

**CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BORLAMA İŞLEMİNİN ÇELİKLERİN YÜZEY KALİTESİ VE AŞINMA  
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Mühendisi Tarkan AYTER**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28 Ağustos 2005**

**Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Eylül 2005**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Salim ŞAHİN (CBÜ)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Doç.Dr. Cevdet MERİÇ (CBÜ)**

**Yrd.Doç.Dr. İsmail ÖZDEMİR (DEÜ)**

**MANİSA 2005**

## ÖZET

Bu çalışma için kullanılan yapı malzemeleri AISI 1020, AISI1040 ve AISI 2344 çelikleridir. AISI 1020 ve AISI 1040 çelikleri makine konstrüksiyonunda geniş kullanım alanı bulmaktadır. AISI 2344 çeliği ise sıcak iş takım çeliği olarak kullanılmaktadır.

Borlama işlemi için her çelik gurubundan 30 mm çapında ve 4.5 mm et kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. Numuneler üzerine farklı yüzey pürüzlülükleri elde etmek için; 80'lik, 150'lik, 240'lık, 600'lük, 1000'lik su zımparası ve keçe ile aşınma işlemi uygulanmıştır.

Borlama işlemi; katı borlama olarak, Ekabor I tozu ile 900°C'de 2-4 ve 6 saat olarak yapılmıştır. Bu borlama işlemi çeliklerle Ekabor I tozunun temas ettiği çelik kutular içerisinde, elektrik rezistanslı fırınlar yardımıyla yapılmıştır.

Numunelerin borlama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo profilometre ile ölçülmüştür. Borlanan numuneler özel bir teçhizat sayesinde 10'ar dakikalık çevrimler halinde; 10-18 ve bazende 30 kez aşındırılmıştır. Her bir çevrim sonunda numunenin yüzey pürüzlülüğü tekrar ölçülmüş, ve aşınma sonrası ağırlık kaybıda tesbit edilmiştir.

Borlama ve aşınma işlemlerinden sonra yüzey yapısı SEM cihazıyla fotoğraflanmıştır. Numunenin oluşturduğu tabaka fazını belirleyebilmek amacıyla XRD analizleri yaptırılmıştır.

Numunelerin mikro sertlik değerleri laboratuvar ortamında ölçülmüştür.

Borlanan numunelerin mikroyapı fotolarının alınabilmesi için, numuneler hassas aşınma işlemlerine tabi tutulmuş ve yüzeyleri dağlanmıştır. Mikroyapı fotoğrafları Hunt Wetzlar optik mikroskobuyla fotoğraflanmıştır. Malzeme üzerinde oluşan bor tabakası genişliğide yine dijital optik mikroskobu yardımıyla ölçülmüştür.

Deneyle birçok sonuç verdi. Borlama sonrası yüzey pürüzlülüğü değişir. Genellikle borlama süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğüde artmaktadır. Benzer parametrelere sahip numunelerde; düşük pürüzlü başlangıç yüzeyine sahip numunelerin, borlama sonrası değişimi, yüksek pürüzlü başlangıç yüzeyine sahip numunelerden fazladır. Boyut değişimi ve bor tabakası borlama işlemiyle birlikte artar. AISI 1040 çeliğinin (C) miktarı AISI 1020 çeliğinden fazladır ve AISI 2344 çeliğinin alaşım oranı AISI 1040 tan fazladır. Bu nedenle AISI 1020 çeliği, AISI 1040 çeliğine oranla daha kalın ve rijit bor tabakası oluşturmaktadır. Aynı şekilde de AISI 1040 çeliği, AISI 2344 çeliğinden daha iyi sonuçlar vermektedir. Borlama sonrası yüzey pürüzlülüğü yüksek olan numuneler aşınma deneyi sonucunda daha fazla aşınmıştır ve yine daha fazla ağırlık kaybına uğramıştır.

## ABSTRACT

The substrate materials used for this study were AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2344 steels. AISI 1020 and AISI 1040 steels are widely used in different areas of machine constructions. AISI 2344 steels are used as hot work tool steel.

30 mm in diameter and 4mm in thickness samples from all steels are prepared for boronizing process. Different surface roughness has been obtained by using: 80, 150, 240, 600, 1000 emery paper and to with wet grinding process.

Boronizing was performed in a solid medium consisting of Ekabor I powders at 900°C for 2-4 and 6 hours. Test materials to be boronized which contact with Ekabor I powders were placed in a steel container and then transferred to an electrical resistance furnace.

The surface roughness of the samples was measured before and after boronizing using a Mitutoya profilometer. The samples are grinded by a special equipment; for 10 minutes and 10-18 or 30 times. After the process, the surface roughness are measured by means of the profilometer and the weight loss are also determined.

The surfaces of the samples are photographed by SEM equipment. The boron layer are analyzed by XRD equipment

The micro hardness from the samples are measured in laboratory.

The microstructures were photographed by using a Hunt Wetzlar optical microscope, for the photograph process the surface are etched with nital solution.

Experiments give lots of results. The surface roughness change after boronizing. Generally the surface roughness increase with the boronizing process time. In same parameters samples; the sample with the less start surface roughness give more change after boronizing the sample with the high start surface roughness. Dimension change and boron layer increase after boronizing process. AISI 1040 steels (C) quantity is more than AISI 1020 steel and AISI 2344 steels alloy quantity is more than AISI 1040 steel. Because of this AISI 1020 steel gives thicker and more rigid boron layer than AISI 1040 steel. AISI 1040 steel gives better results from AISI 2344. The samples with is more roughness of surface after boronizing, more wear and loss more weight than the other samples.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

<b>İÇİNDEKİLER</b>	I
<b>ŞEKİL ve RESİMLER LİSTESİ</b>	III
<b>GRAFİK VE TABLO LİSTESİ</b>	VIII
<b>ÖZET</b>	IX
<b>ABSTRACT</b>	X
<b>TEŞEKKÜR</b>	XI
<b>1. GİRİŞ</b>	1
<b>2. BOR ELEMENTİ</b>	3
2.1. Bor Elementinin Özellikleri	4
2.2. Bor Elementinin Dünyada Bulunma Oranı	6
2.3. Borun Tarihçesi	8
2.4. Bor Üretimi	9
2.5. Bor-Demir'in Bileşikleri	10
2.6. Borun Kullanım Alanları	11
<b>3. BORLAMA</b>	13
3.1. Borlama İşlemi	14
3.2. Borlama Yöntemleri	16
3.2.1 Katı Borlama Yöntemi	16
3.2.2. Sıvı Borlama Yöntemi	18
3.2.3. Gaz Borlama Yöntemi	19
3.2.4. Plazma Borlama Yöntemi	20
3.3. Borlanabilen Malzemeler	21
3.5. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi	21
<b>4. BORÜR TABAKASI</b>	24
4.1. Borür Tabakasının Gelişimi	24
4.2. Borür Tabakası Çeşitleri	24
4.3. Borür Tabakası Yapısı	26
4.4. Geçiş Bölgesi	27
4.5. Borür Tabakasının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	28
4.5.1. Tabaka Kalınlığı	28
4.5.2. Sertlik	29
4.5.3. Aşınma	31
4.5.4. İç Gerilmeler	33
4.5.5. Korozyon Direnci	35

<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	36
5.1. Deney Amacı	36
5.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler	36
5.3. Deneye Başlangıç ve Numunelerin Adlandırılması	37
5.4. Borlama İşlemi	40
5.5. Borlama Öncesi ve Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü	41
5.6. Boyut Değişimi	43
5.7. Borlama Sonrası Mikroyapı ve XRD Diyagramları	44
5.8. Mikrosertlik	55
5.9. Aşınma Deneyi	58
5.9.1 Aşınma Deney Sonuçları	62
5.9. SEM Fotoları	87
<b>6. GENEL SONUÇLAR</b>	94
<b>KAYNAKLAR</b>	96

## ŞEKİL ve RESİM LİSTESİ

### Sayfa No

<b>Şekil 2.1:</b> Siyah-Gri, beta Boru; 5 değişik bor yapısından sadece birisi	3
<b>Şekil 2.2:</b> Fe-B ikili Denge Diyagramı	4
<b>Şekil 2.3:</b> Borun kafes yapısı	5
<b>Şekil 2.4:</b> Çift renkli Turmalin (Elbait) Stak Nala/Pakistan	7
<b>Şekil 2.5:</b> Soldan sağa doğru Bor'un kaşifleri: Joseph Gay-Lussac, Louis Jacques Thénard ve Sir Humphrey Davy)	9
<b>Şekil 2.6:</b> Bor asidi ve Magnezyumdan elde edilmiş amorf yapıdaki bor	10
<b>Şekil 3.1.1:</b> Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması	15
<b>Şekil 3.1.2:</b> Fe <sub>2</sub> B kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu (Quing'en and Zaizhi, 1983).	16
<b>Şekil 3.1.3:</b> FeB kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu (Badini et al,1987).	16
<b>Şekil 3.2.1.1:</b> Borlama Tozu	17
<b>Şekil 3.2.1.2:</b> Katı (paket) borlama işleminin şematik görünüşü	17
<b>Şekil 3.2.2:</b> Sıvı Borlama Ünitesi	18
<b>Şekil 3.2.3.:</b> Gaz borlama ünitesi	19
<b>Şekil 3.4.1.1:</b> Alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi	22
<b>Şekil 3.4.1.2:</b> 1000 °C'de, 25 saat amorf bor ile borlanmış %1 C'lu çelikte yüzeyden itibaren karbon miktarının değişimi	22
<b>Şekil 4.2.1:</b> Borür tabakasının sınıflandırılması	25
<b>Şekil 4.3.1:</b> Tek fazlı ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü	26
<b>Şekil 4.5.1:</b> Ekabor-1 ile borlanmış Ck 45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi	29
<b>Şekil 4.5.2.1:</b> Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları	30
<b>Şekil 4.5.2.2:</b> 42CrMo <sub>4</sub> çeliğinde farklı yüzey tabakalarının dinamik sıcaklık sertlikleri	31
<b>Şekil 4.5.3.</b> Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları	33
<b>Şekil 4.5.4:</b> Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakasındaki iç gerilme dağılımı	34
<b>Şekil 4.5.5:</b> Ck 45 çeliğinin 56°C'de, bazı asitlere karşı korozyon direnci	35
<b>Şekil 5.3.1.</b> Su Zımparası makinesi	37
<b>Şekil 5.3.2.</b> Pürüzlülük Ölçüm Cihazı	40
<b>Şekil 5.4.1</b> Borlama Kabının Fırından Çıkartılması	40
<b>Şekil 5.4.2</b> Borlama Kabının Ortam sıcaklığında Soğutulması	41
<b>Şekil 5.5.1.</b> AISI 1020 çeliğin yüzey pürüzlülüğü değişimi	41
<b>Şekil 5.5.2.</b> AISI 1040 çeliğin yüzey pürüzlülüğü değişimi	42
<b>Şekil 5.5.3.</b> AISI 2344 çeliğin yüzey pürüzlülüğü değişimi	42
<b>Şekil 5.6.1.</b> Borlama Süresiyle Tabaka Kalınlığının Değişimi	43
<b>Şekil 5.7.1 ve 2 :</b> 1211x10 ve 1211x40 'lık büyütülmüş halleri	44
<b>Şekil 5.7.3:</b> 1262x40 'lık büyütülmüş hali	45

<b>Şekil 5.7.4-5 ve 6</b> : 1411x20, 1411x40 ve 1451x20 'lik	45
<b>Şekil 5.7.7 ve 8</b> : 1611x20'lik büyütme ve 1611x40'lık büyütme	46
<b>Şekil 5.7.9 ve 10</b> : 2231x10 ve 2231x20 'lik büyütme	46
<b>Şekil 5.7.11 ve 12</b> : 2261x10 ve 2261x20 'lik büyütülmüş	47
<b>Şekil 5.7.13 ve 14</b> : 2411x10 ve 2411x20 'lik büyütülmüş	47
<b>Şekil 5.7.15 ve 16</b> : 2461x10 ve 2461x20 'lik büyütülmüş	47
<b>Şekil 5.7.17 ve 18</b> : 2611x20 ve 2611x40 'lık büyütülmüş	48
<b>Şekil 5.7.21 ve 22</b> : 2661x20 ve 2661x40 'lık büyütülmüş	48
<b>Şekil 5.7.23 ve 24</b> : 3211x20 ve 3211x40 'lik büyütülmüş	49
<b>Şekil 5.7.25 ve 26</b> : 3261x40 ve 3261x20 'lik büyütülmüş	49
<b>Şekil 5.7.27 ve 28</b> : 3411x40 ve 3411x100 'lük büyütülmüş	50
<b>Şekil 5.7.29 ve 30</b> : 3461x40 ve 3461x100 'lük büyütülmüş	50
<b>Şekil 5.7.31 ve 32</b> : 3611x40 ve 3611x100 'lük büyütülmüş	51
<b>Şekil 5.7.33 ve 34</b> : 3661x40 ve 3661x100 'lük büyütülmüş	51
<b>Şekil 5.7.35</b> : 1262 nolu numunenin XRD analizi	52
<b>Şekil 5.7.36</b> : 1661 nolu numunenin XRD analizi	52
<b>Şekil 5.7.37</b> : 2261 nolu numunenin XRD analizi	53
<b>Şekil 5.7.38</b> : 2661 nolu numunenin XRD analizi	53
<b>Şekil 5.7.39</b> : 3261 nolu numunenin XRD analizi	54
<b>Şekil 5.7.40</b> : 3661 nolu numunenin XRD analizi	54
<b>Şekil 5.8.1</b> : 1211 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği	55
<b>Şekil 5.8.2</b> : 1611 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği	56
<b>Şekil 5.8.3</b> : 2261 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği	56
<b>Şekil 5.8.4</b> : 2661 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği	57
<b>Şekil 5.8.5</b> : 3211 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği	57
<b>Şekil 5.8.6</b> : 3611 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği	58
<b>Şekil 5.9.1</b> . Aşındırma makinesi	59
<b>Şekil 5.9.2</b> . Aşındırıcı uç	59
<b>Şekil 5.9.3</b> . 25 Hz frekansta çalışan Aşınma Makinasının AISI çeliği aşındırması	60
<b>Şekil 5.9.4</b> Aşınmış Numunenin Yüzey Pürüzlülüğünün Profilometre ile ölçülmesi	61
<b>Şekil 5.9.5</b> . Dijital Göstergeli, Hassas Tartı	61
<b>Şekil 5.9.1.1.A</b> : 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	62
<b>Şekil 5.9.1.1.B</b> : 80 lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	62
<b>Şekil 5.9.1.2.A</b> : 240'lık Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişim Grafiği	63
<b>Şekil 5.9.1.2.B</b> : 240'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	63

<b>Şekil 5.9.1.3.A:</b> 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1040 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	64
<b>Şekil 5.9.1.3.B:</b> 80'lik Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1040 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	65
<b>Şekil 5.9.1.4.A:</b> 240 'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1040 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	65
<b>Şekil 5.9.1.4.B:</b> 240'lık Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1040 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	66
<b>Şekil 5.9.1.5.A:</b> 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	67
<b>Şekil 5.9.1.5.B:</b> 80'lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Ağırlık Değişimi Grafiği	67
<b>Şekil 5.9.1.6.A:</b> 240 'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	68
<b>Şekil 5.9.1.6.B:</b> 240 'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	68
<b>Şekil 5.9.1.7.A:</b> 80'lik Zımpara ile Zımparalanmış ,2 saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğinin, Çentikli Yüzeyinin (1211) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	70
<b>Şekil 5.9.1.7.B:</b> 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğinin,Çentikli Yüzeyinin (1211) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	70
<b>Şekil 5.9.1.8.A:</b> 150 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 2 saat Borlama işlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğinin,Çentikli Yüzeyinin (1221) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	71
<b>Şekil 5.9.1.8.B :</b> 150' lik Zımpara ile Zımparalanmış , 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1221) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	71
<b>Şekil 5.9.1.9.A:</b> Keçelenmiş , 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin,Çentiksiz Yüzeyinin (1262) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	72
<b>Şekil 5.9.1.9.B:</b> Keçelenmiş, 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentiksiz Yüzeyinin (1262) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	72
<b>Şekil 5.9.1.10.A:</b> 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1411) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	73
<b>Şekil 5.9.1.10.B:</b> 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1411) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	73
<b>Şekil 5.9.1.11.A:</b> 150 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentiksiz Yüzeyinin (1422) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	74
<b>Şekil 5.9.1.11.B:</b> 150 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentiksiz Yüzeyinin ( 1422) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	74
<b>Şekil 5.9.1.12.A:</b> 1000'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğinin, Çentikli Yüzeyinin (1451) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	75
<b>Şekil 5.9.1.12.B:</b> 1000'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1451) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	75



<b>Şekil 5.9.1.13.A:</b> 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğin ,Çentikli Yüzeyinin (1611) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	76
<b>Şekil 5.9.1.13.B:</b> 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 6 Saat Borlama İşlem uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1611) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	76
<b>Şekil 5.9.1.14.A:</b> 600 'lük Zımpara ile Zımparalanmış, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin ,Çentikli Yüzeyinin (1641) Aşınma Sorası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	77
<b>Şekil 5.9.1.14.B:</b> 600 'lük Zımpara ile Zımparalanmış , 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1641) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	77
<b>Şekil 5.9.1.15.A:</b> Keçelenmiş, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1661) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği	78
<b>Şekil 5.9.1.15.B:</b> Keçelenmiş, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1661) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği	78
<b>Şekil 5.9.1.16.A:</b> Yüzeyi 240'lık zımpara ile geçilmiş, 2 saat borlanmış, AISI 1040 çeliğinin, Çentikli yüzeyinin (2231) aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği	79
<b>Şekil 5.9.1.16.B:</b> Yüzeyi 240'lık zımpara ile geçilmiş, 2 saat borlanmış, AISI 1040 çeliğinin, Çentikli yüzeyinin (2231) aşınma sonrası ağırlık değişim grafiği	79
<b>Şekil 5.9.1.17.A:</b> Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, çentikli yüzeyinin (2661) aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişim grafiği	80
<b>Şekil 5.9.1.17.B:</b> Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, çentikli yüzeyinin (2661) aşınma sonrası ağırlık değişim grafiği	80
<b>Şekil 5.9.1.18.A:</b> (2461) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 4 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişim grafiği	81
<b>Şekil 5.9.1.18.B:</b> (2461) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 4 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, aşınma sonrası ağırlık değişim grafiği	81
<b>Şekil 5.9.1.19.A:</b> (2261) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 1020 çeliğinin, aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişimini veren grafik	82
<b>Şekil 5.9.1.19.B:</b> (2261) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 1020 çeliğinin, aşınma sonrası ağırlık değişimini veren grafik	82
<b>Şekil 5.9.1.20.A:</b> (2411) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 4 saat borlanmış 1040 çeliğinin aşınma sonrası değişen yüzey pürüzlülüğünü veren grafik	83
<b>Şekil 5.9.1.20.B:</b> (2411) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 4 saat borlanmış 1040 çeliğinin aşınma sonrası aşınma değişimini veren grafik	83
<b>Şekil 5.9.1.21.A:</b> (2611) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğünü gösteren grafik	84
<b>Şekil 5.9.1.21.B:</b> (2611) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin aşınma sonrası ağırlık değişimini gösteren grafik	84
<b>Şekil 5.9.1.22.A:</b> (3211) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişimini veren grafik	85
<b>Şekil 5.9.1.22.B:</b> (3211) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası ağırlık değişimini veren grafik	85

<b>Şekil 5.9.1.23.A: (3261)</b> Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulan ve 2 saat borlanan 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişimini veren grafik	86
<b>Şekil 5.9.1.23.B: (3261)</b> Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulan ve 2 saat borlanan 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası aşınma değişimini veren grafik	86
<b>Şekil 5.10.1:</b> 1211 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	87
<b>Şekil 5.10.2:</b> 1611 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	88
<b>Şekil 5.10.3:</b> 1262 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	89
<b>Şekil 5.10.4:</b> 1661 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	89
<b>Şekil 5.10.5:</b> 2231 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	90
<b>Şekil 5.10.6:</b> 2611 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	91
<b>Şekil 5.10.7:</b> 2261 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	91
<b>Şekil 5.10.8:</b> 2661 nolu numunenin SEM fotoları (iz görülemediği için sadece yüzeyden çekildi)	92
<b>Şekil 5.10.9:</b> 3211 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)	92
<b>Şekil 5.10.10:</b> 3611 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler izden, sağdakiler yüzeyden)	93

## GRAFİK VE TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Çizelge 2.1.</b> Önemli Bor Mineralleri (İleri, 1976).	6
<b>Çizelge 2.2.</b> Dünya bor mineralleri rezervleri (Milyon ton) (Poslu, 1994).	8
<b>Çizelge 2.3.</b> Dünya bor minerali üretimi (Milyon ton) (U.S. Geo. Survey, 1998).	8
<b>Çizelge 3.1.1.</b> Çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikrosertlikleri	14
<b>Çizelge 3.1.2.</b> Fe <sub>2</sub> B ve FeB'nin bazı özellikleri (Matuschka, 1980; Selçuk, 1994)	16
<b>Çizelge 4.5.1.</b> Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri	30
<b>Çizelge 4.5.2:</b> Bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları	32
<b>Çizelge 4.5.3:</b> Borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları	33
<b>Tablo 5.2.1:</b> Deneyleerde kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri (%ağırlık cinsinden)	37
<b>Tablo 5.3.1:</b> AISI 1020, AISI 1040, AISI 2344 Çeliklerin Numaralandırılması	38

## ÖZET

Bu çalışma için kullanılan yapı malzemeleri AISI 1020, AISI1040 ve AISI 2344 çelikleridir. AISI 1020 ve AISI 1040 çelikleri makine konstrüksiyonunda geniş kullanım alanı bulmaktadır. AISI 2344 çeliği ise sıcak iş takım çeliği olarak kullanılmaktadır.

Borlama işlemi için her çelik gurubundan 30 mm çapında ve 4.5 mm et kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. Numuneler üzerine farklı yüzey pürüzlülükleri elde etmek için; 80'lik, 150'lik, 240'lık, 600'lük, 1000'lik su zımparası ve keçe ile aşınma işlemi uygulanmıştır.

Borlama işlemi; katı borlama olarak, Ekabor I tozu ile 900°C'de 2-4 ve 6 saat olarak yapılmıştır. Bu borlama işlemi çeliklerle Ekabor I tozunun temas ettiği çelik kutular içerisinde, elektrik rezistanslı fırınlar yardımıyla yapılmıştır.

Numunelerin borlama öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo profilometre ile ölçülmüştür. Borlanan numuneler özel bir teçhizat sayesinde 10'ar dakikalık çevrimler halinde; 10-18 ve bazende 30 kez aşındırılmıştır. Her bir çevrim sonunda numunenin yüzey pürüzlülüğü tekrar ölçülmüş, ve aşınma sonrası ağırlık kaybıda tesbit edilmiştir.

Borlama ve aşınma işlemlerinden sonra yüzey yapısı SEM cihazıyla fotoğraflanmıştır. Numunenin oluşturduğu tabaka fazını belirleyebilmek amacıyla XRD analizleri yaptırılmıştır.

Numunelerin mikro sertlik değerleri laboratuvar ortamında ölçülmüştür.

Borlanan numunelerin mikroyapı fotolarının alınabilmesi için, numuneler hassas aşınma işlemlerine tabi tutulmuş ve yüzeyleri dağlanmıştır. Mikroyapı fotoğrafları Hunt Wetzlar optik mikroskobuyla fotoğraflanmıştır. Malzeme üzerinde oluşan bor tabakası genişliğide yine dijital optik mikroskobu yardımıyla ölçülmüştür.

Deneyler birçok sonuç verdi. Borlama sonrası yüzey pürüzlülüğü değişir. Genellikle borlama süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünde artmaktadır. Benzer parametrelere sahip numunelerde; düşük pürüzlü başlangıç yüzeyine sahip numunelerin, borlama sonrası değişimi, yüksek pürüzlü başlangıç yüzeyine sahip numunelerden fazladır. Boyut değişimi ve bor tabakası borlama işlemiyle birlikte artar. AISI 1040 çeliğinin (C) miktarı AISI 1020 çeliğinden fazladır ve AISI 2344 çeliğinin alaşım oranı AISI 1040 tan fazladır. Bu nedenle AISI 1020 çeliği, AISI 1040 çeliğine oranla daha kalın ve rijit bor tabakası oluşturmaktadır. Aynı şekilde de AISI 1040 çeliği, AISI 2344 çeliğinden daha iyi sonuçlar vermektedir. Borlama sonrası yüzey pürüzlülüğü yüksek olan numuneler aşınma deneyi sonucunda daha fazla aşınmıştır ve yine daha fazla ağırlık kaybına uğramıştır.

## ABSTRACT

The substrate materials used for this study were AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2344 steels. AISI 1020 and AISI 1040 steels are widely used in different areas of machine constructions. AISI 2344 steels are used as hot work tool steel.

30 mm in diameter and 4 mm in thickness samples from all steels are prepared for boronizing process. Different surface roughness has been obtained by using: 80, 150, 240, 600, 1000 emery paper and to with wet grinding process.

Boronizing was performed in a solid medium consisting of Ekabor I powders at 900°C for 2-4 and 6 hours. Test materials to be boronized which contact with Ekabor I powders were placed in a steel container and then transferred to an electrical resistance furnace.

The surface roughness of the samples was measured before and after boronizing using a Mitutoya profilometer. The samples are grinded by a special equipment; for 10 minutes and 10-18 or 30 times. After the process, the surface roughness are measured by means of the profilometer and the weight loss are also determined.

The surfaces of the samples are photographed by SEM equipment. The bor layer are analyzed by XRD equipment

The micro hardness from the samples are measured in laboratory.

The microstructures were photographed by using a Hunt Wetzlar optical microscope, for the photograph process the surface are branched with nital solution.

Experiments give lots of results. The surface roughness change after boronizing. Generally the surface roughness increase with the boronizing process time. In same parameters samples; the sample with the less start surface roughness give more change after boronizing the sample with the high start surface roughness. Dimension change and bor layer increase after boronizing process. AISI 1040 steels (C) quantity is more than AISI 1020 steel and AISI 2344 steels alloy quantity is more than AISI 1040 steel. Because of this AISI 1020 steel gives thicker and more rigid boron layer than AISI 1040 steel. AISI 1040 steel gives better results from AISI 2344. The samples with is more roughness of surface after boronizing, more wear and loss more weight than the other samples.

## TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışma konumu bana kazandıran ve tezim boyunca yardım ve desteğini hiç esirgemeyen Sayın Yrd.Doç.Dr Salim Şahin'e, çalışma boyunca fiili ve manevi yardımlarını eksik etmeyen Sayın Araştırma Görevlisi Selda Akgün'e ve Uğur Çavdar'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Çalışmamın başlangıç safhasında çok fiili yardımını gördüğüm Lisans öğrencileri Vedat Bilir ve Alper Gazioğlu'na yaptıkları büyük özveri ve gösterdikleri gayret için ayrıca minnetarlığımı belirtmek isterim.

SEM ve XRD çalışmaları için laboratuvarlarını imkanımıza sunan D.E.Ü Malzeme Mühendisliği Bölümünden Sayın Yrd.Doç.Dr. Bülent Önay ve Doç.Dr. Erdal Çelik'e, çalışmaları bizzat fiili sürdüren Araştırma Görevlileri: Işıl Kayatekin, Esra Dokumacı'ya yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak; tez çalışmalarım boyunca tek gün bile şikayet etmeden maddi ve manevi desteklerini üzerimden esirgemeyen ve tüm olumsuzlukları aşmamı sağlayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

## 1- GİRİŞ

Bor, yer kabuğunda nadir bulunan elementlerdendir. 150'den fazla mineralin bileşiminde bulunmasına rağmen tabiatta serbest olarak bulunmaz (TSKB, 1980). Türkiye bor mineralleri açısından oldukça zengindir. Dünya rezervinin yaklaşık %62' si ülkemizde olmakla birlikte mineral çeşitliliği ve cevher tenörü açısından da doğal bir zenginliğe sahiptir (Poslu, 1994). Bor bileşikleri gübreden ilaç sanayiine, temizlik sektöründen nükleer endüstriye kadar çok geniş alanlarda kullanılmaktadır (Poslu, 1994). Bor, demir esaslı malzemelerde ise alaşım elementi veya yüzey sertleştirme amacı ile kullanılır. Ayrıca borlama işleminin alaşımsız çeliklere uygulanabilmesi ekonomik açıdan bir üstünlük teşkil etmektedir.

Termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama, esas olarak metal yüzeyine bor difüzyonu olarak tanımlanabilir (Şen ve Bindal, 1980). Borlama işleminin fiziksel durumu katı, sıvı, gaz yada plazma olabilir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleri ile karakterize edilirler (Hunger and Trute, 1994). Bu nedenle borlanmış malzemelerde oluşan borür tabakasına ait çalışmalar daha çok sertlik, aşınma ve korozyon üzerine yoğunlaşmaktadır. Ancak bu çalışmamızda bunlara ek olarak önceden belirlenmiş farklı yüzeylerin aşınma sonrası, yüzey pürüzlülüklerindeki değişimi ve buna bağlı olarak ağırlık kayıplarını da görebileceğiz.

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu borlama şartlarına bağlı olarak malzeme yüzeyinde ferrobör fazlarından  $Fe_2B$  veya  $(Fe_2B + FeB)$  meydana gelir. Borlama sonucu karbonlu çeliklerde 1800–2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500–2800 HV ve yüksek hız çeliklerinde 2800-3300 HV yüzey sertliği elde edilmektedir (Özsoy, 1996). Borür tabakasının sertliği oluşan fazlara göre değişir. FeB fazı,  $Fe_2B$  fazından daha sert ve gevreklerdir.

Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistem özelliği olmakla beraber malzeme sertliği ile doğrudan alakalıdır. Borlanmış yüzeylerde yüksek sertlikle birlikte teflonun sürtünme katsayısına yakın sürtünme katsayısı elde edilmektedir (Atik, 1997). Makina parçalarındaki aşınma kayıplarının azaltılması çalışmalarında borlama işlemi alternatif bir yöntemdir. Özellikle makina parçalarında borlama ile yüzeylerin sertleştirilmesi aşınma miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Borun oksijene karşı ilgisi yüksektir ve bütün borürler yüzeyde ince bir oksit filmi oluştururlar. Bu oksit filmi de sürtünme sırasında kaynak oluşumunu engelleyip yağlayıcı bir görev yapar (Özsoy, 1996).

Borür tabakasının önemli bir özelliği ise sahip olduğu yüksek sertlik değerini, 900-1000 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda dahi koruyabilmesidir. Bu sayede sahip olduğu tribolojik özellikleri kaybetmeden aşınma ve oksidasyona karşı direnç gösterebilmektedir (Karamış ve diğerleri, 1995).

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu elde edilen ferrobör bileşiklerinin atmosfer korozyon direnci az olmasına karşılık bazı asit ve sıvı metallere karşı yüksek korozyon direnci göstermektedir. Özellikle HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> gibi asitler ve Al, Pb, Zn gibi metal eriyiklerine karşı çok iyi korozyon direnci göstermektedir (Bozkurt, 1984).

Toz metalurjisi, metal tozlarından makina parçası üretiminin bilim ve teknolojisi demektir. Bir modern imalat yöntemi olduğu gibi ileri teknolojik malzemeler üretilmesinde en uygun yöntemdir (Sarıtaş, 1996). Toz metalurjisi bütün dünyada giderek yaygınlık kazanmakta olan bir teknolojidir. Döküm ve klasik şekillendirme metodlarına rakip ve alternatif olarak tanınmakta ve bilinmektedir (Uygur, 1979). Ergitme döküm süreçleri ile eldesi mümkün olmayan ve şekillendirilemeyen sistemlerde toz metalurjisi yöntemleri ile tam olarak homojen, ince taneli, segregasyonsuz ve yüksek mukavemetli malzemeleri üretmek mümkündür (Ünlü ve Öveçoğlu 1994).

Ferrobör, maden endüstrisinde metalotermik ve karbotermik olmak üzere iki yöntemle üretilmektedir. Metalotermik yöntemde kullanılan alüminyum ve silisyum gibi redüktantlar, üretilen master alaşım içinde yüksek konsantrasyonlarda kalabilmektedir. Bu durum alaşımın yüksek teknolojik malzeme üretiminde kullanımını kısıtlamaktadır (Yücel, 1992). Master alaşımının empürite konsantrasyon sınırlarının düşük değerlerde olmasının istendiği şartlarda karbotermik yöntem tercih edilmektedir. Karbotermik yöntem, ferrobör üretiminde uygun hammaddelerin karıştırılarak ark fırınında yada şaft fırınında ergitilmesiyle uygulanır (Yücel, 1992).

Bu çalışmada ticari tanımlı bor tozu; 1020, 1040 ve 2344 sıcak iş çelik numunelerine katı borlama yöntemiyle kaplanmıştır. Katı borlama öncesi her bir numune 80, 150, 240, 600, 1000'lik zımpara ve keçe ile yüzey işlemi görmüştür. Amaç; oluşturulan bu özel yüzeylere sahip farklı malzemelerin borlama sonrası yüzeylerinde meydana gelecek değişimlerinin incelenmesidir. Bu amaçla; borlama sonrası oluşan yüzeyler çelik bilyelerle belirli süreler boyunca aşındırılmış ve hem bu işlemler boyu ağırlık kayıpları hem de yüzey pürüzlülük değişimleri kayıt altına alınmıştır.



## 2-BOR ELEMENTİ



**Şekil 2.1:** Siyah-Gri, beta Boru; 5 değişik bor yapısından sadece birisi

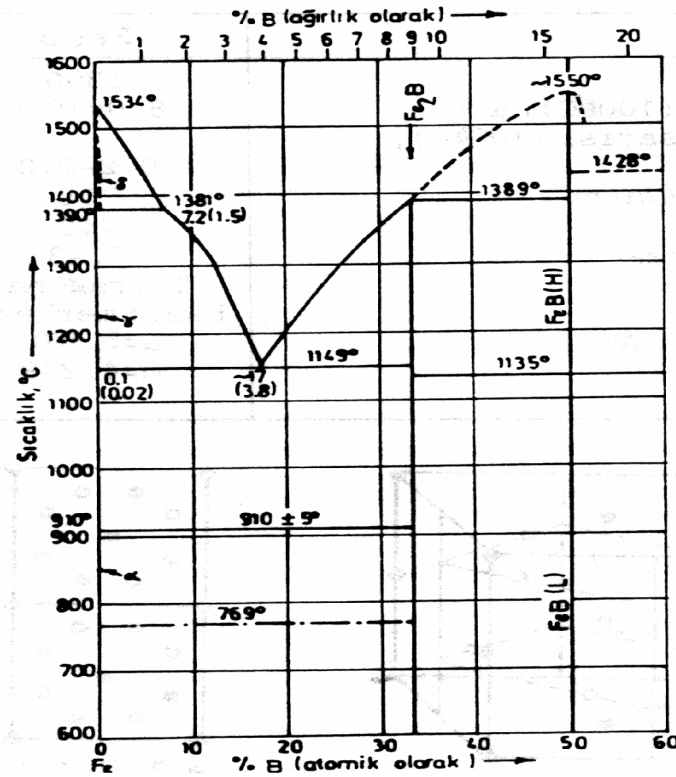
Yaklaşık Atom Ölçüsü:	10,811
Peryodik Atom Numarası:	5
Ergime Noktası:	2180 °C
Kaynama Noktası:	3650 °C (Basınç altında)
Oksidasyon sayısı:	3
Yoğunluk:	2,35 g/cm <sup>3</sup>
Sertlik (Mohs):	ca. 10 9.3
Elektronegatiflik:	2,04 (Pauling)
Atom çapı:	79,5 pm
Elektron dağılımı.:	[He]2s <sup>2</sup> 2p <sup>1</sup>
Doğadaki İzotopları:	B-10 19,57%
*) Yukarıdaki verilerin geneli resimdeki beta bor'una istinadendir	B-11 80,43%

Metal ve ametal özelliklerin her ikisini birden göstermesi nedeni ile metaloid olarak adlandırılan ve periyodik sistemin üçüncü gurubunun başında bulunan bor elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10.82, ergime sıcaklığı  $2190 \pm 20$  °C, kaynama sıcaklığı 2550 °C ve 9.3 mohs sertlik değerine sahiptir (Werner, 1990; Poslu, 1994).

Bor elementi doğada serbest olarak bulunmaz, yapay bor ise amorf ve kristal yapıda olmak üzere iki şekilde elde edilir. Amorf bor  $2.34 \text{ gr/cm}^3$  yoğunlukta siyah yada kahverengi toz şeklinde, kristal bor ise  $2.33 \text{ gr/cm}^3$  yoğunlukta parlak siyah renkte, sert ve kırılğan yapıdadır. Kristal bor; orthorombal ve tetragonal kristal kafes yapısına sahiptir (T.S.K.B., 1980).

Bor elementi %19.57 oranında  $B^{10}$  ve %80.43 oranında  $B^{11}$  izotoplarından meydana gelmektedir. Borun büyük bir nötron absorpsiyon kesiti vardır. Bu değer  $B^{10}$  izotopu için 75.5 barn ve  $B^{11}$  için 38 barn'dır.  $B^{10}$  izotopu nükleer reaktörlerin kontrolü ve nükleer radyasyondan korunma nedeni ile büyük önem taşımaktadır (T.S.K.B., 1980).

**Şekil 2.2:** Fe - B ikili denge diyagramı (Hansen, 1958).



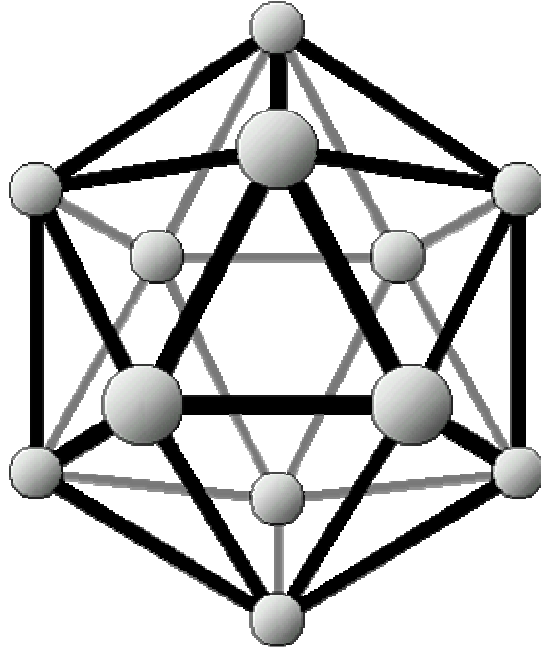
### 2.1. Bor Elementinin Özellikleri:

Bor; ısıya dayanımı, ergime ve kaynama sıcaklığı çok yüksek olan bir elementtir. Bor, Karbon esaslı Elmas madeninden sonra dünyanın en sert 2. madenidir. 20°C'deki elektrik geçirgenliği düşük olsa da, ısınmasıyla birlikte ciddi anlamda artış göstermektedir. Öyle ki 600°C

civarında, oda sıcaklığına oranla bu katsayı 100 misli artar. Saydam olmayan siyah amorf yapının yanında 4 değişik kristal yapısı daha vardır: ([www.periodensytem.net.de](http://www.periodensytem.net.de))

- $\alpha$ -orthorombal Bor (kırmızı, saydam)
- $\beta$ -orthorombal Bor (siyah-gri parlak)
- $\alpha$ -tetragonal Bor (siyah)
- $\beta$ -tetragonal Bor (kırmızı)

Tüm kristal yapılarda birleşme B<sub>12</sub>-köşeli olarak meydana gelmektedir. Bu tür bir kristali 20 yüzeyle olarak da tanımlamak mümkündür.:



**Şekil 2.3:** Borun kafes yapısı([www.periodensytem.net.de](http://www.periodensytem.net.de))

Borun en sağlam yapısı; amorf bordan yada yüksek derecede (1200 °C)  $\beta$ -hegzagonal Bor dan elde edilen  $\alpha$ -orthorombal Bor'dur. ([www.periodensytem.net.de](http://www.periodensytem.net.de))

Bor madeni ilk bakışta beyaz bir kayayı andırıyor. Çok sert ve ısıya dayanıklı. Doğada serbest bir element olarak değil, tuz şeklinde bulunuyor. Ülkemizde bulunan 'bor'un kalitesi de diğerlerine oranla daha yüksek. Toprağın 40 metre altında bulunan borun işlenmesi de, diğer elementlerle az karıştığı için kolaydır.(Şahin 1999)

Kimyasal sembolü "B" olup periyodik cetvelin III A grubunun metal olmayan tek elementidir. Boratlar, önemli ölçüde boroksit ( $B_2O_3$ ) içeren borik asitlerin tuzları veya esterleri olarak tanımlanır ve endüstri tarafından borik asit sağlayan bileşikler olarak bilinir. (Şahin,1999)

Bor ametal yapıda olmasına karşın oda sıcaklığında reaksiyona girme yetisi pek yoktur. Ancak sıcaklığın artmasıyla tepkime yeteneğinde müthiş bir yükselme kaydedilmektedir. Amorf yapıdaki Bor 700°C civarında oksijenle yanmaya başlar ve kırmızı bir alev görünür:



Daha yüksek sıcaklıklarda Cl, Br ve Kükürt ile tepkimeye girer. Sıcak ve konsantre asitler Boru oksitleyerek kolayca borik asite dönüştürür. Aynı zamanda bor açık havadan da çok etkilenir, oksijene olan yüksek afinitesi yüzünden oksitlenmeye çok müsaittir. Bor ve tuzlarının yanma sırasında alev kattıkları renk genel olarak yeşildir. (www.periodensystem.com.de)

## 2.2.Bor Elementinin Dünyada Bulunma Oranı:

Bor yer kabuğunda bulunan elementler arasında nadir bulunanlardandır. Yer kabuğunda ortalama 10 ppm olan bor konsantrasyonu denizlerde 3-5 ppm arasında değişmektedir. 150'den fazla mineralin bileşiminde bulunmasına rağmen tabiatta serbest olarak bulunmaz. Bu minerallerin büyük kısmı nadir olarak bulunur ve ticari önemi yoktur (T.S.K.B.,1980). Ekonomik olarak bor ürünleri elde edilen bor mineralleri .

**Çizelge 2.1.** Önemli Bor Mineralleri (İleri, 1976).

Mineral	Kimyasal formül	%B İçeriği	% $B_2O_3$ İçeriği	Bulunduğu yer
Tinkal	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	11.3	36.5	Kırka, ABD, Arjantin
Kernit	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	15.8	50.9	ABD, Arjantin
Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	15.7	50.8	Emet, Bigadiç, Kestelek, ABD
Üleksit	$NaCaB_5O_9 \cdot 5H_2O$	13.8	42.9	Bigadiç, ABD

0,0016% lik oranıyla Bor yeryüzünde bulunan elementler arasında 37. sırayı almaktadır. Bor'u doğada elemental halde bulmak imkansızdır. Borun en önemli bileşikleri bor asitleri ve tuzlarıdır; borax ve ulexit gibi. Bor mineralleri genel olarak kuvvetli şekilde belirli bölgelerde yoğunlaşmışlardır.

Bir mücevher taşı sayılan Turmalin; Bor silikatlarının farklı yerleşimlerinden meydana gelmektedir. Rengi ve büyük yapısı en belirgin özelliğidir. (www.periodensytem.net.de)



**Şekil 2.4:**Çift renkli Turmalin (Elbait) Stak Nala/Pakistan (www.periodensytem.net.de)

Ülkemiz bor madeni bakımından dünya rezervlerinin yaklaşık %62'si gibi önemli bir orana sahip olmakla birlikte dünya borat üretiminin ancak %18 ini gerçekleştirebilmektedir. Gelişmiş ülkeler bu boratlardan saf borun yanında, bortriksit ( $B_2O_3$ ), borkarbür ( $B_4C$ ), bornitrür (BN), diboran ( $B_2H_6$ ) ve ferrobör (FeB) gibi rafine bileşikler üreterek çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmaktadırlar. (Şahin, 1999)

Yayınlanmış bor rezervleri ile ilgili bilgiler arasında önemli farklılıklar olmakla birlikte Amerikan Madencilik Bürosu ve Etibank'ın yayınlamış olduğu değerlere göre toplam rezerv 1303 milyon ton  $B_2O_3$  içeren 3199 milyon ton cevher olarak belirtilmektedir (Poslu, 1994). Çizelge 2.2' de de görüleceği gibi Dünya bor rezervinin yaklaşık %62'si Türkiye'de bulunmaktadır. Ülkemiz rezerv fazlalığına ilaveten mineral çeşitliliği ve cevher tenörü bakımından da doğal bir zenginliğe sahiptir (Poslu, 1994).

**Çizelge 2.2.** Dünya bor mineralleri rezervleri (Milyon ton) (Poslu, 1994).

Ülke	Görünür Rezerv		Muhtemel Rezerv		Toplam Rezerv	
	Cevher	$B_2O_3$	Cevher	$B_2O_3$	Cevher	$B_2O_3$
Türkiye	780	263	1664	540	2444	803
ABD	325	105	325	105	650	210
BDT	-	60	-	90	-	150
Bolivya	12	8	65	36	77	44
Çin	-	30	-	10	-	40
Şili	20	5	-	-	20	5
Arjantin	3	0.5	5	0.9	8	1.4
Diğerleri	-	17	-	33	-	50
TOPLAM	1140	488.5	2059	814.9	3199	1303.4

Dünya bor mineralleri üretiminde Türkiye ve ABD lider konumdadır. Önemli miktarda üretim yapan diğer ülkeler ise Çizelge 2.3.'de verilmiştir. Tablodan da anlaşıldığı gibi Türkiye Dünya'nın en büyük bor minerali üreticisi durumundadır.

**Çizelge 2.3.** Dünya bor minerali üretimi (Milyon ton) (U.S. Geo. Survey, 1998).

Ülke	1993	1994	1995	1996	1997
Arjantin	146	215	245	342	270
Bolivya	12	10	7	4	5
Şili	117	86	211	149	150
Çin	155	188	140	157	140
Almanya	2	2	2	2	2
İran	1	1	1	1	1
Kazakistan	8	7	7	7	7
Peru	37	30	41	39	40
Rusya	33	13	13	13	13
Türkiye	1079	1140	1144	1300	1250
ABD	1060	1110	1190	1150	1190
TOPLAM	2640	2800	3000	3160	3070

### 2.3.Borun Tarihçesi:

Bor'un en çok kullanılan türü olan Boraks binlerce yıldan beri bilinmektedir. Mısırlılar ve Mezopotamya Uygarlıklarının, bazı hastalıkların tedavisi ve ölülerin mumyalanmasında, Çinlilerin porselenlerinin cilalanmasında, Babillilerin kıymetli metallerinin ergitilmesinde boraks kullandıkları bilinmektedir.

Modern bor endüstrisi ise 13. yy.'da boraksın Marco Polo tarafından Tibet'den Avrupa'ya getirilmesiyle başlamıştır. 1771 yılında, İtalya'nın Tuscani bölgesindeki sıcak su kaynaklarında Sassolit bulunduğu anlaşılmış, 1852' de Şili'de endüstriyel anlamda ilk boraks madenciliği başlamıştır. Nevada, California, Caliko Mountain ve Kramer yöresindeki yatakların bulunarak işletilmeye alınmasıyla ABD Dünya bor gereksinimini karşılayan birinci ülke haline gelmiştir. Türkiye' de ilk işletmenin, 1861 yılında çıkartılan "Maadin Nizannamesi" uyarınca 1865 yılında bir Fransız şirketine İşletme imtiyazı verilmesiyle, başladığı bilinmektedir.

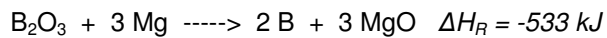
Bor; temiz elementer yapısına kavuşmadan birçok kimyager tarafından eş zamanlarda keşfedilmeye başlanmıştır (1808). Fransız kimyagerler Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850) ve Louis Jacques Thénard (1777-1857) elementi ilk olarak bortrioxid ve kaliumdan elde etmişlerdir. Sir Humphrey Davy ise Boru; Bor asitin elektrolizinden elde etmeyi başarmıştır. Davy bu buluşunun ismini "boracium" olarak adlandırsa da sonradan "boron" olarak kısaltılmıştır. Bu buluşun elementer kısaltmasını ise J.J.Berzelius 1814 yılında yapmıştır. Borun tam anlamıyla temiz ve saf olarak elde edilmesi ise Amerikan kimyageri W.Weintraub tarafından bortrioxidin su bazıyla redüksiyonundan meydana gelmiştir (1909) . (www.periodensystem.net.de)



**Şekil 2.5:** Soldan sağa doğru Bor'un keşifçileri: (Joseph Gay-Lussac, Louis Jacques Thénard ve Sir Humphrey Davy) (www.periodensystem.net.de)

#### 2.4.Bor Üretimi:

İstenilen birleşikte Bor oluşturmak için birçok yöntem ve usul vardır. Güçlü bağa sahip ancak temiz yapıda olmayan boru; boroxid ve magnesiumdan elde etmek mümkün;



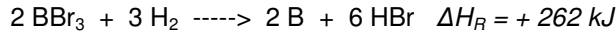
900°C de Bor(III)-chlorid ve çinko reaksiyonundan %96 saflığa sahip kristal yapıli boron elde etmek mümkün. (www.periodensystem.net.de)



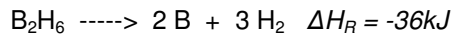
**Şekil 2.6:** Bor asidi ve Magnezyumdan elde edilmiş amorf yapıdaki bor  
([www.periodensystem.net.de](http://www.periodensystem.net.de))

Kaliumfluoroborat ( $\text{KBF}_4$ ), Bor(III)-oksid ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), Kaliumchlorid (KCl) ve Kaliumfluorid (KF) in.  $900^\circ\text{C}$  deki ergimiş karışımının elektrolizinde belirli bir sürenin sonunda demir katot uçta %99 oranında Bor birikmekte, diğer Anot uçta ise grafit yapı görülmekte. (Şahin,1999)

$1000^\circ\text{C}$ 'nin altında ki reaksiyonlarda amorf yapıları bor oluşurken,  $1000$  ve  $1200^\circ\text{C}$  arası alfa ve beta yapıları Bor meydana gelmektedir,  $1200^\circ\text{C}$  sonrasında ise tetragonal yapıları Bor elde edilmekte.  $1200^\circ\text{C}$  sonrası içinse %99,9 oranında saflıklara ulaşılabilir. ([www.periodensystem.net.de](http://www.periodensystem.net.de))



En saf Bor; Diboran'ın ( $\text{B}_2\text{H}_6$ )  $650\text{-}800^\circ\text{C}$ 'de Wolfram- veya Tantal yüzey üzerine termolizi ile elde edilir: ([www.periodensystem.net.de](http://www.periodensystem.net.de))



### 2.5.Bor-Demir'in Bileşikleri:

Borun atom çapı demirden %25 daha küçük olduğundan bu elementte katı eriyik yapar. Demirde bor erirliği sıcaklığa bağlı olarak ferrit fazında 20-80 ppm, ostenit fazında ise 55-260 ppm kadardır. Bor ostanitte ara yer katı eriyiği,  $\alpha$  demirde ise yer alan katı eriyik yapar.



Demir-bor denge diyagramında ağırlıkça % 8.83 bor oranında  $Fe_2B$ , yine ağırlıkça % 16.23 bor oranında  $FeB$  arabileşikleri meydana gelmektedir. Ağırlıkça % 3.8 bor oranında ergime sıcaklığı  $1149^{\circ}C$  olan ötektik faz oluşmaktadır. Dolayısıyla borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmektedir. (Şahin,1999)

## 2.6.Borun Kullanım Alanları:

Roket yakıtından, diş macununa kadar her alanda kullanılan bor, sanayinin tuzu olarak adlandırılabilir. İşte 400'den fazla üründe "olmazsa olmaz" denilen borun hayatımızdaki yeri:

Borcamlarda kullanılan bor, motor yağlarında ve çelik jantlarda da kullanılıyor. Ayrıca araba boyalarının içine katılan bor, parlaklığı ve kolay çizilmemeyi sağlıyor. Lastiklerin içindeki çelik teller de borla güçlendiriliyor. Bilgisayarlar, cep telefonları, walkmanler bugün bu kadar küçükse, bunu 'bor'a borçlu, çünkü bilginin akışını sağlayan ince optik lifler, bor almadan gerekli sağlamlığa ulaşamıyor. Tarım ilaçlarında da bor madenini görebiliyoruz. Yalnız; çok kullanılırsa canlı formuna zarar verdiği için dolayı öldürüyor, dozunda olursa verimi artıran gübre oluşuyor. Bisküvi, pasta gibi gıda ürünlerinin yapıldığı kalıplarda da bor kullanılıyor. Eğer bor olmasaydı, kalıplar yüksek ısıya dayanmayacaktı. Ahşap ürünler, uzun ömürlü ve bozulmadan kalabilmeleri için, bor bulunan bir madde ile işleme tabi tutuluyor. Seramik sanayiinde; fayansların parlaklığı ve sertliği bor sayesinde oluyor. Çamaşırları beyaz yapan aslında bor. Ateşe dayanıklı olduğu için yanmaz kumaş üretiminde de kullanılıyor. Tıp ve ilaç sanayiinde; diş macunlarında, yanık ve yara kremlerinde de bor var. Losyonlarda ve kremlerde de bor olduğunu unutmayın. Yakıt sanayi, borun en değerli olduğu sektördür. Çünkü borlu yakıtlar itme güçlerinin fazlalığından dolayı, roket, füze ve savaş uçaklarında kullanılıyor. İçinde olduğumuz şu günlerde bor katkılı yakıtların güncel içten yanmalı motorlardada kullanıldığını görmekteyiz. İçten yanmalı motorlarda kullanılan bor madeni hem aşınmayı azaltmakta , hem kompresyon kaçaklarını mizimize etmekte ve buna dayalı olarakta yakıt tüketimini düşürmektedir.

Amerikalılar'ın havada infilak eden uzay mekiği Challenger'in sağlam kalan tek parçası, Türk bor'undan yapılan baş kısmıdır.

Bor o kadar değerli ki, yakın gelecekte zenginliğin simgesi olacağı söyleniyor. Türkiye'nin elindeki bor rezervi, tüm dünyanın bor ihtiyacını tek başına 400 yıl karşılayacak düzeyde..., Amerikalılar, ülkelerindeki bor madenlerini kapatıp, Türkiye'den alım yapmaya başlamış. Çünkü Türk boru, hem kaliteli hem çok daha ucuz...

Dünyada bor mineral ve bileşiklerini tüketen sanayi dalları toplam B203 tonajı bazında

aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür:

- A) Cam sanayi (Isıya dayanıklı cam ve elyaf imali)
- B) Seramik sanayi (Emaye, Frit ve Sır imali)
- C) Temizleme ve beyazlatma (Deterjan) sanayi
- D) Yanmayı nleyici maddeler
- E) Tarım (Gübre ve zirai ilaç yapımı)
- F) Metalurji (Ergimeyi hızlandırıcı ve çeliğin sertleştirilmesi)
- G) Nükleer uygulama (Atom reaktörlerinde)
- H) Diğer kullanım alanları (Dericilik , fotoğrafçılık, ilaç).

Bor mineral ve bileşiklerinin ülkemiz içinde kullanılması çok kısıtlıdır. Kırka (Eskişehir) ve Bandırma (Balıkesir) de yer alan tesislerde bor cevherleri rafine ürünlere dönüştürülmektedir.

