



**BORLAMA İLE YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ RAY
ÇELİĞİNİN AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Bilgehan KONDUL

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**BORLAMA İLE YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ RAY ÇELİĞİNİN AŞINMA
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Bilgehan KONDUL

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**KARABÜK
Mayıs 2020**

“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.”

Bilgehan KONDUL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLAMA İLE YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ RAY ÇELİĞİNİN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Bilgehan KONDUL

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN

Mayıs 2020, 78 sayfa

Borlama işlemi ile elde edilen yüksek sertlik değerleri, aşınma odaklı mühendislik problemleri açısından dikkat çekicidir. Bu çalışmada bor ile kaplanmış ray çeliklerinin metalografik yapısı ve aşınma davranışı incelenmiştir. Ray çeliklerinin borlanması ve borlama ile aşınma dayanımlarının artırılması literatür için tektir. Bu amaçla 700 °C, 800 °C ve 900 °C’de 4 saat borlama işlemi yapılan ray çeliklerinin aşınma deneyleri 2 farklı yük (30 N ve 50 N) ve hız koşulları (0,1 m/s ve 0,2 m/s) altında yapılmıştır. Ray çeliğinin aşınma davranışının görsel ve elemental analizinde SEM, EDX, XRD ve 3D topoğrafya yöntemleri kullanılmıştır. Deney sonuçlarının istatistiksel analizi için varyans metodu (ANOVA) kullanılmış ve kayma hızı, yük ve borlama sıcaklığı parametrelerinin sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve hacim kaybı üzerindeki etkisi ilk kez nicel olarak analiz edilmiştir.

Deneysel sonuçlara göre borür tabakasının kalınlık ve sertlik değerleri borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte artmıştır. Başlangıçta ~ 300 HV olan ray çeliğinin

sertliği 700-800-900 °C'de sırasıyla 1886, 2145 ve 2590 HV değerine ulaşmıştır. En yüksek tabaka kalınlığı ise ~ 66 µm kalınlık ile 900 °C'de borlanmış numunede elde edilmiştir. Numunelerin mikroyapısal karakterizasyonları incelendiğinde borür tabakasında genel olarak demir borürlerin hakim olduğu gözlenmiştir. 700 °C'de borlanmış numunenin borür tabakasında tek fazlı (Fe₂B) bir yapı, 800 °C ve 900 °C'de borlanmış numunelerin tabakalarında ise çift fazlı (FeB + Fe₂B) bir yapı elde edilmiştir. Demir borürlerin yanısıra MnB ve CrB fazlarının oluşumu da gözlenmiştir. Borlanmış ray çeliğinin aşınma davranışı analiz edildiğinde borlanmamış numuneye göre aşınma direncinde önemli oranda artış elde edilmiştir. Borlama yöntemiyle birlikte elde edilen yüksek sertlik ve malzeme yüzeyinde oluşan bor oksit (B₂O₃) tabakası sayesinde sürtünme katsayısının minimizasyonu sağlanmıştır. Borlama prosesinin sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi sırasıyla % 87,60, % 84,43 ve % 66,78 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre aşınma davranışı üzerindeki en fazla etkiyi borlama prosesi göstermiştir. Yüzeylerden alınan topoğrafya görüntülerinde borlanmış numunelerin işlem görmemiş numunelere göre daha düzgün bir yüzey formuna sahip olduğu, işlem görmemiş numunelerde ise derin çukurların ve yoğun dalgalanmaların oluştuğu grlmştir. SEM görüntüleri ise bu durumu desteklemiş ve işlem görmemiş numunelerde yoğun bir şekilde adhezyon ve abrazyon aşınmaları tespit edilmiştir. 700 °C'de borlanan numunede ihmal edilebilir çatlaklar ve pullanma kusuru hariç bir deformasyon oluşmamıştır. 800 °C ve 900 °C borlanan numunelerde ise sadece pullanma kusuru artmış ve baskın bir deformasyon mekanizması gözlenmemiştir.

Anahtar Sözcükler : Borlama, ray çeliği, sertlik, aşınma, sürtünme katsayısı, hacim kaybı, yüzey pürüzlülüğü, ANOVA.

Bilim Kodu : 91419

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOR OF RAIL STEEL HARDENED BY BORONIZING

Bilgehan KONDUL

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

May 2020, 78 pages

The high hardness values obtained by the boroning process are remarkable in terms of wear-oriented engineering problems. In this study, the metallographic structure and wear behaviors of boron coated rail steels were investigated. Boronizing of rail steels and increasing wear resistance by boronizing is unique for the literature. For this purpose, the wear tests of the rail steels, which were borided at 700 °C, 800 °C and 900 °C for 4 hours, were carried out under 2 different load (30 N and 50 N) and speed (0.1 m/s and 0.2 m/s) conditions. SEM, EDX, XRD and 3D topography methods are used in visual and elemental analysis of wear behavior of rail steel. The variance method (ANOVA) was used for the statistical analysis of the test results and the effect of shear rate, load and boronizing temperature parameters on friction coefficient, surface roughness and volume loss was analyzed for the first time quantitatively.

According to the experimental results, the thickness and hardness values of the boride layer increased with increasing boronizing temperature. The hardness of the rail steel, initially ~ 300 HV, reached the value of 1886, 2145 and 2590 HV at 700-800-900 °C, respectively. The highest layer thickness was obtained in the sample boronized at 900 °C with ~ 66 µm thickness. When microstructural characterizations of the samples were examined, it was observed that iron borides were dominant in the boride layer. A single phase (Fe₂B) structure was obtained in the bored layer of the sample boronized at 700 °C, and a double phase (FeB + Fe₂B) structure in the layers of samples boronized at 800 °C and 900 °C. Besides iron borides, the formation of MnB and CrB phases was also observed. When the wear behavior of the boronized rail steel is analyzed, a considerable increase in wear resistance has been achieved compared to the untreated sample. Thanks to the high hardness obtained with the boronizing method and the boron oxide (B₂O₃) layer formed on the material surface, the friction coefficient is minimized. The effect of the boronizing process on friction coefficient, volume loss and surface roughness was calculated as 87.60%, 84.43% and 66.78%, respectively. According to these results, the boroning process showed the greatest effect on wear behavior. Topography images taken from the surfaces show that boronized samples have a smoother surface form compared to untreated samples, and deep pits and intense fluctuations occur in untreated samples. No deformation has occurred in the sample boronized at 700 °C, except for negligible cracks and spalling defect. In the samples boronized at 800 °C and 900 °C, only spalling defect increased and no dominant deformation mechanism was observed.

Keywords : Boronizing, rail steel, hardness, wear, friction coefficient, volume loss, surface roughness, ANOVA

Science Code : 91419

TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasının planlanması, araştırılması ve yürütülmesi süresince ilgisini ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle tez çalıŐmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren çok kıymetli sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Hüseyin ÇETİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

ÇalıŐmam süresince maddi ve manevi her konuda yardımlarını esirgemeyen, büyük bir sabırla her an yanımda olan ve anlayışlarıyla destek olan başta annem ve babam olmak üzere aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	7
RAY ÇELİKLERİ.....	7
2.1. RAY ÇELİKLERİ VE MİKROYAPILARI.....	7
2.2. KİMYASAL BİLEŞİMLERİ.....	8
2.3. MANTAR SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN GEREKLİLİĞİ.....	8
BÖLÜM 3	10
BORLAMA İŞLEMİ	10
3.1. BORLAMA İŞLEMİNİN AVANTAJ ve DEZAVANTAJLARI.....	11
3.1.1. Borlama İşleminin Avantajları	11
3.1.2. Borlama İşleminin Dezavantajları	12
3.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ	13
3.2.1. Kutu Borlama.....	13
3.2.2. Sıvı Borlama	15
3.2.3. Gaz Borlama	16
3.2.4. Pasta Borlama	17

	<u>Sayfa</u>
3.2.5. Plazma Borlama.....	18
3.3. BORÜRLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ ve BORLANABİLEN MALZEMELER.....	19
3.3.1. Borürlerin Özellikleri.....	20
3.3.2. Fe-B İkili Denge Diyagramı	22
3.3.3. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği.....	23
3.3.4. Borür Tabakası / Borür Tabaka Kalınlığı	24
3.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORLAMA YÖNTEMİNE ETKİSİ.....	26
3.5. BORLAMA İŞLEM SICAKLIĞI VE SÜRESİNİN BORÜR TABAKA KALINLIĞINA ETKİSİ	28
3.6. BORLAMA İŞLEMİNİN ENDÜSTRİDE UYGULAMA ALANLARI.....	28
BÖLÜM 4	30
AŞINMA	30
4.1. ADHEZİF AŞINMA	31
4.2. ABRAZİF AŞINMA	31
4.3. YORULMA ve DELAMİNASYON AŞINMASI	33
4.4. OKSİDASYON AŞINMASI.....	34
BÖLÜM 5	35
MATERYAL VE METOT	35
5.1. RAY ÇELİĞİ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	35
5.2. BORLAMA PROSESİ.....	36
5.3. MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU	37
5.3.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX Analizi.....	37
5.3.2. Yüzey Pürüzlülük İşlemleri	38
5.3.3. X Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi	38
5.3.4. Mikro-Sertlik Ölçümleri	38
5.4. AŞINMA DENEYLERİ.....	39
5.5. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)	40

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6	42
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR	42
6.1. MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU	42
6.1.1. Borür Tabaka Kalınlıkları.....	42
6.1.1.1. Borür Tabakası EDX Analizleri.....	44
6.1.2. Borür Tabakasının XRD Analizleri	45
6.1.3. Mikro-Sertlik Değerleri	47
6.2. AŞINMA DENEYLERİNİN SONUÇLARI.....	48
6.2.1. Sürtünme Katsayısı.....	48
6.2.2. Hacim Kaybı.....	55
6.2.3. Yüzey Pürüzlülük ve Topoğrafya Analizleri.....	61
6.2.4. Aşınmış Yüzeylerin Görsel Analizi.....	65
BÖLÜM 7	69
SONUÇ VE ÖNERİLER	69
7.1. SONUÇ	69
7.2. ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi.	13
Şekil 3.2. Plazma borlama işlemin şematik olarak gösterimi	18
Şekil 3.3. Fe-B ikili denge diyagramı	22
Şekil 3.4. Borür tabakasının şematik olarak gösterimi	25
Şekil 4.1. Adhezif aşınmanın şematik olarak gösterimi	31
Şekil 4.2. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi	32
Şekil 4.3. Yorulma aşınmasının şematik olarak gösterimi	33
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan ray çeliğinin fotoğrafı.	35
Şekil 5.2. Borlama prosesi.....	36
Şekil 5.3. Aşınma izinin perspektif görünümü.	37
Şekil 5.4. Ball-on-Flat deney cihazı fotoğrafı.	39
Şekil 5.5. Borlanmamış ve borlanmış numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri (50 N, 0,2 m/s).....	40
Şekil 5.6. ANOVA yönteminin metodolojisi.	41
Şekil 6.1. Nano bor tozu ile borlanmış ray çeliğinin kesit SEM mikro yapısı. A) 700 °C, b) 800 °C, c) 900 °C (2.50 kx), c.1) 1.00 kx.....	43
Şekil 6.2. 900 °C’de 4 saat borlanmış numunenin EDX analizi.	45
Şekil 6.3. Borlanmış ray çeliğinin XRD analizleri. A) 700 °C, b) 800 °C, c) 900 °C.	46
Şekil 6.4. Borlanmış ray çeliğinin sertlik profili.	48
Şekil 6.5. Sürtünme katsayısı için değişkenlik grafiği.	49
Şekil 6.6. 30 N, 0,1 m/s deney koşullarındaki ray çeliğinin aşınma izlerinin SEM mikrografları (7 kx zoom ve 10 µm ölçek); a) İşlenmemiş, b) 900 °C, 4h.....	50
Şekil 6.7. EDX spektrumu.....	51
Şekil 6.8. Borür tabakası ve oksit tabakası oluşumunun şematik olarak gösterimi.	52
Şekil 6.9. Sürtünme katsayısını etkileyen parametreler; a) Yük, b) Kayma hızı, c) Borlama prosesi.....	54
Şekil 6.10. Borlanmamış ve borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri (Ra).....	54
Şekil 6.11. Aşınma izi derinlikleri; a) İşlenmemiş, b) 700 °C, c) 800 °C, d) 900 °C	56
Şekil 6.12. Hacim kayıpları için değişkenlik grafiği (mm ³).	57

Sayfa

Şekil 6.13. 50 N, 0.2 m / s test koşullarında ray çeliğinin aşınma izlerinin SEM mikrografları (7 kx); a) İşlenmemiş, b) 700 °C, c) 800 °C, d) 800 °C....	58
Şekil 6.14. Hacim kaybını etkileyen parametreler; a) Yük, b) Kayma hızı, c) Borlama prosesi.....	60
Şekil 6.15 Basma ve kayma gerilmelerinin etkisinin şematik olarak gösterimi.	61
Şekil 6.16. Aşınmış bölgelerin yüzey topoğrafyası.....	62
Şekil 6.17. Yüzey pürüzlülükleri için değişkenlik grafiği (µm).....	63
Şekil 6.18. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreler; a) Yük, b) Kayma hızı, c) Borlama prosesi.....	64
Şekil 6.19. Borlanmamış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları; a) 30 N, 0,1 m/s, b) 30 N, 0,2 m/s, c) 50 N 0,1 m/s, d) 50 N, 0,2 m/s.	65
Şekil 6.20. 700 °C’de borlanmış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları.....	67
Şekil 6.21. 800 °C’de borlanmış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları.....	67
Şekil 6.22. 900 °C’de borlanmış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları.....	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Borlanmış çeliklerin diğer işlem görmüş malzemelerle karşılaştırılması	11
Çizelge 3.2. Kutu borlama yönteminde kullanılan bor verici maddelerin özellikleri	14
Çizelge 3.3. Sıvı borlama yönteminde kullanılan bazı bor kaynakları	16
Çizelge 3.4. Gaz borlamada kullanılan bazı gazlar ve özellikleri	16
Çizelge 3.5. Farklı metal borürler ve bazı özellikleri	21
Çizelge 3.6. Farklı sıcaklıklarda borlanmış C45 çeliğinin tabaka kalınlıkları	28
Çizelge 3.7. Borlama işleminin kullanım alanları	29
Çizelge 5.1. Deneylerde kullanılan ray çeliğinin kimyasal bileşimi.	35
Çizelge 5.2. Borlama prosesi ve aşınma deneyleri için kullanılan parametreler.	39
Çizelge 6.1. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri (μ).	49
Çizelge 6.2. Sürtünme katsayısı için ANOVA tablosu.	52
Çizelge 6.3. Tüm deney koşulları için borlanmış ve borlanmamış numunelerin hacim kayıpları (mm^3).	57
Çizelge 6.4. Hacim kaybı için ANOVA tablosu (mm^3).	59
Çizelge 6.5. Yüzey pürüzlülükleri (R_t) için ANOVA tablosu (μm).	64

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

FeB	: demir borür
Fe ₂ B	: demir borür
MnB	: mangan borür
CrB	: krom borür
Ni ₃ B	: nikel borür
TiB	: titanyum borür
TiB ₂	: titanyum diborür
CoB	: kobalt borür
Co ₂ B	: kobalt borür
NiB	: nikel borür
NbB ₂	: niyobyum borür
Fe ₃ C	: sementit
B ₄ C	: bor karbür
SiC	: silisyum karbür
TiC	: titanyum karbür
CO	: karbonmonoksit
KBF ₄	: potasyum floroborat
Na ₂ CO ₃	: sodyum karbonat
Na ₂ B ₄ O ₇	: boraks
Al ₂ O ₃	: alüminyum oksit
NH ₄ Cl	: amonyum klorür
(NH ₄) ₃ BF ₄	: amonyum floroborat
NaBF ₄	: sodyum tetrafloroborat
BaF ₂	: baryum florür
B ₂ O ₃	: bor oksit
HBO	: metabor asit

BF ₃	: bor tri florid
BCl ₃	: bor tri klorid
BBr ₃	: bor tri blorid
(CH ₃) ₃ B	: bor tri metil
(C ₂ H ₅) ₃ B	: bor tri etil
Ti	: titanyum
Cl	: klor
B	: bor
Fe	: demir
C	: karbon
Al	: alüminyum
Si	: silisyum
S	: kükürt
P	: fosfor
Mn	: manganez
V	: vanadyum
Ar	: argon
N ₂	: nitrojen
NH ₃	: amonyak
HV	: vickers sertliği
HB	: brinell sertliği
Pa	: Pascal
°C	: santigrat derece
N	: newton
dev/dak	: bir dakikadaki devir sayısı
µm	: mikrometre
h	: saat
gr	: gram
Ra	: ortalama çizgi değeri
Rt	: maksimum tepe- çukur yüksekliği

KISALTMALAR

SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopu)
EDX	: Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Işını)
XRD	: X-ray Diffraction Analysis (X-Işınları Difraksiyon Analizi)
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
PVD	: Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
MSS	: Martensitic Stainless Steel (Martensitik Paslanmaz Çelik)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Demiryolu taşımacılığının emniyet ve güvenilirliğinin sağlanmasında tekerlek ve raylar büyük önem taşımaktadır [1–4]. Ray çelikleri makas geçişlerinde ve kurplarda yoğun bir şekilde sürtünmeye maruz kalmakta ve rayların temas yüzeylerinde aşınma kusurları meydana gelmektedir [1,4,5]. Tekerlek/ray temasında meydana gelen aşınma mekanizmaları çatlak ve çöküntü oluşumu, soyulma, adhesif aşınma ve delaminasyon aşınması olarak sınıflandırılabilir [6]. Delaminasyon aşınması ve adhesif aşınma diğerlerine göre daha deforme edicidir [6,7]. Aşınmış rayların yeniden kullanımı için taşlama ve yeniden profillemeye tekniklerinin kullanıldığı fakat bu tekniklerin işletme maliyetini yükselttiği literatürde belirtilmiştir [1]. Bu yüzden rayın aşınma direncinin artırılması için ısıl işlem ve kaplama yöntemlerinin araştırılması önem taşımaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda mühendislik malzemelerinin mekanik performansını arttırmak için ağırlıklı olarak sementasyon, nitrürasyon, borlama, kromlama ve bilyalı dövme yöntemleri uygulanmaktadır [8–16]. Bu yöntemler aşınma davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Bu yöntemler içerisinde borlama prosesi, yüzeyde katı yağlayıcı etkisi oluşturabilme kabiliyeti ile dikkat çekmektedir [9,14,15,17–19]. Termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama prosesinde, bor atomlarının malzeme yüzeyine yayılarak malzemelerle borür bileşikleri oluşturduğu, substrat ile kusursuz bir yapışma sağladığı ve tribolojik özellikleri iyileştirdiği literatürden bilinmektedir [8,20–22]. Endüstriyel uygulamalarda borlama işlemi çelik, dökme demir (gri, sfero, sinterlenmiş), titanyum, kobalt, nikel ve molibden alaşımlı malzemelere uygulanabilmektedir [21,23]. Katı, sıvı ve gaz formunda yapılabilen borlama işlemi genellikle 700-1000 °C sıcaklıklarda uygulanmaktadır [21]. Katı formda yapılan kutu (paket) borlama, uygun maliyetli ve diğer borlama işlemlerine göre daha kolay yapılabilen bir yöntemdir [21,24,25].

Literatüre bakıldığında borlama işleminin mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerini önemli oranda etkilediği görülmektedir. Borlama işleminin sertliği arttırdığı (~2400 HV), sürtünme katsayısını ve aşınma oranını düşürdüğü bilinmektedir [26–29]. Gutierrez-Noda vd. 2019 yılında AISI M2 çeliği yüzeyinde borlama işlemi sonucu oluşan borür tabakasının tribolojik ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikro sertlik sonuçlarına göre maksimum sertlik değeri 25 GPa olup bu değer yüzeye en yakın bölgede elde edilmiştir. Tribolojik sonuçlara bakıldığında, borlama işlemi sayesinde sürtünme katsayısının düşürüldüğü dolayısıyla aşınma oranının da azaltıldığı belirtilmiştir [20]. Kayali vd. 2012 yılında borlanmış AISI 52100 ve AISI 440C çeliklerini incelemiş ve işlem görmemiş AISI 52100 çeliğinin yüzey sertliğinin 311 HV iken borlama sonucunda yüzey sertliğinin 1989 HV değerine ulaştığını belirlemiştir. Benzer şekilde, AISI 440C çeliği borlama sonrasında 2170 HV sertlik değerine çıkmıştır. Araştırmacılar her iki çelik için kaplama tabakasında FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazlarının oluştuğunu XRD ile tespit etmişlerdir [21]. Şahin ve Meriç 2002 yılında borlamanın dökme demir üzerine etkisini incelemek için gri demir, sünek demir ve sıkıştırılmış grafitli dökme demiri kutu borlama yöntemi ile borlamışlardır. Borlanan numunelerin metalografik incelenmesi sonucunda, oluşan bor tabakasının yapısının dış şeklinde olduğu ve bu tabakanın malzeme yüzeyinde homojen bir dağılım sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, işlem süresinin ve sıcaklığın artmasıyla tabaka kalınlığının arttığı ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra tabakaya X-ışını difraksiyon analizi uygulanmış ve yüzeyde FeB, Fe₂B ve Fe₃C fazlarının bulunduğu doğrulanmıştır. Ayrıca araştırmacılar artan zaman ve sıcaklıkla birlikte FeB miktarının da arttığını belirtmişlerdir. Üç farklı tipteki dökme demir arasında en kalın bor tabakasının 930 °C'de 6 saat boyunca borlanan gri dökme demirde olduğu, aynı koşullar altında sünek ve sıkıştırılmış grafit dökme demirin ise aynı tabaka kalınlığına sahip olduğu gözlenmiştir. Sertlik değerlerine bakıldığında ise borlanmamış numunelerin mikro sertlik değerleri 289 ile 247 HV arasında değişirken, borlanmış numunelerin sertlikleri 2463-2683 HV'ye ulaşmıştır. Böylece, numunelerin yüzey sertliklerinin borlama işlemi ile ~10 kat arttırıldığı kanıtlanmıştır [28]. Motallebzadeh vd. 2015 yılında 31CrMoV9 ve X40CrMoV5-1 çeliklerinin yüksek sıcaklık altındaki aşınma davranışını borür tabakalarının faz yapısına göre değerlendirmişlerdir. Çalışmada disk şeklindeki (35 mm çap ve 6 mm yükseklik) numuneler 900 °C'de 4 saat ve

950 °C’de 6 saat borlama işlemine tabi tutulmuştur. Aşınma testleri oda sıcaklığında (RT) ve 500 °C’de gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonunda yüzeyde oluşan aşınma izleri 2D optik profilometre tespit edilmiş ve yüzeyler taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Deneyle sonuçunda borlanmış çeliklerin borür tabakaların yaklaşık 65 mikron kalınlığında FeB ve Fe₂B fazlarından oluştuğu gözlenmiştir. Her iki borlama koşulu için oda sıcaklığında benzer sürtünme özellikleri ve üstün aşınma direnci gözlenmiş fakat 500 °C’de temas bölgelerindeki çatlaklardan ötürü aşınma direncinin düştüğü gözlenmiştir [30]. Taktak 2007 yılında AISI H13 ve AISI 304 çeliklerine borlama işlemi uygulamış ve borürlerin mekanik özelliklerini incelemiştir. Borlama işlemi için 800-850-900-950 °C’de 3, 5 ve 7 saat borlama parametreleri kullanılmıştır. Borür katmanında FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazlarının oluşumu XRD ile ortaya konulmuştur. Vickers mikro sertlik test cihazı ile tabakaların sertliği AISI H13 ve AISI 304 çeliklerinde sırasıyla yaklaşık 1860 ve 2150 HV olarak ölçülmüş ve ölçülen değerlerin baz çeliklerinden daha yüksek olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca sertlik değerlerinin işlem sıcaklığına ve zamana bağlı olarak arttığını ifade etmişlerdir. Kaplamaların yüzey pürüzlülüğü ölçümü için optik profilometre kullanılmış ve borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülüğünün işlem sıcaklığı ve zamanındaki artışla arttığı görülmüştür. Ayrıca borür tabakasının AISI 304 çeliğinde düz ve pürüzsüz bir yapıya sahip olduğu, AISI H13 çeliğinde ise düzensiz bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir [31]. He vd. 2015 yılında yüksek karbonlu çeliğin (CPM® S90V) düşük sıcaklıkta borlanmasını malzemedeki sertlik değişimi ve aşınma dayanımı açısından incelemişlerdir. Borlama işlemi 780 °C’de 2,4,12 ve 24 saatlik süre ile gerçekleştirilmiş ve borlama sonrası oluşan tabaka kalınlıkları sırasıyla 60 µm, 130 µm, 400 µm, 420 µm olarak ölçülmüştür. Tabaka kalınlıklarının borlama zamanındaki artışla birlikte arttığı böylelikle tespit edilmiştir. XRD diyagramlarına göre borlama sonucunda FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğu doğrulanmıştır. Yüzey sertlikleri Vickers sertlik test cihazında ölçülmüş ve borlama işlemi sayesinde numunenin yüzey sertliği 680 HV’den 1070 HV’ye çıktığı belirtilmiştir. Borlamanın kazandırdığı diğer bir avantaj ise sürtünme katsayısının çelik-çelik temasında % 17, elmas-çelik temasında ise % 65 oranında düşürülmesidir [13]. Aydemir ve Şen 2003 yılında soğuk iş takım çeliklerine borlama işlemi uygulayarak çelikler üzerindeki aşınma davranışlarını ve oluşan borürlerin karakterizasyonunu incelemişlerdir. Borlama işlemi için numuneler 950 °C’de 2,4,6

ve 7 saat sürelerde ısıl işleme tabi tutulmuştur. Yapmış oldukları mikroyapı incelemeleri sonucunda çeliklerin yüzeyinde oluşan borür tabakalarının en dış kısmında koyu gri renkte FeB fazı, iç kısmında ise Fe₂B fazının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Optik mikroskop bünyesinde incelenen çeliklerin borür tabaka kalınlıkları AISI D2 çeliğinde 46-135 µm ve Chipper Wicking çeliklerinde ise 51-142 µm olarak hesaplanmıştır. Araştırmacılar oluşan borür tabakalarının kısmen kolonsal yapılı, kompakt ve düz karakterli bir yapı sergilediğini ifade ederken aynı zamanda borür tabakasının fazla kalın olmasıyla birlikte çatlak oluşumunun da meydana geldiğini belirtmişlerdir. Sertlik değerleri göz önüne alındığında borlanmamış numunelere göre borlanmış çeliklerin sertliğinde artış olduğunu açıkça vurgulamışlardır. Yapılan ball-on-disk aşınma deneyi sonuçlarına göre borlanmış soğuk iş takım çeliklerinin aşınma dirençlerinin ıslah işlemiyle sertleştirilen soğuk iş takım çeliklerine göre yaklaşık 2 kat daha dirençli olduklarını tespit etmişlerdir [32]. AISI 1030 çeliğine uygulanan borlama işleminin abrasif aşınma direnci üzerindeki etkilerini araştıran Çelik vd. 2008 yılında, AISI 1030 çeliğine 900, 950, 1000 ve 1050 °C'de 2, 4 ve 6 saat sürelerde, katı ortamda EKabor®2 toz bor verici karışımla birlikte borlama işlemi uygulamışlardır. Borlama ile oluşan borür tabakasının yapısı optik mikroskop ile incelenmiştir. Yüzeye yakın olan tabakada FeB fazı, alt kısmında ise Fe₂B fazının olduğu tespit edilmiştir. FeB faz tabakasının daha koyu renkte olduğu gözlenmiştir. Oluşan borür tabakasının kalınlığının artan sıcaklık ve süreyle birlikte arttığı görüntü analiz sistemi ile belirlenmiştir. Borür tabakasının bazı bölgelerinde yüzeye paralel doğrultuda çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Bunun sebebinin fazlar arasındaki termal genleşme katsayılarının farklı olması ve borür tabakasındaki kalıntı gerilmelerin olduğu ifade edilmiştir. Tüm aşınma deneyleri ise 150 dev/dk dönme hızında ve 42 N sabit yük altında yapılmış olup ardından ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Aşınma deneyleri sonucunda aşınma direncinin borür tabakasına bağlı olarak işlem görmemiş numunelere göre yüksek oranda arttığı tespit edilmiştir. Borür tabakalarında en düşük 1227 HV en yüksek 1625 HV sertlik değeri ölçülmüştür. Bu değerlerin ise işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olarak arttığı gözlenmiştir [33]. Er ve Par 2004 yılında AISI 1030 ve AISI 1050 çeliklerine bor yayınıyla yüzey sertleştirme işlemi uygulamış, malzemelerin yüzey sertliği ve abrasif aşınma dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, numunelere 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat süre için toz borlama tekniği ile (katı ortamda)

yüzey sertleştirme metodu uygulamışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda borlama işlemi uygulanmış malzemelerin yüzey sertlik değerinin işlenmemiş hallerine göre yaklaşık 8-10 kat arttığı tespit edilmiştir. Borlu tabaka kalınlıklarına bakıldığında borlama süresinin artmasıyla birlikte tabaka kalınlığının da düzenli olarak arttığı görülmüştür. Abrasif aşınma deney sonuçlarına göre ise borlanan çeliklerin abrazyon aşınma dayanımlarında önemli oranda artış elde edildiği ifade edilmiştir [34].

