadır. Genel olarak difüzyon işleminin gerçekleşebilmesi için iki temel kavram önem kazanmaktadır. Bunlar; difüzyonlanabilme ve difüzyon için gerekli olan itici güçtür. Borür tabakasında ki bu özellik, sadece ana metalin yapısına bağlı değildir ve aynı zamanda borür tabakasının yapısına da bağlı olmaktadır. Bu temel karakteristikler difüzyonla metal tabaka oluşturma işlemlerinde, kaplama kinetiğinin temelini teşkil etmektedir. Dislokasyonlar, tane sınırları, yüzeyler ve arayüzeyler malzemelerin başlıca yapı hatalarıdır. Potansiyel gradyant ve bu yapı hatalarının kombinasyonları çeşitlilik arzeder ve difüzyon olayını karmaşılaştırır. Matris malzemedeki, tane sınırları ve dislokasyonlar boyunca kütle taşınımının hızlı olduğu literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır [1,5,11].

### **2.4.2. Demir Borürlerin Büyüme Mekanizması**

Demir borürler, seramiklerin yüksek sertlik ve metallerin termal ve elektriksel iletkenlik gibi genel özelliklerini bir arada bulunduran bileşiklerdir [11]. Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımli çeliklerin termokimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürlerin, kolonsal kümecikler halinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe<sub>2</sub>B fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe<sub>2</sub>B ve Fe<sub>2</sub>B ile matris arayüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımli çeliklerde arayüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu belirtilmektedir [12]. Borlama işlemi sonucunda oluşan borür fazları, borlama

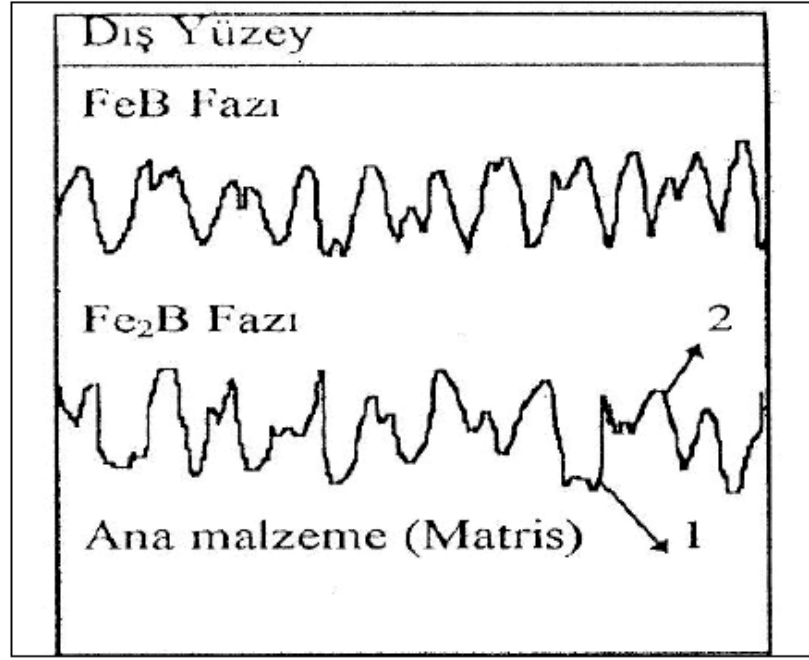
ortamının aktif bor konsantrasyonuna bağı olarak, yüzey çizikleri ve pürüzlülükleri gibi makro hataların, tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlamaktadır [12]. Özellikle düşük aktif bor konsantrasyonunun bulunduğu ortamlarda, bu bölgeler borür fazının oluşabildiği yegane yerlerdir. Şekil 2. 1' de konvansiyonel borlama sırasında borür tabakasının oluşum mekanizması verilmiştir.



Şekil 2.1. Konveksiyonel borlama sırasında borür tabakasının a) Oluşum mekanizması, b) çekirdeklenme ve c)  $\langle 001 \rangle$  oryantasyonunda büyüme [11].

Uçtan büyüme mekanizmasına göre; ana malzemenin bileşimine ve işlem şartlarına bağı olarak başlangıçta oluşan  $\text{Fe}_2\text{B}$  çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönlendirir [11].

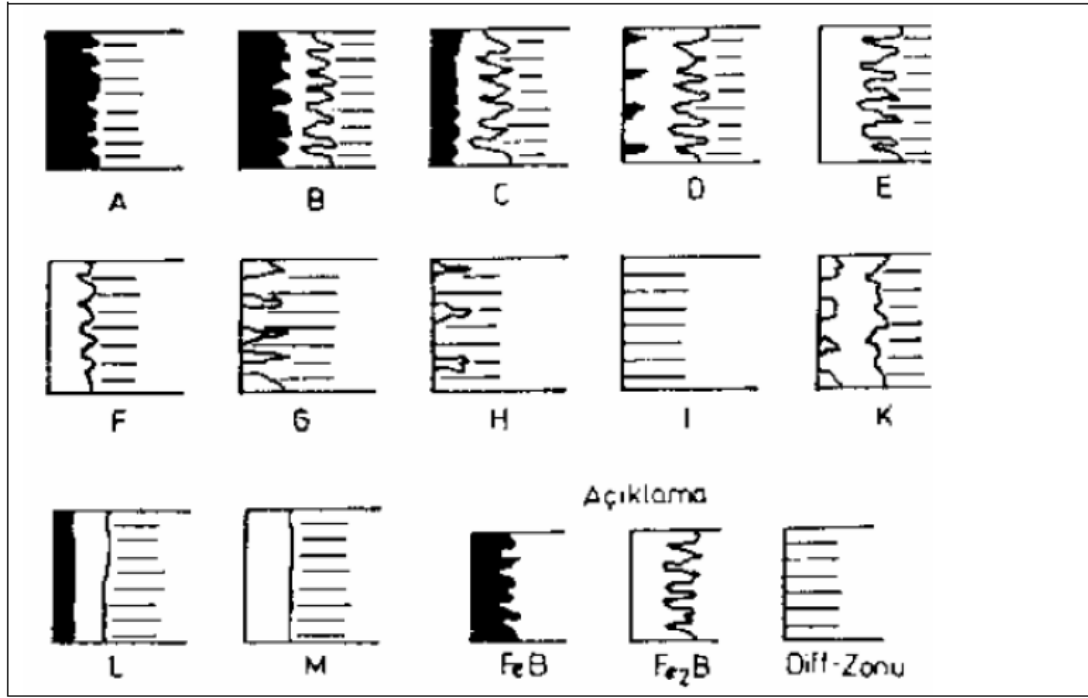
Bu durumda  $\text{Fe}_2\text{B}$  çekirdeğinin ucu civarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar. Uçtan büyüme mekanizmasında, Şekil 2.2'de görüldüğü gibi demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan tabaka ile malzeme ara yüzeyindeki kolonsallık 1 noktasında 2 noktasına göre daha yüksektir.



Şekil 2.2. FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarında, demir-bor reaktivitesinden kaynaklanan kolonsal büyümenin şematik gösterimi [5].

### 2.4.3. Borür Tabakası Çeşitleri

Borlama esnasında uygulanan yöntem, kullanılan borlama maddesi, borlanan malzemenin cinsi ve borlama esnasındaki işlem parametreleri oluşan borür tabakasının şekline ve özelliklerine etki eden faktörlerdir. Metalografik incelemeler sonucu oluşan borür tabakasının kalınlığını, şekli, demir borürler için Fe<sub>2</sub>B yada FeB'nin oluştuğunu görmek mümkündür. Demir esaslı malzemeler için borlama sonucu yüzeyde FeB, Fe<sub>2</sub>B ve geçiş bölgesi oluşabilmektedir. Bu tabakalar tek basına ya da değişik kombinasyonlar da bir arada bulunabilirler. Kunst ve Schaaber Şekil 2.3' te gösterilen bir değerlendirme sistemi geliştirilmiştir [13].



Şekil 2.3. Borür tabakasının sınıflandırılması [6,15].

Şekil 2.3' te belirtilen tabaka çeşitleri aşağıdaki gibi karakterize edilmiştir:

- a) Tek fazlı tabaka, sadece FeB
- b) İki fazlı tabaka, Fe<sub>2</sub>B ve FeB. (Tam tabaka)
- c) İki fazlı tabaka, FeB tabakası B'dekinden daha ince.
- d) İki fazlı tabaka, fakat FeB dişleri izole edilmiş.
- e) Tek fazlı tabaka, sadece Fe<sub>2</sub>B, güçlü dişler.
- f) Tek fazlı tabaka, sadece Fe<sub>2</sub>B, daha az kuvvetli dişler.
- g) Bağımsız Fe<sub>2</sub>B dişli tabaka.
- h) İzole edilmiş Fe<sub>2</sub>B tabakası.
- i) Geçiş bölgesi
- j) Dejenere olmuş tabaka.
- k) İki fazlı FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz
- ı) Tek fazlı FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz

Borür tabakasının özelliklerini bu sınıflama ile belirlemek mümkün değildir. Bu değerlendirme sistemi borür tabakasının görünümünü ve borlama işleminin uygunluğuna karar vermeyi sağlar [15].

#### **2.4.4. Geçiş Bölgesi**

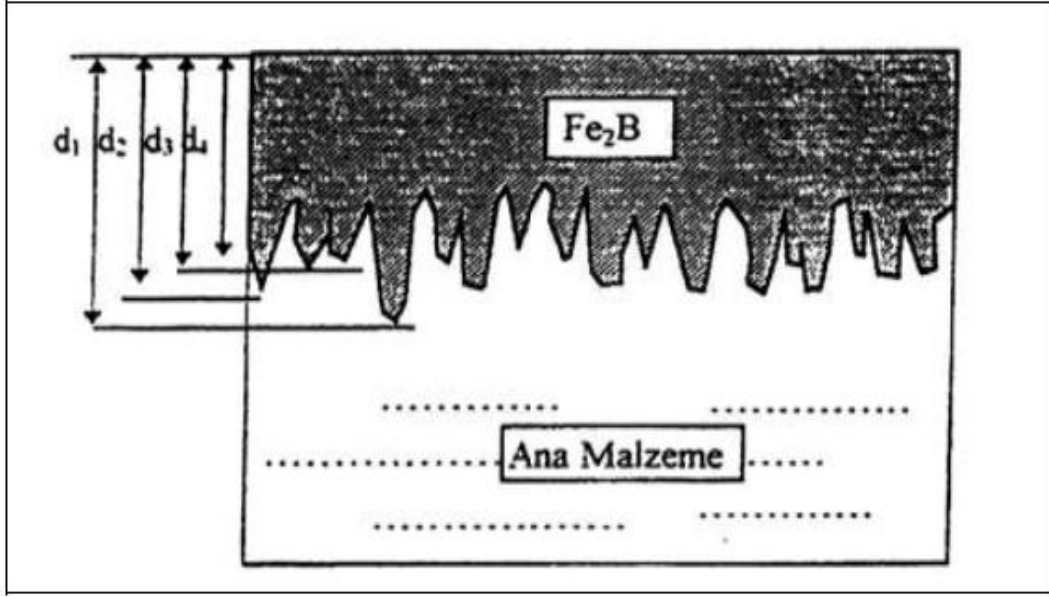
Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçiş bölgesi ile alakalı farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur [15].

Geçiş bölgesinin kalınlığı konusunda da farklı değerlendirmeler mevcuttur; Lovshenko ve arkadaşları, geçiş bölgesi kalınlığını borür tabakasının 3-4 katı olarak belirtmişlerdir [13]. Bozkurt ise, bu oranın 10-15 kat olduğunu tespit etmiştir [6]. Borür tabakası tarafından karbonun içeri doğru itilmesi sonucu bu bölgede esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunduğu ileri sürülmektedir [13]. Bozkurt ise doktora tezinde geçiş bölgesindeki karbon miktarının ana malzemedeki seviyesini koruduğunu, buna karşılık borun yüzeyden içe doğru tedrici olarak azaldığını tespit etmiştir [6].

#### **2.4.5. Tabaka Kalınlığı**

Borür tabakaları iğnesel ve değişken bir formda olduklarından, tabaka kalınlığının tanımlanmasında güçlükler çıkmakta ve farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle tabakanın diş yapısı, düz bir düzlemlle karşılaştırılarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak (Şekil 2. 4) belirtilmektedir [4].





Şekil 2.4. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması [11].

## 2.5. BORÜR TABAKASININ MEKANİK VE KİMYASAL ÖZELLİKLERİ

### 2.5.1. Sertlik

Borlanan yüzeyin en önemli özelliklerinden biri sertliktir. Borlama ile çok yüksek ergime sıcaklıklı faz yapısından oluşan 1450-5000 HV aralığında mikro sertlik içeren borür tabakaları oluşmaktadır. Borlama sonrası oluşan FeB tabakası Fe<sub>2</sub>B tabakasından daha sert ancak daha gevrek yapıdadır. Borlanmış malzemelere sertlik testleri Vickers ve Knoop sertlik ölçme yöntemleri ile yapılır. Sertlik ölçümleri, tabaka kalınlığı ve faz yapısına bağlı olarak 25-200 g yüklerle gerçekleştirilmektedir.

Geouriot ve arkadaşları, borür tabakasının sertliğini belirlemek için iki ayrı yöntem önermektedirler. Bunlar sırasıyla, sertlik deneylerinin malzeme yüzeyine dik yada büyüme yönünde artan yükler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve sabit yük kullanılarak gerçekleştirilmesi yöntemidir [14].

### **2.5.2. Kırılma Tokluğu**

Klasik kırılma tokluğu deneyleri, boyut bakımından uygun malzemelere uygulanabilmektedir. Özellikle, numunenin kalınlığı ve plastik bölgenin boyutu kırılma tokluğu deneylerinde oldukça önemli parametrelerdir. Ayrıca bu işleme tabi tutulan malzemelerin gevrek olmamaları gerekmektedir.

Gevrek ve kütleli olarak küçük malzemelere klasik kırılma tokluğu deneylerinin uygulanması mümkün olmadığından, “indentasyon” esaslı bir metod geliştirilmiştir. Bir malzemenin kırılma tokluğu, uygulanan yüke, çatlak boyuna ve numunenin geometrisine büyük ölçüde bağlıdır [1,15].

## BÖLÜM 3

### AŞINMA

Aşınma için birçok tanım yapılmakla beraber DIN 50320'ye göre aşınma; “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen istenmeyen yüzey bozulması” şeklinde tanımlanmaktadır. Aşınma sonucunda malzeme kayıpları ile beraber makine parçası üzerinde hasarlar meydana gelir. Bu aşınma hasarları önemli ölçüde maddi kayıplara neden olabilmektedir.

Aşınma olayında beş unsur vardır. Bunlar; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve harekettir. Ayrıca sıcaklık faktörü de altıncı parametre olarak değerlendirilebilir.

Aşınan malzeme ve aşındıran malzemeler “aşınma çifti” olarak tanımlanmaktadır. Aşınma çifti ile ara malzemeye de beraberce “aşınma kombinasyonu” denilmektedir. Aşınma çifti ile ara malzeme, sert taneli sıvı, gaz ve buhar halinde olabilir. Aşınma sırasında oluşan aşınma parçacıkları da, ara malzeme gibi etki yaparak aşınma olayına katılırlar [16].

#### 3.1. AŞINMA ZAMAN İLİŞKİSİ

Aşınma pratikte ikiye ayrılır.

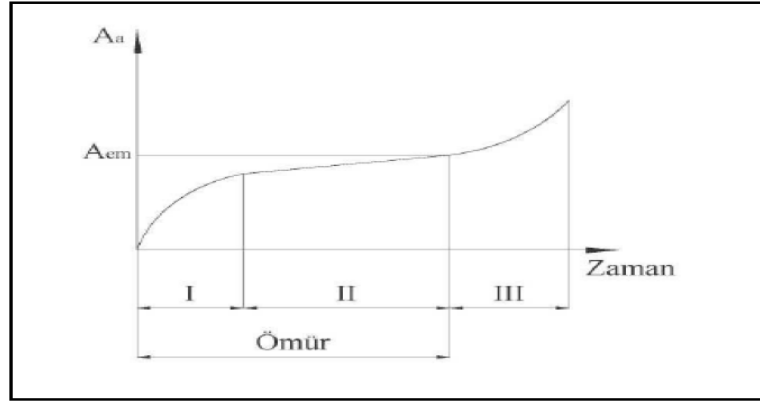
- a) Zaman ile gelişen aşınma,
- b) Aniden meydana gelen aşınma,

Zamanla gelişen aşınmayı üç safhada incelemek mümkündür (Şekil 3.1).

1.Safha (Rodaj Safhası): Bu safha birbirine alıştırma safhasıdır. Bu safhada parçaların ilk çalışması sırasında şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu nedenle parçaların birbiri ile alıştırılması iyi yapılması ve kısa sürede gerçekleştirilmesi bu safhaya ait önemli şartlardır. Genelde alıştırma, yüksüz ve normal hızlardan daha düşük hızlarda yapılır. Alıştırmmanın iyi ve kısa sürede tamamlanması için bu safhaya ait olan özel ağırlıklarla kullanılır.

2. Safha : Bu safhada aşınma çalışma sırasında temas noktalarında meydana gelir.

3. Safha: Bu bölgede artan aşınma hızı ile şiddetli aşınma meydana gelir.

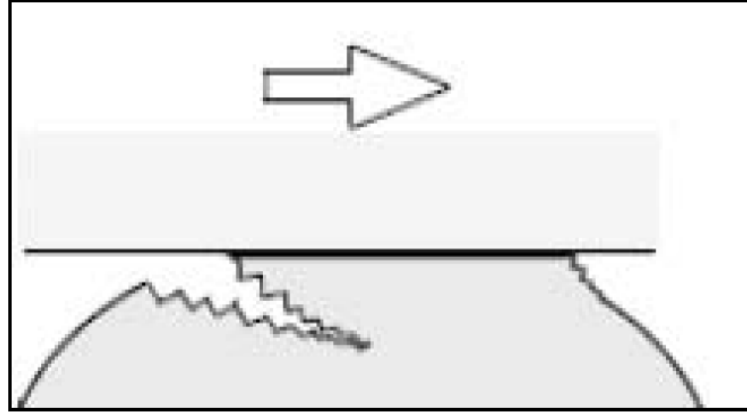


Şekil 3.1. Aşınma zaman ilişkisi [17].

## 3.2. AŞINMA ÇEŞİTLERİ

### 3.2.1. Adhesiv Aşınma

Adhezyon ara yüzeydeki pürüzlerin teması ile meydana gelir ve bu temas noktaları kayma ile kesilir. Bununla birlikte bir yüzeyden kopan parçalar diğer yüzeye yapışabilirler. Kayma devam ettiğinde diğer yüzeye yapışmış olan parçalar tekrar orijinal yüzeye yapışabilir veya her iki yüzeyden bağımsız aşınma partikülü olabilirler [18].



Şekil 3.2. Adhesiv aşınma [15].

Adhesiv aşınma, temas halinde olan birbirine göre bağıl hareket yapan, pratik manada kuru kayma yüzeylerinde, diğer aşınma unsurları önlense dahi daima mevcut olan bir aşınma türüdür.

Yüzey ne kadar hassas işlense de gerçek temas alanı görünür temas alanından daima küçüktür. Birbiri üzerine temas eden malzemelere yük uygulandığında temas noktalarında aşırı gerilmeler meydana gelir. Akma sınırı aşıldığında ise küçük kaynak bağları oluşur.

Yük ve sıcaklık kaynak bağlarının oluşumunu hızlandırır. Temas halindeki malzemeler de kaynak veya yapışma olmuşsa hareket ile bu bağ kopacak ve temas noktalarında kırılmalar meydana gelecektir. Genel olarak kırılma yani kopma zayıf olan metalde oluşmaktadır.

Çizelge 3.1. Malzeme özelliklerinin adhesiv aşınmaya etkisi [19].

