



**1040 VE 8620 ÇELİKLERİNİN KOROZİF AŞINMA  
DİRENCİNE BOR İLAVESİNİN ETKİSİ**

**2020  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

**Ferhat SARIÇAM**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK**

**1040 VE 8620 ÇELİKLERİNİN KOROZİF AŞINMA DİRENCİNE BOR  
İLAVESİNİN ETKİSİ**

**Ferhat SARIÇAM**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK**

**T.C.  
Karabük Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ocak 2020**

Ferhat SARIÇAM tarafından hazırlanan “1040 VE 8620 ÇELİKLERİNİN KOROZİF AŞINMA DİRENCİNE BOR İLAVESİNİN ETKİSİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğretim Üyesi Engin ÇEVİK

Tez Danışmanı, Metalurji Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Metalurji Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.  
17/01/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Yavuz SUN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Engin ÇEVİK (KBÜ)

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Yüksel AKINAY (YYÜ)



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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



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

Ferhat SARIÇAM



## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **1040 VE 8620 ÇELİKLERİNİN KORUZİF AŞINMA DİRENCİNE BOR İLAVESİNİN ETKİSİ**

**Ferhat SARIÇAM**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Engin ÇEVİK**

**Ocak 2020, 61 sayfa**

Bu çalışmada; farklı oranlarda bor ilavesi ile üretilen 1040 ve 8620 kalite çeliklerinin koroziif aşınma davranışları incelenmiştir. Borun katkı maddesi olarak kullanılmasının çelik korozyonuna etkisi ortaya çıkarılarak, elde edilen malzeme özellikleri değerlendirilip korozyonun yoğun olduğu uygulamalarda kullanım alanlarının genişletilmesi amaçlanmıştır. Farklı oranlarda bor ilave edilen 1040 ve 8620 kalite ticari çeliklerin koroziif aşınma davranışlarının belirlenmesi amacıyla %3,5 sodyum klorür (NaCl) çözeltisi içerisinde farklı yükler (20, 30 ve 40 N) altında koroziif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılmış ve buradan elde edilen sonuçlar kullanılarak numunelerde meydana gelen hacimce kayıplar belirlenmiştir. Numunelerin aşınma karakteristikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda mekanik özellikler için 1040 çeliklerinde optimum bor oranı 15 ppm, 8620 kalite çelikler için 48 ppm olarak tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler** : Bor, borlu elik, 1040 çeliği, 8620 çeliği, korozif aşınma.  
**Bilim Kodu** : 91514

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE EFFECT OF BORON ADDITIVES ON CORROSIVE WEAR RESISTANCE OF 1040 AND 8620 STEELS**

**Ferhat SARIÇAM**

**Karabük University**

**Institute of Graduate Programs**

**Department of Metallurgy and Materials Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assist. Prof. Dr. Engin ÇEVİK**

**January 2020, 61 pages**

In this study; the effect of boron addition to commercial steels such as 1040 and 8620 on the corrosive wear resistance was investigated. The effects of the use of boron as an additive on the corrosion of steel have been evaluated and the usage areas of the applications are increased. Firstly, in order to determine the corrosive behaviour of boron doped steels, wear tests were performed under different loads of 20, 30, 40 N in the 3.5% sodium chloride (NaCl) solution. Subsequently, the surface roughness measurements were made and the volume losses of the samples were determined by the results obtained here. Abrasion characteristics of the samples were analysed by scanning electron microscope (SEM). As a result of the analyses, the optimum boron ratio in 1040 steels for mechanical properties was determined as 15 ppm and 48 ppm for 8620 grade steels.

**Key Words** : Boron, boron steel, 1040 steel, 8620 steel, corrosive wear.

**Science Code** : 91514



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıŐmasını, yrtlmesinde bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıŐmamı bilimsel temeller ışıkında Őekillendiren danıŐman hocam Dr. ÖĞr. Üyesi Engin ÇEVİK'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Deneyleerin yapılmasında vermiŐ olduğu desteklerden dolayı Karabük Üniversitesi Demir elik Enstitüsü Müdürü Prof. Dr. Yavuz SUN'a, bana her türlü yardımını ve desteğini esirgemeyen Dr. ÖĞr. Üyesi Emre TURAN ve Dr. ÖĞr. Üyesi Erhan KAYABAŐI ve Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA'ya teŐekkürü bir borç bilirim. Deneysel çalıŐmalarımın yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, Demir elik Enstitüsü çalıŐanlarına teşekkür ederim.

Bu çalışmanın her aŐamasında desteğini sürekli yanımda hissettiğim eŐim AyŐegül SARIÇAM ile oğullarım Yusuf Sirac ve Agâh Kadir SARIÇAM'a ithaf ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
ÇELİKLER VE GENEL ÖZELLİKLERİ .....	3
2.1. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI .....	4
2.1.1.1. Düşük Karbonlu.....	4
2.1.1.2. Orta Karbonlu .....	5
2.1.1.3. Yüksek Karbonlu .....	5
2.1.2. Kullanım Alanlarına Göre Çelikler .....	6
2.1.2.1. Mikro Alaşımli Çelikler.....	6
2.1.2.2. Paslanmaz Çelikler .....	6
2.1.2.3. Takım Çelikleri.....	6
2.1.2.4. Zırh Çelikleri.....	7
2.1.2.5. Otomotiv Çelikleri .....	7
BÖLÜM 3 .....	9
BOR .....	9

	<b><u>Sayfa</u></b>
BÖLÜM 4 .....	14
BORLU ÇELİK ALAŞIMLARI.....	14
4.1. BORLU ÇELİKLERİN ÜRETİMİ .....	15
4.2. BORLU ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ .....	16
4.3. BORLU ÇELİKLERİN KULLANIM ALANLARI .....	17
BÖLÜM 5 .....	22
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	22
5.1. DENEYLERİN YAPILIŞI.....	22
5.2. MALZEME TEMİNİ VE HAZIRLANMASI .....	23
5.3. MİKROYAPI İNCELEMESİ.....	24
5.3.1. Optik Mikroskop İncelemesi .....	24
5.3.2. SEM Analizi.....	26
5.4. XRD İNCELEMESİ.....	27
5.5. SERTLİK TESTLERİ .....	28
5.6. KOROZİF AŞINMA TESTLERİ .....	28
BÖLÜM 6 .....	30
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	30
6.1. MİKROYAPI İNCELEMESİ .....	30
6.1.1. 1040 Kalite Çelikler .....	30
6.1.2. 8620 Kalite Çelikler .....	33
6.2. SEM ANALİZİ .....	37
6.3. XRD ANALİZLERİ.....	42
6.4. SERTLİK TESTLERİ .....	44
6.5. KOROZİF AŞINMA TESTLERİ .....	46
BÖLÜM 7 .....	56
GENEL SONUÇLAR.....	56
KAYNAKLAR .....	57
ÖZGEÇMİŞ .....	61

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 3.1. Borun kullanım alanları.....	13
Şekil 4.1. Demir bor denge diyagramı.....	14
Şekil 5.1. Yapılan çalışmanın şematik gösterimi. ....	23
Şekil 5.2. Numunelerin hazırlanması: a) kesilmiş numune, b) taşlama aşaması.....	24
Şekil 5.3. 1040 ve 8620 bor ilaveli çelik numuneleri: a) ham numune, b) taşlanmış numune. ....	24
Şekil 5.4. Mikroyapı incelemesinde kullanılan cihazlar: a) Discotom 100 kesme cihazı, b) Secotom 50 hassas kesme cihazı, c) Tegramin 30 yüzey parlatma cihazı, d) CitoPress 10 bakalite alma cihazı.....	25
Şekil 5.5. Nikon Eclipse MA200 optik görüntüleme cihazı.....	26
Şekil 5.6. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem SEM cihazı. ....	27
Şekil 5.7. Rigaku XRD cihazı.FGFGFF.....	27
Şekil 5.8. Q10 A+ QNESS Mikro sertlik cihazı.....	28
Şekil 5.9. UTS Tribometer T10/20 aşınma cihazı.....	29
Şekil 6.1. 3 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x. ....	31
Şekil 6.2. 3 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x. ....	31
Şekil 6.3. 15 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x. ....	32
Şekil 6.4. 15 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a)500x b) 1000x. ....	32
Şekil 6.5. 30 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a)500x b) 1000x. ....	33
Şekil 6.6. 30 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x b) 1000x.....	33
Şekil 6.7. 3 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x b) 1000x. ....	34
Şekil 6.8. 3 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü a) 500x b) 1000x. ....	34
Şekil 6.9. 48 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x b) 1000x. ....	35

Şekil 6.10. 48 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.....	35
Şekil 6.11. 58 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü a) 500x, b) 1000x. ....	36
Şekil 6.12. 58 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.....	36
Şekil 6.13. 1B3 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü. ....	37
Şekil 6.14. 1B30 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü. ....	38
Şekil 6.15. 1B30 nolu numuneye ait 20000x SEM görüntüsü. ....	39
Şekil 6.16. 8B3 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü. ....	40
Şekil 6.17. 8B58 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü.....	41
Şekil 6.18. 8B58 nolu numuneye ait 20000x SEM görüntüsü. ....	42
Şekil 6.19. 1040 Kalite çeliklere ait XRD sonuçları. ....	43
Şekil 6.20. 8620 Kalite çeliklere ait XRD sonuçları. ....	43
Şekil 6.21. 1040 Kalite çeliklere bor ilavesinin sertliğe etkisi.....	44
Şekil 6.22. 8620 Kalite çeliklere bor ilavesinin sertliğe etkisi.....	45
Şekil 6.23. (a) 1B3 ve (b) 1B30 nolu numuneye ait SEM görüntüsü.....	46
Şekil 6.24. 1040 kalite çelikler için uygulanan yüke bağlı olarak hacimce aşınma kayıpları.....	48
Şekil 6.25. 8620 kalite çelikler için uygulanan yüke bağlı olarak hacimce aşınma kayıpları.....	49
Şekil 6.26. 1040 kalite çelikler için Archard yasası dikkate alınarak elde edilen yüke bağlı aşınma hızı değerleri. ....	50
Şekil 6.27. 8620 kalite çelikler için Archard yasası dikkate alınarak elde edilen yüke bağlı aşınma hızı değerleri. ....	51
Şekil 6.28. 1B3 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N-1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000X.....	52
Şekil 6.29. 1B30 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N-1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000X.....	53
Şekil 6.30. 8B3 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N-1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000X.....	54
Şekil 6.31. 8B58 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N-1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000X.....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları. ....	4
Çizelge 2.2. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları. ....	5
Çizelge 2.3. Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları .....	5
Çizelge 3.1. Bor ve bileşiklerinin sertlik değerleri. ....	10
Çizelge 3.2. Borun kristal şekilleri ve parametreleri. ....	11
Çizelge 5.1. Numunelerin spektral analiz sonuçları. ....	22
Çizelge 6.1. B3 nolu numuneye ait EDX analizi. ....	37
Çizelge 6.2. 1B30 nolu numuneye ait EDX analizi. ....	38
Çizelge 6.3. 1B30 nolu numuneye ait EDX analizi. ....	39
Çizelge 6.4. 8B3 nolu numuneye ait EDX analizi .....	40
Çizelge 6.5. 8B58 nolu numuneye ait EDX analizi. ....	41
Çizelge 6.6. 8B58 nolu numuneye ait EDX analizi. ....	42

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

B : bor

C : karbon

Cr : krom

N : azot

Fe : demir

V : vanadyum

W : volfram

Mn : mangan

Co : kobalt

Ni : nikel

P : fosfor

Si : silisyum

## **KISALTMALAR**

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme  
Topluluğu)

Ppm : Parts Per Million (Milyonda Bir)



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Çelik insanoğlunun yüzyıllardır kullandığı bir malzeme olmasının yanında sanayi devrimiyle birlikte hemen hemen her alanda ihtiyaç duyulan bir malzeme halini almıştır. Bununla beraber özellikle makine imalat sanayisinin gelişimi hızlanmış ve üstün fiziksel özelliklere sahip çeliklere ihtiyaç doğmuştur.

Çelik uzun yıllardır kullanılmasına rağmen hala gelişmeye açık bir malzeme olarak ön plana çıkmaktadır. Çünkü çeliklerin birçok özelliği gibi fiziksel özelliklerinin de iyileştirilmesi, kimyasal bileşimlerinin optimize edilmesi veya ısıl işlemlerle mümkün olabilmektedir.

Endüstride aşınma kaynaklı problemler malzeme ve ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Sementasyon ve ıslah çelikleri bu ihtiyacı karşılamaya yönelik üretilen çelikler arasındadır. AISI 1040 kodlu ıslah çeliği transmisyon milleri, raylar ve dişlilerde kullanılırken, AISI 8620 Sementasyon çelikleri ise dişli çark, piston pimleri ve mil yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. 1040 ve 8620 kalite çeliklerinin aşınma davranışları krom, nikel, molibden, tungsten ve vanadyum gibi alaşım elementlerinin ilavesi ile geliştirilebilmektedir [1].

Hammadde sorunu yaşanmayacak bir elementin ilavesi ile imalat sektöründe hâlihazırda kullanılan çeliklerin özelliklerinin iyileştirilmesinin endüstriye bir katma değer kazandıracığı düşünülmektedir. Bilindiği üzere dünya bor rezervinin %73'lük kısmı ülkemiz topraklarında bulunmaktadır. Bunların yanında bor, çeliklere ilave edildiğinde daha üstün aşınma, korozyon ve mukavemet özellikleri kazandırmaktadır [2].

Yapılan literatür incelemesinde korozyon davranışlarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar daha çok çeliklerin yüzeylerinin borla kaplanmasına yöneliktir. Alaşım elemanı olarak bor elementinin kullanıldığı ticari çelikler üzerine yapılan çalışmalar bulunmakla beraber, korozif aşınma davranışının incelendiği herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bizim çalışmamızda ise AISI 1040 ve AISI 8620 kalite çelikler farklı oranlarda bor ilavesi ile alaşımlandırılmış, üretilen çeliklerin mikro yapı, sertlik ve korozif aşınma davranışları belirlenmiştir. Bu yönüyle yapılan tez çalışması özgün bir araştırma olarak ön plana çıkmaktadır.

## BÖLÜM 2

### ÇELİKLER VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Çelik; sanayinin gelişmesiyle ortaya çıkan, ekonomik ve teknolojik gelişimin bir göstergesi olarak ticari öneme sahip, demir (Fe) ve karbonun (C) belirli oranlarda karışmasıyla meydana gelen değerli bir alaşımdır [3]. Ham haldeki demirin çeşitli yöntemler kullanarak belirli oranda, karbon eklenmesi ile çelik veya dökme demir elde edilir. Bileşiminde %0,2-%2,1 oranlarında karbon (C) bulunan ve karbon-demir (Fe) karışımının neticesinde oluşan bir alaşım olan çeliğin C seviyesi çeliklerin gruplandırılmasında etkin rol oynamaktadır. Genelleme yapıldığında çelikler içerdikleri C oranına göre üç kısma ayrılır. %0,25'e kadar karbon içerenler düşük karbonlu, %0,25–0,55 arasında karbon içerenler ise orta karbonlu, %0,55'den yüksek karbon içerenlerde yüksek karbonlu çelikler olarak sınıflandırılırlar [4]. Bileşimdeki karbon miktarı, çeliğin hangi sınıfta yer alacağını belirlerken, sertliğini ise, demir ile birleşerek alaşım oluşturan karbon ve diğer elementler üstlenmektedir. Alaşımı oluşturan diğer elementlerin bazıları ise; vanadyum (V), volfram (W), magnezyum (Mg), mangan (Mn), krom (Cr) ve kobalttır (Co) [5,6]. Demire ilave edilen karbon miktarı arttıkça çeliğin mukavemeti artarken sünekliği de azalmaktadır. Yüksek karbon içeren demirlerde erime noktası düşüktür ve dökme kabiliyetleri oldukça iyidir. Bu tür çeliklere “dökme demir” denir. Az miktarda karbon ve demir cürufları içeren çelikler “dövme demir” olarak tanımlanır. Bu faktörler çeliğin paslanmazlığı ve kaynaklanma kabiliyetini belirler [7].

Çeliklerin genel özellikleri :

- Kaynak işlemine uygundur. Çeşitli plastik ve metallere kaplama yapılabilir.
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılığı artırılabilir. Soğuk olarak şekil verilebilir.
- Paslanmaz çelikler korozyona ve ısıya karşı dayanıklıdır, yüzde yüz geri dönüşüm yapılabilir, üretimi ve temizliği kolaydır.

- Çelik alaşımında ana element maddesi olan karbon, çeliğin akma ve çekme dayanıklılığını artırır. Demirden daha sert ve hafiftir. %100 geri dönüştürülebilir.
- Karbon miktarı arttıkça çeliğin akma ve çekme mukavemeti artırırken, kaynak ve şekillenebilme kabiliyetlerini azaltır [5].
- Korozyona (kireçlenme, paslanma vb. de denilen madenlerin elektriksel, kimyasal ya da mekanik sebeplerle aşınması) ve yüksek sıcaklığa dayanıklılığı artırılabilir.
- Çeliklerin büyük bir bölümü çeşitli yöntemler ile metal ile kaplanmaya, emaye yapılmaya, boyanmaya ve plastik maddeler ile kaplanmaya elverişlidir.

## 2.1. ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

### 2.1.1. Karbon Oranına Göre Çelikler

#### 2.1.1.1. Düşük Karbonlu

Yapılarında %0,02-%0,25 oranında karbon barındıran Fe-C alaşımları düşük karbonlu çelikler olarak adlandırılmaktadır. Yumuşak çelikler olarak da adlandırılan bu çeliklerden çubuk, köşebent, profil vb. gibi malzemeler üretilir. Düşük karbonlu çelikler iyi şekillendirebilme, kaynaklanabilme özelliğine sahiptir. Bu çelikler nitrasyon, sementasyon ve yüzey sertleştirme işlemleri gibi uygulamalar ile sertleştirilebilir. Çekme mukavemetleri düşüktür. Genel olarak cıvata, çivi, makine parçaları, somun yapı ve inşaat sektöründe kullanılır [8].

Çizelge 2.1. Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.

Element	Maks %
C	0,2
Si	0,2
Mn	0,6
P	0,04
Si	0,05

### 2.1.1.2. Orta Karbonlu

Bu çelikler %0,25-0,60 aralığında karbon ihtiva eden çeliklerdir. Isıl işleme kolayca sertleşebilen bu çelikler makine sanayide kullanılmaktadır. Mekanik özellikleri karbon miktarına bağlı olarak değişmektedir. Kaynak kabiliyeti yüksek C' lu çeliklere göre daha iyi, düşük C'lu çeliklere göre azdır. Orta karbonlu çelikler makine üretiminde, gemi şaftı, makine, cıvata, somun, uskur, dişli çark, dingil, mil, transmisyon mili, frezeli mil, manivela kolu, yük kancası, ray, kazma, kürek gibi malzemelerin üretiminde kullanılır [8].

Çizelge 2.2. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.

Element	Maks%
C	0,6
Si	0,23
Mn	0,9
P	0,04
Si	0,05

### 2.1.1.3.Yüksek Karbonlu

%0,60' dan daha fazla karbon içeren çeliklerdir. Isıl işleme kolayca sertleşebilirler. Bu yüzden aşınmaya karşı dayanıklı çeliklerdir. Orta ve düşük C'lu çeliklere göre şekil alma ve işlenme kabiliyeti düşüktür. Yüksek karbonlu çelikler, düşük ve orta karbonlu çeliklere nazaran daha kolay su alabilir ve elde edilen martenzitik yapının sertliği de daha fazla olur. Kaynak kabiliyeti de oldukça düşüktür. Yüksek karbonlu çelikler; spiral ve yaprak yaylar, cıvata, somun, şaft, mil, kesici basit takımlar, makas, zımba, greyder bıçağı, kepçe dişlisi, ege keser, ağaç testeresi ve yüksek mukavemetli makine parçaları gibi ürünlerin üretiminde kullanılır [8,9].

Çizelge 2.3. Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları.

Element	Min%
C	0,60
Si	0,15
Mn	0,7
P	0,04
Si	0,05

## **2.1.2. Kullanım Alanlarına Göre Çelikler**

### **2.1.1.4. Mikro Alaşımli Çelikler**

Mikro alaşımli çelikler, mekanik özellikleri geliştirilmek için kuvvetli karbür ya da nitrür yapıcı elementlerden çok miktarlarda ilave edilen çeliklerdir [10]. Mikro alaşımli çelikler günümüzde uygun termo-mekanik işlemler, farklı sertleştirme mekanizmaları ve düşük karbon içeriklerinden dolayı tokluk, mukavemet veya düşük sıcaklıklarda gevrek kırılma emniyeti ve kaynak edilebilirlik gibi özellikleri bir arada bulunduran malzeme grubu olarak tanımlanabilir [11,12].