Ray çeliklerinin aşınma dayanımlarının artırılması ilişkin literatür bilgisi sınırlıdır. Lewis vd. 2016 yılında R260 çeliğini lazer yöntemi ile kaplamışlardır. Kaplama ile ray aşınmasının minimizasyonunu hedefleyen araştırmacılar; MSS, stellite 6 ve stellite 12 ile kaplanan numunelerde işlenmemiş numuneye göre tekerlek/ray çeliği aşınmasında azalma olduğunu kaydetmişlerdir [35]. Aladesanmi vd. 2019 yılında Ti ve TiB₂ tozunu ray çeliğine lazer kaplama metodu ile kaplamışlardır. Kaplama sonucunda ~1500 HV sertlik değerine ulaşmışlardır [36]. Benzer şekilde Yazıcı ve Yılmaz 2018 yılında R260 kalite ray çeliğinin aşınma direncini incelemek amacıyla ray çeliğini yüksek güçlü diyet lazer ile ısıl işleme tabi tutmuşlardır. İşlem görmemiş numunenin sertliği 277 HV iken, lazerle işlem görmüş numunelerin sertlikleri 1100 °C, 1200 °C ve 1300 °C'de sırasıyla 836 HV, 851 HV ve 889 HV değerine yükselmiştir. Artan yüzey sertliği ile birlikte sürtünme katsayısı ve hacim kaybı değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Araştırmacılar bu durumu, sıcaklığın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve bu durumun da tribolojik performansı olumsuz yönde etkilediğine bağlamışlardır [1].

Çalışmalarda ray çeliklerinin genellikle lazer kaplama ile yüzey dayanımının artırılması hedeflenmiş fakat borlama prosesi araştırılmamıştır.

Bu çalışmanın özgün değeri, ray çeliğinin borlama karakteristiğinin belirlenmesi ve borlanmış numunelerin aşınma davranışının araştırılmasıdır. Borlama prosesi ile deforme olmuş rayların tekrar kullanılabilirliğinin sağlanması ve makas-kurp geçişlerinde kullanılan rayların aşınma direncinin artırılması sağlanabilir. Borlanmış numunelerin aşınma davranışlarının farklı yük ve hız koşullarında incelenmesi çalışmanın diğer bir özgün değeridir. Deney sonuçları varyans metodu ile incelenerek, bor kaplama, aşınma hızı ve yük etkileşimi literatürde ilk kez nicel

olarak analiz edilmiştir. Malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakasının metalografik incelemeleri SEM, EDX ve XRD spektral analiz ile yapılmış ve tabakaların mikro sertlikleri ölçülmüştür. Tribolojik analiz için 4 farklı hız-yük koşulunda aşınma testleri yapılmıştır. Borlanmış ray çeliklerinin aşınma direnci sürtünme katsayısı, hacim kaybı, 3D yüzey topoğrafyası, aşınma izi görüntüleri (SEM) ve EDX verileri kullanılarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

BÖLÜM 2

RAY ÇELİKLERİ

2.1. RAY ÇELİKLERİ VE MİKROYAPILARI

Rayların kullanım ömürleri; ray üretimleri esnasında uygulanan ısıtma işlemleri, kurulum aşamasında yapılan kaynak, kurulumlarından sonra meydana gelen sürtünme, aşınma ve yorulma gibi fiziksel nedenlerden dolayı değişiklik göstermektedir. Ayrıca ray çeliklerinin içyapısı ve mekanik özellikleri de bu durumu etkilemektedir [37].

Demiryollarında genellikle perlitik mikroyapıya sahip ray çelikleri kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra beynitik, östenitik ve temperlenmiş martenzitik ray çelikleri de üretilmektedir. Perlitik mikroyapı; yumuşak ferritik yapı içinde ince, uzun ve sert sementitlere (Fe_3C) sahiptir [38].

Perlitik mikroyapılı ray çeliklerinin düşük maliyetli olması, düşük aşınma özelliklerine ve yüksek dayanıklılığa sahip olmaları demiryolu ray ve tekerleklerinde en çok kullanılmalarına sebep olmuştur. Yorulma ve aşınmaya karşı dayanımlı olmaları; perlitik mikroyapı içerisindeki karbon miktarının artırılması, alaşım elementleri ilavesi ve rayların mantar kısmının sertleştirilmesi ile geliştirilmektedir [37]. Ray çeliklerine uygulanan ısıtma işlemleri ile ray çelikleri daha yüksek sertliğe ulaşır ve dolayısıyla daha yüksek aşınma dayanımı oluştururlar.

Beynitik mikroyapılar ise çeliğe eklenen elementler ve uygun soğutma oranı ile oluşturulmaktadır. Bu mikroyapı ile elde edilen rayların, tokluk değerleri iyi ve darbelere karşı dayanımlıdır [38].

Östenitik mikroyapıdaki raylar, düşük akma dayanımlarına sahip olmalarından dolayı çok düşük kırılma dayanımı gösterirler ve aşınma davranışlarının iyi olmaları sebebi ile genellikle makaslarda kullanılmaları tercih edilirler [37].

Temperlenmiş martenzit ray çelikleri ise sertliğin yanında iyi bir tokluk değerlerine sahiptir. Fakat aşınma dayanımları bu çelikler için istenilen seviyede değildir. Martenzitik ve beynitik çeliklerin demiryolu rayı olarak tercih edilmemesinin nedeni, düşük karbon oranı içerdiklerinden dolayı düşük aşınma dayanımı göstermeleridir [37].

2.2. KİMYASAL BİLEŞİMLERİ

Ray çeliklerinin kimyasal bileşimlerine bakıldığında, yapılarında demir elementinin (Fe) yanı sıra karbon (C), silisyum (Si), manganez (Mn) gibi yararlı elementlerin ve kükürt (S), fosfor (P) gibi zararlı elementlerin bulunduğu görülmektedir.

Çeliğin sertlik ve dayanımını artıran en önemli element kabondur. Fakat karbon miktarının arttırılması malzemelerin gevrekleşmesine sebep olmaktadır. Ray çelikleri için genellikle % 0,4-0,8 arasında karbon bulunmaktadır. Silisyum içeriğinin ray çeliklerinde genellikle % 0,35-0,50 arasında olması istenmektedir. Silisyum, çelik üretimi için oksijen giderici olarak kullanılan elementlerden biridir. Ray çeliğindeki manganez içeriği % 0,8-2,4 arasında olmalıdır. Fosfor elementi % 0,03-0,08'den fazla olmamalıdır. Kükürt ise ray çeliği bünyesinde istenmeyen bir alaşımdır. Demir ile bileşik oluşturarak malzemenin çok fazla gevrekleşmesine neden olmaktadır. Kükürt miktarının % 0,06'ya kadarı kabul edilebilmektedir [37].

2.3. MANTAR SERTLEŞTİRME İŞLEMİNİN GEREKLİLİĞİ

Kaba taneli perlitik bir yapıya sahip olan R260 kalitedeki ray çelikleri, yaklaşık olarak 260 HB sertliğe sahiptirler. Bu durum ivmelenmelerin fazla olduğu bölgeler ve kurplar gibi yerlerde ray çeliğinin kısa sürede deformasyona uğramasına sebep olmaktadır [39].

Ray yüzeylerine etki eden yük miktarının ve trafik yoğunluğunun artması ile ray-tekerlek temas bölgelerinde gerilim artmaktadır. Buna bağlı olarak yuvarlanma temas yorulması artar ve aşınma direncinde düşüş yaşanır. Ray eliklerine yapılan ısıl işlemler ve sonrasında uygulanan sıcak haddeleme işlemleri; ray çeliklerinin aşınma direncinde, sertliğinde ve mukavemetinde iyileşmelere yol açmaktadır. Mantarı sertleştirilmiş ray çelikleri sayesinde aşınma direncinde artış ve ayrıca yuvarlanma temas yorulmasına karşı yüksek mukavemet elde edilmektedir [39].

Demiryollarında R260 kalitedeki raylara göre mantarı sertleştirilmiş olan rayların kullanılması, rayların kullanım mrlarını 7 kat arttırmaktadır [38]. Bu nedenle ray mantarının sertleştirilmesi işlemleri rayların kullanım ömrü açısından ve dolayısıyla maliyet açısından büyük önem taşımaktadır.

BÖLÜM 3

BORLAMA İŞLEMİ

Borlama yöntemi, termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemi olup bor elementinin yüksek sıcaklıkta çelik yüzeyine yayılımı ile gerçekleşmektedir. Borlama işleminin diğer yüzey sertleştirme metotlarına göre avantajı; kaplama tabakasının çok sert olması, aşınmaya ve korozyona karşı dayanımlı olması ve yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı dirençli olmasıdır [40]. Borlama ısıl işlemi; alaşımlı ve alaşımsız çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler, demir ve demir dışı metal ve alaşımları (nikel kobalt, molibden titanyum vb.), dökme demir gibi birçok malzemelere uygulanabilmektedir [40,41].

Kaplama yöntemleri olarak PVD, CVD, plazma spreyi ve termokimyasal uygulamalar kullanılmasının yanı sıra borlama işlemi de endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan en önemli yüzey sertleştirme yöntemlerinden biridir [42]. Bu yöntem ile birlikte yüksek sertlik değerleri elde edilirken aynı zamanda çok düşük sürtünme katsayıları elde edilmektedir [43]. Genel olarak borlama işlemi, malzeme yüzeyine yüksek sıcaklıkta borun difüze edilmesi ile malzeme yüzeyinde FeB ve Fe₂B fazlarının meydana gelmesi ile gerçekleşmektedir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu bölgeler borür tabakasının ilk oluşmaya başladığı kısımlarıdır. Bu kısımlarda Fe₂B çekirdekleri oluşmakta ve gelişmektedir [41]. Numune içinde ilk borür çekirdekleri büyüdükten sonra ortamda yeteri kadar bor yoğunluğu sağlanmışsa FeB fazı da oluşur. Borlama işleminin son aşamasında yalnızca FeB fazı meydana gelir ve Fe₂B fazına göre daha kısa sürede büyüme gösterir [41]. Endüstriyel uygulamalarda Fe₂B'nin FeB'den daha az gevrek olması sebebiyle tek fazlı borür tabakaları (Fe₂B) tercih edilir [43].

Borlama işlemi, malzemelere 700–1000 °C sıcaklıklarında ve 1-10 saat süreyle katı, sıvı ve gaz gibi farklı ortamlarda uygulanabilmektedir. Bu ortamların yanı sıra plazma ve pasta borlama gibi yeni yöntemler de kullanılmaktadır [44]. Borlama ile yüzey sertleştirme işleminde, bor kaynağının dışında aktivatör madde, dolgu malzemesi ve deoksidanlardan yararlanılmaktadır. Aktivatör madde kaplama tabakasının düzenli bir şekilde büyümesini sağlarken dolgu malzemesi ve deoksidanlar ise oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturmakta ve malzemelerin baz malzemeye yapışmasını engellemektedirler [41].

3.1. BORLAMA İŞLEMİNİN AVANTAJ ve DEZAVANTAJLARI

3.1.1. Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminde, borür tabakasının çok yüksek sertlik ve ergime sıcaklığına sahip olması en önemli karakteristik özelliklerinden biridir [44]. Kaplama tabakasının sertliği demir esaslı malzemelerde ~ 650 °C'ye yani alt kritik sıcaklığa kadar kalıcıdır [45]. Sementasyon, nitrasyon gibi diğer geleneksel sertleştirme yöntemlerine göre borür tabakalarının sertliği çok daha yüksek sonuçlar vermektedir. Çizelge 3.1'de borlama işlemi uygulanmış metaller ile diğer sert metallerin karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3.1. Borlanmış çeliklerin sertliklerinin diğer işlem görmüş malzemelerle karşılaştırılması [46].

Malzemeler	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış Yumuşak Çelik	1600
Borlanmış AISI H13 Takım Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş A2 Takım Çeliği	630-700
Yüksek Hız Çeliği BM 42	900-910
Nitrasyon Çelikleri	650-1700
Karbürleşmiş Düşük Alaşımlı Çelikler	650-950
Sert Krom ile Kaplama	1000-1200
B ₄ C	5000
SiC	4000
TiC	3500
Elmas	10000

Çizelge incelendiğinde borlama ısı işlemleri ile elde edilen borür tabakasının diğer yüzey sertleştirme metodlarına göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir.

Kaplama tabakasının yüksek sertliğe sahip olması, sürtünme katsayısının düşük olmasını ve malzemelerin aşınmaya karşı dirençli olmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra borlama işleminin diğer avantajları aşağıda sıralanmıştır [46,47].

- Borlanmış yüzeyler 850 °C sıcaklığa kadar oksidasyona karşı direnç gösterebilirler.
- Yüksek sıcaklıklarda bile sertliklerini koruyabilirler ve bu durum borlama işleminin, nitrürleme işlemine göre avantajıdır.
- Birçok malzemeye uygulanabilirler.
- Borlama işlemi sonucunda meydana gelen borür tabakasında düşük sürtünme katsayısı elde edilir.
- Malzemelerin korozyon ve oksitlenme dirençleri artış gösterir.
- Borlama işlemi uygulanmış malzemelerin kullanım ömürleri uzundur.
- Borlama sonucunda meydana gelen tabakanın sertliği çok yüksek olduğu için malzemelerin aşınma dayanımları yüksek oranda arttırılır bu da büyük bir avantaj sağlar.
- Karmaşık geometrili malzemelere dahi uygulanabilirler.

3.1.2. Borlama İşleminin Dezavantajları

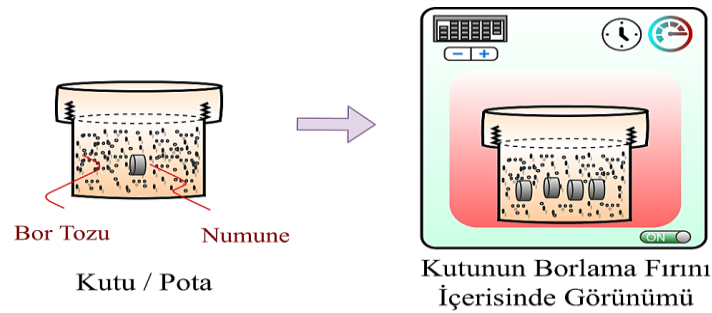
- Plazma nitrürleme ve gaz karbürleme işlemleri kadar esnek değildir ve işçiliği biraz daha fazladır.
- Hassas işlemlerde elmas uç kullanılmalıdır.
- Çeliklerin eğilme ve yorulma dayanımlarına bakıldığında çok az artış görülür ve borlama işlemine tabi tutulmuş malzemelerin eğme işlemleri kısıtlanır.
- Borlama işleminde istenilen sonuçların elde edilmesi için borlama atmosferik koşullarda yapılmalıdır.
- Yüksek sıcaklıklarda işlem yapmak gereklidir.
- Malzemelerin yapı bütünlüğünü koruyabilmek için borlama sonrasında malzemelere temperleme ve sertleştirme yapmak gerekebilir.

3.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ

Bor genellikle demir ve demir dışı malzemelerin yüzeylerinin sertleştirilmesinde ve demir esaslı malzemelerde alaşım elementi olarak kullanılmasında tercih edilir [43]. Borlama işleminde, yüksek sıcaklık etkisi ile bor atomları malzeme yüzeyine difüze olurlar ve baz malzeme atomları ile borür oluştururlar. Bu işlemde bor kaynağı olarak herhangi bir bor bileşiği tercih edilebilir. Borlama ortamı katı, sıvı, gaz ve plazma ortamında olabilir. Fakat boraks ile sıvı veya gaz ortamlarında yapılan borlama işlemlerinde malzeme yüzeyinin kirlenmesi uygulama bakımından dezavantajlı görülmektedir [48]. Borlama ısıl işleminde borür tabakalarının oluşumu birçok etkene göre farklılık göstermektedir. Bunlar borlama işleminde kullanılan yöntem, borlama süresi ve sıcaklığı ve işlem yapılacak malzemenin cinsidir [43]. Kaplama tabakalarının oluşumunda termo-kimyasal yöntem olarak kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlama kullanılırken termo-kimyasal olmayan yöntem olarak plazma borlama kullanılabilir [49].

3.2.1. Kutu Borlama

Kutu borlama yöntemi, borlama işlemi yapılacak malzemenin toz karışımı olan borlu ortamda yaklaşık 700-1000 °C sıcaklık ve 1-8 saat sürelerde fırınlanması işlemi ile gerçekleşmektedir. Borlama ısıl işleminde genellikle sıcaklığa dayanıklı paslanmaz çelik kutu/pota kullanılmaktadır [44]. Bu kutu içerisinde borlama yapılacak numunenin çevresi bor tozu ile kaplanır. Ardından üst kısma dolgu malzemesi eklenerek hava geçişi olmayacak şekilde kutu kapatılır ve fırınlama işlemi gerçekleştirilir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kutu borlama yönteminin şematik gösterimi.

Kutu borlama işleminde özel bir tekniğe ihtiyaç duyulmadığı için ve çok az bir ekipmanla işlem gerçekleştirildiğinden bu yöntem kolay ve emniyetlidir [44,45]. Kullanılan bor bileşenleri her bir uygulama için farklılık gösterebilir. Kutu borlama için toz karışım bileşenleri; bor kaynağı, akışkanlar ve aktivatör maddeden oluşmaktadır [50]. Bu yöntem sementasyon yöntemine benzer fakat işlemin kolay olması, ekipmanların kolay temin edilebiliyor olması, toz bileşenlerinin rahat bir şekilde değiştirilebilmesi ve maliyet açısından ucuz olması gibi etmenlerden dolayı kullanım alanı yaygın olan bir yöntemdir [50]. Yüksek iç gerilmeler oluşmaması, çatlaklar ve kalkmaların gözlenmemesi için borlama işleminde kullanılan kutunun fırın hacminin % 60'ını geçmemelidir [45]. Kutu içerisine yerleştirilen numuneler birbirine değmeyecek şekilde yerleştirilmelidir. Borlama işlemlerinde yaygın olarak kullanılan bor tozlarının bileşimi aşağıda verilmiş olup, kullanılan bazı bor verici maddelerin özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir [44,45,50,51].

Yaygın olarak kullanılan toz karışımı bileşenleri (% ağırlıkça);

- %95 Amorf Bor, %5 KBF₄
- %5 B₄C, %5 KBF₄, %90 SiC
- %50 B₄C, %15 Na₂CO₃
- %95 B₄C, %15 Na₂B₄O₇
- %50 B₄C, %45 SiC, %5 KBF₄
- %84 B₄C, %16 Na₂B₄O₇
- Amorf bor
- % 79 B₄C, %16 Na₂B₄O₇, %5 KBF₄

Çizelge 3.2. Kutu borlama yönteminde kullanılan bor verici maddelerin özellikleri [44,45,50].

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı (gr.)	Teorik Miktarı (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)
Amorf Bor	B	10,82	97-97	2050
Ferro-Bor	-	-	17-19	-
Bor Karbür	B ₄ C	55,29	77,28	2450

Bor karbür (B₄C), amorf bor ve ferrobor yaygın olarak kullanılan bor kaynaklarından [45]. Kalın borür tabakası elde edilmesinde bu bor kaynaklarının

kullanılmasının önemi büyüktür. Dolgu maddesi olarak genelde SiC ve Al₂O₃, aktivatör madde olarak ise KBF₄, NH₄Cl, (NH₄)₃BF₄, NaBF₄, BaF₂, Na₂CO₃ ve Na₂B₄O₇ tercih edilmektedir [44]. Tane boyutu küçük olan borlama maddelerinin kullanımı avantaj sağlamaktadır. Çünkü tane boyutunun küçülmesi ile temas alanı artar ve bor atomlarının yüzeye yayılımı kolaylaşır. Böylece kaplama tabakasının kalınlığı ve mikro sertliği artırılmış olur [44].

3.2.2. Sıvı Borlama

Sıvı borlama, bor sağlayıcı ortamın sıvı olduğu borlama yöntemidir. 700-1000 °C sıcaklıklarda ve 2-6 saat süreyle malzemelere akışkan ortamda borlama işlemi uygulanır. Bu işlem için elektrolitli, elektrolitsiz ve derişik çözeltiler kullanılabilir [46]. Temel bir elektroliz devresinde olduğu gibi burada da anot ve katot bölümleri mevcuttur. Anot için grafit, katot için ise baz malzeme esas alınmaktadır. Uygun maliyetli olması ve uzmanlık gerektirmemesi bu yöntemin avantajıdır [47]. Yöntemin dezavantajları ise şunlardır [41];

- Borlama işlemi için kullanılacak fırının korozif ortama karşı dayanıklı olması gerekmektedir.
- Borlama işlemi bittiğinde malzeme yüzeyinde tuz kalıntıları oluşur. Aynı zamanda yüzeyde tepkimeye girmeyen bor atomları görülür. Bunların temizlenmesi hem zaman hem de maliyet açısından olumsuzdur.
- Banyo viskozitesinin artmaması gerekir. Bunun sağlanması için tuz kullanılır ve bu da extra maliyet demektir..

Sıvı borlama yöntemi tercih edilen düşük alaşımlı çeliklerde yüksek akım yoğunluğu kullanılarak, kısa süreli bir borlama işlemi ile çok ince bir kaplama tabakası elde edilir. Kalın kaplama tabakası istenilen alaşımlı çeliklerde ise düşük akım yoğunluğu uygulanarak uzun süreli borlama işlemine tabi tutulur [41]. Ekonomik ve pratik olmasından dolayı, malzeme yüzeyinin tuz banyosunda seramik bir malzeme ile kaplanması da fayda sağlayabilir [41].

Sıvı borlama işlemi için birçok bor kaynağı kullanılmaktadır. Bu kaynaklardan bazıları özellikleriyle birlikte Çizelge 3.3'te verilmiştir

Çizelge 3.3. Sıvı borlama yönteminde kullanılan bazı bor kaynakları [46].

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı (g/mol)	Teorik Bor Ağırlığı (%)	Ergime Sıcaklığı
Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	381,42	11,35	-
Susuz Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	201,26	21,50	741
Sodyum Bor Forid	NaBF ₄	109,81	9,85	-
Bor Karbür	B ₄ C	55,29	78,28	2450
Borik Oksit	B ₂ O ₃	69,64	31,07	450
Metabor Asidi	HBO ₂	43,83	24,69	-

3.2.3. Gaz Borlama

Gaz borlama, borlama ortamının gaz fazında olduğu işlemdir. Bu işlem için öncelikle evapotartörde gaz formuna getirilmiş bir bor kaynağı ile H₂ ve Ar gazlarının karışımı sağlanır. Elde edilen karışım, dış ortama kapalı olan paslanmaz çelik bir odadaki malzeme üzerine püskürtülür ve borlama işlemi gerçekleşir. Gaz borlama yönteminde B₂H₆ (diboran) ve BCl₃ (bor klorür) gazları gaz kaynağı olarak kullanılırlar. Fakat zehirleyici etkileri olmaları ve kimyasal olarak kararsız olmalarından dolayı bu gazlar problemlidir [40]. B₂H₆ gazının H₂ gazı ile birlikte kullanılması durumunda ise verimli sonuçlar alınabilmektedir [49]. Gaz borlamada kullanılan B₂H₆ ve BCl₃ gazlarına ilaveten kullanılan diğer gazlar ve özellikleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Gaz borlamada kullanılan bazı gazlar ve özellikleri [44].

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (gr.)	Teorik Bor Miktarı (%)	Donma Noktası (°C)
Bor Tri Florid	BF ₃	67,82	15,95	-128,8
Bor Tri Klorid	BCl ₃	117,9	9,23	-107,3
Bor Tri Borid	BBr ₃	250,57	4,32	-46,0
Bor Tri Metil	(CH ₃) ₃ B	55,92	19,35	-161,5
Bor Tri Etil	(C ₂ H ₅) ₃ B	98,01	11,04	-94,0
Di-Boran	B ₂ O ₃	26,69	39,08	-165,5

Gaz ortamında yapılan borlama işleminin bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Avantajları [49];

- Bor atomlarının yüzeyde daha iyi yayılım göstermesi,
- Katı borlama yöntemine göre kıyaslandığında gelişmiş sıcaklık kararlılığı göstermesi,
- Homojen bir kaplama tabakası elde edilmesi,
- Büyük boyutlu parçaların da işlenebilmesidir.

Dezavantajları [49];

- Tesisatın maliyetli olması,
- Gazların zehirli olması,
- Patlama tehlikesinin olmasıdır.

3.2.4. Pasta Borlama

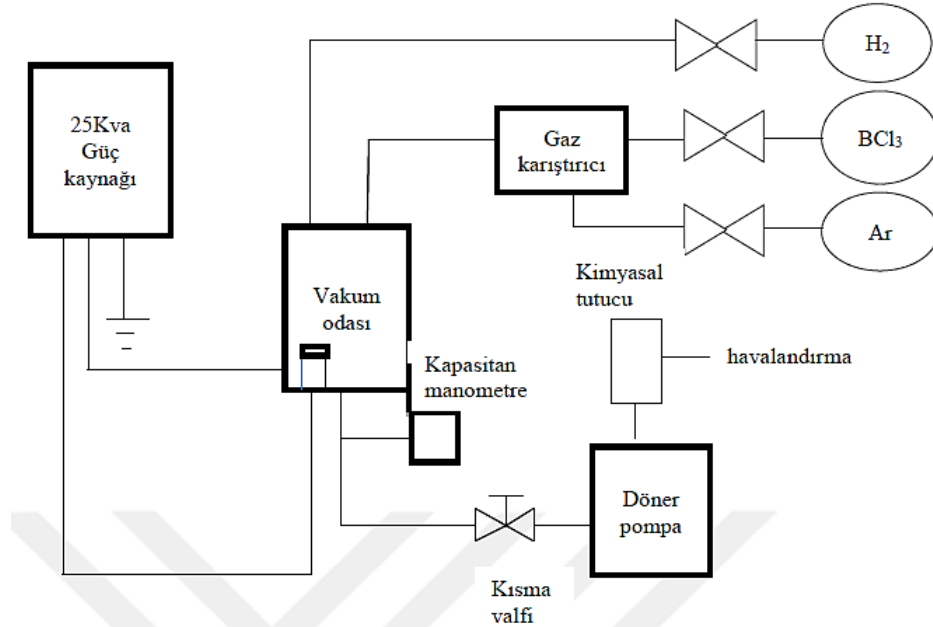
Kutu borlama yönteminin zor ve daha maliyetli olduğu yada daha fazla zaman kaybının yaşanacağı durumlarda pasta borlama yöntemi kullanılır. % 55 kriyolit, % 45 B₄C veya B₄C+SiC+KBF₄ geleneksel borlama toz karışımı ile iyi bir bağlayıcı maddenin karışımı sağlanarak malzemenin tüm yüzeyine yada sadece istenen bölümlere pasta fırça veya spreyci yardımıyla bu karışım sürülür. İşlem tamamlandıktan sonra kurutulur ve yaklaşık 1-2 mm bir tabaka kalınlığı elde edilir [40]. Büyük boyutlu parçaların ve belirli seçilmiş alanların borlanabilmesi açısından oldukça avantajlı bir yöntemdir [40,50]. Demir esaslı malzemeler için pasta borlama yöntemi, geleneksel fırınlarda 800-1000 °C sıcaklık aralığında ve 5 saat süreyle uygulanır. Bu yöntemde Ar, NH₃ veya N₂ gazları koruyucu atmosfer olarak kullanılır [44]. Kullanılan gazların özellikleri borlayıcı ürünün davranışını etkiler. Ar gazı kullanıldığında en verimli sonuç elde edilir fakat bunun yanında NH₃ gazı da kullanılabilir. Endotermik veya CO ihtiva eden gazların kullanılmaması gerekmektedir [50]. Pasta borlama yönteminde 1000 °C ve 20 dakika süre ile borlama işlemi yapılan malzemelerde 50 µm kaplama tabakası elde edilebilmektedir [44,50].

3.2.5. Plazma Borlama

Plazma borlama yöntemi, demir ve demir dışı metalik malzemeler için kullanılırlar. Bor kaynağı olarak B_2H_6 , BCl_3 , $B(OCH_3)_3$ ve BF_3 kullanılırken H_2 ve Ar gazları da bunlarla birlikte kullanılmaktadır. İşlem, 800-1000 °C sıcaklıklarda $\sim 10^{-2}$ Pa değerinde bir basıçla meydana getirilmiş plazma içerisinde yapılır [41]. Bu yöntemde kullanılan $B_2H_6-H_2$ karışımı sayesinde çok düşük sıcaklıkta (600 °C) bile işlem gerçekleştirilebilir [47]. Şekil 3.2’de plazma borlama işlemi şematize edilmiştir.

Plazma borlama yöntemine baktığımızda bu yöntemin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz [42,47];

- Klasik borlamaya göre daha yüksek potansiyele sahiptir.
- Borlama işlemi düşük sıcaklık ve sürede gerçekleştirilebilir.
- Daha ince yapılı borlu tabaka elde edilebilir.
- Borlu tabakanın derinlik ve bileşim kontrolü yapılabilir.
- Enerji ve gaz kullanımında verimlilik sağlanır.



Şekil 3.2. Plazma borlama işlemin şematik olarak gösterimi [42,47].

Malzemelerin mikroyapısı ve borlama sonucu oluşan demir bor (Fe_xB) tabakalarının büyümesi; malzemenin bileşimi, işlem sıcaklığı, basınç değişim oranları, gaz karışım oranları ve kullanılan akım yoğunluğu ile kontrol edilebilir [48]. Cl iyon yoğunluğunun düşük, B iyon yoğunluklarının ise maksimum olduğu plazmada en iyi verimlilik sağlanır. Çünkü Cl iyon yoğunluğunun yüksek olduğu durumlarda plazma şiddetinde düşüş, borür tabakası üzerinde Cl ve B birikmesi ve mikroyapıda gözeneklilik meydana gelir [41].