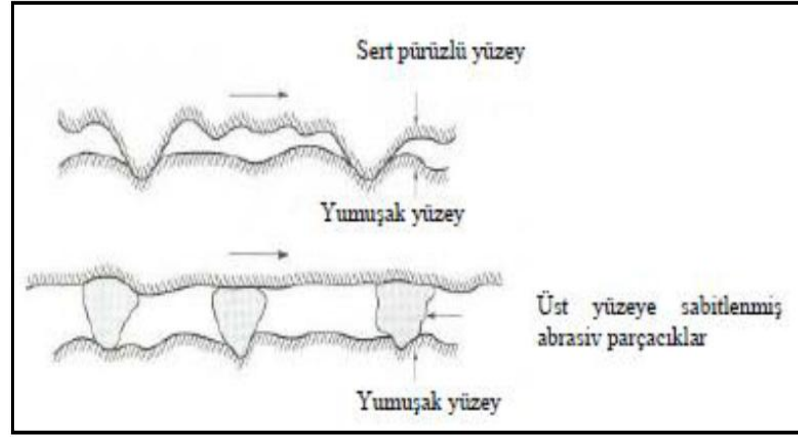
Malzeme Özellikleri	Adhesiv Aşınma
Oksitli yüzey	Az
Kübik kristal yapı	Çok
Hegzogonal kristal yapı	Az
Yüksek deformasyon sertleşmesi	Çok
Yüksek sertlik	Çok
Yüksek elastik modül	Çok
Yüksek ergime noktası	Çok
Yüksek yeniden kristalleşme sıcaklığı	Çok
Küçük atom yarıçapı	Çok

Adhezyon aşınması için aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir.

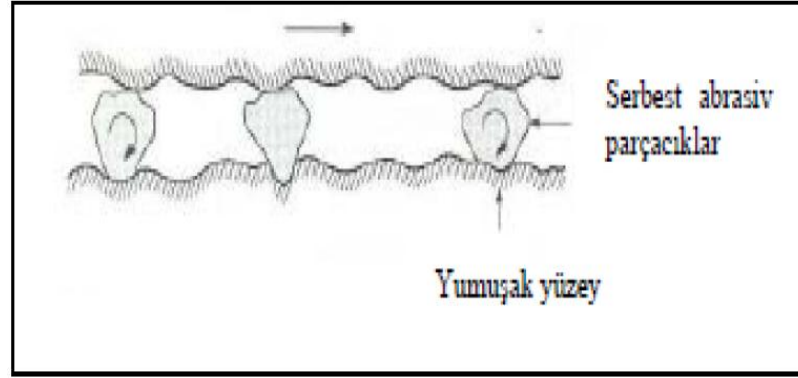
- Adhezyon aşınması uygulanan yük ile
- Kayma mesafesi ile
- Aşınan malzemenin yüzey sertliği ile doğru orantılıdır.

### 3.2.2. Abrasif Aşınma

Birbiri üzerinde kayan yüzeyler arasında sert ve pürüzlü yüzey veya partiküller ile sistemi hasara uğratan bir aşınma türüdür. Abrasif aşınma için iki genel durum vardır. Birinci durumda sert yüzey iki sürtünen yüzeyin daha sert olanıdır (iki cisimli obrasyon). Bu duruma örnekler öğütme kesme ve talaşlı imalat gibi makine çalışmalarıdır. İkinci durumda sert yüzey üçüncü bir cisimdir, genellikle küçük abrasiv partiküllerdir, diğer iki yüzey arasında bulunur ve yüzeylerden birini veya ikisini de aşındırabilir (üç cisimli abrasyon). Buna örnek serbest abrasif alıştırma ve parlatmadır. Birçok durumda başlangıçta aşınma mekanizması adhesivdir. Adhesif aşınmada aşınma partikülleri oluşur, bu partiküller ara yüzeyde sıkışır ve üç cisimli abrasif aşınmaya neden olur [19].



Şekil 3.3. Pürüzlü sert bir yüzey veya abrasif parçacıkların bir yüzeye yapışık olması [19].



Şekil 3.4. Yüzeylerden en az birinden daha sert abrasif parçacıkların iki yüzey arasında sıkışması [19].

Abrasif aşınma direnci;

- Artan sertlik
- Azalan deformasyon sertleşme hızı
- Ana fazdan daha sert, tok, elastik modülü yüksek ve iri boyutlu partiküller aşınma direncini artırır.
- Yabancı partikülleraşınma direncini arttırabilir [19].

### 3.3. AŞINMANIN AZALTILMASI İÇİN GEREKLİ ÖNLEMLER

- a) Aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi; parçanın çalıştığı ortamdaki mevcut aşınma türü ve şiddeti belirtilerek yapılmalıdır [21].
- b) Parçanın geometrik tasarımı, aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır.
- c) Sadece aşındırıcı ortamla temas halindeki yüzeyler veya tüm yüzey alanı, esas malzemenin özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip ve mevcut aşınma türüne daha dayanıklı bir malzeme ile kaplanmalıdır.
- d) Parçanın tamamının aşınmaya dirençli malzemeden üretilmesi yerine, maliyeti azaltmak açısından sadece aşınan yerlerin aşınmaya dirençli malzemelerden üretilmesi daha uygun olacaktır.
- e) Parçanın üretim aşamasında herhangi bir imalat hatasına (gözenek, cüruf, çatlak, kalıcı çekme gerilmeleri, istenmeyen mikro yapı, yüksek yüzey pürüzlülüğü) yer verilmemelidir.
- f) Parça, dayanım limitlerini aşan yükleme şartlarında (yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve yüksek hız vb. gibi) kullanılmamalıdır.
- g) Bir yağın vizkozitesi sıcaklığa göre değişir. Vizkozite indeksi büyük olan yağlar, sıcaklık ile özellikleri daha az değişim gösteren yağlardır. Yağlayıcı ile çalışan ortamlarda yüksek vizkozite değerli ve yüksek basınca dayanıklı yağlar (fosfor ve kükürt katkı) kullanılarak yağ filminin çabuk bozulması önlenebilir. Bununla beraber, katkı yağların oksidasyon aşınmasını artırıcı bir rol oynadığı da düşünüldüğünde malzeme seçiminde daha dikkatli olunmalıdır.
- h) Soğutucu seçimi, parçanın çalışma ortamına uygun biçimde olmalıdır.
- i) Yağlayıcı ve soğutucunun uygun bir filtreleme işleminden geçirilerek içindeki aşındırıcı partiküllerin sisteme tekrar girmesine engel olunmalıdır.
- j) Yağlayıcının kontrolleri düzenli olarak yapılmalı ve en düşük kullanım limiti belirlenerek belli aralıklarla yenilenmelidir.
- k) Sürtünme elemanları malzeme açısından bir birine uygun seçilmelidir.



### **3.4. AŞINMA ÖLÇÜM METODLARI**

#### **3.4.1. Ağırlık Farkı Metodu**

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesinde bulunması sebebi ile en çok kullanılan ölçüm metodudur. Ağırlık kaybının ölçülmesi 10<sup>-4</sup> veya 10<sup>-5</sup> gr hassasiyetinde oldukça duyarlı terazi ile yapılır.

Aşınma miktarı gram ve miligram cinsinden ifade edilmiş ise, alınan yol metre veya kilometre olarak tespit edilmiş bulunan kayma veya sürtünme yoluna göre birim kayma yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade edilir. Ağırlık kaybı birim alanı için hesap edilecekse (gr/cm<sup>2</sup>) gibi bir birim ile ifade olunabilir [22].

#### **3.4.2. Kalınlık Farkı Metodu**

Aşınma esnasında meydana gelecek boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması sureti ile elde edilir. Kalınlık olarak tespit edilen değer, hacimsel olarak tespit edilip birim hacimdeki aşınma miktarı elde edilir. Kalınlık hassas ölçme aletleri ile 1 µm duyarlılıkta ölçülebilir. Boyutsal değişimin ölçülmesinde sistemin durdurulması gerekmez. Bunun için mekanik (mikrometre), optik (mikroskop), elektronik (lineer deplasman ölçer) yöntemlerde kullanılabilir.

#### **3.4.3. İz Değişimi Metodu**

Sürtünme yüzeyi bölgesi geometrisi belirli bir iz, plastik deformasyon ile oluşturulur. Deney boyunca bu izin karakteristik bir boyutunun değişimi ölçülür.

Uygulamalarda en çok kullanılan alet Vickers veya Brinell sertlik ölçme aletidir. Bilya veya elmas pramitin bıraktığı iz çapındaki değişme mikroskop yardımıyla ölçülmesi suretiyle değişim incelenir.

#### **3.4.4. Rasyoizotoplar İle Ölçme**

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü atom parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır.

Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlarıdır. Fakat ekonomik olmaması nedeniyle özel problemlerin çözümü dışında yaygın bir yöntem değildir.

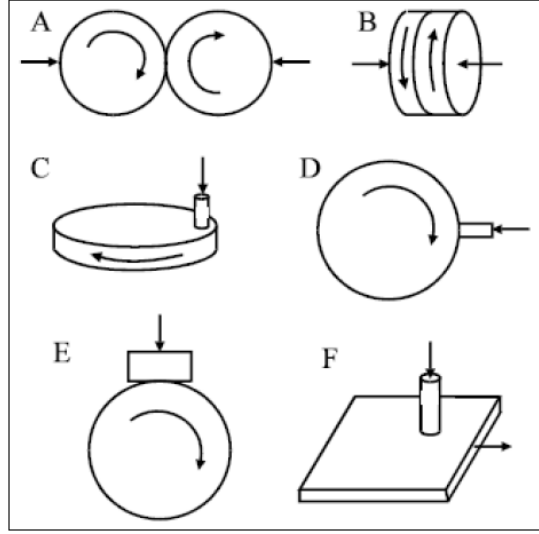
#### **3.4.5. Bilgisayar Destekli Aşınma Ölçüm Metodu**

Bu yöntemlerde aşınma ve aşınma değişkenlerine ait veriler, esas itibarı ile pim disk aşınma test mekanizmasına ilave edilen uygun sensörler vasıtası ile belirlenmektedir. Aşınma kayıpları ve sürtünme katsayısı verileri bilgisayara A/D-D/A kartlar üzerinden aktararak işlenir. Bu veriler, bir paket programla grafik formlara dönüştürülebilir, istatistiksel analizlere tabi tutulabilir ve diğer hesaplamalarda kullanılabilir. Sistemin duyarlılığı, kullanılan sensörlerin ve kontrol kartının voltaj değerindeki lineer sapmaya bağlıdır [22].

### **3.5. AŞINMA DENEY METODU**

Aşınma çalışmalarında birçok değişik deneysel düzenekler kullanılmaktadır. Aşınma için yapılan laboratuvar araştırmaları, genellikle hem oluşan aşınma mekanizmalarının incelenmesini hem de pratik uygulamaların benzeşiminin yapılması ve aşınma oranları ile sürtünme katsayıları için kullanışlı dizayn verilerinin elde edilmesini ortaya çıkarmaktadır. Her iki amaç için de aşınmayı etkileyebilen tüm değişkenlerin kontrol ve ölçümü oldukça önemlidir.

Şekil 3.5' da yaygın olarak kullanılan birkaç tip aşınma ve test aparatlarının geometrik şekilleri görülmektedir. İlk defa 1774 yılında sürtünmeyi ölçmek için kullanılan bir alete isim olarak verilen Tribometre kelimesi bazen birkaç aparat için kullanılmaktadır. Daha fazla son zamanlarda kabaca tibotester ve bunun fiil ile birleşmiş hali oluşan terimler için kullanılmaktadır [23].



Şekil 3.5. Kayma aşınması için kullanılan geometrik düzenekler [24].

Çok yaygın olarak asimetrik cihazlarda bir diske karşı bastırılan pim kullanılır. Bu pim diskin ya düz yüzeyi üzerine (C) ya da kenarına (D) bastırılır. Bu düzen tipi bileziğe karşı bastırılan bir blok (E) veya düz bir yüzey üzerine bastırılan pim (F) şeklinde olabilir.

### 3.6. AŞINMA DENEYLERİNDE KULLANILAN BAZI AŞINMA DENEY CİHAZLARI

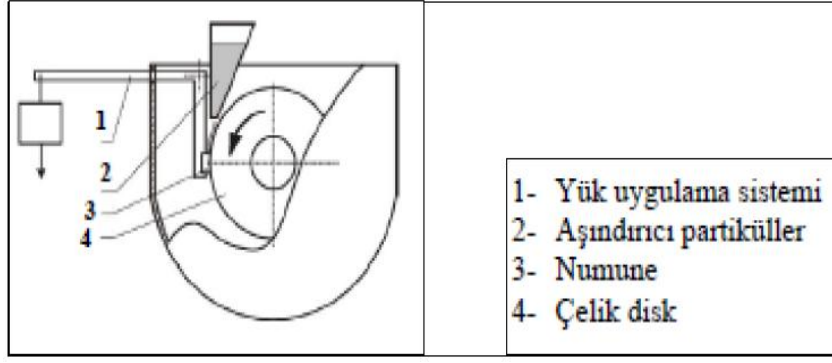
H, Klaasen ve J, Kübarsepp, bazı karpit bileşiklerinin aşınma performansı hakkında deneysel çalışmalar yapmışlardır. Aşınma deneyi için Şekil 3.6’ de şematik olarak gösterilen lastik(kauçuk) tekerli abrasyon (ASTM G65-94) deney cihazını kullanmışlardır. Bu deney cihazı üç partiküllü abrasif aşınma deneyleri için ideal bir tasarım olmakla birlikte disk üstü blok deneyi içinde rahatlıkla kullanılabilir [25].

Ayrıca abrasif aşınma deneyleri ASTM standartlarına göre;

G65 Lastik tekerli abrasyon testi (aşındırıcı kuru kum)

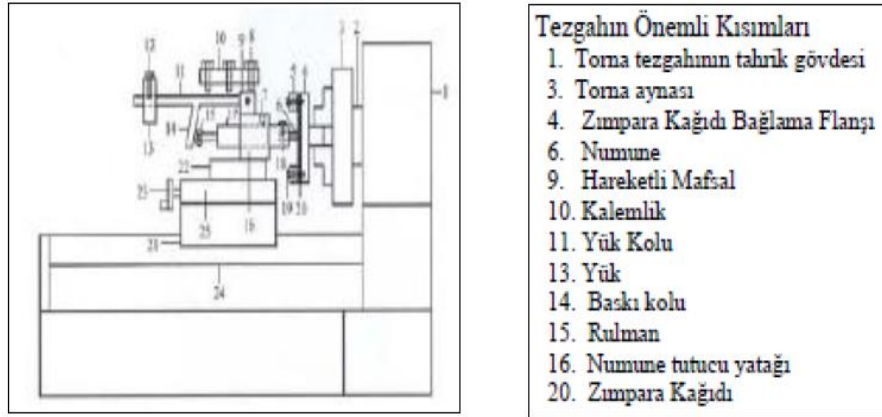
G105 Lastik tekerli abrasyon testi (aşındırıcı ıslak kum)

B611 Yüksek gerilimin olduğu yerlerde çelik teker kullanılı



Şekil 3.6. Lastik tekerli abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü [25].

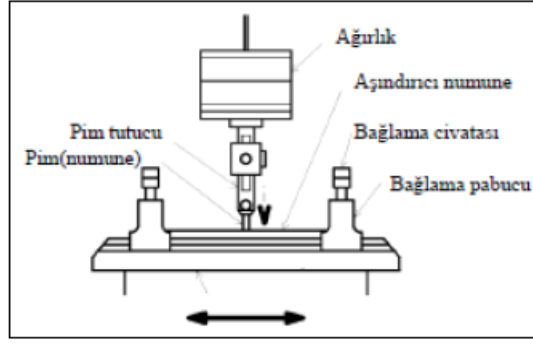
Y, Taşgın ve M, Kaplan, yaptıkları çalışmada dubleks döküm tekniğiyle üretilen FeCrC katkılı malzemenin abrasiv aşınma davranışını incelemişlerdir. Bu deneysel çalışmada Şekil 3.7’de şematik olarak görünen aşınma deney cihazını kullanmışlardır. Deney cihazı esasen bir torna tezgahı üzerine gerekli aparat ve ölçüm sisteminin monte edilmesi ile oluşturulmuştur [26].



Şekil 3.7. Abrasiv aşınma deney cihazı şematik görünümü [26].

### 3.6.1. Düzlem Üzeri Çubuk (Pin On Flat) Deney Cihazı

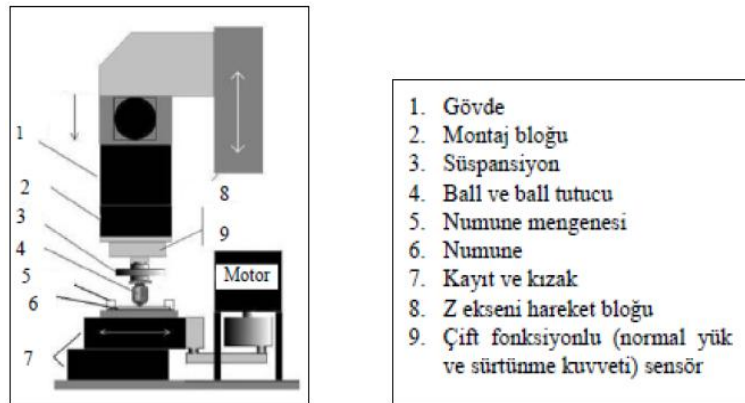
Düzlem üzerinde çubuk aparatında, sabit duran çubuk üzerinde bir düzlem git-gel hareketi yapar. Bazı durumlarda düzlem sabit ve çubuk hareketlidir. Çubuk, bir bilye, yarım küre uçlu bir ilave veya düz uçlu bir silindir olabilir. Yüksek frekansta küçük bir titreşim genliği kullanarak aşınma testleri yapılabilir [17].



Şekil 3.8. Pin on Flat deney cihazı şematik görünümü [27].

### 3.6.2. Ball On Flat Aşınma Deney Cihazı

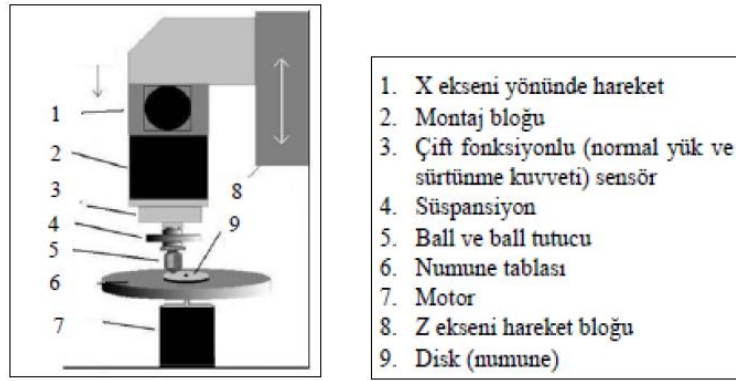
Bu deney liner olarak ileri geri hareket eden düz bir numune yüzeyine belirli bir yük ile temas ettirilen kürenin kayması esasına dayanmaktadır. Şekil 3.9'daki modelde görüldüğü gibi yük küre üzerinden uygulanmaktadır. Ayrıca aşınma deneyi ile birlikte sürtünme kuvveti deneyleri de yapılabilmektedir. Bu deney cihazının çalışma prensibi motordan alınana dairesel hareket ile kızak üzerinde bulunan kayıt lineer olarak ileri geri hareket ettirilmektedir. Kayıt üzerine bağlama aparatları ile bağlanan numune yüzeyine belirli ölçülerdeki bir kürenin belirlenen yük ile temasına dayanmaktadır. Bu deneydeki önemli parametreler uygulan yük, numunenin hareket uzunluğu, hareket sıklığı ve hızı, test sıcaklığı, test süresi [23].



Şekil 3.9. Ball on Flat deney cihazı [23].

### 3.6.3. Ball On Disk Deney Cihazı

Ball on disk deney cihazı ile pin on disk deney cihazının çalışma prensipleri birbirilerine benzerler. Ball on disk deneyinde numune (disk) yüzeyine bir küre belirlenen yük ile temas ettirilmesi ile aşınma gerçekleştirilir. Motordan alınan dairesel hareket ile disk kendi eksenini etrafında dönmesi sağlanır. Küre, bağlama aparatları ile montaj bloğuna bağlanır. Ayrıca kürenin x veya y ekseninde hareket etmesi gereklidir. Şekil 3.10'deki modelde yük düşey olarak küre üzerine uygulanmaktadır.



Şekil 3.10. Ball on Disk deney cihazı [28,54].

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1. AISI 4140 ÇELİĞİ

Bu çalışmada, çeşitli koşullarda borlama işlemine tabi tutulmuş AISI 4140 (42CrMo4) kalite çelik numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

Borlama deneylerinde kullanılan AISI 4140 (42CrMo4) çeliğin bileşimi Çizelge 4.1’ de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 4140 çelik malzemenin kimyasal bileşimi.