### **2.1.1.5. Paslanmaz Çelikler**

Paslanmaz çelikler; yüksek sıcaklık dayanımları, mükemmel korozyon dirençleri, üstün mekanik özellikler sergilemeleri nedeniyle kimya, ilaç, inşaat, otomotiv, petrokimya, enerji ve dekoratif alanlar gibi farklı endüstrilerde kullanım alanlarına sahiptir. Demir alaşımlarında, alaşım elementi olarak %12' nin üzerinde krom bulunması, paslanmaz özellik sergilemelerine sebebiyet vermektedir. Korozyon direncinin diğer demir çelik ürünlerine göre artması, kromun paslanmaz çeliklerin yüzeyinde ince aktif bir oksit tabakası oluşturabilmesi sayesinde. Oksit tabakası çok ince, sadece birkaç atom tabakası kalınlığında olup, korozif ortamlarda paslanmaz çelikleri etkili bir şekilde korumaktadır. Kısaca, bütün paslanmaz çelikler yüksek miktarlarda krom içermektedirler. Krom miktarının artması aynı zamanda çeliklerin yüksek sıcaklıklarda oksidasyon dirençlerini geliştirmektedir [13,14].

### **2.1.1.6. Takım Çelikleri**

Takım çelikleri kesme, bükme, delme, talaş kaldırma gibi yüksek sıcaklığa dayanıklı, yüksek tokluk, yüksek süneklik, yüksek mukavemet, yüksek sertlik vb. gibi özelliklere sahip olması gerekir. Kullanım alanlarına göre; soğuk, sıcak, plastik iş takım çelikleri olarak kendi aralarında kategorilere ayrılabilir [1,15,16].

### **2.1.1.7. Zırh Çelikleri**

Düşük karbon alaşımlı çelik sınıfı kategorisinde yer alan, zırh çeliklerinin başlıca alaşım elementleri Cr, Ni, Mn ve Mo'dur. Zırh çelikleri temel olarak düşük karbon (genelde %0,30 değerinden az) içermektedir. Karbon içeriğinin düşük olması üretim kolaylığı yanında iyi tokluk, darbe mukavemeti ve kaynaklanabilirlik gibi performanslarının elde edilmesine imkân sunmaktadır. Yüksek mukavemet, sertlik ve toklukları bu çeliklere mükemmel balistik performans sağlamaktadır. Zırh çelikleri askeri ve sivil uygulamalarda araçların ve binaların korunmasında, bu üstün balistik performansları sayesinde çok geniş yelpazede kullanım alanına sahiptir [16,17].

### **2.1.1.8. Otomotiv Çelikleri**

Otomotiv endüstrisinde çelik haricindeki plastik, alüminyum, magnezyum vb. gibi malzemelerin kullanımı, araçlarda yakıt tüketimini düşürmek amacıyla ağırlık azaltma kaygısından dolayı artış göstermesine rağmen, çelik endüstrisindeki gelişmeler sayesinde çelik; otomotiv sektörü için hala önemini korumaktadır. Genel olarak bir otomobilden istenen özellikler öncelikle güvenli oluşu, yakıt tüketimi, yakıt verimliliği ve ekonomikliğidir. Diğer taraftan bu temel üç unsurun sağlanmasının yanında CO<sub>2</sub> emisyonu önemli hale gelmiştir. Ayrıca konfor, otomobilin ağırlığı, sürüş performansı, maliyet/fiyat ilişkisi önem arz etmektedir. 2009 yılında Dünya Çelik Topluluğu (World Steel Assosiation,) CO<sub>2</sub> emisyonuna özellikle dikkat çekerek 5 kişi taşıyabilen taşıtlarda diğer kalite çelikler yerine gelişmiş yüksek mukavemetli çelik kullanımının artırılması halinde CO<sub>2</sub> emisyonunun %6 oranında azalacağını rapor etmiştir. Yapılan bir araştırmada güvenlik açısından malzemelerin maksimum dayanımının 600 MPa civarlarında olmasının can kaybını önemli ölçüde azalttığını bildirilmiştir [20,21].

Otomotiv endüstrisinde çelik haricindeki plastik, alüminyum, magnezyum vb. gibi malzemelerin kullanımı, araçlarda yakıt tüketimini düşürmek amacıyla ağırlık azaltma kaygısından dolayı artış göstermesine rağmen, çelik endüstrisinde

kaydedilen ilerlemeler sayesinde elik; otomotiv sekt6r6 için hala 6nemini korumaktadır [21,22].



## BÖLÜM 3

### BOR

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. İlk kez T. Baron (1747) boraksın sal sedativumun (borik asidin) bir bileşeni ve alkali bir tuz olduğunu göstermiştir. Saf olmayan bor ilk defa, eş zamanlı olarak Humry Davy tarafından İngiltere’de ve J. L. Gay-Lussac ile L. J. Thenard tarafından Fransa’da 1808 yılında elde edilmiştir [2].

Bor elementi, okyanuslarda, sedimantasyon yoluyla oluşmuş kayalarda, kömür madenlerinin olduğu bölgelerde, şeylde (kistli kayaçlarda) ve bazı topraklarda borat formunda bulunan doğal olarak oluşan bir elementtir [21]. Oluşumu volkanik süreçlere bağlıdır. Jeolojik yapılar jeolojik zamanlarda görsel hallerde sulara bulunan bor tuzları, kuraklık dönemlerde suların buharlaşması sonucunda çökelerek bor yataklarını oluştururlar. Bor aslında bir tuzdur. Bor mineralleri, yapılarında farklı oranlarda bor oksit ( $B_2O_3$ ) içeren doğal bileşiklerdir. Bu mineralleri içeren cevherlere uygulanan fiziksel zenginleştirme işlemleri sonucunda konsantre bor ürünleri elde edilmektedir. Konsantre bor ürünleri de rafinasyon ile çeşitli rafine bor ürünlerine dönüştürülmektedir. Yaklaşık olarak torağın 40 metre altından açık ocak işletmeciliği yöntemi ile çıkarılan bor, delme patlatma yöntemi ile gevşetilir, kazıcı yükleme yöntemi ile işlenmek üzere rafine bor üretim tesislerine getirilir. Tesislerden çıkan bor madeni, yıkanır, ayıklanır, boyutlandırılır, elenir ve kuru öğütme yapılarak satışa sunulur. Metal ile ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir element olan Bor, çok çeşitli bileşik yapma kapasitesine ve nötronları absorbe etme özelliğine sahip olmasından dolayı sanayinin vazgeçilmez hammaddesindedir.

Doğada 230 çeşit farklı bor minerali bulunmakta olup, tinkal, kolamanit, üleksit ve kernit ticari açıdan en yaygın olanlardır. Türkiye’de en yaygın bulunan bor mineralleri; sodyum içerikli tinkal ve kalsiyum içerikli kolemanit içerikli üleksittir

[22]. Dünya üzerinde 1,3 milyar ton Bor rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervin yaklaşık 1 milyar tonu (%73) Türkiye'dir. (%7,6 Rusya; %6,1 A.B.D; %3,6 Çin) küresel talebin yarısından fazlasını Türkiye karşılamaktadır [2]. Bu açıdan Türkiye rezerv üstünlüğü ve üretim kapasitesi olarak dünyada söz sahibidir.

Türkiye'de Marmara Denizi'nin güneyinden gelişen hattın, 300 km uzunluğunda ve 150 km genişliğinde olduğu tahmin edilmektedir. Hattın doğu tarafından Kaz Dağları'ndan başlayıp, Eskişehir Kırka, Kütahya Hisarcık ve Emet, Bursa Kestelek, Balıkesir Bigadiç bor yatakları mevcuttur [22].

Türkiye'de bor üretimi için 1935 yılında Eti Bank kurulmuş ve 1978 yılına kadar kamu ve özel sektör eliyle üretimi yapılan bor madeni bu yıldan itibaren çıkan yasa ile sadece devlet kamu eliyle (Eti Maden İşletmeleri) borun üretim ve satışı yapılmaktadır.

Bor periyodik sırası 5, atom ağırlığı 10,81 olan metal, ametal karışımı bir element olan bor doğada B<sup>10</sup> ve B<sup>11</sup> olarak adlandırılan iki ayrı izotoptan oluşmaktadır. B<sup>10</sup> izotopun doğada bulunma olasılığı % 19,1-20,3 olup, B<sup>11</sup> in ise %79-80,9 dur [22]. Ergime sıcaklığı 2090 ± 20 °C ve kaynama noktası 2550 °C ve yarı iletken bir elementtir. Doğada genelde beyaz ve beyaza yakın renkte bulunmaktadır. Bor bileşikleri insanlık tarihinin en eski teknolojilerinden günümüze kadar kullanılmıştır. Günümüzde kullanım alanları çok daha fazla gelişmektedir, özellikle 400'den fazla endüstriyel alanlarda uygulama alanı ve 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir. Bor, karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla olan elementtir. Çizelge 3.1'de gösterildiği gibi 9,3 mohs sertlik değeri ile elmastan sonra en sert elementtir [2].

Çizelge 3.1. Bor ve bileşiklerinin sertlik değerleri.

Malzeme	Mohs Sertliği
Bor	9,3
Bor Karbür	9,32
Bor Nitrür	9,34
Elmas (Standart)	10

Bor elementi doğada serbest olarak bulunmaz, yapay bor ise amorf ve kristal yapıda olmak üzere iki şekilde elde edilir. Amorf bor 2,34 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta siyah ya da kahverengi toz şeklinde, kristal bor ise 2,33 gr/cm<sup>3</sup> yoğunlukta parlak siyah renkte, sert ve kırılğan yapıdadır. Çizelge 3.2’de verildiği gibi kristal bor hekzagonal ve tetragonal kristal kafes yapısına sahiptir. Su ile 100 °C üzerinde, oksijenle 700 °C de, hidrojenle 840 °C de reaksiyona girer [2].

Çizelge 3.2. Borun kristal şekilleri ve parametreleri.

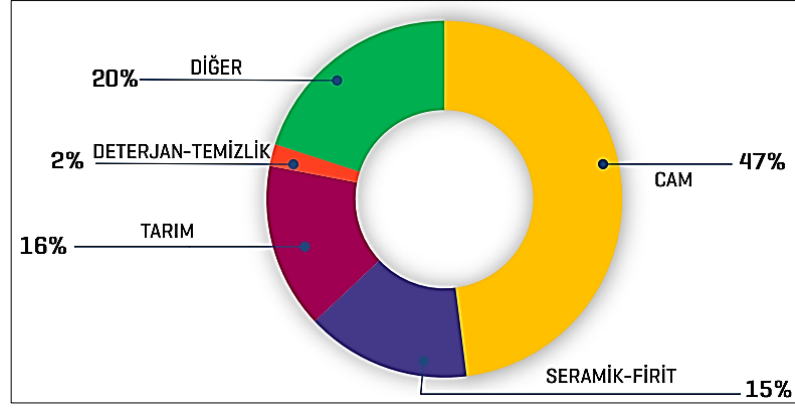
Kristal Şekli	Kafes Parametresi (°A)	
	a = b	c
Tetragonal	8,13	8,57
Hegzagonal	9,54	11,98

Bor bileşikleri kullanım alanı bakımından endüstrinin ve insan hayatının her safhasında yeri almaktadır. Bor teknolojik ve endüstriyel uygulamalarda daima çeşitli bileşikler ve bor kimyasalları şeklinde olur. Bor alaşımları borun geçiş elementleri olan demir, nikel ve kobalt ile yapmış olduğu alaşımlardır. Bor ve bor bileşikleri makine ve metalürji sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bor demir esaslı malzemelerde alaşım elemanı olarak kullanıldığında borun %0,1’in altında olması gerekir. Çünkü bu oranın üzerinde bor miktarları çeliklerin yüksek sıcaklıkta kırılğanlıklara, dökme demirde ise zararlı çatlamalara neden olur. Bor çeliklerde % 0,007 oranına kadar sertleştirme derinliğini artırır, dökme demirlerde ise % 0,005’e kadar grafitin çekirdeklenmesine ve yapının düzgün bir şekilde dağılmasına sebep olur [2].

Takım çeliklerine bor ilâvesi sertleşme kabiliyetini arttırmaktadır. Paslanmaz çeliğe ppm mertebesinde bor ilavesi, kaynak kabiliyetini, sürünme direncini, taneler arası korozyon direncini, nötron absorpsiyon kapasitesini arttırmakta, sıcak yırtılmaları önlemektedir. Bor elementi ayrıca çeliklerin yüzey kaplama (Borlama) işleminde de kullanılmaktadır. Alaşımlı çeliklerdeki borlu tabaka, Fe atomunun yerini alan alaşım elementlerinin yerini de içermektedir. Bu tür çelikler FeB ve Fe<sub>2</sub>B bileşiklerinin yanında, alaşım elementlerine bağlı olarak Cr<sub>2</sub>B, CoB, CoB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub>, NiB<sub>2</sub> kafes parametresi 10,62 ± 0,02 A° olan kübik yapılu M<sub>23</sub>(B,C)<sub>6</sub> (M=Metal) bileşiklerini de

içerirler. Bor aynı zamanda çelik içerisinde bulunan  $V_4C_3$ , NbC gibi karbürlerle de eriyik halde bulunabilir. Ni ve Cr,  $Fe_2B$ 'de Fe atomlarının yerini alarak erir. Bazı süper alaşımlarda az oranda bor ilavesi (0-50 ppm) malzemenin yüksek sıcaklık davranışına olumlu yönde etkisi vardır. Yüksek hız çeliklerine, kullanımda sertleşebilen ve ısıtıl işlem görebilen çeliklere bor ilavesi özellikle sürünme mukavemetini arttırmaktadır. Krom, krom-nikel-kobalt gibi yüksek sıcaklık çeliklerine az miktarda bor ilavesi bu malzemelerin ömrünü arttırmaktadır [2].

Malzeme teknolojileri alanında ilerlemiş ülkelerin önemli bir kısmında, bor madeni bulunmamasına rağmen, bor minerallerinden çeşitli bor türevi yeni malzemeler elde etmek ve bu malzemeleri çeşitli sanayi kollarında eşdeğer kimyasallar yerine daha etkin ve yaygın bir şekilde kullanımının sağlanması üzerine çok ciddi araştırmalar yapılmaktadır [16]. Endüstride bor ve türevleri, yüksek sıcaklık uygulamalarında yüksek performanslı, tutunma ve koruma seviyesi yüksek ve pürüzsüz sıvı oluşturma özelliklerinden dolayı demir dışındaki malzemelerin kullanıldığı sanayi ürünlerinde de tercih edilmektedir. Ayrıca demir çelik sektöründe tozlaşan cürüfa bor ürünü ilave edilerek kompakt yapıda cüruf elde edilmektedir. Bunlara ek olarak, bor mineralinin yoğun olarak kullanıldığı bir diğer sektör cam sanayisidir. Cam sanayisinde izolasyon malzemelerinde, sıvı kristal içeren göstergelerde, birçok laboratuvar ürünüde, otomotivde kullanılan cam ürünlerinde, CRT ekran cam ürünlerinde kullanılmaktadır. Bunlara ek bor eklenerek üretilen bazı özel camlar uzay sanayinde, nükleer reaktörlerde kullanılmakta, böylece bor araştırmaları endüstrinin birçok alanında araştırma fırsatlarını oluşturmaktadır. Bor seramik sanayisinde, temizleme ve beyazlatma sektöründe, alev geciktirici malzemelerde, tarım ürünlerinde bitkilerin gelişiminin iyileştirilmesi amacıyla (Etidot-67), metalürji, fiber malzemeler, uzay ve havacılıkta yüksek hız kanat uygulamaları, yüksek ısıya dayanımlı gövde, düşük ağırlık yüksek kapasite ve benzeri uygulamalarda, enerji alanında hidrojenin tutularak kullanılabilir hale getirilmesinde, nükleer uygulamalarda, sağlık ürünlerinde ve çimento sektöründe kullanılmaktadır. 2017 yılında Dünya genelinde tüketilen bor ürünlerinin yaklaşık %80'i cam, seramik-frit, tarım ve deterjan-temizlik sektörlerinde yoğunlaşmıştır. Borun kullanım alanları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

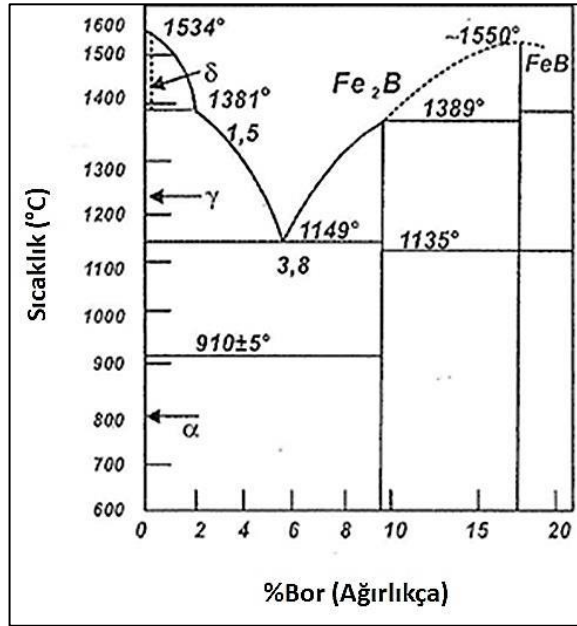


Şekil 3.1. Borun kullanım alanları.

## BÖLÜM 4

### BORLU ÇELİK ALAŞIMLARI

Demir-Bor denge diyagramına bakıldığında borun FeB ve Fe<sub>2</sub>B şeklinde iki farklı bileşik oluşturduğu gözlemlenmektedir. Buna ek olarak, demirin 1538 °C’de ve borun ise 2092 °C’de eridiği görülmektedir. Burada FeB ortorombik kristal yapıya sahiptir. Birim kafes 4 Fe ve 4 B atomlarından meydana gelmektedir. Fe<sub>2</sub>B ise tetragonal kristal yapıya sahip 12 atom noktasından oluşur [2].



Şekil 4.1. Demir bor denge diyagramı.

Şekil 4.1.’de görülmekte olan Fe-B ikili denge diyagramında Fe<sub>2</sub>B bileşiğinde % 8,83, FeB bileşiğinde ise % 16,2 bor yer almaktadır. İkili denge diyagramına göre % 9-16 arasında bor içeren alaşımda faz dağılımı Fe<sub>2</sub>B ve FeB bileşiklerinden veya kristallerinden oluşur. FeB ve B kristalleri ise % 16,2’den fazla bor içermektedir. 1149 °C sıcaklık ve % 3,8 bor bileşiminde bir ötektik nokta meydana gelmektedir [2].

Bor, çelik içerisinde fazda ppm derecesinde çözülebilir. Borun demir ile katı eriyik oluşturabilmesinin nedeni atom çapının % 25 daha küçük olmasıdır. Genel olarak demir alaşımlarında alaşımı oluşturan elementler atom çapları büyüklüğüne göre arayer elementi şeklinde çözülebilmektedir. Dolayısıyla, diğer elementlerden farklı olarak bor  $\alpha$ -Fe'de yeralan olarak bulunabildiği gibi de arayer olarak da bulunabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda borun demirde çözünlülüğü incelediğinde 1/50 mertebesinde arayer atomu olarak görülmektedir. Buna ek olarak,  $\alpha$ -Fe'de bor yayınımlında ihtiyaç duyulan aktivasyon enerjisinin, yeralan katı eriyik için beklenen seviyede olduğu yapılan difüzyon çalışmaları sonucunda ortaya çıkmıştır. Ayrıca, B-Fe ile yapılan difüzyon çalışmaları da aktivasyon enerjisinin arayer çözünlülüğü için uygun seviyede olduğunu ortaya çıkarmıştır [2].

Buna karşın bor,  $\alpha$ ,  $\gamma$  ve  $\delta$  demirde çok az çözünmektedir. 910 °C'de  $\alpha$ -Fe'de en yüksek çözünebilirlik değeri 20 - 80 ppm iken, 1150 - 1170 °C'de  $\gamma$ -Fe'de 55 - 260 ppm bor çözüldüğü gözlemlenmektedir. Çözünebilirlik aralığı aynı zamanda, asıl malzemenin saflığı ve tane boyutu üzerinde önemli etkiye sahiptir. Demir ve bor arasında Fe<sub>2</sub>B (% 8,83 B), FeB (% 16,23 B) ve 1149 °C'de, % 3,8 B bileşiminde bir ötektik nokta olduğundan borlu yüzey 1149 °C'ye kadar ısıya dirençlidir. Fe-B sisteminde alaşım elementleri, % 1 ötektik sıcaklığını 50°C düşürmektedir [2].

#### **4.1. BORLU ÇELİKLERİN ÜRETİMİ**

Yüzlerce farklı kullanım alanına sahip olan bor ve bor türevi ürünlerin endüstriyel anlamda yeni sayılabilecek uygulama alanlarından biri de çelik endüstrisidir.