### 3. BORLAMA

Çelik, dökme demir, nikel alaşımları, titanyum alaşımları ve sinterlenmiş karbürlerin borlanması konusu üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda; borlanmış malzeme yüzeyinin çok yüksek sertliğe, yüksek bir aşınma direncine ve yüksek korozyon direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak borlamanın tek dezavantajı borlanmış tabakanın kırılganlığıdır. (Şahin,1999)

Borlama işlemi katı, sıvı, gaz, plazma ve iyon implantasyonu gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Katı borlama genellikle patentlerle korunan yaklaşık %5 B<sub>4</sub>C, %5 KBF<sub>4</sub> ve %90 SiC içeren karışımlar ile yapılmaktadır. Bu yöntemde toz karışım sızdırmaz bir kutuya doldurulur ve içine numune yerleştirilir. Kutu gerekli sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta gerektiği kadar tutulur ve soğutulur. Sıvı borlamada boraks, borik asit ve ferro silis karışımından oluşan erimiş tuz banyosuna numune daldırılır ve bu sıcaklıkta gerekli bir süre bekletilir. Gaz ve plazma borlamada BCl<sub>3</sub> TMB (trimetil borat), TEB (trietil boran) ve BF<sub>3</sub> gibi bor kaynakları ile H<sub>2</sub> ile Ar gazları kullanılmaktadır. Katı borlama ile C 45 çeliği borlandığı bir çalışmada; 170 mm kalınlığında ve 1600 HV sertliğinde borür tabakası elde edilmiştir, borür tabakasının metal alt tabakaya göre 20 kat daha fazla aşınma direncine sahip olduğu gözlenmiştir. Bir başka çalışmada ise AISI 316L çeliği sıvı borlama işlemi ile borlanmış; 12 - 14 mm kalınlığında ve 1500 HV sertliğinde borür tabakası elde edilmiştir. Gaz ortamında borlamaya örnek olarak; düşük karbonlu çelik karbürlendikten sonra BCl<sub>3</sub> ve H<sub>2</sub> gaz ortamında borlanmış ; 70 - 150 mm kalınlığında ve 1500 - 1800 HV mikrosertliğinde borür tabakası elde edilmiştir. Bu yöntemlerden sıvı borlamada erimiş tuz tabakası numune yüzeyine yapışır ve kalıntının temizlenmesi problem oluşturmaktadır. Katı borlamada numune yüzeyinin temizlenmesi gerekir. Ancak yapışma tam olmadığından numune yüzeyi kolaylıkla temizlenir. Gaz ve plazma borlamada malzeme yüzeyi temiz olmasına rağmen kullanılan gazların zehirli, pahalı ve patlayıcı olması dezavantajlarıdır. (Bayça ve Şahin,1999)

Yüksek sıcaklıkta (850-1050°C) yapılan borlama işlemi ile demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe<sub>2</sub>B veya iki fazlı Fe<sub>2</sub>B+ FeB den oluşan ferrobor tabakası elde edilir. Tek faz Fe<sub>2</sub>B oluşumu, iki faz Fe<sub>2</sub>B+ FeB nin oluşumundan daha fazla istenir. Çünkü borca zengin FeB fazının kırılganlığı yüksektir; bu yüzden FeB fazının oluşması istenmez. FeB nin ısıl genleşme katsayısı (23.10<sup>-6</sup>/°C), Fe<sub>2</sub>B nin genleşme katsayısından (7,85.10<sup>-6</sup>/°C) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamlar oluşur. Bu çatlamları önlemek FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür. Demir bor diyagramı Şekil 2.2'de görülmektedir.

### 3.1. Borlama İşlemi

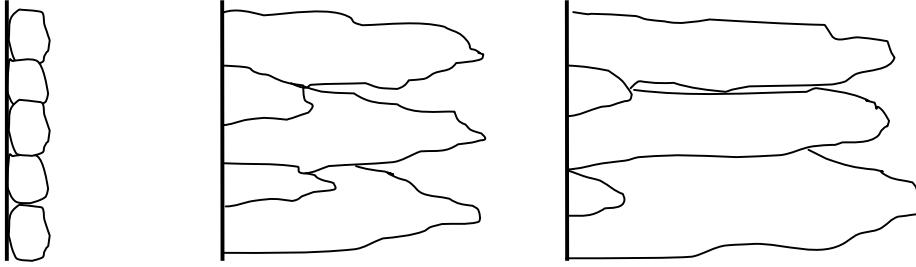
Borlama; termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Borlama, bor elementinin yüksek sıcaklıkta metal yüzeyine yayılması (difüzyonu) ile yüzeyde borür tabakası elde etme işlemidir. Demirli malzemelerin borlanması da, malzeme yüzeyinde FeB ve Fe<sub>2</sub>B ile bu bileşiklerin karışımından oluşan tek veya çift fazlı borür tabakaları elde edilir. Alaşımlı çeliklerde ve diğer malzemelerde kendi alaşım elementlerinin borürleri oluşur. Tablo 3.1'de çeşitli malzemelerde borlama ile elde edilen borürler ve mikrosertlik değerleri verilmiştir. (Şahin,1999)

**Çizelge 3.1.1.** Çeşitli metallerde elde edilen borür fazları ve mikrosertlikleri

Borlanan alt yüzey	Borür tabakasındaki fazlar	Borür tabakasının sertliği (HV)
Fe	FeB Fe <sub>2</sub> B	1900-2100 1800-2000
Co	CoB Co <sub>2</sub> B Co <sub>3</sub> B	1850 1500-1600 700-800
Ni	Ni <sub>4</sub> B <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> B Ni <sub>3</sub> B	1600 1500 900
Mo	Mo <sub>2</sub> B MoB <sub>2</sub> Mo <sub>2</sub> B <sub>5</sub>	1660 2330 2400-2700
W	W <sub>2</sub> B	2600
Ti	TiB TiB <sub>2</sub>	2500 3370
Nb	NbB <sub>2</sub> NbB <sub>4</sub>	2200 -
Ta	Ta <sub>2</sub> B TaB <sub>2</sub>	- 2500
Hf	HfB <sub>2</sub>	2900
Zr	ZrB <sub>2</sub>	2250
Re	ReB	2700-2900

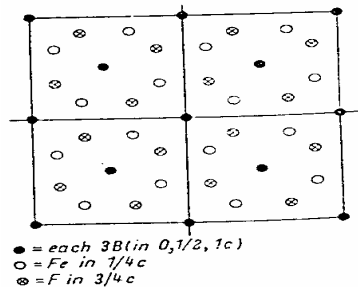
Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerler borür tabakası oluşumunun başlangıç noktalarıdır. Bu noktalarda  $\text{Fe}_2\text{B}$  çekirdekleri oluşur ve gelişir.

Borlamanın birinci aşamasında borlayıcı ortam ve nesnenin yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Taneler yüzeyde çekirdek oluşturmaktadır. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor,  $\text{Fe}_2\text{B}$  ve  $\text{FeB}$  yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Borlama işlemi sırasında, ilk borür çekirdeği numunenin yüzeyinde oluşmaktadır. ( Şekil 3.1.1) (Bayça ve Şahin,2004)

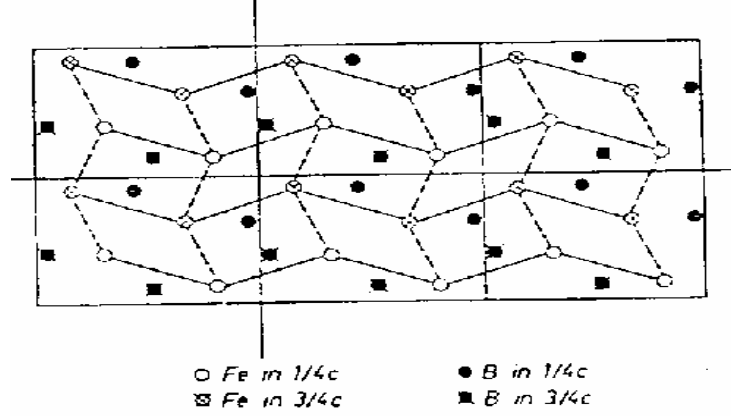


**Şekil 3.1.1:** Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması

Oluşan ilk borür çekirdeği numune içinde büyür. Bor atomları kafes yapının 001 doğrultusunda daha hızlı yayıldığı için  $\text{FeB}$  ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  001 boyunca yönlenir. Bu yüzden borür taneleri 001 yönünde yüzeye dik daha hızlı büyür. Borür tanelerinin diğer yönlerde büyümesi daha yavaştır. Bu nedenle kolonsal yapı oluşur. Önce  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı oluşur, ortamda yeterince bor konsantrasyonu varsa  $\text{FeB}$  fazı da oluşur. İlk önce oluşan  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru  $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$  yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece  $\text{FeB}$  fazı oluşur.  $\text{FeB}$  fazı  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden  $\text{FeB}$  fazının dokusu  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazı kadar güçlü değildir .



**Şekil 3.1.2:** Fe<sub>2</sub>B kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu (Quing'en and Zaizhi, 1983).



**Şekil 3.1.3:** FeB kristalinin (001) düzlemindeki projeksiyonu (Badini et al,1987).

Çizelge 3.1.2.'de borlu tabakayı meydana getiren Fe<sub>2</sub>B ve FeB bileşiklerinin bazı özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3.1.2.** Fe<sub>2</sub>B ve FeB'nin bazı özellikleri (Matuschka, 1980; Selçuk, 1994).

Özellik	Fe <sub>2</sub> B	FeB
Ergime noktası (°C)	1390	1550
Mikro Sertlik (HV)	1600-2000	1600-2400
Uzama Katsayısı (1000 °C)	8.10 <sup>-6</sup> 1/°K	10-16.10 <sup>-6</sup> 1/°K
Termal İletkenlik (1000 °C)	0.2-0.3 W/(cm °C)	0.1-0.2 W/(cm °C)
Küri Noktası (°C)	742	325
Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	7.00	6.3
Kristal Sistem	Tetragonal hacim merkezli	Ortorombik
Kafes Parametreleri (Å)	a:5.078, b:4.249	a:4.053, b:5.495, c:2.496

### 3.2.Borlama Yöntemleri

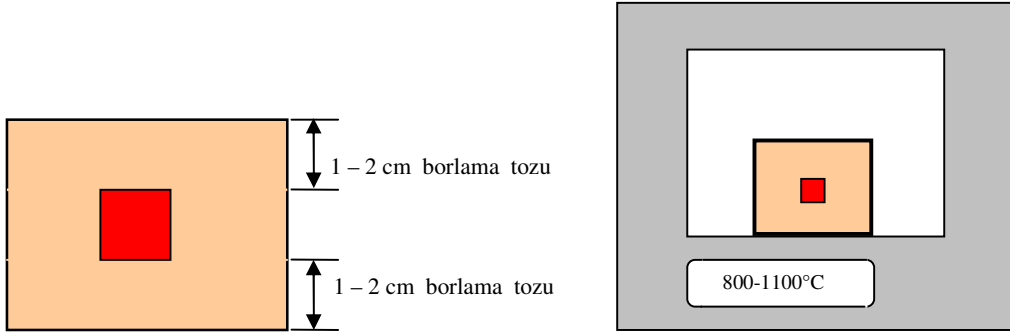
#### 3.2.1- Katı (Paket) Borlama Yöntemi

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. B<sub>4</sub>C, KBF<sub>4</sub> ve SiC içeren toz veya granürden oluşan bir karışım ile malzemenin etrafı sarılır.(Şekil.3.2.1.1)



**Şekil 3.2.1.1** Borlama Tozu

Bu işlem koruyucu atmosfer altında veya sıkı kapatılmış kutularda yapılır. Burada amaç borlama ortamına dışarıdan oksijen akışını kesmektir. Böylece redüksiyon ortamı korunmuş olur. İşlem sırasında ısıya dayanıklı malzemeden yapılmış kutular kullanılır. Borlama 800 - 1100 °C sıcaklık aralığında ve 2 - 10 saat süreyle inert bir atmosferde yapılır. ( Şekil 3.2.1.2)

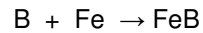
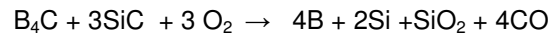


a) Kutu hazırlama

b) Kutunun fırında ısıtılması

**Şekil 3.2.1.2:** Katı (paket) borlama işleminin şematik görünüşü (Bayça ve Şahin,2004)

Katı borlama prosesinde yer alan reaksiyonlar şunlardır:



Katı borlama yönteminde kullanılan bor bileşikleri; borkarbür, ferrobor, elementer bordur. Bunlardan en çok kullanılanı, borkarbürdür. Aktivatör olarak sodyum bor florür, potasyum bor

florür, baryum florür, sodyum karbonat, amonyum klorür ve redükleyici olarak silisyum karbür, grafit ve sodyum klorür gibi maddeler kullanılır.

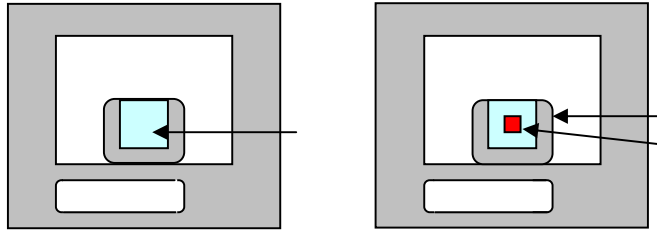
Borlama maddesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar. Temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır, dolayısıyla borür tabakasının kalınlığı artar. Borlama, kaynaklı birleştirmelerde başarı ile uygulanabilir. (Bayça ve Şahin,2004)

### 3.2.2- Sıvı Borlama Yöntemi

Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması yöntemidir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900 - 1100 °C sıcaklıkta ve 2 - 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklıktır. Sıcaklığın 850°C nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkansız hale gelecektir. (Bayça ve Şahin,2004)

İşlemden önce susuz boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), susuz borik asit ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), metaborik asit ( $\text{HBO}_2$ ), boraks, bor karbür gibi bor bileşikleri kullanılır. Silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl, Al gibi redükleyiciler kullanılır. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bileşiklerinin veya NaCl gibi eriticilerin miktarı yüksek olmalıdır. Böylece eritici olan bu maddeler diğer maddeleri de eriterek sıvı eriyik oluşturur,

(Şekil 3.2.2)



a) Bor ortamının eritilmesi

b) Borlama sıvısına numunenin daldırılması

**Şekil 3.2.2:** Sıvı Borlama Ünitesi (Bayça ve Şahin,2004)

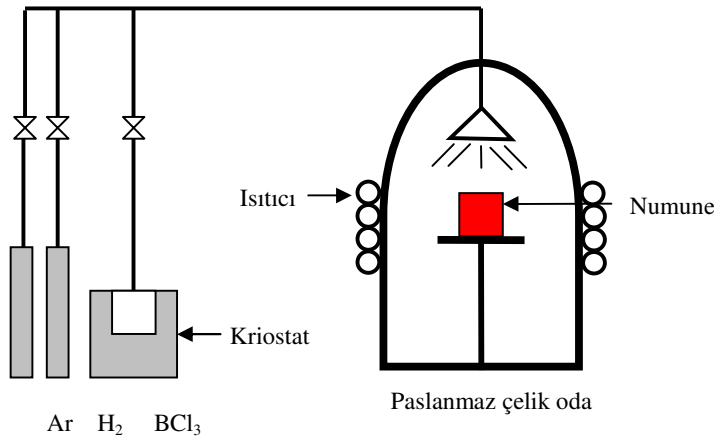
Sıvı ortam borlaması sırasında borlanan metal ile redükleyici madde arasında galvanik pil oluşur. Aktif bor oluşumu sırasında metal yüzeyinde katodik bir reaksiyon olurken, redükleyici madde yüzeyinde anodik bir reaksiyon olmaktadır. Bu işlemin oluşması için; borlanacak metal ile redükleyici madde taneleri arasında elektrokimyasal farkın bulunması gerekir. Difüzyon reaksiyonu esnasında katot potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın ( $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) potansiyel değerini alır. Katı eriyik, oluşum esnasında yüzeyde yayılan elementin konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişir. (Bayça ve Şahin,2004)



Sıvı borlama yöntemi AISI 1040 çeliğine uygulanmış, çelik 1000 °C de erimiş %70 boraks, % 13 borik asit, %10 ferrosilisyum ve %7 Al içeren tuz banyosuna daldırılmıştır. 1000 °C sıcaklıkta 7 saat borlama sonucu 150µm tabaka kalınlığı ve 2000 HV sertlikte borür tabakası elde edilmiştir. (Bayça ve Şahin,2004)

### 3.2.3- Gaz Borlama Yöntemi

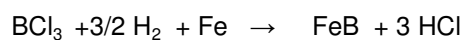
Borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Borlama işlemi Ar ve H<sub>2</sub> gazlarının ve evapotartörde gaz haline getirilmiş bir bor kaynağının (BCl<sub>3</sub> gibi) belirli karışımının, dış ortama kapalı paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine püskürtülmesiyle yapılır.( Şekil 3.2.3) (Bayça ve Şahin,2004)



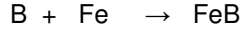
**Şekil 3.2.3.:** Gaz borlama ünitesi (Bayça ve Şahin,2004)

Gaz borlamada gazlaştırılabilen BCl<sub>3</sub> (bor halitler), BF<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (diboran) ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde genellikle bor halitler ve diboran kullanılmaktadır. Diboran ve bor halitlerin gazları zehirli ve patlayıcıdır; çevreyi kirleticiliği yaptığından ticari kullanımı sınırlıdır. Gaz borlamanın avantajları gaz sirkülasyonu sonucu daha uniform bir bor dağılımının sağlanması, sonradan temizleme gerektirmediği için kolay elde edilmesidir. (Bayça ve Şahin,2004)

Gaz borlama reaksiyonları şunlardır. Gaz borlamada bor triklorür ısı ile aktive edilir.



Burada hidrojen  $\text{BCl}_3$  ü redükler. Böylece bor, demire yayılır. Reaksiyon bileşenleri iki aşamada oluşur.



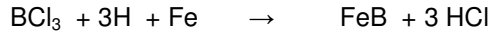
Gaz borlamada diboran ve bor klorür gazlarına alternatif olarak zehirsiz organik bor kaynakları trimetil borat, TMB,  $\text{B}(\text{OCH}_3)_3$  ve trietil boran, TEB,  $\text{B}(\text{C}_2\text{H}_5)_3$  boran trietil amin gibi maddeler kullanılmaktadır. (Bayça ve Şahin,2004)

### 3.2.4- Plazma Borlama

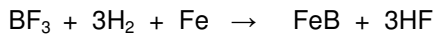
Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz; ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür. Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır. Uygulamada plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile elde edilir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi elektriksel boşalmadır. Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa belirli şartlar gerçekleştiği takdirde uygulanan gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise , bu iki plaka arasında bir elektrik akışı olur.

Plazma borlama  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{BF}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$  ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikleri ve redükta olarak hidrojen gaz kullanılarak, 800 - 1100 °C sıcaklıkta, yaklaşık 2-10 Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş bir plazma içerisinde yapılan borlamadır. Klasik borlama, tuz borlama ve gaz borlama gibi işlemlerin çevreye kirlenici etkisi nedeniyle son yıllarda plazma borlama işlemi daha yoğun olarak çalışılmaktadır. (Bayça ve Şahin,2004)

Plazma borlama reaksiyonları şunlardır:



Bor florür ( $\text{BF}_3$ ) ile borlama reaksiyonu



Plazma borlamanın avantajları yüksek enerji etkinliği, minimum çarpılma, düşük işlem sıcaklığıdır. Plazma borlamanın dezavantajları  $\text{BCl}_3$  ve  $\text{B}_2\text{H}_6$  gazları kullanılmasıdır. Bu gazlar, pahalı, zehirli, patlayıcıdır ve korozyona neden olmaktadır. (Bayça ve Şahin,2004)

### 3.3. Borlanabilen Malzemeler

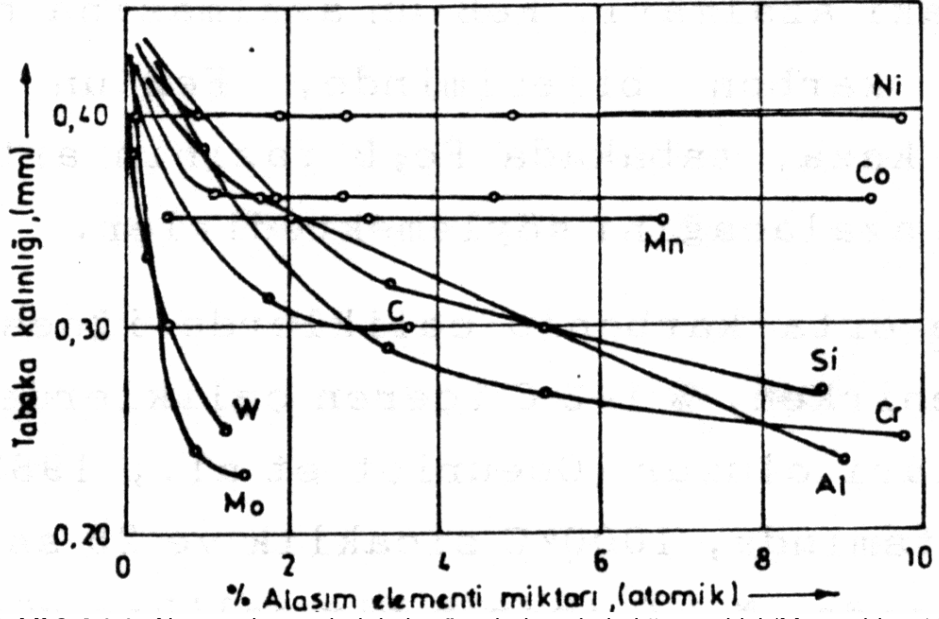
Bütün demir esaslı malzemeler, örneğin yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir, sinterlenmiş demir ve çelikler borlama için uygundur. Demir esaslı malzemelere ek olarak başka element ve bileşikleri de borlamak mümkündür (Matuschka, 1980). Refrakter malzemeler (W, Ta, Mo, Zr, Nb), karbürler (özellikle kobalt ile bağlı WC) ve nikel esaslı alaşımlara başarı ile uygulanarak borlu tabakalar elde edilmektedir. Titanyum ve titanyum alaşımlarında borlama sonucu aşınmaya dayanıklı TiB<sub>2</sub> tabakası elde edilmektedir (Krzyminski and Kunst, 1973).

Titanyum ve titanyum alaşımlarının borlanması tercihen 1000-1200 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılmalıdır. Titanyum ve refrakter metaller üzerinde oluşan borür tabakasının sertlik değeri nikel ve kobalt üzerinde oluşan tabakaya göre çok yüksektir (Sinha, 1982). Borlama işlemi bakır ve alaşımlarına da tatbik edilebilmektedir, fakat düşük ergime sıcaklığına sahip çinko ve alüminyuma uygulanamamaktadır (Bozkurt, 1980). Bahsedilen malzemelerin borlama işlemleri demir esaslı malzemelerin borlanmasından farklıdır (Matuschka, 1980).

### 3.4. Alaşım Elementlerinin Borlamaya Etkisi

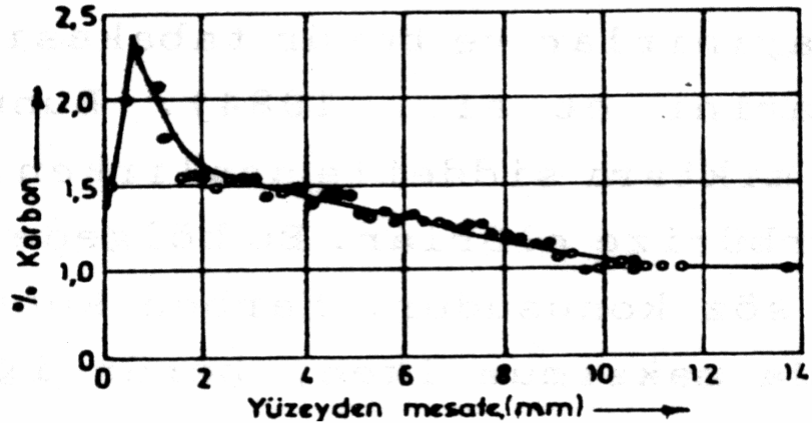
Borlama işlemi esnasında borür tabakasının oluşumuna ana metaldeki alaşım elementlerinin etkisi büyüktür. Genel olarak bütün alaşım elementleri için tabaka kalınlığında bir azalma tespit edilmiştir (Matuschka, 1980). Alaşım elementleri bor difüzyonunu azaltmakta, ana malzeme ve borür tabakasının özelliklerini değiştirmektedir (Carbucicchio and Palombarini, 1987). Şekil 3.4.1.1'de alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi görülmektedir.

Alaşım elementleri tabaka kalınlığını azaltırken, tabaka geometrisini de değiştirirler. Az karbonlu çeliklerde meydana gelen girintili çıkıntılı yapı borür tabakasının ana metale bağlantısını kuvvetlendirirken, ara yüzeyde meydana gelen iç gerilmelerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Ana metaldeki alaşım elementleri, özellikle karbon, krom ve nikel tabaka geometrisini değiştirerek ana metal – borür tabakası ara yüzeyini düzleştirir (Bozkurt ve diğerleri, 1979). Alaşım elementlerinin başka bir etkisi de borür tabakasının sertliğini arttırması ve Fe – B denge diyagramındaki ötektik noktayı aşağı kaydırmasıdır (Matuschka, 1980).



Şekil 3.4.1.1: Alaşım elementlerinin borür tabakası kalınlığına etkisi (Matuschka, 1980).

Ana malzeme içerisindeki karbon oranının artması şekil 3.4.1.1'den de anlaşıldığı gibi tabaka kalınlığını azaltmaktadır. Karbon; FeB ve Fe<sub>2</sub>B gibi fazlarda çözünmediğinden, karbon fazlalığının sonucu borür tabakası altında difüzyon bölgesi meydana gelmektedir (Matuschka 1980). Bu bölgedeki karbon, Fe<sub>3</sub>C, Cr<sub>3</sub>C, Fe<sub>6</sub>C<sub>3</sub> gibi karbürler oluşturarak borlama mekanizmasını etkilediği ve borür tabakasını daha sıkı ve sert yaptığına inanılmaktadır (Badini et al, 1987). Şekil 3.4.1.2'de borür tabakasının altındaki karbon miktarının değişimi görülmektedir. Tabakanın hemen altındaki karbon %1'den %2,3'e yükselmiştir.



Şekil 3.4.1.2: 1000 °C'de, 25 saat amorf bor ile borlanmış %1 C'lu çelikte yüzeyden itibaren karbon miktarının değişimi (Matuschka, 1980).

Artan krom miktarı tabaka kalınlığında ve ara yüzeyde oluşan girintili çıkıntılı yapıda azalmaya sebep olur. %4 Cr içeren çeliklerde kolonsal karakterde ve 65-95 µm kalınlıkta borür tabakası elde edilirken, %12 Cr içeren çeliklerde ise 65 µm kalınlıkta, düz karakterde borür tabakası elde edilmiştir. %26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlığı genel olarak 5 µm'yi aşmamaktadır (Goeuriot et al, 1982).

Manganez ve nikel borür tabaka kalınlığını fazla etkilememektedir (Matuschka, 1980). Buna karşılık yüksek nikel oranı borür tabakasının kolonsal yapısını azaltmakta, yüksek poroziteyi ve kötü mekanik özellikleri beraberinde getirmektedir (Goeuriot et al, 1982).

Silisyum, borür tabakası sertliğini etkilemez, ancak geçiş bölgesinin sertliği Si artışı ile artar (Permyakov et al, 1973). Silisyum, borür tabakasının gevrekliğini arttırdığı için %1'in üzerinde silisyum içeren çelikler borlamaya uygun değildir (Fichtl, 1981).

Tungsten, molibden, vanadyum miktarının çelikte artmasıyla tabaka kalınlığı azalır ve kolonsal yapı düzleşir. Borlanacak malzemelerde vanadyum miktarının %0,15'i geçmemesi istenir (Matuschka, 1980).

Titanyum, FeB'de çözünür ve FeB'nin sertliğini artırır. Ayrıca geçiş bölgesinde tane irileşmesini önleyici rol oynar (Permyakov et al, 1973).

## **4. BORÜR TABAKASI**

### **4.1. Borür Tabakasının Gelişimi**

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu oluşan tabaka, genellikle demir borürlerin çekirdeklenmesi ve gelişmesi şeklinde meydana gelmektedir. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi metal özelliklerinden başka yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir (Palombarini and Carbucicchio, 1987).

Demir borürler, kullanılan malzemeler ve işlem şartlarına bağlı olarak tek fazlı yada birden fazla faz oluşabilmesine rağmen, ikinci fazın (FeB) oluşturduğu iç gerilmeler ve aşırı gevreklik gibi olumsuz etkilerden dolayı uygulamada tek fazlı tabakalar tercih edilmektedir.

Borür tabakasının oluşumunda başlangıç noktaları, tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerlerdir. Bu noktalarda  $Fe_2B$  çekirdekleri oluşur ve gelişirler. Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi demir-bor reaktivliğinin düşük olduğu şartlarda, bu noktalardan sadece birkaçı reaksiyona girer ve gelişigüzel çekirdekler meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumda, metal yüzeyindeki daha az reaktif noktalarda devreye girerek sürekli bir tabaka elde edilir.  $Fe_2B$  fazının dış yüzeylerinde  $FeB$  ve  $FeB_{1+x}$  bileşiklerinin meydana geldiği tesbit edilmiştir (Palombarini and Carbucchio, 1987; Özsoy, 1996).