3.3. BORÜRLERİN GENEL ÖZELLİKLERİ ve BORLANABİLEN MALZEMELER

Borlama işleminin uygulanabileceği malzeme aralığı çok geniş olup birçok demir esaslı ve demir dışı alaşımlara bu işlem uygulanmaktadır. Bunlardan bazıları; sade karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler, takım çelikleri, dökme demirler ve sinterlenmiş demirlerdir. Ayrıca molibden, nikel, kobalt, krom, titanyum, mangan gibi demir dışı metal ve alaşımlarına da borlama işlemi uygulanmaktadır [45,50]. Yapılan çalışmalarda bazı seramiklere de bor kaplamanın yapıldığı görülmüştür [45,50]. Borlama ile sertleşen çeliklerde işlem östenit fazında gerçekleştiği için borlama sonucunda hemen sertlik kazanırlar. Düşük ergime sıcaklıklarına sahip olan alüminyum, çinko ve magnezyum borlanmaya elverişli olmayan alaşımlardır. Kükürt ve kurşun içeren çelikler kaplama tabakasının kalkmasına ve yüzeyde çatlak oluşumuna sebebiyet verirler [45]. Benzer şekilde nitrürlenmiş çelikler yüzeyde çatlak oluşumuna yol açarlar. Bu nedenle bu çelikler borlama işlemine tabi tutulmamalıdır [50]. Malzeme içinde ağırlıkça yaklaşık % 1'den fazla Si bulunan çeliklerin de borlanması uygun değildir. Çünkü bor atomlarının difüze edildiği sırada Al ve Si yüzeyden iç kısma doğru itilmeye başlarlar ve Fe_2B fazının altında (difüzyon bölgesinde) ferritik bir bölge oluştururlar. Böylece oldukça sert olan borür tabakasının altında bu tabakadan daha yumuşak bir tabaka meydana getirirler. İş parçasının kullanımı sırasında çok yüksek gerilmelere maruz kaldığında borür tabakası bu gerilmeleri ferrit bölgesine iletir ve bu durum da borür tabakasının çatlayıp parçalanmasına sebep olacaktır [50].

Borlama sayesinde malzemeler aşınmaya karşı dayanıklı hale gelirler. Örneğin titanyum ve alaşımlarının borlanması, nikel kobalt gibi yumuşak metallerin borlanması ve sinterlenmiş karbürlerin borlanması sayesinde malzemeler aşınmaya karşı dirençli hale gelirler [45]. Fakat bakır ve alaşımları bor atomlarının difüzyonunu engellediği için borlanmaya elverişli değildir. Alaşım elementleri kaplama tabakası içinde katı eriyik borürleri oluşturarak kaplama tabakasının sertliğini arttırlar. Alaşım elementlerinden titanyum, nikel ve kobalt borür tabakasının büyüme hızını yavaşlatır ve yüksek bor yoğunluğuna sahip borürlerin oluşmasını sağlarlar. Bu sayede çok fazlı ve daha sağlam borür tabakaları elde edilir [50]. Ayrıca titanyum ve kobaltın borlanması ile elde edilen borür tabakası kolonsal değil, üniform ve düz bir yapıdadır [50].

3.3.1. Borürlerin Özellikleri

Bor elementi, periyodik cetvelde birden fazla elementle bileşik oluşturabilmektedir. Borürlerin çoğu kuvvetli kovalent bağ yapılı oldukları için elastisite modülleri, ergime sıcaklıkları ve sertlik değerleri oldukça yüksektir. Borür bileşiklerinin oluşumu, bileşik yapılan atomla aralarındaki atomik boyut faktörüne ve elektrokimyasallıklarına bağlıdır. Borürlerin latis parametreleri ve kristal yapıları benzer olduklarında borürler katı eriyik oluşturabilirler [42]. Genel olarak borürlerin termal genleşme katsayıları orta seviyede iken termal şok dirençleri ve ısı iletkenlik katsayıları oldukça yüksek değerdedir. Diğer seramik bileşikler ile karşılaştırıldıklarında, mukavemet ve sertlik değerlerinin yüksek olduğu görülür. Fakat gerçekte tokluk ve mukavemet değerleri açısından orta dereceye sahip olan borürlerdir. Borürlerin birçoğu, seramiklere göre iyi elektriksel iletkenlik gösterir ve elektriksel dirençleri 5-80 $\mu\Omega$ -cm aralığında değişim gösterir. İlaveten birçok seramiğe göre borürlerin kimyasal dirençleri çok daha yüksektir [44].

Borürlerin oluşabilmesi için dış yörüngede bulunan elektronlar dağılık sp^2 ve sp^3 elektron konfigürasyonlarında yerleşebilirler. Bu durum, kuvvetli kovalent bağların oluşmasında önemli bir karakteristiktir. Bor ile tepkimeye giren atomların elektron verme eğilimlerine göre bu sp^2 ve sp^3 yapıları değişim göstermektedir. s^2p , sp , sp^2 ve

sp^3 elektron konfigürasyonlarının kombinasyonlarındaki değişiklik çeşitli borür yapılarının oluşmasını sağlamaktadır [41].

Oluşan borürleri üç ana grup altında toplayabiliriz [41,44];

- Dış yörüngelerinde s seviyesinde elektron bulunduran elementlerin yaptıkları borürler. Bu elementler alkali ve toprak alkali elementlerdir.
- d iç yörüngesine sahip elementler ile oluşturulan borürler. Bunlar; geçiş metalleri, lantanitler ve aktinidlerdir.
- s ve p valans elektronlarına sahip olan elementler ile oluşturulan borürler.

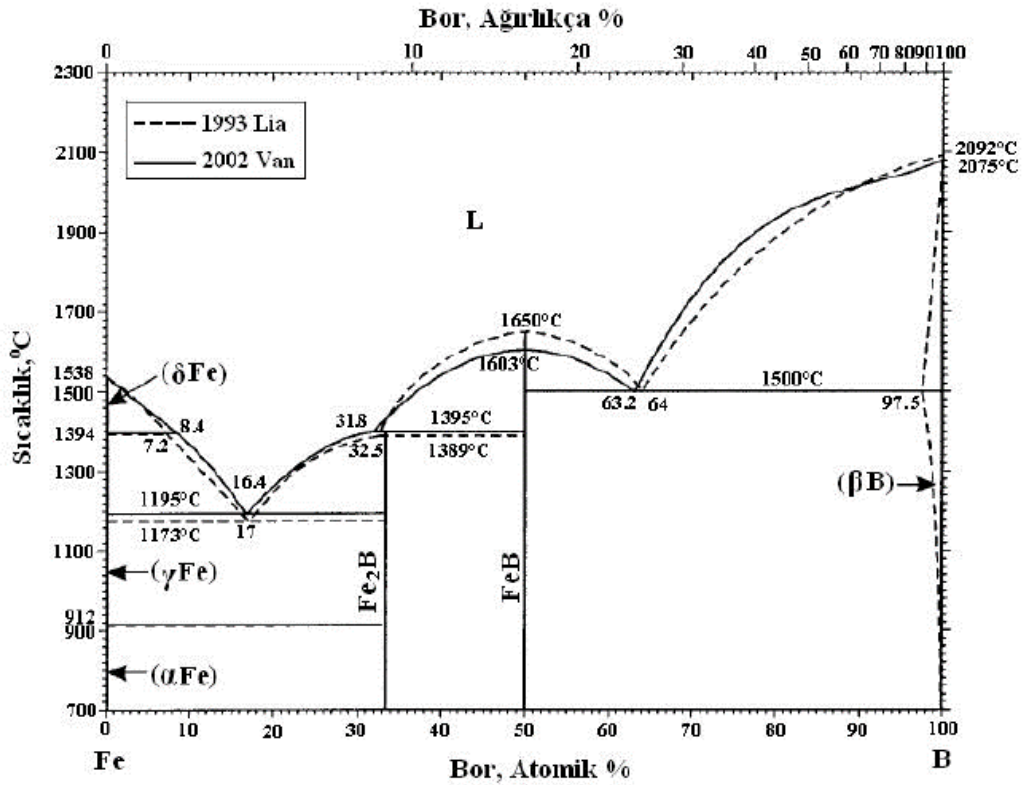
Çizelge 3.5'te farklı metal borürlerin çeşitli özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Farklı metal borürler ve bazı özellikleri [42,44,45].

Borür	Kristal Yapı	Teorik Yoğun. (gr/cm ³)	Erg. Sckl. (°C)	Termal Genleşme (10 ⁻⁶ /K)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Sertlik (GPa)	Elas. Mod. (GPa)	Elk. Direnç (10 ⁶ Ωcm)
CrB	Tetra.	6,14	--	12,3 (27-1027 °C)	20,1 (20 °C)	11,8	---	46
Cr₂B	Ortog.	6,58	1870	14,2 (27-1027 °C)	10,9 (20 °C)	13,2	---	107
CoB	Ortog.	7,32	--	---	17	11,3	---	33
Co₂B	Tetra.	8,05	1260	---	14	11,3	---	76
FeB	Ortog.	6,73	1650	12 (400-1000 °C)	12 (20 °C)	16,2-18,6	343	80
Fe₂B	Tetra.	7,34	1410	---	17,4	13,1-17,7	284	38
MnB	Ortog.	6,36	1890	---	7,7	20,1	---	57
Mn₂B	Tetra.	7,18	1580	---	6,6	17,7	---	40
NiB	Ortog.	7,17	1590	---	21,9	15,2	---	50
Ni₂B	Tetrag.	8,05	1225	---	54,8	14	---	14
NbB	Ortog.	7,57	2917	12,9 (27-1027 °C)	15,6 (27 °C)	21,5	---	40
NbB₂	Hegz.	7,00	3036	8 (27-1027 °C)	23,5 (27 °C)	25,5	637	26
Nb₃B₄	Ortog.	7,28	2935	9,9 (27-1027 °C)	20,5 (27 °C)	22,5	---	34
TiB	Ortog.	4,56	2190	---	---	22,7	---	40
TiB₂	Hegz.	4,52	3225	---	64,4 (27 °C)	33-25,5	551	9

3.3.2. Fe-B İkili Denge Diyagramı

Alaşım elementlerinin demir alaşımlarında arayer veya yer alan katı eriyiği olarak davrandıkları bilinmektedir [40,48,49]. Bu durum elementlerin atom çaplarına bağlı olarak değişmektedir. Demirin atom çapına göre borun atom çapı % 27 daha küçüktür. Bu nedenle bu iki element birbirleriyle katı eriyik oluşturabilirler [49]. Demir bor denge diyagramında bor, α -Fe'de hem arayer hem de yer alan konumunda olabilmektedir. Borun demir içerisinde çözünürlüğüne bakıldığında düşük sıcaklıkta 1/50 oranında arayer atomu olarak, çoğunlukla ise yer alan atom olarak eridiği tespit edilmiştir [40]. Sıcaklıktaki değişime göre borun erirliği ferrit fazında 20-80 ppm, östenit fazında ise 55-260 ppm olarak bulunmuştur [48]. Şekil 3.2'de Fe-B ikili denge diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda, Fe_2B fazının ergime sıcaklığının 1389-1410 °C değerleri arasında olduğu, FeB fazının ise 1540-1657 °C arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 3.3. Fe-B ikili denge diyagramı [40,49,52].

Bor atomları çok küçük boyutta ve hareketli olduklarından demir alaşımlarında çok rahat bir şekilde difüze olurlar. Ayrıca, sahip oldukları termal enerjileri ile metal latisin içerisine yerleşir ve baz malzemenin atomları ile borürleri oluştururlar. Bor atomlarının difüzyonu ile malzemelerde sıcaklık ve süreye bağlı olarak hem tek fazlı fazlı (Fe_2B) hem de çift fazlı (FeB ve Fe_2B) borür tabakaları elde edilir [40].

Borür tabakalarının çift fazlı (FeB ve Fe_2B) olmasından ziyade tek fazlı (Fe_2B) olmaları tercih edilen bir durumdur. Çünkü birbirlerine çekme ve basma gerilmeleri uygulayan FeB ve Fe_2B fazlarından dolayı bu fazlar arasında çatlak oluşumları gözlenmekte ve bu da kaplama tabakasının tabakalar halinde kalkmasına neden olmaktadır [48]. Bu nedenle FeB faz içeriğinin minimum düzeyde olduğu tabakalar sağlanmaya çalışılmalıdır.

3.3.3. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Borlama işleminin ilk aşamasında bor sağlayıcı ortam ile malzeme yüzeyinde bir tepkime meydana gelir. Difüzyon olayının başlamasıyla birlikte yüzeyde önce çekirdeklenmeler oluşur ve zamanla borür tabakası haline dönüşürler. Bor difüzyonuna matris malzemenin içerisindeki alaşım elementleri, tek olarak yada birlikte etki ederler [42]. Borlama sonucunda oluşan tabakanın en dış kısmında FeB , alt kısmında Fe_2B ve matris ile Fe_2B arasında da difüzyon (geçiş) bölgesi meydana gelir. Bu fazlarının sertlik değerleri oldukça yüksektir. Demir esaslı malzemeler için sıcaklık artışı oldukça, oluşan tabaka kalınlığı da artmaktadır. Tabakalardaki fazlar tek (Fe_2B) ya da çift (Fe_2B ve FeB) fazlı olabilmektedir ve tabakaların şekli oluşan bu fazlara göre değişkenlik göstermektedir [47]. FeB - Fe_2B ve Fe_2B -matris arayüzeylerindeki yapıların kolonsal bir yapı sergilediği bilinmektedir. Fakat yüksek alaşımlı çeliklerde bu yapı düz bir çizgi halindedir [52].

Yapılan çalışmalarda, ilk olarak Fe_2B fazının olduğu fakat Mösbauer elektron spektroskopu ile ölçüm yapıldığında Fe_2B fazının üst kısmında FeB fazının olduğu ve en dış katmanda ise FeB_{1+x} fazının bulunduğu tespit edilmiştir. Buradaki x bilinmeyeninin 1'den büyük olduğu (büyük olasılıkla $x=2$) belirtilmiştir [44]. Bu

doğrultuda borür tabakasının yüzeyinden matris malzemeye doğru gidildikçe Fe₂B fazının yoğunlukta olacağı düşünülmektedir.

Borlama işlemi yapılacak malzemenin kimyasal bileşimine ve borlama işlem koşullarına bağlı olarak Fe₂B çekirdekleri iğnesel olarak büyümekte ve bor gradyanı boyunca ilerlemektedir. Böylece çekirdeğin etrafında meydana gelen yüksek gerilim alanları, borür tabakasının kolonsal (testere dişi) olarak büyümesini sağlamaktadır [44].

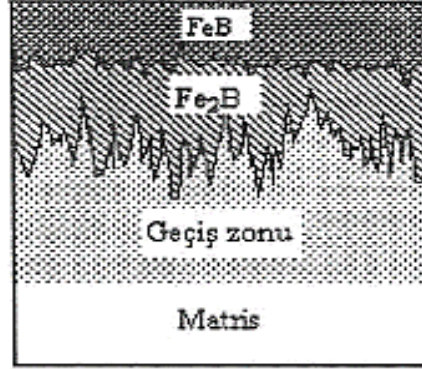
Demir esaslı malzemelerde elde edilen borür tabakasında, FeB fazının büyümesi Fe₂B fazı ile benzerlik gösterir. Fakat Fe₂B-matris arayüzeyindeki kolonsallığa göre FeB-Fe₂B arayüzeyindeki kolonsallığın daha az olduğu görülür. FeB fazının sert bir tabaka üzerinde büyürken, Fe₂B fazının ise nispeten sünek bir yüzey üzerinde büyüdüğü bu nedenle FeB-Fe₂B arayüzeyindeki kolonsallığın daha az olduğu söylenebilir [44].

3.3.4. Borür Tabakası / Borür Tabaka Kalınlığı

Termo-kimyasal yöntemlerle borlanan düşük alaşımlı ve sade karbonlu çeliklerde borürler genellikle kolonsal olarak büyümektedir. Borür tabakasının kalınlığı ve özellikleri; borlama yöntemine, borlanacak malzemenin kimyasal bileşimine, borlama sıcaklığına, süresine ve borlama ortam koşullarına bağlı olarak düz bir yapıda veya kolonsal (dişli) bir yapıda olabilir. Çelik malzemelerde karbon miktarı arttıkça bor difüzyonunda azalmalar meydana gelir. Difüzyonun azalmasıyla birlikte malzeme yüzeyinde oluşan borür kalınlığı azalır ve düz bir yapı elde edilir [47]. Mekanik özellikler açısından düz yapıdaki tabakalara göre kolonsal yapıdaki tabakalardan daha iyi sonuçlar alınır. Çünkü dişli yapıdaki borür tabakaları baz malzemeye çok daha iyi tutunur [50].

Borlama ısıl işlemi sonucunda borür tabakası ve difüzyon (geçiş) bölgesi olmak üzere iki farklı tabaka (Şekil 3.4) elde edilir. Bu işlemde en kalın tabaka elde etmek optimum kalınlık demek değildir. Kalınlık değerleri kullanım amacı ile uygun olmalıdır. Eroziyon aşınmalar için kalın tabaka, adhezif aşınmalar için ise ince

tabakaların olması gereklidir [50]. Tabaka kalınlığı arttıkça doğru orantılı olarak gevreklik de artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda borür tabakasının kalınlığına dikkat etmek gerekir. Kırılganlık bakımından borlamayla birlikte alaşımlı çeliklerde 100 µm, alaşımsız çeliklerde 15-200 µm ve darbesiz aşınmaya maruz kalacak iş parçalarında 400 µm kalınlığa kadar çıkılabilmektedir [49].



Şekil 3.4. Borür tabakasının şematik olarak gösterimi [50].

Demir esaslı malzemelerde borlanmış tabakanın sertliği yaklaşık olarak 1800-2100 HV aralığındadır. Yüksek alaşımlı çeliklerde ise bu değer 2400 HV'ye kadar çıkmaktadır. Artan sertlikle birlikte yüzeyde oluşan çatlakları önleyebilmek amacıyla tabakada tek fazlı yapının olması istenmektedir [49].

Borür tabakası ile yüzey sertlik değerinin artırılması ve sürtünme katsayısının düşürülmesi abrazyon aşınmaya karşı direnci arttırmaktadır. Bor elementinin oksijene karşı ilgili olması malzeme yüzeyinde koruyucu bir oksit film tabakası oluşturarak yüzeyde yağlayıcı olarak görev yapmasını sağlamaktadır. Bu durum, sürtünme katsayısını düşürerek yüzeylerin birbirine kaynak olmasına engel olmaktadır [49]. Borlanmış malzemelerin aşınma dayanımları sementasyon, nitrasyon gibi işlemlere tabi tutulmuş malzemelerden oldukça yüksektir. Ayrıca borlanmış tabakalar yüksek sıcaklıklarda (900-1000 °C) bile sertliklerini koruyup, aşınmaya karşı dirençlerini sürdürebilmektedirler [49].

3.4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN BORLAMA YÖNTEMİNE ETKİSİ

Alaşım elementleri, demir dışı ve demir esaslı malzemelerin borlanması esnasında borür tabakası ve difüzyon (geçiş) bölgelerinin kristal yapısını, faz bileşimini, tabakanın büyüme kinetiğini ve mekanik özelliklerini etkilemede büyük bir öneme sahiptir. Borun yayınmasını ve reaktifliğini etkileyerek, genellikle tabaka kalınlığının azalmasına sebep olurlar. Alaşım elementlerinin etkisi, elde edilen tabakaya yerleşme davranışına ve bor atomları ile bileşik oluşturma kabiliyetlerine göre değişiklik göstermektedir. Alaşım elementlerinden Cr, Ni, V, Mn, Mo gibi elementler borür tabakasında bileşik oluşturabiliyorlarken, C, Cu, Si, Al gibi elementler ise borür tabakasında çözünemezler [41].

Demir esaslı malzemeler borlandıktan sonra yüzeyde (Fe, M)B ve (Fe, M)2B bileşikleri elde edilir. Burada M; Cr, Mn ve Ni olabilmektedir. Borlanmış malzemelerde alaşım elementlerinin etkisi, atom numaraları ve atom çaplarına bağlıdır. Örneğin; Cr ve Mn elementlerinin atom numaraları Fe'nin atom numarasından küçük olduğu için baz malzemedan yüzeye doğru yayılırken, Ni ve C elementleri ise yüzeyden içeri yayınırlar [44].

Karbon elementleri, demir borürlerde çözünemezler. Bu nedenle baz malzemeye doğru yayınırlar ve tabakanın altında perlitik bir faz oluştururlar. Burada Fe₃C, Cr₂₃C₆, Fe₆C₃ gibi karbürler halinde birikirler. Bu durum tabaka yapısını önemli oranda etkilemektedir [42]. Aynı zamanda geçiş bölgesinin daha düzenli ve sert bir yapıya sahip olmasını sağlarlar. Ayrıca, karbon konsantrasyonu arttıkça kaplama tabakasından baz malzemeye geçiş durumu da sağlanmaktadır. Bu artışla birlikte kaplama tabakasının kalınlığı ve sertliği azalır, demir borürlerin ise izafi dengeleri değişir. Karbon miktarı arttıkça tabaka kalınlığının azalması FeB'nin azalmasına bağlanmaktadır [44]. İlâveten, karbon miktarının artması parmaklı yapının düzleşmesine neden olmaktadır. Düşük ve orta karbonlu çeliklerde ise bu yapı iğnemsî şekilde olmaktadır.

Silisyum (Si) elementi karbon elementinde olduğu gibi borür tabakası içinde çözünmez. Bor atomları tarafından malzeme yüzeyinden içeri doğru itilerek geçiş

bölgesinin Si açısından zenginleşmesine neden olurlar. % 1'in üzerinde silisyum içeriğine sahip olan çeliklerde Fe_2B fazının alt kısmında bir ferrit bölgesi oluşturulur. Bu bölge yumuşak bir faz olduğundan kaplama tabakasının çatlamasına, dökülmesine veya çökmesine sebep olabilir. Bu nedenle Si içeriğinin % 0,7'yi geçmemesi istenir [42]. Borlama işlemi yapılabilmesi açısından Si içeriğinin % 1' in üzerinde olmaması gerekmektedir.

Krom elementinin atom numarası demir elementinin atom numarasından küçük olduğundan borür tabakasında çözünürler ve malzeme yüzeyine yayınırlar [44]. Borür tabakalarının karakteristik özellikleri kromlu ve kromsuz alaşımlar açısından karşılaştırıldığında, kromlu alaşımların karbon konsantrasyonlarına bağlı olarak tabakanın çok daha ince olduğu ve borür tabakası/matris arayüzeyinin çok daha düzgün olduğu görülmüştür [42]. Krom içeriğine sahip tabakaların sertlik değerleri ise Cr miktarının artmasıyla birlikte artmaktadır [41].

Alaşım elementlerinden olan nikel elementi, tabakada Fe_2B fazının gelişmesine ve düşük nikelli borürlerin elde edilmesine katkı sağlamaktadır [41]. Krom elementinin aksine nikel, geçiş bölgesinde yayınır. Nikel içeriği % 9'un üzerine çıktığında iğnesel yapıya sahip olan kaplama tabakası düz bir yapıya dönüşür. Bu durum porozite artışına sebep olarak mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler. Malzemelerde nikel miktarının artması Fe_2B fazının sertliğini düşürür fakat FeB fazının sertliğine etki etmez [44].

Manganez, krom elementi gibi borür tabakasında çözünür ve yüzeye doğru yayınır. Borür tabaka kalınlığının azalmasında etkili olup aynı zamanda artan Mn miktarı ile tabaka geometrisinin düzleşmesine sebep olmaktadır [41].

Molibden, titanyum, tungsten ve vanadyum gibi alaşım elementleri, genellikle kaplama tabakası ile geçiş bölgesi arasında oluşur ve toplam tabaka kalınlığının azalmasına neden olurlar. Borlama işlemi uygulanacak malzemelerde vanadyum içeriğinin % 0,15'i geçmemesi tercih edilmektedir. Titanyum elementi ise geçiş bölgesinde tane büyümesini engelleyici bir role sahiptir ve FeB fazında çözünerek sertlik artışına sebep olur [41].

3.5. BORLAMA İŞLEM SICAKLIĞI VE SÜRESİNİN BORÜR TABAKA KALINLIĞINA ETKİSİ

Borlama ısıl işleminde, işlem sıcaklığı ve süresi arttıkça malzeme yüzeyinde oluşan borür tabaka kalınlığı artmaktadır. Sıcaklık artışının borür tabakası üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek amacıyla Çizelge 3.6'da farklı sıcaklıklarda borlanmış C45 çeliğininin tabaka kalınlıkları verilmiştir [46].

Çizelge 3.6. Farklı sıcaklıklarda borlanmış C45 çeliğininin tabaka kalınlıkları [46].

Sıcaklık (°C)	700	750	800	850	950	1000
Tabaka Kalınlığı (µm)	2	12	17	30	46	59

Borlama işleminde işlem sıcaklığını sınırlandıran ergime olayıdır. FeB denge diyagramı için işlem sıcaklığının ötektik sıcaklığı (1149 °C) geçmemesi gerekmektedir. Bu sıcaklık değeri aşıldığında malzeme yüzeyinde lokal erimeler meydana gelir ve yüzeyin bozulmasına sebep olabilir [46]. Sıcaklık artışı ile birlikte tabaka kalınlıkları artar fakat bunun yanında porozite de artmış olur. Porozitenin artması ise kaplama tabakasının gevrekleşip daha seramik hale gelmesine sebep olmaktadır [41].

Borür tabaka kalınlığını sınırlandıran faktörlerden biri de kırılma faktörüdür. Kalınlığın artması kırılma da arttıracağı için özellikle çift fazlı (FeB+Fe₂B) tabakalarda kalınlığın çok fazla olması istenmemektedir. Bor oksit ve demirin birlikte redüksiyonu tek tek redüksiyonundan (Fe₂B ve FeB fazlarından dolayı) daha hızlıdır. İşlem süresi devam ettikçe malzeme yüzeyine bor yayılımı devam eder ve böylece borür tabaka kalınlığı da artmış olur [41].

3.6. BORLAMA İŞLEMİNİN ENDÜSTRİDE UYGULAMA ALANLARI

Borlama ısıl işlemi ile kaplanan malzemeler, sahip oldukları üstün performansları ile makine, otomotiv, gıda, tekstil, kimya sektörleri ve bu sektörlerin dışında daha birçok endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Özellikle abrazif ve adhezif

aşınma koşullarında çok fazla kullanım alanlarına sahiptirler. Malzemelerin aşınma davranışları endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle borlama işlemi sayesinde malzemelerin kullanım ömürleri artırılarak ekonomik açıdan kazanç elde edilmektedir [50]. Çizelge 3.7’de borlama işleminin endüstride bazı kullanım alanları verilmiştir [49].

Çizelge 3.7. Borlama işleminin kullanım alanları [49].

Kullanım Alanı	Kullanım Yerleri
Savunma Sanayi	Seramik plakalarda ve zırhlarda, ateşli silah namlularında ve fişek yapımında kullanılır.
Cam Sanayi	Laboratuar camlarında, bor silikat camlarda, uçak camlarında ve borcamlarda kullanılır.
Kimya Sanayi	Elektrolitik işlemler ve bazı kimyasalların indirgenmesinde kullanılır.
Otomobil Sanayi	Hava yastığı mekanizmalarında ve titreşim sönümleyici malzemelerde kullanılır.
Makine Sanayi	Aşındırıcı ve kompozit malzemelerde, zımparalarda ve manyetik cihazlarda kullanılır.
Tarım Sektörü	Biyolojik gelişim ve sentetik gübreler için kullanılır.
Enerji Sektörü	Yüksek ısı transistörlerinde ve gaz türbinlerinde kullanılır.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	LCD ekranlarında, mikro çiplerde ve CD-sürücülerinde kullanılır.
Görüş Sistemleri	Fotoğraf makinelerinde ve mercek camlarında kullanılır.
İletişim Araçları	Televizyonlarda, cep telefonlarında ve modemlerde kullanılır.
Nükleer Sanayi	Nükleer atıkların depolanmasında ve reaktör aksamalarında kullanılır.
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünme, aşınma ve ısıya dayanıklı malzemelerde, roket yakıtlarında ve uydularda kullanılır.
Kâğıt Sanayi	Geri dönüştürülen kâğıtların mürekkeplerinden arındırılmasında kullanılır.
Metalürji	Kaplama alanında kullanılır.
Seramik Sanayi	Fayanslarda ve porselen boyalarında kullanılır.
Koruyucu	Ahşap malzemeler için kullanılır.
Tıp	Antibiyotikler ve yapay organlarda kullanılır.