Kullanım alanları miktarları açısından yaygın halde bulunan ham bor ve rafine ürünleri metalurji sektöründe, uçak ve havacılık endüstrisinde bor kullanımı giderek artan bir seyir izlemektedir. Bu sanayilere yönelik, ağırlıklı olarak ABD, Avrupa, Rusya ve Japonya'da yapılmakta olan araştırma ve uygulamalar dikkat çekicidir.

Çeliklerin sertleşmesinde borun etkisi 1940 yıllara dayansa bile, yakın tarihte borun çeliklere sertleşme yeteneğini kazandırması aşamasındaki sorunlar giderilebilmiştir.

Çelik sanayisinde alaşım elementi olarak kullanılan bor, çeliğe sertleşme kabiliyeti sağlaması ile bilinmektedir.

Yüzlerce çeşit borlu çelik bulunmaktadır. Bunların büyük çoğunluğu ise Mn ve Cr alaşımları olarak hazırlanmaktadır. C oranları %0,15 ile %0,45 arasında değişen borlu çeliklerde nadiren Ni ve Mo de bulunmaktadır. Sertleştirilmiş, temperlenmiş ve yüzeyleri sertleştirilmiş olarak kullanılan borlu çeliklerdeki toplam bor içeriği, en fazla % 0,006 olmalıdır. Bor çelikleri esas olarak alüminyumla deoksitlenir. Deoksidasyon sonucunda yapı içerisinde %0,03 yapıda Alüminyum bulunur. Genellikle bor çeliklerine %0,03 oranında nitrüleme işlemi uygulanır [23].

#### **4.2. BORLU ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Bir malzemenin çekme mukavemeti, akma sınırı, yüzey sertliği, çentik, darbe vb. gibi mekanik özelliklerine ek olarak kaynak işlemine uygunluğu, sertleşme, şekillendirme ve kolay işlenebilme özellikleri de oldukça önemlidir.

Isıl işlem öncesinde nadiren düşük mekanik özelliğe sahip olan borlu çelikler, sıcak hadde ürünü, yassı levha halinde ise, karbonlu yapı çelikleri ile hemen hemen aynı mekanik özelliklere sahiptirler. Bu şekliyle, sıcak ve soğuk, hatta derin çekme işlemi bu sebeplerden dolayı bu tür çeliklerde daha kolay uygulanmaktadır. Normal yapı çeliklerinin şekillendirilmesinde kullanılan yöntemler, aynı takımlarla ve aynı işleme hızlarıyla bu tip çeliklerde de kullanılabilir. Bu çeliklerin şekillendirilmesinde de kullanılacak yöntemler, normal yapı çelikleriyle benzerlik göstermektedir. Borlu çeliklerin düşük alaşım içeriğine kaynak işlemini de kolaylaştırır. Kaynak yöntemlerinden MIG ve direnç nokta kaynağı borlu çeliklerde ısıdan etkilenmiş daha az mikro bölgeye sebep olduğundan tercih edilir.

Farklı araştırmacılar tarafından korozyon ve yorulma dirençlerinin de borlu çeliklerde yüksek olduğu tespit edilmiştir. Şöyle ki, gemi, köprü ve petrol platformu gibi korozyon direncinin çok yüksek olduğu platformların yapımında tercih edilen düşük karbonlu bey nitik çeliklere bor katkısı ilave edilmiş ve korozyon direncinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir [2,3].



### 4.3. BORLU ÇELİKLERİN KULLANIM ALANLARI

Uygulanan ısıtım işlem sonrasında borlu çeliklerin sertlik değeri yükselir ve sürtünme ve aşınma direnci de iyileştikten dolayı çoğu zaman ağır çalışma şartları için tavsiye edilir. Örneğin toprak işleme ve yol yapımı uygulamaları, otomobillerdeki güvenlik elemanlarında kullanımı yaygındır.

Borlu çelikler sertlik ve aşınma dayanımını açısından yüksek seviyeli alaşımlı çeliklerdir. Isıtım işlemlerinden sonra işlenmeleri kolaydır ve çok iyi mekanik özelliklere sahiptirler. Yakın özelliklerdeki yüksek alaşımlı çeliklere nazaran düşük maliyetli olmaları düşünüldüğünde, makina ve imalat sanayisinde borlu çeliklerin önemli bir seçenek oldukları görülmektedir.

Borlu çelikler bunlara ek olarak Avrupa otomotiv sanayisi araçların darbelerin yoğun olarak geldiği bölgelerde ve yolcu güvenliği açısından önemli parçalarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak forklift ve kepçelerin tırnaklarında, yaylarda, vites kutularında, tankların yürüyen paletlerinde vb. yüksek aşınma dayanımı gerektiren iş parçalarının kullanıldığı yerlerde borlu çelikler başlıca malzeme olarak kullanılmaktadır [2].

Bor çelikleri ve uygulamaları gün geçtikçe çeşitlenmekte ve daha popüler hale gelmektedir. Bor çelikleri esas olarak sert, aşınmaya dayanıklı elemanlar için tasarlanmış olsa da, günümüzde daha geniş uygulamalar için de araştırmaları yaygın olarak yapılmaktadır [24]. Örneğin, Frydman ve Letkowska yaptıkları çalışmada B27 kalite bor çeliğinin farklı ısıtım işlemlerde gösterdiği davranışları incelemişlerdir. Çalışmada mukavemet, darbe testi ve gevreklik ve kırılmaya olan eğilim, aşınma direnci ve korozyon direnci gibi temel parametreleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda B27 çeliklerinin temel mukavemet parametrelerinin normalizasyon sonrasında bağlı olarak daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Mukavemet değerlerinin yükselmesi 200 °C'de sertleştirme ve tavlama gibi işlemlerden sonra elde edilmiştir [24]. Kim ve arkadaşları [25], sıcak preslenmiş bor çeliğinde titanyum içeriğinin hidrojen gevrekleşmesi üzerindeki etkileri, elektrokimyasal katodik şarj yöntemi, yavaş gerilme testi ve termal desorpsiyon analizleri kullanılarak incelemişlerdir.

Çalışma sonucunda sıcak preslenmiş bor çeliğinde artan titanyum içeriği ile titanyum karbürlerin çökeldiği, hidrojen yüklü numunelere stres uygulandığında ise hidrojen gevrekleşmesine karşı direncin hafif bir şekilde azaldığı görülmüştür. Jia ve arkadaşları [12], QP980 çelik ve sıcak presleme bor alaşımlı çelik olan B1500HS malzemelerinin lazer kaynağında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Kaynak bağlantılarının en yüksek gerilme mukavemetine 4m/dakika hızda ulaştığı gözlemlenmiştir. Kim ve arkadaşları [26], kalıp içi sıcak kırpmanın ana parametrelerini tanımlamak ve bu nedenle, kesilmiş kenarın ses yüzeyi kalitesine yönelik kontrol tablosunu ve bor çeliklerinin körleme işlemindeki düşük kalıp aşınmasını çalışmışlardır. Çalışma sonucunda, istenen yüzey kalitesine ve boyutsal doğruluğa sahip olan kırpılmış bölgenin, 500 °C ila 550 °C sıcaklık aralığında ve %5'lik açıklığın altında elde edilebileceği gözlemlenmiştir.

Günen, nano bor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan östenitik paslanmaz çeliğin mekanik özellikler ve korozyon davranışını araştırmıştır. Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin yüzeyine kutu borlama tekniği ile katı ortamda Nanobor ve ekabor 3 tozları kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde yüzey alaşımlandırma işlemi uygulanmıştır. Buna ek olarak yüzeyleri alaşımlandırılan numuneleri herhangi bir işleme tabi tutulmayan ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile kıyaslanmıştır. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin aynı koşullarda Ekabor tozları ile borlanan numunelere göre yüzey sertlik değerlerinde 2 kat'a kadar daha fazla sertlik değerleri elde etmiş, çekme, üç noktalı eğme dayanımları ve aşınma dayanımlarında da daha iyi sonuçlar alındığı sonucuna varmıştır. Farklı kayma mesafelerinde yapılan aşınma deneylerinde 950 ve 1000 °C'de yapılan analizde ilk 15 metre mesafede sürtünme katsayısı 0.6 iken 15-30 metre aralığında bu değer 0.5'e kadar düşmüştür. Ortalama değerler sırasıyla 0.368 ve 0.344 olarak hesaplanmış böylelikle ekabor tozu ile borlama neticesinde aşınma da önemli iyileşmeler elde edilmiştir. 1000 °C'de 6 saat Nanobor tozu kullanılarak yapılan deneylerde borür tabakasının döküldüğü belirlenmiştir. 2 ve 4 saat yapılan proseste istenilen borür tabakası elde edilmiştir [27].

Er, yaptığı çalışmada bor katkı 316L paslanmaz çelik elektrodunun korozyon davranışını farklı çözelti ortamlarında elektrokimyasal yöntemler ile karakterize

edilmiştir. Böylece en yüksek korozyon direncine sahip elektrodun W 316L, en düşük korozyon direncine sahip elektrodun ise 316L elektrodu olduğunu göstermiştir. Böylece elektrotların korozyon VII dirençleri sıralamasının da W 316L>316L+NiB> 316L şeklinde olduğu görülmüştür. Diğer taraftan 0,5M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözelti ortamında pH değeri arttıkça 316L+NiB elektrodun korozyon direncinin de arttığı görülmüştür [28].

Demirel, çalışmasında, AISI 8640 ve GS 60 çeliğinin abrasif aşınma ve korozyon davranışına borlama işleminin etkisini araştırmıştır. Buna ek olarak borlanmış numunelerin mikroyapısı, mikro sertliği, bor tabakası kalınlığı, korozyonu ve aşınma yüzeyleri incelenmiştir. Bu çalışmada abrasif aşınma testlerinden, 950°C'de 8 saat süreyle borlanan numunelerin, tüm deney şartlarında en düşük aşınma kaybına sahip olduğu tespit edilmiştir. Borlama süresinin arttırılmasıyla daha kalın katman oluştuğu görülmüştür. Mikro sertlik ölçüm ve korozyon sonuçlarına göre de borlama sıcaklığı ve süresinin artmasıyla sertlik değerlerinin ve korozyon dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir. SEM ve optik incelemeler sonucunda ise çelik malzemelerin üzerinde oluşan borürlerin düzgün dallı bir morfolojiye sahip olduğu sonucu elde edilmiştir [29].

Aydın, yaptığı çalışmada, ısıtma işlem parametrelerinin bor katkılı östenitik çelik üzerine etkisini incelemiştir. Non-manyetik yapıda olan östenitik çelikler oda sıcaklığında yüzey hacimli kristal yapısında olup yüksek mukavemet ve sertlik, kırılma tokluğu ve yüksek korozyon direncine sahiptir. Yapı içerisinde bulunan molibden ve krom, karbür yapıcı elementlerdir. Yapıda bulunan bor elementi ise borür yapıcı elementtir. Sertlik değerlerini arttırmak için yaşlandırma işlemleri boyunca karbür çökeltileri haricinde borür çökeltileri de elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçlarında, yapılan ısıtma işlem sonrasında ötektik karbürlerin morfolojisi küresel hale getirilmiştir. Bir miktar ağ şeklindeki ötektik karbür, küresel hale dönüşmeden yapı içerisinde kalmıştır. Yaşlandırma işlemlerinde elde edilen sertlik değerleri daha önce yapılan ısıtma işlemlerinin yaşlandırma değerlerinden daha küçük olmasının sebebi tanelerde kabalaşmanın olmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Tanelerin kabalaşması ile yapıda bulunan tane sınırları azaldığı, tane sınırları yüksek enerjili bölgeler oldukları için çökelti fazları genellikle tane

sınırlarında çekirdeklenmeye başlar ve azalan tane sınırları ile oluşacak çökelti fazlarının azaldığı tespit edilmiş ve sertlik değerlerindeki artış istenilen düzeyde olmadığı görülmüştür. Ayrıca yapılan ısı işlem ile yapıda bulunan birincil karbürlerin tamamı östenit fazında çözüldüğü için bu mekanizmadan dolayı da sertlikte bir miktar düşüş yaşandığı tespit edilmiştir [1].

Köseli, bor içerikli elektrotlarla düşük karbonlu çelik yüzeylerinin kaplanması ve aşınma direncinin incelenmesi konularında çalışmışlar ve bor içerikli örtülü elektrotlar üretmiş ve düşük karbonlu çelik yüzeylerini tek paso halinde kaplamıştır. Buna ek olarak elektrot örtüsündeki bor içeriğinin kaplamanın mikroyapısı, sertliği ve aşınma direnci üzerindeki etkileri araştırmıştır. Sonuç olarak kaplama işleminden sonra, WDX ve Xray'i de içeren mikroyapı incelemeleri, sertlik ölçümleri ve abrasiv aşınma testleri sonuçlarından hareketle kaplamadaki bor içeriğinin birincil ve ötektik  $Fe_2B$  oluşumunda ve dolayısıyla sertlik üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Kaplamadaki bor miktarı arttığında mikroyapı ötektikten ( $Fe_2B + \alpha-Fe$ ), birincil  $Fe_2B$ +ötektik + $FeB$  yapıya doğru değişmiştir. Kaplamada kullanılan ısı girişinin de kaplama bor miktarı üzerinde kısmen etkili olduğu görülmüştür. Kaplamadaki bor miktarındaki artışla beraber aşınma direnci arttığı görülmüştür. Mikroyapı WDX ile X-ray analizleri ve mikrosetlik ölçümleri, yeni üretilen bor içerikli örtülü elektrotlar ile düşük karbonlu bir çelik yüzeyinde bor içeriğinin %7,2'ye kadar arttırılabileceğini göstermiştir [30].

Türkan, bor alaşımlı çelikler ve yüksek zorlamalara karşı kullanılan bor alaşımlı yeni semantasyon çelikleri üzerine çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, çeliklerin sertleşme özelliğini arttırmak için kullanılan yüksek değerdeki alaşım elemanlarından tasarruf edebilmek amacıyla yeni bor alaşımlı çeliklerin geliştirilmesine çalışılmıştır. Sonuç olarak, bor elemanının çeliklerde sertleşme derinliğini ve sertlik alma kabiliyeti, çeliğin içinde mevcut C miktarı ile ters orantılı olduğu ve C miktarı %0,90 olan çeliklerde bor elemanının çeliğe hiçbir sertleşme özelliği vermediği gözlemlenmiştir [31].

Eti Maden İşletmesi Genel Müdürlüğü'nce yapılan projede, demir çelik sektöründe tozlaşan cürufa bor ürünü ilave edilerek kompakt yapıda cüruf elde etmek amacıyla

deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Pota metalürjisinde oluşan ve soğuduktan sonra tozlaşan cüruf, fazla ıslanma ve sıkışma özelliği olmadığından taşımada, stoklamada ve çevre açısından problem oluşturmaktır. Bu durum işletmelere ek maliyet getirmektedir. Pota fırınına bor ürünü ilavesi ile cürufu kompakt bir yapıya kavuşturmak ve bu sorunları en az seviyeye indirerek demir çelik sektöründe bor ürünü kullanımını yaygınlaştırmak amaçlanmıştır. Demir çelik sektöründe pota fırını cürufu başarılı gerçekleşen endüstriyel deneyler sonucunda ıslah edilmiştir. Böylece çevre açısından problem olan pudra cüruf, yeniden değerlendirilebilir bir ürün olarak kompakt yapıya kavuşturulmuştur. Bu çalışmalar sonucunda demir çelik sektöründe faaliyet gösteren etkin ve yetkin 10 firma faydalanmıştır [22]. Fakat ticari çeliklerde borun katkı maddesi olarak kullanıldığında ortaya çıkan korozif aşınma konusunda literatürde çok az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışmada; 1040 ve 8620 kalite ticari çeliklere bor ilavesinin korozif aşınma direncine etkisi incelenmiştir. Borun katkı maddesi olarak kullanılmasının çelik korozyonuna etkisi ortaya çıkarılarak elde edilen malzeme özellikleri değerlendirilmiş, korozyonun yoğun olduğu uygulamalarda kullanım alanlarının genişletilmesi sağlanmıştır. İlk olarak, bor katkılanmış çelikler tedarik edilerek, elde edilen çeliklerin korozif aşınma davranışlarının belirlenmesi amacıyla %3,5 sodyum klorür (NaCl) çözeltisinde 10N, 20N ve 40 N yükler altında korozif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinin sonrasında aşınmış yüzeylerin karakterizasyonları taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve yüzey profilometresi kullanılarak yapılmıştır. Böylece bor ilavesinin korozif aşınma davranışlarına olan olumlu etkileri ortaya çıkarılmış ve ölçüm sonuçları tablo ve grafiklerle sunulmuştur.

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

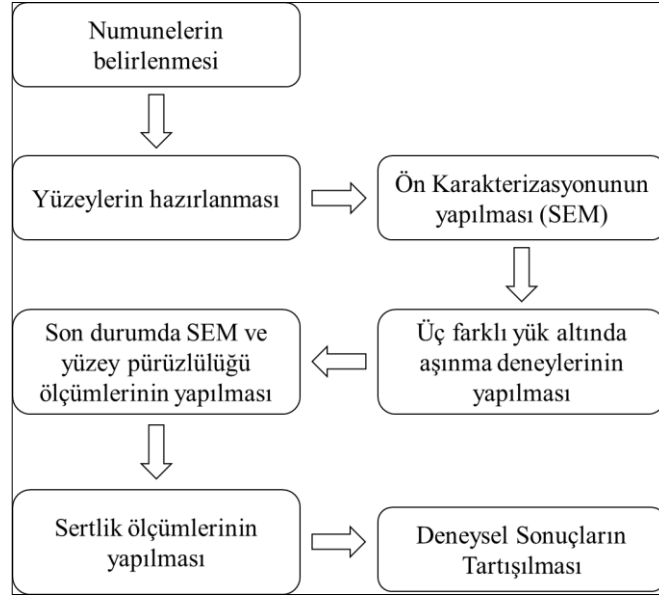
Bu çalışmada, birçok endüstriyel alanda kullanılan 1040 ve 8620 kalite çeliklere Çizelge 5.5.1. 'de belirtilen oranlarda bor ilavesi gerçekleştirilmiştir. 20x30x5 mm boyutlarında hazırlanan farklı bor içeriklerine sahip numunelerin korozif aşınma davranışları üç farklı yük (10-20-40 N) altında, %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde test edilmiştir.

Çizelge 5.1. Numunelerin spektral analiz sonuçları.

No.	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Al (%)	Cu (%)	Ti (%)	N (%)	Fe (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (ppm)
<b>1040 Çeliği</b>														
1B3	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	<b>3</b>
1B9	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	<b>9</b>
1B15	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	<b>15</b>
1B23	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	<b>23</b>
1B30	0,41	0,21	0,95	0,015	0,008	0,16	0,08	0,061	0,039	0,013	97,92	0,045	0,011	<b>30</b>
<b>8620 Çeliği</b>														
8B3	0,23	0,20	0,86	0,013	0,008	0,64	0,096	0,066	0,035	0,013	97,11	0,49	0,17	<b>3</b>
8B14	0,23	0,20	0,86	0,013	0,008	0,64	0,096	0,066	0,035	0,013	97,11	0,49	0,17	<b>14</b>
8B30	0,23	0,20	0,86	0,013	0,008	0,64	0,096	0,066	0,035	0,013	97,11	0,49	0,17	<b>30</b>
8B48	0,23	0,20	0,86	0,013	0,008	0,64	0,096	0,066	0,035	0,013	97,11	0,49	0,17	<b>48</b>
8B58	0,23	0,20	0,86	0,013	0,008	0,64	0,096	0,066	0,035	0,013	97,11	0,49	0,17	<b>58</b>

#### 5.1. DENEYLERİN YAPILIŞI

Tez çalışması kapsamında yapılan deneysel çalışmalarda izlenen yol şematik olarak Şekil 5.1 'de verilmiştir.

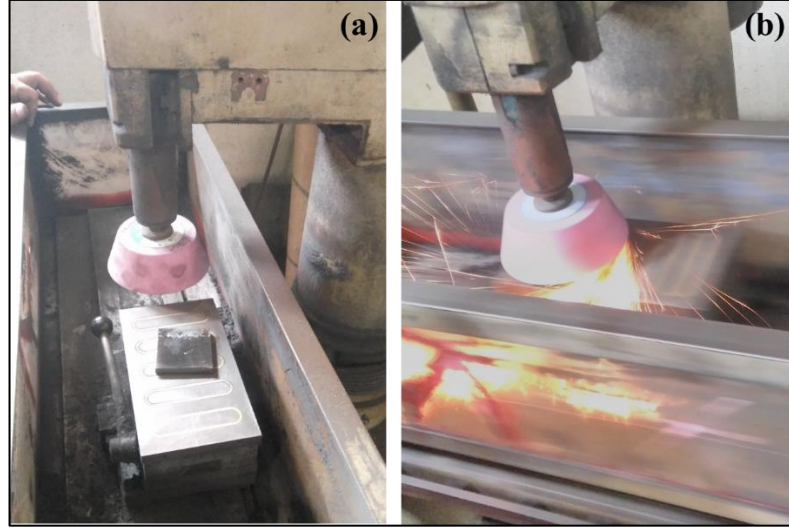


Şekil 5.1. Yapılan çalışmanın şematik gösterimi.