Demir borürlerin sürekli tabakalarının büyümesi genelde difüzyon kontrollü bir prosestir (Bindal, 1991). Şekil-3.1.2'de görüldüğü gibi,  $Fe_2B$  birim kafesinde bor atomları [001] yönünde, en yakın demir atomlarının oktagonal prizması ile eş ekseninde ve  $c/2$  uzaklıkta çok yoğun olarak dizilmişlerdir. Oktagonal prizma, bor atomlarının difüzyonunu kolaylaştıracak en büyük ara kesite sahiptir. Böylece oktagonal prizma,  $Fe_2B$  kristalinde ve [001] doğrultusunda, bor atomları için bir difüzyon kanalı olmuştur. Bunun sonucu olarak, borlama tabakası yüzeyi ile dik doğrultuda, [001] yönünde  $Fe_2B$  kristalleri oluşur ve kolonsal şekilde içeri doğru büyür (Palombarini and Carbucchio, 1987).

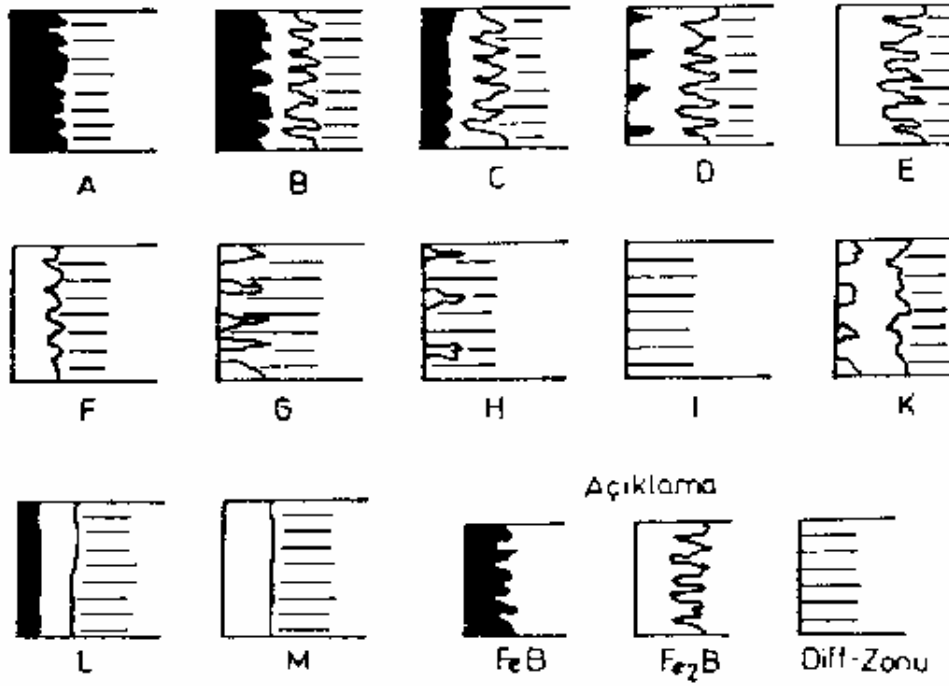
Borür tabakasının gelişimini anlatan başka bir mekanizma ise uçtan büyüme mekanizmasıdır. Bu mekanizmaya göre başlangıçta oluşan  $Fe_2B$  çekirdeği içnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönlenir. Bu durumda  $Fe_2B$  çekirdeğinin uç kısımlarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar (Carbucchio and Sambogna, 1985).

Çok fazlı borür tabakalarında  $Fe_2B$  üzerinde  $FeB$ 'nin büyüme mekanizması demir üzerinde  $Fe_2B$ 'nin büyümesi ile aynıdır. Ancak aynı tabaka için  $FeB/Fe_2B$  ara yüzeyindeki kolonsallık,  $Fe_2B$  / matriks ara yüzeyine göre daha düşüktür.  $Fe_2B$  sünek bir matrikste büyürken,  $Fe_2B$  matriksinde büyüyen  $FeB$  çok sert bir fazdır. Bu farklılıklar, ara yüzeylerde çok farklı bölgesel gerilmelere ve kafes distorsiyonlarına sebep olur (Palombarini and Carbucchio, 1987).

#### 4.2. Borür Tabakası Çeşitleri

Borlama esnasında uygulanan yöntem, kullanılan borlama maddesi, borlanan malzemenin cinsi ve borlama esnasındaki işlem parametreleri oluşan borür tabakasının şekline ve özelliklerine etki eden faktörlerdir. Metalografik incelemeler sonucu oluşan borür tabakasının kalınlığını, şekli, demir borürler için  $Fe_2B$  yada  $FeB$ 'nin oluştuğunu görmek mümkündür.

Demir esaslı malzemeler için borlama sonucu yüzeyde FeB, Fe<sub>2</sub>B ve geçiş bölgesi oluşabilmektedir. Bu tabakalar tek başına yada değişik kombinasyonlarda bir arada bulunabilirler. Kunst ve Schaaber (1967) Şekil 4.2.1.'de gösterilen bir değerlendirme sistemi geliştirilmiştir. Kompozisyona göre değişik guruplardaki olası borür tabakaları düzenlenmiş ve her guruba bir harf verilmiştir (Matuschka, 1980).



**Şekil 4.2.1:** Borür tabakasının sınıflandırılması (Matuschka, 1980).

Şekil 4.2.1.'de belirtilen tabaka çeşitleri aşağıdaki gibi karakterize edilmiştir:

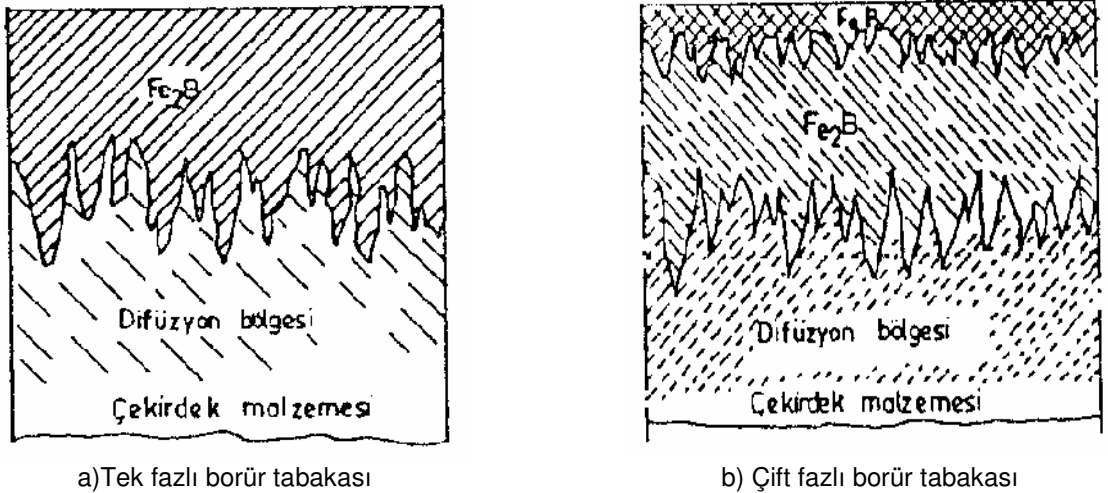
- A : Tek fazlı tabaka, sadece FeB
- B : İki fazlı tabaka, Fe<sub>2</sub>B ve FeB. (Tam tabaka)
- C : İki fazlı tabaka , FeB tabakası B'dekinden daha ince.
- D : İki fazlı tabaka, fakat FeB dişleri izole edilmiş.
- E : Tek fazlı tabaka, sadece Fe<sub>2</sub>B, güçlü dişler.
- F : Tek fazlı tabaka, sadece Fe<sub>2</sub>B, daha az kuvvetli dişler.
- G : Bağımsız Fe<sub>2</sub>B dişli tabaka.
- H : İzole edilmiş Fe<sub>2</sub>B tabakası.
- I : Geçiş bölgesi
- K : Dejenere olmuş tabaka.
- L : İki fazlı FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz
- M : Tek fazlı FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz

Borür tabakasının özelliklerini bu sınıflama ile belirlemek mümkün değildir. Bu değerlendirme sistemi borür tabakasının görünümünü ve borlama işleminin uygunluğuna karar vermeyi sağlar (Matuschka, 1980).

Endüstride E ve F tipi borür tabakaları amaçlanmakta ve kullanılmakta olan birçok borlama malzemesi ile elde edilebilmektedir. Tek fazlı borür tabakasının ( $Fe_2B$ ) birçok avantajları vardır; örneğin düşük gevreklik, borlamadan sonradan uygulanan ısıl işlemler için ana metale bağlanma mukavemeti ve borür tabakasının özelliklerini bozmadan yapmak mümkün olmaktadır (Matuschka, 1980).

#### 4.3. Borür Tabakası Yapısı

Alaşımız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı ( $Fe_2B$ ) yada çok fazlı ( $FeB + Fe_2B$ ) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı  $Fe_2B$  fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında  $Fe_2B$  fazına ilaveten  $FeB$  fazıda oluşur (Palombarini and Carbucchio, 1985). Alaşımlı çeliklerde ise bunlara ilaveten alaşım elementine bağlı olarak  $Cr_2B$ ,  $TiB_2$ ,  $NiB_2$ ,  $CoB$  gibi bileşiklerden biri yada birkaçı oluşabilir (Goeuriot et al, 1982). Şekil 4.3.1'de tek fazlı ve iki fazlı borür tabakaları görülmektedir.



**Şekil 4.3.1:** Tek fazlı ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü (Selçuk ve diğerleri, 1995).

İki fazlı borür tabakalarında, farklı genleşme katsayılarına sahip iki faz arasında önemli derecede iç gerilmeler meydana gelir. Borlama işleminden sonra parçaların soğuması sırasında



Fe<sub>2</sub>B fazında basma, FeB fazında ise çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilmeler, hızlı soğutulma yada mekanik zorlanmalar esnasında çatlak oluşumuna sebep olur (Selçuk, 1994).

Borür tabakasının karakteristik özelliği dış şeklinde bir yapıya sahip olmasıdır. Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon oranının artmasıyla bor difüzyonu yavaşlamaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasında hem kalınlık azalmakta, hem de borür tabakası ile ana malzeme ara yüzeyindeki dış şeklindeki yapı düzleşmektedir (Bozkurt, 1984).

#### 4.4. Geçiş Bölgesi

Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçiş bölgesi ile alakalı farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş ; borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur (Matuschka, 1980). Şekil 3.4.1.2'de yüzeyden itibaren karbon miktarının değişimi görülmektedir.

Borür tabakası tarafından karbonun içeri doğru itilmesi sonucu bu bölgede esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunduğu ileri sürülmektedir (Lovshenko et al, 1978). Bozkurt (1984) ise doktora tezinde geçiş bölgesindeki karbon miktarının ana malzemedeki seviyesini koruduğunu, buna karşılık borun yüzeyden içe doğru tedrici olarak azaldığını tespit etmiştir.

Geçiş bölgesi hakkında başka bir görüş; bu bölgedeki borun çeliklerde alaşım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısı işleme hassasiyeti, borun ostenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen ostenit tane irileşmesi de, borun alaşım elementi olarak çeliklerde gösterdiği tipik özelliklerdendir (Bozkurt, 1984).

Geçiş bölgesinin kalınlığı konusunda da farklı değerlendirmeler mevcuttur; Lovshenko ve arkadaşları (1978) geçiş bölgesi kalınlığını borür tabakasının 3-4 katı olarak bildirirken, Bozkurt (1984) bu oranın 10-15 kat olduğunu tesbit etmiştir. Geçiş bölgesinin tane büyüklüğü ise ana malzemeye göre oldukça fazladır.

## 4.5. Borür Tabakasının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

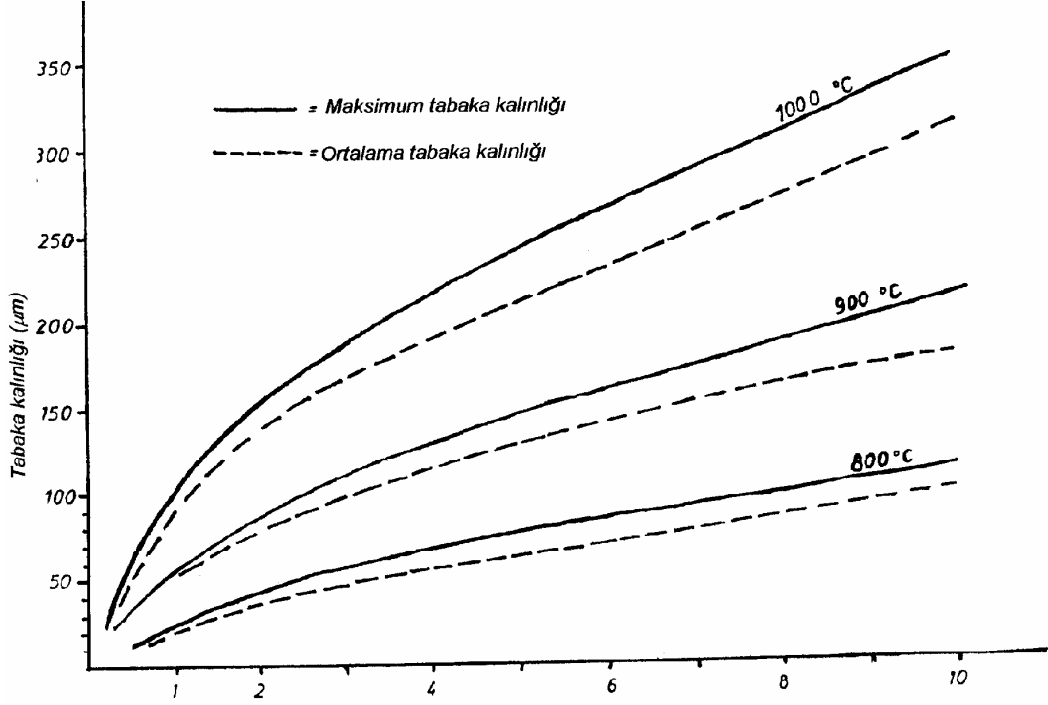
### 4.5.1. Tabaka Kalınlığı

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi, işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu ise işlem sıcaklığı ve süresinin artmasıyla mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda lokal erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir (Bozkurt, 1984). Zaman faktörü ise ekonomik açıdan belli bir değeri aşmayacaktır. Şekil 4.5.1'de Ck 45 çeliği ve Ekabor-1 borlayıcısı kullanılarak yapılan çalışmada tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi görülmektedir.

Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktörde kırılgenliktir. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenliği da artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekmektedir (Fichtl, 1981).

Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon miktarının artması ile bor difüzyonu azalmaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasının hem kalınlığı azalmakta, hemde dış şeklindeki yapısı düzleşmektedir (Bozkurt, 1984).

Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20-200µm tabaka kalınlığı uygundur. Kırılgenlik yönünden alaşımli çeliklerde 100µm, alaşimsiz çeliklerde 200µm kalınlığa, hatta darbesiz aşınmaya maruz parçalarda su vermeme kaydıyla 400µm kalınlığa çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırmasına ilaveten poroziteyide arttırarak tabakanın gevrekliğine yol açar (Selçuk, 1994).

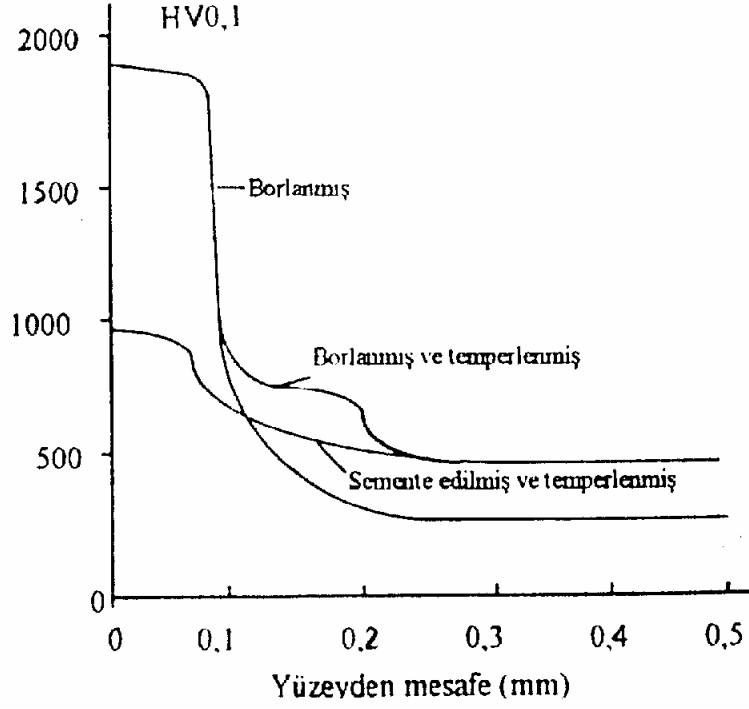


**Şekil 4.5.1:** Ekabor-1 ile borlanmış Ck 45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi (Matuschka, 1980).

#### 4.5.2. Sertlik

Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. FeB fazı Fe<sub>2</sub>B'den daha sert ve gevrektrir (Atik, 1997) Borlama ile elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1800-2000 HV (Lakhtin, 1983), alaşımlı çeliklerde 2500-2800 HV (Geller, 1978), titanyumda ise 3000 HV civarındadır (Bazille, 1977). Şekil 4.5.2'de borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları görülmektedir. Çizelge 4.5.1.'de ise borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik kıyaslamaları yapılmıştır.

Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile Vickers veya knoop uçları kullanılarak yapılır (Matuschka, 1980). Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara sebep olur. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir. Genel olarak 50-100 gr.'lık yüklerle ölçüm yapılır (Özsoy, 1996).



**Şekil 4.5.2.1:** Borlu ve sementasyonlu tabakalardaki sertlik dağılımları (Matuschka, 1980).

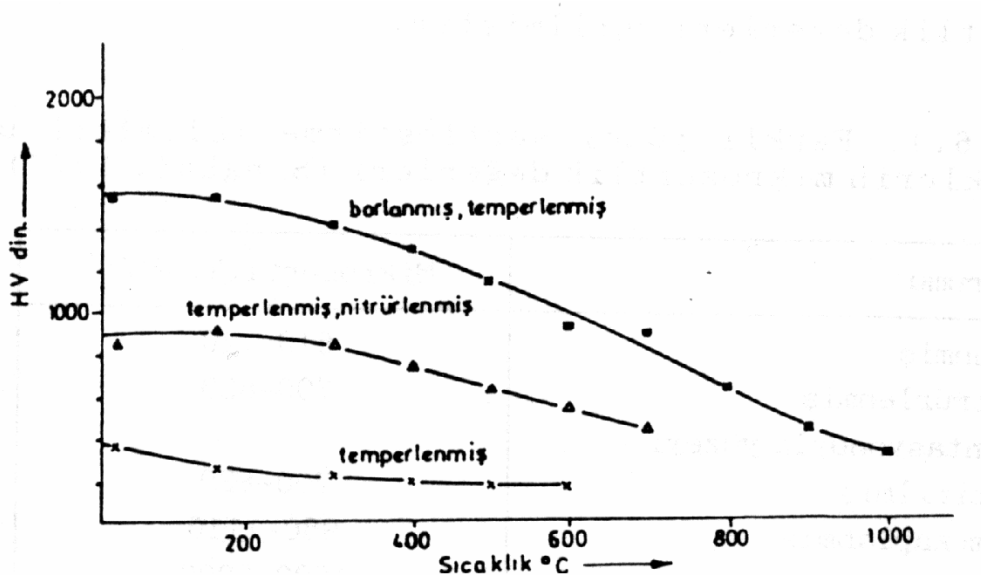
**Çizelge 4.5.1.** Borlama ve diğer işlemlerle elde edilmiş yüzeylerin sertlik değerleri

(Singhal, 1977).

<i>Malzeme</i>	<i>Mikro sertlik (kg/mm<sup>2</sup>)</i>
Nitrürlenmiş yüzey	610-940
Gaz ile karbürize edilmiş yüzey	700-820
Sert krom kaplı yüzey	950-1100
WC+%13 Co Sinter malzeme	1300
Borlu karbon çeliği	1600
Borlu AISI H13 çeliği	1800
Borlu AISI A2 çeliği	1900

Borlama ile elde edilen yüksek sertlik değeri, 900-1000°C'a kadar yüksek sıcaklıklarda kaybolmamaktadır (Geller, 1978). Şekil 4.5.2.2'da 42CrMo<sub>4</sub> çeliğinde elde edilen farklı yüzey tabakalarının dinamik yüksek sıcaklık sertlikleri görülmektedir.

Şekil 4.5.2.2: 42CrMo<sub>4</sub> çeliğinde farklı yüzey tabakalarının dinamik sıcaklık sertlikleri (Ficht,1987)



#### 4.5.3. Aşınma

Sürtünme katsayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla birlikte, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanır (Atik, 1997).

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu, ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürerek yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir (Biddulph, 1977). Borlama ile WC'ün sertliğine eşdeğer sertlik, teflonun (PTFE) sürtünme katsayısına yakın sürtünme katsayısı elde edilir (Linial and Lavella, 1974). Çizelge 4.5.2.'de bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları verilmiştir.

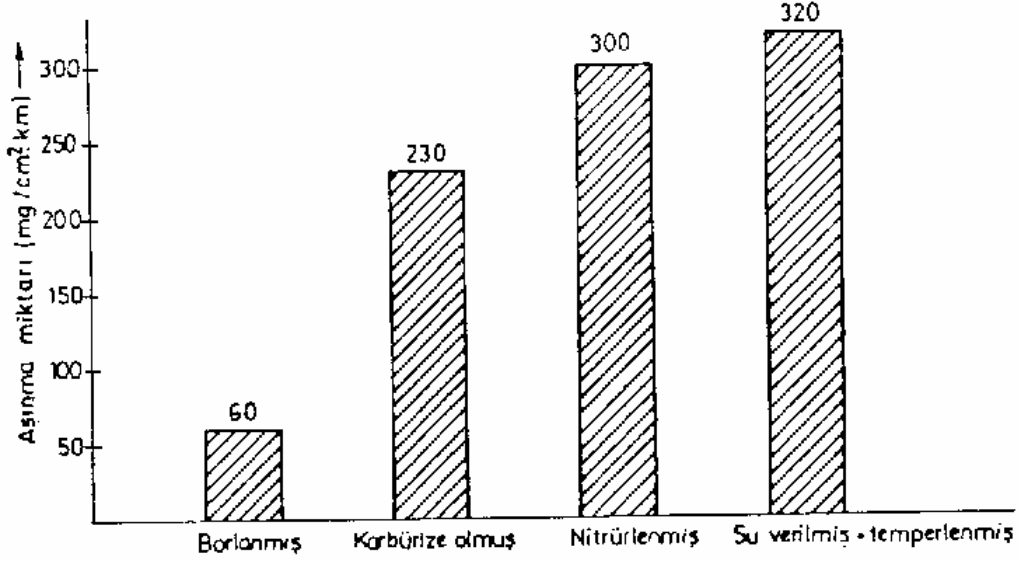
**Çizelge 4.5.2:** Bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları (Linial and Lavella, 1974).

<i>Malzeme</i>	<i>Sürtünme</i>	
	<i>Borlu</i>	<i>Borsuz</i>
Düşük Karbonlu Çelik	0.17-0.19	0.585-0.595
Takım Çeliği	0.07-0.04	0.16-0.18
WC+Co Sinter malzeme	0.1939-0.2335	0.2617-0.2773

Borlanmış çeliklerin aşınma dirençleri sementasyon, nitrürasyon, sert krom kaplama ve su vererek sertleştirme ile elde edilen yüzeylere göre oldukça yüksektir. Şekil 4.5.3.'da bu durum görülmektedir.

Darbesiz aşınmanın söz konusu olduğu uygulamalarda, borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş malzemeler başarı ile kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik için derin çekme kalıbı sert krom kaplı AISI A6 çeliğinden yapıldığında 2000 parça üretilirken, aynı çelik borlandığı takdirde 50000 parça ürettiği belirtilmektedir (Andrew and Linial, 1974).

Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, sementasyonda sertleştirilmiş tabakanın yumuşamasına sebep olurken borlu tabakaya etki etmez. Borlu tabakanın 900-1000°C sıcaklıklara kadar sertliğini koruması, aşınma direncini yüksek sıcaklıklarda da muhafaza etmektedir (Özsoy, 1996).



**Şekil 4.5.3.** Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları (Bels'kii et al, 1980).

#### 4.5.4. İç Gerilmeler

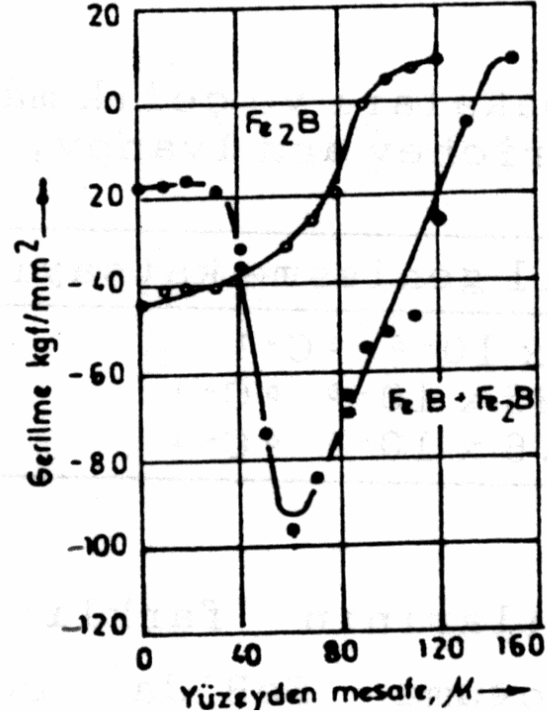
Metallerde borlama işlemi sonrası borür tabakasında ve borür tabakası – ana metal arasında iç gerilmeler oluşur. Malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve uygulanan ısı işlemler iç gerilmelere etki eden faktörlerdir. Tabakanın faz yapısı (Tek fazlı veya çift fazlı) ve geometrisi de (düz veya girintili çıkıntılı) iç gerilmelerin oluşumuna etki eder (Bozkurt, 1984). İdeal bir tabaka için tek fazlı ve tabaka geometrinin girintili çıkıntılı olması istenir.

İç gerilmeler, FeB, Fe<sub>2</sub>B ve ana malzemenin ısıl genleşme katsayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 4.5.3.'de borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları verilmektedir.

**Çizelge 4.5.3:** Borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları (Rile, 1974).

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı
Saf Demir	$15.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
FeB	$23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Fe <sub>2</sub> B	$7.85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Çift fazlı borür tabakalarında borlama sonrası  $\text{Fe}_2\text{B}$ 'de basma,  $\text{FeB}$ 'de çekme gerilmeleri oluşur (Fichtl and Über,1974). Bu gerilmeler, tabakanın çatlamasına ve  $\text{FeB}$  fazının pullanarak dökülmesine sebep olur. Tek fazlı ve çift fazlı tabakalardaki iç gerilme dağılımı Şekil 4.5.4.'de görülmektedir.



**Şekil 4.5.4:** Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakasındaki iç gerilme dağılımı (Babushkin and Polyakov, 1973).

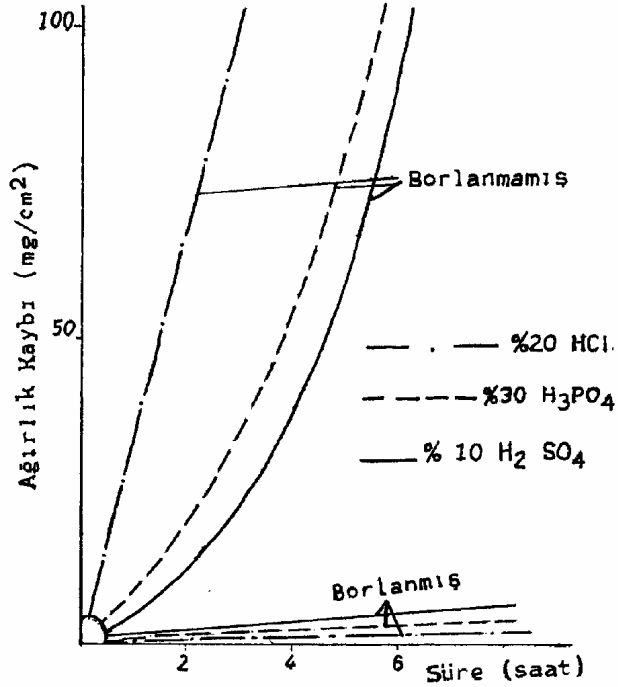
Borlamadan sonraki uygulanan ısıl işlemler de iç gerilmelere etki etmektedir. Soğuma hızı arttıkça iç gerilmeler azalmakta ve en yüksek iç gerilmeler borlamadan sonra fırında soğutma şartlarında gerçekleşmektedir (Babushkin and Polyakov, 1973).