Element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Fe
% Ağırlık	0,41	0,20	0,83	0,03	1,04	98,5

Borlama işleminde AISI 304 kalite 3mm kalınlığında paslanmaz çelik saçdan yapılmış; 120 mm çapında, 80 mm yüksekliğinde silindirik ağzı kapaklı kap kullanılmıştır. Borlama tozu ile doldurulmuş olan kap içerisine, yüzeyleri 800 nolu zımparaya kadar parlatılarak hazırlanmış çelik numuneler gömülmüş ve kapak sıkıca kapatılmıştır. Kap içerisinde, numune aralarında ve numune ile kap kenarı arasında en az 12 mm aralıkta borlama tozu olacak şekilde yerleştirme yapılmış ve işlem sıcaklığına çıkarılmış olan Magma Therm marka sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırınına yerleştirilmiştir (Çizelge 4.1). Borlama sonrasında numuneler oda sıcaklığına kadar pota içerisinde havada soğutulmuştur. Numune suda yıkanarak temizlenmiştir.



Şekil 4.1. Sıcaklık kontrollü elektrikli direnç fırını.

Borlama ısıl işleminin öncesi, tüm numuneler iyi bir yüzey eldesi için 600'lük zımpara ile zımparalanmıştır. Borlama işleminin AISI 304 çeliğinden imal edilen potalar içinde 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat süre ile gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sırasında numunelerin oksitlenmesini önleme amacıyla ticari EKabor II tozunun üst kısmına Ekrit tozu eklenmiştir.

Borlanan numunelerin kesit yüzeyleri 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 meshlik zımparalardan uygun kesiti elde edene kadar aşındırdıktan sonra 1µm'lik alümina kullanılarak parlatılmıştır. Numunelere %1,5'lik nital çözeltisi ile dağlama işlemi uygulanmış ve NİKON LV 100 model metal mikroskobu ile içyapı fotoğrafları çekilmiştir.

Borür tabakasının kalınlıkları Nikon optik mikroskop üzerine monte edilmiş olan Clemex vision Professional Edition analiz programı ile belirlenmiştir. Borür tabakası kalınlıkları kaplama tabakası üzerinden alınan 10 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Numunelerin mikrosertlik ölçümleri Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı ile 10 sn süre ve 50 gf yük kullanılarak numunelerin kesit alanları üzerinden yapılmıştır.



#### **4.2. MİKROYAPI İNCELEMELERİ İÇİN NUMUNE HAZIRLANMASI VE MİKROYAPI ÇALIŞMALARI**

Yüzeyi Ekobar II tozu ile alaşımlandırılmış olan  $\phi 30 \times 10$  mm boyutlarındaki numuneler mikroyapı incelemeleri için uygun ölçüde kesilmiştir. Kesme işlemleri Şekil 4.2’de görülen metkon metacut –M250 hassas kesme cihazında yapılmıştır.



Şekil 4.2. Metkon metacut-M250 marka hassas kesme cihazı.

#### **4.3. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) ANALİZLERİ**

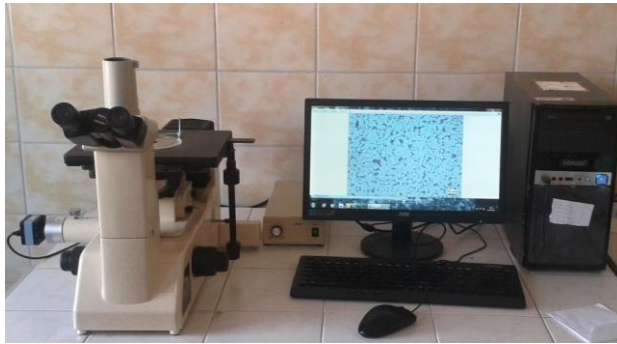
Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numunelerin SEM ve EDX analizleri, Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Laboratuvarında bulunan Şekil 4.3’ te görülen Scanning Elektron Mikroskobu (SEM) cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 4.3. Scanning elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analiz cihazı.

#### **4.4. OPTİK MİKROSKOBİ İNCELEMELERİ VE BORÜR TABAKASI KALINLIK ÖLÇÜMLERİ**

Metalografik olarak hazırlanmış numunelerin kaplama yüzeylerinin karakteristiklerinin mikroskopi incelemeleri ve borür tabakası kalınlıklarının ölçülmesi için Nikon MA-100 mikroskop ve bu mikroskop üzerine monte edilmiş Clemex görüntü analiz sistemi kullanılmıştır. Borür tabaka kalınlığı, borlama için geliştirilmiş tabaka kalınlığı belirleme yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Tabaka kalınlığı olarak en dış yüzeyden uç kısmına kadar olan bölge seçilmiş ve tabaka kalınlıkları 10 ölçüm ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 4.4. Bilgisayar kontrollü optik mikroskop.

#### **4.5. BORÜR TABAKASININ SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN YAPILMASI**

Numunelerin mikrosertlik deneyleri, Şekil 4.5’ te görülen Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı ile 10 sn süre ve 50 gf yük kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4.5. Mikrosertlik ölçüm cihazı.

#### **4.6. EDX ANALİZLERİ**

Yüzeyleri bor tozları ile alaşımlandırılmış numunelerin EDX analizleri, Şekil 4.3’te görülen SEM mikroskop üzerinden veri aktarımı yapılabilen EDX analiz ünitesi ile yapılmıştır. Farklı bölgelerden alınan EDX analizleri ile sıcaklık ve sürenin borür tabakası karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir.

#### **4.7. XRD ANALİZİ**

Borür tabakasında oluşan fazları belirlemek amacıyla Şekil 4.6’da gösterilen XRD cihazı ile numunelerin analizleri yapılmıştır. Borlama sıcaklığının etkilerini görebilmek amacıyla 850 °C, 900 °C, 950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat süre ile EKabor 2 tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numuneler incelenmiştir.



Şekil 4.6. Bilgisayar kontrollü XRD analiz ünitesinin görünümü.

#### 4.8. AŞINMA DENEYİ

Aşınma deneyleri, Şekil 4.7' de görülen TURKYUS marka karşıt hareketli aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir.

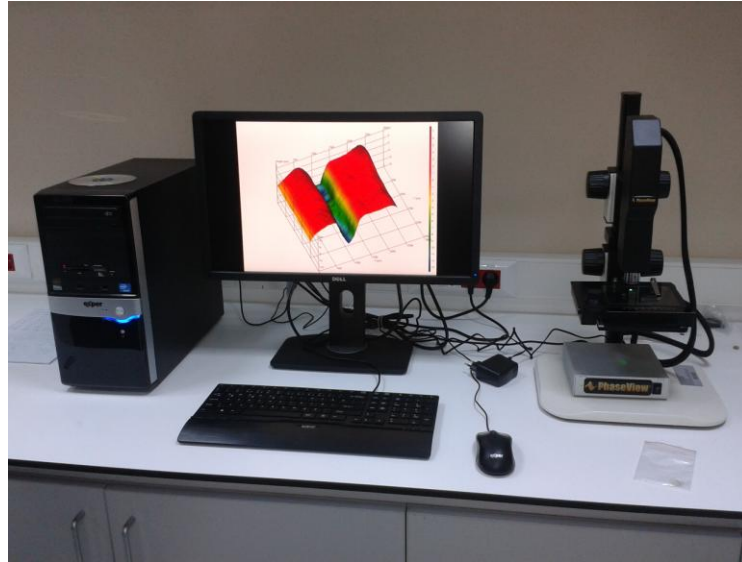


Şekil 4.7. TURKYUS marka karşıt hareketli aşınma cihazı.

1 adet herhangi bir işleme tabi tutulmamış AISI 4140 paslanmaz çelik, 9 adet farklı EKabor 2 tozu ile farklı sıcaklık ve sürelerde yüzey alaşımlandırma işlemine tabi

tutulan numunelerin tribolojik özelliklerini incelemek için yapılan aşınma deneyleri kuru ortamda yapılmıştır. Aşınma deneylerinde EKabor 2 ile yüzeyleri alaşımlandırılan numuneler için ( $Al_2O_3$ ) alüminyum oksit bilya kullanılmıştır. Deneyler 5 N, 10 N ve 15 N yük altında ve 15 mm/s kayma hızında yapılmış, karşıt hareket genişliği 4 mm, toplam kayma mesafesi 9000 mm olarak uygulanmıştır.

Aşınma izleri genişlik ve derinlikleri 3'er adet oluşturulup ortalamaları alınarak, Veeco Dektak 6M marka bir yüzey profilometresi ile ölçüldü. Aşınma izinin kesiti bir elipsin yarısı olarak kabul edildi ve aşınma izinin alanı hesaplandı. Daha sonra bu alan, kayma genişliği olan 5 mm ile çarpıldı ve aşınma iz hacmi ( $mm^3$ ) hesaplandı.



Şekil 4.8. Yüzey profilometre cihazı.

Numunelerin 9000 mm aşındırılmaları sonucu oluşan değerler alınarak aşınma hızı hesaplandı. Sürtünme katsayılarının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi bilgisayar programı vasıtasıyla çizildi. Ayrıca aşındırılan numunelerin yüzeyleri SEM ile incelenerek EDX analizleri yapılmıştır.

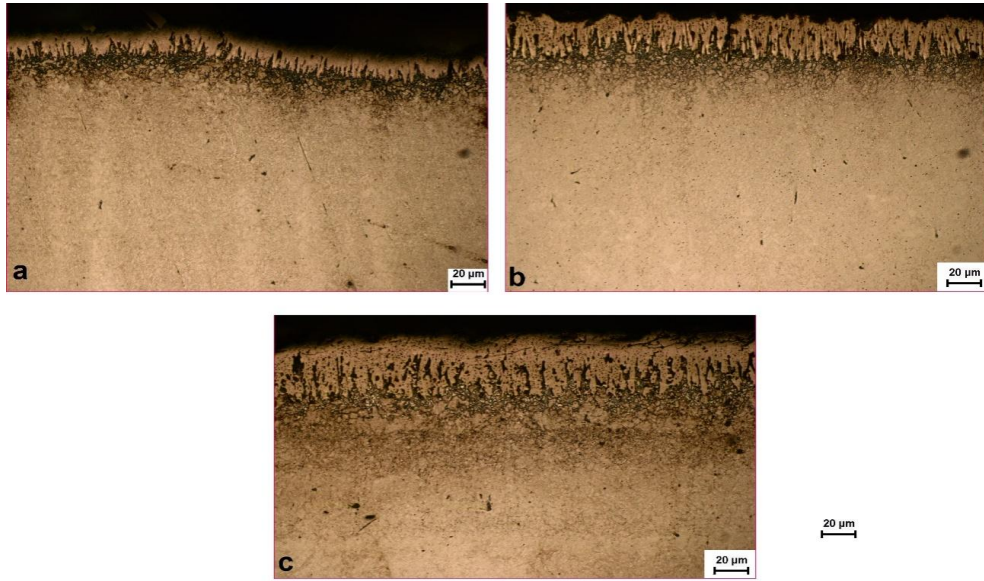
## BÖLÜM 5

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, AISI 4140 paslanmaz çeliğin yüzeyi kutu borlama tekniği ile katı ortamda EKabor 2 tozu kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlanmış numuneler, optik mikroskop, SEM, X-ışını, mikrosertlik ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Böylece borlama ısıl işlemine tabi tutulmuş numuneler ile herhangi bir işleme tabi tutulmayan ticari AISI 4140 paslanmaz çelik ile kıyaslanmıştır.

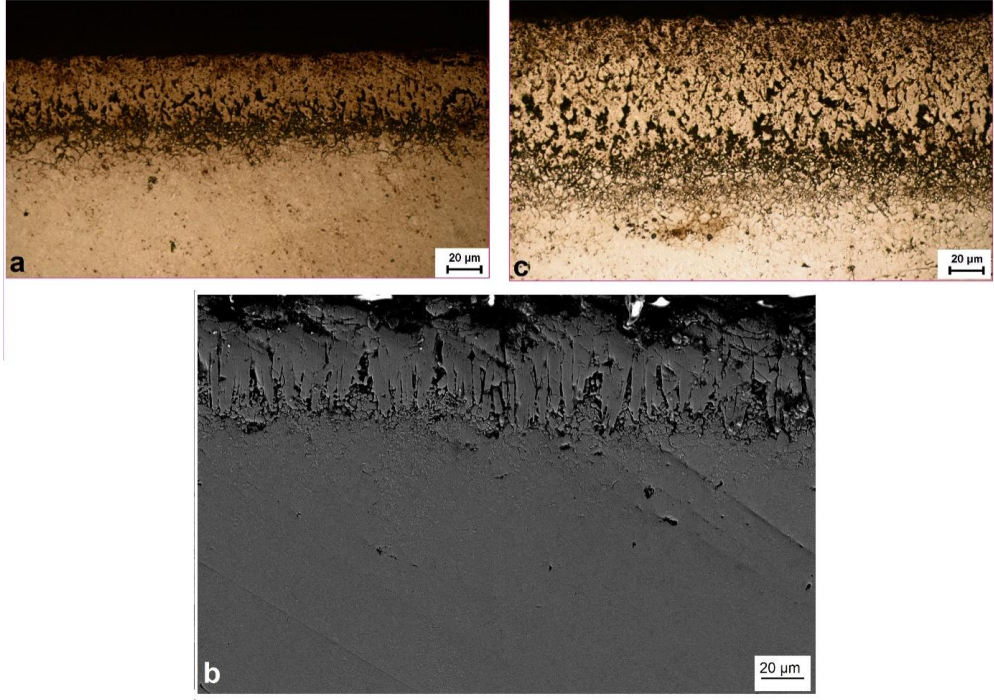
#### 5.1. METALOGRAFİK İNCELEMELER

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2' de Ekabor 2 tozu 850 °C, 900 °C, 950 °C' de 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlanan AISI 4140 paslanmaz çeliğin mikroyapı görüntüleri görülmektedir.

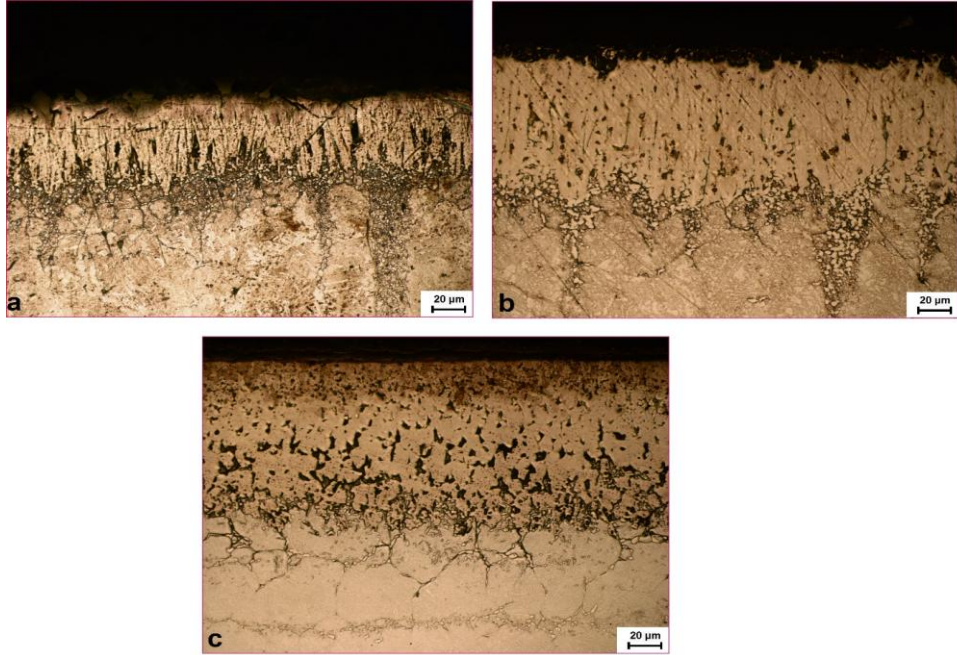


Şekil 5.1. 850 °C de Ekabor 2 tozu ile borlanmış AISI 4140 çeliğinin optik görüntüsü  
a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat.





Şekil 5.2. 900 °C’de Ekabor 2 tozu ile borlanmış AISI 4140 çeliğinin a) 2 saat optik, b) 4 saat, SEM c) 6 saat optik görüntüsü.



Şekil 5.3. 950 °C de Ekabor 2 tozu ile borlanmış AISI 4140 çeliğinin optik görüntüsü a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat.

Numunelere ait görüntü resimleri incelendiğinde tüm numunelerde dişli bir morfolojiye sahip borür tabakası elde edildiği görülmektedir. Artan borlama sıcaklığı

hem kaplama kalınlığı hem de dişli yapıdaki taraklanma oluşumunu arttırmıştır. Borür tabakasında (özellikle yüzeyden 0-25 µm) bir miktar gözeneklilik görülmektedir. Bu durum FeB fazının yüzeyde oluşumundan kaynaklanmaktadır. Çünkü işlem difüzyon kontrollü olduğundan yüzeyden malzemenin iç kısma doğru difüzyon olan bor oranı azalır. FeB fazı borca daha zengin (%16.23) olduğundan Fe<sub>2</sub>B'ye (%8.93) göre daha sert ve gevreklerdir. Dolayısıyla borür tabakasında çatlak oluşumu, kalkma ve tabakada dökülmeler daha fazla olmaktadır [29]. Artan sıcaklık değerlerine bağlı olarak bu gözeneklilik artmasının yanında tane büyümesi olduğu görülmektedir (Şekil 5.3c). Mikro yapı resimleri incelendiğinde kaplama tabakasının üç ana bölge; (I) kaplama (II) çökeltilerin var olduğu geçiş bölgesi (III) matris bölgelerinden oluştuğu görülmektedir. 850 °C'de borlanan numunelerde net bir görüntüsü olamasa da geçiş bölgesinin oluştuğu sertlik ölçümleri sonucu kaplama tabakasının altında elde edilen sertlik değerleri ile belirlenmiştir. Geçiş bölgesinin yüksek sıcaklık ve sürelerde daha net bir şekilde görünmesi difüzyon işlemi için gerekli olan sıcaklık ve zaman parametrelerinin önemini göstermektedir. Çünkü düşük sıcaklık ve düşük süre ile bor atomları tane içine difüzyon olabilmeleri için gerekli aktivasyon enerjisi eşiğine ulaşamazlar. Geçiş bölgesi artan süre ve sıcaklık ile daha geniş olmuş ve bu bölgedeki çökeltiler kaplama tabakasından matrise doğru azalmıştır.

## **5.2. TABAKA KALINLIKLARI VE MİKROSERTLİK SONUÇLARI**

Çizelge 5.1'de borlama işlemi sonrası işleme parametrelerine bağlı olarak yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlıkları ve mikro sertlik değerleri verilmiştir. Tabaka kalınlıkları değeri ve mikro sertlik değerleri her bir numune üzerinden alınan 10 ölçümün ortalama sonuçları olarak verilmiştir.



Çizelge 5.1. Borlama işlemi sonrası işleme parametrelerine bağlı olarak yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlıkları ve mikro sertlik değerleri.