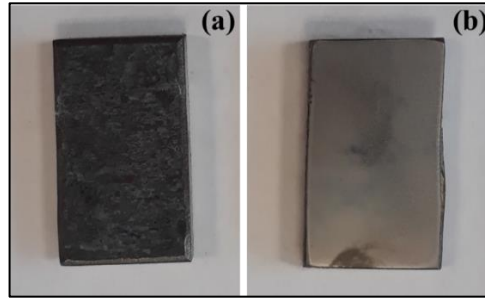
## 5.2. MALZEME TEMİNİ VE HAZIRLANMASI

Deneysel çalışmalar için farklı oranda bor içeren 1040 ve 8620 alaşımlı çelikler üretilmiştir. Alaşımların döküm işlemi, vakumsuz indüksiyon ocağı kullanılarak 1635°C’de ergitilerek, 40x40 cm kare seramik kalıplara homojen bir şekilde İstanbul Serpa Döküm A.Ş’de gerçekleştirilmiştir. Daha sonra dökümler Avcılar hadde firmasında %200 oranlarında haddelenerek yassı hale getirilmiştir. Dökümü gerçekleştirilen alaşımların kimyasal bileşimleri (Çizelge 5.1) spektral analizle belirlenmiştir. Korozif aşınma deneyleri için haddelenmiş alaşımların her birinden 20x30x5 mm boyutlarında numuneler çıkarılmıştır.

Şekil 5.2 ve 5.3 de görüldüğü üzere istenilen boyutlarda hazırlanan numunelerin yüzey temizleme işlemi Karabük Çelikoğlu Demir Çelik San. ve Tic. Ltd. Şti.’nde yer alan dikey taşlama tezgahında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2. Numunelerin hazırlanması: a) kesilmiş numune, b) taşlama aşaması.



Şekil 5.3. 1040 ve 8620 bor ilaveli çelik numuneleri: a) ham numune, b) taşlanmış numune.

### 5.3. MİKROYAPI İNCELEMESİ

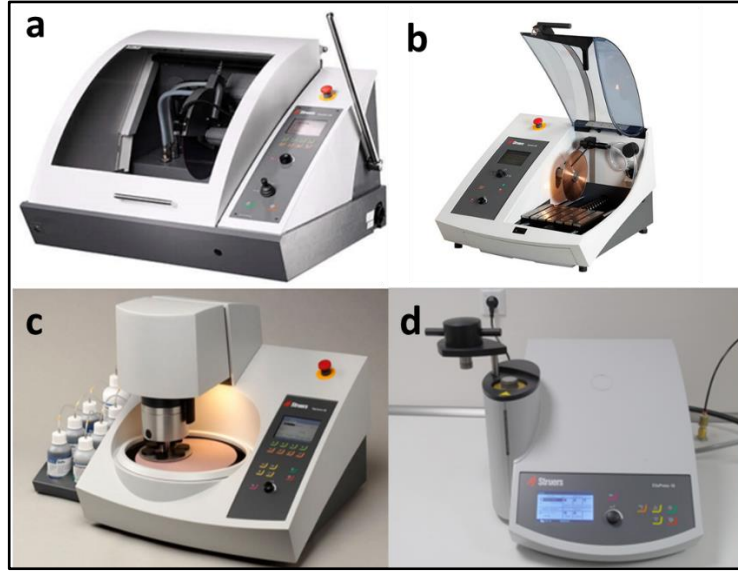
Mikroyapı incelemesi için numunelere kaba ve ince zımparalama işlemleri sonrasında parlatma ve dağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ilk olarak optik mikroskop incelenmesi ve SEM analizleri sırasıyla gerçekleştirilmiştir.

#### 5.3.1. Optik Mikroskop İncelemesi

Numunelerin optik mikroskop incelemeleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü MARGEM laboratuvarlarında yapılmıştır. Öncelikle Şekil 5.4a' da verilen Discotom 100 kesme cihazı ile daha küçük parçalar haline getirilmiştir. Boyutları biraz daha azalan numunelerin Şekil 5.4b'de verilen Secotom 50 hassas kesme cihazı



ile boyut küçültme işlemleri devam ettirilmiştir. Kesme cihazından çıkan parçaları otomatik zımparalama işlemine koyabilmek için Şekil 5.4d’de gösterilen CitoPress 10 cihazını kullanarak bakalite alma işlemi yapılmıştır. Bakalite alınan numuneler Şekil 5.4c’de verilen Tegramin 30 cihazına yerleştirilerek sırası ile 240-400-600-800-1000-1200-2000-3000 SiC zımparalama aşamalarından geçirilerek parlatma işlemi için yüzeyleri hazır hale getirilmiştir. Tegramin 30 cihazına Floc Parlatma keçesi takılmıştır. 3 mikron elmas süspansiyon kullanılarak yüzey parlatma işlemi sonlandırılmıştır. Dağlama çözeltisi olarak Nital olarak bilinen (%5 Nitrik Asit-%95 Etanol) dağlama reaktifi kullanılmıştır. 10 Saniye dağlama işleminden sonra etanol ile yüzey temizlenmiştir.



Şekil 5.4. Mikroyapı incelemesinde kullanılan cihazlar: a) Discotom 100 kesme cihazı, b) Secotom 50 hassas kesme cihazı, c) Tegramin 30 yüzey parlatma cihazı, d) CitoPress 10 bakalite alma cihazı.

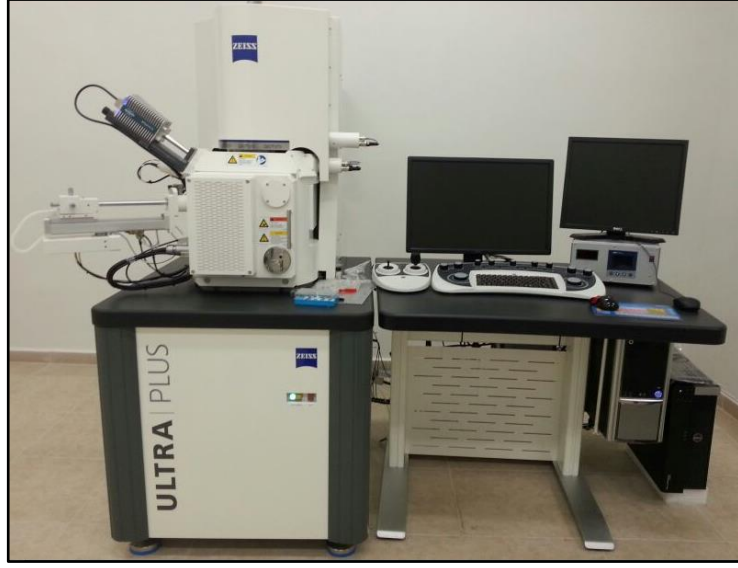


Şekil 5.5. Nicon Eclipse MA200 optik görüntüleme cihazı.

Hazırlama işlemleri tamamlanan numunelerin optik görüntüleme çalışmaları Şekil 5.5'de verilen Clemex yazılıma sahip Nicon Eclipse MA200 marka optik ışık mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### **5.3.2. SEM Analizi**

Optik mikroskopta incelemesi tamamlanan numunelerin detaylı mikroyapı incelemeleri Şekil 5.6'da verilen EDX donanımlı Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem SEM cihazı ile yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu çalışmaları korozif aşınma deneyleri sonrasında aşınmış yüzey incelemeleri ile sonlandırılmıştır.



Şekil 5.6. Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem SEM cihazı.

#### 5.4. XRD İNCELEMESİ

Üretilen numunelerin detaylı faz incelemeleri 3 derece/dakika tarama hızında Şekil 5.7' de verilen Rigaku marka XRD cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 5.7. Rigaku XRD cihazı.

## 5.5. SERTLİK TESTLERİ

Mikroyapı incelemelerinin ardından, makro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak sertlik ölçümleri minimum 3 farklı bölgelerden olacak şekilde yapılmış ve bunların ortalamaları sonuç olarak değerlendirilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri HBW2.5/62.5 parametrelerinde 15 sn yük altında brinell sertlik yöntemi kullanılarak Şekil 5.8’de görülen Q10 A+ QNESS marka makro sertlik cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8. Q10 A+ QNESS Mikro sertlik cihazı.

## 5.6. KOROZİF AŞINMA TESTLERİ

Korozif aşınma testleri Şekil 5.9’da verilen UTS Tribometer T10 test cihazında %3,5 NaCl tuzlu su çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma yükü olarak 10N, 20N ve 40N olmak üzere üç farklı yük tek bir aşınma hızında (60 mm/s) uygulanmıştır. Aşınma mesafesi olarak 250 metre seçilmiştir. Aşınma testleri neticesinde yüzey pürüzlülük cihazı kullanılarak aşınan yüzeylerin derinlikleri ve genişliklerinin ölçümü yapılarak 250 metre sonucunda hacimsel olarak kayıp belirlenmiştir. Aşınma hızı hacimsel olarak hesaplanmıştır. Ayrıca cihazdan elde edilen sürtünme kuvveti

değerleri göz önünde bulundurularak, uygulanan yükün aşınmaya etkisi incelenmiştir. Aşınma sonrası en düşük ve en yüksek yükler değerlendirilerek, SEM analizine tabi tutulmuştur. Numunelerin aşınma mekanizmaları yüke bağlı olarak gözlemlenmiş ve aşınmış yüzey SEM görüntüleri ile desteklenmiştir.



Şekil 5.9. UTS Tribometer T10/20 aşınma cihazı.

## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar bölümünde belirtilen test prosedürlerine uygun olarak ölçümleri tamamlanmış ve hazır hale getirilmiş olan numunelerin, mikroyapı analizleri yapılmış, sertlik, korozif aşınma ve SEM testleri gerçekleştirilmiştir.

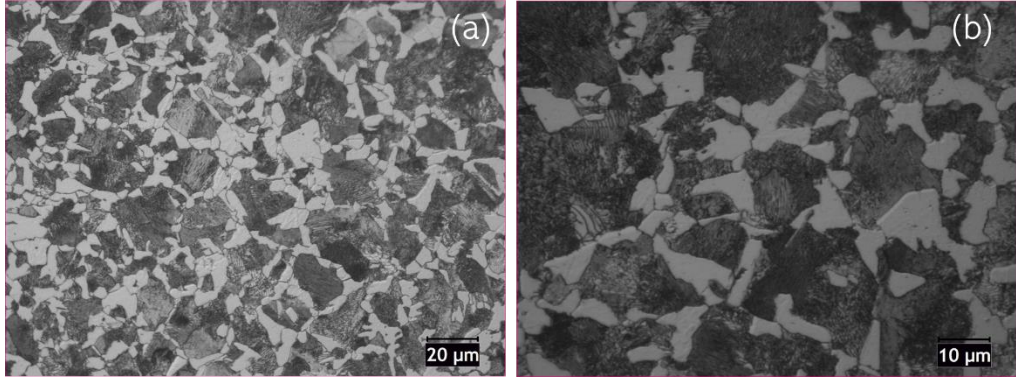
Farklı oranlarda bor içeren 1040 ve 8620 kalite çeliklerin mekanik ve tribolojik açıdan optimum bor oranının belirlenmesi amaçlanmıştır. Alüminyum, döküm esnasında havadan eriyik metal içerisine girebilecek oksijenden korumak amacıyla kullanılmıştır. Titanyum ise malzeme içerisinde ve havada bulunan azottan boru korumak amacıyla kullanılmıştır. Belirtilen sebeplerden ötürü üretimi gerçekleştirilen numunelere ayrıca 400 ppm alüminyum ve titanyum ilavesi yapılmıştır [32].

Borun, azot ile bor nitrür (BN) oluşturmadan önce azota karşı ilgisinin daha fazla olduğu titanyum ile TiN bileşiği oluşturduğu SEM ve EDX ölçümleri ile tespit edilmiştir. Bu yüzden bor ilavesi öncesinde alüminyum ve titanyum ilave edilmiş ve borun BN oluşumu ve oksijenden etkilenmesi engellenerek borun elementel seviyede 1040 ve 8620 çeliğinin içerisinde kalması amaçlanmıştır[33].

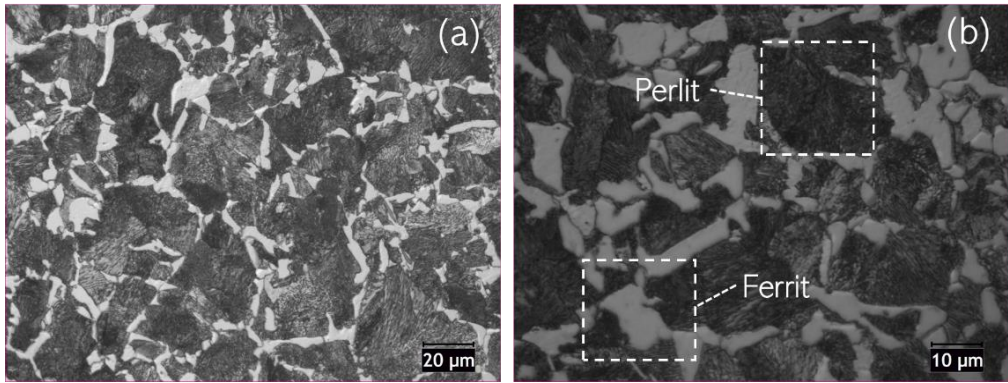
#### 6.1. MİKROYAPI İNCELEMESİ

##### 6.1.1. 1040 Kalite Çelikler

3 ppm bor içeren 1040 kalite çeliklere ait haddeleme yönüne yatay ve dik olmak üzere 500x, 1000x büyütmedeki mikroyapı görüntüleri Şekil 6.1 ve 6.2'de verilmektedir.

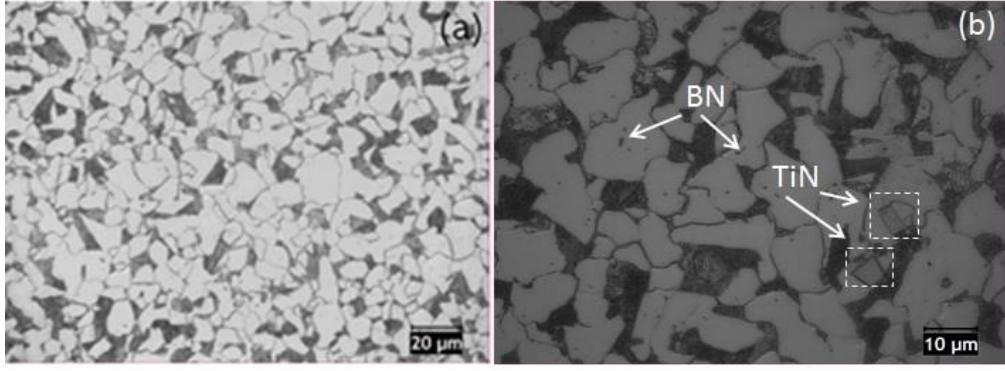


Şekil 6.1. 3 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.

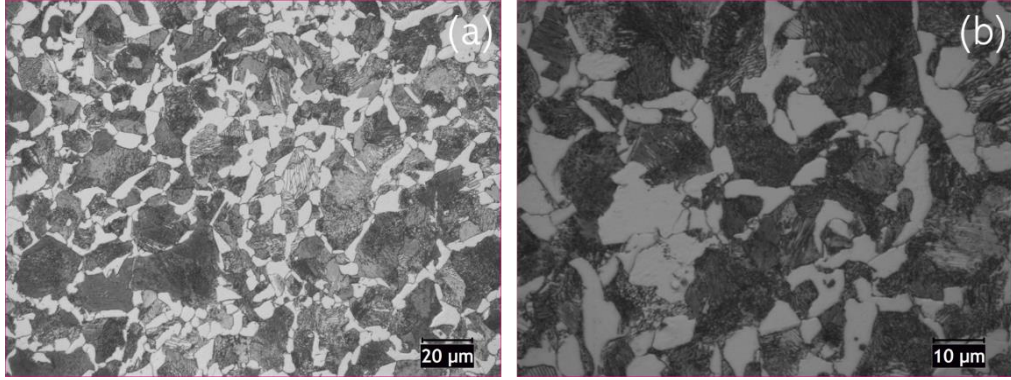


Şekil 6.2. 3 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.

3 ppm bor içeren numunelerden alınan mikroyapı görüntülerinden de anlaşıldığı gibi haddeleme sonrası tanelerin dönüşümünün tamamen gerçekleştiği ve perlitin ferrite göre daha yoğun olduğu görülmektedir. Beyaz ile görülen bölgelerde ferrit siyah deniz kabuğu şeklinde görülen bölgelerde ise perlitik yapı hâkimdir.



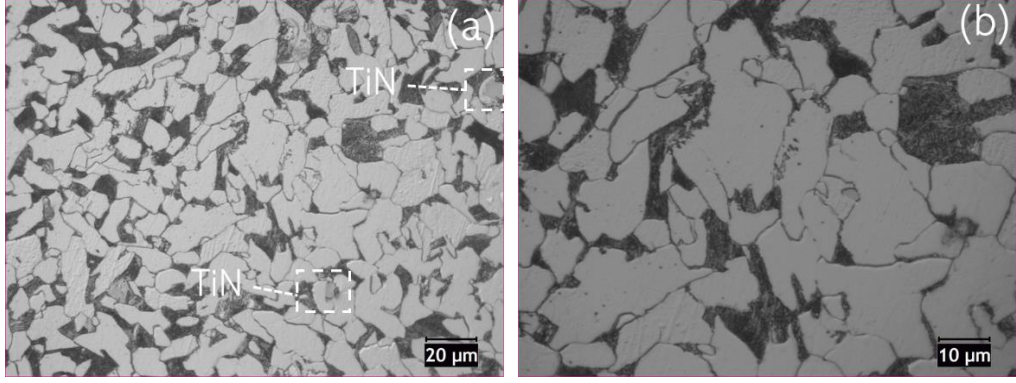
Şekil 6.3. 15 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.



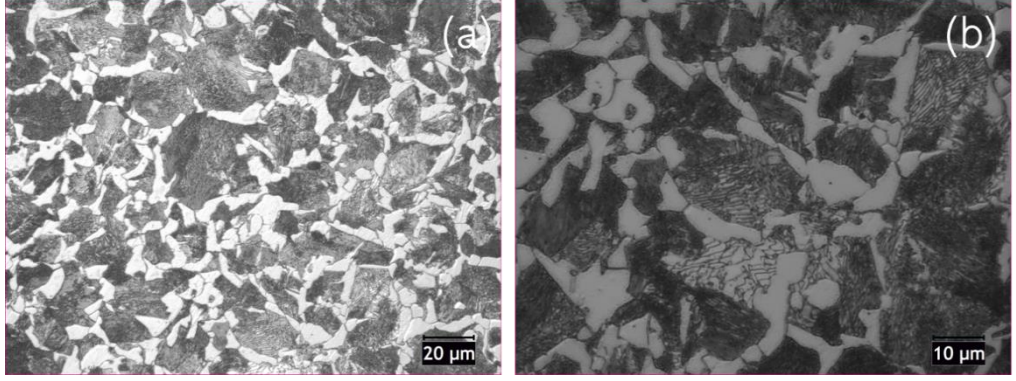
Şekil 6.4. 15 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a)500x, b) 1000x.

15 ppm bor içeren numuneye ait mikroyapı fotoğraflarında okla gösterilen noktalarda borsuz ve 3 ppm bor içeren malzemelere göre, bor oranının artmasıyla birlikte perlitik yapıda daha belirgin bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Tanelerin eş eksenli olduğu ve perlitik yapının mikroyapıda homojen dağıldığı görülmektedir.





Şekil 6.5. 30 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a)500x, b) 1000x.

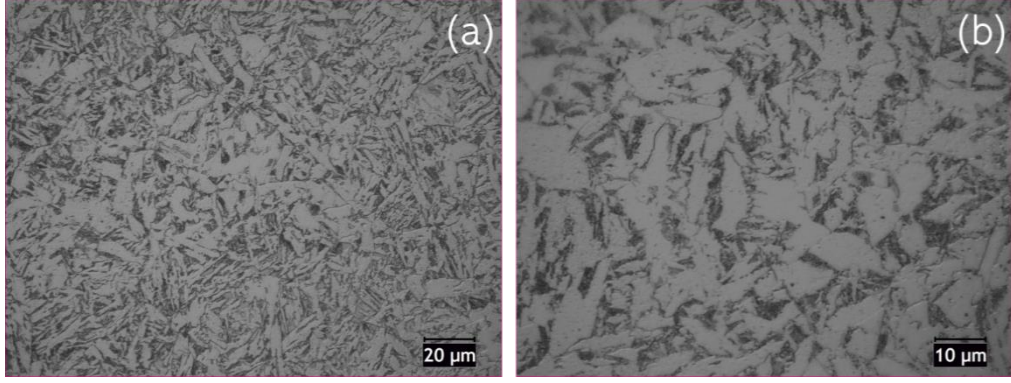


Şekil 6.6. 30 ppm bor içeren 1040 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.