BÖLÜM 4

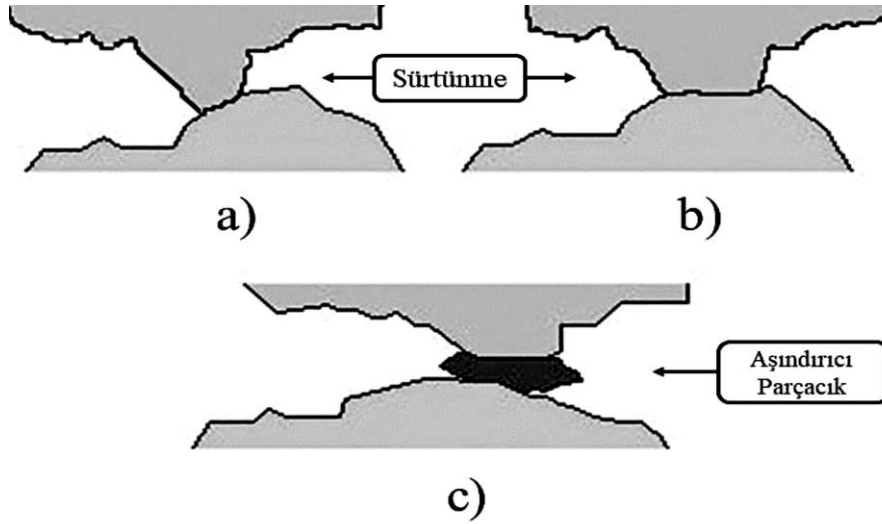
AŞINMA

Aşınma, birbirleri ile temas halinde olan yüzeylerin mekanik etkenlerden dolayı yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Temas halinde bulunan iki yüzey arasındaki bağıl hareket, cisimlerin yüzeyini etkiler ve aşınma meydana gelir [49]. Aşınma mekanizmasının gerçekleşebilmesi için aşınan, aşındırıcı ve ara malzeme, yük ve hareket gibi faktörlerin olması gerekmektedir [41]. Aşınma davranışı karmaşık ve mikroskobik bir etkileşimdir. Bu etkileşimle birlikte malzemelerin yüzey formları; iki yüzeye de etki eden kuvvetler, kayma hızı, sıcaklık, yüzeylerin ıslak veya kuru olması, atmosferik şartlar gibi birçok unsura bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [53]. Aşınmadan dolayı malzeme yüzeyleri ilk formlarını kaybederler ve işlevlerini yerine getiremez hale gelirler. Örneğin, makine elemanlarında meydana gelen arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının zamanla kullanılamamasındaki en önemli etken aşınma problemidir. Aşınma problemleri, yağlama, filtreleme, uygun bir malzeme seçilmesi ve tasarımda düzenlemeler yapılması gibi unsurlarla minimize edilebilir fakat hiçbir zaman tamamen önlenemez [49]. Aşınmanın meydana geldiği ortam koşulları, kullanılan alaşımın çeşiti ve aşındırıcının türüne göre metal ve alaşımları farklı aşınma türlerine maruz kalmaktadır. Aşınma türlerini şu şekilde sıralayabiliriz;

- Adhezif Aşınma
- Abrazif Aşınma
- Yorulma ve Delaminasyon Aşınması
- Oksidasyon Aşınması.

4.1. ADHEZİF AŞINMA

Adhezif (yapışma) aşınması, birbirlerine göre bağıl hareket eden temas halindeki iki yüzeyden birinden partiküllerin sıyrılarak diğer malzeme yüzeyine yapışması neticesinde, yüzeyler arası malzeme taşınması olarak ifade edilebilir [44]. Basınç etkisi altında bir araya getirilmiş malzemelerdeki mevcut olan pürüzlükler, sürtünme kuvvetinin etkisi ve soğuk kaynaklaşmanın etkisi ile birbirlerine bağ yaparlar. Yüzeylerin bağıl teğetsel hareketinden dolayı, özellikle bağ kuvvetlerinin zayıf olduğu noktalardaki yüzeylerde kopmalar meydana gelir. Bunun sonucunda malzeme transferi gerçekleşmiş olur [40]. Şekil 4.1’de adhezif aşınma türü şematize edilmiştir.



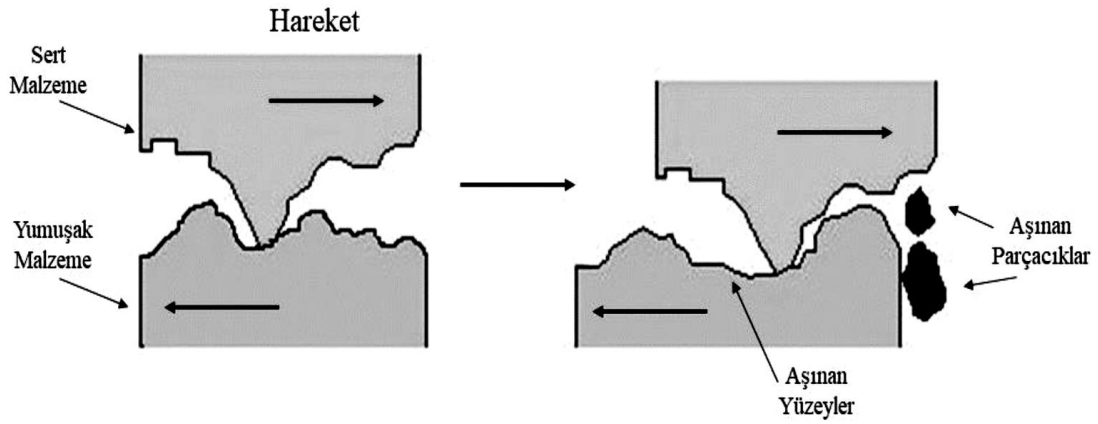
Şekil 4.1. Adhezif aşınmanın şematik olarak gösterimi [54].

Archard’ın adhezif aşınma teorisine göre adhezif aşınmanın miktarı kayma yolu ve yük ile doğru orantılı, malzemenin sertlik ve plastik akma mukavemeti ile ters orantılıdır [44]. Adhezif aşınma miktarının azaltılabilmesi için metaller arasında yağlayıcılar kullanılması, uygulanan yükün azaltılması ya da malzemelerin sertliklerinin artırılması gerekmektedir [49].

4.2. ABRAZİF AŞINMA

Abrasif aşınma, birbirleri ile temas halinde olan ve sürtünen iki yüzeyden daha sert olanının, yüzey pürüzleri aracılığıyla diğer yüzeyden parça koparması olayıdır. Bu işlemden malzemelere uygulanan yük ve hareket etkili olmaktadır [49]. Abrasif

aşınmada etkili olan sert partiküller sisteme ya dışarıdan girerler ya da adhezif aşınma ürünleri olarak sistem içinden oluşurlar. Bu durumda, bu aşınma türü iki elemanlı veya üç elemanlı olarak meydana gelmektedir. Sürtünen yüzeylerin doğrudan birbirleriyle etkileşime girmeleri sonucunda meydana gelen aşınma iki elemanlı abrazif aşınmadır. Üç elemanlı abrazif aşınma ise iki malzeme arasında serbest ara malzemenin olması durumu ya da aşınma sonucunda yüzeylerden kopan parçacıkların ara malzeme gibi davranarak üçüncü bir elemanmış gibi görev yapmaları durumu olabilir [40]. Şekil 4.2’de abrazif aşınma şematize edilmiştir.



Şekil 4.2. Abrazif aşınmanın şematik olarak gösterimi [54].

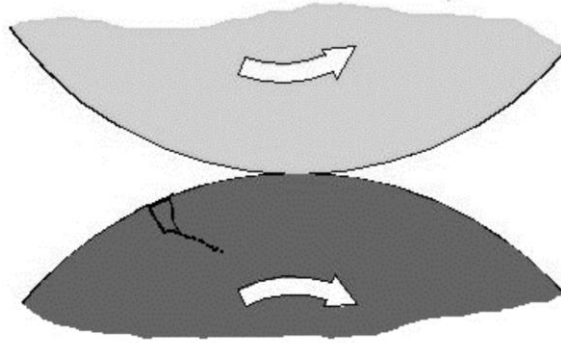
Aşınma esnasında kullanılan sert ve keskin aşındırıcılar, sünek malzemelerde hareket ettirildikçe yüzeylerde oluk ya da pullanma şeklinde malzeme kayıp olmasına sebep olurlar. Gevrek malzemelerde ise çatlak oluşumuna sebep olarak kırılmalara neden olurlar [53]. Abrazif aşınma türünde sertlik, aşındırıcı partikülün boyutu ve şekli, uygulanan yük, kayma hızı ve malzemelerin kırılma tokluğu gibi faktörler önemli faktörlerdendir [44].

Abrazif aşınma türünün önlenmesi veya etkisinin minimize edilmesi mümkün olmaktadır. Bunun için malzeme yüzeylerine ısıl işlemler uygulanabilir veya sert kaplamalar yapılabilir, dışarıdan gelen sert partiküllerin malzeme yüzeyleri arasına geçişi engellenebilir veya aşınmaya maruz kalan parçaların değiştirilmesinin kolay olacak şekilde tasarımları yapılabilir [54].

4.3. YORULMA ve DELAMİNASYON AŞINMASI

Yorulma aşınması, metal yüzeylerde değişken tekrarlı yüklemeler sonucunda ortaya çıkan bir aşınma türüdür. Çok küçük gerilmeler ve oldukça yüksek hız uygulanan metal yüzeylerde oyuklara benzer bir şekilde boşluklar meydana gelmektedir [48].

Birçok aşınma prosesinde yorulma aşınması görülmektedir. Önce malzeme yüzeylerinde çatlaklar oluşur ve bu da yüzeyden parçaların kopmasına, oyuk ve çukurların meydana gelmesine sebep olmaktadır [40]. Yorulma aşınması; makaralı ve bilyeli yataklar ve birbirleri ile temas halindeki dişlilerin kullanım ömürlerini azaltmaktadır. Yüzeylerin hemen alt kısmında maksimum gerilmeye ulaşıldığında, dislokasyonların yoğunlaştığı bölgelerde çatlaklar hızla ilerler ve yüzeyin hızla hasara uğramasına sebep olurlar [48]. Şekil 4.3'te yorulma aşınması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Yorulma aşınmasının şematik olarak gösterimi [54].

Delaminasyon aşınması, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerin mikroskobik ölçekte ortaya çıktığı bir tür yorulma aşınmasıdır. Malzemelerin temas bölgelerinde meydana gelen basınç etkisi ile yüzeyin hemen alt kısmında çatlaklar oluşur. Uygulanan yükün artması ve çatlaktaki deformasyon, çatlakın yayılmasına ve diğer çatlaklarla birleşmesine sebep olur. Çatlaklar yüzeye paralel bir şekilde yayılır ve yüzeyden plakalar halinde kopmalar meydana gelir [44].

4.4. OKSİDASYON AŞINMASI

Oksidasyon aşınması, kimyasal aşınma proseslerinden biri olarak sıklıkla karşımıza çıkmaktadır. Bu aşınma türünde kayan iki yüzey arasında sürtünmeden dolayı meydana gelen ısı, metal yüzeylerin üzerinde bulunan oksit tabakası kalınlığını arttırmak için enerji sağlayabilir. Oksit film tabakası belirli bir kalınlığa ulaştıktan sonra çıkıntılar (asperities), aşınma partiküllerini oluştururlar ve ardından kırılırlar. Meydana gelen bu yığıntılar (debris) abrazif aşınmanın başlamasına da sebep olabilirler [40]. Adhezif aşınma ile oksidasyon aşınması kıyaslandığında, adhezif aşınmanın daha baskın olduğu söylenebilir [49].

Aşındırıcı partiküllerin oluşturulması kayma hızı, sıcaklık, temas basıncı, korozyon potansiyeli, metalin oksijene afinitesi, oksidasyon kinetiği, sertlik ve mukavemet gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Mevcut şartlar ele alındığında oksit tabakasının büyümesi elverişli ise aşınma hızı, temas eden yüzeyler arasındaki adhezyonun azalmasına bağlı olarak azalabilir [40,44,49].

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

5.1. RAY ÇELİĞİ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Çalışma kapsamında kullanılan R260 ray çeliği Şekil 5.1’de gösterilmiş olup kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir. Borlama işleminden önce numuneler 25 x 20 x 8 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin yüzeyleri sırasıyla P400, P800 ve P1200 grit SiC zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve parlatılmıştır.



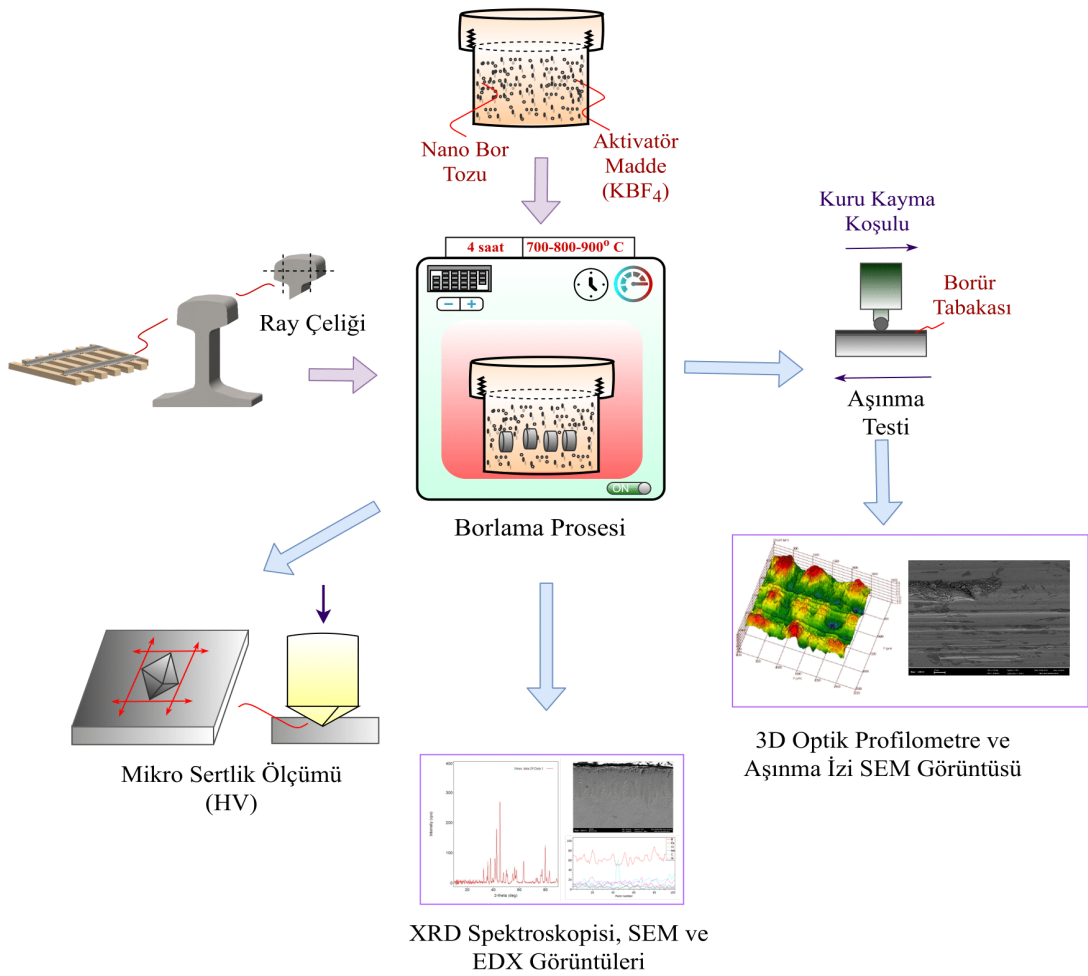
Şekil 5.1. Deneyleerde kullanılan ray çeliğinin fotoğrafı.

Çizelge 5.1. Deneyleerde kullanılan ray çeliğinin kimyasal bileşimi (%).

Malzeme	Fe	C	Mn	Si	Cr	P	Ni	Cu	Mo	Al
Ray Çeliği	97,7	0,749	1,07	0,251	0,026	0,019	0,036	0,013	0,025	0,035

5.2. BORLAMA PROSESİ

Şekil 5.2’de şematik olarak gösterilen borlama işlemi atmosferik koşullar altındaki bir fırında kutu (paket) borlama yöntemi kullanılarak 700-800-900 °C’de 4’er saatlik bir periyotta gerçekleştirilmiştir. Borlama işleminde, % 95 oranında nano bor tozu ile % 5 oranında KBF₄ (aktivatör madde) birlikte kullanılmıştır. Aktivatör madde borür tabakasının düzenli bir şekilde büyümesini sağlamaktadır [33]. Numuneler paslanmaz bir çelik kap içerisine birbirine değmeyecek şekilde yerleştirildikten sonra üzeri nano bor ve KBF₄ tozu karışımı ile ~3 cm geçecek şekilde doldurulmuş ve kutu hava geçirmez bir şekilde kapatılmıştır. Belirlenen sıcaklıklarda fırınlama işlemi gerçekleştirildikten sonra kutu fırından çıkarılmış ve oda sıcaklığına soğutulmuştur.



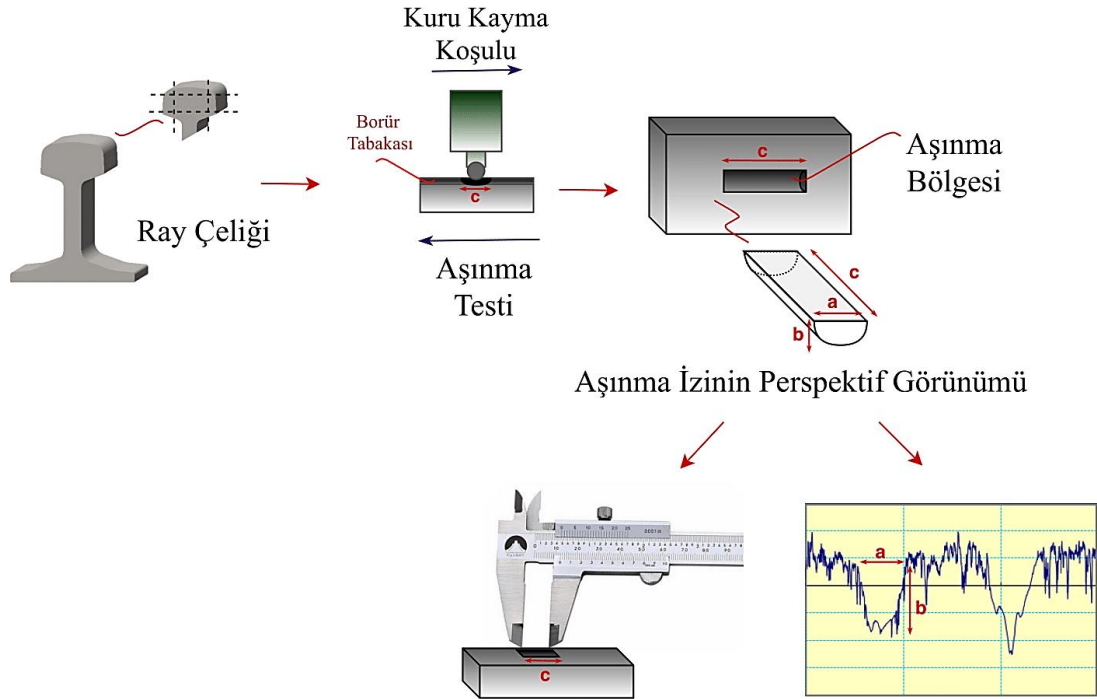
Şekil 5.2. Borlama prosesi.

5.3. MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU

5.3.1. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ve EDX Analizi

Numunelerin mikroyapı görüntüleri ve aşınmış yüzeylerin analizinde taramalı elektron mikroskobu (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM) kullanılmıştır. SEM ile borlama işlemi sonrasında 2,5 kx büyütme ile görüntü alınmış ve borür tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Görüntüleme FeB ve Fe₂B fazlarının ayrımı, renk farkı ile ortaya konulmuştur. Aşınma deneyleri sonrasında, aşınma bölgelerinden alınan SEM görüntüleri ise 2 kx ve 7 kx büyütme ile alınmış ve görüntü alanındaki deformasyon karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır. İlâveten sürtünme yüzeylerindeki kimyasal elementlerin analizi X-ışınlarının enerji dağılımı (EDX) ile yapılmıştır.

Aşınma izi görüntüleme (SEM) aşınma karakteristikleri literatür [1,12,55,56] dikkate alınarak yorumlanmıştır. Aşınan malzeme miktarlarının kıyaslanması için Şekil 5.3'te gösterilen aşınma izi bölgelerinin hacim kaybı hesapları yapılmıştır.



Şekil 5.3. Aşınma izinin perspektif görünümü.

5.3.2. Yüzey Pürüzlülük İşlemleri

2D optik profilometre kullanılarak numunelerin aşınma iz boyutları Ra cinsinden ölçülmüş ve elde edilen parametreler aşınma hacmi hesabında kullanılmıştır (Eşitlik 1). Ayrıca numunelerin yüzey kalitelerini belirleyebilmek için 3D optik profilometre (Phase View Optic Profilometer) ile yüzey topoğrafya görüntüleri alınmıştır. Görüntülemelerde x ekseninde 2500 µm ve y ekseninde 2500 µm alan taranmıştır. Z ekseninde renklendirme metodolojisi kullanılmış ve aşınma izi derinliği için Rt (toplam profil yüksekliği) değerleri ölçülmüştür. Sarı ve yeşil renklendirmeler düzlemsel bölgeleri, kırmızı renklendirmeler tepecikleri, mavi renklendirmeler ise çukur bölgeleri ifade etmektedir. İdeal bir yüzey formu için sarı ve yeşil renklendirmelerin çoğunlukta olması beklenmektedir.

$$V_{aşınma} = (2/3).a.b.c \quad (1)$$

a: Aşınma genişliği b: Aşınma derinliği c: Stroke mesafesi

5.3.3. X Işınları Difraksiyon (XRD) Analizi

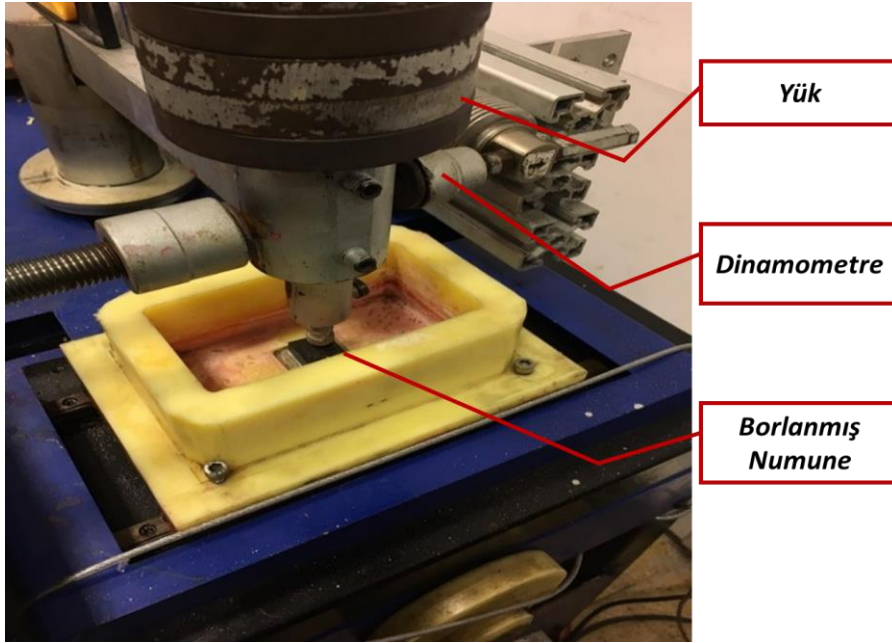
Kaplama alaşımlarının belirlenmesi için X ışınımı kırınımı (XRD) ölçümleri Cu K α radyasyonu kullanılarak (Rigaku Ultima IV, tarama hızı: 20/dk; voltaj: 40 kV, tarama açısı: 20°-90° ve akım: 30 mA) yapılmıştır. XRD ile borür tabakasında hangi fazların olduğu belirlenmiştir.

5.3.4. Mikro-Sertlik Ölçümleri

Mekanik karakterizasyon için kaplama yüzeyinden malzemenin merkezine doğru 20 µm aralıklarda mikro-sertlik ölçümleri yapılmıştır. Mikro-sertlik ölçümleri Bruker-UMT markalı Vickers test cihazında 50 gr yük altında ve 15 sn süre ile 7 farklı noktadan gerçekleştirilmiştir.

5.4. AŞINMA DENEYLERİ

Borlanmış ray çeliğinin aşınma deneyleri, kuru kayma koşulları altında Şekil 5.4'te gösterilen Ball-on-Flat aşınma cihazında yapılmıştır. 2 farklı yük (30 N and 50 N) ve hız koşulu (0,1 m/s ve 0,2 m/s) için deneyler gerçekleştirilmiştir. Literatürde kaplanmış yüzeylerin aşınma karakteristiğini farklı yük ve hız koşulları altında inceleyen yeterli sayıda çalışma yoktur.



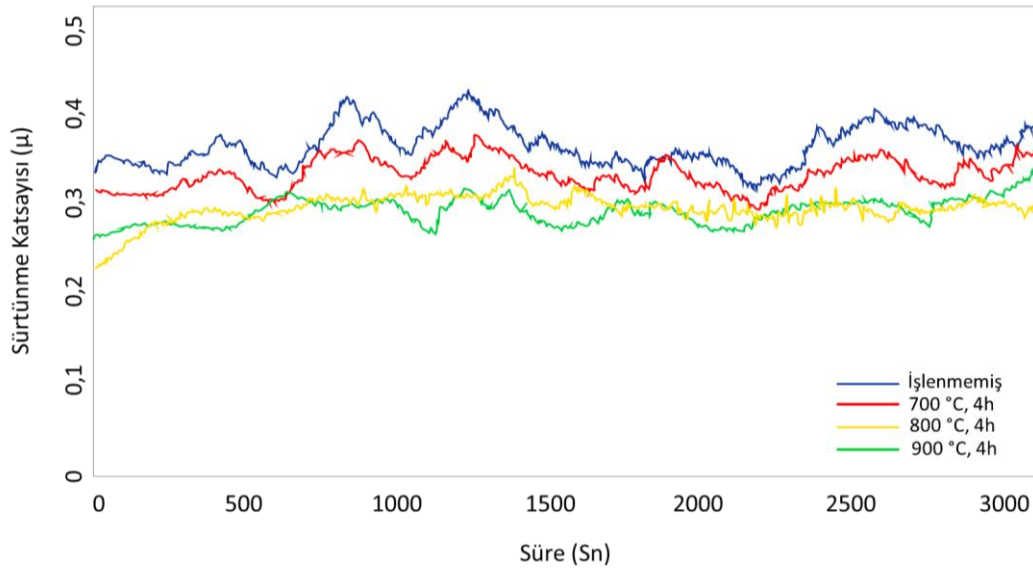
Şekil 5.4. Ball-on-Flat deney cihazı fotoğrafı.

Aşınma testleri tam faktöriyel deney tasarımına göre yapılmış (2*2) ve deney koşulları Çizelge 5.2'de verilmiştir. 4 farklı borlama ve 4 farklı aşınma testi koşulu için toplamda 16 deney yapılmıştır (4*4).

Çizelge 5.2. Borlama prosesi ve aşınma deneyleri için kullanılan parametreler.

Borlama Prosesi	Aşınma Deneyleri için Ful Faktöriyel Deney Tasarımı		
	Yük (N)	Kayma Hızı (m/s)	Kayma Mesafesi (m)
Untreated	30	0,1	500
700 °C – 4 h	30	0,2	500
800 °C – 4 h	50	0,1	500
900 °C – 4 h	50	0,2	500

Deney parametrelerinin belirlenmesinde literatür ve ön deneyler dikkate alınmıştır [8,9,20,26,55,57]. Ön deneylerde aşınma izinin oluşumunu sağlayan minimum parametreler belirlenmiştir (30 N ve 0,1 m/s). Tüm testler toplamda 500 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak yaklaşık 280 HV sertlikte ve 6 mm çapında olan ER9 (karbon içeriği \leq % 0,6) ray tekeri çeliği [58–60] kullanılmıştır. Teker aşınmasını minimize edebilmek için maksimum sertlikteki malzeme tercih edilmiştir. Sürtünme katsayısı verileri test esnasında sürekli olarak kaydedilmiştir. 50 N ve 0,2 m/s parametreleri için elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 5.5'te verilmiştir. Durgun hal (steady state) koşulundaki sürtünme katsayısı değerlerini belirleyebilmek için Şekil 5.5'te verilen grafik değerlerinin ortalaması dikkate alınmıştır. Bütün deney koşulları için sürtünme katsayısı değerleri benzer metodoloji ile elde edilmiştir. Aşınma katsayısı ölçümü için 500 ± 0.1 N yüke kadar tek eksen ölçüm yapabilen dinamometre kullanılmıştır.