Sıcaklık (°C)	Borlama Malzemesi	Süre (saat)	Kalınlık (µm)	Mikrosertlik (HV)
850	Ekabor II	2	15,73	1188,8
		4	22,71	1283,5
		6	34,47	1319,3
900	Ekabor II	2	20,7	1220,9
		4	24,85	1306,3
		6	38,37	1351,4
950	Ekabor II	2	25,6	1267,5
		4	39,31	1333,4
		6	82,32	1385,2
İşlemsiz				507

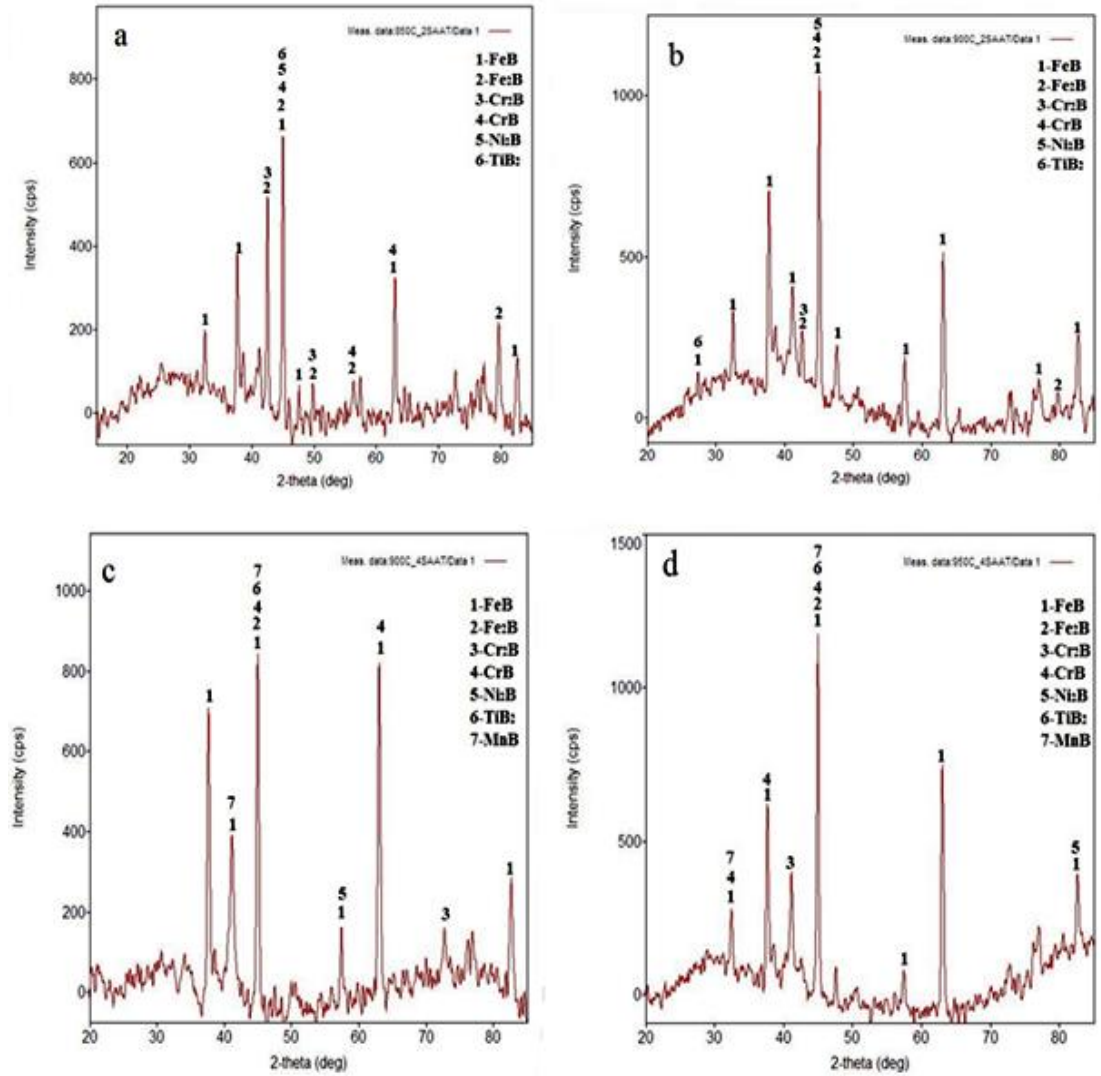
Çizelge 5.1 incelendiğinde artan sıcaklık ve borlama süresi sonucunda hem tabaka kalınlıkları hemde mikro sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Tabaka kalınlıklarının artışında borlama sıcaklığından ziyade borlama süresinin daha fazla etken olduğu görülmektedir. Borlama ısıl işlemi sementasyon, karbürizasyon gibi difüzyon kontrollü işlemlerden olduğu için I. ve II. Fick kanunlarına göre işlem sıcaklığı ve sürenin artmasıyla tabaka kalınlıklarının artışı beklenen bir sonuçtur (Şen 1998). Elde edilen tabaka kalınlığı sonuçları borlama sıcaklık ve sürenin artmasıyla borür kaplama tabakalarının arttığı sonucunu göstermiştir [30].

Borlama öncesi AISI 4140 çeliği 507 (HV) sertliğinde iken borlama işlemi sonucunda 1188,8 ile 1386 arasında bir sertlik değerine sahip olmuştur. Düşük sıcaklık ve kısa sürelerde elde edilen sertlik değerleri daha az iken sıcaklık ve süre arttıkça sertlik artmıştır. Bu durum sıcaklık ve sürenin artışı ile daha çok oluşan FeB fazının yapıda çoğaldığını gösterir. Borlama şartlarına bağlı olarak yapıda oluşan CrB, TiB ve NiB gibi fazların tabakanın sertliğine katkıda bulunduğu belirtilmiştir (Sinha 1991, Garcia-Bustos vd. 2013, Motallebzadeh vd. 2015) [4]. Tüm numunelerde en yüksek sertlik değeri borür tabakasında elde edilmiş ve sertlik

değerleri yüzeydeki borür tabakasından matrise doğru kademeli bir şekilde azalmıştır.

### 5.3. XRD SONUÇLARI

Borür tabakasındaki oluşan fazları belirlemek için Şekil 5.4’de verilen XRD analizleri yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalarla kıyaslanması açısından ve sıcaklık aralıkları birbirine yakın olduğundan borlama süresinin etkilerini görebilmek amacıyla Ekabor tozu ile 850 °C’de 2 saat, 900 °C’de 2 saat, 900 °C’de 4 saat, 950 °C’de 4 saat borlanan numuneler seçilmiştir.

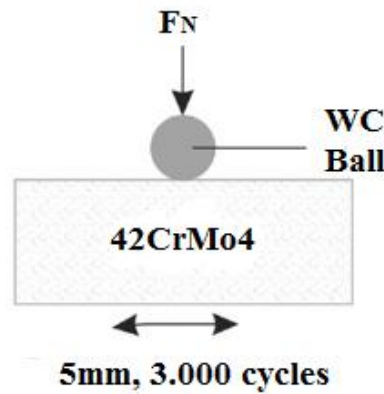


Şekil 5.4. Borlanmış numunelerin XRD grafikleri a) 850 °C de 2 saat b) 900 °C de 2 saat c) 900 °C de 4 saat d) 950 °C de 4 saat.

XRD analiz sonuçlarına göre; Ekabor II tozu ile borlanan tüm numunelerde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının baskın faz olduğu CrB, Cr<sub>2</sub>B, TiB<sub>2</sub>, MnB, Ni<sub>2</sub>B, Mn<sub>2</sub>B fazlarının ise düşük oranda meydana geldikleri belirlenmiştir. Kutu borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte FeB faz şiddetlerinde artışlar görülürken, Fe<sub>2</sub>B faz şiddetinde ise azalma meydana gelmiştir. Çimenoğlu vd. AISI 4140 çeliğini 12 saat süre ile borlama işlemine tabi tuttukları çalışmalarında 750 ve 800 °C’de sadece Fe<sub>2</sub>B fazı, 850 ve 950 °C’de ise FeB+Fe<sub>2</sub>B fazları elde ettiklerini belirtmişlerdir. Dilektaş (2014) aynı çelik üzerinde FeB, Fe<sub>2</sub>B ve CrB fazlarını elde ettiğini belirtmiştir. Başlangıçta literatürde CrB fazının oluşu ile ilgili farklı görüşler ileri sürülmüştür. Carbucicchio ve Palombarini (1987) CrB fazının ancak %26 üzeri Cr içeren çeliklerde oluştuğunu söylemiştir. Ancak Bindal (1991) ise düşük krom yüzdelerinde dahi krom borürler tespit ettiğini açıklamıştır. Fakat daha sonraki çalışmalar alaşım elementlerine bağlı olarak bu çalışmada elde edilen fazların elde edildiği çalışmalar mevcuttur (Özbek vd.2002, Uslu vd. 2007, Taktak 2007, Günen vd. 2014) [44].

#### 5.4. AŞINMA DENEY SONUÇLARI

Borür tabakaları yüksek sertliklerinin yanı sıra yüksek aşınma dirençleri ile karakterize edilirler. Deneysel olarak kullanılan AISI 4140 çeliği silah endüstrisinde kullanılan ZİGANA F tipi marka tabanca namlusu’nun imal edildiği çeliktir. Atış işlemi esnasındaki kullanım şartlarını düşünecek olursak bu çeliğin aşınma direncinin artırılmasının ne kadar önemli olduğu unutulmamalıdır. Bu sebepten ötürü bu çalışmada karşıt hareketli aşındırıcıda 5, 10 ve 15 N yüklerde aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyi kuru ortamda aşağıda verilen koşullar altında yapılmıştır.



Şekil 5.5. Aşınma mekanizması şematik resmi [47].

Deney yükü:5N-10N-15N

Kayma Hızı:15 mm/s

Bilya:5 mm

Frekans:50 Hz

Dönme hızı:200 dev/dak

Test cycles:3000

Kayma mesafesi:9 m

Aşındırıcı: Sertlik değeri 1500 HV altındaki EKabor II tozu ile alaşımlandırılanlar numuneler için 5 mm çapında WC bilya kullanılmıştır.

#### **5.4.1. Borür Tabakalarının Sürtünme Katsayısı**

Çizelge 5.2’ de farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış AISI 4140 çeliğinin farklı yüklerdeki sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Borlanmış numunelerin sürtünme katsayısı değerleri 0,218 ile 0,542 aralığında değişmiştir. Ticari AISI 4140 çeliğinin sürtünme katsayısı değerleri ise 0,441- 0,682 aralığında değişmiştir. Genel olarak sürtünme katsayısı değerleri artan borlama süresi ile artmıştır.

Bu durum borlama süresinin artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün artışına atfedilebilir. Artan kuvvet ile AISI 4140 çeliğinin tüm numuneleri ve borlanmış numunelerin çoğunda sürtünme katsayısında bir azalma tespit edilmiştir. Bu durum kuvvet artışına paralel olarak numune yüzeylerinin daha fazla ısınması sonucunda numune yüzeylerinde oksitlerin oluşması ileri sürülebilir. Literatürde benzer bulguların olduğu birçok çalışma bulunmaktadır [44]. Ancak sürtünme katsayısı değerlerinde düşüş olsa da aşınan hacim miktarında artış rapor edilmiştir (Çizelge 5.2).

Çizelge 5.2. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri.

850 °C			900 °C			950 °C			AISI 4140	
Kuvvet(N)	Süre(saat)			Süre(saat)			Süre(saat)			İşlemsiz
	2	4	6	2	4	6	2	4	6	-----
5	0,301	0,364	0,411	0,239	0,510	0,294	0,281	0,298	0,254	0,682
10	0,296	0,478	0,423	0,218	0,542	0,504	0,237	0,322	0,496	0,451
15	0,253	0,327	0,483	0,218	0,496	0,506	0,250	0,344	0,572	0,441

#### 5.4.2. Borür Tabakalarının Aşınma Oranı

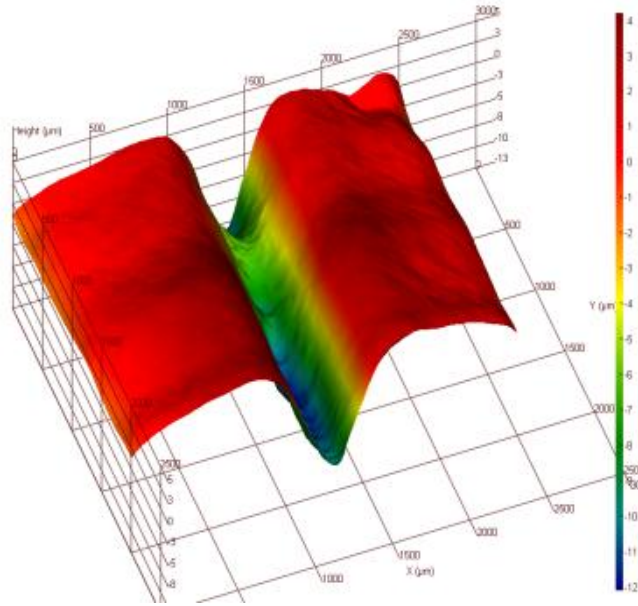
Aşınma testleri sonucunda Çizelge 5.3' te verilen değerler elde edilmiştir. Çizelge 5.3 incelendiğinde uygulanan kuvvetin artışı ile tüm numunelerin aşınma dirençlerinde bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Borlanan numunelerin aşınma dayanımları farklılıklar gösterse de işlemsiz numuneye göre tüm numuneler daha iyi bir aşınma direnci göstermişlerdir. En iyi aşınma direnci 900 °C'de 6 saat süre ile borlanan numunenin 5 N yüke karşı göstermiş olduğu numunede tespit edilmiştir. Aşınma deneyleri sonunda en yüksek aşınma oranı ise en düşük aşınmanın meydana geldiği numuneye göre 27,3 kat daha fazla aşınan herhangi bir işlem görmeyen AISI 4140 çeliğinde meydana gelmiştir. Bu durum borlama işleminin aşınma dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.3. Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma hacim kaybı değerleri ( $\times 10^{-5} \text{mm}^3$ ).

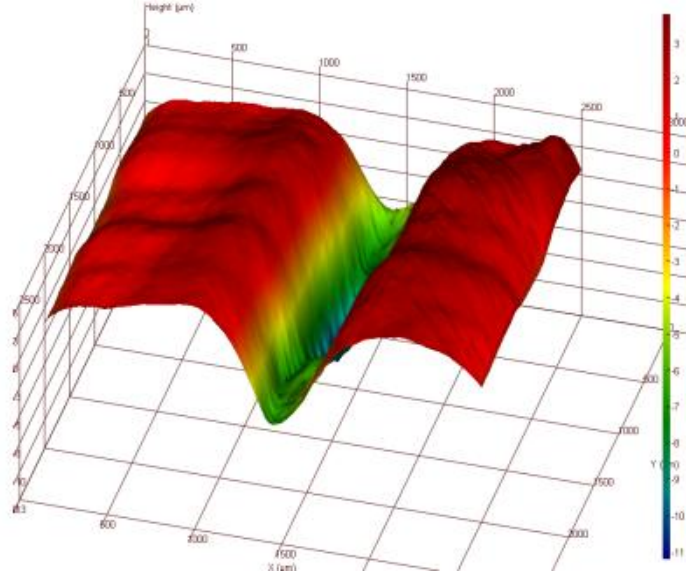
850 °C			900 °C			950 °C			AISI 4140	
Yük (N)	Süre (saat)			Süre (saat)			Süre (saat)			----
	2	4	6	2	4	6	2	4	6	.....
5	35	47	44	9	8	3	6	11	14	82
10	138	190	212	10	48	34	8	15	30	237
15	187	238	241	42	86	177	29	46	52	259

#### 5.4.3. Borlanmış AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Bölgelerindeki Sem Mikroyapı ve Profilometre Görüntüleri

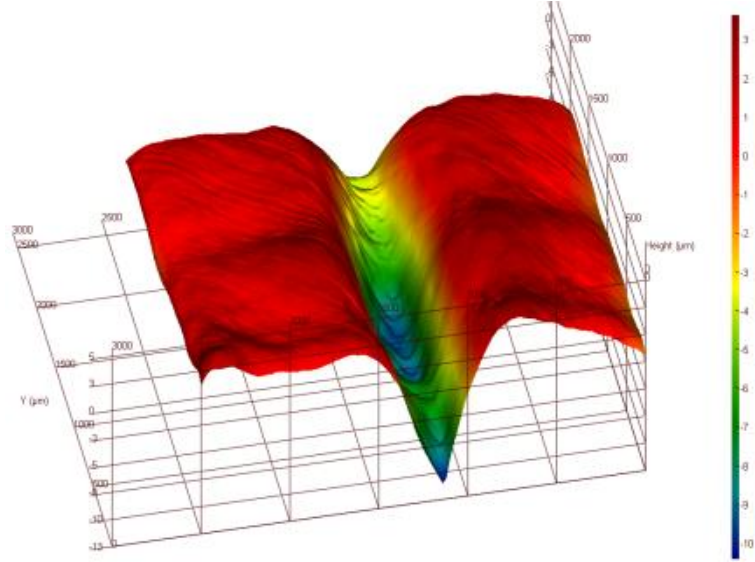
Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma bölgeleri SEM incelenmiş ayrıca Aşınma yüzey profilometresi ile de aşınma tipi ve hacim kayıpları ölçülmüştür.



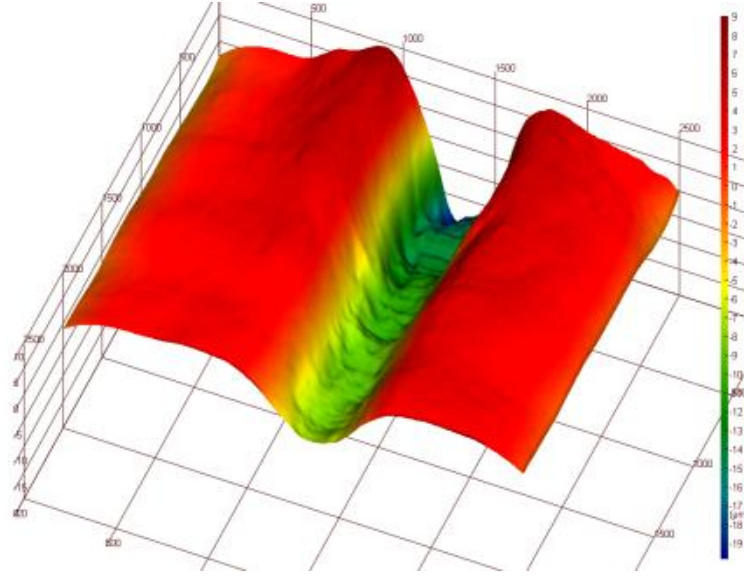
Şekil 5.6. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 850 °C de 4 saatte 5 N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri.



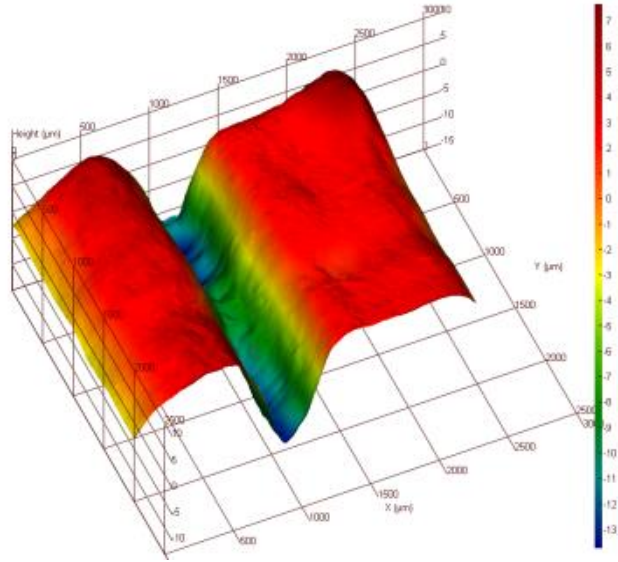
Şekil 5.7. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 850 °C de 4 saatte 10 N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri.



Şekil 5.8. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 850 °C de 4 saatte 15 N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri.

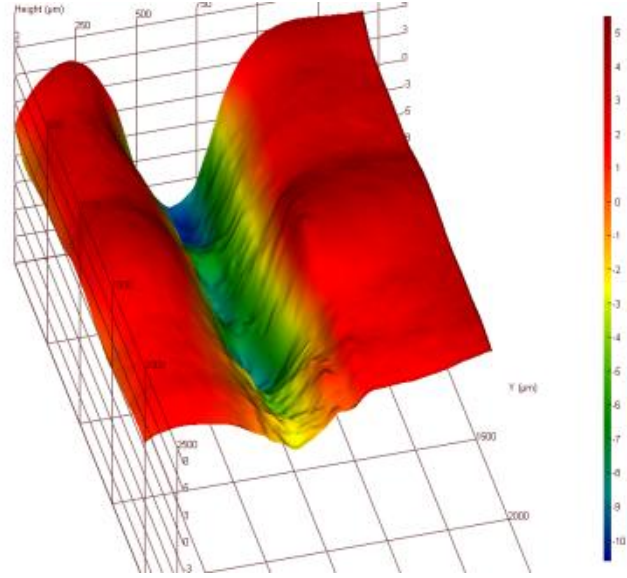


Şekil 5.9. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 900 °C de 6 saatte 5 N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri.