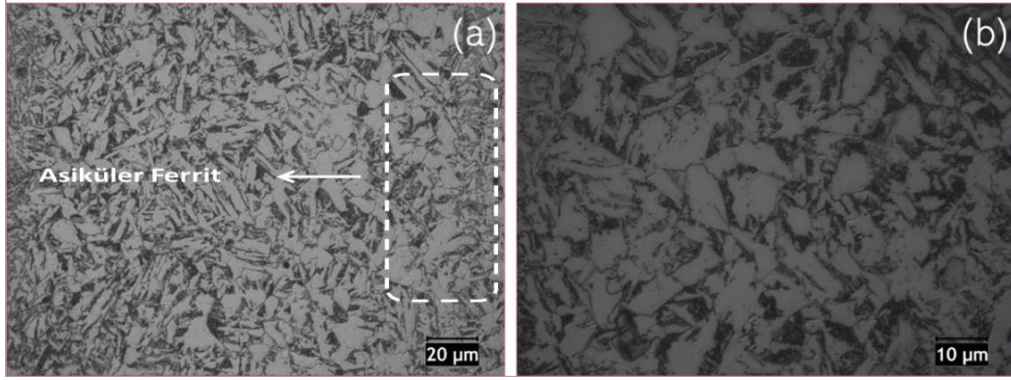
Bor ilavesi östenit tane sınırlarında ferrit fazının çekirdeklenmesini geciktirir fakat bor miktarı arttığında tane sınırlarında oluşan karbür ve nitrürler uygun arayüzey sağlayıcı olarak davranıp ferritin çekirdeklenmesini hızlandırmaktadır [34–36]. Özellikle haddeleme yönüne paralel alınan mikroyapı fotoğraflarında bu durum (ferrit fazının yoğunluğu) açıkça görülmüştür.

### 6.1.2. 8620 Kalite Çelikler

3 ppm bor içeren 8620 kalite çeliklere ait haddeleme yönüne dik ve yatay olarak alınan mikroyapı fotoğrafları Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de verilmektedir.

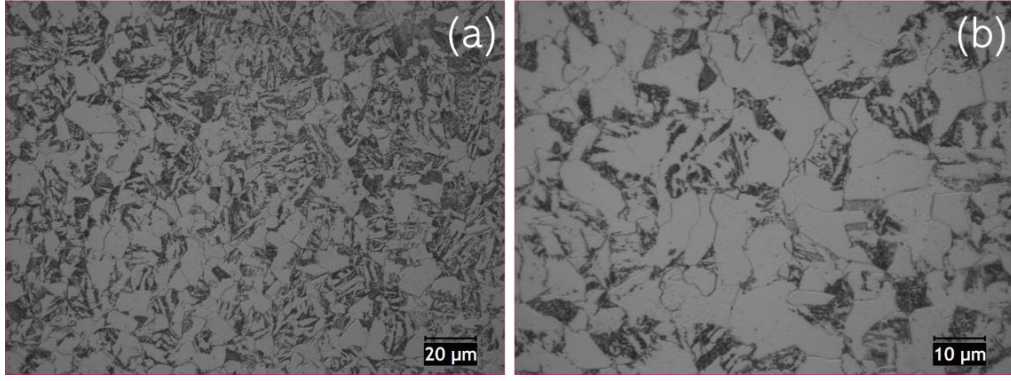


Şekil 6.7. 3 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.



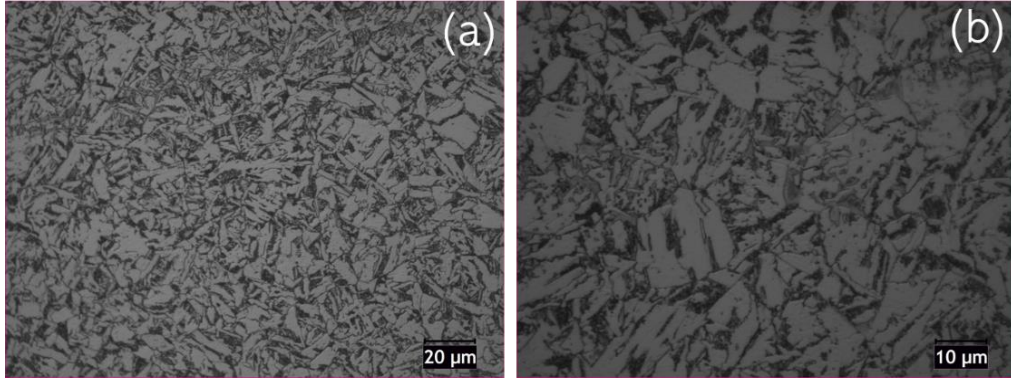
Şekil 6.8. 3 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü a) 500x, b) 1000x.

3 ppm bor içeren 8B3 nolu numuneye baktığımızda haddeleme işlemi sonrasında uzamış ve deforme olmuş tane formunu almıştır. Yapıya kimyasal bileşimindeki karbon oranına bağlı olarak daha çok ferrit yapının hakim olduğu görülmekle beraber ana yapının ferrit ve perlitten oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan deformasyon neticesinde yapıda mikroyapı üzerinde gösterilen bölgelerde asiküler ferrit yapıya rastlanılmıştır [37]. Ferrit tane içerisinde görülen küresel noktaların ise sementit olduğu SEM incelemesi (Şekil 6.13) sonucu anlaşılmıştır.



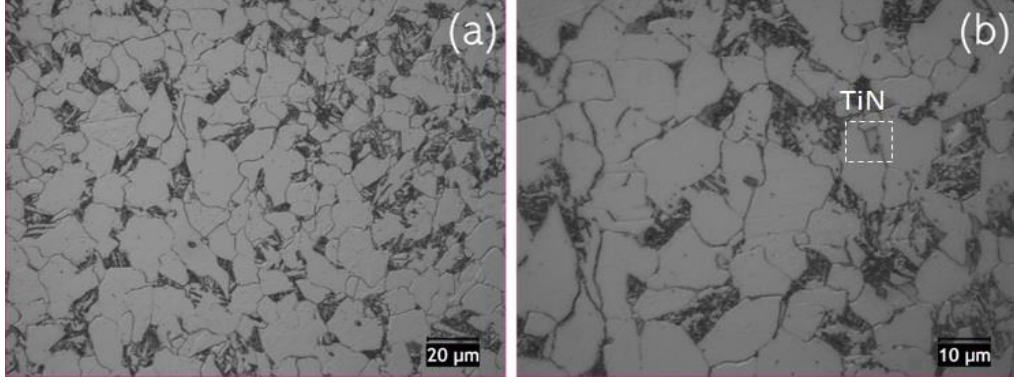
Şekil 6.9. 48 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.

Şekil 6.9 ve 6.10'da 8B48 numaralı numunelerde alınan mikroyapı fotoğraflarına baktığımızda ferrit ve perlit fazlarına ilaveten farklı faz oluşumlarının meydana geldiği görülmektedir. 5000x büyütmede mikroyapı üzerinde görülen düzgün şekilli yapıların titanyum nitrür (TiN) olduğu SEM incelemesi (Şekil 6.14) ile anlaşılmıştır.



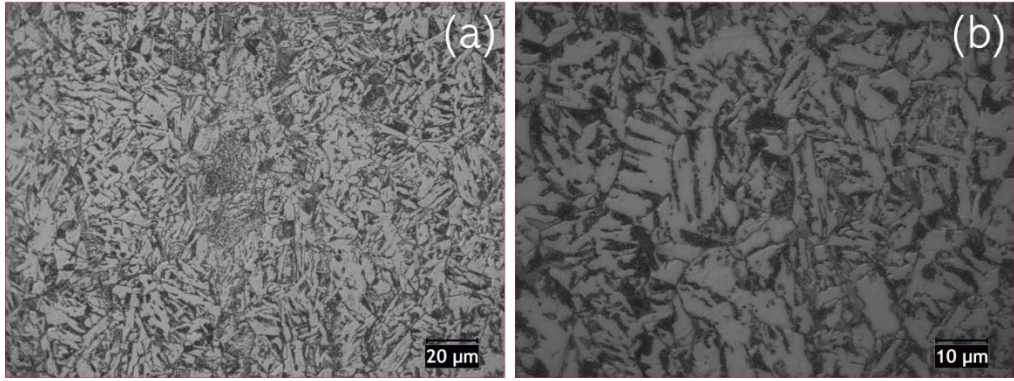
Şekil 6.10. 48 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x

8620 kalite çeliğin haddeleme sonrası yapılarında yer alan perlit tanelerinin iğnesel formda olduğu belirlenmiştir. Özellikle haddeleme yönüne paralel alınan görüntülerde eşksenel bir tane yapısı görülmektedir. Artan bor oranının tane boyutu üzerinde etkisi görülmemiştir.



Şekil 6.11. 58 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne paralel mikroyapı görüntüsü a) 500x, b) 1000x.

Şekil 6.11 ve 6.12’de verilen mikroyapı görüntüsü incelendiğinde BN ve TiC benzeri yapıların oluştuğu tespit edilmiştir. Literatürde tane sınırlarında çökelen bor’un çeliklerin sertleşebilirliğini artırırken tane sınırlarındaki bor miktarı artarsa çeşitli karbürlerin oluştuğu ve bu yapının ferrit fazının çekirdeklenmesini kolaylaştırdığı belirtilmiştir [35,36]. Literatürle paralel olarak bor oranı arttıkça ferrit miktarının arttığı elde edilen görüntülerde belirlenmiştir [2].

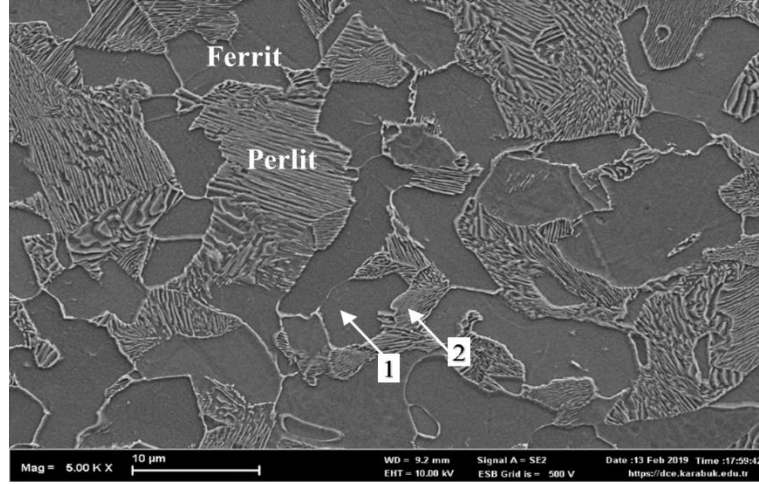


Şekil 6.12. 58 ppm bor içeren 8620 kalite çeliğe ait numunenin haddeleme yönüne dik mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b) 1000x.

Bor oranının artmasıyla birlikte siyah küresel noktaların miktarında daha belirgin bir artış olduğu belirlenmiştir. Siyah renkli bu noktalarının bazılarının BN (Bor Nitrür) olduğu Şekil 6.18 ve Çizelge 6.6 ile desteklenmiştir.

## 6.2. SEM ANALİZİ

SEM analizleri sonucunda ikincil elektron yöntemi kullanılarak mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir. EDX nokta analizi sonucunda bor, karbon, azot, titanyum ve demir elementleri tespit edilmiştir.

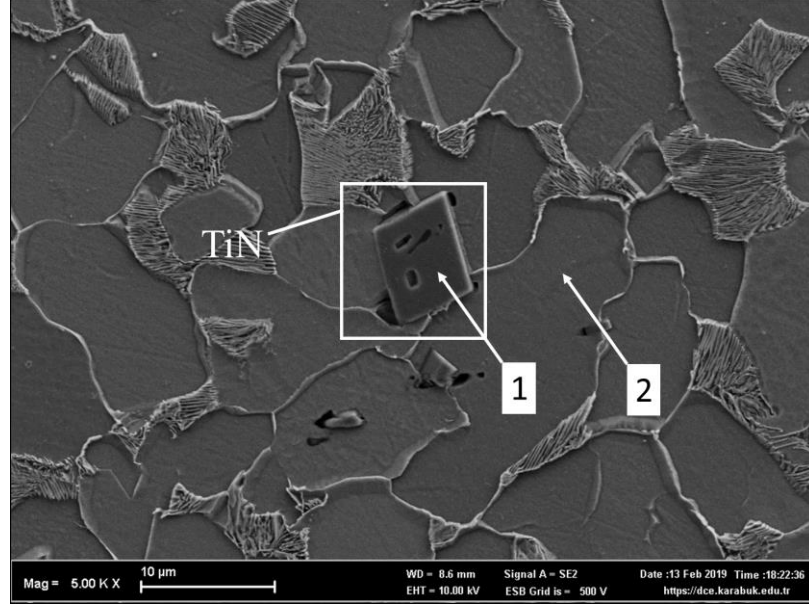


Şekil 6.13. 1B3 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü.

Çizelge 6.1. B3 nolu numuneye ait EDX analizi.

	B	C	N	Ti	Fe
1	-	5,04	-	-	94,96
2	-	6,94	-	-	93,06

Bor içermeyen 1B3 nolu numunenin SEM incelemesi sırasında elde edilen mikroyapı görüntüleri ve EDX sonuçları Şekil 6.13 ve Çizelge 6.1' de verilmiştir. 1 numaralı bölgeler ferrit, 2 numaralı bölgeler ise perlit fazlarından oluşmaktadır.

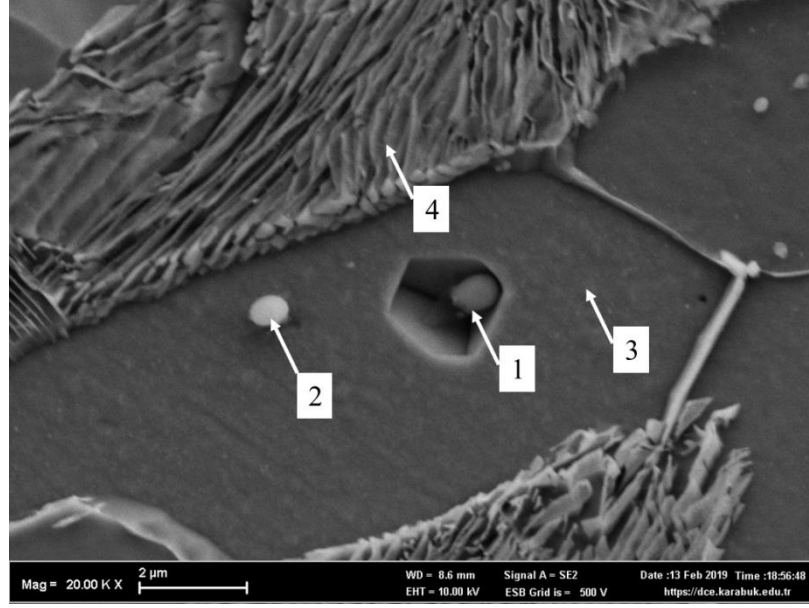


Şekil 6.14. 1B30 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü.

1B30 numaralı numuneye ait 5000 büyütmede SEM görüntüsü Şekil 6.14’de, SEM-EDX analizi sonucu ise Çizelge 6.2’ de verilmiştir. SEM-EDX analizine göre 2 numaralı noktada %4,07 oranında bor olduğu görülmüştür. 1 nolu bölgede ise %24,24 oranında azot ve %71,71 oranında Ti tespit edilmiştir. Yapı içerisindeki bu fazın TiN olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 6.2. 1B30 nolu numuneye ait EDX analizi.

	B	C	N	Ti	Fe
1	-	2,91	24,24	71,71	1,15
2	4,07	3,90	-	0,13	91,90



Şekil 6.15. 1B30 nolu numuneye ait 20000x SEM görüntüsü.

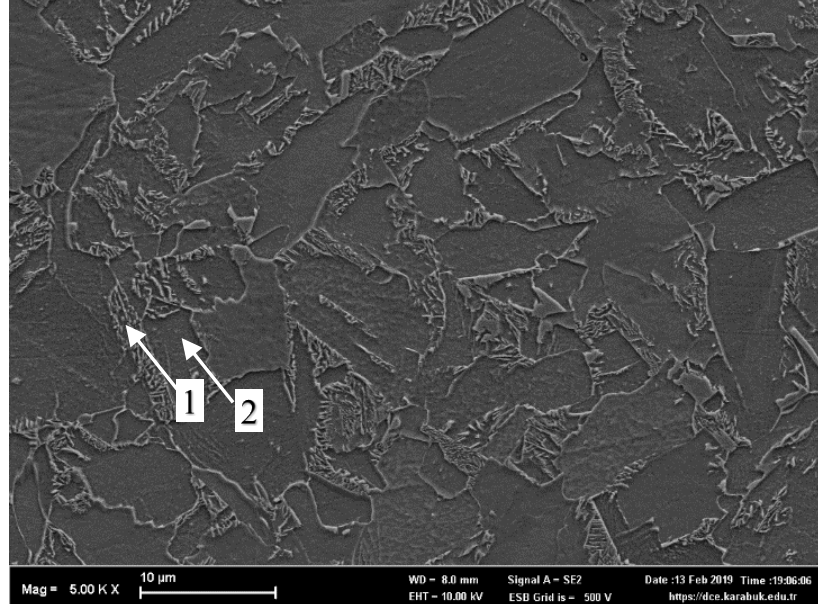
1B30 numaralı numuneye ait 20000 büyütmede SEM görüntüsü Şekil 6.15’de, SEM-EDX analizi sonucu ise Çizelge 6.3’ de verilmiştir. SEM-EDX analizine göre 1 numaralı noktada % 24,72 oranında bor olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3. 1B30 nolu numuneye ait EDX analizi.

	B	C	N	Ti	Fe
1	24,72	17,30	-	1,22	56,76
2	23,67	20,12	-	0,05	56,16
3	-	2,05	-	-	97,95
4	0,17	9,11	-	0,24	90,48

Yapılan incelemeler sonucunda borun tane içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Ayrıca Şekil 6.15’de 1B30 nolu numuneye ait 20000 SEM görüntüsünde farklı boyutlarındaki küresel parçalarda yapılan noktasal analizlerde ve Çizelge 6.3’de verilen 1B30 nolu numuneye ait EDX analizi sonucunda artan bor oranıyla birlikte özellikle 1 ve 2 nolu bölgelerde yüksek oranlarda bor elementi tespit edilmiştir. Bor oranının artmasıyla birlikte siyah küresel noktalarında arttığı tespit edilmiştir. Bor içeren malzemelerde TiN’lere daha az oranlarda rastlanmaktadır.

8B3 numaralı numuneye ait 5000 büyütmede SEM görüntüsü Şekil 6.16’da, SEM-EDX analizi sonucu ise Çizelge 6.4’ de verilmiştir. SEM-EDX analizine göre 1 numaralı noktada %4,55 oranında bor olduğu görülmüştür.



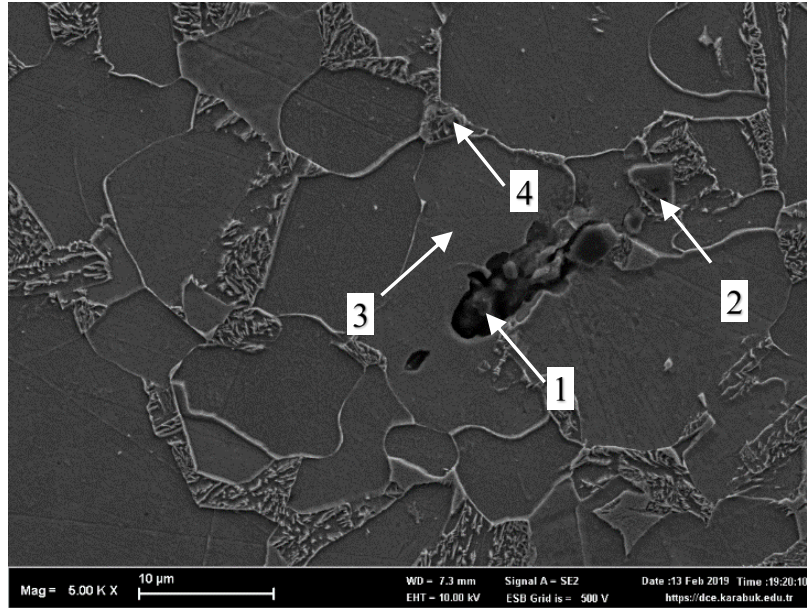
Şekil 6.16. 8B3 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü.

Çizelge 6.4. 8B3 nolu numuneye ait EDX analizi.