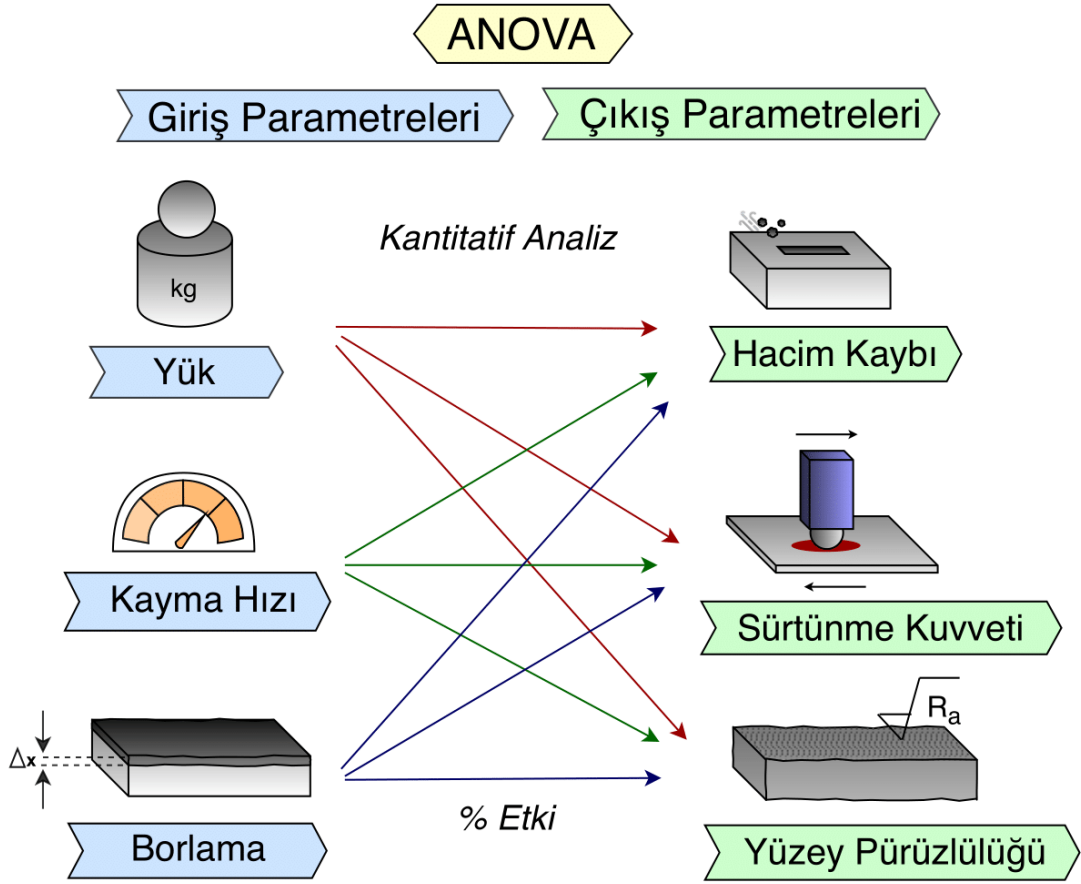


Şekil 5.5. Borlanmamış ve borlanmış numunelerin sürtünme katsayısı grafikleri (50 N, 0,2 m/s).

5.5. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Deney sonuçlarının istatistiksel analizi için varyans metodu (ANOVA-lineer model) kullanılmıştır. Analizler için % 95 güven aralığı dikkate alınmıştır. ANOVA'nın amacı yük, hız ve borlama sıcaklığı parametrelerinin sürtünme katsayısı, yüzey

pürüzlülüğü ve hacim kaybı üzerindeki etkisini nicel olarak belirlemektir (Şekil 5.6). Borlama ve aşınma ilişkisinin ANOVA metoduyla analiz edilmesi çalışmanın özgünlüğü açısından önem taşımaktadır. ANOVA metodunda “p” değeri istatistiksel ve fiziksel önemi, “F” değeri önem sıralamasını ve % etki değeri ise giriş parametrelerinin çıkış parametreleri üzerindeki etki değerini göstermektedir. “p” değerinin 0,05 değerine eşit veya küçük olması istatistiki ve fiziksel anlamlılığı ifade etmektedir.



Şekil 5.6. ANOVA yönteminin metodolojisi.

BÖLÜM 6

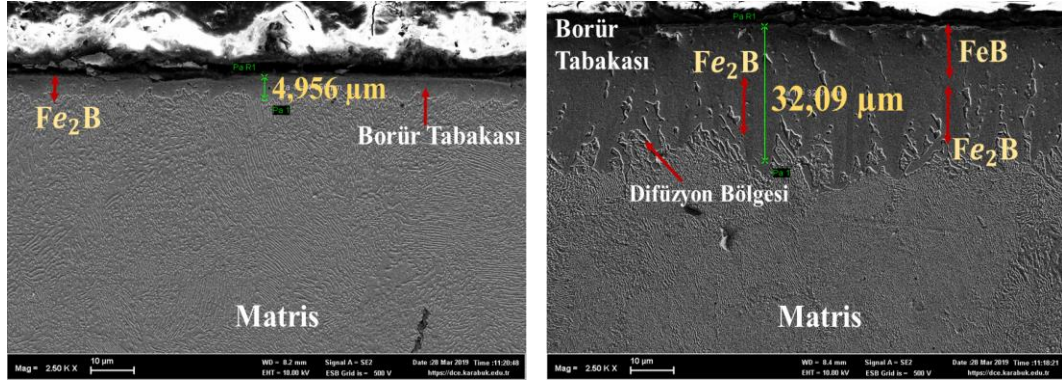
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

6.1. MALZEMELERİN KARAKTERİZASYONU

6.1.1. Borür Tabaka Kalınlıkları

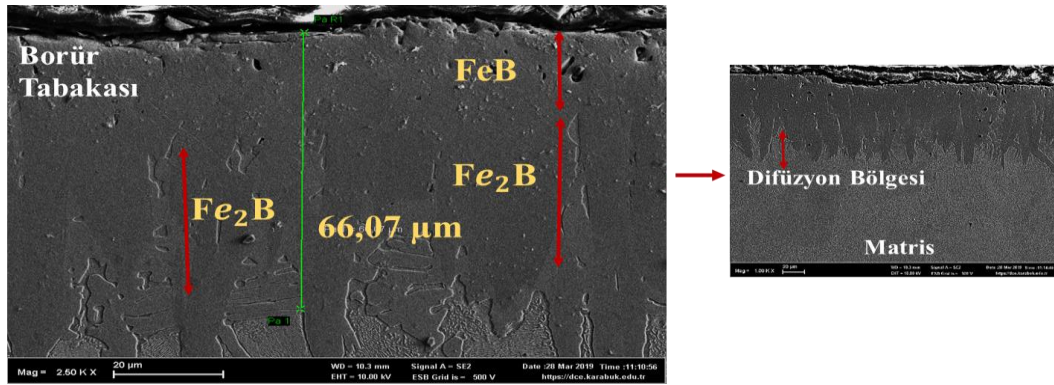
Malzeme yüzeyinde borür tabakasının oluşması için bor atomları ile baz malzeme etkileşime girmektedir. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimine göre, borür tabakası tek fazlı (Fe_2B) ya da çift fazlı (FeB ve Fe_2B) olmaktadır [14,31]. 700, 800 ve 900 °C sıcaklıkta nano bor tozu ile 4 saat borlanan ray çeliği numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'de borlama sıcaklığına göre tabakada " Fe_2B -matris" ve " FeB - Fe_2B -difüzyon bölgesi-matris" katmanlarının oluşumları gözlenmektedir. 700 °C'de (Şekil 6.1 (a)) tek fazlı Fe_2B fazı oluşurken, 800 ve 900 °C'de (Şekil 6.1 (b) ve (c)) çift fazlı FeB ve Fe_2B fazının birlikte olduğu görülmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak artan bor difüzyonu ile bor yoğunluğu fazla olan FeB fazı, kaplama tabakasının üst katmanlarında oluşmaya başlamaktadır. Şekil 6.3'deki XRD grafiklerine bakıldığında SEM görüntülerinin XRD görüntüleri ile uyumlu olduğu, birbirlerini doğruladığı görülmektedir. Şekil 6.1 (b) ve 6.1 (c)'de yüzeye yakın bölgedeki koyu kısımlar FeB fazının, daha açık renkte olan kısımlar ise Fe_2B fazının varlığını göstermektedir [15,26]. İlaveten Şekil 6.1 (b) ve Şekil 6.1 (c.1)'de görüldüğü gibi borür tabakasının hemen alt kısmında borlanmış yüzeyi baz malzemedan ayıran bir difüzyon bölgesinin varlığı söz konusudur. Ray çeliği yüzeyinde elde edilen bor kaplamasının morfolojisi, 700 °C'de pürüzsüz ve düz [21] bir görünüme sahip iken 800 ve 900 °C'de testere dişi morfolojisine [14,20,31] sahiptir. Alaşım elementleri kaplama tabakasında alaşım borürleri oluşturarak yüzeyin düz bir yapıya dönüşmesini sağlamaktadırlar [16]. Kromun borür tabakasında çözünerek yüzeye yayılması ile tabakanın morfolojisi etkilenmekte ve düz bir yapı elde edilmektedir [16]. Bu nedenle 700 °C'de CrB fazlarının yoğunlukta

olması (Şekil 6.3 (a)) düz bir yapı elde edilmesini sağlamıştır. Fakat, kaplama kalınlığı derinleştikçe homojen sıcaklık dağılımı bozulduğu için difüzyon bölgesi testere formunda oluşmaktadır.



(a)

(b)



(c)

(c.1)

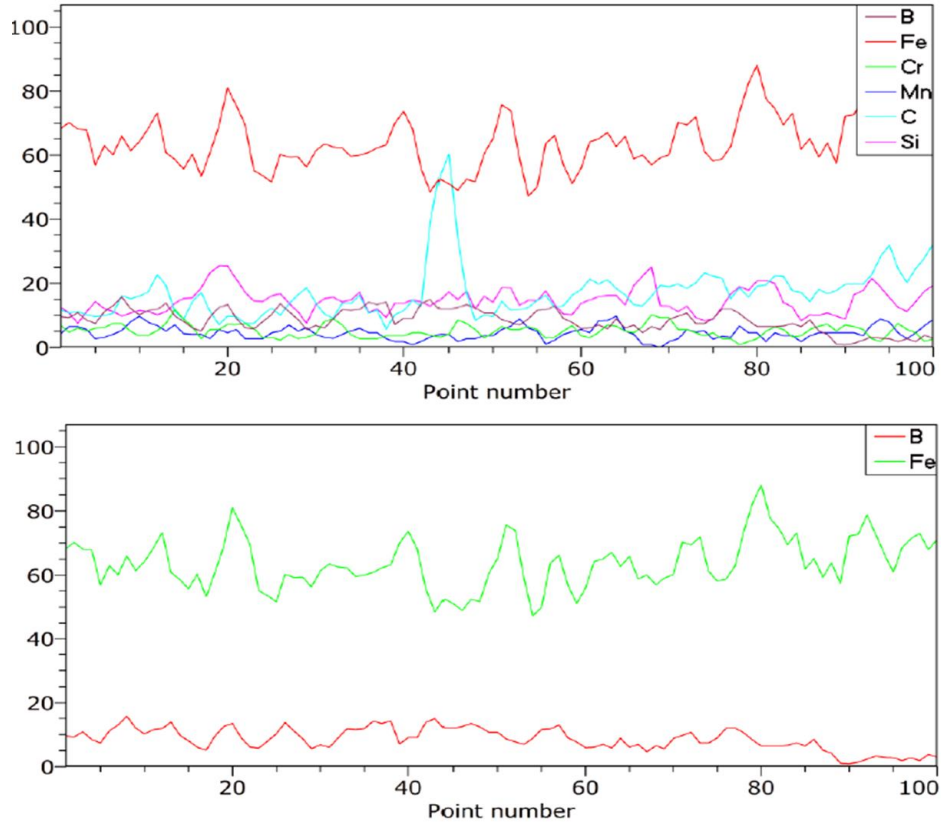
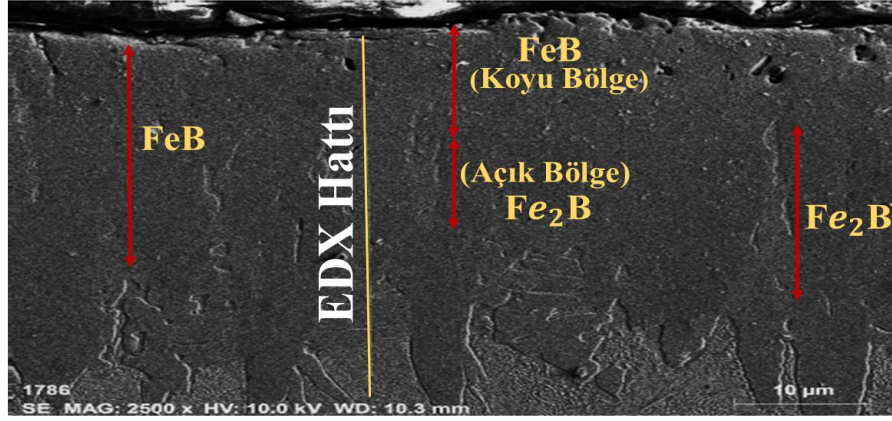
Şekil 6.1. Nano bor tozu ile borlanmış ray çeliğinin kesit SEM mikro yapısı. a) 700 °C, b) 800 °C, c) 900 °C (2,50 kx), c.1) 1,00 kx.

Şekil 6.1'e göre borlanmış numunenin tabaka kalınlıkları, 700 °C'de ~5 µm, 800 °C'de ~32 µm ve 900 °C'de ~66 µm'dir. Bu sonuçlara göre borlama sıcaklığının artırılmasıyla birlikte tabaka kalınlıklarının arttığı tespit edilmiştir. Literatüre bakıldığında Keddam vd. 2018 yılında AISI P20, H13 ve D2 çeliklerini 900 ve 950 °C'de 2,4,6 saat paket borlama ile borlamışlardır. 4 h borlanmış numunelerin 900 ve 950°C'deki tabaka kalınlıkları sırasıyla AISI P20 çeliği için 76 ve 79 µm, AISI H13 çeliği için 45 ve 72 µm, AISI D2 çeliği için 34 ve 50 µm olarak ölçülmüştür. Araştırmacılar tabaka kalınlıkları farklılıklarını, çeliklerin kimyasal bileşimlerine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [61]. Benzer şekilde Cuao-Moreu vd. 2019 yılında

CoCrMo döküm alaşımı üzerinde 1223, 1248 and 1273 K sıcaklığında 6, 8 ve 10 saat borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama sonucunda sırasıyla 33, 44 ve 76 μm tabaka kalınlıkları elde etmişlerdir [8]. Gök vd. 2017 yılında AISI H13 çeliğini 800, 900 ve 1000 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 2, 4 ve 6 h periyotlarda borlamıştır. 4 h borlanan numunelerin tabaka kalınlıkları sıcaklık artışına göre 6,62, 24,45 ve 69,16 μm olarak ölçülmüştür [14]. Literatüre göre sıcaklık artışı ile borür tabaka kalınlıkları arasındaki etkileşim mevcut çalışma ile uyumluluk göstermektedir. Mevcut değerler kıyaslandığında ray çeliğinin borlama karakteristiğinin AISI 316 ve P20 çelikleri ile benzer olduğu belirlenmiştir.

6.1.1.1. Borür Tabakası EDX Analizleri

900 $^{\circ}\text{C}$ 'de 4 saat borlanan numunenin EDX çizgi tarama profili Şekil 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.2'de borür tabakasında B, Fe, Cr, Si, Mn ve C elementlerinin varlığı görülmektedir. Yüzeiden derine doğru gidildikçe bor element miktarı azalmaktadır. Borlama işleminin başlamasıyla bor atomları demir ile etkileşime girmekte ve malzeme yüzeyinde Fe_2B fazı oluşmaktadır [15]. Sıcaklığın artmasıyla birlikte tabaka kalınlığı artmakta ve daha yüksek bor oranına sahip FeB fazı, Fe_2B fazı ile birlikte oluşmaya başlamaktadır [62].

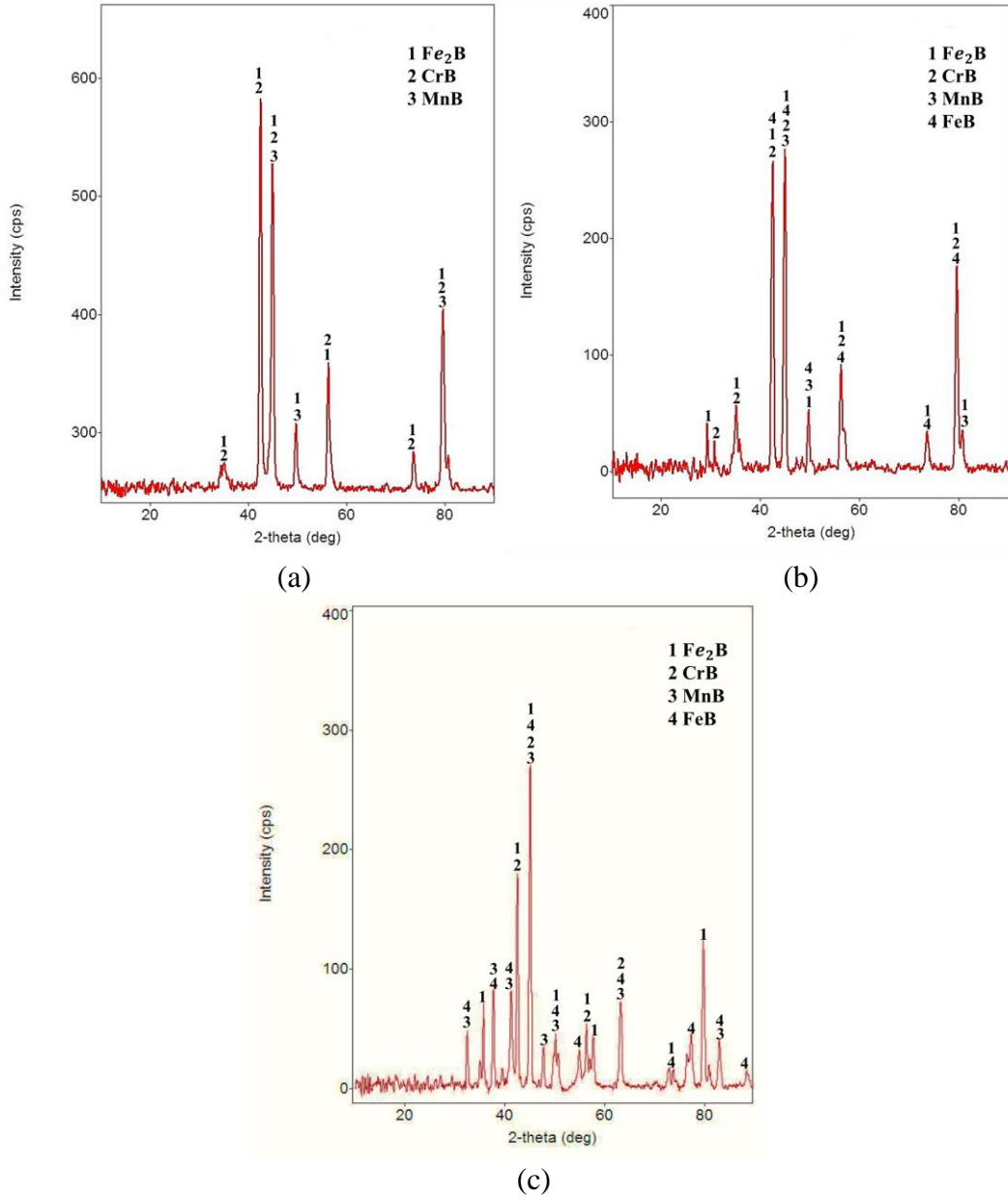


Şekil 6.2. 900 °C'de 4 saat borlanmış numunenin EDX analizi.

6.1.2. Borür Tabakasının XRD Analizleri

Borlama işlemine tabi tutulan demir esaslı malzemelerde borür fazı, malzeme yüzeyinde başlangıçta çekirdek halinde büyümektedir [50]. Borlama sıcaklığının 800-900 °C'ye yükselmesiyle birlikte difüzyon katsayısında artış meydana gelmektedir. Bu artışla birlikte malzeme yüzeylerinde daha kalın borür tabakaları elde edilmektedir [44]. Bor atomları, baz malzemenin atomları ile alaşım

oluşturabilmek için termal enerji ile metal latisin içerisine penetre olurlar [44]. Bor atomlarının difüzyonu sonucunda sıcaklık ve süreye bağlı olarak hem tek fazlı (Fe_2B) hem de çift fazlı (FeB ve Fe_2B) borür tabakaları oluşmaktadır. Şekil 6.3'te borlanmış ray çeliğinin XRD görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.3. Borlanmış ray çeliğinin XRD analizleri. a) 700 °C, b) 800 °C, c) 900 °C.

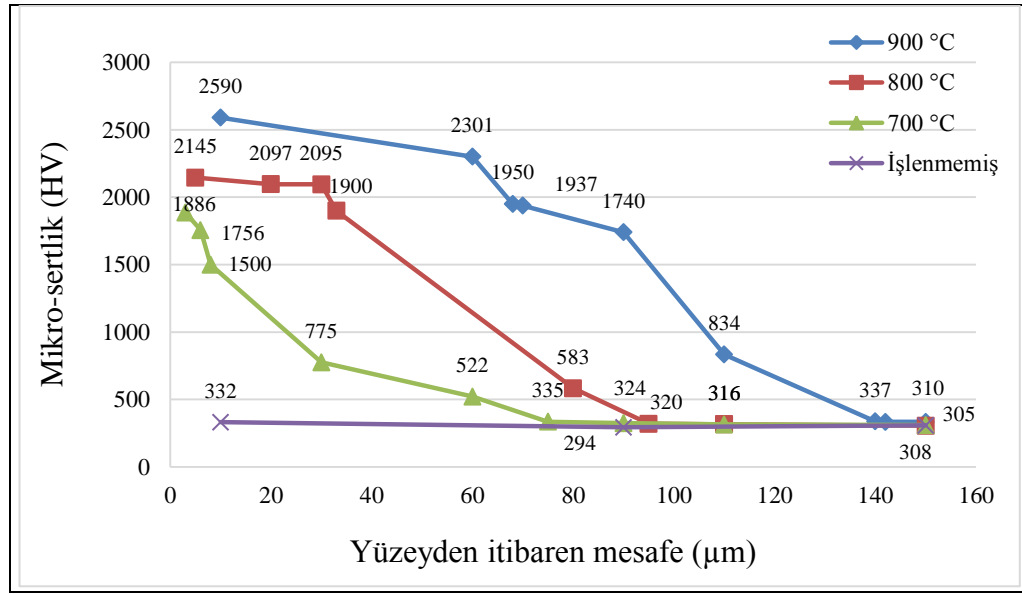
XRD grafiğine göre, borür tabakasında genel olarak demir borürler hakim olmaktadır [15]. İlâveten CrB ve MnB fazlarının da meydana geldiği görülmektedir. XRD görüntülerine göre 700 °C'de (Şekil 6.3 (a)) FeB fazı görülmezken, 800 °C'de (Şekil

6.3 (b)) az yoğunlukta FeB piki ve 900 °C'de ise (Şekil 6.3 (c)) yoğun bir şekilde FeB pikleri tespit edilmiştir. Bu durum sıcaklığın artmasıyla birlikte FeB fazının da arttığını kanıtlar niteliktedir [14,15,26]. Kayalı 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada, Fe₂B fazının nispeten sünek bir malzeme üzerinde büyüdüğünü, FeB fazının ise daha sert bir tabakada büyüdüğünü ifade etmiştir [44]. Bu nedenle sıcaklık artışı ile FeB fazı oluşumu bu yaklaşım ile de açıklanabilir. İki fazın farklı sertlik davranışı göstermeleri nedeniyle, kaplama karakterizasyonu açısından mikro sertlik ölçümü önem taşımaktadır.

6.1.3. Mikro-Sertlik Değerleri

Kaplama işlemlerinde kaplama ve difüzyon bölgesinin mekanik karakterizasyonu için sertlik değerlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda toplamda 150 µm derinlikte 7 farklı noktadan mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Mikro sertlik değerleri borlama sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. İşlenmemiş numunenin sertliği ~300 HV iken 700-800-900 °C 'de 4 saat borlama işlemiyle birlikte bu değer sırasıyla 1886, 2145 ve 2590 HV'ye ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlar borlama sıcaklığı arttıkça sertlik değerinin de arttığını göstermektedir. Bu durum sıcaklığın artmasıyla birlikte daha sert FeB fazının oluşmasıyla açıklanabilir [15,44]. Borür tabakasının sertliği FeB ve Fe₂B fazından dolayı matris malzemedan daha serttir ve sertlik değeri önceki çalışmalara uygun olarak matrix malzemeye doğru kademeli olarak azalmaktadır [14,15,20]. İlaveten sertlik artışında borür tabakasındaki krom elementinin de (Şekil 6.2) etkili olduğu söylenebilir [17,31]. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar literatür ile uyumluluk göstermektedir. Kara vd. 2016 yılında, AISI P20, H13 ve D2 çeliklerini 900 ve 950 °C'de 2,4,6 saat borlamışlardır. Borlama işlemiyle birlikte malzemelerin yüzey sertlikleri 408-532 HV'den 932-1989 HV'ye ulaşmıştır. Araştırmacılar sertlik değerindeki artışı borlama süresine ve sıcaklığına bağlamışlardır. Tüm numuneler için kaplama tabakasında yüksek sertlik değerleri elde edilmiş ve bu bölgelerden sonra ani düşüş yaşanarak matris bölgeye ulaşılmıştır [16]. Gök vd. 2017 yılında AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin 800, 900 ve 1000 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat borlanması sonucunda yüzey sertliklerinin 1650 – 2487 HV'ye ulaştığını ve baz malzemeye doğru bu değerlerin kademeli olarak azaldığını belirtmişlerdir [14].

Benzer şekilde AISI M2 yüksek hız çeliğine 950 °C'de 6 h borlama işlemi yapan Noda vd. 2019 yılında borlama işlemi ile birlikte yüzeye en yakın bölgede maksimum sertlik değerine (25 GPa) ulaşıldığını tespit etmişlerdir. Yüzeyden difüzyon bölgesine kadar doğrusal bir azalma meydana geldiğini (6,5 GPa) ve bu değer gittikçe azalarak minimum sertlik değerine matris bölgede (3,5 GPa) ulaşıldığını belirtmişlerdir [20]. Bu çalışmalara ek olarak, Raghs vd. 2020 yılında yapmış oldukları çalışmalarında AISI H13 sıcak iş takım çeliğini 700, 800, 900 °C'de 2, 4 ve 8 saat borlamışlardır. 700, 800, 900 °C'de 4 saat borlanmış numunelerin yüzey sertliklerini sırasıyla 1758 HV, 1887 HV ve 2001 HV olarak ölçerken 800 °C'de 2 ve 8 saat borlanmış numunelerin sertliklerini 1376 HV ve 1923 HV olarak ölçmüşlerdir. Araştırmacılar tüm numuneler için baz malzemeye doğru gidildikçe sertlikte önemli oranda düşüş yaşandığını tespit etmişlerdir [63].



Şekil 6.4. Borlanmış ray çeliğinin sertlik profili.

6.2. AŞINMA DENEYLERİNİN SONUÇLARI

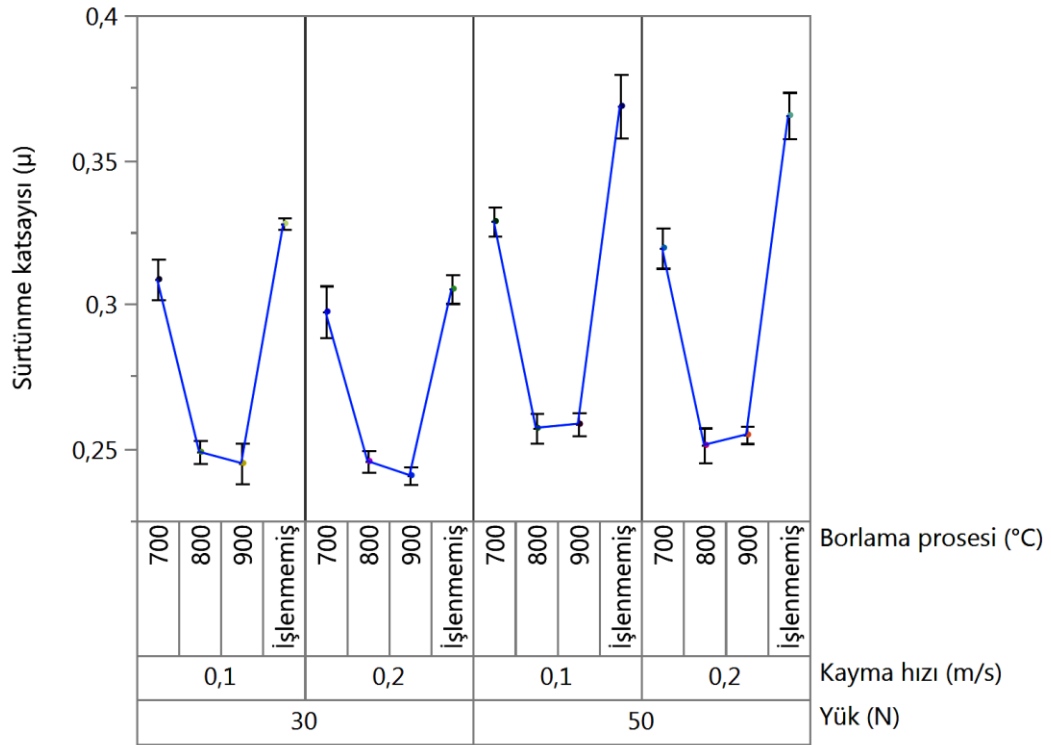
6.2.1. Sürtünme Katsayısı

Ray çeliklerine etki eden gerilmeler, rayların mantar bölgelerinde mikro çatlaklar oluşturmaktadır [7,64,65]. Oluşan çatlakların ilerlemesinden kaynaklanan plastik deformasyonlar sürtünme katsayısını etkilemektedir [15]. Kuru kayma koşulları

altında yapılan aşınma testlerinde sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüş ve test sırasında kaydedilen sürtünme katsayılarının ortalama değerleri Çizelge 6.1’de ve hata çubuklarıyla birlikte Şekil 6.5’te verilmiştir. Şekil 6.5’te, borlama sıcaklığının 800 °C’ye kadar artışı ile birlikte sürtünme katsayısının düştüğü, 800 °C’den sonra ise sabit kaldığı görülmektedir. Bu durum literatür ile uyumluluk göstermektedir [15,17,20].