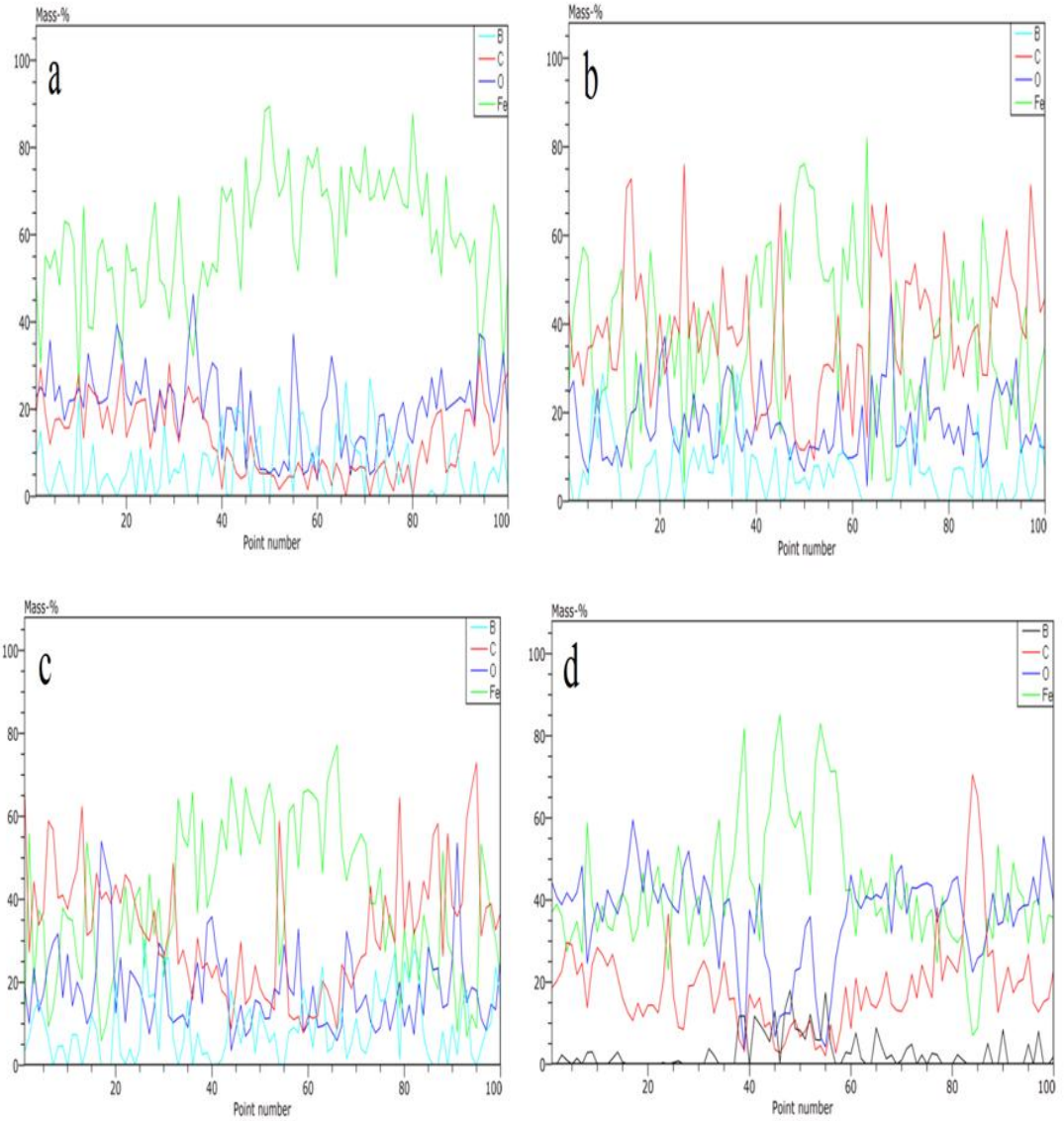
Şekil 5.10. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 900 °C de 6 saatte 15 N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri.





Şekil 5.11. Borlanmış AISI 4140 çeliğine ait 950 °C de 4 saatte 10 N yük altında aşınan numunelerin aşınma iz görüntüleri.

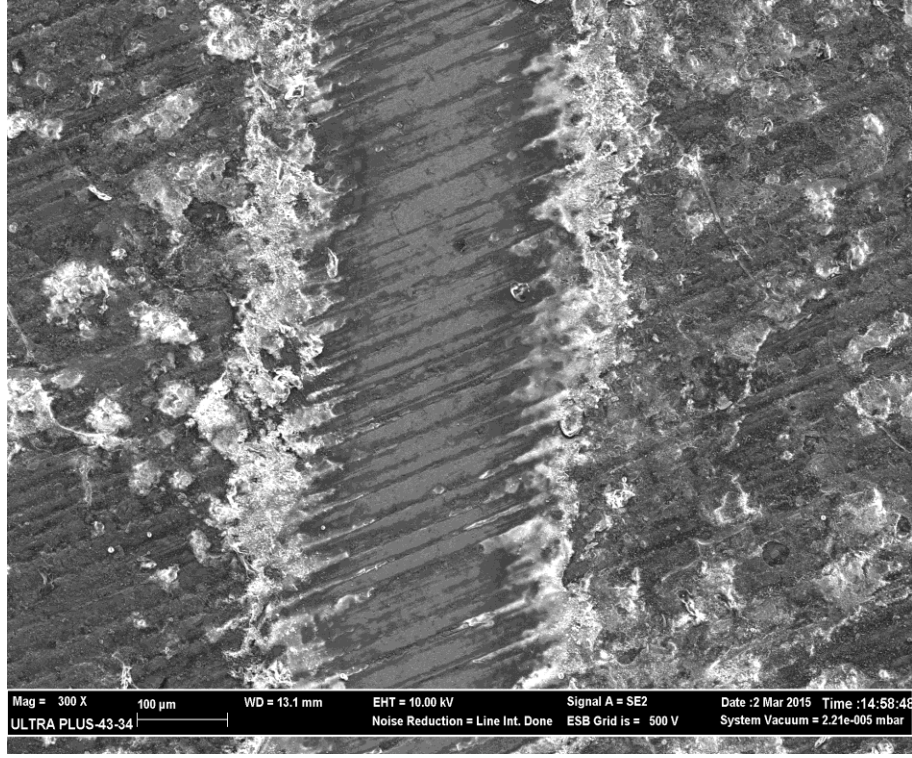
Numunelerin profilometre görüntüleri incelendiğinde metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinin dayandığı abrazif aşınmanın (çizilme aşınması) bir türü olan sürülme aşınmasının meydana geldiği görülmektedir. Sürülme aşınması mekanizmasında malzeme yüzeyinden direkt olarak malzeme koparılmaz, önce bitişik sırtlar şeklinde oluklar meydana gelir, sonra bu sırtlar ikinci bir abraziv partikül tarafından malzeme yüzeyinden koparılmasıyla oluşur. Bu şekilde aşınan yüzeyde çizikler ve kesikler oluşur. Sem görüntüleri bu oluşumu destekler niteliktedir. Pulluk gibi aletlerde, kırıcılar ve iş makinelerinin kazıma bıçakları ve çalışma ağızları gibi parçalarda bu tür aşınma oldukça yaygındır [51].



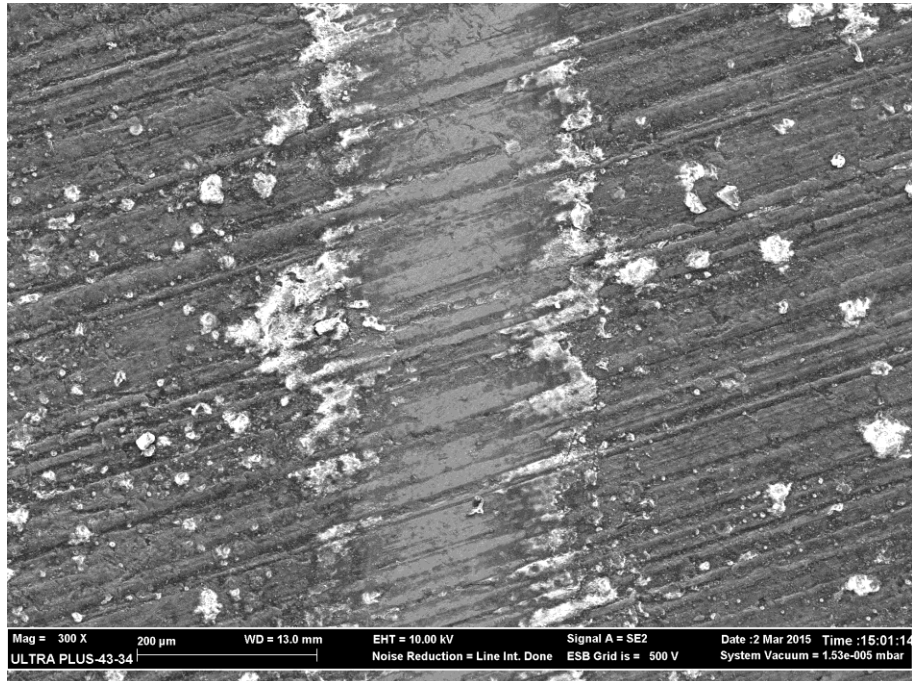
Şekil 5.12. Numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan EDX analizleri a)850°C-15N b)900 °C-5 N c)900 °C-15 N d)950 °C-5 N.

Şekil 5.12’de numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan EDX analizleri yüzeyde oksit kalıntılarının ve abrasif çiziklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Şekil 5.12 c ve Şekil 5.12 d’de aşınma iz boyunca numunede mikro çatlakların oluştuğu görülmüştür. EDX analizlerinden aşınmış numune yüzeylerinde sürtünme ısısından dolayı Fe bazlı oksit katmanlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca aşınma izi boyunca kayma yönünde oksit tabakalarının uzanarak yöneldikleri gözlenmiştir [49]. Plazma pasta borlanmış AISI52100, 440C ve 8620 çeliklerini aşındırmışlar ve aşınma sonucunda borlanmış çeliklerin aşınma yüzeylerinde sürtünme ısısından dolayı oluşan demir oksit tabakalarının varlığından bahsetmişlerdir. Oksit

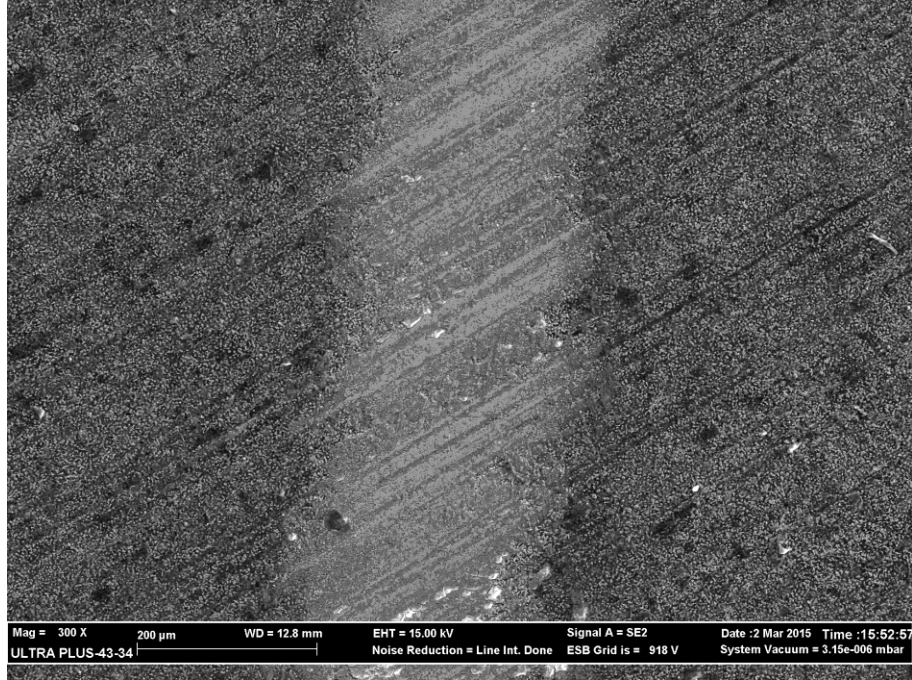
tabakalarının aşınma iz boyunca uzandıklarını ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkilediklerini tespit etmişlerdir [45].



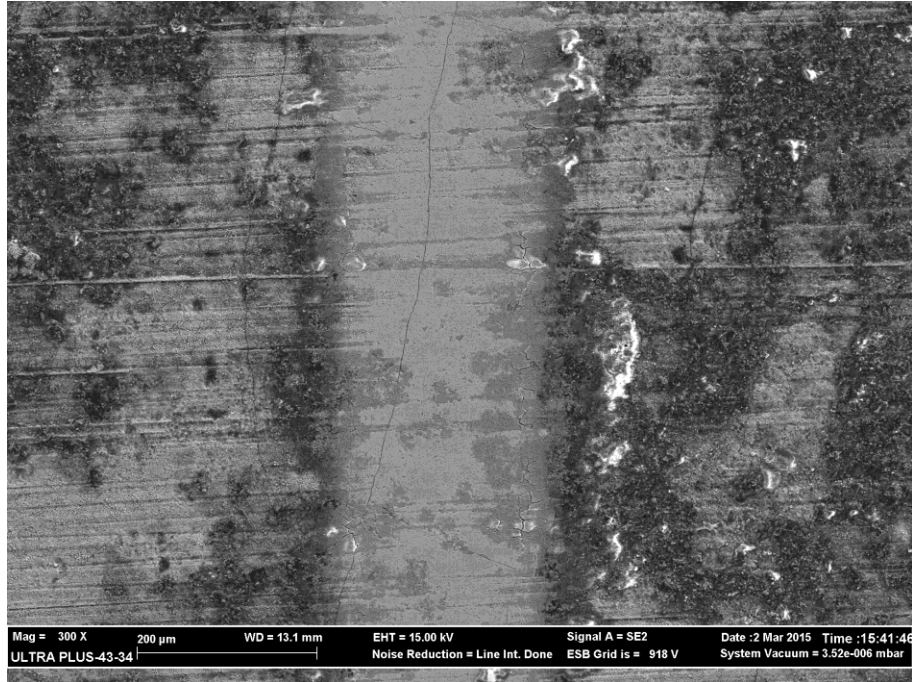
Şekil 5.13. Ekobar 2 tozu ile 850 °C’de 10 N’luk yük altında 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.



Şekil 5.14. Ekobar 2 tozu ile 900 °C'de 10 N'luk yük altında 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.

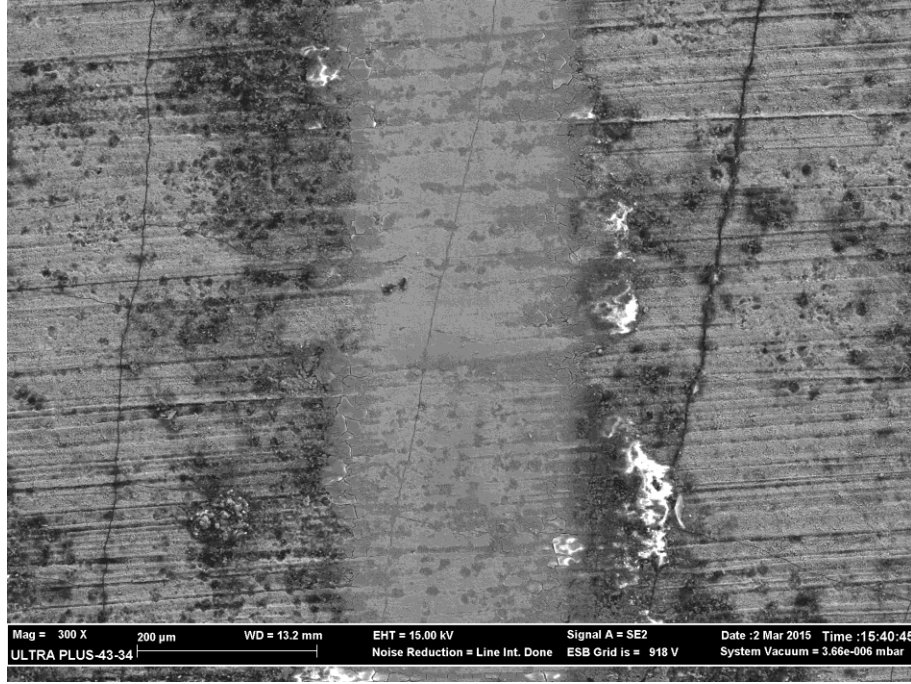


Şekil 5.15. Ekobar 2 tozu ile 950 °C'de 15 N'luk yük altında 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.

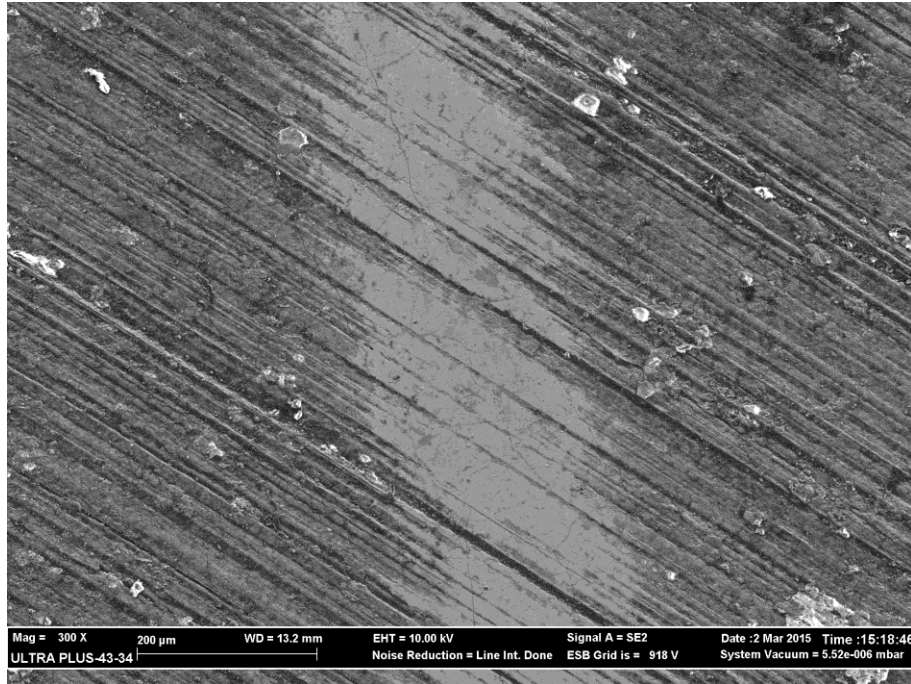




Şekil 5.16. Ekobar 2 tozu ile 850 °C’de 10 N’luk yük altında 6 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.



Şekil 5.17. Ekobar 2 tozu ile 850 °C’de 15 N’luk yük altında 6 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.



Şekil 5.18. Ekobar 2 tozu ile 900 °C’de 15 N’luk yük altında 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 300X sem yüzey morfolojisi.

Yüzey görüntüleri incelendiğinde borür tabaka kalınlığının az olduğu numunelerde (850 °C’de yapılan borlamalar) yüzeyden tamamen kalktığı ve matrisin aşınması sonucunda bu numunelerde en fazla aşınmanın meydana geldiği belirlenmiştir. Fakat en yüksek kaplama tabakasının elde edildiği numunelerde en yüksek aşınma direnci elde edilememiştir. Bu durum 900 °C’deki deneyler incelenerek açıklanabilir. Borlama tabakası daha ince olmasına rağmen 900 °C’de 2 saat yapılan borlama işleminde, 4 ve 6 saat sürelerde elde edilen yüzeylere göre aşınma daha az olmuştur. Bunun nedeni artan süre ile yüzeyden sinterlemeye bağlı gözenekliliğin artması ve oluşan gevrek FeB tabakasının daha kolay yüzeyden kopup, kırılıp ayrılmasıdır (Ulutan, 2007) [34,36]. SEM görüntüleri incelendiğinde aşınmanın yüksek oranda gerçekleştiği numunelerde aşınma izleri daha derin, kopan tanelerin bıraktığı boşluklar daha büyük olarak gözlemlenmiştir. AISI 4140 çeliği endüstride yaygın bir şekilde kullanıldığından üzerinde borlama ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Çimenoglu vd. (2014) AISI 4140 çeliğini katı ortamda 750, 800, 850 ve 900 °C sıcaklıklarda 12 saat süre ile borlama işlemine tabi tutmuşlardır. 750 ve 800 °C sıcaklıkta Fe<sub>2</sub>B fazı 850 ve 900 °C sıcaklıklarda ise Fe<sub>2</sub>B fazının yanında FeB fazı elde ettiklerini belirtmişlerdir. Her iki fazında oda sıcaklığında iyi bir aşınma direnci sergilediğini, yüksek sıcaklıklarda ise (özellikle 300 °C) FeB ve Fe<sub>2</sub>B çift yapılı tabakaların daha iyi aşınma direnci sergilediklerini belirtmişlerdir [34,36].