#### 4.5.5. Korozyon Direnci

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı iyi bir direnç gösterir. Özellikle HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> gibi asitlerle alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir (Matuschka, 1980). Borlanmış ve borlanmamış Ck 45 çeliğinin bazı asit ortamlarındaki korozyon direnci Şekil 4.5.5.'de verilmiştir.

**Şekil 4.5.5:** Ck 45 çeliğinin 56°C'de, bazı asitlere karşı korozyon direnci (Matuschka, 1980).



Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan krom borür meydana gelir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilmeyebilir (Bozkurt, 1984).

## 5. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 5.1 Deney Amacı:

Bu araştırmanın yapılaş amacı: katı borlama işlemi sonrasında, çeliklerin yüzey kalitesindeki değişimi ve yüzey pürüzlülüğünün aşınma davranışına etkisini incelemektir. Amaca yönelik ayrıntılı bir çalışma yapabilmek için öncelikle birbirinden farklı malzemeler edinilmiştir. Bu malzemeler üzerine oluşturulan özel yüzeylerin, yine farklı parametrelerde katı borlandıktan sonra, geçirdikleri yüzey değişimini incelemek ve buna ek olarak aşınma karakteristiklerini inceleyerek, pürüzlülüğün aşınma davranışına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Ayrıntılı inceleme olanağı için kolay bulunabilir 3 adet çelik türü edinilmiş ve bu çelikler yine piyasadan temin edilebilen 6 adet farklı zımpara çeşidi ile yüzey işlemine tabi tutulduktan sonra, 2-4-6 saatlik ayrı borlama işlemlerine yapılmıştır. Tüm bu işlemler sonucu meydana gelen 54 numune arasından özellikle seçilen numuneler ise 10 dakikalık peryotlarda; 10'ar, 30'ar ve 18'er çevrimde aşındırmalara tabi tutulmuşlardır ve değişimler izlenmiştir.

### 5.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneye başlayabilmek için temin edilen ilk ana malzemeler 3 farklı yapıya sahip çelik türüdür. Deney sonuçlarını rahat irdeleyebilmek amacıyla çelikler öncelikle piyasadan rahat temin edilebilecek şekilde seçildi. Seçilen çeliklerden 2'si benzer yapıda diğeri ise bu 2 adet çeliğe uzak bir bileşimde seçildi. Malzeme seçimindeki bu kıstas ilerdeki deneylerde değişimleri daha iyi ayırt edebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu çeliklerden 2 tanesi AISI 1020 ve AISI 1040 ıslah çeliği ile AISI 2344 sıcak takım iş çeliğidir. İlk olarak deneyde kullanılmak üzere bu çeliklerden her birinden 18'er adet olmak üzere 54 adet  $\phi$  30 mm çapında ve 4,5-5 mm et kalınlığında numuneler temin edildi. İşlemin 2. ana malzemesi olarak temin edilen ise Ekabor I adlı ticari amaçlı bor tozudur. Daha sonra Borlama İşleminde kullanılmak üzere numunelerin içinde borlanacağı çelik borlama kapları hazırlandı. Numunelerin yüzeylerinde farklı pürüzlülükler oluşturmak için 80'lik, 150'lik, 240'lık, 600'lük, 1000'lik ve keçe olmak üzere 6 farklı su zımparası ve aşınma deneyinde kullanılmak üzere aşınma makinası tutucusu ve aşındırıcı çelik bilyeler temin edildi. Aşındırıcı olarak kullanılan bilyeler ise; rulman çelik bilyesidir. Sertlik ölçme cihazında yapılan deneyde ise 300 gr ile 10 s boyunca yapılan baskıda sertliklerinin 826,8-910 HV olduğu tesbit edilmiştir.

Deney boyunca kullanılacak olan AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 2344 çeliklerinin kimyasal bileşimleri Tablo 5.2.1'de verilmiştir.

**Tablo 5.2.1:** Deneylerde kullanılan çeliklerin kimyasal bileşimleri (%ağırlık cinsinden)

AISI-SAE	(%)C	(%)Mn	(%)Si	(%)Pmax	(%)Smax	(%)Cumax	(%)Cr	(%)Mo	(%)V
1020	0,18-0,25	0,30-0,60	0,15-0,35	0,045	0,045	--	--	--	--
1040	0,36-0,44	0,60-0,90	0,15-0,20	0,025	0,030	0,20	--	--	--
2344	0,37	0,30	0,90	--	--	--	4,80	1,20	0,90

### 5.3.Deneye Başlangıç ve Numunelerin Adlandırılması

AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 2344 çelikleri deneyler boyunca birbirlerinden ayırt edilebilmeleri için; numunelerin her biri çentik atılarak, nokta vurularak ve kanal açılarak adlandırılmıştır. Noktalar borlama saatini (1 nokta=2 saat, 2 nokta=4 saat, 3 nokta=6 saat), çentikler yüzey kalitesini ( 1 çentik= 80'lik zımpara, 2 çentik= 150'lik zımpara, 3 çentik= 240'lık zımpara, 4 çentik= 600'lük zımpara, 5çentik= 1000'lik zımpara, 6 çentik= keçe ), kanallar ise malzemeyi belirtiyor ( 1 kanal=1020, 2 kanal=1040, kanalsız= 2344 çeliğidir). Bu çeliklerde borlama öncesi ve sonrası pürüzlülük farkını görebilmek için; borlama öncesi 80'lik, 150'lik, 240'lık, 600'lük, 1000'lik su zımparaları ve Keçe ile farklı yüzey pürüzlülükleri elde edildi. İşlem için Resim 5.3.1' de ki Su Zımparası Makinası kullanılmıştır. Numaralandırma Tablo 5.3.1de gösterilmiştir.



**Şekil 5.3.1.** Su Zımparası Makinası

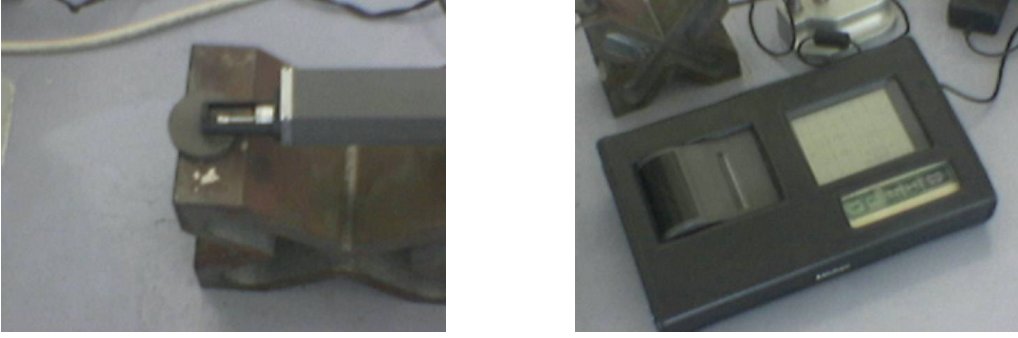
**Tablo 5.3.1** AISI 1020, AISI 1040, AISI 2344 Çeliklerin Numaralandırılması

<b>Numune No:</b>	<b>Malzeme</b>	<b>Borlama saati</b>	<b>Aşındırıcı</b>
1211	AISI 1020	2 saat	80'lik zımpara
1221	AISI 1020	2 saat	150'lik zımpara
1231	AISI 1020	2 saat	240'lık zımpara
1241	AISI 1020	2 saat	600'lük zımpara
1251	AISI 1020	2 saat	1000'lik zımpara
1261	AISI 1020	2 saat	keçe
1411	AISI 1020	4 saat	80'lik zımpara
1421	AISI 1020	4 saat	150'lik zımpara
1431	AISI 1020	4 saat	240'lık zımpara
1441	AISI 1020	4 saat	600'lük zımpara
1451	AISI 1020	4 saat	1000'lik zımpara
1461	AISI 1020	4 saat	keçe
1611	AISI 1020	6 saat	80'lik zımpara
1621	AISI 1020	6 saat	150'lik zımpara
1631	AISI 1020	6 saat	240'lık zımpara
1641	AISI 1020	6 saat	600'lük zımpara
1651	AISI 1020	6 saat	1000'lik zımpara
1661	AISI 1020	6 saat	keçe
2211	AISI 1040	2 saat	80'lik zımpara
2221	AISI 1040	2 saat	150'lik zımpara
2231	AISI 1040	2 saat	240'lık zımpara
2241	AISI 1040	2 saat	600'lük zımpara
2251	AISI 1040	2 saat	1000'lik zımpara
2261	AISI 1040	2 saat	keçe
2411	AISI 1040	4 saat	80'lik zımpara
2421	AISI 1040	4 saat	150'lik zımpara
2431	AISI 1040	4 saat	240'lık zımpara
2441	AISI 1040	4 saat	600'lük zımpara
2451	AISI 1040	4 saat	1000'lik zımpara
2461	AISI 1040	4 saat	keçe
2611	AISI 1040	6 saat	80'lik zımpara
2621	AISI 1040	6 saat	150'lik zımpara

2631	AISI 1040	6 saat	240'lık zımpara
2641	AISI 1040	6 saat	600'lük zımpara
2651	AISI 1040	6 saat	1000'lik zımpara
2661	AISI 1040	6 saat	keçe
3211	AISI 2344	2 saat	80'lik zımpara
3221	AISI 2344	2 saat	150'lik zımpara
3231	AISI 2344	2 saat	240'lık zımpara
3241	AISI 2344	2 saat	600'lük zımpara
3251	AISI 2344	2 saat	1000'lik zımpara
3261	AISI 2344	4 saat	keçe
3411	AISI 2344	4 saat	80'lik zımpara
3421	AISI 2344	4 saat	150'lik zımpara
3431	AISI 2344	4 saat	240'lık zımpara
3441	AISI 2344	4 saat	600'lük zımpara
3451	AISI 2344	4 saat	1000'lik zımpara
3461	AISI 2344	4 saat	keçe
3611	AISI 2344	6 saat	80'lik zımpara
3621	AISI 2344	6 saat	150'lik zımpara
3631	AISI 2344	6 saat	240'lık zımpara
3641	AISI 2344	6 saat	600'lük zımpara
3651	AISI 2344	6 saat	1000'lik zımpara
3661	AISI 2344	6 saat	keçe

Numune nolarının sonunda yer alan (1) numarası. Numunelerin işaretli yüzünü ifade etmektedir. (2) numara ise (1) numaralı aynı numunenin isaretsiz yüzünü temsil etmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda her iki yönde aynı sonuçları verdiğiinden dolayı ilerki safhalarda karmaşayı önlemek ve numune çeşitliliğine etkisini ortadan kaldırmak amacıyla bu uygulama kullanılmamıştır.

Zımpara işleminde oluşan yüzeylerin pürüzlülük değerlerinde yanlışlık olmaması için zımpara çizgilerinin aynı yönde oluşmasına, farklı yöndeki çizgilerin yok edilmesine dikkat edilmiştir. Oluşturulan yüzeylerdeki, pürüzlülük değerlerinin ölçümü için, aşağıda ki resimde gösterilen pürüzlülük ölçüm cihazı (Mitutoyo pirofilometre ) kullanılmıştır. İstenilen düzgünlükte pürüzlülük elde edildikten sonra, numunede oluşacak bor boyut değişiminin ölçümü için, borlanacak her bir numunenin kalınlıkları Mitutoyo dijital mikrometre ile ölçülmüştür.



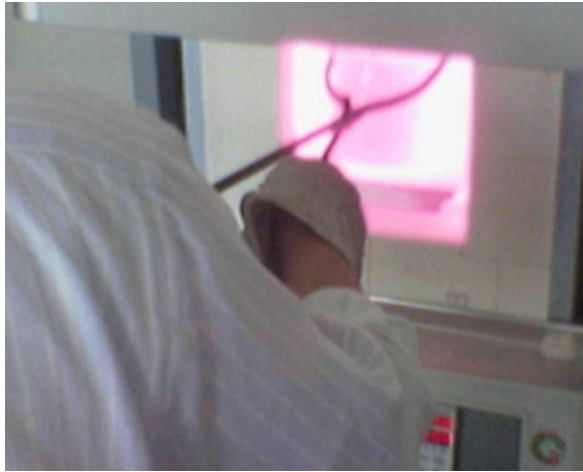
**Şekil 5.3.2.** Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

#### **5.4.Borlama İşlemi**

Borlama ısıl işlem deneyleri; 1200-1400 °C sıcaklık kapasiteli  $\pm 5$  °C hassasiyetli, mikro işlemci kontrollü, elektrik rezistanslı , dijital göstergeli fırınlarda yapılmıştır.

Bu deneyde AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 2344 çeliklerine, 900 °C ' de dijital kontrollü fırınlarda 2'şer, 4'er ve 6'şar saat olmak üzere 3 farklı parametrede katı borlama işlemine tabi tutulmuştur.

Borlanmış numunelerin soğutma işlemi ise laboratuvar ortamında ortam sıcaklığında bekletilerek yapılmıştır.



**Şekil 5.4.1** Borlama Kabının Fırından Çıkarılması



Şekil 5.4.2 Borlama Kabininin Ortam sıcaklığında Soğutulması

### 5.5. Borlama Öncesi ve Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü

Borlama işleminin çeliğin yüzeyinde oluşturduğu pürüzlülük değişimini görmek için; borlama öncesi numunelerin ve borlanmış numunelerin yüzeyleri, Profilometre ile ölçülmüştür.

Grafikler hakkında bilgiler :

A1 : Keçe ile elde edilmiş yüzeylerdir.

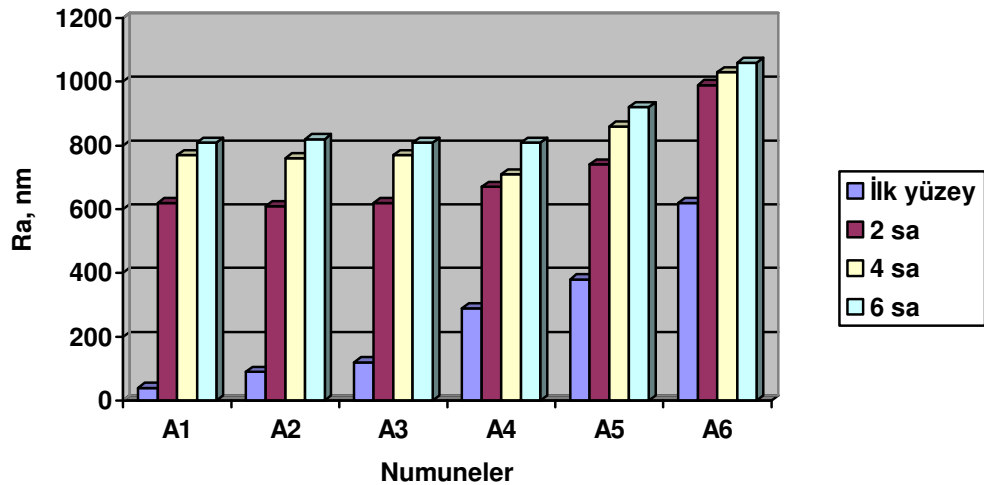
A2 : 1000' lik zımpara ile elde edilmiş yüzey

A3 : 600' lük zımpara ile elde edilmiş yüzey

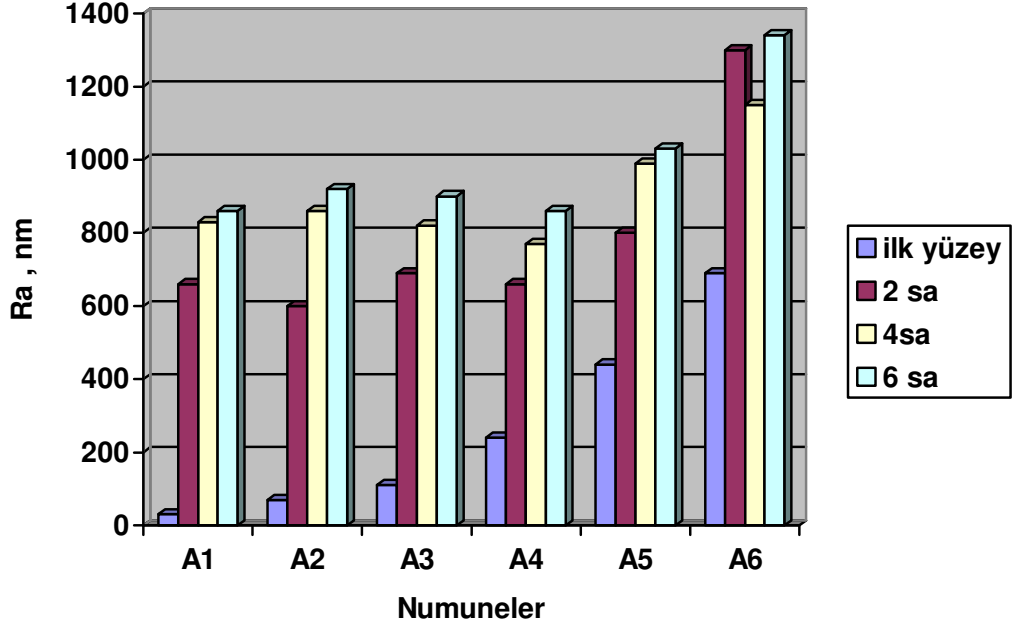
A4 : 240' lık zımpara ile elde edilmiş yüzey

A5 : 150'lik zımpara ile elde edilmiş yüzey

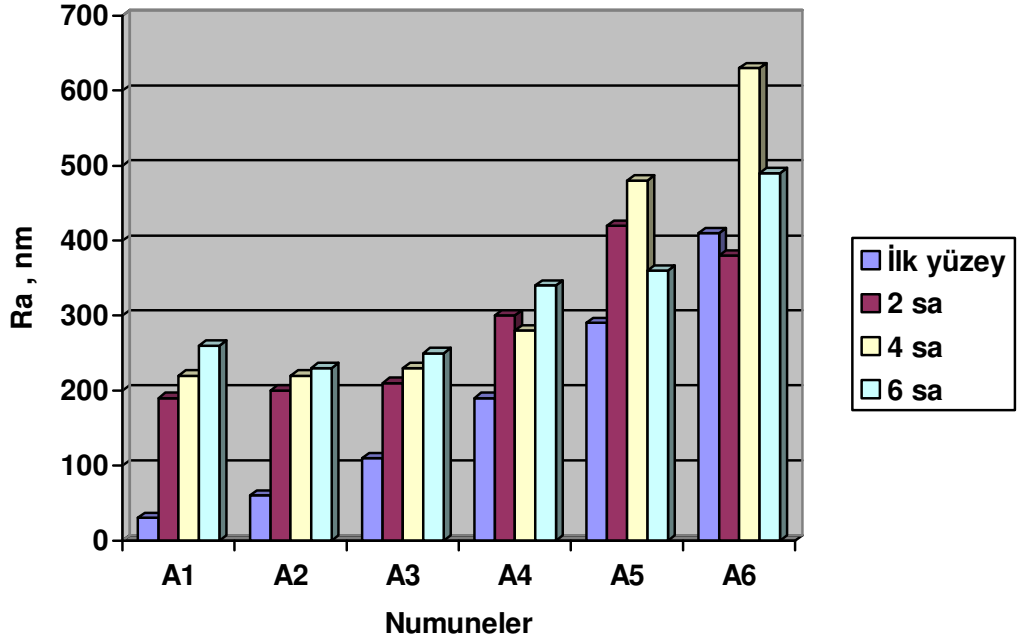
A6 : 80'lik zımpara ile elde edilmiş yüzey



Şekil 5.5.1. AISI 1020 çeliğin yüzey pürüzlülüğü değişimi



Şekil 5.5.2. AISI 1040 çeliğin yüzey pürüzlülüğü değişimi



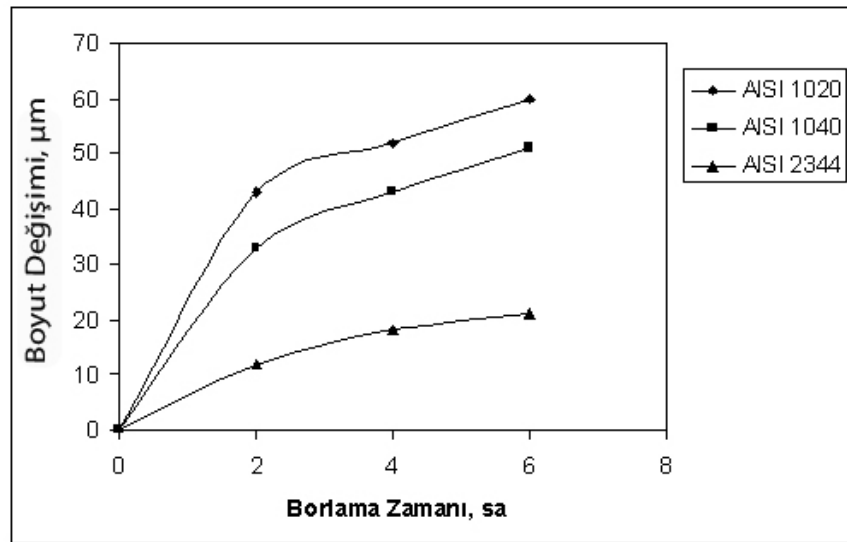
Şekil 5.5.3. AISI 2344 çeliğin yüzey pürüzlülüğü değişimi



Borlama sonrası yapılan ölçümlerden meydana gelen grafiklerde de gördüğümüz üzere ; belirli aşındırıcılarla 3 değişik çelik üzerinde oluşturulan borlama öncesi yüzey pürüzlülükleri tamamen aynı olmasada yaklaşık değerler vermektedir. Ayrıca bu değerler aşındırıcıların değerlerine uygun olarak artış göstermektedir. Ancak bu artıştaki düzgün değişimi borlama sonrası göremedik. Çelik numuneler hem kendi içlerinde hemde birbirleri arasında; farklı parabolik değişimler gösterdiler. Genel itibariyle, istisnalar olsada, borlama süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünde artıyor.

Diğer gözlemlenen bir sonuç ise tüm çelik numuneleri için benzer özelliktedir. Borlama öncesi başlangıç yüzeyi düşük pürüzlü olan numunelerin borlama sonrası yüzey pürüzlülüklerinde yüksek bir artış görülmektedir. Ancak başlangıç pürüzlülüğü arttıkça, yüzey pürüzlülüğü yine artsada bu artış git gide azalmaktadır. Yani borlama öncesi ve sonrası fark, ilk yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla ters orantılı azalıyor. Grafiklere dikkatle bakıldığında her çelik gurubunun her borlama saati için özel bir kritik yüzey pürüzlülük değeri var. Bu kritik değer, borlanmış numunelerin değişiminin neredeyse aynı olduğu aralıktır. Örnek olarak AISI 1020 nin 2 saatlik borlaması için bu değer 600 nm dir. 8 saatlik borlama içinse kritik değer 800 nm dir. Borlama öncesi yüzey pürüzlülüğü, kritik pürüzlülük değerinin altında olan numunelerin; borlama sonrası pürüzlülük artışı çok yüksektir. Borlama öncesi yüzey pürüzlülük değeri bu kritik değer üzerinde olan numuneler içinse bu artış oranı daha düşüktür.

## 5.6. Boyut Değişimi

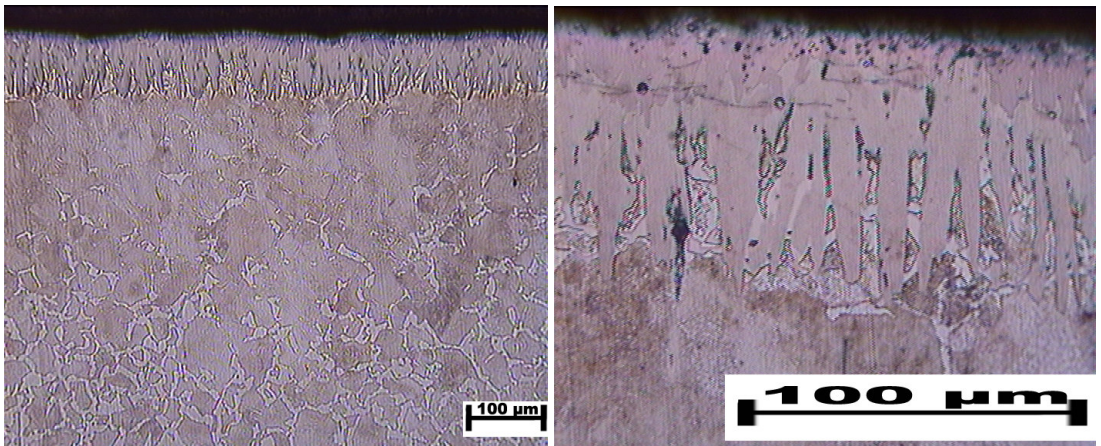


Şekil 5.6.1. Borlama Süresiyle Tabaka Kalınlığının Değişimi

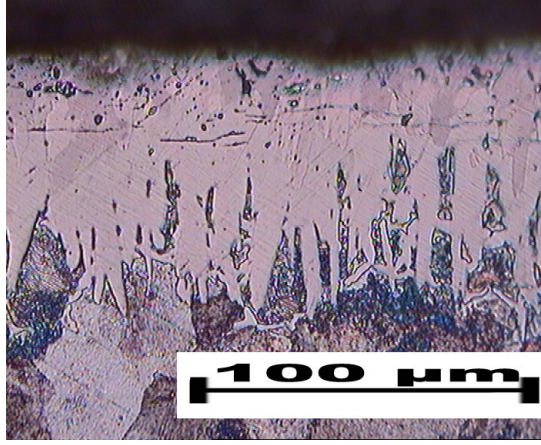
Borlama süresine göre boyut değişimi grafiğine baktığımızda; verilerin daha belirgin ve oransal olduğunu görmekteyiz. Elimizdeki 108 ayrı yüzey üzerinden alınan, borlama öncesi ve sonrası boyut değişimi verileri grafiğe aktarıldığında Şekil 5.6.1 ortaya çıkmaktadır. Grafiğimizden de anlaşılacağı gibi; tüm numunler borlama süresi arttıkça, boyut olarak artışa uğramaktalar. 2-4-6 saatlik borlama işlemlerinin sonucunda herhangi bir numunede bir önceki durumuna nazaran yada daha düşük bir zaman dilimine oranla boyutta düşüşe rastlanmadı. Grafik verilerine dikkatle bakıldığında AISI 1020 çeliği diğer çelikler ile aynı şartlar altında, daha büyük boyut değişimi oluşturmaktadır. Buradan çıkarılan ilk sonuç, 1020 nin yüzeyine daha rahat bor difüzyonu olduğudur. Bu verileri AISI 1040 ve 2344 takip etmektedir. Eğer malzemelerimizin kimyasal bileşim yapılarına geri döner ve bu bilgileride daha önce anlattığımız bor tabakasına etki eden faktörlerden; alaşım elementinin ve C miktarının anlatıldığı Şekil 3.4.1.1-3.4.1.2 la karşılaştırsak belirli bir sonuca varabiliriz. AISI 1020 çeliğinin diğer çeliklerden daha fazla boyut değişimine sahip olabilmesi alaşımsız yapısı ve daha az C oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. AISI 1040 çeliğide alaşımsız çeliklerden sayılsa da, 1020 çeliğine oranla neredeyse 2 kat C oranına sahip olması nedeniyle, borun çelik içine difüzyonu zorlaşmaktadır. 2344 çeliğinin bor gelişimini olumsuz etkileyen ise yapısındaki alaşım elementlerinin çokluğudur.