Çizelge 6.1. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri (μ).

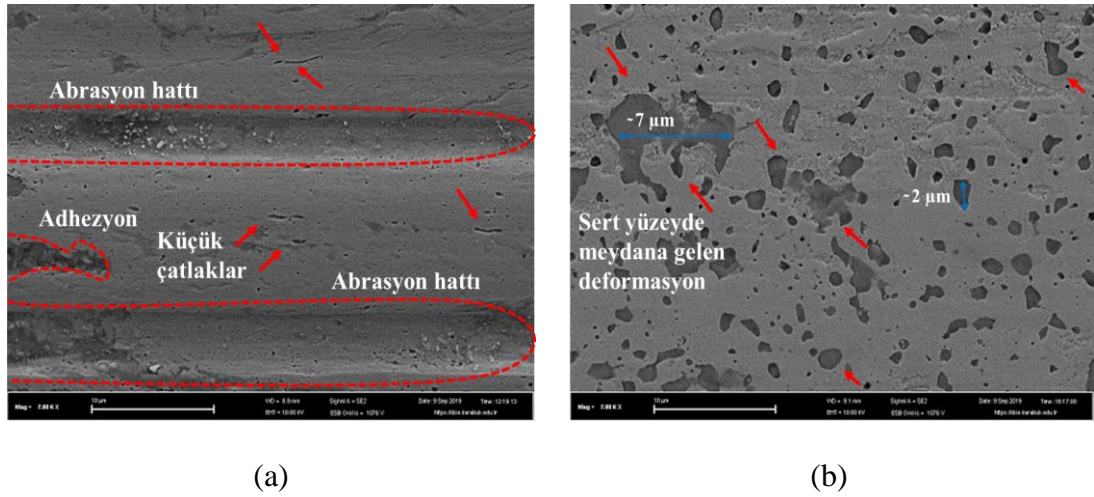
Numuneler	30 N, 0,1 m/s	30 N, 0,2 m/s	50 N, 0,1 m/s	50 N, 0,2 m/s
İşlenmemiş	0,3279	0,3053	0,3686	0,3654
700 °C, 4 h	0,3086	0,2974	0,3287	0,3195
800 °C, 4 h	0,2488	0,2456	0,2571	0,2512
900 °C, 4 h	0,2449	0,2407	0,2585	0,2548



Şekil 6.5. Sürtünme katsayısı için değişkenlik grafiği.

Borlama sıcaklığı artışı ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki borlanan yüzeyin sertliği ve pürüzlülüğü ile açıklanabilir. Malzemelerin yüzey sertliğinin artmasıyla

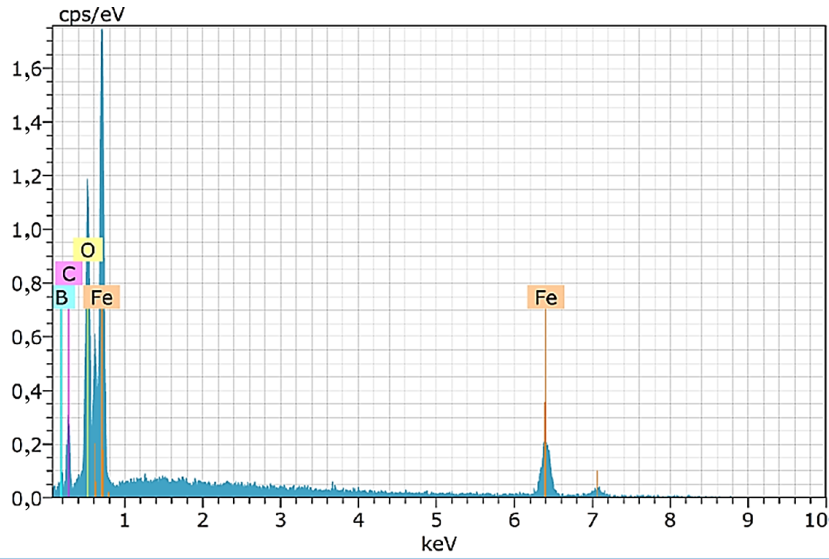
birlikte artan yüzey direncine bağlı olarak sürtünme katsayısında düşüş sağlanmıştır. Yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri sürtünme katsayısı sonuçlarını doğrular niteliktedir. Kaplanmamış numunede oluşan aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü incelendiğinde (Şekil 6.6 (a)), yüzeyin sürünme aşınması mekanizmasıyla plastik deforme olduğu görülmektedir. Deformasyon esnasında oluşan bağ enerjisi direnci nedeniyle sürtünme katsayısı artmaktadır. Deneylede en düşük sürtünme katsayısı değerleri 800 °C ve 900 °C’de borlama yapılmış numunelerde elde edilmiştir. Şekil 6.6 (b)’de verilen SEM görüntüsünde malzemenin aşınmamış olması bu durumu desteklemektedir. Şekil 6.6 (b)’de sadece, yüzeyin aşırı sert olmasına (Şekil 6.4) bağlı olarak tabaka kalkması kusuru göze çarpmaktadır. Sert yüzeyde sürtünme etkisiyle oluşan küçük çatlaklar yüzeyden ~2 µm çapında tabaka sıyrılmalarına neden olmuştur. Fakat bu kusur yüzeyde derinlemesine etki etmemiş, yüzey pürüzlülüğünü arttırmamış ve bu sayede sürtünme katsayısını olumsuz etkilememiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.6. 30 N, 0,1 m/s deney koşullarındaki ray çeliğinin aşınma izlerinin SEM mikrografları (7 kx zoom ve 10 µm ölçek); a) İşlenmemiş, b) 900 °C, 4h.

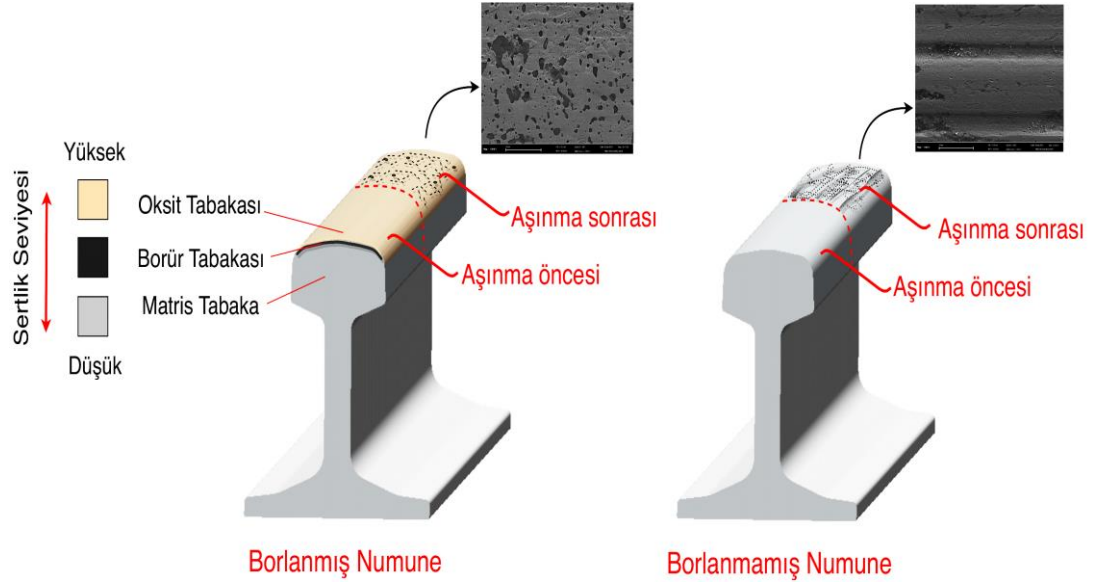
Borlama işlemi ile birlikte aşınma katsayısının düşmesinde bor elementinin yağlayıcı etkisi de önem taşımaktadır. Borun oksijene olan yüksek ilgisi sebebiyle yüzeyde ince bir film tabakası halinde oluşan bor oksit (B_2O_3) sürtünme esnasında katı yağlayıcı olarak görev yapmaktadır [9,19,62]. Bu tabaka literatürde camsı-sert bir tabaka olarak da adlandırılmıştır [14,15]. Şekil 6.6 (b)’deki yüzey için elde edilen EDX spektrumu değerleri (% 15,13 oranındaki oksijen ve % 8 oranındaki bor) oksit

tabakasının varlığını kanıtlamaktadır (Şekil 6.7). Bu tabaka sayesinde adhezyon oluşumu engellenmiştir (Şekil 6.6 (b)). Adhezyon kaynaklı deformasyon, yüzeylerdeki mikro kaynaklar sebebiyle oluşmaktadır. Oksit tabakasının yağlayıcılık etkisi sayesinde yüzeydeki basıncın belirli bir kısmı yağlayıcı film tabakası tarafından taşınmış ve kaynak oluşumları engellenebilmiştir. Ray çeliğinin aşınma direncini arttıran ve adhezyon aşınmasını engelleyen bor kaplama ve oksit tabakası oluşumu mekanizmaları Şekil 6.8’de şematik olarak verilmiştir.



Spektrum: 1						
Element	AN	Seriler	Unn. C (% Ağırlıkça)	Norm. C (% Ağırlıkça)	Atom. C. (%)	Hata (1 Sigma) (% Ağırlıkça)
B	5	K- serisi	8,85	8,00	21,17	2,83
C	6	K- serisi	7,35	6,65	15,83	1,55
O	8	K- serisi	16,73	15,13	27,05	2,49
Fe	26	K- serisi	77,65	70,22	35,96	3,85
		Toplam	110,57	100,00	100,00	

Şekil 6.7. EDX spektrumu.



Şekil 6.8. Borür tabakası ve oksit tabakası oluşumunun şematik olarak gösterimi.

Sürtünme katsayısı için elde edilen ANOVA sonuçları Çizelge 6.2’de verilmiştir. Sürtünme kaybı değerlerinin ANOVA’ında Adj-RSq değerleri % 93 olarak hesaplanmıştır. Bu değer istatistiksel güvenilirlik açısından tatmin edici seviyede elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre sürtünme katsayısı üzerinde yük ve borlama sıcaklığı parametreleri istatistiksel ve fiziki olarak anlamlı etki göstermiştir ($p < 0,05$). Sürtünme katsayısı üzerinde hız parametresi % 0,85, yük parametresi % 7,28 ve borlama sıcaklığı % 87,60 oranında etkili olmuştur.

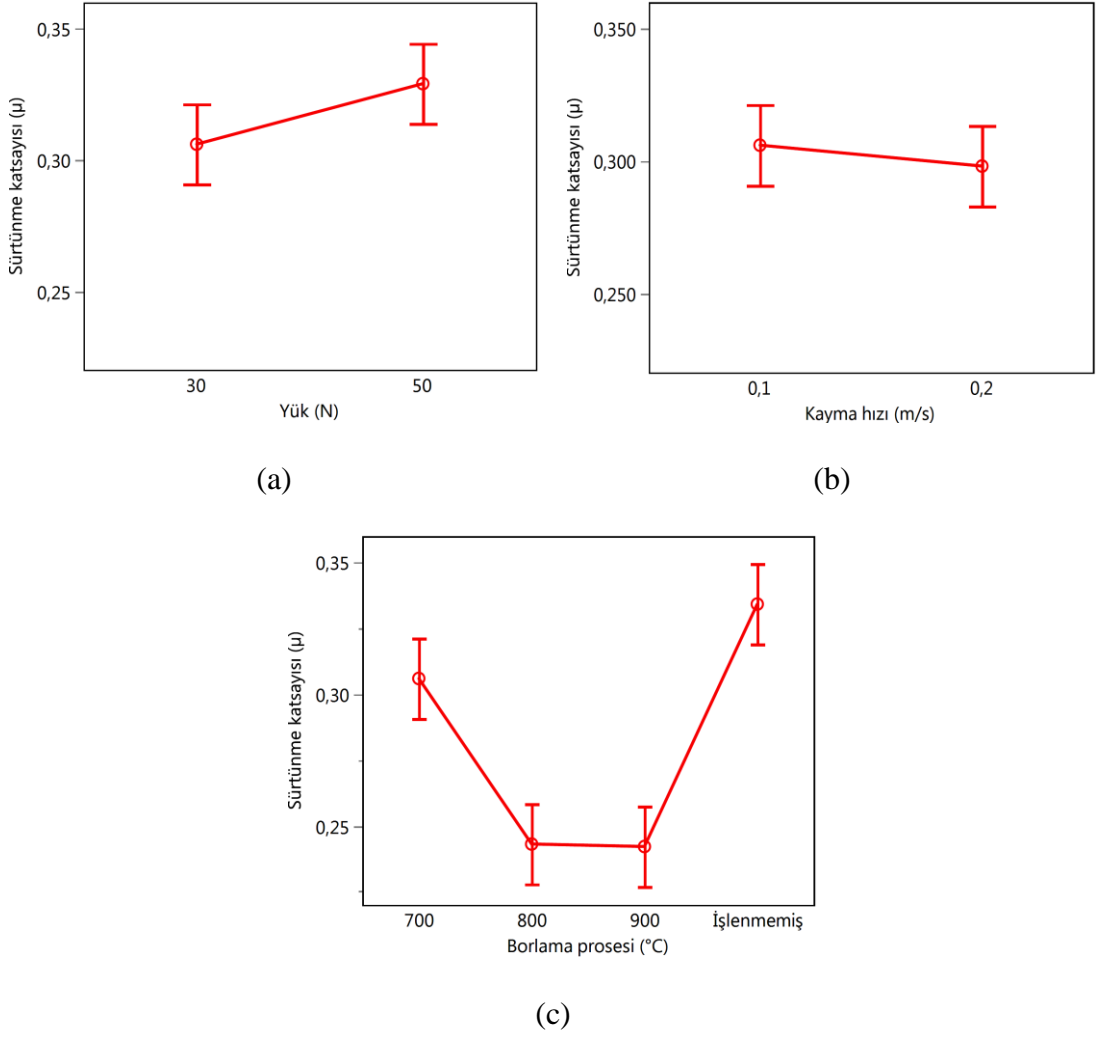
Çizelge 6.2 Sürtünme katsayısı için ANOVA tablosu.

	DF	SS	f-değeri	p-değeri	Etki Oranı %
Yük (N)	1	0,00212982	17,041	0,0021	7,28
Kayma Hızı (m/s)	1	0,00024964	8	0,1879	0,85
Borlama Sıcaklığı (°C)	3	0,02560743	1,9975	<0,0001	87,60
Hata	10	0,00124976	68,299		4,27
Toplam	15	0,02923666	5		100
R ²	% 95,7				
R ² (Adj)	% 93,6				

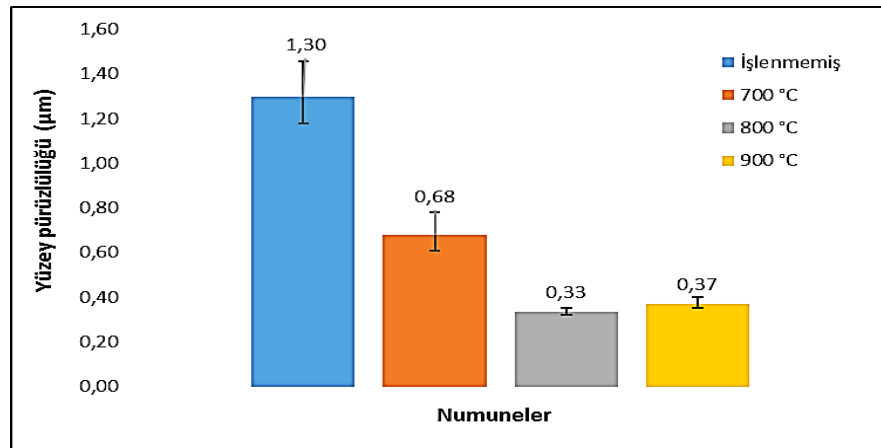
Cetin ve Korkmaz 2020 yılında [66] yük parametresinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisini % 66,35 olarak belirlemiştir, Literatür ile kıyaslama yapılırsa,

borlama işlemi yük parametresinin etkisini ~ % 60 oranında düşürmüştür. Hız parametresinin etkisi literatür ile benzerdir [66].

Parametrelerin arındırılmış etki grafikleri Şekil 6.9'da verilmiştir. Sürtünme katsayısı üzerinde en düşük etkiyi gösteren hız parametresi arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır (Şekil 6.9 (b)). Hız artışıyla birlikte yüzeydeki atalet etkisinin azaldığı ve buna bağlı olarak sürtünme katsayısının düştüğü iddia edilebilir. Benzer şekilde sürtünme katsayısını azaltıcı etki borlama prosesiyle elde edilmiştir. Borlama sıcaklığı ile birlikte artan sertliğe bağlı olarak sürtünme katsayısı azalma davranışı göstermiş, fakat 800 °C ve 900 °C'de benzer sürtünme katsayısı sonuçları elde edilmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde 800 °C ile 900 °C arasında 445 HV fark olduğu görülmektedir. Bu duruma bağlı olarak, sertlik artışının ~2000 HV değerine kadar sürtünme katsayısı ile etkileşim oluşturduğu fakat bu değerden sonra anlamlı bir ilişkinin oluşmadığı belirlenmiştir. ~2000 HV sertlik değerinden sonra sürtünme esnasında yüzeylerde ihmal edilebilir seviyede deformasyon oluşması sebebiyle sürtünme katsayısı sabit kalmıştır. Sürtünme katsayısı üzerinde sertlik ile beraber yüzey pürüzlülüğü değeri de etkili bir parametredir. Bu sebeple ~2000 HV sertlik değerinden sonra sürtünme katsayısını sadece yüzey pürüzlülüğü parametresinin etkilediği iddia edilebilir. İlaveten, yüzeyde ihmal edilebilir seviyede deformasyon oluşacağı için malzemenin borlama işlemi sonrası oluşan pürüzlülük değerine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi analiz edilebilir. Borlanmış yüzeylerin ortalama pürüzlülük değerleri incelendiğinde borlama sıcaklığı arttıkça yüzey pürüzlülüğün azaldığı, 800 °C'den sonra ise yüzey pürüzlülük değerinin değişmediği görülmektedir (Şekil 6.10). Şekil 6.10'dan elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü değerleri ile sürtünme katsayısı değerleri pozitif yönlü ve ~ % 90 uyumlu korelasyona sahiptir. Bu değer iddia edilen sonuçları doğrular niteliktedir. Sonuç olarak, sürtünme katsayısının minimizasyonu açısından ray çeliklerinin 800 °C'de borlanması ve 2000 HV sertlik değerine ulaşması yeterlidir. Bu değerden sonra borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri değişmediği için borlama sıcaklığı ve sertlik değerleri sürtünme katsayısını etkilememektedir.



Şekil 6.9. Sürtünme katsayısını etkileyen parametreler; a) Yük, b) Kayma hızı, c) Borlama prosesi.



Şekil 6.10. Borlanmamış ve borlanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri (Ra).

6.2.2. Hacim Kaybı

Sürtünen yüzeylerde hacim kaybı kaçınılmazdır. Archard'ın aşınma teorisine göre aşınma hacmi; kayma hızı, yük ve malzemenin sertliğine göre değişkenlik göstermektedir [14]. Eşitlik 2'de verilen bu teoriye göre, malzemelerin sertlik değerleri arttıkça aşınmaya karşı üstel bir oranla dirençli hale gelmeleri, kayma hızı ve yük değerleri arttıkça da daha fazla aşınmaları beklenir. Sertliğin üstel olarak hacim kaybını etkilemesi nedeniyle ray çeliklerinin borlanması önem taşımaktadır. Hacim kaybı ölçümü için kullanılan metodolojiye göre, 2D optik mikroskop ile ölçülen aşınma izi derinlikleri Şekil 6.11'de gösterilmiş ve Eşitlik 1'e göre hesaplanan hacim kayıpları Çizelge 6.3'te verilmiştir (Şekil 6.12 sonuçların hata değerleri ile gösterimidir). Şekil 6.11'de görülen her bir derinlik noktası deney sıralamasını ifade etmektedir. Borlanmamış numunede maksimum 80 µm (Şekil 6.11 (a)) derinlik oluşurken, borlanmış numunelerde bu değer maksimum 5 µm'dir (Şekil 6.11 (b)). Şekil 6.4'teki sertlik grafiği dikkate alındığında, en fazla hacim kaybının işlenmemiş numunede elde edilmesi ve borlama işlemiyle birlikte bu kaybın azaltılması beklenen bir durumdur. Şekil 6.12'de bu öngörünün doğrulandığı görülmektedir. İlaveten, numune yüzeylerinden alınan aşınma izlerinin SEM görüntülerinde maksimum deformasyonun işlenmemiş numunede (Şekil 6.13 (a)) olduğu görülmektedir. 800 ve 900 °C'de borlanmış numune yüzeylerinde (Şekil 6.13 (b-c)) ciddi deformasyon izlerinin oluşmadığı görülmüş, yer yer yorulma gerilmesi kaynaklı ihmal edilebilir çatlak oluşumları gözlenmiştir [15]. Bu nedenle bu numunelerde meydana gelen hacim kayıpları minimum düzeyde gerçekleşmiştir. Literatüre bakıldığında, borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça malzeme yüzeyindeki borür (FeB) tabaka kalınlığı ve yüzey sertliği artmakta bunun sonucunda da hacim kayıplarında azalma gözlenmektedir [14].

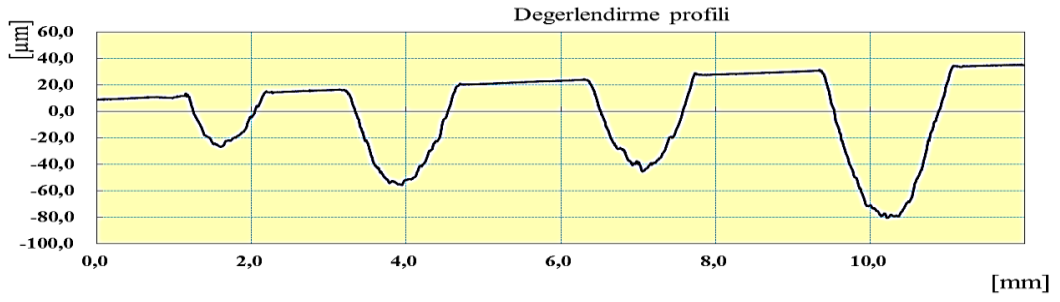
$$Volume Loss = \int K \cdot \frac{P \cdot v}{H^2} dt \quad (2)$$

K : Deneysel olarak ölçülmüş katsayı

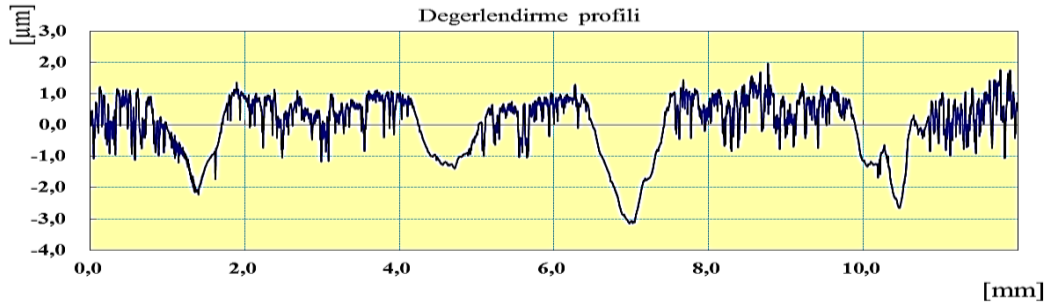
H : Malzemenin sertliği

v : Kayma hızı

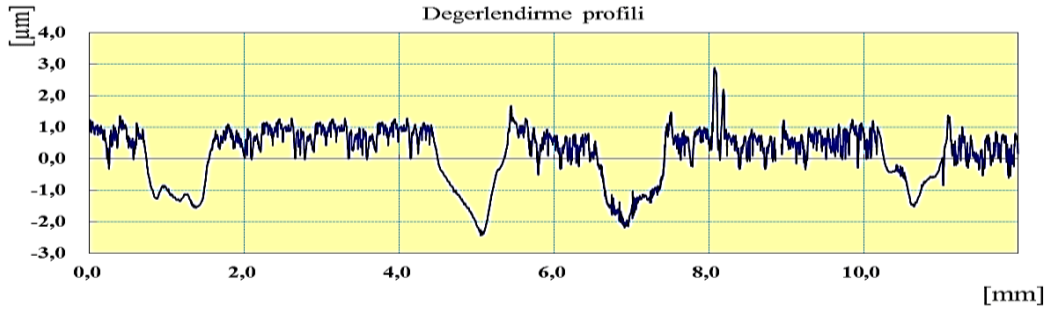
P : Yük



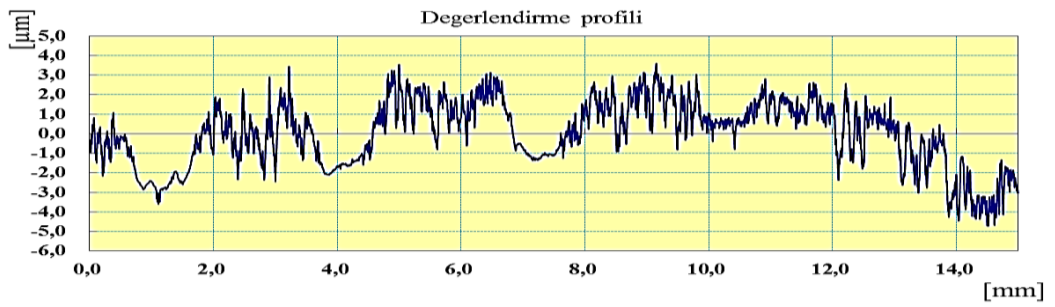
(a)



(b)



(c)

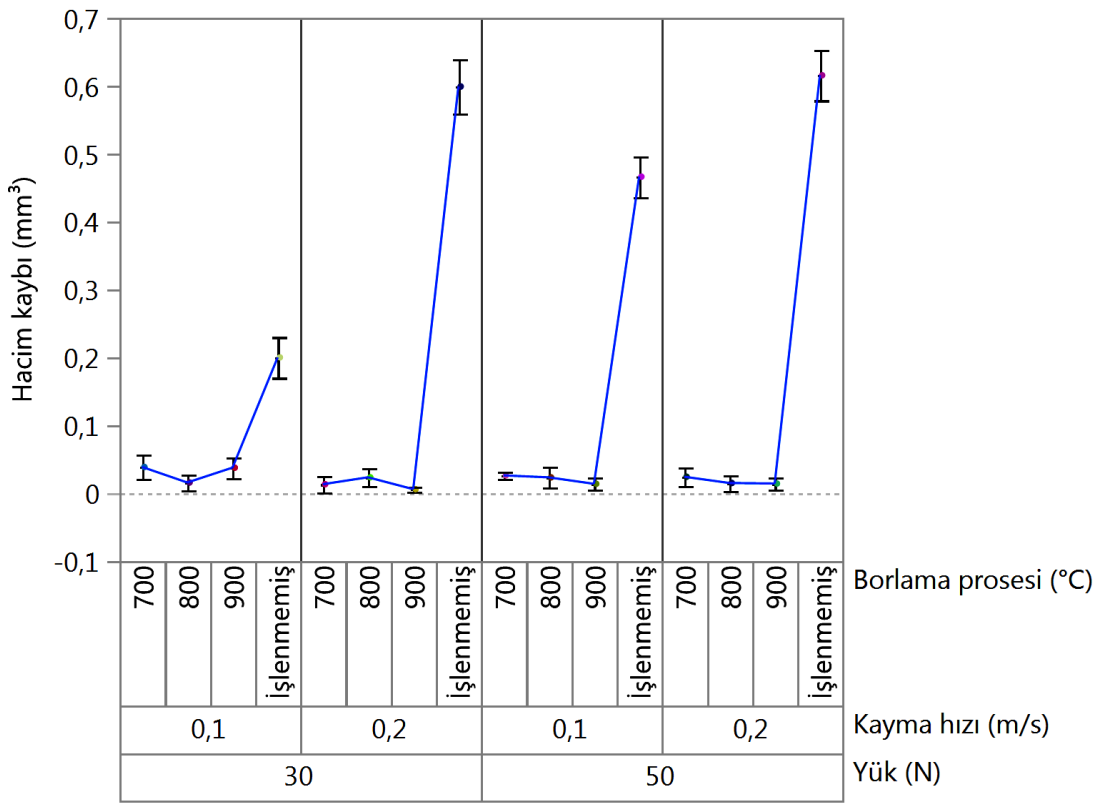


(d)

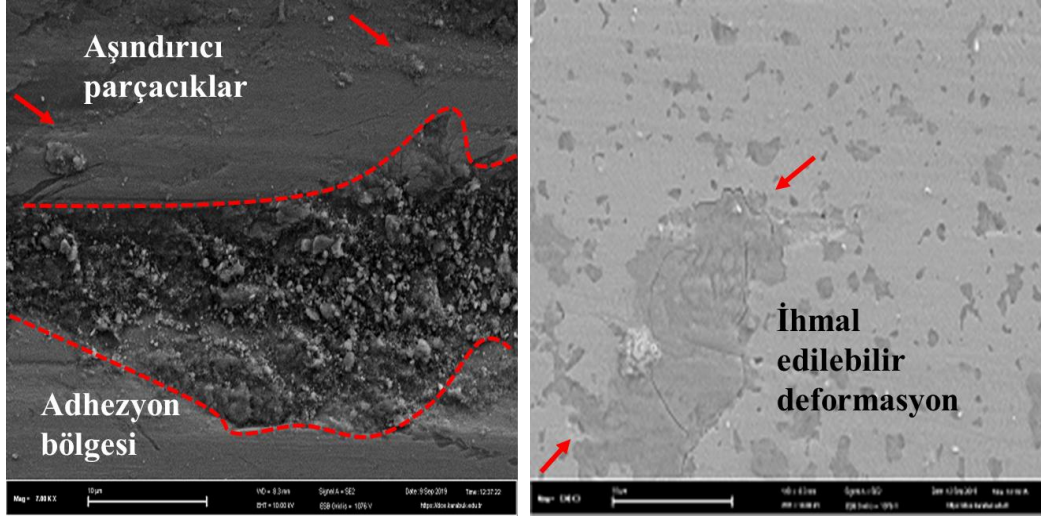
Şekil 6.11. Aşınma izi derinlikleri; a) İşlenmemiş, b) 700 °C, c) 800 °C, d) 900 °C

Çizelge 6.3. Tüm deney koşulları için borlanmış ve borlanmamış numunelerin hacim kayıpları (mm^3).