Dilektaş (2014) AISI 4140 çeliğini 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda 4, 6, ve 8 saat sürelerle Ekabor Paste kullanılarak borlamıştır. Yapılan yüksek sıcaklık aşınma deneyleri sonucunda AISI 4140 çeliğinin 250, 300 ve 500 °C’de aşınma deneyi yapılarak sürtünme katsayısı değerleri bulunmuştur. Elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri ile aşınma oranları arasında paralellik görülmediği belirtilmiştir. 300°C’deye kadarki aşınma uygulamalarında AISI 4140 çeliğin kullanılabilceğini belirtmiştir [37].

Ulutan vd. (2010) AISI 4140 çelik numunelere 900 °C, 950 °C, 1000 °C ve 1050 °C’de; 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işlemi uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, işlem sıcaklığı ve süresinin artışıyla, beklenildiği gibi, bor tabaka kalınlıklarının

arttığı tespit etmişlerdir. En kalın bortabakası, en yüksek sıcaklık ve surenin uygulandığı 1050 °C'de 6 saat süre ile borlanmış numunede 290,4 µm olarak ölçüldüğü, en yüksek sertlik değeri 1000 °C'de 4 saat süreyle borlanan numunede, 1757 HV olarak tespit etmişlerdir. Oluşan sert borür tabakaların etkisiyle tüm numunelerde abrasiv aşınma direncinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. Abrasiv aşınma deneylerinde, yük artısına bağlı olarak ağırlık kayıplarında artışlar olduğu belirlenmiştir [44,45].

Yapılan çalışmanın literatur ile uyumlu olduğu ve işlemsiz numuneye göre 27,3 kat'a kadar daha fazla aşınma direnci elde edilmiştir. Bu durum borlanmış tabakaların tüm aşınma deneyleri dikkate alındığında farklı sıcaklık ve sürelerde farklı aşınma davranışlar sergilese de borlama işleminin aşınma dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

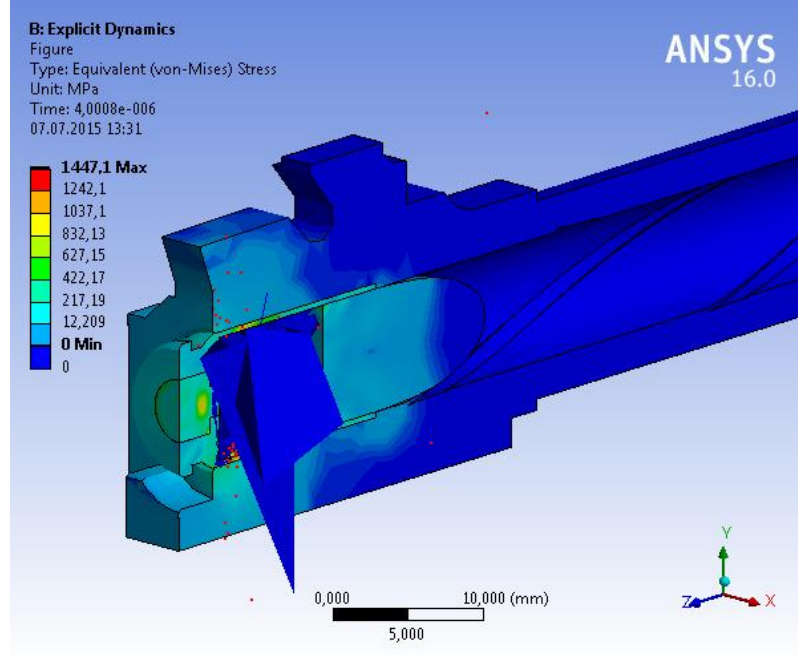
## BÖLÜM 6

### SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

#### 6.1.SONLU ELEMANLAR YÖNETİMİ

Zigana F tipi silah namlu modelinin oluşturulmasında çözüm zamanını kısaltmak ve daha optimum sonuçlar elde etmek için analiz sonuçlarına etkisinin az veya etkisiz olan parçalar modellenmemiştir. Modelin çizimlerinde Solidworks programından yararlanılmıştır. Bu model; silah namlusu, kapsül, kovan ve mermi çekirdeğinden meydana gelmektedir. Analiz yapmak için de namlu malzemesi olarak AISI 4140 İslah çeliği, mermi çekirdeği olarak Pb ve mermi kovani olarakta CuZn30 malzemesi kullanılmıştır. Modelin analizini yapmak için değişik Sonlu Elemanlar Programları denenmiş, literatürden de yapılan araştırmalar da deneysel çalışmalara daha yakın sonuç veren ANSYS yazılımı tercih edilmiştir. Modelde kullanılan her bir parça için SEM programına malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Malzemeleri kendi aralarında ilişkilendirildikten (contact) sonra Ağ örme (mesh) işlemi yapılmıştır. Sonuca etkisinin fazla olacağı tahmin edilen bölgelerde mesh yoğunluğu artırılmıştır. Kovan içerisinde ateşleme meydana getirilmiş(Şekil 6.1), buradan elde edilen basınç grafikleri literatürdeki verilerle karşılaştırılarak çekirdeği iten kuvvet ve zaman hesaplanmaya çalışılmıştır. Namlu alt kısmından sabitlenmiştir. Yer çekimi etkisi sonuca dahil edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda mermi çekirdeği ve namluda meydana gelen gerilmeler, Elastik ve Plastik uzamalar, toplam deformasyon, sıcaklık dağılımı ve çekirdekte meydana gelen ivmelenmenin etkileri araştırılmıştır.





Şekil 6.1. Kovan içerisindeki patlama modeli.

## 6.2.MALZEME ÖZELLİKLERİ

### 6.2.1.AISI 4140 Çeliğinin Mekanik Özellikleri

AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri.

Özellikleri	Değeri	Koşullar		
		T ( °C )	Temper sıcaklığı	İşlem
Elastik Modülü , Gpa	190-210			
Darbe Mukavemeti , İzod (J)	54.5	25	815 °C de tavllanmış	
Max. Çekme Mukavemeti, MPa	655	25	815 °C de tavllanmış	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	1020,4		870 ° C normalize edilmiş	
	1772		205	
	1551		315	
	1248		425	
	951		540	
Akma Mukavemeti, Mpa	417,1	25	815 °C de tavllanmış	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	655		870 ° C normalize edilmiş	
	1641		205	
	1434		315	
	1138		425	
	834		540	
Uzama %	25,7	25	815 °C de tavllanmış	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	17,7		870 ° C normalize edilmiş	
	8		205	
	9		315	
	13		425	
	18		540	
Kesit Daralması %	56,9	25	815 °C de tavllanmış	Yağda Serleştirme, ince taneli , temperlenmiş
	46,8		870 ° C normalize edilmiş	
	38		205	
	43		315	
	49		425	
	58		540	
	63		650	

Çizelge 6.2. AISI 4140 Çeliğinin Termal Özellikleri.

Özellikleri	Değeri	Koşullar	
		T ( °C )	İşlem
Termal büyüme katsayısı , (10 <sup>-6</sup> / °C)	12,3	20-100	Yağda sertleştirme, 600 °C de tavllanmış
	12,7	20-200	
	13,7	20-400	
	14,5	20-600	
Termal iletkenlik (W/m-K)	42,7	100	
	42,3	200	
	37,7	400	
	33,1	600	
Özgül Isısı (J/kg-K)	473	150-200	
	519	350-400	
	561	550-600	

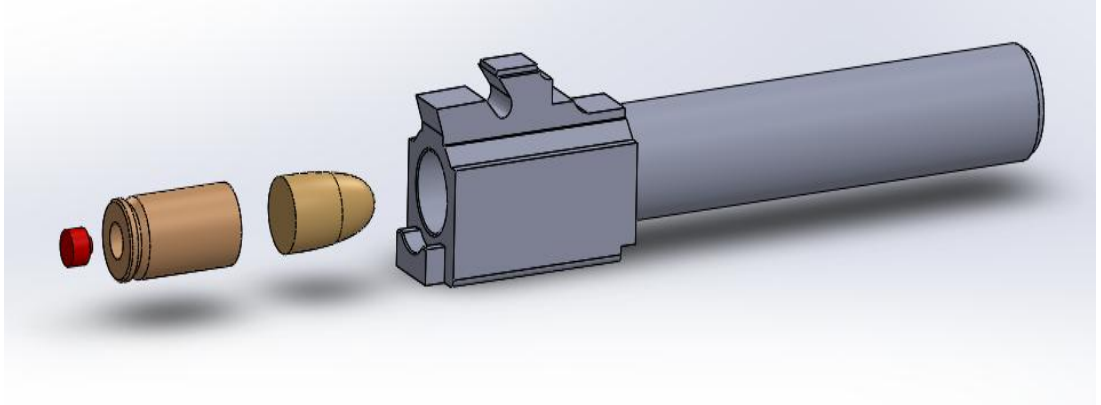
### 6.3.SİLAHTA KULLANILAN BARUTUN ÖZELLİKLERİ

Zigana F tipi silahta kullanılan barutun teknik özellikleri çizelge 6.3'te verilmiştir. Bu çizelgeden yararlanılarak ansys programına değerler girildi.

Çizelge 6.3. Silahta Kullanılan Barutun Özellikleri [53].

Teknik Özellikler	
Barut Tipi	Tek Bazlı
Barut Miktarı	0,36 g
Hız	375±10 m/sn
Basınç	2400-2800 kg/cm <sup>2</sup>
Barut Şekli	Silindirik

### 6.4. ZİGANA F TİPİ NAMLU MODELİ



Şekil 6.2. Zigana F tipi namlu modeli.

Namlu, bir silahın ana elemanıdır. Prensip olarak bir ucu açık diğer ucu kapalı değişken basınç ve sıcaklığa maruz bir boru olarak düşünülebilir. Namlu barutun yerleştirilmesi ve yanması için gerekli yanma odası hacmine, merminin dönerek stabilize kazanması için gerekli yiv-set'lere ve barut gazı enerjisinin mermiye aktarıldığı bir silindirik boya sahiptir [55].

## 6.5. MERMİ-KOVAN ÖZELLİKLERİ

Çizelge 6.4'de bu çalışmada kullanılan mermi ve kovanının özellikleri görülmektedir. Buradan elde edilen veriler SEM modelinde aynen kullanılmıştır.

Çizelge 6.4. Mermi-Kovan Özellikleri [52].

Şartname	STANAG 4090, AEP-97 EDITION A (MULTI CALIBRE MOPI)
Fişek Boyu	29,69 – 0,3 mm
Fişek Ağırlığı	~12,15 g
Hız	370± 10 m/s (16 m'de)
Hız Standart Sapması	max. 9 m/s
Ortalama Kovan Ağzı Basıncı	Max. 285 Mpa
Dağılım	Ort. dağılım yarıçapı max. 7,6 cm (46m'de)
Mermi İrtibat Kuvveti	min. 20,4 kgf
Kovan Model Numarası	9 mmx19 PARABELLUM KOVAN
Mermi Tipi	FMJ, MERMİ GÖMLEK YÜKSÜĞÜ PİRİNÇ (CuZn36), MERMİ ÇEKİRDEĞİ KURŞUN-ANTİMON ALAŞIMI
Mermi Ağırlığı	8 ± 0,075 g
Kovan Malzemesi	PİRİNÇ (CuZn30)
Kapsül	9 mm KAPSÜL, BOXER
Barut	KÜRESEL BARUT

## 6.6. SINIR ŞARTLARI

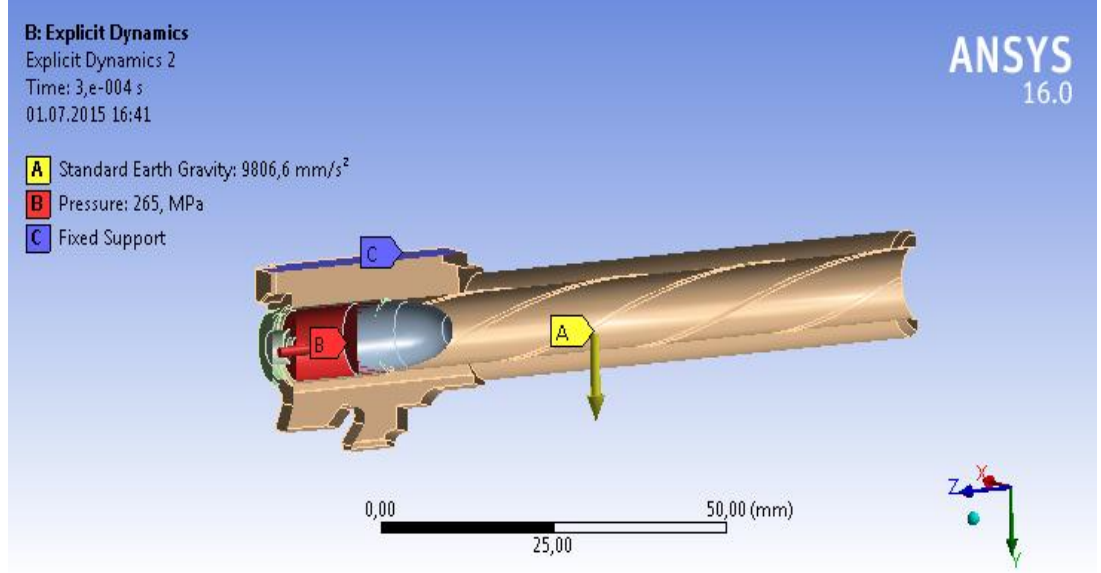
Namlunun Sonlu Elemanlar Analizi için sınır şartlarının belirlenmesi gerekir. Bu sınır şartlarının analiz başlamadan belirlenmesi gerekir.

### 6.6.1. Yer Çekimi İvmesi

Namlu Modeline standart yerçekimi ivmesi olarak 9806,6 mm /s<sup>2</sup> uygulanmıştır.

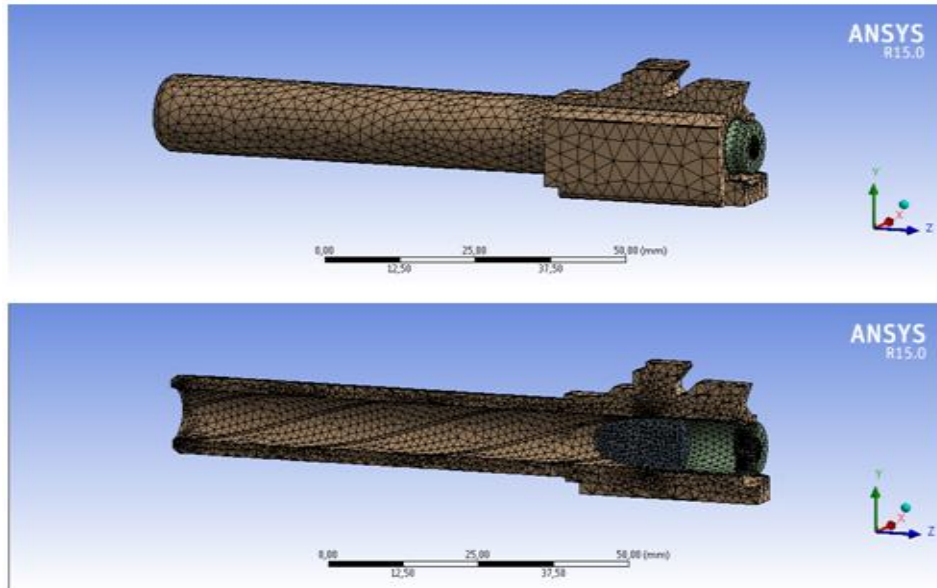
## 6.6.2. Basıncın Etki Edeceği Yer

Kama tarafından sabit olan namlu, ankastre kiriş özelliği göstereceği için ele alış yönüne göre yüzeyi sabitlenmiştir. Şekil 6.3'te namlu modeli görülmektedir.



Şekil 6.3. Sınır Koşulları.

## 6.7. AĞ UYGULAMASI (MESH)



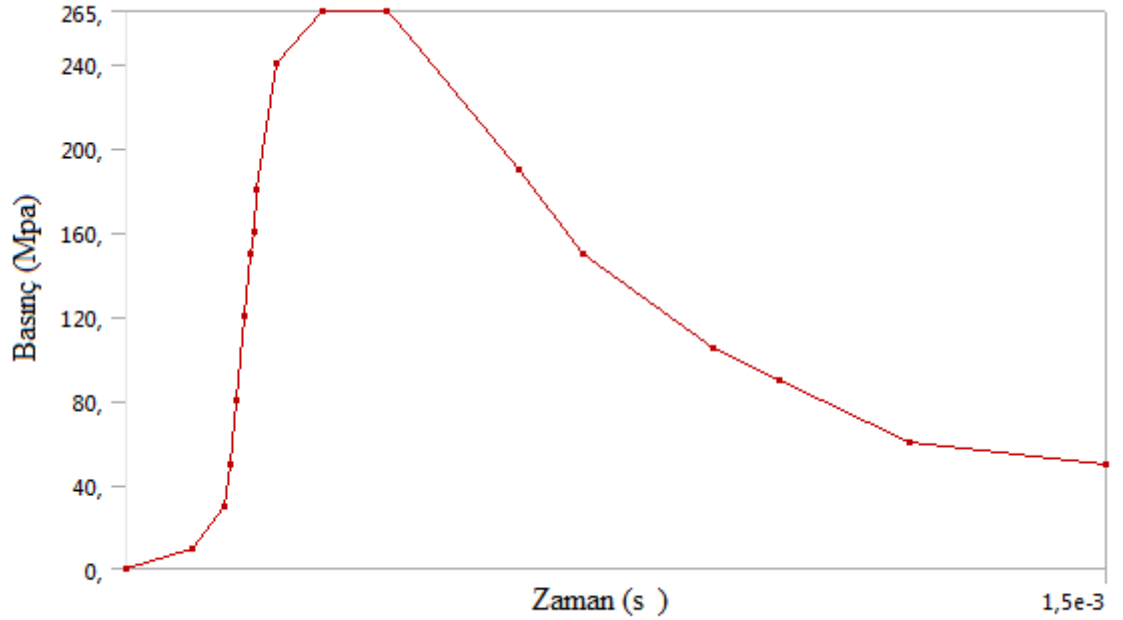
Şekil 6.4. Modelin Mesh Örülmüş Hali.

Namluya uygulanan çözüm ağı, element boyutu 1 mm olarak atanmıştır. Kritik bölgelerdeki mesh yoğunluğu artırılarak iyi bir çözüm hedeflenmiştir. Çözüm ağı Şekil 6.4'te görülmektedir.

Çizelge 6.5. Namlu, kovan ve mermi çekirdeğinde bulunan node ve element sayıları.

	Node	Element
Namlu	14076	68386
Kovan	2792	12511
Mermi çekirdeği	1351	6499

### 6.7.1. Kovanın İç Kısımında Meydana Gelen Basıncın Zamana Bağlı Grafiği



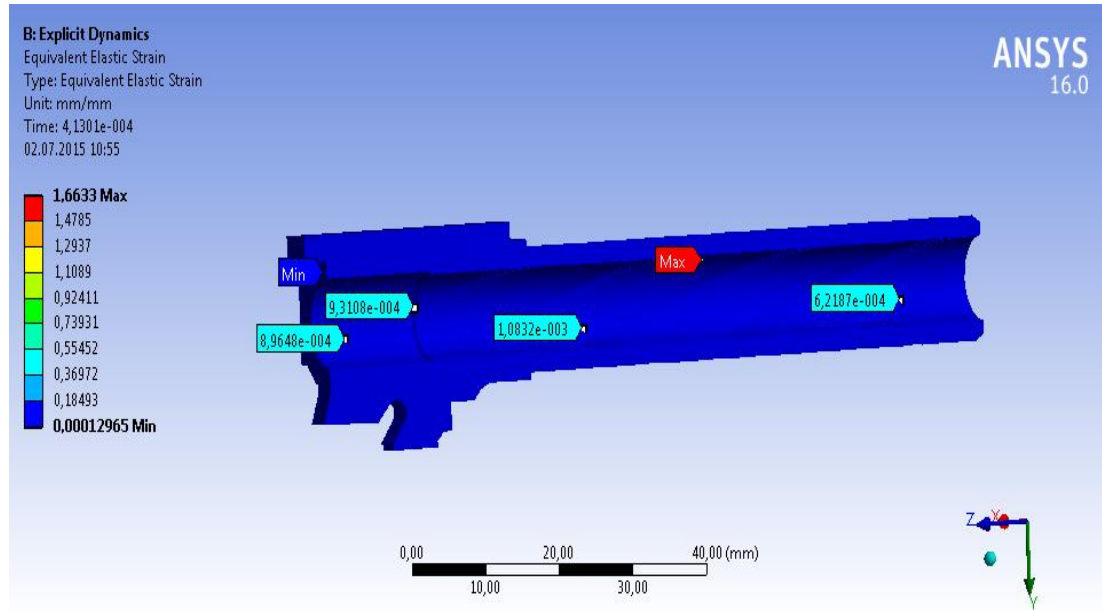
Şekil 6.5. Kovanın iç kısmında meydana gelen basınç-zaman grafiği [43].