	B	C	N	Ti	Fe
1	4,55	7,47	-	0,18	87,80
2	2,87	4,45	-	-	92,68



8B58 numaralı numuneye ait 5,000 büyütmede SEM görüntüsü Şekil 6.17’de, SEM-EDX analizi sonucu ise Çizelge 6.5’ de verilmiştir. SEM-EDX analizine göre bor elementine rastlanmamıştır. SEM ve EDX analizlerinden görüldüğü üzere ilave edilen Ti elementinin mikroyapı içerisinde C ve N ile birleşerek TiC ve TiN bileşiklerini oluşturmuştur. 1 nolu bölgede tane sınırlarında yer alan saç örgüsü şeklindeki yapının TiC bileşiği olduğu EDX analizi ile tespit edilirken yine tane sınırlarında yer alan köşegen yapıların TiN bileşikleri olduğu düşünülmektedir.

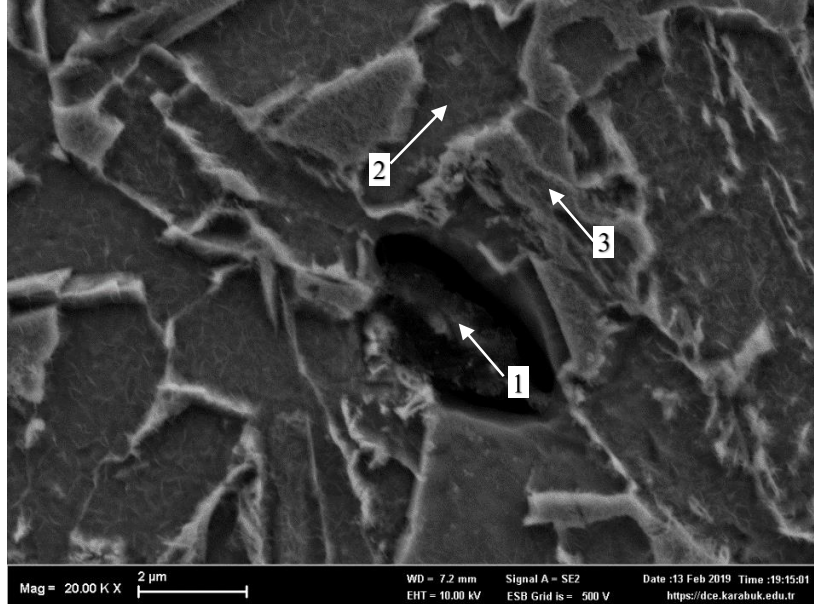


Şekil 6.17. 8B58 nolu numuneye ait 5000x SEM görüntüsü.

Çizelge 6.5. 8B58 nolu numuneye ait EDX analizi.

	B	C	N	Ti	Fe
1	-	34,34	-	15,96	49,70
2	-	1,96	22,08	71,89	4,07
3	-	3,74	-	-	96,26
4	-	7,72	-	-	92,28

8B58 numaralı numuneye ait 20.000 büyütmede SEM görüntüsü Şekil 6.18’de, SEM-EDX analizi sonucu ise Çizelge 6.6’ da verilmiştir. SEM-EDX analizine göre 1 numaralı noktada %22,98 oranında bor olduğu görülmüştür. SEM fotoğrafı üzerinden alınan 1 nolu EDX analizi yapıda TiN bileşiklerine ilaveten BN bileşiklerinin de oluştuğunu desteklemektedir.



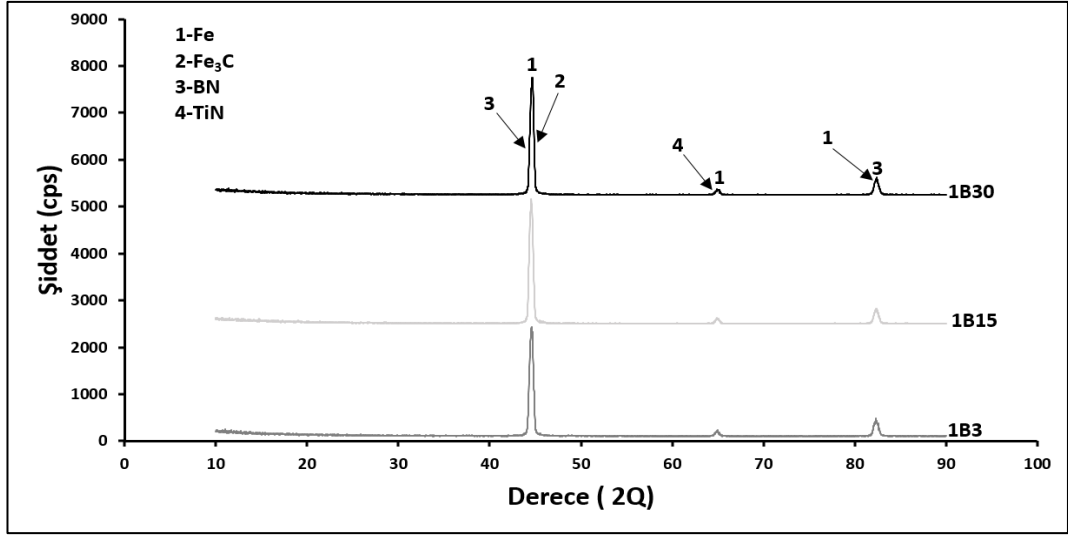
Şekil 6.18. 8B58 nolu numuneye ait 20000x SEM görüntüsü.

Çizelge 6.6. 8B58 nolu numuneye ait EDX analizi.

	B	C	N	Ti	Fe
1	26,07	6,31	19,79	0,00	11,99
2	0,82	2,17	0,00	0,48	96,53
3	0,00	4,17	0,00	0,00	95,83

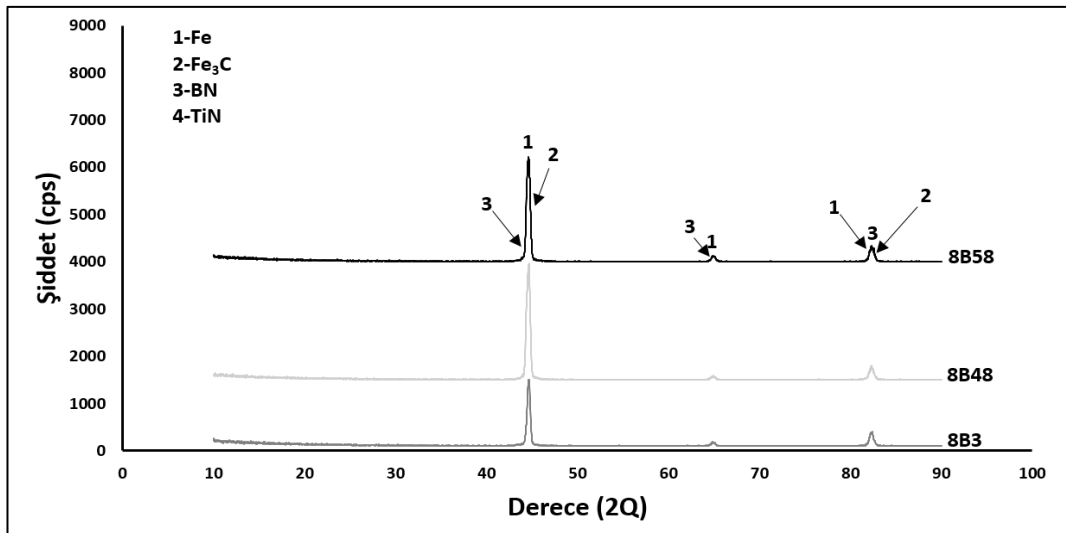
### 6.3. XRD ANALİZLERİ

Farklı oranlar da bor içeren AISI 1040 kalite çeliklere ait XRD analizleri Şekil 6.19'da verilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere artan bor ilavesi ile, SEM analizinde belirttiğimiz BN ve TiN türü bileşikler XRD analizi ile de tespit edilmiş ve grafikte de gösterilmiştir.



Şekil 6.19. 1040 Kalite çeliklere ait XRD sonuçları.

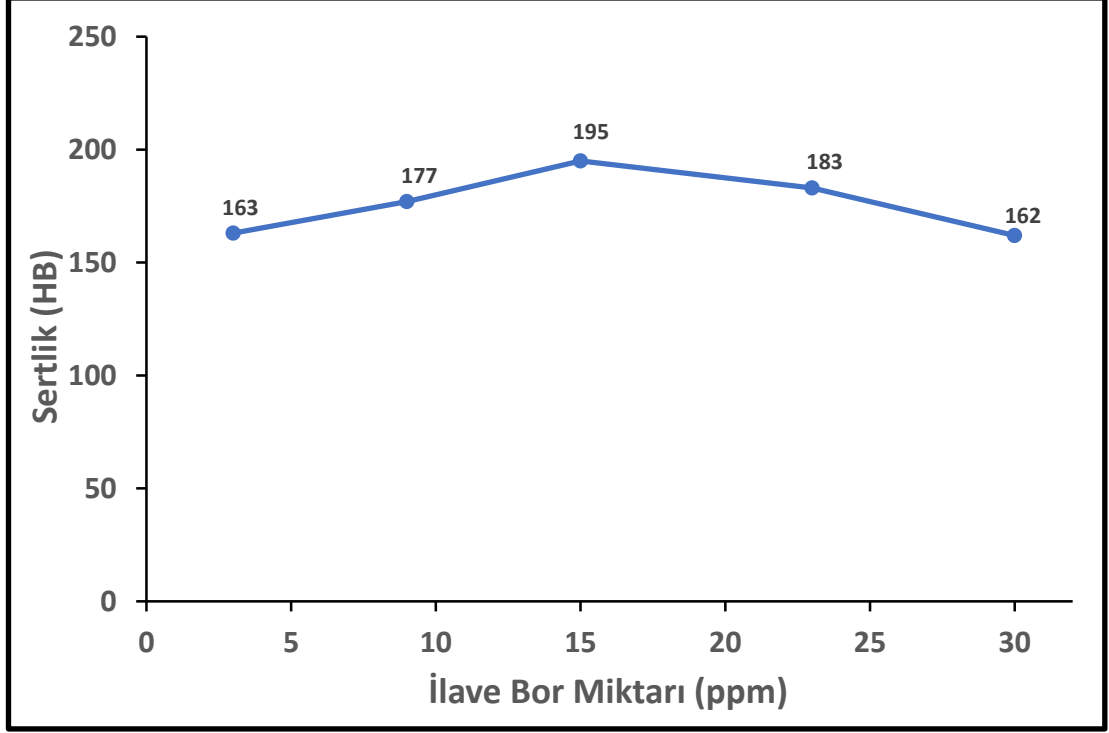
3,48 ve 58 ppm oranında bor içeren AISI 8620 kalite çeliklere ait XRD analizleri ise Şekil 6.20 de verilmektedir. XRD analizinde BN bileşiklerine rastlanılmış fakat TiN bileşikleri tespit edilememiştir. Yapılan SEM analizlerinde de 8620 kalite çeliklerde 1040 kalite çeliklere kıyasla daha düşük oranlarda TiN bileşikleri görülmüştür. Bunun sebebi olarak yapıda daha fazla bulunan bor elementinin BN bileşiği oluşturduğu ve TiN oluşumunu kısıtladığı düşünülmektedir.



Şekil 6.20. 8620 Kalite çeliklere ait XRD sonuçları.

#### 6.4. SERTLİK TESTLERİ

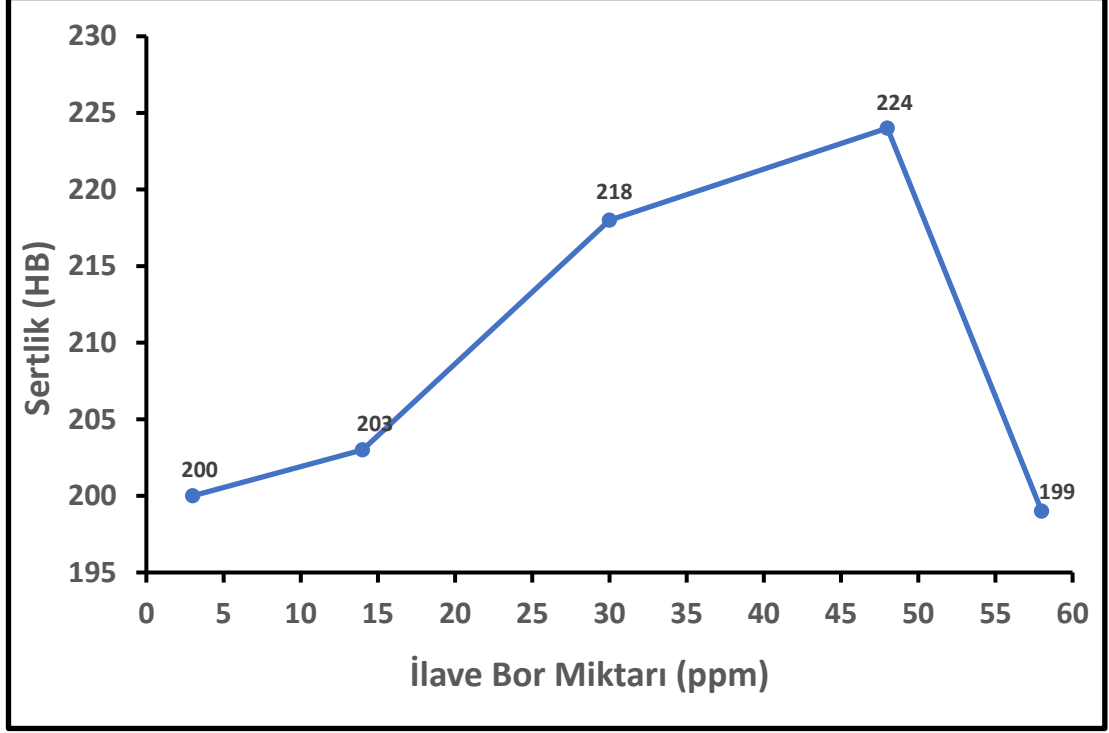
Numunelerimize üç farklı bölgelerden sertlik ölçümleri yapılmış ve bunların ortalamaları sonuç olarak Şekil 6.21 'de verilmiştir.



Şekil 6.21. 1040 Kalite çeliklere bor ilavesinin sertliğe etkisi.

1B3 nolu 3 ppm bor içeren numune ile 1B9 nolu 9 ppm bor içeren numune kıyaslandığında %8 civarında sertlik artışı gözlenmiştir. Bu artışın sebebi, 9 ppm bor içeren numunede ferrit fazının daha az olması ve ilave edilen bor ile nitrürlü bileşiklerin oluşma potansiyelinin daha fazla olmasıdır. En yüksek sertlik artışı 15 ppm bor içeren 1B15 nolu numunede gözlemlenmiştir. Yaklaşık %20 lik bir sertlik artışı elde edilmiştir. Çelik alaşımlarına eser miktarda ilave edilen bor, sertleşebilirlikte önemli bir katkı sunmakta olup, TTT diyagramlarındaki ferrit ve perlit burunlarını diyagramın sağına doğru çekmektedir. 1040 çeliklerinde ortalama sertlik sonuçları kıyaslandığında, 15 ppm seviyesindeki bor miktarı sertlik artışı açısından optimum oran olarak görülmüştür. Bu değer üzerinde bor ilavesi sertlikte düşüşe neden olmuştur. Bu durum daha fazla borun ilavesinin yapı içerisinde

homojenlik sağlanamaması ve tane sınırlarında nitrür fazların yoğun olarak birikmesi böylelikle mukavemette düşüşe neden olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 6.22. 8620 Kalite çeliklere bor ilavesinin sertliğe etkisi.

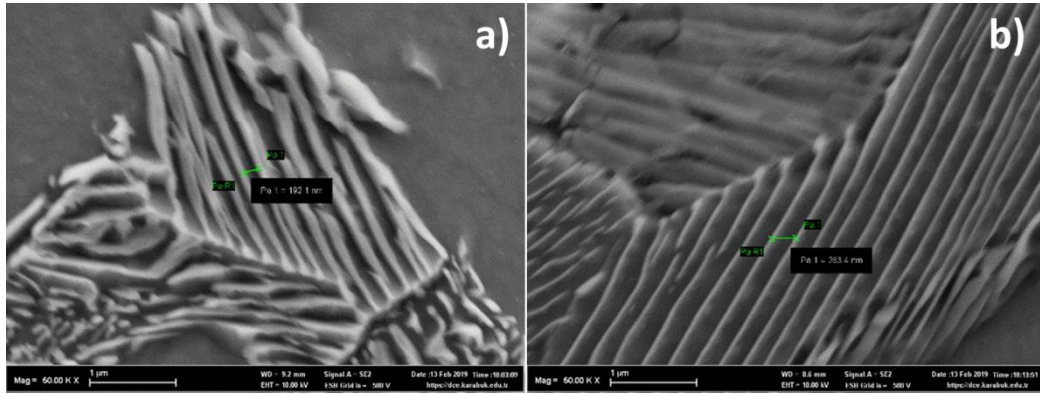
8620 serisi çelik numunelerinin sertlik sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, 1040 çeliklerinde olduğu gibi eser miktarda bor oranı sertliği olumlu yönde etkilemiştir. En fazla sertlik Şekil 6.22’ de görüldüğü üzere 8B48 numaralı 48 ppm oranında bor katkısı neticesinde gözlemlenmiştir. 3 ppm bor içeren alaşıma kıyasla yaklaşık %12 civarında sertlikte artış sağlanmıştır. Bor ilaveli çeliklerde, östenit tane sınırlarında bulunan bor, tane sınır enerjisini düşürmekte ve ferrit fazının çekirdeklenmesini geciktirmektedir. Böylelikle sertlikte artış görülmektedir [36].

Diğer yandan belli bir oranın üzerinde bor bulunması, karbürlü veya nitrürlü yapıların tane sınırlarında çökmesine neden olarak ferrit fazının çekirdeklenmesini de kolaylaştırmaktadır. Bundan dolayı bor miktarı açısından belirli bir eşik değeri vardır. Bu değer üzerinde sertlikte azalmalar görülebilmektedir [35,38,39].

Yapılan literatür taramasında 17 ppm bor ilavesine kadar bor miktarı ile sertliklerin arttığı gözlenmiştir. 4140 çeliklerine 17 ppm değerinin üzerinde bor katılmasıyla mikroyapıda daha ince tane boyutu ve iğnemsî morfoloji gözlemlenmesine rağmen sertlikte ani düşüş meydana gelmiştir [3].

Genel olarak bor miktarı çelik alaşımlarında hem literatüre göre hem de tezde yapmış olduğumuz deneysel çalışmalara göre sertlik artışını sağlamakta fakat belli bir oranın üzerinde tekrardan sertlikte azalmalara neden olmaktadır.

Bilindiği üzere perlitik çeliklerde lameller arası mesafenin düşürülmesi mekanik özellikleri pozitif yönde etkilemektedir [40]. En düşük ve en yüksek oranda bor içeren 1040 kalite çeliğin perlitik yapısına baktığımızda yüksek oranda ilave edilen bor, ferritin çekirdeklenmesini kolaylaştırdığından perlit yapıda lameller arası mesafeyi genişlettiği düşünülmektedir. Şekil 6.23' e baktığımızda yüksek oranda bor ilavesi sonrası daha geniş lameller arası mesafeye sahip perlit yapısı görülmektedir. Bunun sonucu olarak 30 ppm bor içeren 1B30 nolu numunede daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.



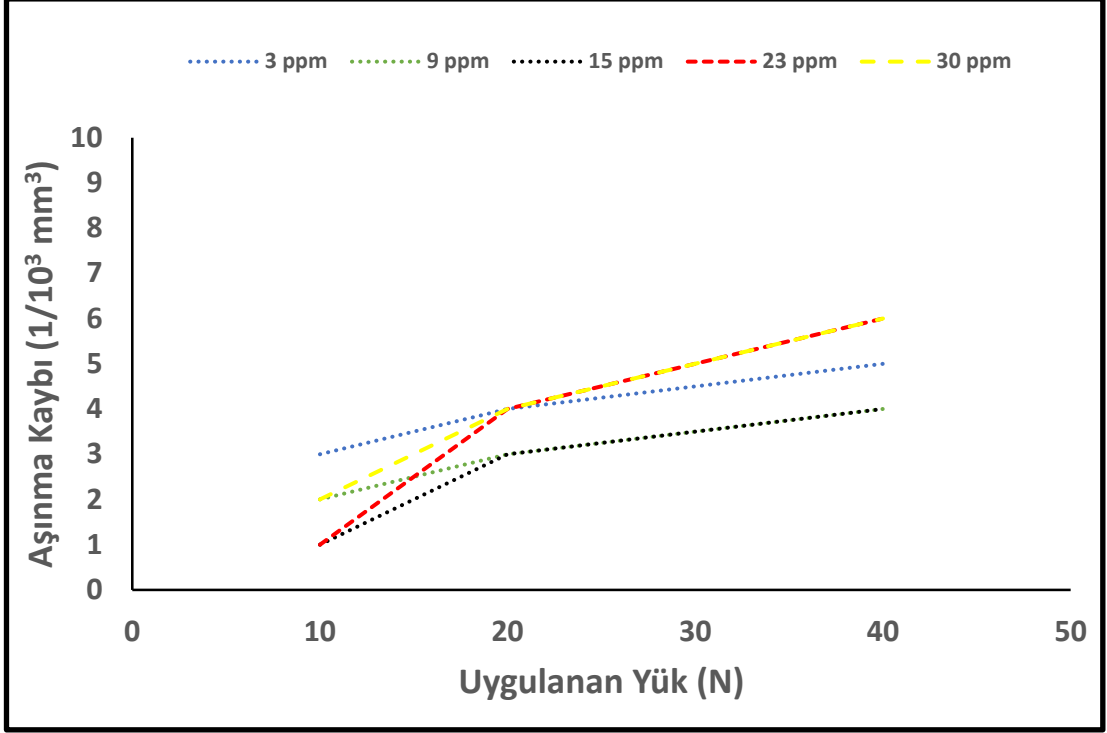
Şekil 6.23. (a) 1B3 ve (b) 1B30 nolu numuneye ait SEM görüntüsü.