Numuneler	Aşınma Deney Koşulları			
	Yük : 30 N Hız : 0,1 m/s	Yük : 30 N Hız : 0,2 m/s	Yük : 50 N Hız : 0,1 m/s	Yük : 50 N Hız : 0,2 m/s
İşlenmemiş	0,2	0,5992	0,4663	0,6157
700 °C, 4 h	0,0385	0,0131	0,0261	0,0241
800 °C, 4 h	0,0156	0,0233	0,0232	0,0149
900 °C, 4 h	0,0375	0,0058	0,0137	0,0141

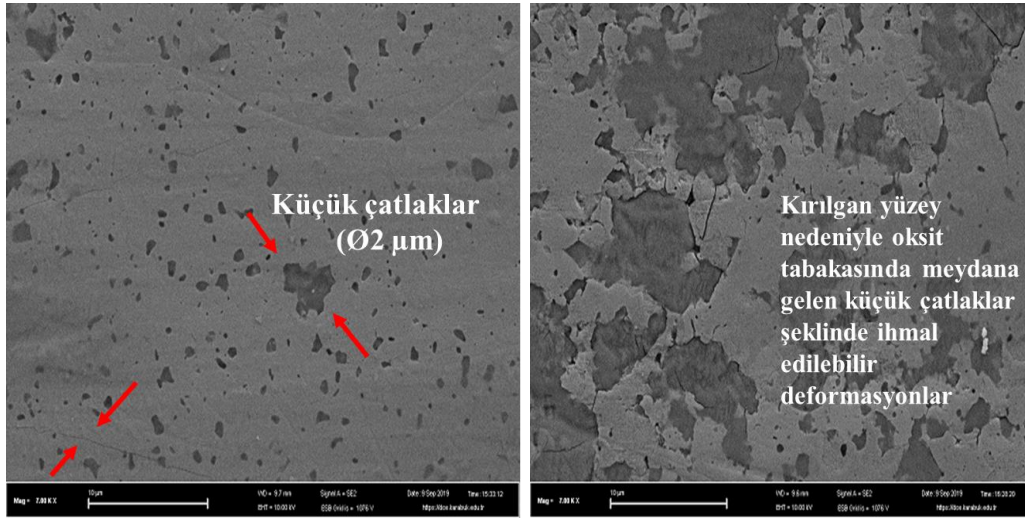


Şekil 6.12. Hacim kayıpları için değişkenlik grafiği (mm^3).



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 6.13. 50 N, 0.2 m / s test koşullarında ray çeliğinin aşınma izlerinin SEM mikrografları (7 kx); a) İşlenmemiş, b) 700 °C, c) 800 °C, d) 800 °C.

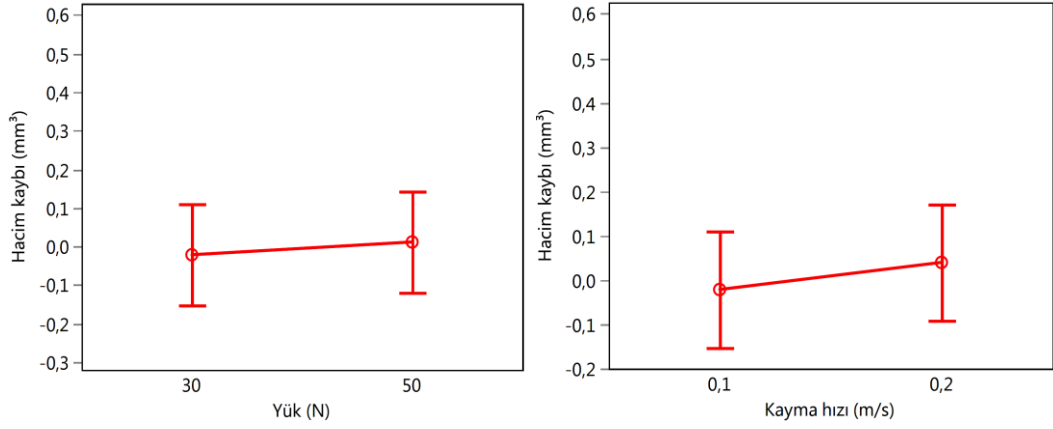
Ray çeliği numunelerinde meydana gelen hacim kayıpları ANOVA ile değerlendirilmiştir (Çizelge 6.4). Hacim kaybı değerlerinin ANOVA'sında Adj-RSqr değeri % 80 olarak hesaplanmıştır. Bu değer istatistiksel modelin anlamlılığı açısından yeterli seviyededir [66]. Analiz sonuçlarına bakıldığında hacim kaybı parametresi üzerinde en etkili faktörün borlama prosesi olduğu (% 84,43) görülmektedir.

Çizelge 6.4. Hacim kaybı için ANOVA tablosu (mm³).

	DF	SS	f-değeri	p-değeri	Etki Oranı %
Yük (N)	1	0,00439	0,47521	0,50628	0,61
Kayma Hızı (m/s)	1	0,01496	1,61888	0,23204	2,08
Borlama Sıcaklığı (°C)	3	0,60622	21,86203	0,00011*	84,43
Hata	10	0,09243			12,88
Toplam	15	0,71800			100
R ²	% 87,13				
R ² (Adj)	% 80,69				

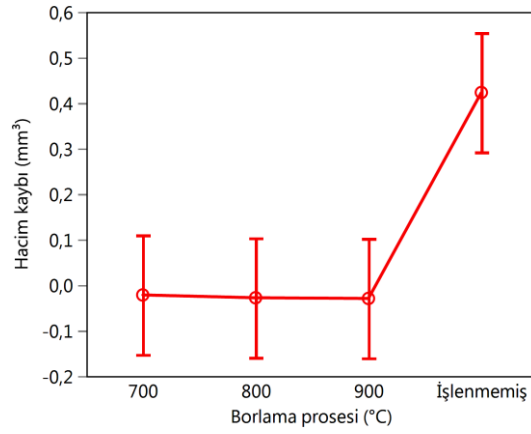
Borlama parametreleri birbirleri arasında karşılaştırıldığında ise (Şekil 6.14) birbirine yakın sonuçların ölçüldüğü görülmektedir. Bu sonuca bağlı olarak 700 °C’de borlanan ray çeliklerinde aşınmaya bağlı hacim kaybının minimize olduğu ve bu değer üstündeki sıcaklıklarda sonucun değişmediği belirlenmiştir. Ayrıca sertlik açısından 700 °C’de elde edilen ~1800 HV değerinin aşınma esnasında oluşacak hacim kayıplarının minimizasyonu açısından yeterli olduğu (Şekil 6.4) anlaşılmaktadır. Şekil 6.14’teki bir diğer sonuç, yük ve hız parametrelerinin artışıyla hacim kaybı artışıdır. Yük ve hız parametrelerinin artışıyla yüzeye etki eden basma ve kesme gerilmeleri artmıştır. Mikro düzlemde artan basma gerilmesine bağlı olarak ray malzemesinin akma sınırını geçip plastik deformasyona uğraması ve artan kesme gerilmesine bağlı olarak pürüzlülük tepelerinin partiküller halinde yüzeyden ayrılması hacim kaybının artışına sebep olmuştur. Bu etkiye bağlı deformasyon Şekil 6.13 (a)’da işlem görmemiş ray numunesinde net bir şekilde görülmektedir. Fakat borlanmış numunelerde artan yüzey sertliğine bağlı olarak basma ve kayma gerilmelerinden kaynaklı deformasyon sınırı aşılmamış ve hacim kaybı değerleri minimize olmuştur. Basma ve kayma gerilmelerinin etkisi Şekil 6.15’te şematik olarak ifade edilmiştir. Artan yük ve hıza bağlı olarak borlanmış yüzeylerde etki oluşmaması ANOVA sonuçlarında görülmektedir. Çizelge 6.4’e göre yük ve hız hacim kaybı üzerinde sırasıyla % 0,6 ve % 2,08 oranında etkilidir. İlaveten p (p<0,05) değerine göre yük ve hız parametreleri hacim kaybı üzerinde istatistiki ve fiziki önemde bir etki oluşturamamıştır. Cetin ve Korkmaz’ın 2020 yılında yapmış oldukları çalışmalarında, yük ve hız parametrelerinin hacim kaybına etkisini sırasıyla % 39,74 ve % 11,16 şeklinde, Namdeo vd. 2016 yılında yük parametresinin etkisini

% 2,7, Ambigai ve Prabhu 2019 yılında % 0,15, Mat Tahir vd. 2017 yılında yükün hacim kaybı üzerinde etkisini % 8,44 olarak bulmuşlardır [66–69]. Borlama etkisi, yük ve hız parametrelerinin hacim kaybı üzerindeki etkisini anlamsız hale getirmiştir.



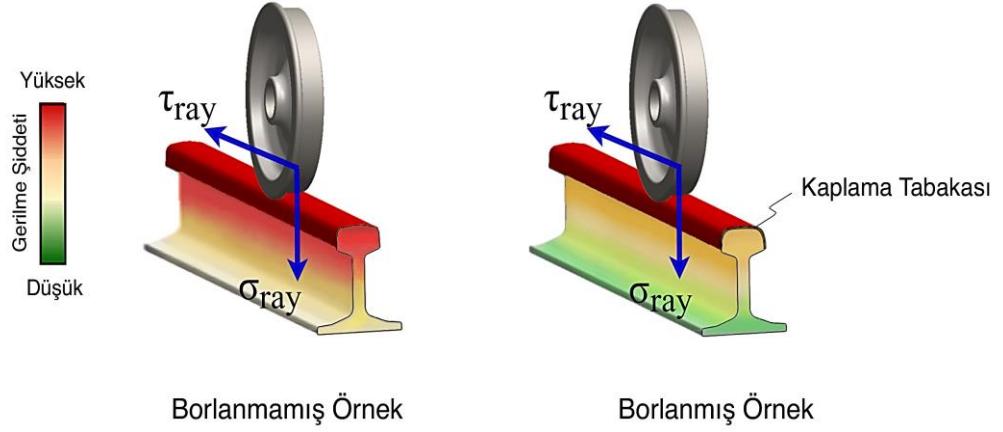
(a)

(b)



(c)

Şekil 6.14. Hacim kaybını etkileyen parametreler; a) Yük, b) Kayma hızı, c) Borlama prosesi.

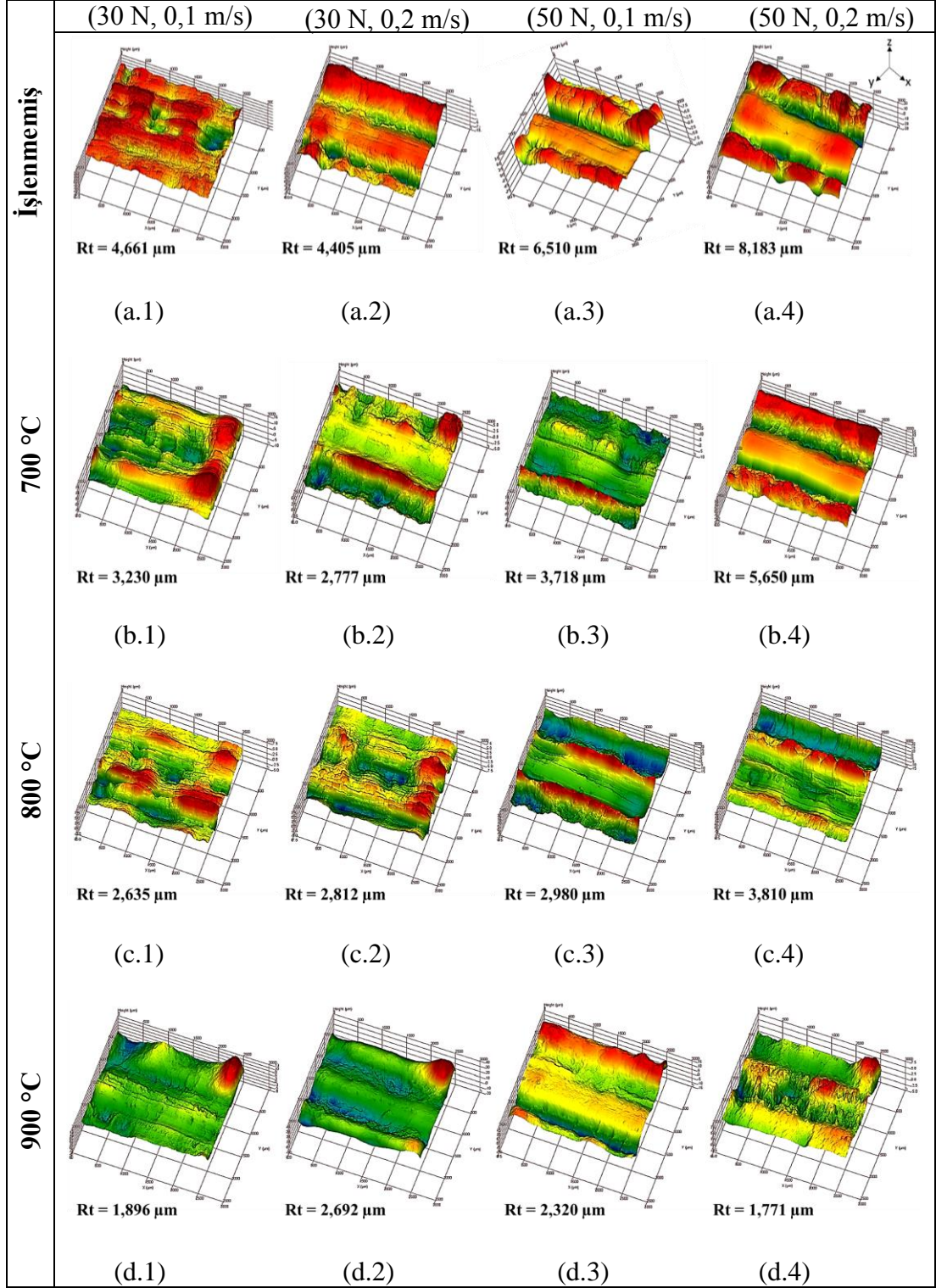


Şekil 6.15. Basma ve kayma gerilmelerinin etkisinin şematik olarak gösterimi.

6.2.3. Yüzey Pürüzlülük ve Topoğrafya Analizleri

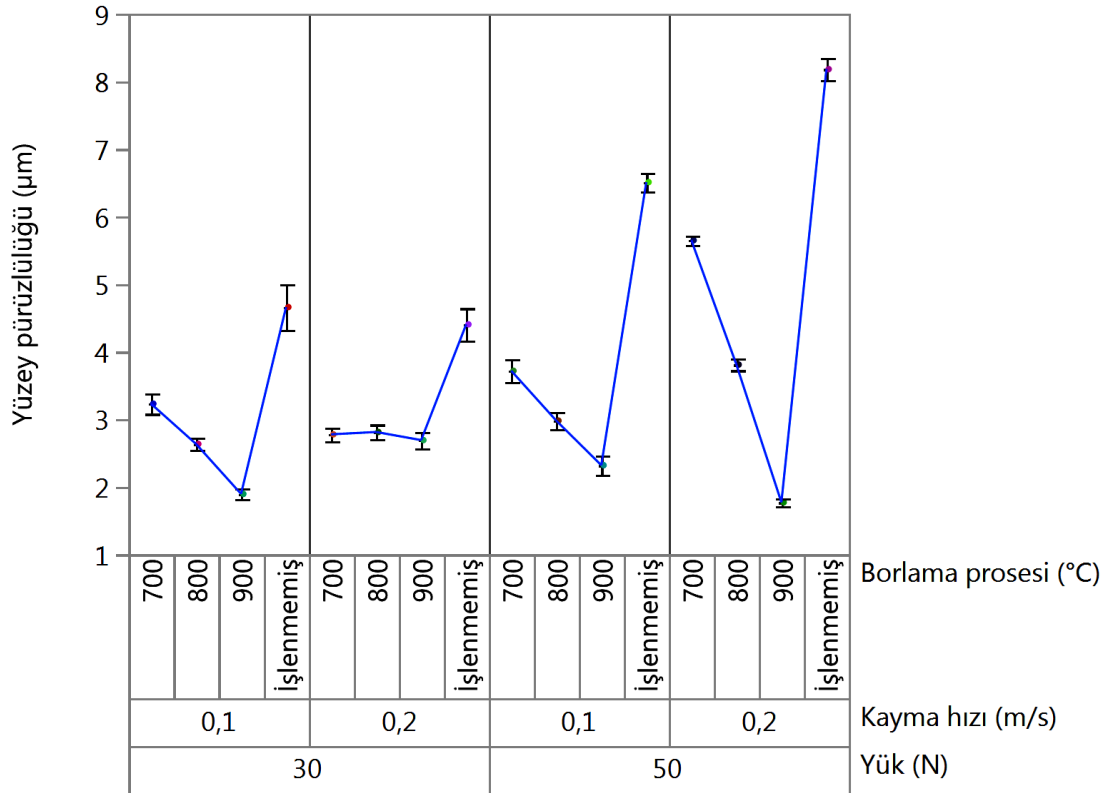
Hacim kaybı için elde edilen sonuçları doğrulamak amacıyla aşınan yüzeylerden ölçülen topoğrafya görüntüleri Şekil 6.16'da verilmiştir. Topoğrafya görüntülerinde elde edilen R_t değerleri, aşınma iz derinliğini ifade etmek amacıyla her bir görüntünün altına eklenmiştir. Topoğrafya görüntüleri öncelikli olarak renklendirme metodolojisiyle incelendiğinde, işlem görmemiş numunelerde kırmızı renk yoğunluğuna bağlı olarak yoğun deformasyon olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 6.16 (a.1-4)). Borlama sıcaklığının artmasına bağlı olarak yeşil ve sarı tonlamalarda oluşan artış, aşınma bölgesinde düzgün bir yüzey oluştuğunu göstermektedir (Şekil 6.16 (b-c-d)). Aşınma direnci düşük yüzeylerde abrazyon, adezyon ve difüzyon mekanizmaları yoğun etki oluşturmakta ve yüzey düzgünlüğü bozulmaktadır. Bu durum aşınma entropisi olarak tanımlanabilir. Borlama sıcaklığının artışı ile birlikte artan yüzey sertliği ve azalan yüzey pürüzlülüğü değerleri sayesinde aşınma entropisi azalmıştır. Entropinin yüksek borlama sıcaklıklarında düştüğü R_t değerleri dikkate alınarak söylenebilir. Aşınma mekanizmaları etkisini azalttıkça R_t değerleri yani aşınma izi derinliği azalmıştır. Bu sayede hacim kaybı azalmış, yüzey formu ve düzlemsellik korunmuştur. Yüzeydeki dalgalanmaların azalmasında oksit tabakasının yağlayıcı etkisi de önem taşımaktadır. Katı yağlama etkisi sayesinde yüzeyde oluşan sürtünme sıcaklıklarının hem azalması hem de yüzeye homojen bir şekilde dağılması sağlanabilmektedir. Sıcaklığın azalması termal yumuşamayı azaltarak ray çeliğinin

rijitliğini korumasını sağlamıştır. İlaveten, homojen sıcaklık dağılımına sayesinde genişlemeye bağlı dalga bantlarının oluşumu azaltılmıştır.



Şekil 6.16. Aşınmış bölgelerin yüzey topoğrafyası.

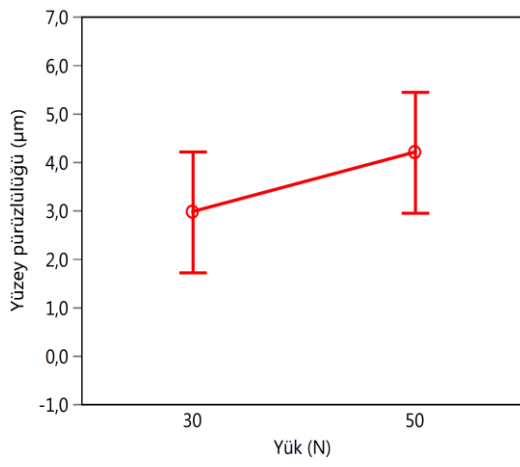
Görsel olarak elde edilen sonuçları, ANOVA testi istatistiksel olarak desteklemektedir (Şekil 6.17 R_t değerlerinin hata çubukları ile gösterimidir). R_t değerleri için elde edilen ANOVA sonuçlarına göre (Çizelge 6.5), borlama sıcaklığı % 66,77, yük ise % 12,97 oranında etkili olmuştur. Elde edilen veriler hacim kaybı ve sürtünme katsayısı için elde edilen ANOVA verileriyle uyumludur. Aradaki farklar malzemenin iç yapı kusurları, kontrol edilemeyen titreşimler ve ısıl kuvvetler, ölçüm hataları gibi parametrelere bağlı olarak izah edilebilir. Ayrıca R_t için elde edilen 0,73 Adj-RSq değeri, aşınma deneylerinin karakteristik zorluğu dikkate alındığında deneysel modelin anlamlılığı açısından yeterlidir. İlaveyen, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreler (yük, kayma hızı ve borlama prosesi) Şekil 6.18’de ayrı ayrı olarak grafiklendirilmiştir. Şekil 6.18’e göre en fazla etkinin borlama prosesinde olduğu görülmektedir. Borlanmamış numunenin pürüzlülük değeri en yüksek iken, borlama işlemiyle birlikte ve borlama sıcaklığı arttıkça bu değer azalmaktadır (Şekil 6.18 (c)).



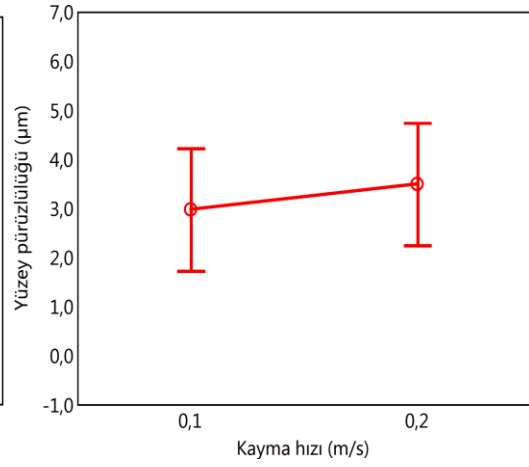
Şekil 6.17. Yüzey pürüzlülükleri için değişkenlik grafiği (µm).

Çizelge 6.5. Yüzey pürüzlülükleri (R_t) için ANOVA tablosu.

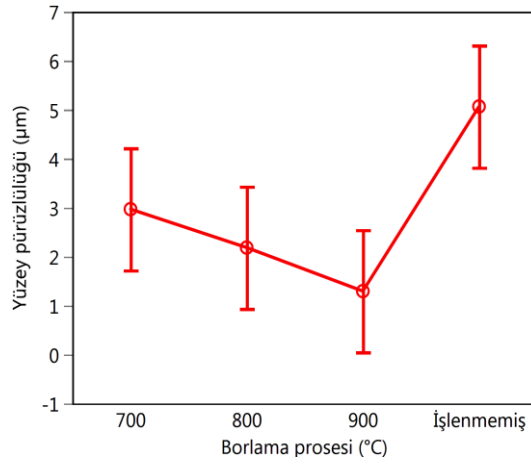
	DF	SS	f-değeri	p-değeri	Etki Oranı %
Yük (N)	1	6,044222	7,2294	0,0227	12,97
Kayma Hızı (m/s)	1	1,076406	1,2875	0,283	2,31
Borlama Sıcaklığı (°C)	3	31,112323	12,4042	0,001	66,77
Hata	10	8,36067	0,83607		17,95
Toplam	15	46,593622			100
R^2	%82				
R^2 (Adj)	%73				



(a)



(b)

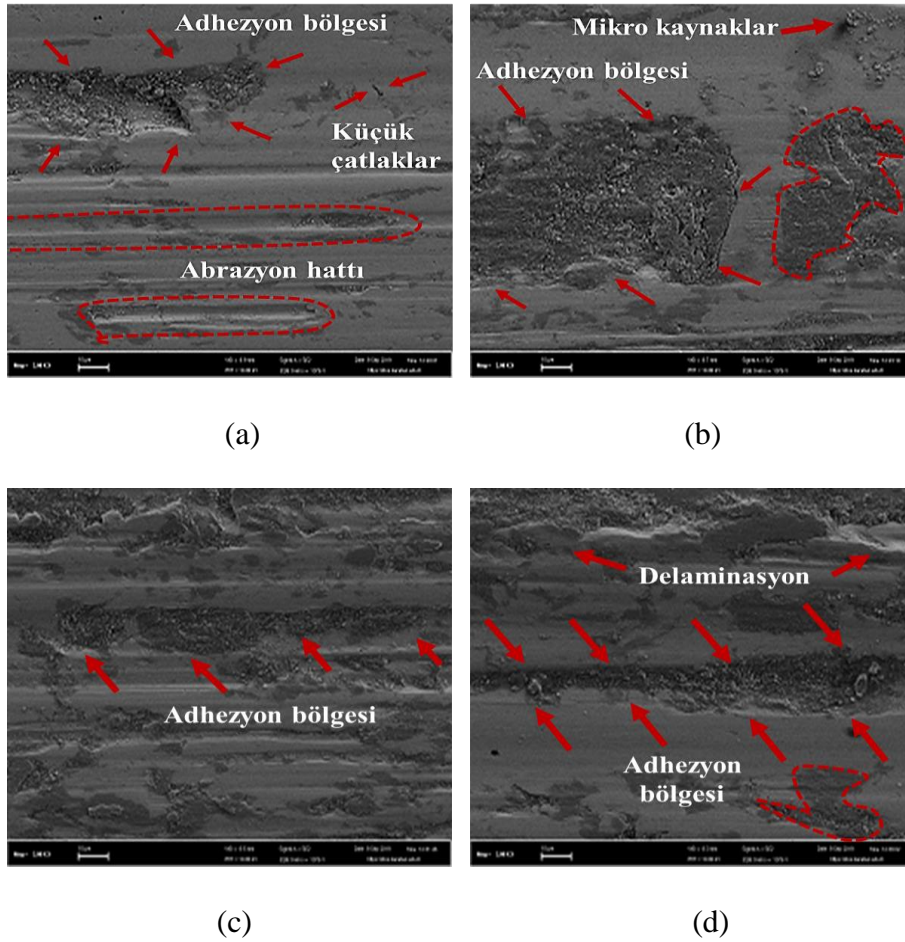


(c)

Şekil 6.18. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametreler; a) Yük, b) Kayma hızı, c) Borlama prosesi.

6.2.4. Aşınmış Yüzeylerin Görsel Analizi

Görsel analiz için aşınan yüzeylerden alınan SEM görüntüleri kullanılmıştır. Şekil 6.19'da borlanmamış yüzeylerin aşınmaya daha fazla maruz kaldığı ve aşınma izlerinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu yüzeylerde meydana gelen yoğun adhezif deformasyonlar, kaplanmamış numunenin düşük sertliğe (Şekil 6.4) ve yüksek sürtünme katsayısına (Çizelge 6.1) sahip olması ile açıklanabilir. İşlem görmemiş numunede, adhezyon bölgesinden ayrılan partiküllerin aşındırıcı malzeme ile numune arasında sıkışması durumuna bağlı olarak abrasif aşınmalar da meydana gelmiştir. Ayrıca yük arttıkça artan deformasyona bağlı olarak delaminasyon aşınmasının oluşmaya başladığı görülmektedir (Şekil 6.19 (d)). Ray malzemesinin aşınma karakteristiği literatürde de benzer şekilde tanımlanmıştır [64].