Silahın ilk ateşlenmesi esnasında oluşan yanma basıncı mermi çekirdeğinin mesafesini ve hızını çok büyük oranda etkilemektedir. Oluşan bu basıncı belirlemek

için bir çok deneysel çalışma yapılmıştır [43]. Bu çalışmada oluşan basıncı belirlemek için oluşturulan teorik modelde değişik patlayıcılar kullanılarak bu belirlenmeye çalışılmıştır. Patlayıcıdan elde edilen değerlerle uygulamadan elde edilen değerler karıştırılarak bu silah için en uygun basınç eğrisi elde edilmeye çalışılmıştır. Bu verilerden yola çıkarak kovanın iç kısmında meydana gelen basıncın azami 265 MPa olduğu ve işlem süresinin 0,0015 saniye olduğu kabul edilmiştir. Elde edilen zaman-basınç eğrisi Şekil 6.5’ te görülmektedir.

## 6.8. ANALİZLER

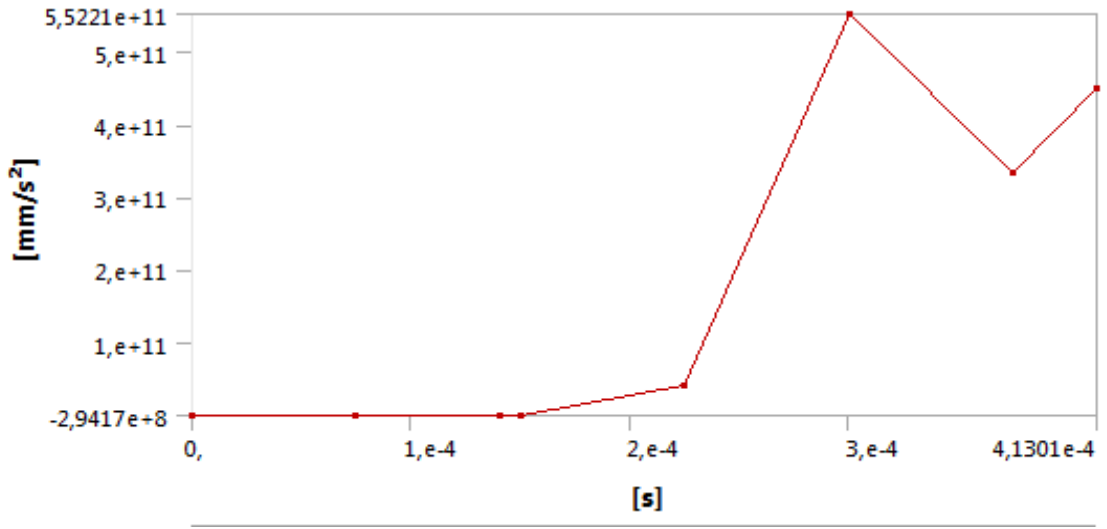
### 6.8.1. Namluda Meydana Gelen Elastik Gerinmeler



Şekil 6.6. Namluda meydana gelen elastik gerinmeler.

Terik çözümlerde mermi çekirdeği namlu içinde yol alırken temas esnasında oluşan gerilmelerin etkisiyle elastik ve plastik birim şekil değiştirmeler oluşmaktadır. Elastik deformasyon miktarı aşınma için çok önemli olmazsa da zamanla kalıntı gerilmelerin etkisiyle de gerilim yığılması oluşan bölgelerde çatlakların oluştuğu bilinmekte dolayısıyla da elastik deformasyonu azaltacak çalışmalar da plastik deformasyona geçişi azalatacaktır. Şekil 6.6’da mermi kovani terkettikten sonra namluda oluşan elastik birim şekil değiştirme miktarları bölgesel olarak görülmektedir.

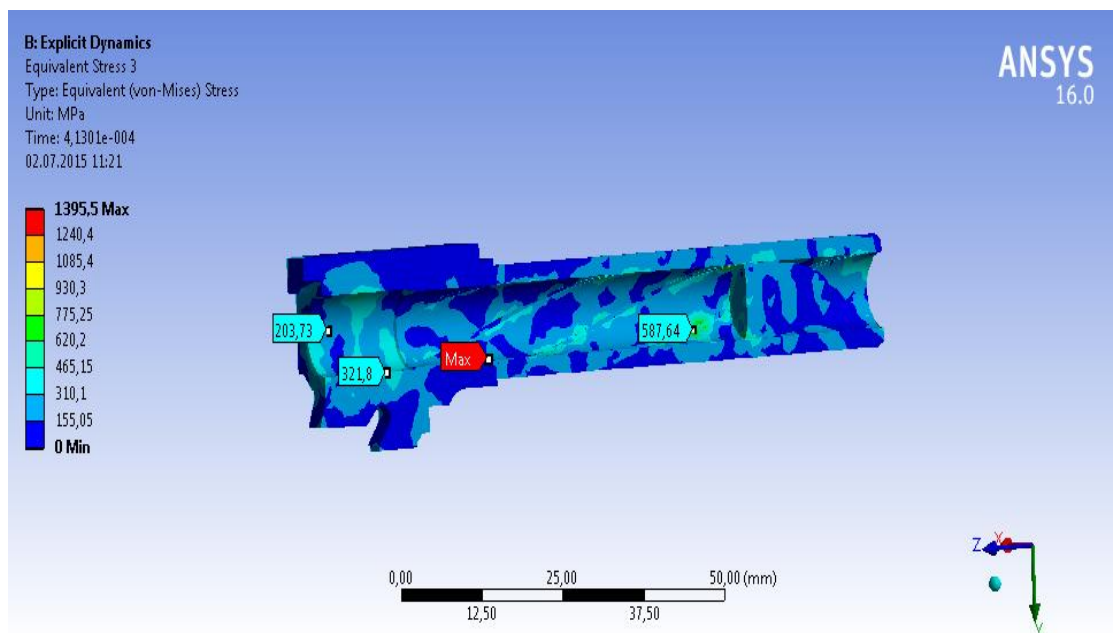
### 6.8.2. Mermide Meydana Gelen Toplam İvmelenme



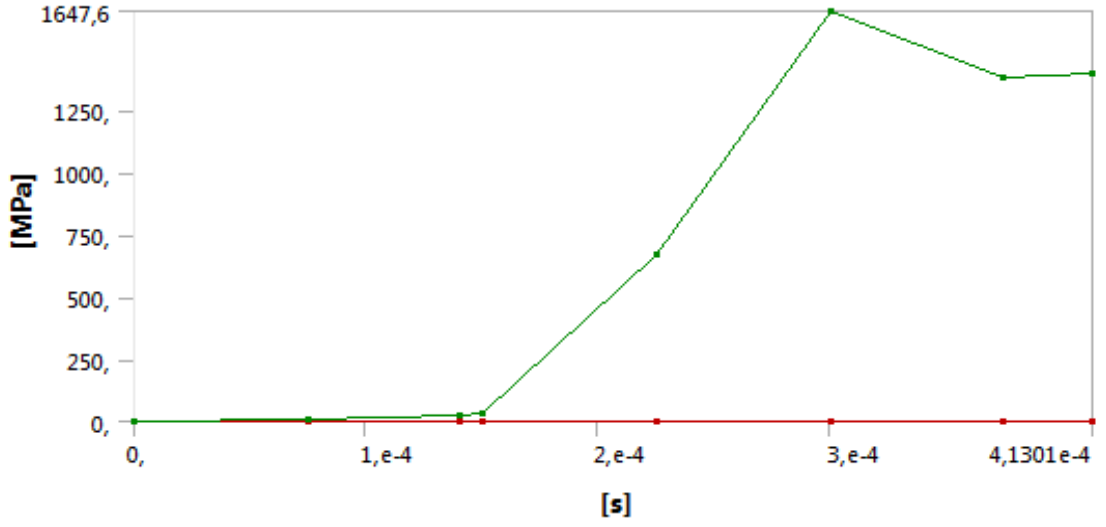
Şekil 6.7. Mermide meydana gelen toplam ivmelenme.

Şekil 6.7’de mermi çekirdeğinin zamana bağlı olarak ivmelenmesi görülmektedir. Grafikten anlaşıldığı kadarıyla ivmelenmenin çok stabil olmadığı basınç artsa bile sürtünme ve yivin hızlanmada negatif yönde etkisi olduğu söylenebilir. Bu grafikte ivmelenmenin 4, 1301e-4.saniyesinde 4, 5022e+11 mm/s<sup>2</sup> olduğu görülmektedir.

### 6.8.3. Namluda Meydana Gelen Gerilmeler



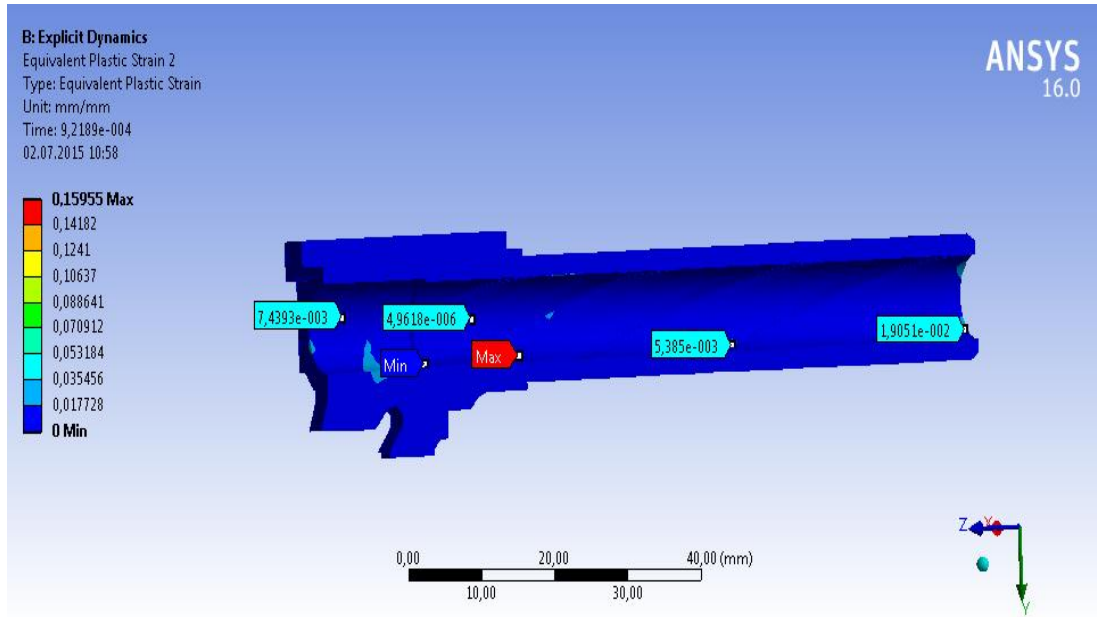




Şekil 6.8. Namluda meydana gelen von-mises gerilmeleri.

Ateşleme yapıldıktan sonra oluşan basıncın etkisiyle öncelikli olarak kovanda ve mermi çekirdeğinde gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilemlerin namluya etkisi bölgesel olarak farklılıklar göstermektedir. Mermi yol alırken yiv setlerine çarpmakta ve namlu içerisinde noktasal bazda kısa süreli aşırı gerilmeler meydana gelmektedir. Bu da namlu içeirsinde elastik ve plastik deformasyonların olabileceğini göstermektedir. Namluda meydana gelen von-Mises gerilmesinin 7,5001e-005.saniyede başladığı ve 4,1301e-4.saniyede 1650 MPa değerine ulaştığı Şekil 6.8’ den anlaşılmaktadır.

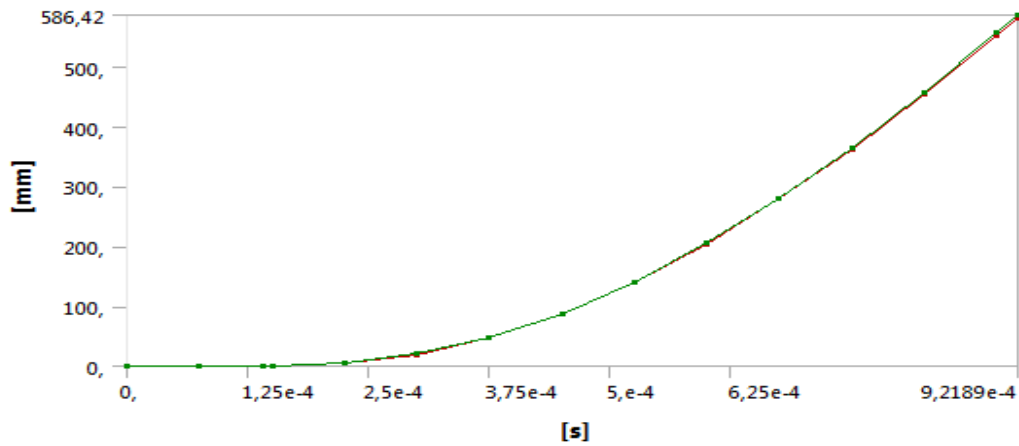
#### 6.8.4. Namluda Meydana Gelen Plastik Gerinmeler



Şekil 6.9. Namluda meydana gelen plastik gerinmeler.

Mermi çekirdeği yol alırken temas ettiği noktaların etkisiyle dönmeye başlıyor, fakat bu temas esnasında çok küçük te olsa aşınmalar meydana getirmektedir. Aşınma mermi çekirdeği kovani terkettikten sonra başlamaktadır.

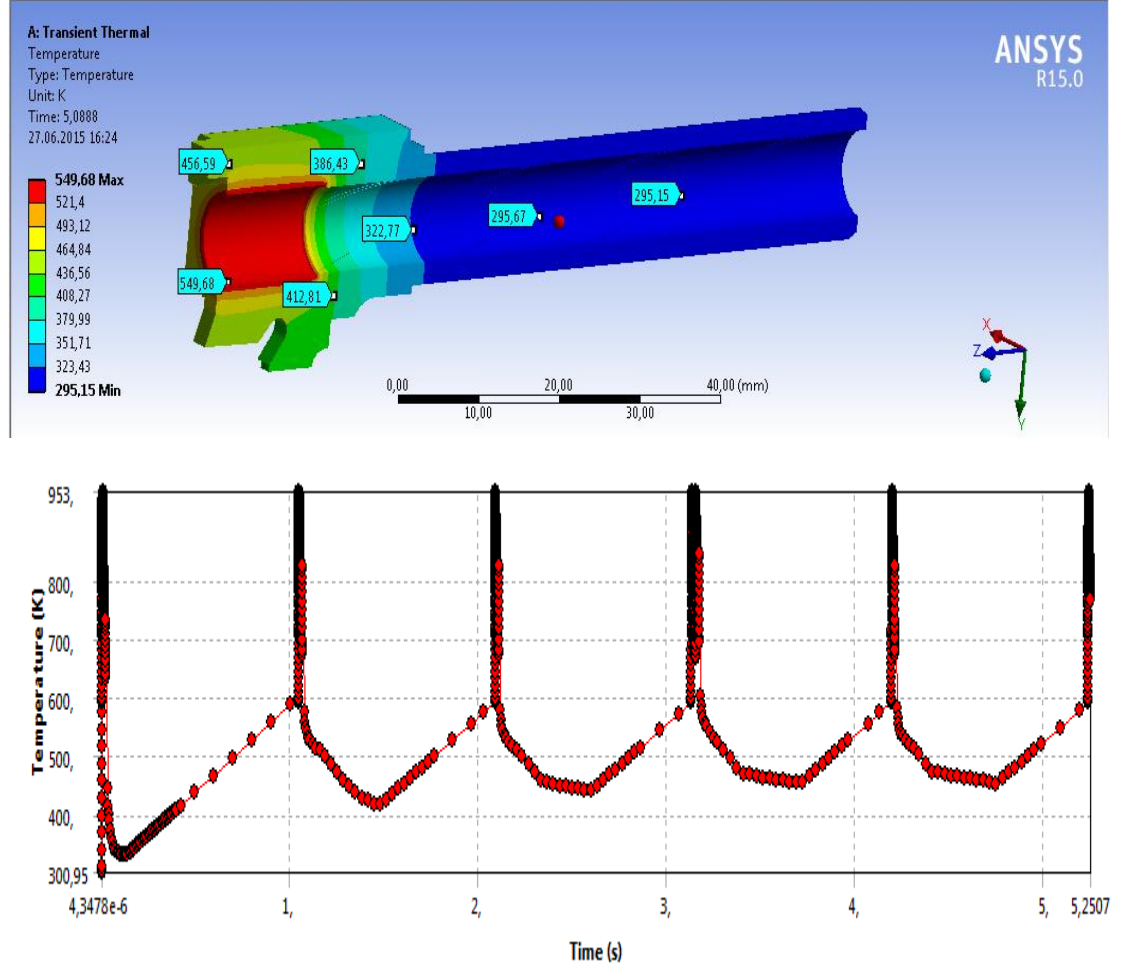
#### 6.8.5. Mermi Çekirdeğinin Aldığı Yol



Şekil 6.10. Mermi çekirdeğinin aldığı yol.

Mermi çekirdeğinin hareketi, işlem süresine bağlı olarak artış gösterdiği ve 9,2189e-4 saniye'ye kadar 586,42 mm yol aldığı Şekil 6.10' daki grafikte anlaşılmaktadır.

### 6.8.6. Namluda Meydana Gelen Sıcaklık Dağılımı



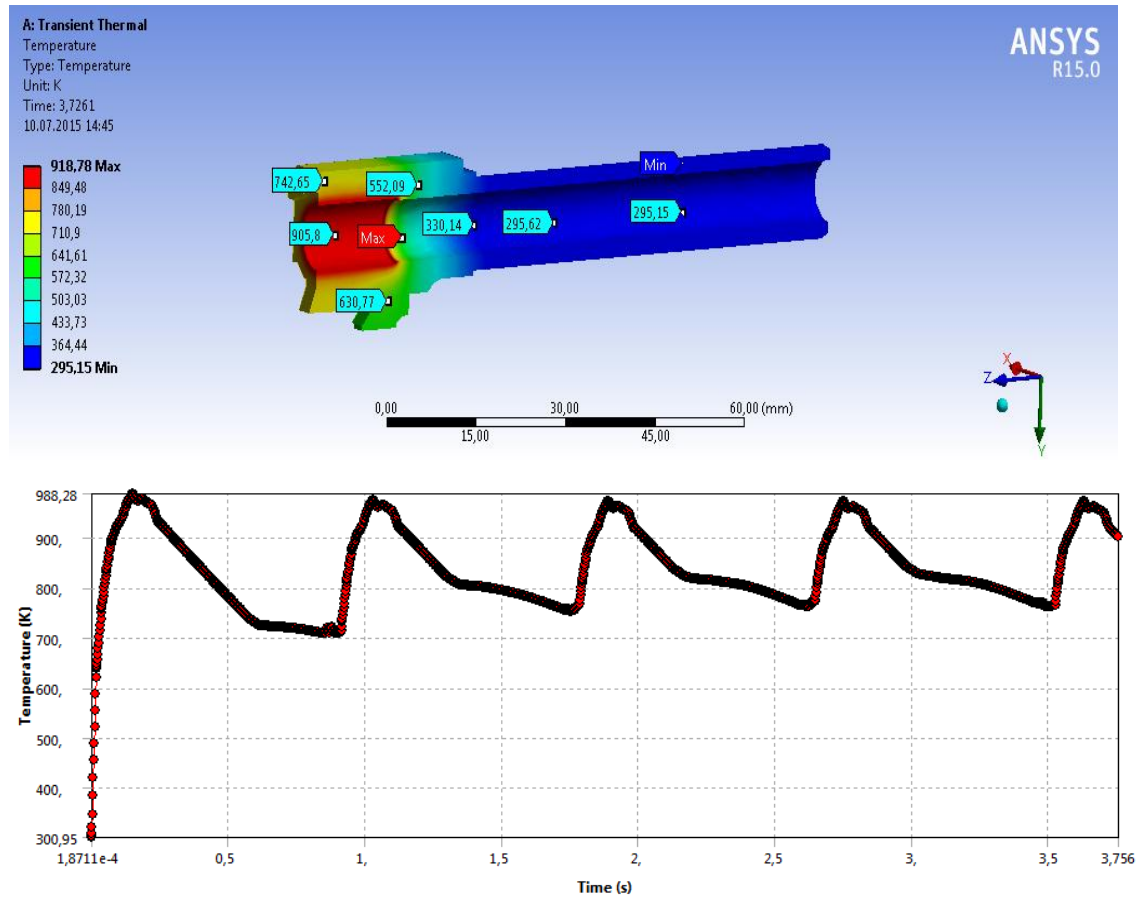
Şekil 6.11. Namluda meydana gelen sıcaklık dağılımı.