## 6.5. KOROZİF AŞINMA TESTLERİ

Bor katkılı ve bor içermeyen numunelere %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde yapılan koroziif aşınma testlerinden elde edilen aşınma derinlikleri Mutitoyo profilometre cihazı ile elde edilmiş, 1040 ve 8620 serisi numuneler için kayıt altına alınmıştır.

Hesaplamalar maksimum derinlik esas alınarak yapılmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak aşınma kayıpları hacimsel olarak hesaplanmış ve bulgular 1040 kalite çelikler için Şekil 6.24' de verilirken 8620 kalite çelikler için Şekil 6.25' de verilmiştir.

Her ne kadar yüksek yüklerde ağırlık kayıpları bütün alaşımlarda birbirine yaklaşırsa da özellikle düşük yükte (10 N) bor ilavesi ile aşınma dayanımında ciddi oranlarda iyileşmeler sağlanmıştır. Bor ilavesi ile aşınma kaybının azalması borun çeliğin sertleşebilirliğine olan pozitif katkısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca bor ilavesi ile oluşan BN ve TiN gibi ikincil fazların aşınma dayanımını arttırdığı görülmektedir. 1040 kalite çelikleri değerlendirdiğimizde hem düşük hem de yüksek yüklerde en yüksek aşınma dayanımı 15 ppm bor ilavesi ile elde edilmiştir. Fakat yüksek yüklerde 15 ppm bor ilavesinin üzerinde bor ilavesi yapıldığında oluşan ikincil fazlar ferrit alanını genişlettiğinden sertlikte düşüslere neden olduğu gibi en yüksek aşınma kayıpları da 1B23 ve 1B30 nolu numunelerde gerçekleşmiştir. Yapıda bor ve titanyum ilavesi ile oluşan ikincil fazların yüksek yüklerde kopup yapıdan ayrılarak aşınma kayıplarını daha da arttırdığı düşünülmektedir. Aşınmanın genel bir kuralı olarak, malzemenin sertliğinin artması aşınma direncini artırır. Ancak bu sertlik artışı sonunda eğer malzeme gevrekleşiyorsa yüksek yüklerde aşınma direncini olumsuz yönde etkilenebilir. Yüksek yüklerde aşınma esnasında yapıda çökelen ikincil fazların ve partiküllerin yapıdan koparak ağırlık kaybını arttırdığı düşünülmektedir

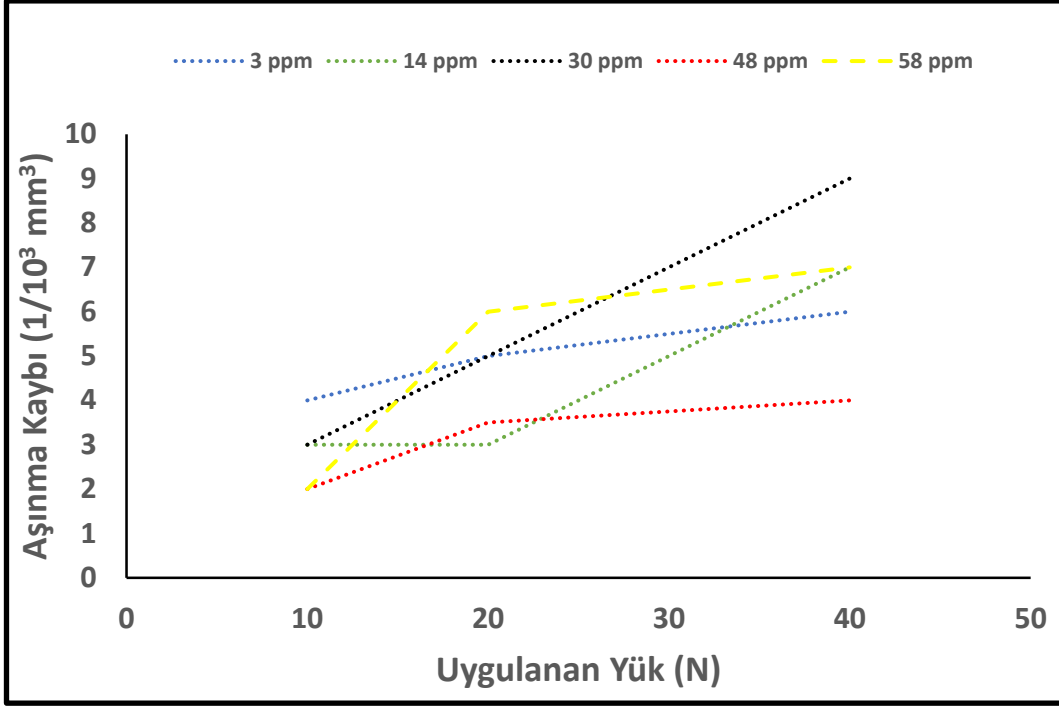


Şekil 6.24. 1040 kalite çelikler için uygulanan yüke bağlı olarak hacimce aşınma kayıpları.

8620 kalite çeliklerde ise bütün yükler için en düşük aşınma 48 ppm bor içeren 8B48 no'lu numunede ölçülmüştür. Ölçülen bu değerler sertlik değerleriyle de örtüşmektedir. Cheng vd. çeliklerde korozyonu pasif bir demir oksit tabakasının oluşumu ve sonrasında oyuklaşmayla bu tabakanın tahrip edilmesi şeklinde açıklamaktadırlar [41].

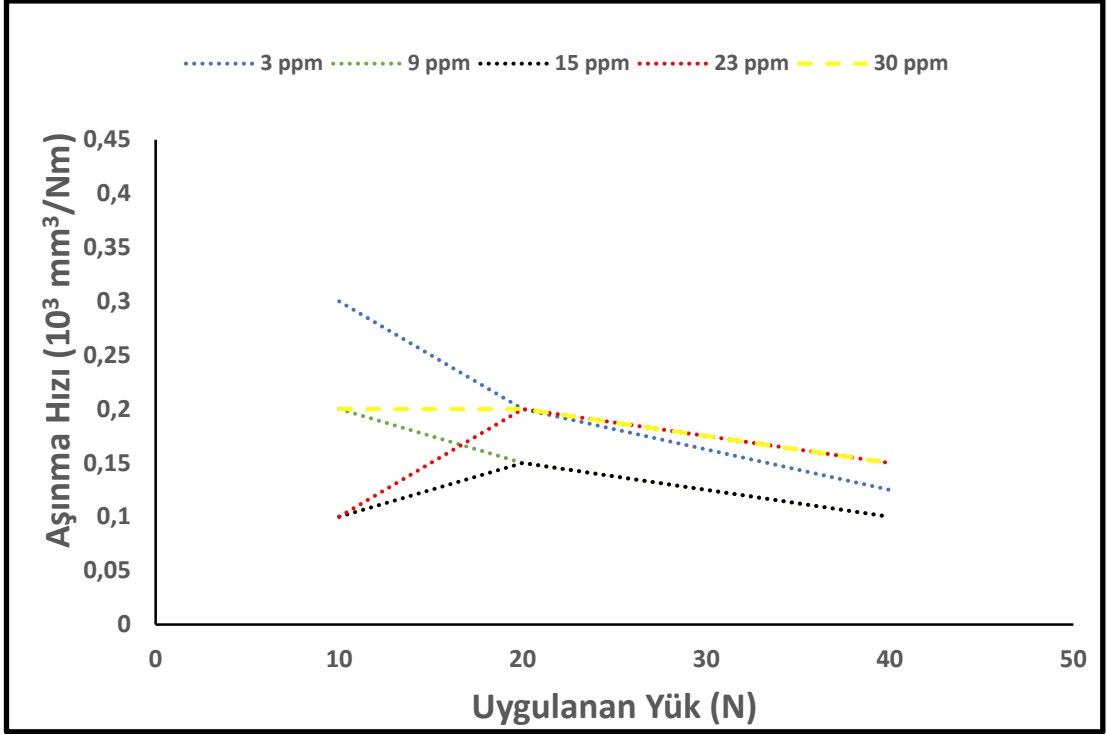
Düşük yüklerde NaCl çözeltisi içerisinde çelikte meydana gelen oksit tabakası aşınma etkisiyle tahrip olmazken yüksek yüklere çıkıldığında aşınma kayıplarda büyük oranlarda artmıştır. Fakat en düşük oranda bor içeren alaşımda bu artış lineer gerçekleşirken yüksek oranda bor içeren numunelerde özellikle 20 N kayma yükünden sonra aşınma kayıpları çok hızlı artmıştır. Bunun sebebi bor ilavesi ile oluşan yeni ikincil fazların ferrit matrisle korozif çözelti içerisinde galvanik ikili oluşturması ve bu fazların etrafını korozyona uğratarak serbest hale gelmesi sonucunda yüksek yüklerde bu partiküllerin yapıdan ayrılıp aşınma kayıplarını daha yüksek oranda arttırmaları olarak düşünülmektedir.





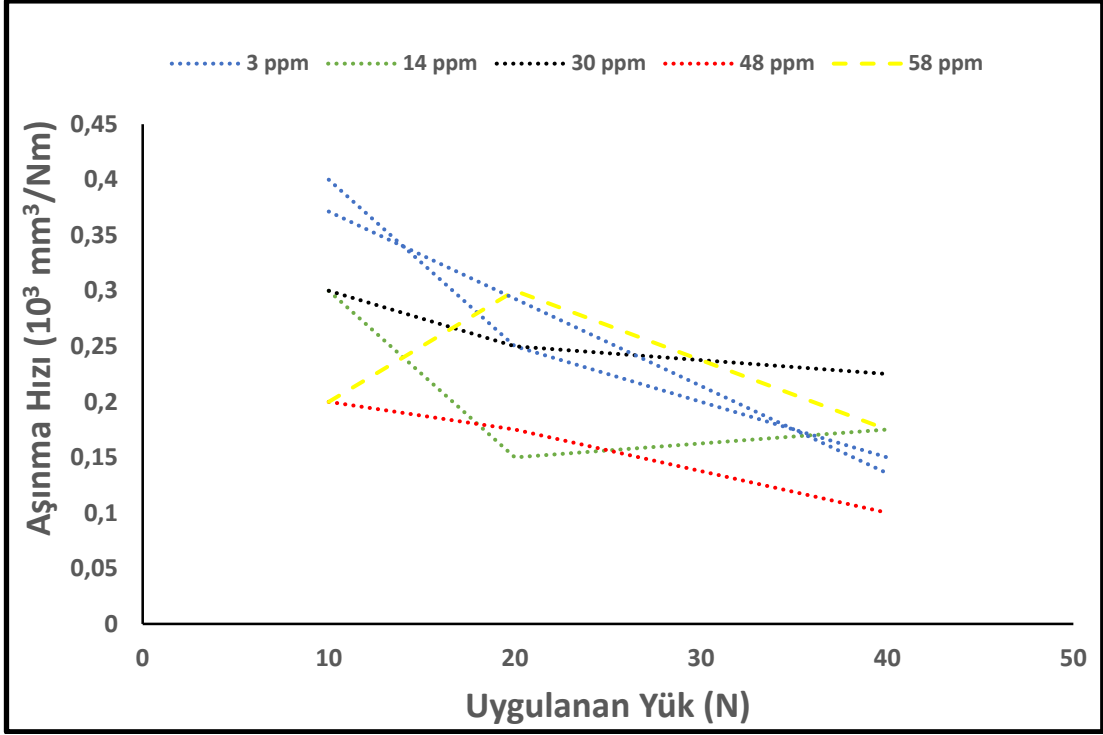
Şekil 6.25. 8620 kalite çelikler için uygulanan yüke bağlı olarak hacimce aşınma kayıpları.

Bor içermeyen numunelerde daha fazla aşınma kayıpları görülürken 1040 kalite çeliklerde 15 ppm ve 8620 kalite çeliklerde 48 ppm bor katkısı aşınma hızını düşürmüştür. Bu sonuç bor katkısının yağlayıcı bir etki gösterdiğini kanıtlamaktadır. Genel aşınma direnç mekanizması göz önünde bulundurulduğunda, borun yüzeydeki dislokasyon hareketlerine engel olması ve ferrit faz miktarının yüzeyde daha az olması sebebiyle aşınma direnci gelişmiştir. Ayrıca kayma yüzeylerindeki sürtünmenin bor ilavesiyle azaltılması malzemede daha az aşınma derinliğine neden olmuştur. Tuzlu su çözeltisi de numune ile bilye arasındaki sürtünmeyi azaltmıştır. Numune yüzeyinde korozif ortamla temas halinde bulunacak şekilde kayda değer herhangi bir korozyon mekanizması gerçekleşmemiştir.



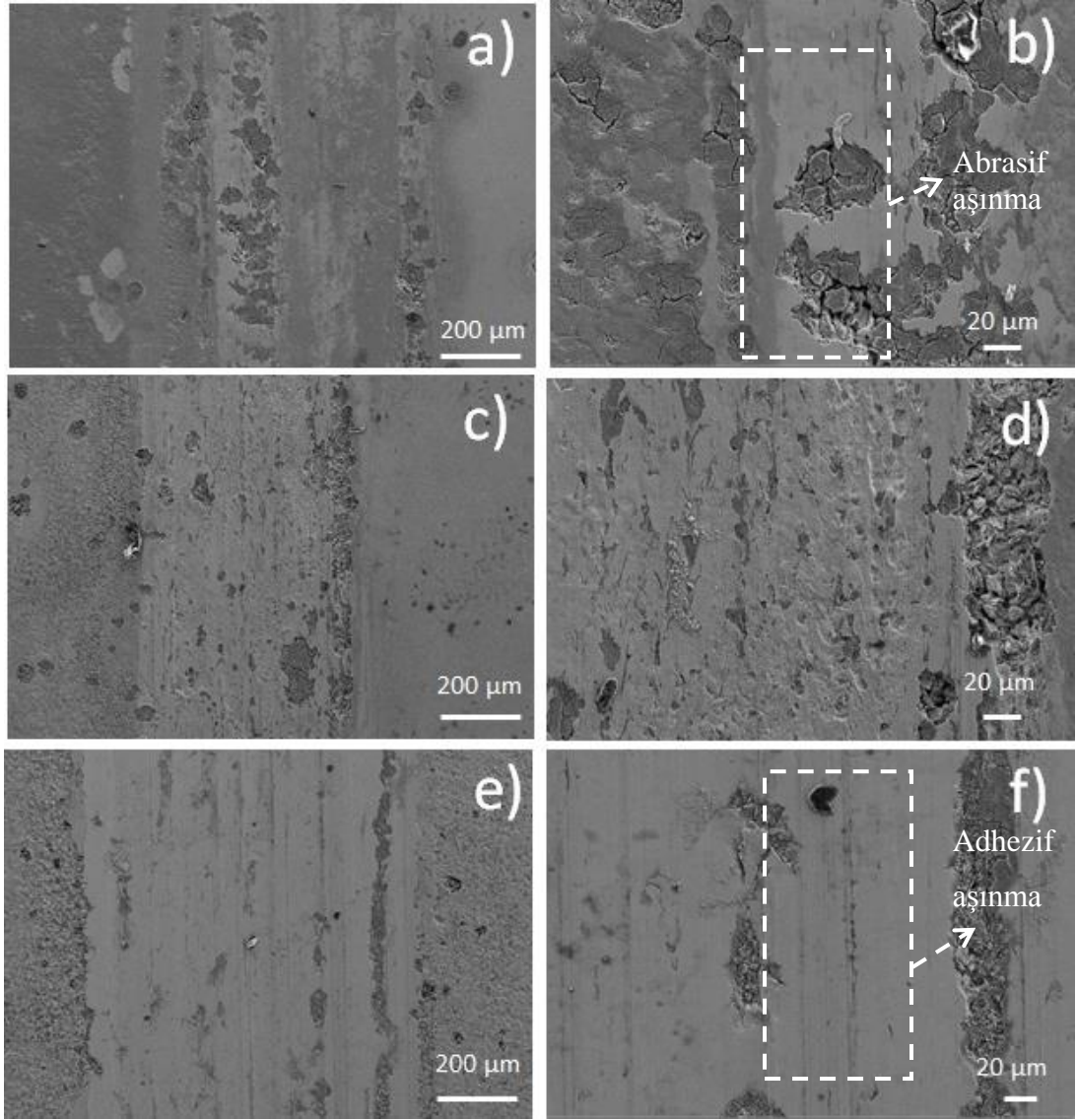
Şekil 6.26. 1040 kalite çelikler için Archard yasası dikkate alınarak elde edilen yüke bağlı aşınma hızı değerleri.

Archard yasasına göre bir malzemenin sertliği ne kadar yüksek olursa yüzeydeki aşınma kaybı daha az olur ve aşınma direnci daha yüksek olması beklenir. Sertlik sonuçları da göz önünde bulundurulduğunda aşınma performansları ve sertlik direnci bor ilavesiyle gelişmiş fakat belli bir eşik değeri aşıldığında aşınma performansının olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Sonuç olarak, aşınma direncinin artması ve aşınma derinliğinin daha az olması yapı içerisindeki yağlayıcı özellik gösterebilen bor ilavesinin yüzey sertliğini önemli bir ölçüde arttırmasına ve numune ile karşıt malzeme arasındaki temas alanının azaltılmasına bağlıdır.

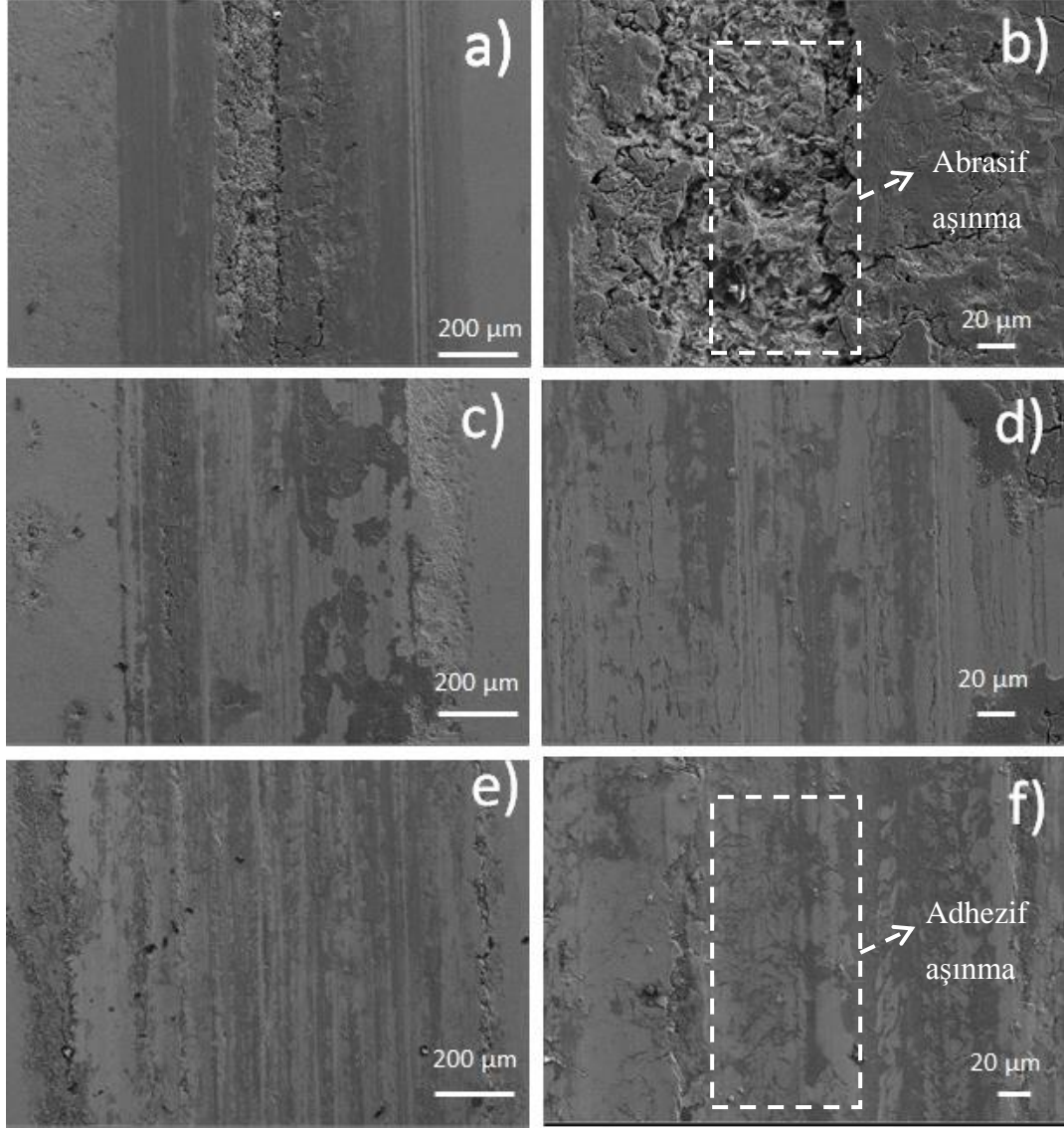


Şekil 6.27. 8620 kalite çelikler için Archard yasası dikkate alınarak elde edilen yüke bağlı aşınma hızı değerleri.