### 5.7. Borlama Sonrası Mikroyapı ve XRD Diyagramları

Borlama sonrası mikroyapının değişimini ve bor tabakasını görsel açıdan inceleyebilmek amacıyla belirli numuneleri 54 numune arasından seçerek mikroyapı fotolarını çektik. Borlama sonrası değişimleri en belirgin biçimde izleyebilmek için özellikle her çelik malzemenin özellikle 2 , 4 ve 6 saat borlanmış, yüzey işlemi olarakta 80'lik ve keçelenmiş numuneleri arasındaki fark baz alınmıştır. Seçilen numuneler: 1211, 1262, 1411, 1451, 1611, 1661, 2231, 2261, 2411, 2461, 2611, 2661, 3211, 3261, 3411, 3461, 3611, 3661'dir.

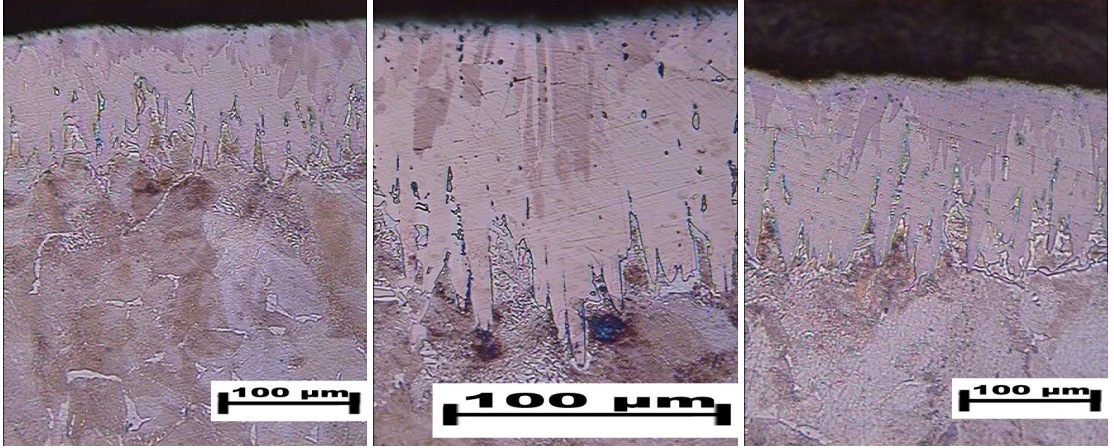


Şekil 5.7.1 ve 2 : 1211x10 ve 1211x40 'lık büyütülmüş halleri



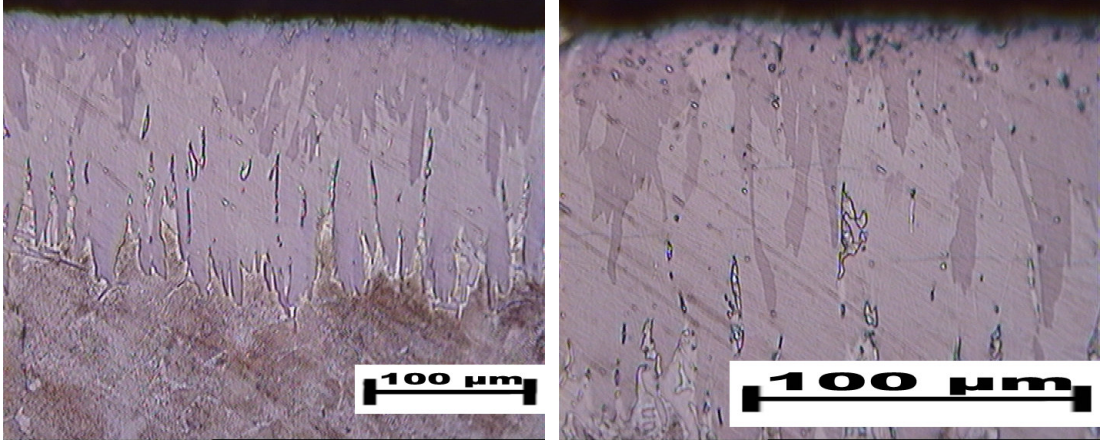
**Şekil 5.7.3:** 1262x40 'lık büyütülmüş hali

1020 çeliğinin 80'lik zımpara ve keçe ile pürüzlendirilmiş ve 2 saatlik borlanmış bu numunelerinden örnekler görmekteyiz. Bu mikroyapı fotolarından anlıyacağımız üzere; her iki numunede tabaka kalınlığı neredyse aynı (50 $\mu$ m). Özellikle keçe ile yapılan numunenin bor tabakası daha düzensiz sarkıtlarla ana malzemeye uzanır.



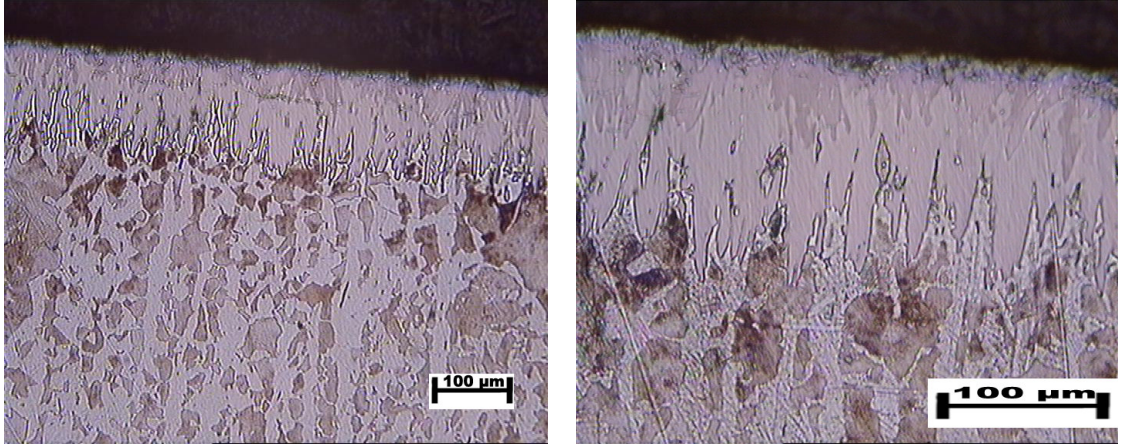
**Şekil 5.7.4-5 ve 6 :** 1411x20, 1411x40 ve 1451x20 'lik

1020 çeliğinin 80'lik zımpara ve 1000'lik zımpara ile aşındırılmış ve 4 saat borlanmış numunelerinin mikroyapı fotolarını görmekteyiz. Her 2 numunenin tabaka kalınlıkları ortalama 75 $\mu$ m'dir. Numunelere dikkatle bakıldığında ana malzemeye doğru oluşturdukları kolonsal yapısında oldukça benzer olduğunu görebiliriz.



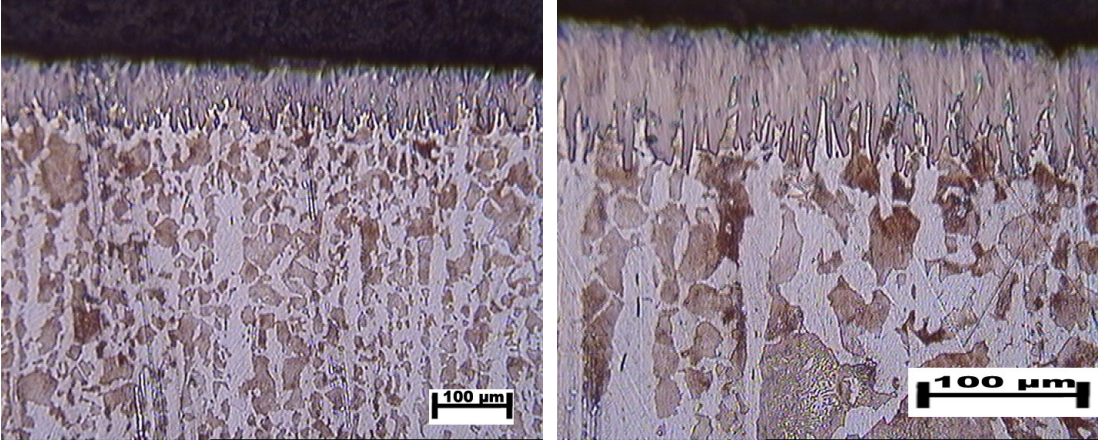
**Şekil 5.7.7 ve 8:** 1611x20'lik büyütme ve 1611x40'lık büyütme

1020 çeliğinin 80'lik zımpara ile aşındırılmış yüzeylerinin 6 sat borlanmış numunelerini görmekteyiz. Numunenin oluşturduğu bor tabaka kalınlığı 100µm civarındadır. Bor tabakası ana mazlemeye doğru düzgün kolonsal yapılar oluşturmuştur.



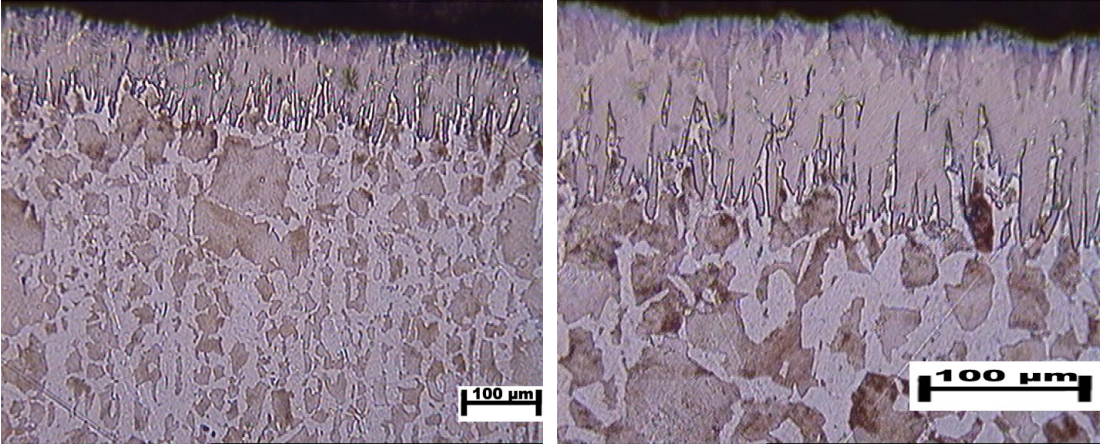
**Şekil 5.7.9 ve 10:** 2231x10 ve 2231x20 'lik büyütmeler

AISI 1040 çeliğinin 240'lık zımpara ile aşındırılmış ve 2 sat borlanmış numunesinin mikroyapı fotolarını görmekteyiz. Bor tabakası kalınlığı 60µm civarındadır. Tabaka ana mazlemeye düzensiz kolonsal yapıyla uzanmaktadır.

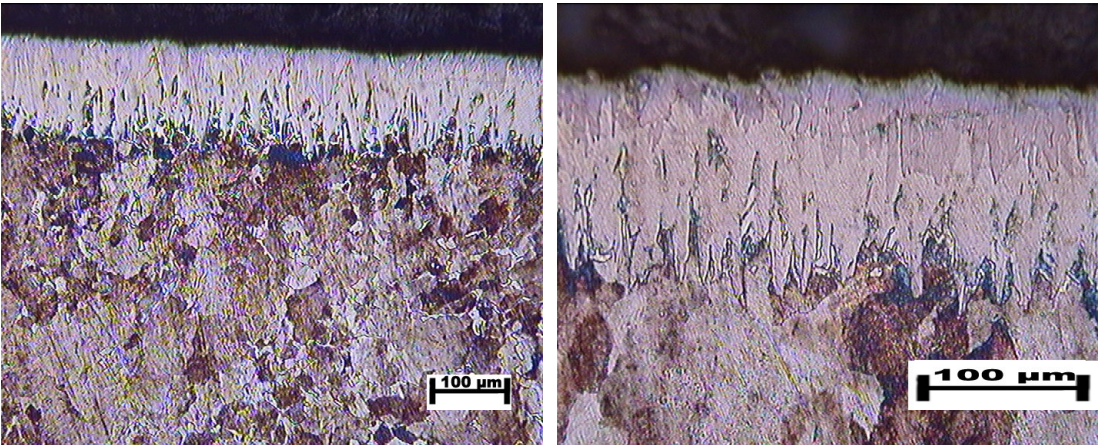


**Şekil 5.7.11 ve 12:** 2261x10 ve 2261x20 'lik büyütülmüş

1040 çeliğinin keçe ile aşındırılmış ve 2 saat borlanmış numunelerini görmekteyiz. Bor tabakası kalınlığı yaklaşık 60μm dir. Keçelenmiş numunenin bor tabaka sarkıtları daha düzensiz.

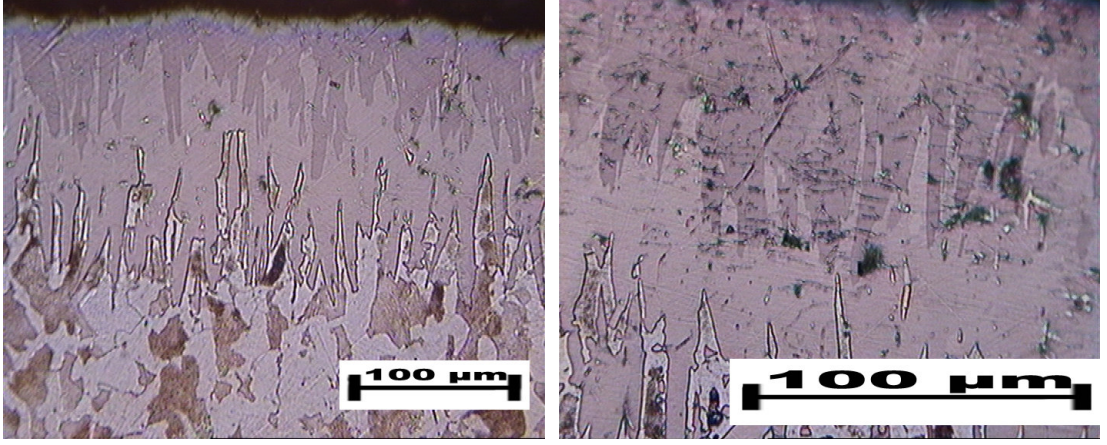


**Şekil 5.7.13 ve 14:** 2411x10 ve 2411x20 'lik büyütülmüş

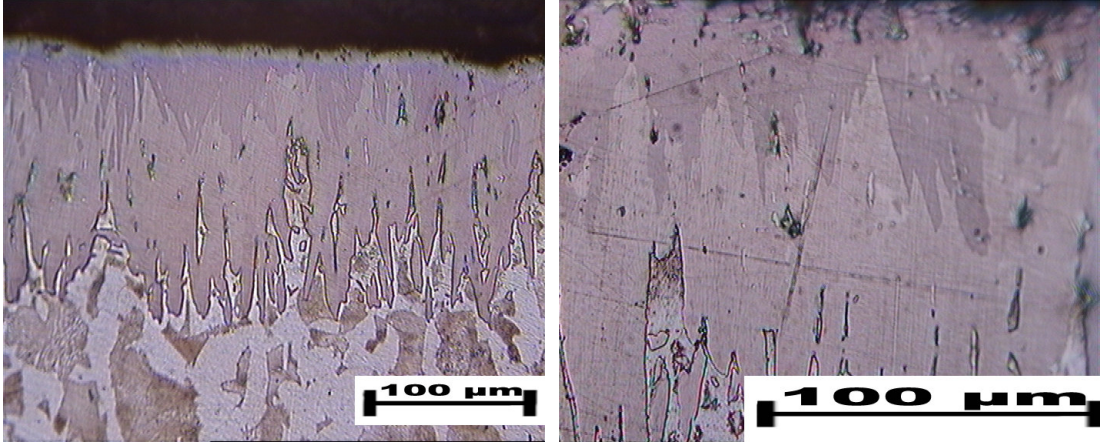


**Şekil 5.7.15 ve 16:** 2461x10 ve 2461x20 'lik büyütülmüş

1040 çeliğinin 80'lik zımpara ve keçe ile aşındırılmış ve 4 saat borlanmış numuneleri görmekteyiz. Bor tabakalarını genişliği aynı ve 80 $\mu$ m'dir. Bu örneklerde ise 80'lik zımpara ile aşındırılanın bor tabaka sarkıtları daha düzensiz.

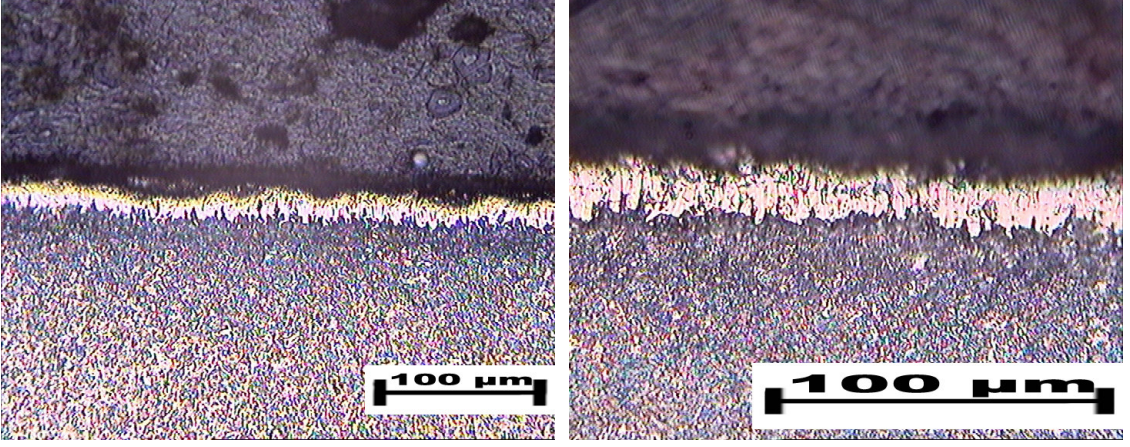


**Şekil 5.7.17 ve 18:** 2611x20 ve 2611x40 'lık büyütülmüş

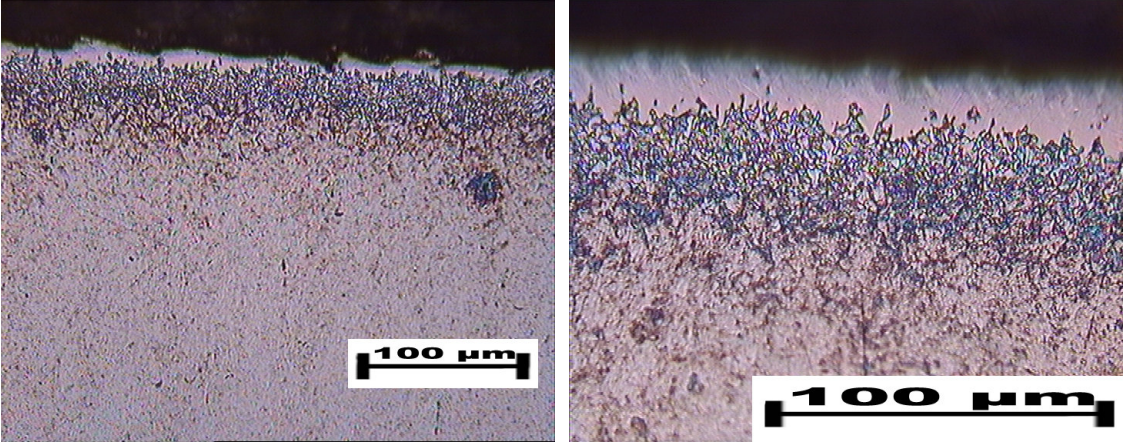


**Şekil 5.7.21 ve 22:** 2661x20 ve 2661x40 'lık büyütülmüş

1040 çeliğinin 80'lik zımpara ve keçe ile aşındırılmış ve 6 saat borlanmış örneklerini görmekteyiz. Her 2 numunedede yaklaşık bor tabakası 100 $\mu$ m civarındadır. Her 2 numuneninde tabaka olarak oluşturdukları kolonsal yapı aynı sayılır.

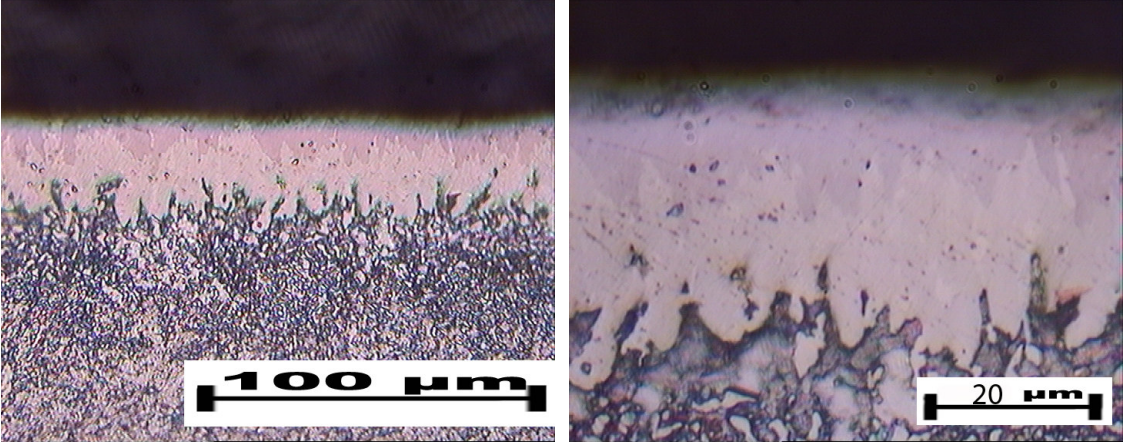


**Şekil 5.7.23 ve 24:** 3211x20 ve 3211x40 'lik büyütülmüş

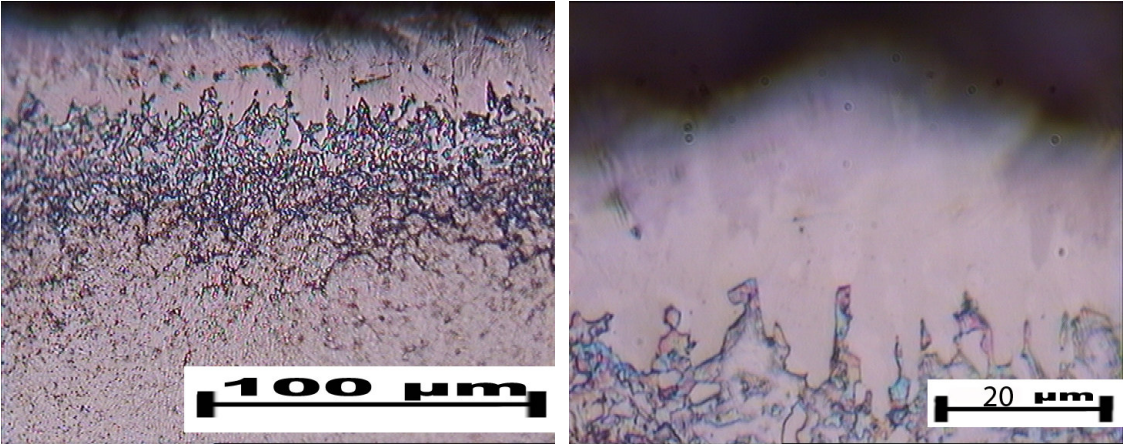


**Şekil 5.7.25 ve 26:** 3261x20 ve 3261x40 'lik büyütülmüş

2344 çeliğinin 80'lik zımpara ve keçe ile aşındırılmış ve 2 saat borlanmış numuneleri görmekteyiz. Şekillerden edindiğimiz en büyük bilgi; bor tabakasının çok ince olduğudur. Her 2 numune içinde tabaka kalınlığı yaklaşık  $20\mu\text{m}$ 'dir. Burada gördüğümüz ve ilk örneklerden ayrılan bir diğer farklı özellik ise, bor tabakasının ana malzemeye kolonsal şekilde değil düz biçimde giriş yapmasıdır.



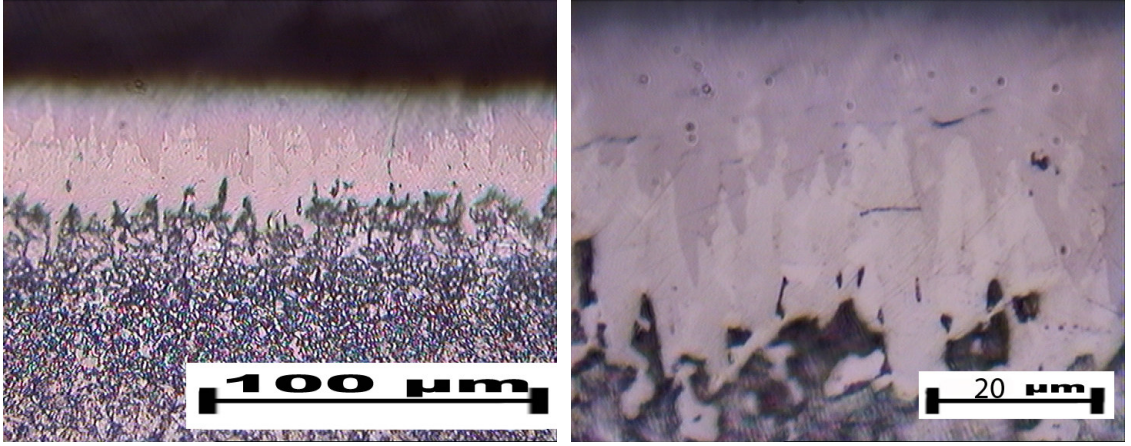
Şekil 5.7.27 ve 28: 3411x40 ve 3411x100 'lük büyütülmüş



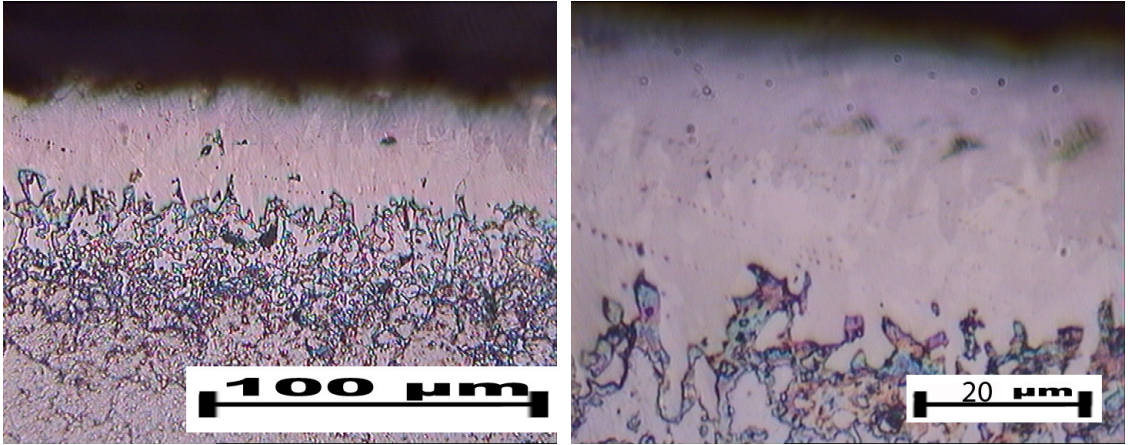
Şekil 5.7.29 ve 30: 3461x40 ve 3461x100 'lük büyütülmüş

2344 çeliğinin 80'lik zımpara ve keçe ile aşındırılmış numunelerinin mikroyapı fotolarını görmekteyiz. Her 2 numuneninde yaklaşık bor tabakası kalınlığı ise 25µm civarındadır. Çok büyütülmüş fotolarda dahi tabakanın ana malzemeye paralel geliştiğini görmekteyiz.