Termal analizler de kullanılan ısı gücü veya sıcaklık değerleri literatürden alınmıştır [55]. Problemin çözümünde kullanılan bilgisayarın sabit diski yetersiz kalmasından dolayı toplam 5 mermi atışı için bu analiz yapılabildiği. Bu analizlerde iki türlü işlem yapılmıştır. Bor tabaklı ve bor tabakasız numunelerin ısıl etkileri sıcaklık dağılımları görülmeye çalışılmıştır. Bor kaplanmamış namluda meydana gelen sıcaklık dağılımı 295,15 ila 953 K aralığındadır. Beş mermi atıldıktan sonra namluda meydana gelen sıcaklık değerleri 300,95 ila 953 K aralığında olduğu ve beşinci

mermi atıldıktan sonra meydana gelen sıcaklık değerinin 549,68 K değerine ulaştığı, ayrıca namlu uç kısmına doğru ısıda düşüş meydana geldiği Şekil 6.11’de görülmektedir. Merminin ilk ateşlendiği esnada sıcaklık gradyanının bölgesel olarak 953 °C ye ulaştığı fakat konveksiyonel soğutma yöntemiyle hızlı bir soğuma oluşmaktadır.

### 6.8.7. Bor Kaplanmış Namluda Meydana Gelen Sıcaklık Dağılımı

Borlama yapılan namlunun termal analizi yapıldığında borlamasız namluya göre sıcaklık değerlerinde artış olduğu Şekil 6.12’de görülmektedir. Bor malzemesi geç ısınıp geç soğuduğu için sıcaklık değerinin artması beklenen bir sonuçtur.



Şekil 6.12. Borlanmış namluda meydana gelen sıcaklık dağılımı.

## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR ve ÖNERİLER

ZİGANA F tipi silah namlusu yapımında kullanılan AISI 4140 çeliği 850, 900, 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat süreyle ticari Ekabor II bor tozuyla borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi sonucunda oluşan çelik yüzeylerinde oluşan borür tabakalarının mikroyapı, tabaka kalınlıkları, mikro sertlikleri, yüzey morfolojileri, XRD analizleri, aşınma bölgelerinin SEM ve EDX analizleri incelenmiş ve modellemesi yapılarak sonlu elemanlar yöntemiyle patlama analizleri yapılmıştır.

Bu kapsamda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- a) Metalografik incelemeler sonucunda, kaplama/matris ara yüzeyi ve matrisin belirgin olarak birbirinden ayrıldığı ve borür tabakasının kolonsal bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir.
- b) Optik incelemeler sonucunda kaplama tabakasının üç farklı bölgeden oluştuğu tespit edilmiştir. (a) En üstte borür tabakası, (b) Geçiş bölgesi (çökelti bölgesi) c) borlama ısıl işleminden etkilenmeyen matris bölgesi bulunmaktadır.
- c) Borlama sonunda elde edilen borür tabaka kalınlıkları süreye bağlı olarak 15,73-82,5 µm arasında değiştiği tespit edilmiştir. Borlama süresinin artmasıyla birlikte daha kalın borür tabakaları elde edilmiştir.
- d) 507 HV sertliğinde olan ticari AISI 4140 çeliği Borlama sonucunda sıcaklık ve sürenin artışına bağlı olarak sertlik değerleri 1188,8 ile 1386 HV<sub>0,1</sub> aralığında değişmiştir. Oluşan FeB, Fe<sub>2</sub>B, CrB ve Cr<sub>2</sub>B fazlarından dolayı yüzey sertliklerinin yüksektir.
- e) Borlama işlemi sonucunda XRD çalışmalarında tüm numunelerde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının baskın faz olduğu CrB, Cr<sub>2</sub>B, TiB<sub>2</sub>, MnB, Ni<sub>2</sub>B, Mn<sub>2</sub>B fazlarının ise düşük oranda meydana geldikleri belirlenmiştir. Kutu borlama sıcaklığının

artmasıyla birlikte FeB faz şiddetlerinde artışlar görülürken, Fe<sub>2</sub>B faz şiddetinde ise azalma meydana gelmiştir.

- f) Borlanmış numunelerin tüm aşınma deneyleri dikkate alındığında farklı sıcaklık ve sürelerde farklı aşınma davranışlar sergilediği borlanan tüm numuneler herhangi bir işlem görmemiş AISI 4140 çeliğinden daha iyi aşınma direnci göstermişlerdir.
- g) En iyi aşınma direnci işlemsiz AISI 4140 çeliğine göre 27,3 kat daha az aşınan 900 °C’de 6 saat süre ile borlanan ve 5 N yük altında aşınma işlemine tabi tutulan numunede elde edilmiştir.
- h) Aşınan yüzeylerden alınan EDX analizleri sonucunda yüzeyde Fe ve O<sub>2</sub> bakımından baskın olduğu gözlenmiştir. Bu durum yüzeyde Fe esaslı oksit tabakalarının oluştuğunu göstermiştir.
- i) Aşınma tipi olarak abrazyon aşınmanın (çizilme aşınması) bir türü olan sürülme aşınmasının meydana geldiği belirlenmiştir.
- j) Mermi çekirdeğinin işlem süresine bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. 9,2189e-4.saniyede 586,42 mm yol almıştır.
- k) Mermideki toplam ivmelenmenin işlem süresine bağlı olarak artış görüldüğü, 4,1301e-4.saniyede 4,5022e+011 mm/s<sup>2</sup> değerine ulaşmıştır.
- l) Namludaki von-Mises gerilmesinin en yüksek değerinin 3,e-4.saniyede 1647,6 Mpa değerine ulaştığı ve işlem bitiminde bu değer 1395,5 Mpa değerine düştüğü görülmüştür.
- m)Namluda meydana gelen plastik gerinme değeri 2,25e-004.saniyeye kadar gerinme olmadığı işlem bitiminde gerinme değerinin 0,15955 mm/mm değerini aldığı görülmüştür.
- n) Namluda 1,4066e-004.saniyeye kadar elastik gerinmenin olmadığı ve bu süreden sonra gerinme değerlerinde artış görüldüğü, işlem bitiminde 1,6648 mm/mm’lik bir gerinmenin meydana geldiği görülmüştür.

İleride yapılacak olan çalışmalarda, farklı borlama süresi ve sıcaklıklarda ve farklı yüklerde borlama ve aşınma deneyleri yapılabilir. Namlu sistem içerisinde hareketli olduğundan çalışma sistemine göre tasarımı yapılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ayrıca tüm atış analizi yapıp faydalı sonuçlar elde edilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Bindal, C., “Az alaşımlı çelikler ve ticari karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borür tipi seramik kompozitlerin bazı özelliklerinin tespiti”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 78 (1991).
2. Babushkin, B. V., And Polyakov, B. Z., “Residual stresses in steel after boriding from melts”, *Met. Sci. Heat Treat.*, cilt no(15): 577-580 (1973).
3. Öztörün, D., “Bir ağır silah namlusunun sonlu elemanlar yöntemi ile elastik plastik gerilme analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 52-63 (2013).
4. Sinha, A. K., “Boriding (Boronizing)”, *J. Heat Treating*, Vol. 4, ASM Int., Ohio, U.S.A, 437-447 (1991).
5. Yapar, U., “Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 42-46 (2003).
6. Bozkurt, N., “Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*, 61 (1984).
7. Taşcı, A., “Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 45 (1993).
8. Uzun, H. A., “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 5-21 (2002).
9. Fargas, G., Anglada, M., and Mateo A., “Effect of the annealing temperature on the mechanical properties, formability and corrosion resistance of hot-rolled duplex stainless steel”, *J. Materials Processing Technology*, 209 (4): 1770-1782 (2009).
10. Tezcan, R., “Borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 2-39 (1996).
11. Soydan, Y., “Katı ortamda bor yayınımlı ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 80-94 (1996).

12. Palombarini, G., And Carbucicchio, M., “On the morphology of thermo chemically produced Fe<sub>2</sub>B/Fe interfaces”, *J. Materials Science Letters*, cilt no(3): 791-794 (1984).
13. Kunst, H., Schaaber, O., “Beobachtungen beim oberflächen borieren von stahl III”, *22 Heft*, HTM, 4: 275–292 (1967).
14. Goerriot, P., Fillit, R., Thevenot, F., Driver, J.H., and Bruyas, H., “The influence of alloying element additions on the boriding of steels”, *Materials Science and Engineering*, 55 (1): 9-19 (1982).
15. Özbek, I., and Bindal, C., “Mechanical properties of boronized AISI W4 steel”, *Surface And Coatings Technology*, 154: (1) 14-20 (2002).
16. Esen, E. “Çelik yüzeylerinin kaplanması”, Erdemir, K. Ereğli, 9-11 (2006).
17. Çelikyürek, İ., “Demir aluminantların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 107-108 (2006).
18. Bhushan, B., “Introduction to tribology”, *Wear*, 12 (2): 332-333 (2002).
19. Simmons J.W., Covino, B.S., Hawth, J.A., and Dunning, J.S., “Effect of nitride(Cr<sub>2</sub>N) precipitation on the mechanical, corrosion and wear properties of austenitic stainless steel”, *ISIJ Institute*, 36 (24): 846–854 (1996).
20. Akbulut, H., “Malzemelerin Sürtünme ve aşınma ders notları”, *Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği*, Sakarya, 36-52 (2006).
21. Sarıkaya, Ö., “Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri”, *Korozyon Derneği Yayını*, Ankara, 1-60 (2007).
22. İpek, R., ve Karamış, M, B., “Aşınma test yöntemleri ve gelişmeler”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 469 (21): 24-29 (1999).
23. Öz Saraç, U., “Endüstriyel yatak alaşımlarının aşınma davranışlarının karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 23-30 (1999).
24. Hutching, I. M., “Tribology: friction and wear of engineering materials”, *Materials Science and Metallurgy University of Cambridge*, Cambridge, 54 (12): 76-82 (1992).
25. Klaasen, H. and Kübarsepp, j., “Abrasive wear performance of carhide composites”, *Wear*, 261 (5): 520-526 (2006).
26. Taşgın, Y. ve Kaplan, M., “Dubleks tekniğiyle üretilen FeCrC katkılı malzemenin abrasiv aşınma davranışlarının araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 16 (1): 217-224 (2007).



27. Sarı, Y, N. ve Yılmaz, M., “Ni-esaslı kaplamaların abrazif - erozif aşınma direncinde ısı püskürtme yönteminin ve WC ilavesinin etkisi”, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 541 (36): 16 (2006).
28. Soydan, Y., ve Ulakan, L., “Triboloji”, *Teknoloji Araştırma Ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi*, 5 (14): 35-40 (2003).
29. Şen, Ş., “Termokimyasal Borlama İşlemi ile AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 Çeliklerinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 51-57 (1998).
30. Özdemir, Ö., Usta M., Bindal C. and Ü.çışık A.H., “Hard ironboride (Fe<sub>2</sub>B) on 99.97 wt % pure iron”, *Vacuum*, 80: 1391-1395 (2006).
31. Tabur, M., İzçiler, M., Gül, F. and Karacan, İ. “Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel”, *Wear*, 266: 1106-1112 (2009).
32. Oliveria, C.K.N., Casteletti, L.C., Lombardin, A., Totten, G.E. and Heck, S.C., “Production and characterization of boride layers on AISI D2 tool steel”, *Vacuum*, 84: 792-796 (2010).
33. Sinha, A. K., “Boriding(Boronising)”, ASM Handbook, Vol. 4, *J. Heat Treating*, pp. 437-447 (1991).
34. E. Garcia-Bustos et al. “The wear resistance of boride layers measured by the four-ball test”, *Surf. Coat. Techno.* 241–246 (2013).
35. Dilektaşlı, E., and Motallebzadeh, A., “Evaluation of the effect of boride layer structure on the high temperature wear behavior of borided steels”, *Wear*, 328-329, 110–114 (2015).
36. C, Huseyin., Atar, E., Motallebzadeh., A., “High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer”, *Wear*, 309, 152–158 (2014).
37. Dilektaşlı, E. “Bazı alaşımlı çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışına borlama işleminin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 36-42, (2014).
38. P  
alombarini, G. and Carbucicchio M., “Effects Of Alloying Elements On The Growth Of Iron Boride Coatings”, *J. Materials Science Letters* 6(10), İtalya, 1147-1149 (1987).
39. Bindal C., “Az Alaşımlı Ve Karbon Çeliklerinde Borlama İle Yüzeye Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 23-28 (1991).
40. Ozbek, I. and Bindal., C., “Mechanical properties of boronized AISI W4 steel”, *Surface and Coatings Technology*, 154: 14-20 (2002).

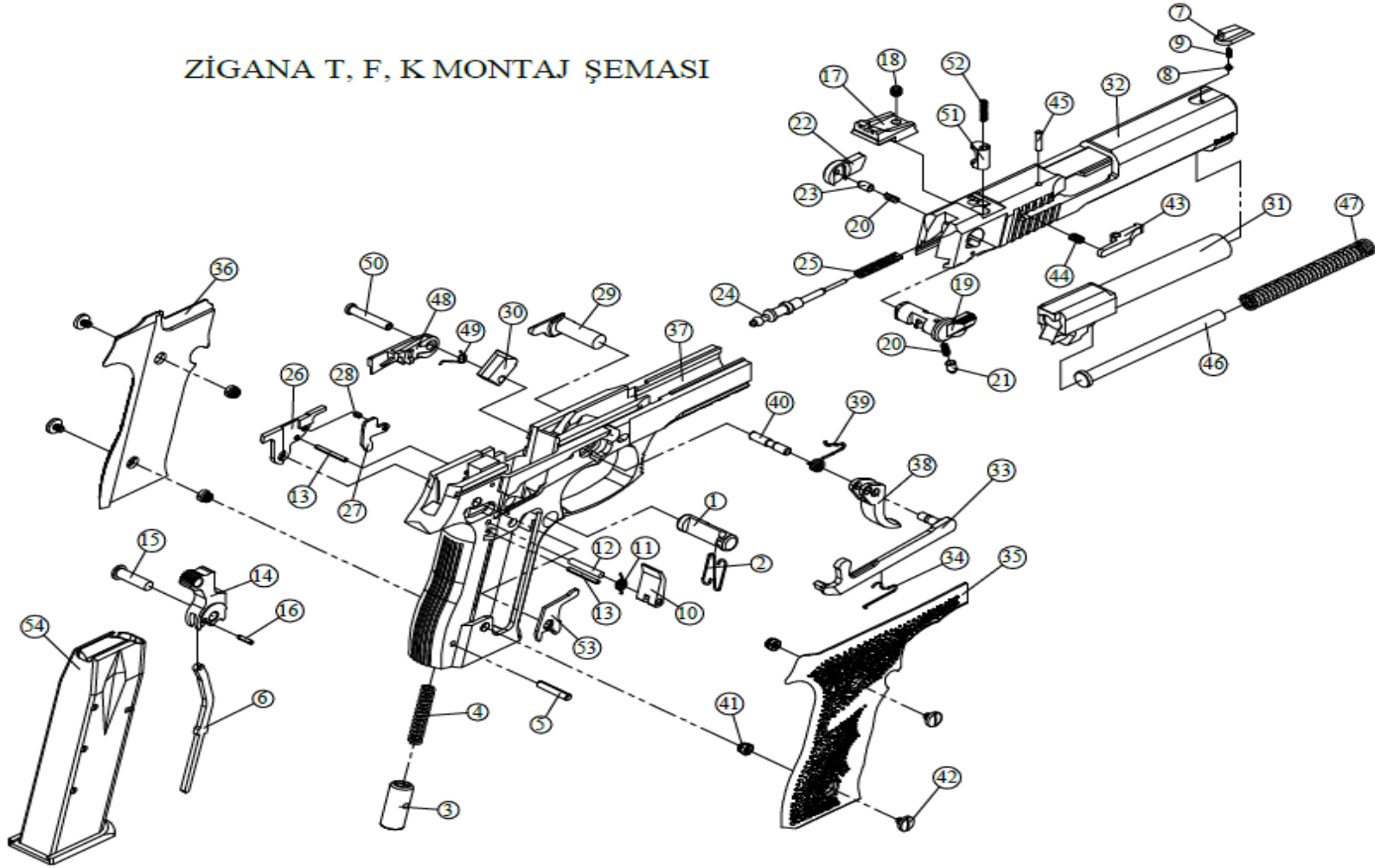
41. Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Ozdemir, O. and Bindal, C., “Evaluation of borides formed on AISI P20 steel”, *Mater and Des.* 28: 55-61 (2007).
42. Taktak, Ş., “Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels”, *Materials and Design*, 28: 1836-1843 (2007).
43. Ahmed, N., Brown, R.D., Hameed, A., “Finite Element Modelling and Simulation of Gun Dynamics using ANSYS”, *Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation*, 0-7695-3114-8/08 (2008).
44. Günen, A., Ulutan, Mustafa., Orhan N., “Friction and wear behaviour of borided AISI 304 stainless steel with nano particle and microparticle size of boriding agents”, *J. Balkan Tribological Association*, Vol. 20, No 3, pp. 362–379 (2014).
45. Ulutan, M., Gasan, H., “Effect of different surface treatment methods on the friction and wear behavior of AISI 4140 steel”. *J. Mater. Sci. Technol.*, 26: 251-257 (2010).
46. Habig, K.H. and Chatterjee-Fischer, R., “Wear behaviour of boride layers on alloyed steels”, *Tribol. Int.*, 14: 209-215 (1981).
47. Subrahmanyam, J., and Gopinath, K., “Wear studies on boronized mild steel”, *Wear*, 95: 287-292 (1984).
48. Eyre, T.S., “Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals”, *Wear*, 34: 383-397 (1975).
49. Ulutan, M., “AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması”, Doktora tezi, *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 21-30 (2007).
50. Gök, M.S., “Düşük ve orta karbonlu çeliklerin yüzeyine tıg kaynak metoduyla kaplanan östenitik paslanmaz çelik tozunun aşınma direncine karbür içeriğinin etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 40-46 (2008).
51. Develi, F., “Plazma nitrüleme ve borlama ile çift yüzey işlem uygulanmış AISI 8620 çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 51-58 (2010).
52. İnternet: Trabzon Silah Sanayii (TİSAŞ), <http://www.trabzonsilah.com/tr/zigana-f-bk>.
53. İnternet: Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu (MKE), <http://www.mkek.gov.tr/tr/Urunler.aspx?UretimYeriID=0&UrunID=319&AnaKategori=109&AltKategori=&EnAltKategori=>.

54. Kalkan, E., “Borlanmış Yüksek Krom ve Nikelli Dökme Çeliğın Korozif Aşınma Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 45-47, (2014).
55. Gündüzer, O., “Namlu cidarı boyutlandırılmasına İç balistik davranışın etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 17-23 (2013).

**EK AÇIKLAMALAR A.**

**ZİGANA F TİPİ SİLAH**

## ZİGANA T, F, K MONTAJ ŞEMASI



Şekil Ek A.1. Zigana F tipi silahın demontaj resmi. (Numaralandırılmış parça isimleri TİSAŞ firması tarafından gizlenmektedir.)

## **ÖZGEÇMİŞ**

1987 yılında Trabzon'un Akçaabat ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Şinik ilkokulunda tamamladı. Akçaabat Endüstri Meslek Lisesi Tesviye Bölümünden mezun oldu. 2006 yılında Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tasarım ve Konstrüksiyon Öğretmenliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2011 yılında mezun oldu. Bu dört yıllık eğitimi boyunca çeşitli seminerlere ve kurslara katılarak kendini geliştirdi. 2013 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına halen devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Şinik Mahallesi Bozali sokak No:20 Akçaabat/TRABZON  
Tel : 0 (542) 692 92 80  
E-posta : [ugur@bozali.com](mailto:ugur@bozali.com)