Şekil 6.28’de 3 ppm ve Şekil 6.29’de 30 ppm oranında B ilave edilmiş numunelerin farklı yükler altındaki aşınmış yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Numunelerin genel olarak daha sert bir yüzeye karşı abrasif bir aşınmaya ve plastik deformasyona maruz kaldıkları görülmektedir. Aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntülerine baktığımızda düşük yüklerde korozyonun daha aktif olduğu görülmekte abrasive aşınmaya ilaveten korozif aşınma görülmektedir. Yüksek yüklerle baktığımızda ise daha çok adhesive aşınma karakteristiği görülmektedir. Şöyle ki yüksek yüklerde aşınma iz genişliği ve derinliği artarken aşınma neticesinde kopan malzemelerin yüksek yük etkisinde yüzeye sıvandığı tespit edilmiştir. Eşik değerin üzerinde yapılan bor ilavesi sonucunda yüzeyde görülen oyuklanmaların da arttığı görülmüştür.



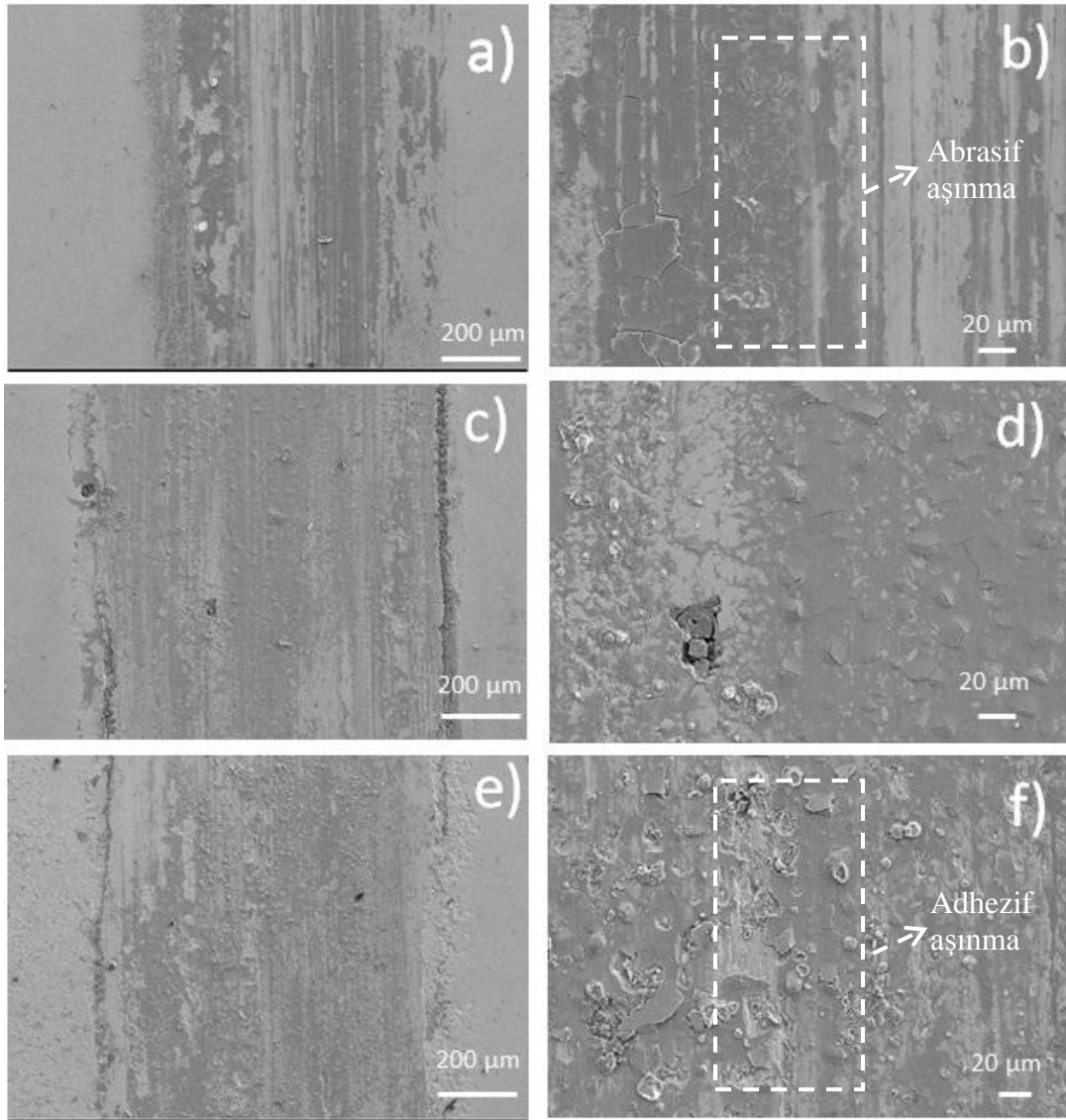
Şekil 6.28. 1B3 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N-1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000 X.



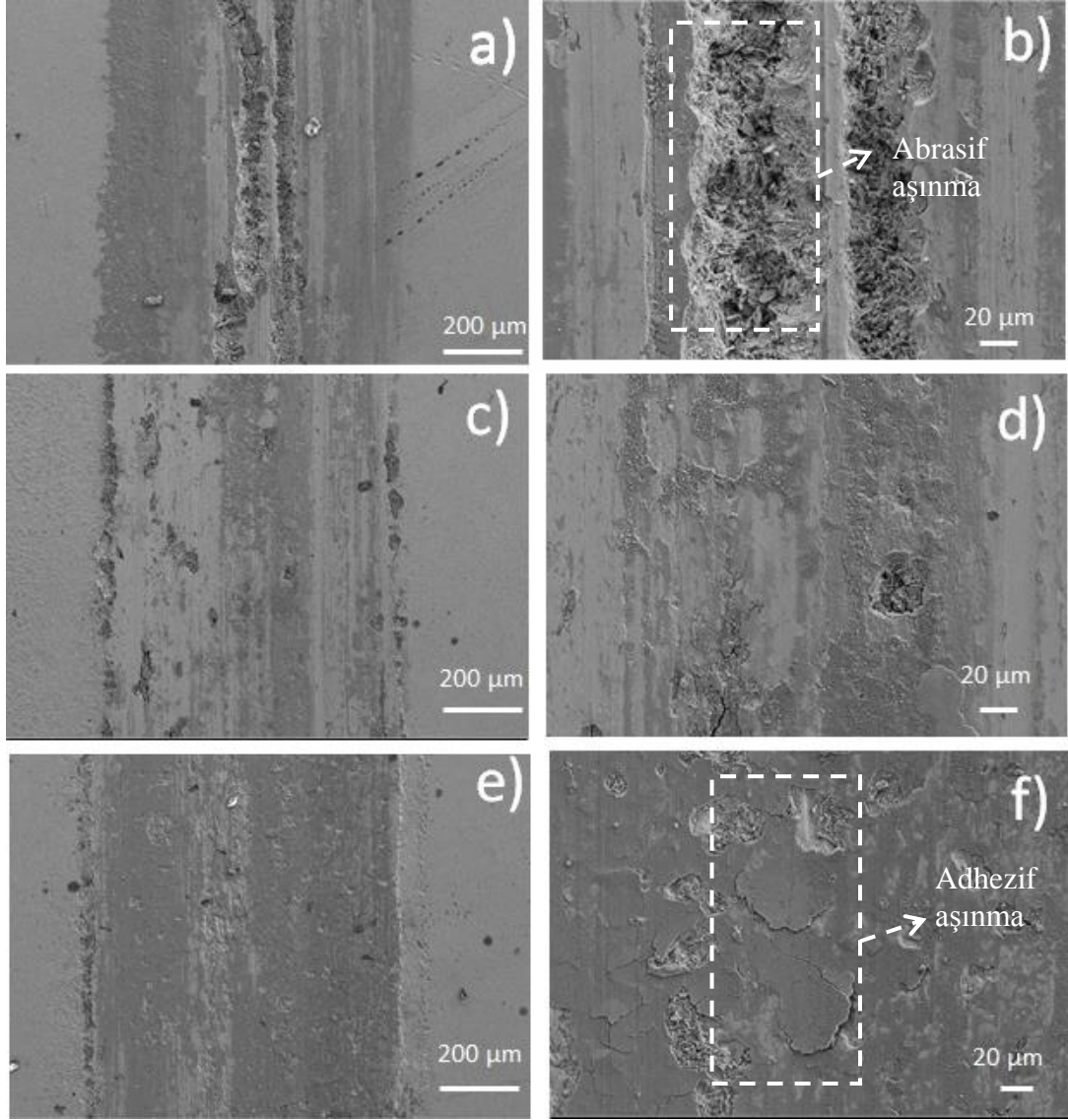
Şekil 6.29. 1B30 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N-1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000X.

8620 kalite çeliklere baktığımızda Şekil 6.30 8B3 nolu numuneye ve Şekil 6.31 8B58 nolu numuneye ait korozif aşınmış yüzey SEM fotoğraflarını içermektedir. 1040 kalite çeliklerde olduğu gibi eşik değerinin (48 ppm) üzerinde ilave edilen bor sertlik değerlerinde düşüşe sebep olduğu gibi aşınma dayanımlarını da negatif yönde etkilemektedir. 8B58 nolu 58 ppm bor ilavesi yapılmış numunede daha derin adhesiv aşınma görülürken 3 ppm bor içeren 8B3 nolu numune daha düşük aşınma derinlikleri görülmektedir.

Yüke bağılı olarak baktığımızda düşük yüklerde korozif ortamın etkisi daha net olarak görülmekte korozif ortamın etkisiyle yüzeye çizikler ve oyuklanmalar şeklinde abrasif aşınma mekanizması hâkim olduğu tespit edilmiştir. Yüksek yüklerde ise gerek karşı malzemedan kopan gerekse malzemedan kopup tekrardan yükün etkisiyle yüzeye yapışmış bölgeler gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek yüklerde daha çok adhezif aşınma karakteristiğinin görüldüğünü göstermektedir.



Şekil 6.30. 8B3 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N- 1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000X.



Şekil 6.31. 8B58 No'lu numuneye ait aşınma SEM görüntüleri (a) 10N-250X, (b) 10N-1000X, (c) 20N-250X, (d) 20N-1000X, (e) 40N-250X, (f) 40N-1000X.

## BÖLÜM 7

### GENEL SONUÇLAR

Ticari 1040 ve 8620 kalite imalat çeliklerine farklı oranlarda bor ilavesi yapılarak vakumsuz indüksiyon ocağında alaşımla işlemi gerçekleştirilmiş ve üretilen alaşımların mikroyapı incelemeleri, sertlik ve metal-metal korozif aşınma deneylerinden aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir.

1. Üretilen alaşımlarda bor ve titanyum ilavesi sonrasında SEM'in EDX dedektörü ile BN, TiC ve TiN fazlarının oluşumu tespit edilmiştir. Artan bor ilavesi ile oluşan bu fazların hacminin ve miktarının arttığı gözlemlenmiştir.
2. 1040 kalite çeliklere 15 ppm bor ilavesi sonrasında alınan sertlik değerlerinde %20 oranında bir artış kaydedilmiştir. 8620 alaşımına yapılan 48 ppm bor ilavesi ile %12 seviyelerinde bir artış gözlenmiştir.
3. Aşınma yükünün artması ile ağırlık kayıplarında artış gözlenmiştir. 1040 kalite çelikte eşik değere (15 ppm) kadar ilave edilen bor ile uygulanan bütün yüklerde aşınma dayanımı artış gösterirken, 8620 kalite çeliklerde sadece düşük yükte (10N) bu durum gözlenmiştir. 8620 kalite çeliklerde yüksek yüklerde (20-40N) yine en yüksek aşınma dayanımını 48 ppm bor içeren numune sağlarken diğer bor ilaveli numuneler daha fazla aşınma kaybına uğramışlardır.
4. Aşınma sonrası SEM fotoğraflarına baktığımızda düşük yüklerde korozif ve abrasif aşınma mekanizması görülürken yüksek yüklerde daha çok adhesiv aşınma mekanizması görülmüştür.



## KAYNAKLAR

1. Aydın, E., "Isıl işlem parametrelerinin bor katkıli östenitik çelik üzerine etkisi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
2. Çarboğa, C., "Düşük karbonlu çeliklere bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi", *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).
3. Aksoy, T., "4140 çeliğinin korozif aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
4. Berns, H. and Theisen, W., "Ferrous Materials: Steel and Cast Iron", *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Leipzig, (2008).
5. Arman, M. A., "Farklı oranlarda mikro alaşım bor içerikli AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışının araştırılması", *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2017).
6. Durand-Charre, M., "Microstructure of Steels and Cast Irons", *Springer-Verlag*, Berlin, 417 (2004).
7. Ata Esener, P., "Farklı oranlarda bor ilave edilmiş AISI 4140 (42CrMo4) ıslah çeliğinin ısıl işlemi ve karakterizasyonu", *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2017).
8. Hosford, W. F., "Iron and Steel", *Cambridge University Press*, New York, (2012).
9. Cain, T., "Hardening, Tempering and Heat Treatment : For Model Engineers", *Argus Books*, 124 (1984).
10. Taşdöğen, H., "Toz metalurjisi yöntemiyle hazırlanan çelik malzemede mikroyapı ve darbe tokluğunun incelenmesi", *Necmetin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
11. Mehmet Akif Erden, "Toz Metalürjisi Yöntemiyle Üretilen Mikroalaşım Çeliklerinin Mikroyapı Mekanik Özellik İlişkisinin Araştırılması", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
12. Jia, Q., Guo, W., Wan, Z., Peng, Y., Zou, G., Tian, Z., and Zhou, Y. N., "Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar joints between QP and boron alloyed martensitic steels", *Journal Of Materials Processing Technology*, (2018).

13. Kahraman, N., Gülenç, B., and Akça, H., "Ark kaynak yöntemi ile birleştirilen östenitik paslanmaz çelik ile düşük karbonlu çeliğin mekanik özelliklerinin incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (2): (2013).
14. Michel Degner, Reinhard Fandrich, Gerhard Endemann, Jean Theo Ghenda, Karsten Letz, Hans Bodo Lungen, Ingo Steller, Joachim Wieland, Achim Winkhold, Ralf Bartos, R. W., "Steel Manual", *Steel Institute VDEh*, Düsseldorf, 189 (2007).
15. Baş, B., "Sıcak iş takım çeliklerinin yüksek sıcaklık darbeli kayma aşınma davranışının incelenmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
16. Ramazan, K. and Emre, H. E., "Gaz Metal Ark Kaynaklı Zırh Çeliklerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Teknolojileri Ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 1 (1): 15–23 (2018).
17. Madhusudhan Reddy, G. and Mohandas, T., "Ballistic performance of high-strength low-alloy steel weldments", *Journal Of Materials Processing Technology*, 57 (1–2): 23–30 (1996).
18. Akınay, Y., "Twip çeliklerinin mekanik ve mikroyapı özelliklerine alaşım elementlerinin etkisi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
19. Hall, J. N. and Fekete, J. R., "Steels for Auto Bodies: A General Overview", *Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications*, *Elsevier Ltd*, 19–45 (2016).
20. Hayat, F., "Trip çeliklerinin otomotiv endüstrisinde kullanımının incelenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25 (4): 701–712 (2010).
21. Ince, S., Filazi, A., and Yurdakok-Dikmen, B., "Boron", *Reproductive and Developmental Toxicology*, *Elsevier*, 521–535 (2017).
22. Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, "Bor Sektör Raporu", Ankara, (2018).
23. Peruzzo, M., Beux, T. D., Ordoñez, M. F. C., Souza, R. M., and Farias, M. C. M., "High-temperature oxidation of sintered austenitic stainless steel containing boron or yttria", *Corrosion Science*, 129 (September): 26–37 (2017).
24. Frydman, S. and Letkowska, B., "Properties of boron steel after different heat treatments", *IX International Congress "Machines, Technologies, Materials" 2012*, 72–74 (2012).
25. Kim, H. J., Jeon, S. H., Yang, W. S., Yoo, B. G., Chung, Y. D., Ha, H. Y., and Chung, H. Y., "Effects of titanium content on hydrogen embrittlement susceptibility of hot-stamped boron steels", *Journal Of Alloys And Compounds*, 735: 2067–2080 (2018).

26. Kim, D., Jeon, Y. J., Choi, H. S., Kang, J., Kim, Y. D., Heo, Y. M., Kim, J. D., and Won, S. T., "An Investigation of the trimming of boron nitride steel (22MnB5) during the die-quenching process", *Procedia Engineering*, 207: 1540–1545 (2017).
27. Günen, A., "Nano bor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan östenitik paslanmaz çeliğin mekanik özellikler ve korozyon davranışının araştırılması", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
28. Er, Ö., "Bor katkılı 316L paslanmaz çeliklerin korozyon davranışlarının elektrokimyasal yöntemle incelenmesi", *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
29. Demirel, Ç., "AISI 8640 ve GS 60 çelik malzemelerin abrasif aşınma ve korozyon davranışına borlama işleminin etkisi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
30. Köseli, B., "Bor içerikli elektrotlarla düşük karbonlu çelik yüzeylerinin kaplanması ve aşınma direncinin incelenmesi", *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).
31. Turkan, N., "Bor aşıyımli çelikler ve yüksek zorlamalara karşı kullanılan bor alaşıyımli yeni semantasyon çelikleri", *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 3 (11): 743–748 (1963).
32. Llewellyn, D. T. and Cook, W. T., "Metallurgy of boron-treated low-alloy steels", *Metals Technology*, 1 (1): 517–529 (1974).
33. Taylor, K. A. and Hansen, S. S., "The boron hardenability effect in thermomechanically processed, direct-quenched 0.2 Pct C steels", *Metallurgical Transactions A*, 21 (6): 1697–1708 (1990).
34. Fountain, R. W. and Chipman, J., "Solubility and Precipitation of Boron Nitride in Iron-Boron Alloys", *Transactions Of The Metallurgical Society Of AIME*, 224: 599–606 (1962).
35. Karlsson, L., Nordén, H., and Odelius, H., "Overview no. 63 Non-equilibrium grain boundary segregation of boron in austenitic stainless steel—I. Large scale segregation behaviour", *Acta Metallurgica*, 36 (1): 1–12 (1988).
36. Morral, J. E. and Cameron, T. B., "A model for ferrite nucleation applied to boron hardenability", *Metallurgical Transactions A*, 8 (11): 1817–1819 (2007).
37. Aksoy, A., "Çelik Malzemelerde Hasar Analizi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
38. Doane, D. V and Kirkaldy, J. S., "Hardenability Concepts with Applications to Steel: Proceedings of a Symposium Held at the Sheraton-Chicago Hotel, October 24-26, 1977", *Metallurgical Society Of AIME*, (1978).

39. Werner, D. H., "Boron and Boron Containing Steels", 2nd editio. Ed., *Woodhead Publishing Ltd*, 218 (1995).
40. Özcan, M. M., "Mikroalaşımli ve sementasyon çeliklerinin yorulma davranışlarının incelenmesi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
41. Cheng, Y. F., Wilmott, M., and Luo, J. L., "Role of chloride ions in pitting of carbon steel studied by the statistical analysis of electrochemical noise", *Applied Surface Science*, 152 (3): 161–168 (1999).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Ferhat SARIÇAM, 1984 yılında Karabük'te doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2004 yılında Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2008 yılında mezun oldu. 2010-2017 yılları arasında kamuda çalışmış olup, 2017 yılında Karabük Üniversitesinde çalışmaya başladı ve halen görev yapmaya devam etmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Demir Çelik Enstitüsü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK  
Tel : (541) 611 6596  
E-posta : ferhatsaricam@karabuk.edu.tr