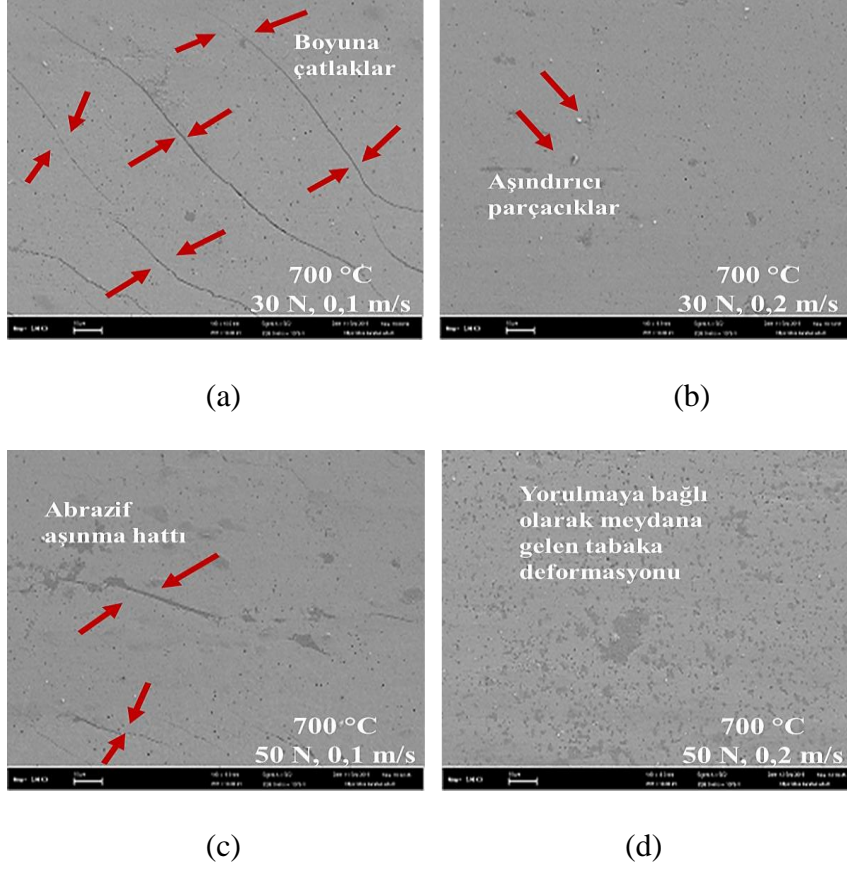


Şekil 6.19. Borlanmamış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları; a) 30 N, 0,1 m/s, b) 30 N, 0,2 m/s, c) 50 N 0,1 m/s, d) 50 N, 0,2 m/s.

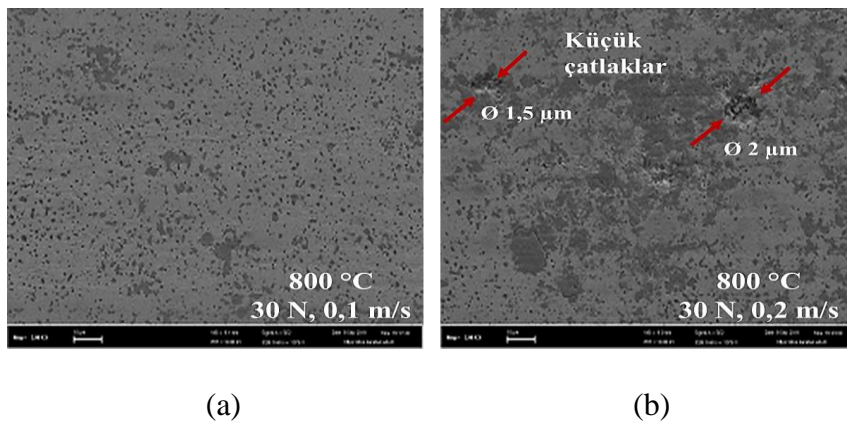
Elde edilen sonuçlara göre ray malzemesinin çoklu deformasyon mekanizmasına maruz kaldığı belirlenmiştir. Bu durum bor kaplamanın önemini göstermektedir. Şekil 6.20, 6.21 ve 6.22’de borlanmış numunelerde ihmal edilebilir seviyede aşınma olduğu görülmektedir. Oluşan aşınmalar yüzeysel çatlak oluşumu ve tabaka dökülmeleri şeklindedir. Bu yüzey kusurları, yorulma aşınması ve sertliğe bağlı kırılma mekanizmaları ile açıklanabilir.

Sürtünen yüzeylerde kayma ve basma gerilmelerinin tekrarlanması malzemede yorulma aşınmasına neden olmaktadır. Tekrarlanan ve değişen mekanik gerilmelerden dolayı yüzeyde çatlak, çatlak yayılımı ve parça kopması gibi plastik deformasyonlar oluşmaktadır [14]. Şekil 6.20’de Fe₂B fazının olduğu 700 °C koşulunda yüzeyde çatlak oluşumu, çatlaktan kopan parçalara bağlı olarak ~0,5 µm boyutunda abrazyon partikülleri ve yorulmaya bağlı olarak pullanma kusurları görülmektedir. Oluşan kusurların, işlenmemiş numuneye kıyasla ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmektedir. Şekil 6.21 ve 6.22’de sıcaklık artışına bağlı olarak yüzeylerde pullanma kusurlarının arttığı belirlenmiştir. Literatürde gerilmelerin FeB fazında döküntülere sebep olduğu ifade edilmiştir [16,70]. Elde edilen sonuçlar literatürle uyum göstermektedir. Pullanmalar artan sertliğe bağlı olarak artan gevreklik sonucu oluşmaktadır [15,30]. Şekil 6.21 (b)’de oluşan küçük çatlaklarda düzgün geometrik yapıları sebebiyle gevrek kırılma karakteristiği göstermektedir [23]. Fakat bu kusurların mekanik açıdan sorun oluşturacağını söyleyebilmek güçtür. Borlama sıcaklıklarının hepsinde gevreklik nedeniyle aşırı bir çatlak oluşumu görülmemiştir. Borun yağlayıcı özelliği gevreklik dolayısıyla oluşabilecek deformasyonları önlemiştir. Bu duruma bağlı olarak sınır tabaka boyutlarında oluşan bir koruyucu filmin gevrekliğin etkilerini minimize etmeye yeterli olduğu söylenebilir. İlave olarak, Şekil 6.20, 6.21 ve 6.22’de katastrofik deformasyonların oluşmamasına bağlı olarak fazların birbirlerine (Fe₂B fazı ray malzemesine, FeB fazında Fe₂B fazına) tatmin edici seviyede difüze oldukları iddia edilebilir. Fe₂B fazının tetragonal hacim merkezli ($a=b \neq c$ and $\alpha=\beta=\gamma$), FeB fazının ise ortorombik ($a \neq b \neq c$ and $\alpha=\beta=\gamma$) kristal yapıda olması faz tabakalarının uyumu açısından önemlidir. İki kristal yapı arasında açı benzerliğinin faz tabakaları arası uyumu sağladığı iddia edilebilir. Ayrıca, kristal kafeste kenar uzunluğu değişimlerinin sertlik

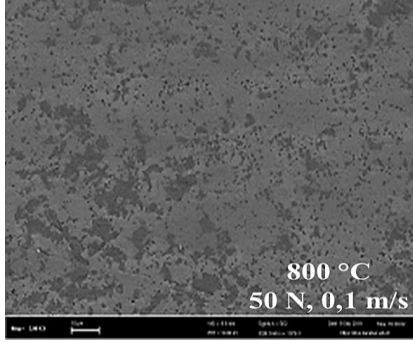
ve aşınma davranışı üzerinde kayda değer bir etken olduğu görülmektedir. Genel olarak sonuçlar ray malzemesinin borlama prosesine uygunluğunu göstermektedir.



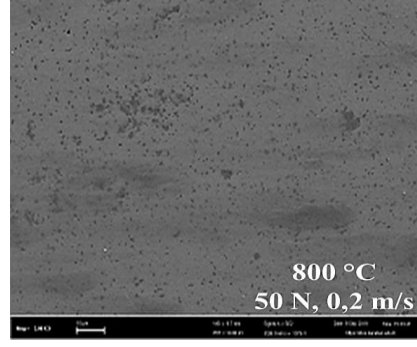
Şekil 6.20. 700 °C’de borlanmış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları.



Şekil 6.21. 800 °C’de borlanmış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları.

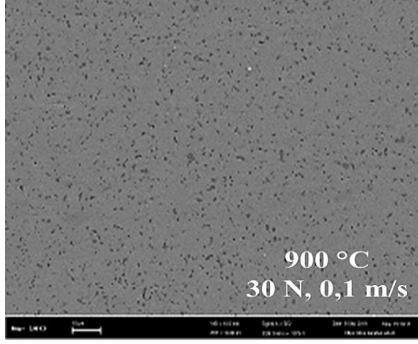


(c)

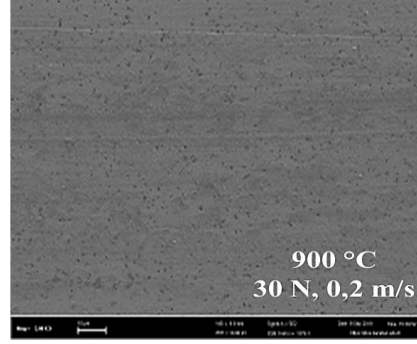


(d)

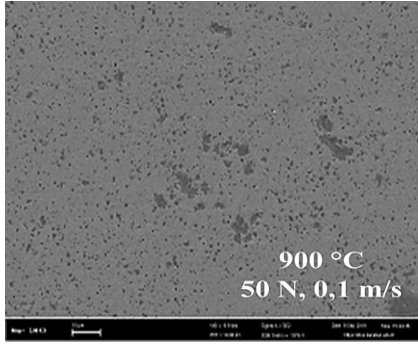
Şekil 6.21. (devam ediyor).



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.22. 900 °C’de borlanmış ray çeliğindeki aşınma izlerinin SEM mikrografları.

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. SONUÇ

Demiryolu ulaşımında ray çelikleri, özellikle dar yarıçaplı kurplarda, makas geçişlerinde, frenleme ve ivmelenmenin yoğun olduğu bölgelerde diğer bölgelere göre daha fazla gerilmelere maruz kalmaktadır. Bu duruma bağlı olarak rayların aşınma direnci düşmekte ve yüzey formu deforme olmaktadır. En önemli üst yapı malzemesi olan ray çeliklerinde bu aşınma probleminin minimize edilmesi önemlidir. Çalışma kapsamında ray çeliğinin mantar kısmına borlama işlemi uygulanarak aşınma direncinin artırılması amaçlanmıştır. Literatürde ray çeliklerinin borlanmasına ilişkin herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bu sebeple çalışmanın özgün değeri rayların borlama karakteristiğinin belirlenmesi ve aşınma davranışlarının incelenmesidir. Bu amaçla 700 °C, 800 °C ve 900 °C'de 4 saat borlama işlemi yapılan ray çelikleri, borlama işleminin ardından kuru kayma koşulları altında aşınma testlerine tabii tutulmuş ve aşınma davranışları görsel (SEM, 3D topoğrafya), spektral (EDX) ve istatistiksel (ANOVA) olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Borlama sonucu elde edilen borür tabaka kalınlıkları sıcaklık artışı ile birlikte artmıştır. ~66 µm ile en yüksek tabaka kalınlığına 900 °C'de borlanmış numunede ulaşılmıştır. 700 °C'de ~5 µm, 800 °C'de ise ~32 µm tabaka kalınlığı elde edilmiştir.
- Borür tabakası 700 °C'de düz bir yapı sergilerken, 800 ve 900 °C'de ise testere dişi morfolojisine sahiptir.

- 700 °C’de borlanmış numunenin borür tabakası tek fazlı iken (Fe_2B) 800 ve 900 °C’de borlanmış numunelerin borür tabakaları çift ($FeB + Fe_2B$) fazlıdır. Ayrıca, 700 °C’de difüzyon bölgesi oluşumu gözlenmemiş fakat 800 ve 900 °C’de gözlenmiştir.
- Sıcaklık artışına bağlı olarak bor difüzyonu artmış ve FeB fazının yoğunlaşmasına neden olmuştur. Böylece borür tabakasının en dış yüzeyinde FeB fazı, FeB fazı ile baz malzeme arasında da Fe_2B fazı oluşmuştur.
- XRD grafiklerinde, borür tabakasında genel olarak demir borürlerin hakim olduğu gözlenmiştir. 700 °C’de FeB fazının görülmediği, 900 °C’de ise en yoğun FeB piklerinin görüldüğü tespit edilmiştir. Bu durum sıcaklık artışı ile birlikte FeB fazının arttığını doğrulamıştır. Demir borürlerin yanısıra MnB ve CrB fazlarının da borür tabakasında oluştuğu gözlenmiştir.
- EDX analizlerine göre malzeme yüzeyinden baz malzemeye doğru inildikçe bor element miktarının azaldığı tespit edilmiştir.
- Başlangıçta ~300 HV olan ray çeliğinin sertliği, 900 °C’de en yüksek sertliğe ulaşmıştır. 700-800-900 °C’de 4 h borlanmış ray çeliğinin sertlik değerleri sırasıyla 1886, 2145 ve 2590 HV olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar borlama işleminin yüzey sertliğini arttırdığını, ayrıca işlem sıcaklığı arttıkça sertlik değerinin de arttığını göstermektedir.
- Yüzeyde oluşan B_2O_3 tabakası sürtünme katsayısının minimizasyonunu sağlamıştır. Sürtünme katsayısının minimizasyonu açısından 800 °C’de elde edilen 2000 HV sertlik değeri yeterlidir. Bu değerden sonra sürtünme katsayısı değerleri stabil kalmıştır. Sürtünme katsayısı üzerinde yük (% 7,28) parametresi kısmen etkili olmuş fakat hız (% 0,85) parametresi anlamlı etki göstermemiştir. Borlama işlemi sürtünme katsayısının azaltılması üzerinde % 87,6 oranında etkili olmuştur.

- Aşınmaya bağlı hacim kaybı 700 °C’de borlanan ray çeliklerinde ~1800 HV sertlikte minimize olmuş ve bu değerin üstündeki sıcaklıklarda değerler anlamlı değişim göstermemiştir. Borlama işlemi hacim kaybının azaltılması üzerinde % 84,43 oranında etkili olmuştur. Yük (% 0,6) ve hız (% 2,08), borlanmış numunelerde hacim kaybı açısından yeterli seviyede istatistiksel ve fiziksel etki oluşturmamıştır.
- Aşınma sonrası topoğrafya görüntülerine göre borlanmış numuneler daha düzgün yüzey formuna sahipken, işlem görmemiş numune yüzeyinde derin çukurlar ve yoğun dalgalanmalar oluşmuştur. Borlama işlemi yüzey düzgünlüğünün sağlanması üzerinde % 66,78 oranında etkili olmuştur.
- SEM görüntülerine göre işlem görmemiş numunenin adhezyon ve delaminasyon aşınmalarına maruz kaldığı belirlenmiştir. 700 °C’de borlanan numunede ihmal edilebilir çatlaklar ve pullanma kusuru hariç bir deformasyon oluşmamıştır. 800 °C ve 900 °C borlanan numunede sadece pullanma kusuru artmış ve baskın bir deformasyon mekanizması gözlenmemiştir. Ayrıca SEM görüntülerine göre demir-bor fazı difüzyonu kaynaklı bir tabaka ayrılması oluşmamıştır.

7.2. ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda borlanmış ray çeliği için borlama yönteminin aşınma direncine olan etkisi incelenmiş fakat farklı süreler için bu etki incelenmemiştir. İleriki çalışmalarda farklı sürelerde borlama işlemi yapılmış ray çeliğinin aşınma direncinin nasıl etkilendiğinin araştırılması önerilebilir. Literatür incelendiğinde ray çeliğine farklı sürelerde borlama işlemi yapılmış bir çalışma mevcut değildir. Ayrıca borlama işlemiyle birlikte ray çeliklerinin kırılma tokluklarının ve korozyon dirençlerinin nasıl bir değişim gösterdiğinin incelenmesi de önerilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Yazici, O. and Yilmaz, S., "Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels", *Tribology International*, 119 (August 2017): 222–229 (2018).
- [2] He, C. G., Chen, Y. Z., Guo, J., Liu, Q. Y., and Wang, W. J., "Investigation on fatigue cracks propagation characteristics of wheel materials under the bending moment condition", *Wear*, 376–377: 1901–1911 (2017).
- [3] Donzella, G., Faccoli, M., Mazzù, A., Petrogalli, C., and Roberti, R., "Progressive damage assessment in the near-surface layer of railway wheel-rail couple under cyclic contact", *Wear*, 271 (1–2): 408–416 (2011).
- [4] Ding, H. H., Fu, Z. K., Wang, W. J., Guo, J., Liu, Q. Y., and Zhu, M. H., "Investigation on the effect of rotational speed on rolling wear and damage behaviors of wheel/rail materials", *Wear*, 330–331: 563–570 (2015).
- [5] Ekberg, A. and Kabo, E., "Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading-an overview", *Wear*, 258 (7–8): 1288–1300 (2005).
- [6] Tunna, J., Sinclair, J., and Perez, J., "A review of wheel wear and rolling contact fatigue", Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part F: *Journal of Rail And Rapid Transit*, 221 (2): 271–289 (2007).
- [7] Maya-Johnson, S., Felipe Santa, J., and Toro, A., "Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth", *Wear*, 380–381: 240–250 (2017).
- [8] Cuaio-Moreu, C. A., Hernández-Sánchez, E., Alvarez-Vera, M., Garcia-Sanchez, E. O., Perez-Unzueta, A., and Hernandez-Rodriguez, M. A. L., "Tribological behavior of borided surface on CoCrMo cast alloy", *Wear*, 426–427 (September 2018): 204–211 (2019).
- [9] Yapici, A., Aydin, S. E., Koc, V., Kanca, E., and Yildiz, M., "Wear Behavior of Borided AISI D2 Steel under Linear Reciprocating Sliding Conditions", *Protection of Metals And Physical Chemistry of Surfaces*, 55 (2): 341–351 (2019).
- [10] Günen, A., Kanca, E., Çakir, H., Karakaş, M. S., Gök, M. S., Küçük, Y., and Demir, M., "Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625", *Surface and Coatings Technology*, 311: 374–382 (2017).

- [11] Wu, J., Liu, H., Wei, P., Zhu, C., and Lin, Q., "Effect of shot peening coverage on hardness, residual stress and surface morphology of carburized rollers", *Surface and Coatings Technology*, 384 (November 2019): 125273 (2020).
- [12] Krelling, A. P., da Costa, C. E., Milan, J. C. G., and Almeida, E. A. S., "Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel", *Tribology International*, 111 (March): 234–242 (2017).
- [13] He, X., Xiao, H., Fevzi Ozaydin, M., Balzuweit, K., and Liang, H., "Low-temperature boriding of high-carbon steel", *Surface and Coatings Technology*, 263: 21–26 (2015).
- [14] Gök, M. S., Küçük, Y., Erdoğan, A., Öge, M., Kanca, E., and Günen, A., "Dry sliding wear behavior of borided hot-work tool steel at elevated temperatures", *Surface & Coatings Technology*, 328: 54–62 (2017).
- [15] Erdoğan, A., "Investigation of high temperature dry sliding behavior of borided H13 hot work tool steel with nanoboron powder", *Surface and Coatings Technology*, 357 (September 2018): 886–895 (2019).
- [16] Kara, R., Çolak, F., and Kayali, Y., "Investigation of Wear and Adhesion Behaviors of Borided Steels", *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 69 (6): 1169–1177 (2016).
- [17] Garcia-Bustos, E., Figueroa-Guadarrama, M. A., Rodríguez-Castro, G. A., Gómez-Vargas, O. A., Gallardo-Hernández, E. A., and Campos-Silva, I., "The wear resistance of boride layers measured by the four-ball test", *Surface and Coatings Technology*, 215: 241–246 (2013).
- [18] Günen, A., Kanca, E., Demir, M., Er, Y., Sağlam, G., and Gök, M. S., "Microabrasion Wear Behavior of Fast-Borided Steel Tooth Drill Bits", *Tribology Transactions*, 60 (2): 267–275 (2017).
- [19] Soydan, Y., Kossal, S., De mirer, A., and Çelik, V., "Sliding friction and wear behavior of pack-boronized aisi 1050, 4140, and 8620 steels", *Tribology Transactions*, 51 (1): 74–81 (2008).
- [20] Gutierrez-Noda, L., Cuao-Moreu, C. A., Perez-Acosta, O., Lorenzo-Bonet, E., Zambrano-Robledo, P., and Hernandez-Rodriguez, M. A. L., "The effect of a boride diffusion layer on the tribological properties of AISI M2 steel", *Wear*, 426–427 (January): 1667–1671 (2019).
- [21] Kayali, Y., Güneş, I., and Ulu, S., "Diffusion kinetics of borided AISI 52100 and AISI 440C steels", *Vacuum*, 86 (10): 1428–1434 (2012).
- [22] Sen, S., Ozbek, I., Sen, U., and Bindal, C., "Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel", *Surface and Coatings Technology*, 135 (2–3): 173–177 (2001).

- [23] Ozbek, I. and Bindal, C., "Mechanical properties of boronized AISI W4 steel", *Surface and Coatings Technology*, 154 (1): 14–20 (2002).
- [24] Ozdemir, O., Omar, M. A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C., and Ucisik, A. H., "An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel", *Vacuum*, 83 (1): 175–179 (2008).
- [25] Allaoui, O., Bouaouadja, N., and Saindeman, G., "Characterization of boronized layers on a XC38 steel", *Surface and Coatings Technology*, 201 (6): 3475–3482 (2006).
- [26] Cimenoglu, H., Atar, E., and Motallebzadeh, A., "High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer", *Wear*, 309 (1–2): 152–158 (2014).
- [27] Er, U. and Par, B., "Wear of plowshare components in SAE 950C steel surface hardened by powder boriding", *Wear*, 261 (3–4): 251–255 (2006).
- [28] Sahin, S. and Meric, C., "Investigation of the effect of boronizing on cast irons", *Materials Research Bulletin*, 37 (5): 971–979 (2002).
- [29] Kulka, M., Makuch, N., and Pertek, A., "Microstructure and properties of laser-borided 41Cr4 steel", *Optics and Laser Technology*, 45 (1): 308–318 (2013).
- [30] Motallebzadeh, A., Dilektasli, E., Baydogan, M., Atar, E., and Cimenoglu, H., "Evaluation of the effect of boride layer structure on the high temperature wear behavior of borided steels", *Wear*, 328–329: 110–114 (2015).
- [31] Taktak, S., "Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels", *Materials and Design*, 28 (6): 1836–1843 (2007).
- [32] Aydemir, T. and Şen, U., "Borlanmış Soğuk İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışları", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7 (3): 28–30 (2003).
- [33] Çelik, O. N., Akbayır, Ö., Gaşan, H., Er, Ü., ve Aydınbeyli, N., "Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abrasif Aşınma Özellikleri", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21 (1): 71–85 (2008).
- [34] Er, Ü. ve Par, B., "Bor Yayınıyla Yüzeyi Serleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 Çeliklerinin Abrasif Aşınma Dayanımlarının İncelenmesi", *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (1): (2004).
- [35] Lewis, S. R., Fretwell-Smith, S., Goodwin, P. S., Smith, L., Lewis, R., Aslam, M., Fletcher, D. I., Murray, K., and Lambert, R., "Improving rail wear and RCF performance using laser cladding", *Wear*, 366–367: 268–278 (2016).

- [36] Aladesanmi, V. I., Fatoba, O. S., and Akinlabi, E. T., "Laser clad Ti + TiB₂ on steel rail microstructural effect", *Procedia Manufacturing*, 33: 709–716 (2019).
- [37] Işık, Y., "Perlitik Ray Çeliklerinde Yüzey Pürüzlülüğünün Abrasiv Aşınmaya Etkisi", *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
- [38] Yazıcı, O., "Lazerle Sertleştirme Yöntemiyle Demiryolu Raylarının Mantarının Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi", *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
- [39] Kalyoncuoğlu, B., "Mantarı Sertleştirilmiş Rayların Kırılma Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
- [40] Dalar, A., "Borlanmış Dişli Çeliklerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
- [41] Nişli, G., "Bortemperlenmiş AISI 1040 Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
- [42] Kabadayı, E., "Yüksek Krom ve Nikelli Dökme Çeliklerin Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Yaşlandırma ve Borlama Isıl İşleminin Etkisi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
- [43] Üçkardeşler, A., "Çelik Dökümlerde Borlama Isıl İşleminin Abrasif Aşınma Direnci Üzerine Etkisi", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
- [44] Kayalı, Y., "Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
- [45] Yapar, U., "Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2003).
- [46] Sarı, M., "Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
- [47] Yamanel, B., "Farklı Sıcaklıklarda Menevişlenmiş ve Borlama İşlemine Tabi Tutulmuş SAE 5140 Çeliğinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
- [48] Özmen, T., "Katı Ortamda Borlanmış DDK 60 Dökme Demirin Borür Tabakası Büyüme Kinetiği ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2007).

- [49] Kanat, S., "Borlanmış AISI D6 Çeliğinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışının İncelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
- [50] Akbayır, Ö., "Katı Ortamda Borlanmış AISI 1030 Çeliğinde İşlem Parametrelerinin Yüzey ve Aşınma Özelliklerine Etkisi", *Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
- [51] Özbek, İ., "Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1999).
- [52] Kayali, Y., "Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in micro-wave furnace", *Vacuum*, 121: 129–134 (2015).
- [53] Küçükkurt, M., "Borlanmış AISI M35 ve AISI M42 Çeliklerinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
- [54] Kılıçarslan, Y. S., "Dolgu Malzemesi Türü ve Oranlarının Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışına Etkisi", *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
- [55] Mertgenc, E., Kesici, O. F., and Kayali, Y., "Investigation of wear properties of borided austenitic stainless steel different temperatures and times", *Materials Research Express*, 6 (7): (2019).
- [56] Yi, Y., Xing, J., Ren, X., Fu, H., Li, Q., and Yi, D., "Investigation on abrasive wear behavior of Fe–B alloys containing various molybdenum contents", *Tribology International*, 135 (February): 237–245 (2019).
- [57] Günen, A., Sabri Gök, M., Erdoğan, A., Kurt, B., and Orhan, N., "Investigation of microabrasion wear behavior of boronized stainless steel with nanoboron powders", *Tribology Transactions*, 56 (3): 400–409 (2013).
- [58] Ma, L., He, C. G., Zhao, X. J., Guo, J., Zhu, Y., Wang, W. J., Liu, Q. Y., and Jin, X. S., "Study on wear and rolling contact fatigue behaviors of wheel/rail materials under different slip ratio conditions", *Wear*, 366–367: 13–26 (2016).
- [59] Zeng, D., Lu, L., Zhang, N., Gong, Y., and Zhang, J., "Effect of different strengthening methods on rolling/sliding wear of ferrite-pearlite steel", *Wear*, 358–359: 62–71 (2016).
- [60] Liu, C. peng, Liu, P. tao, Pan, J. zhi, Chen, C. huan, and Ren, R. ming, "Effect of original microstructure on wear property of ER9 wheel steel", *Ironmaking and Steelmaking*, 0 (0): 1–9 (2020).
- [61] Keddani, M., Chegroune, R., Kulka, M., Makuch, N., Panfil, D., Siwak, P., and Taktak, S., "Characterization, Tribological and Mechanical Properties of

- Plasma Paste Borided AISI 316 Steel", *Transactions of The Indian Institute of Metals*, 71 (1): 79–90 (2018).
- [62] Dokumaci, E., Özkan, I., and Önay, B., "Effect of boronizing on the cyclic oxidation of stainless steel", *Surface and Coatings Technology*, 232: 22–25 (2013).
- [63] Raghs, H. A., Kondul, B., and Cetin, M. H., "Investigation of Wear Behavior of Boronized H13 Steel under Environment of Nano-Silver-Added Lubricants Coated with Different Ligands", *Surface Topography: Metrology and Properties*, 8 (1): (2020).
- [64] Wang, W. J., Jiang, W. J., Wang, H. Y., Liu, Q. Y., Zhu, M. H., and Jin, X. S., "Experimental study on the wear and damage behavior of different wheel/rail materials", *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230 (1): 3–14 (2014).
- [65] Hasan, S. M., Chakrabarti, D., and Singh, S. B., "Dry rolling/sliding wear behaviour of pearlitic rail and newly developed carbide-free bainitic rail steels", *Wear*, 408–409 (May): 151–159 (2018).
- [66] Cetin, M. H. and Korkmaz, S., "Investigation of the concentration rate and aggregation behaviour of nano-silver added colloidal suspensions on wear behaviour of metallic materials by using ANOVA method", *Tribology International*, 147 (January): 106273 (2020).
- [67] Namdeo, R., Tiwari, S., Manepatil, S., and Chand, N., "Optimizing the Effect of Addition of Ma-G-Pe Compatibilizer on Two-Body Abrasive Wear Behavior of Eva/Hdpe Polymer Blend Using Taguchi and Anova", *ELK Asia Pacific Journals*, (April): (2016).
- [68] Ambigai, R. and Prabhu, S., "Experimental and ANOVA analysis on tribological behavior of Al/B 4 C micro and nanocomposite", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 17 (2): 53–63 (2019).
- [69] Mat Tahir, N. A., Abdollah, M. F. Bin, Hasan, R., Amiruddin, H., and Abdullah, M. I. H. C., "Statistical models for predicting wear and friction coefficient of palm kernel activated carbon-epoxy composite using the ANOVA", *Industrial Lubrication and Tribology*, 69 (5): 761–767 (2017).
- [70] Meriç, C., Sahin, S., and Yilmaz, S. S., "Investigation of the effect on boride layer of powder particle size used in boronizing with solid boron-yielding substances", *Materials Research Bulletin*, 35 (13): 2165–2172 (2000).

ÖZGEÇMİŞ

Bilgehan KONDUL, 1994 yılında Erzincan'da doğdu. İlkokulu Erzincan'da, orta öğrenimini ise Bursa'da tamamladıktan sonra 2012 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Mühendisliği Programını kazandı. 2017 yılında Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Mühendisliği Programından 3,34 ortalama ile mezun oldu. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde (% 30 İngilizce) lisans eğitimi ve Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimi almaya başladı. 2019 yılında Makine Mühendisliği lisans eğitiminden 3,48 ortalama ile mezun oldu. Yüksek lisans tez konusu "Borlama İle Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi" şeklindedir. 2019 Haziran ayından itibaren Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Oda No:224

MERKEZ/KARABÜK

Tel : (539) 375 26 41

E-posta : bilgehankondul@karabuk.edu.tr