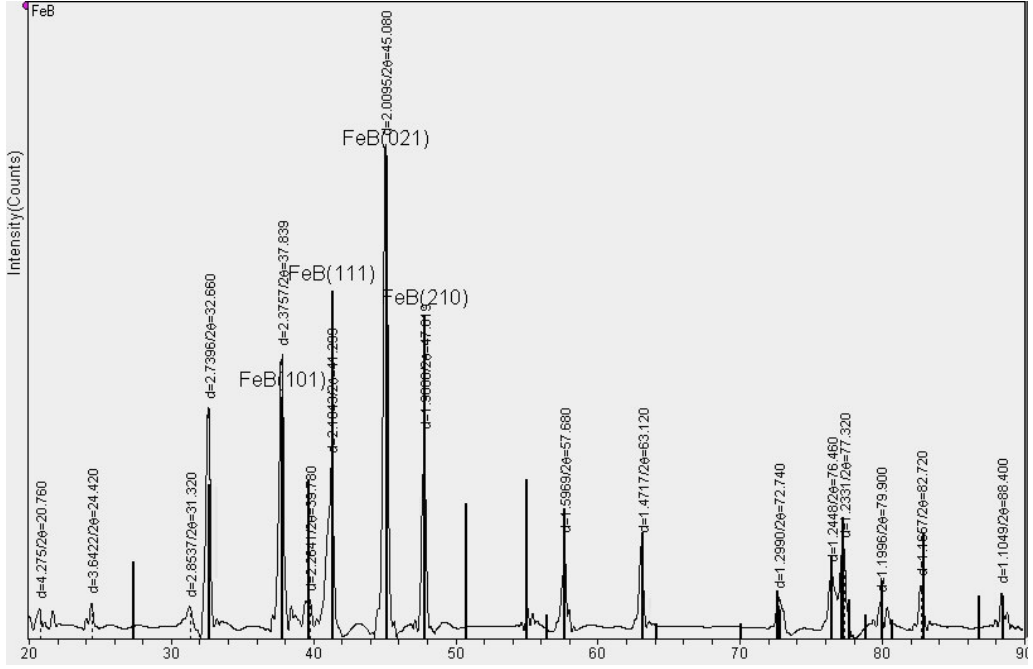
Şekil 5.7.31 ve 32: 3611x40 ve 3611x100 'lük büyütülmüş



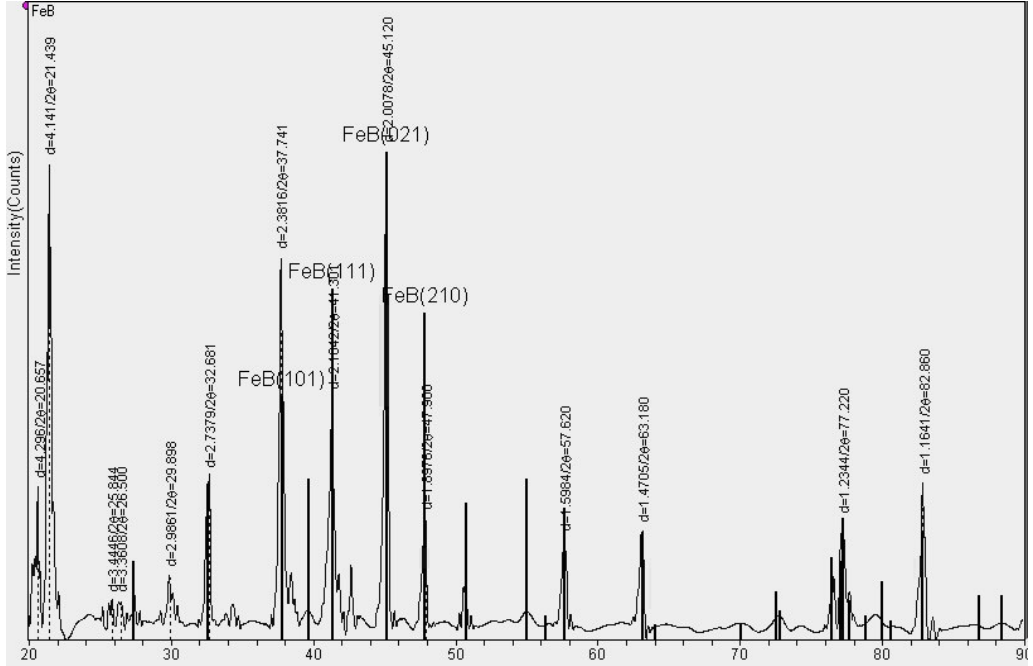
Şekil 5.7.33 ve 34: 3661x40 ve 3661x100 'lük büyütülmüş

2344 çeliğinin 80'lik zımpara ve keçe ile aşındırılmış numunelerinin mikroyapı fotolarını görmekteyiz. Numunelerin ortalama bor tabakaları 40μm civarındadır. Tabaka yapısı ile ana malzeme arası yine düzgündür.

Mikroyapı fotolarından edindiğimiz ilk sonuç; aynı çeliğe ait olan ve aynı borlama saatine tabi tutulmuş, farklı başlangıç yüzey pürüzlülüğüne sahip numunelerin, yinede aynı bor tabakası kalınlığına sahip olduğudur. Kısacası yüzey pürüzlülüğü, bor tabakası kalınlığına etki etmemektedir. Bor tabakası; aynı çelik numuneleri için, saat ile artış göstermektedir. En düşük bor tabakası 2 saatlik borlamada, en geniş bor tabakası ise 6 saatlik borlamada meydana gelmektedir. AISI 1020 ile AISI 1040 çelikleri aynı saatler için yakın bor tabakası genişlikleri oluşturmuşlardır, AISI 2344 çeliği ise belirgin şekilde daha ince bor tabakası oluşmasına izin vermiştir. AISI 1020 ve AISI 1040 çeliklerinin bor tabakası kolonsal yapıda iken, AISI 2344 çeliğinin bor tabakası ana malzemeye düz şekilde girer.

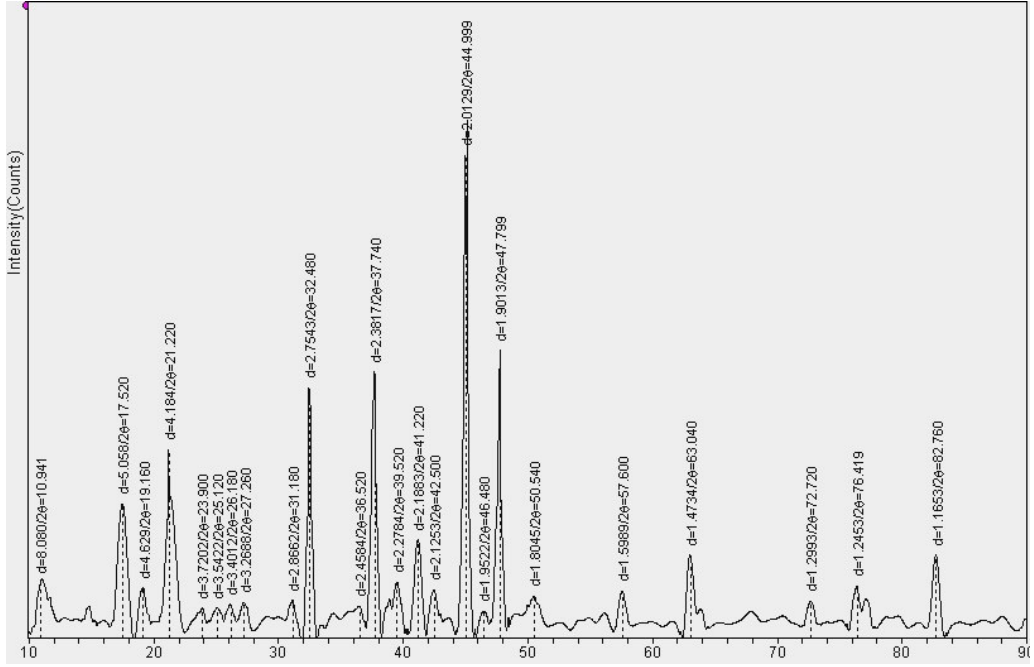


Şekil 5.7.35: 1262 nolu numunenin XRD analizi

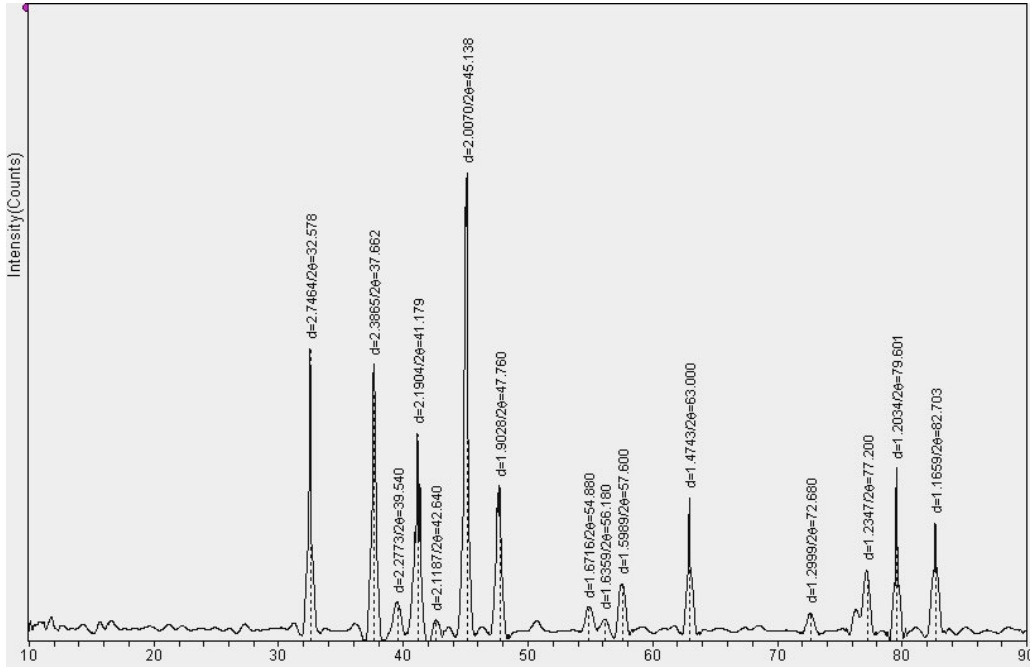


Şekil 5.7.36: 1661 nolu numunenin XRD analizi

1020 çeliğinin 2 ve 6 saatlik borlanmış örnekleri arasında neredeyse hiç fark yok ve tek faz olarak FeB görünüyor.

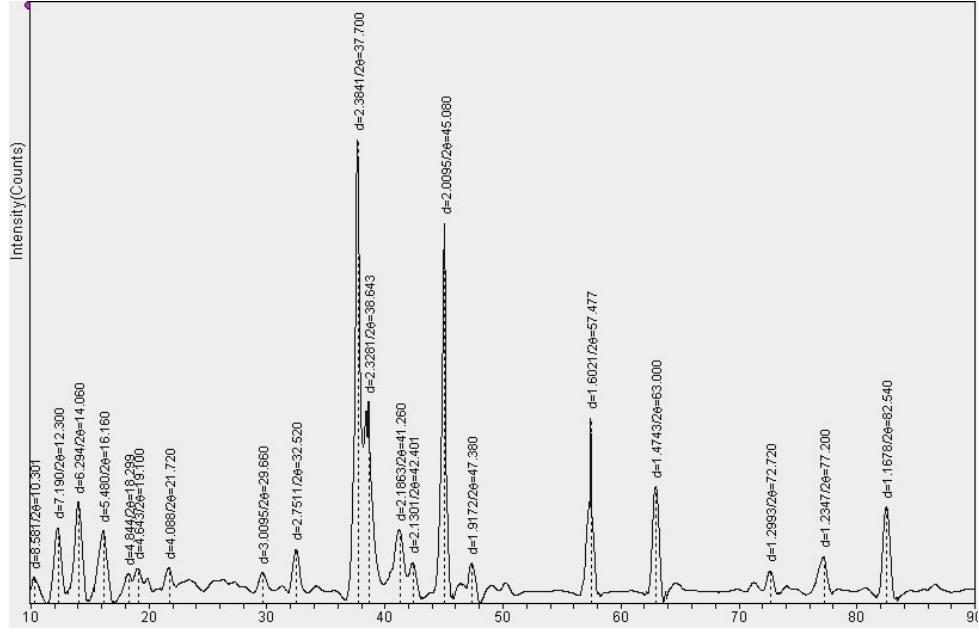


Şekil 5.7.37: 2261 nolu numunenin XRD analizi

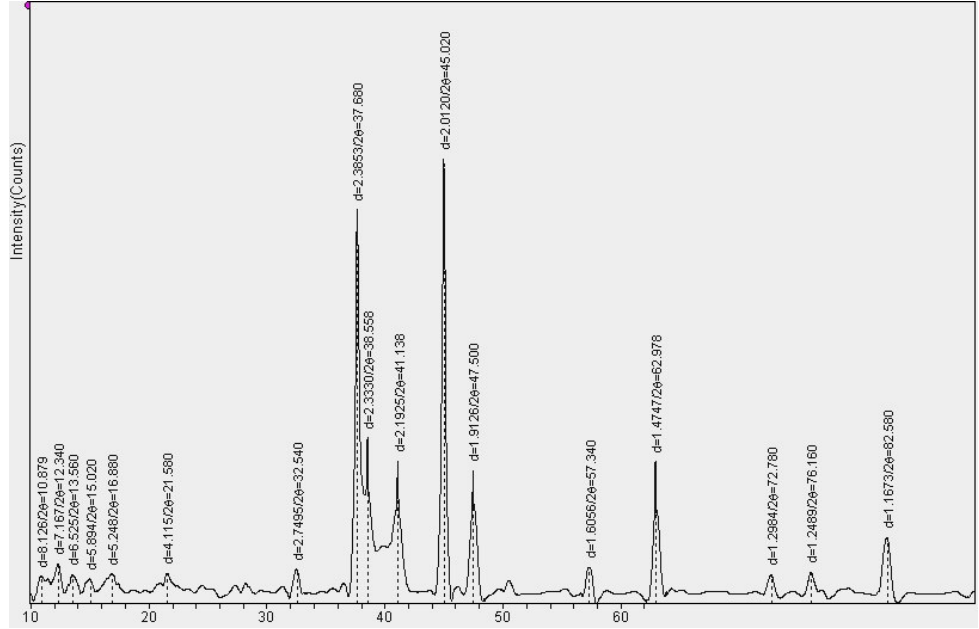


Şekil 5.7.38: 2661 nolu numunenin XRD analizi

1040 çeliğinin keçe ile aşındırılmış ve 2 ile 6 saat borlanmış numunelerinin XRD analizini görmekteyiz. Her 2 analizde de fazlar büyük benzerlik gösteriyor. Oluşan fazların en belirginini FeB.



Şekil 5.7.39: 3261 nolu numunenin XRD analizi



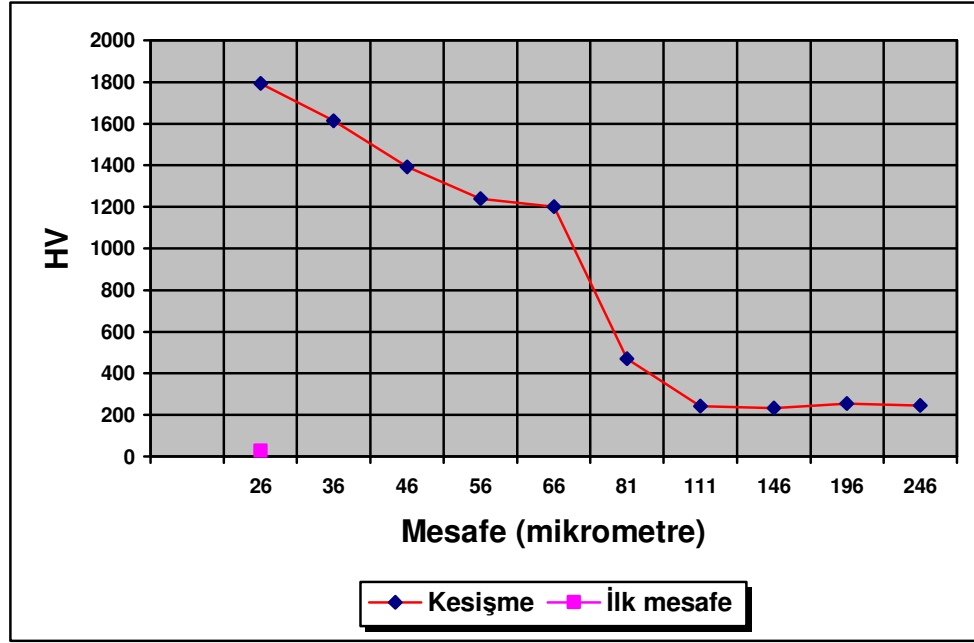
Şekil 5.7.40: 3661 nolu numunenin XRD analizi

2344 çeliğinin keçe ile aşındırılmış, 2 ile 6 saat borlanmış numunelerinin XRD analizleri görmekteyiz. Piklerin değerlerinde oransal değişimler olsada, burada da yine tek faz olarak FeB görülmekte.

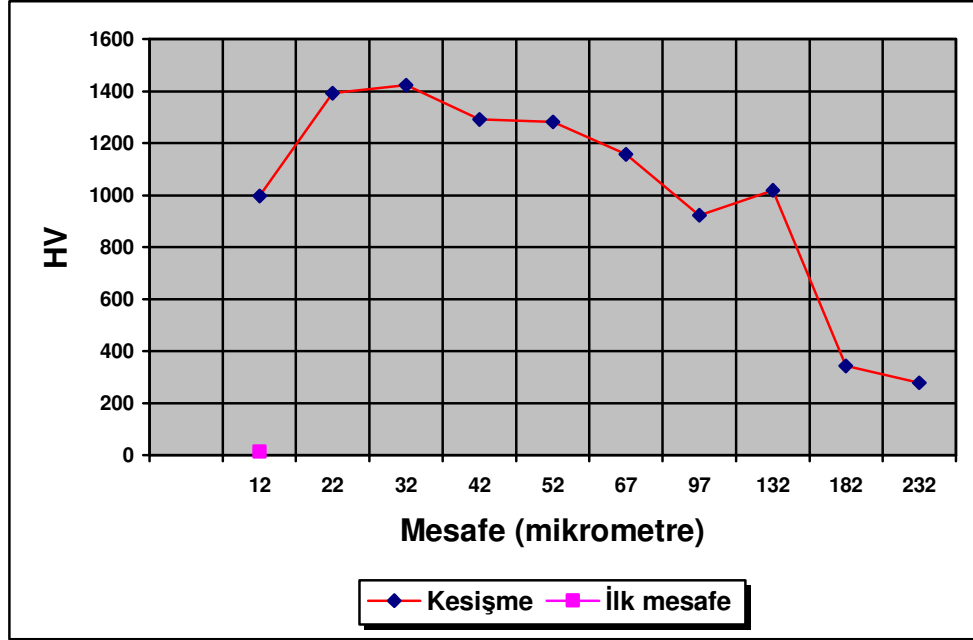
XRD analizleri göstermektedir ki; çelik türü, yüzey pürüzlülüğü ve borlama saati fark etmeksizin tüm numuneler FeB fazını daha belirgin şekilde oluşturmuşlardır.

### 5.8. Mikrosertlik

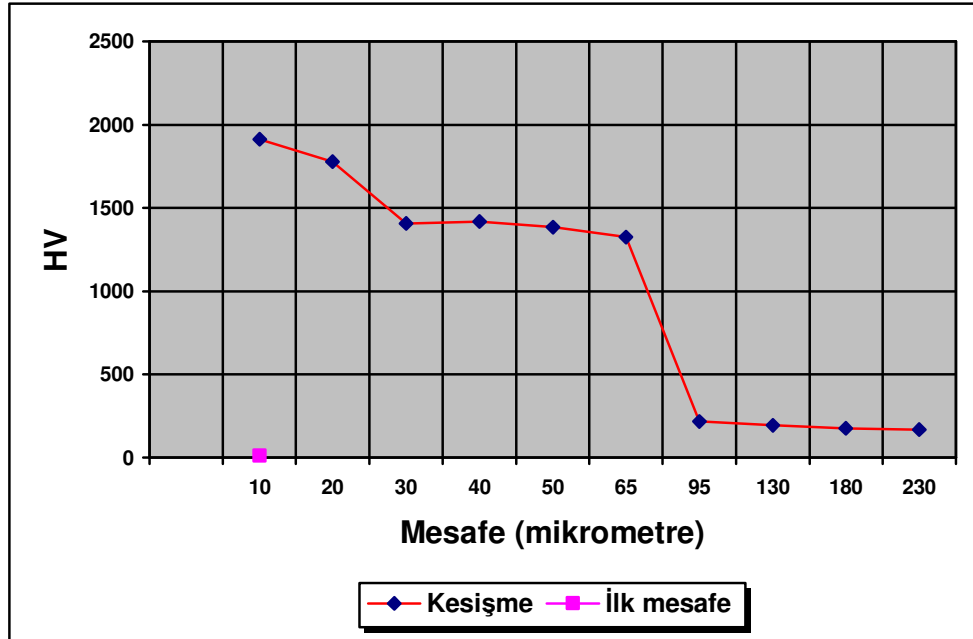
Numunelerimiz üzerine oluşturulan 54 farklı bor tabakasının mikroyapısı yanında, mikrosertliğide önemli bir göstergedir. Mikrosertlik cihazında deneye tabi tutulan numunelerimiz, mikroyapı deneyinde incelediklerimiz ile aynı. Özel olarak seçilen 18 numune, tüm numuneler için ortalama ve yaklaşık değerler belirtmektedir. Bu sayede deneye tabi tutulamayan numuneler hakkındada bilgi sahibi olunabiliyor. Mikro sertlik deneyi: Vickers uç ile, 10 saniye boyunca 10 gr şeklinde uygulanmıştır.



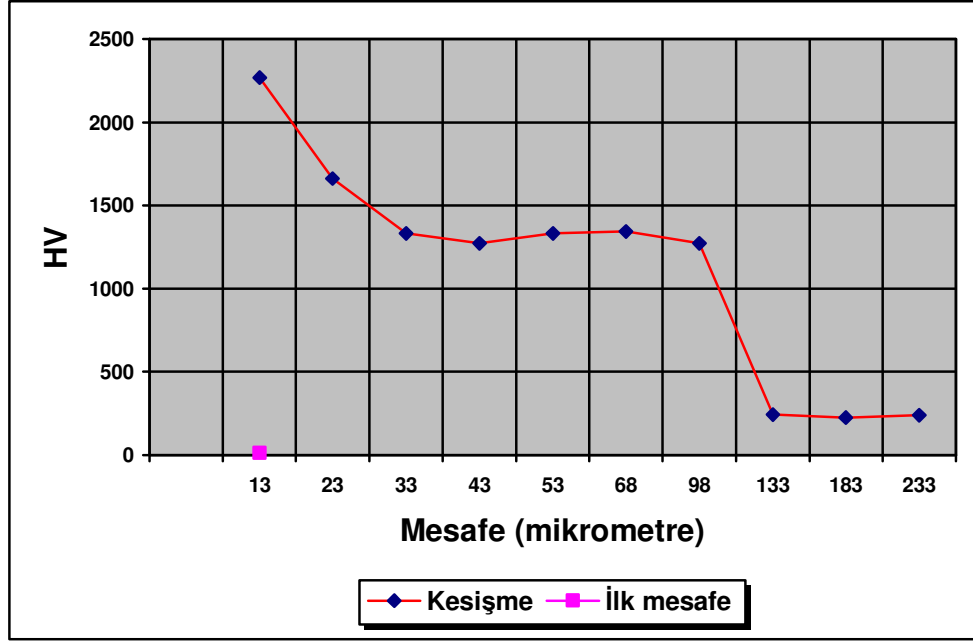
Şekil 5.8.1: 1211 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği



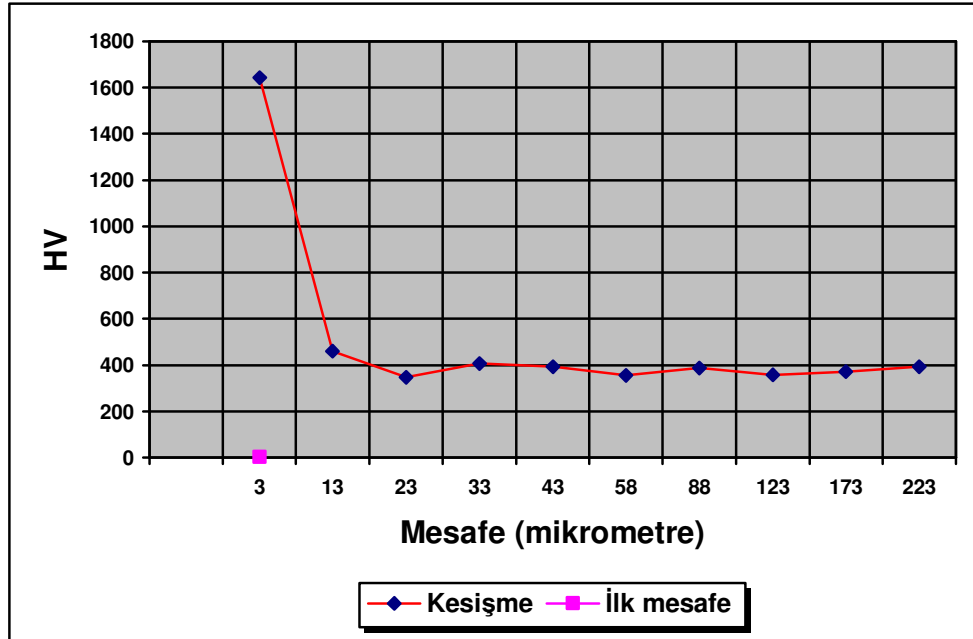
Şekil 5.8.2 : 1611 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği



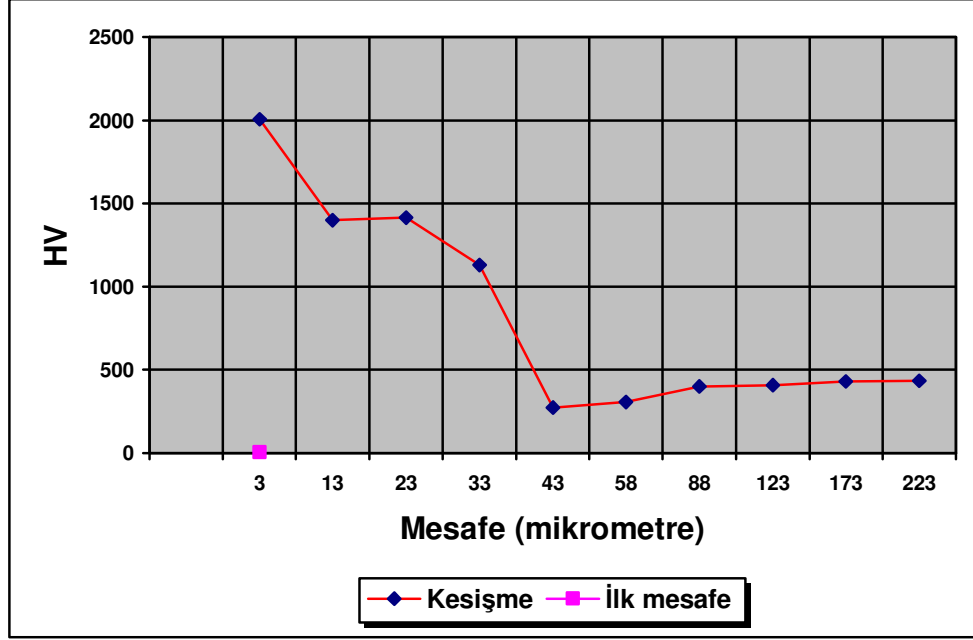
Şekil 5.8.3: 2261 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği



Şekil 5.8.4: 2661 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği



Şekil 5.8.5: 3211 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği



**Şekil 5.8.6:** 3611 nolu numunenin mesafe ile değişen sertlik grafiği

Mikrosertlik grafiklerindende anladığımız üzere; 6 saatlik borlanmış numuneler, 2 saatlik borlanmış numunelerden daha geniş bor tabakası oluşturduğundan dolayı, 6 saatlik numuneler – 2 saatliklere oranla ana malzemenin içine doğru daha yüksek mikrosertlikler göstermektedir. Mesafeler karşılaştırıldığında ise AISI 1020 çeliklerinin, AISI 1040 çeliğine ve AISI 2344 çeliğine karşı daha derin mesafelere dek mikro sertlik yüksekliğini koruduğu görülmektedir.

### 5.9. Aşınma Deneyi

Aşınma işlemini yaparken başlıca amaç; katı borlamanın yüzey pürüzlülüğüne etkisini ve oluşan yeni yüzey pürüzlülüğünün borlama sonrası aşınmaya etkisini incelemektir. Bu amaca yönelik veri elde edebilmek için; öncelikle numuneler aşındırılmış ve aşınma sonrası pürüzlülük değişimleri kayıt edilmiştir. Daha sonra her aşınma sonrası numune ağırlığı ölçülerek, aşınmanın numune üzerinde meydana getirdiği ağırlık değişimi incelenmiştir.

Aşındırma işlemi uyguladığımız numuneler: 1211, 1221, 1262, 1411, 1422, 1451, 1611, 1641, 1661, 2231, 2461, 2661, 2261, 2411, 2611, 3211, 3261 rakamları ile numaralandırarak adlandırdığımız borlanmış çelik numuneleri ile, 80'lik ve 240'lık su zımparaları ile zımparalanmış borlanmamış AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 2344 çelik numunelerdir. Aşınma işlemi her defasında 10 dakikalık periyotlarda; 10-18 veya 30 çevrim şeklinde yapılmıştır.



Aşındırma işlemi, aşındırma makinasında yapılmıştır (Şekil 5.9.1). Aşındırılacak numuneler önce makinanın tutucusuna yerleştirilir. Vida ile sıkma işlemi gerçekleştirildikten sonra komparatör ile aşınacak yüzeylerde salınım hareketi olmaması için iş parçasının ölçü farklılıklarının kontrolü ve tabla yüzeyin düzgünlüğünün kontrolü yapılır.



**Şekil 5.9.1.** Aşındırma Makinası

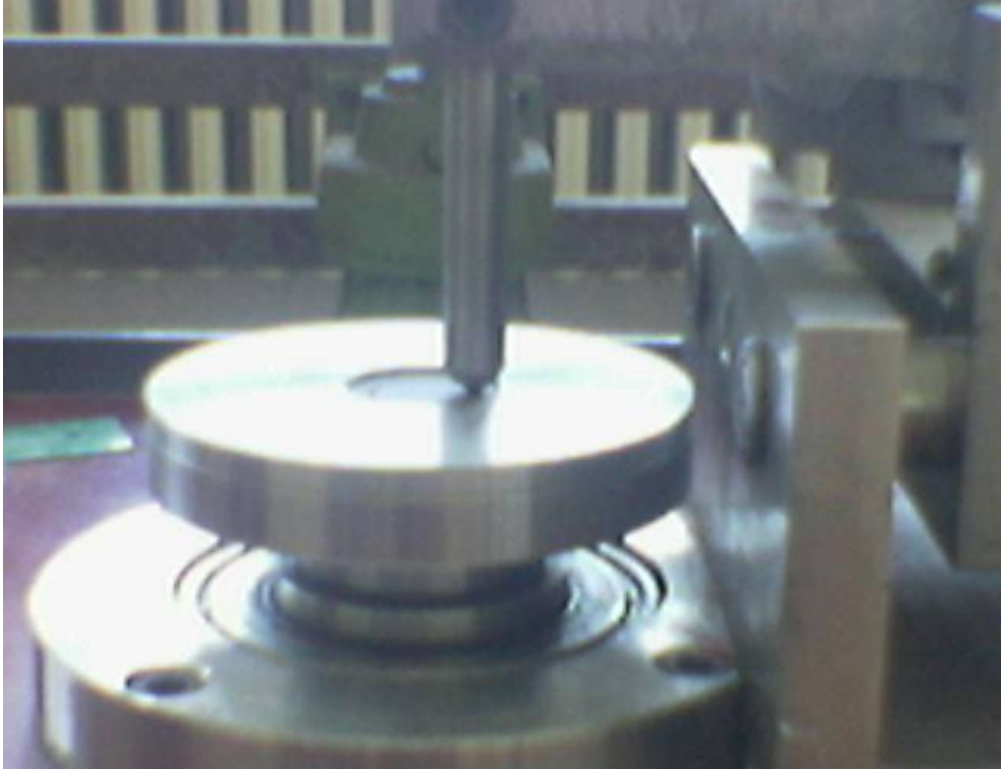
Komparatör ile ölçüm yapıldıktan sonra su terazisi ile makinanın eğimi ölçülür. Ölçüm işlemlerinden sonra aşındırıcı ucun üzerine ağırlıklar konup makina çalıştırılır.

Aşındırma makinası 25 Hz frekansta dönmektedir. Ayrıca aşındırıcı uç (Şekil 5.9.2) 826,8-910 HV Sertliğinde çelik bilyedir. Bu bilyelerin sertliği Sertlik Ölçüm Cihazında ölçülmüştür. Sertlik Ölçüm Cihazının ölçüm esnasında çelik bilyeye uyguladığı ağırlık 10 sn boyunca 300 gr'dır.



**Şekil 5.9.2.** Aşındırıcı uç

Aşınma sırasında aşındırıcı uç; üzerine yerleştirdiğimiz 463,6342 gr ağırlık ile numune yüzeylerini aşındırabilmektedir. (Burada oluşturulmaya çalışılan aşınma belirli ve kolay ulaşılabilen malzemelerle yapılmaya çalışılmıştır. Bu nedenle ticari anlamda rahat edinilebilen rulman çelik bilyeler kullanılmıştır. Borlanmış yüzeylerin belirli çevrim sayıları sonunda bilyayı aşındıracağı aşıkardır. Bu bağlamda çelik bilya, her 10 dakikalık 5 çevrim sonunda değiştirilmiştir ve bilyanın kendi aşınımı minimum seviyede tutulmaya çalışılmıştır.). Tüm çevrimler boyunca çevrim boyunca aşındırıcı uç üzerine konulan yük sabit tutulmuştur ve frekansıda yine sabit olarak 25 Hz seçilmiştir.

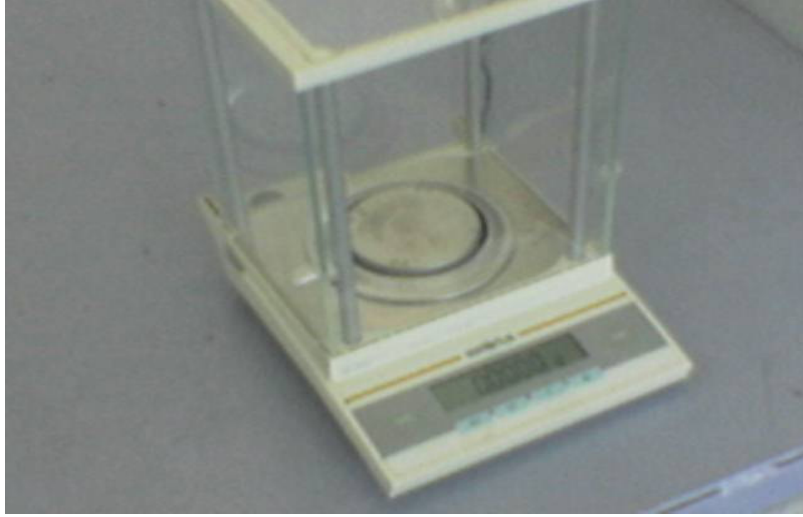


**Şekil 5.9.3.** 25 Hz frekansta çalışan Aşınma Makinasının AISI çeliği aşındırması

Tüm numunelerin her çevrimi sonunda , çeliğin aşınmış yüzeyinin yüzey pürüzlülüğü Mitutoya Profilometre ( Yüzey Pürüzlülüğü Cihazı) ile ölçülürken (Şekil 5.9.3), yine her çevrim sonunda aşınmanın neden olduğu ağırlık kaybı dijital göstergeli hassas tartı (Şekil 5.9.4) ile hesaplanmaktadır. Elde edilen bu veriler kağıtlara not edilmiş, her çevrimin pürüzlülük değerinin profilometreden çıktısı alınmıştır.

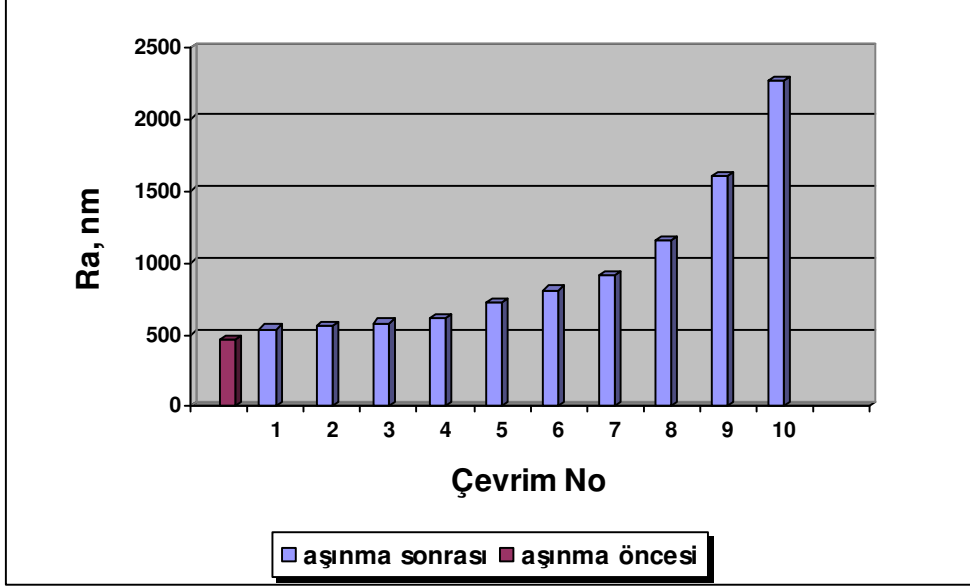


**Şekil 5.9.4** Aşınmış Numunenin Yüzey Pürüzlülüğünün Profilometre ile ölçülmesi

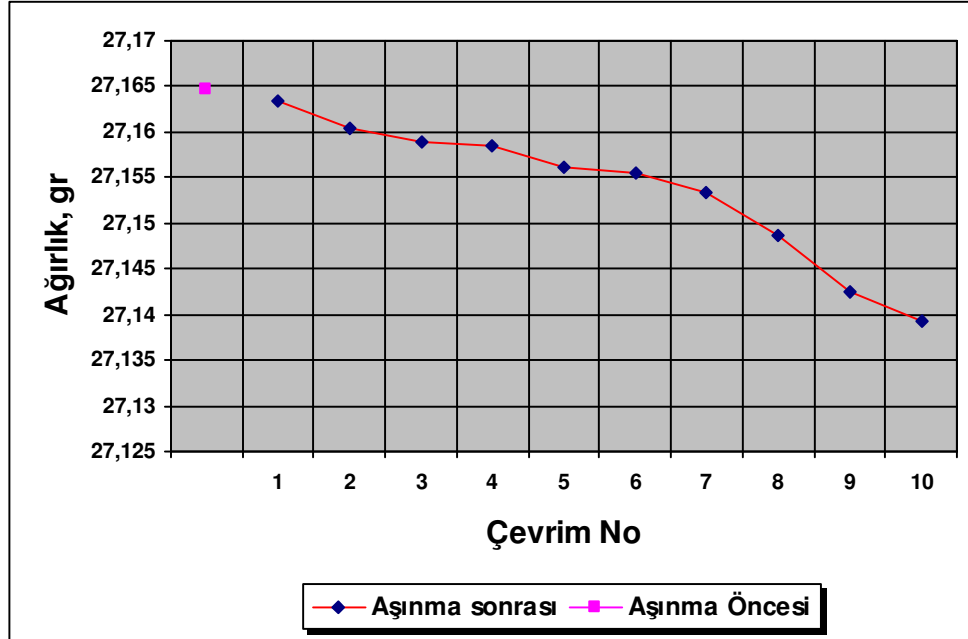


**Şekil 5.9.5.** Dijital Göstergeli, Hassas Tartı

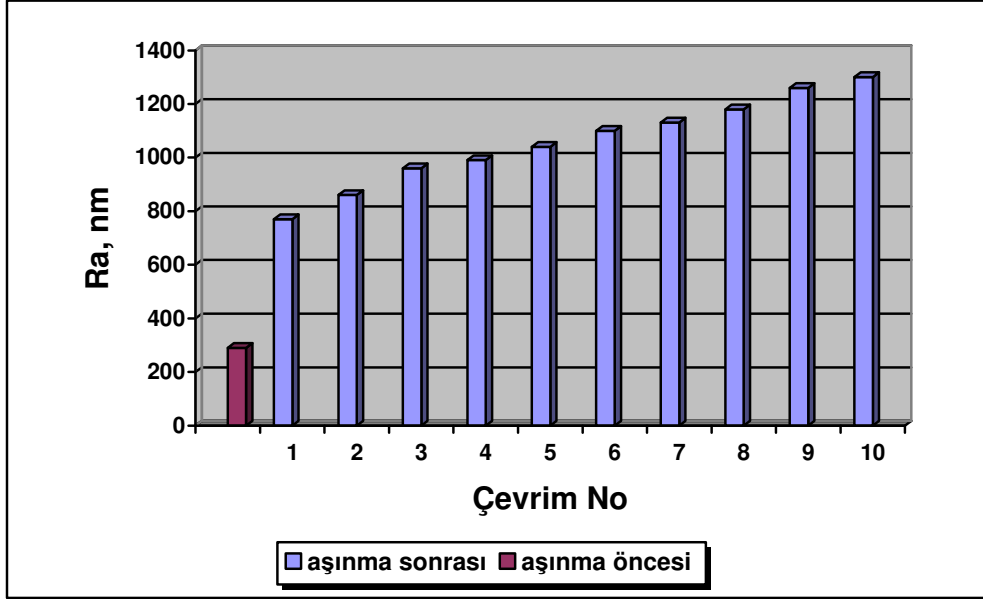
### 5.9.1 Aşınma Deney Sonuçları



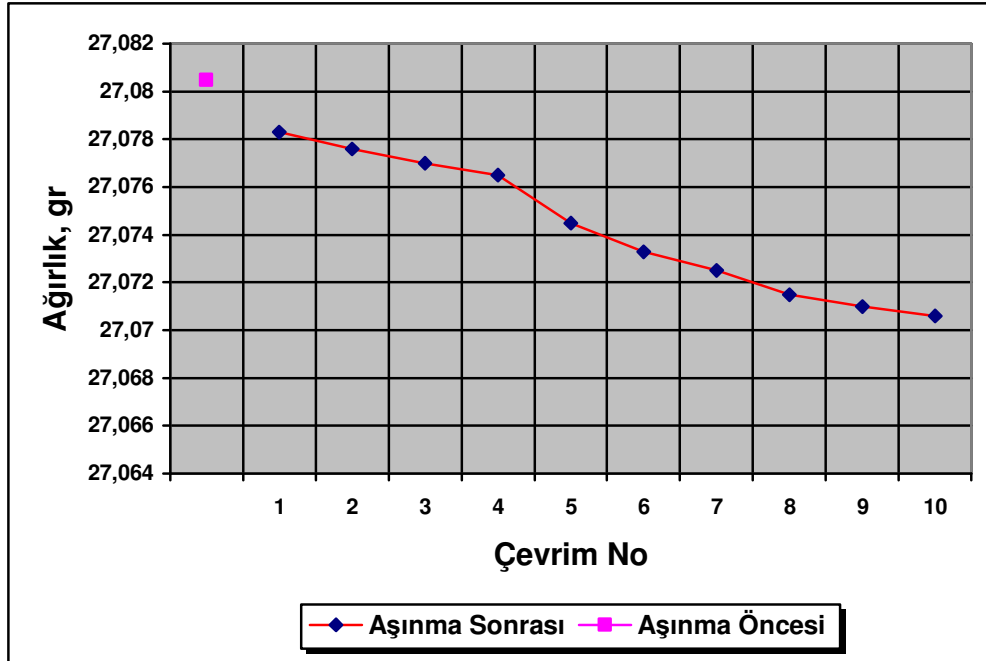
**Şekil 5.9.1.1.A:** 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



**Şekil 5.9.1.1.B :** 80 lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği



**Şekil 5.9.1.2.A:** 240'lık Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişim Grafiği

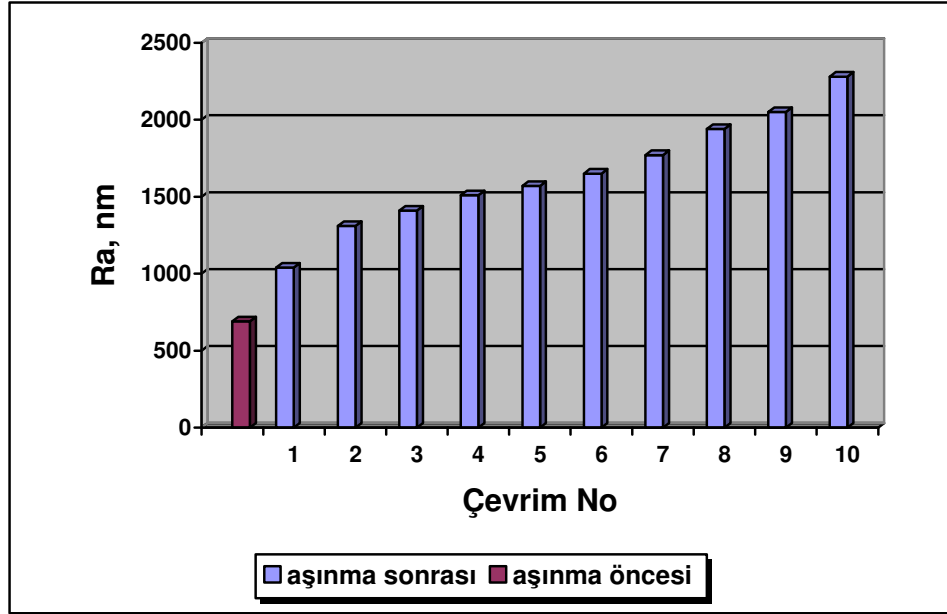


**Şekil 5.9.1.2.B:** 240'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1020 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

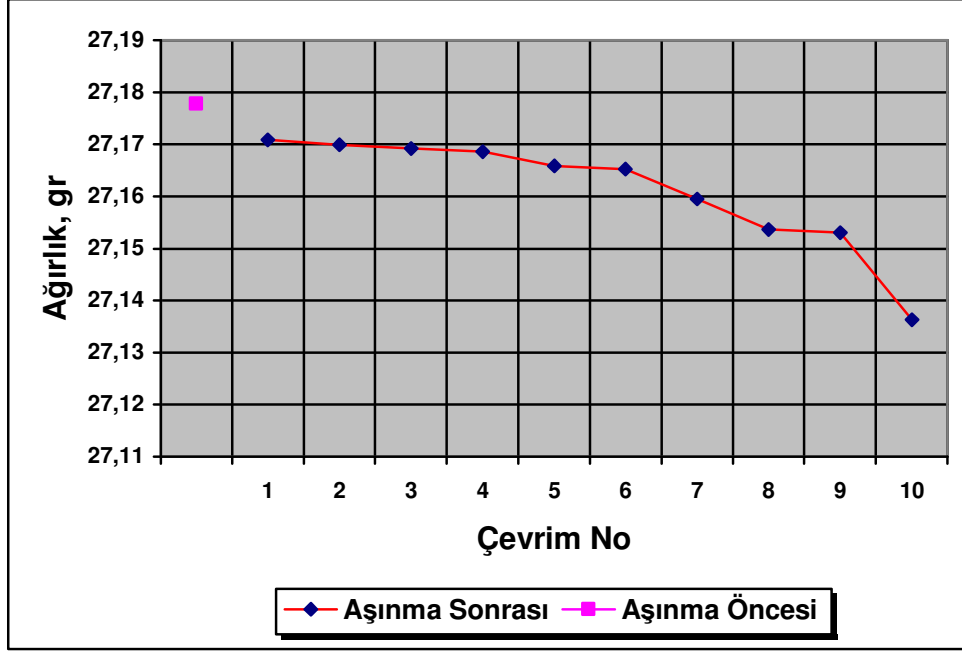
Yukarıdaki grafiklerde de görüldüğü gibi 80 'lik ve 240 'lık zımpara ile zımparalanmış borlanmamış AISI 1020 çeliklerinde yüzey pürüzlülüğü aşınma ile artarken çeliğin ağırlığında düşüş gözlenmiştir.

80'lik zımpara ile zımparalanmış, borlanmamış AISI 1020 çeliğindeki aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğü artışı devamlı artan bir ivmeyle gerçekleşirken, 240'lık zımpara zımparalanmış AISI 1020 çeliğinin yüzeyindeki pürüzlülük ilk çevrim sonrası belirgin bir biçimde artmış, belli bir Ra değerine ulaştıktan sonra pürüzlülük artışı sabit bir ivmeyle gerçekleşmiştir.

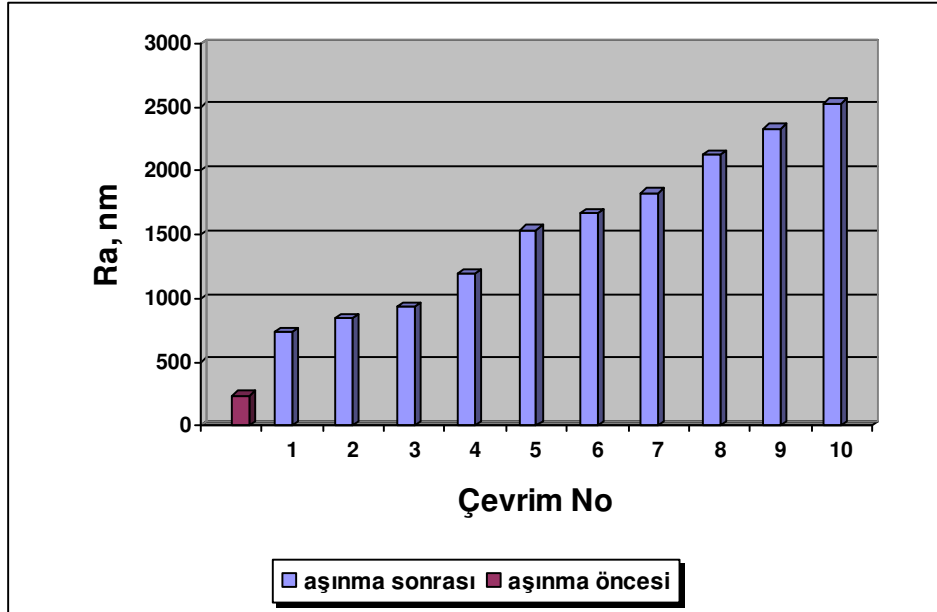
80'lik zımpara ile zımparalanmış, borlanmamış AISI 1020 çeliğinde aşınma sonucu ağırlık kaybı **0,0254 gr** iken; 240 'lık zımpara ile zımparalanmış borlanmamış AISI 1020 çeliğindeki ağırlık kaybı **0,0099 gr** olmuştur.



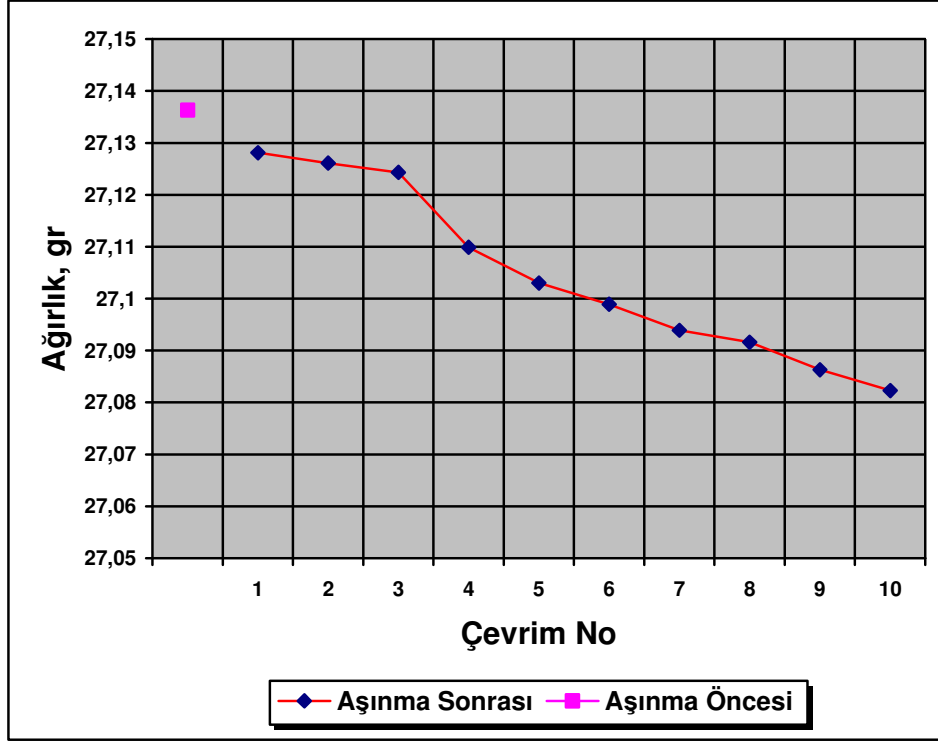
**Şekil 5.9.1.3.A:** 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1040 Çeliğinin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



**Şekil 5.9.1.3.B:** 80'lik Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1040 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği



**Şekil 5.9.1.4.A:** 240 'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 1040 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği

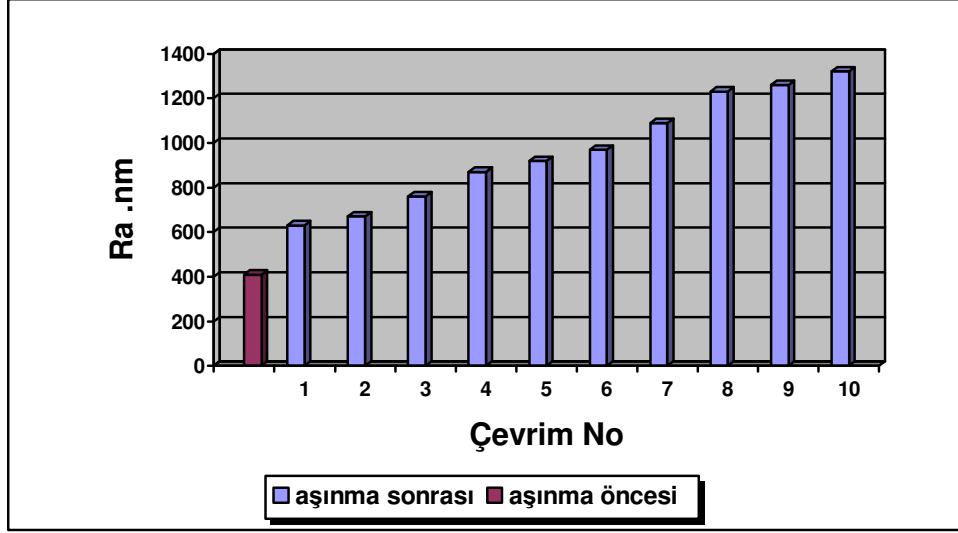


**Şekil 5.9.1.4.B:** 240'lık Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 1040 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

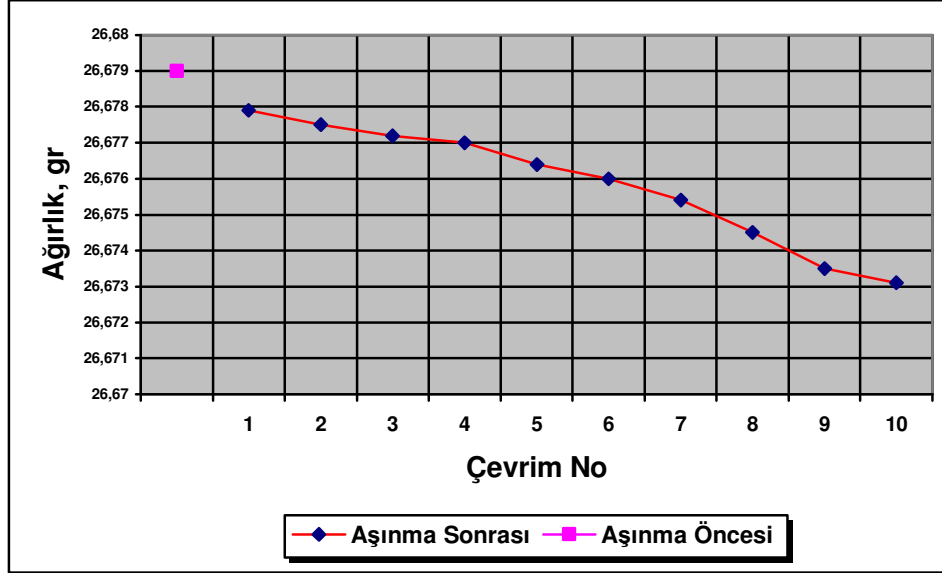
AISI 1040 çeliğinde yine aşınma sonrası 80'lik ve 240 'lık zımpara ile zımparalanmış borlanmamış numunelerin yüzeylerindeki pürüzlülükte artış gözlemlenmiştir.

80 'lik zımpara ile zımparalanmış AISI 1040 çelikteki aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0415gr** iken, 240 'lık zımpara ile zımparalanmış AISI 1040 çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı ise **0,054 gr** 'dır.

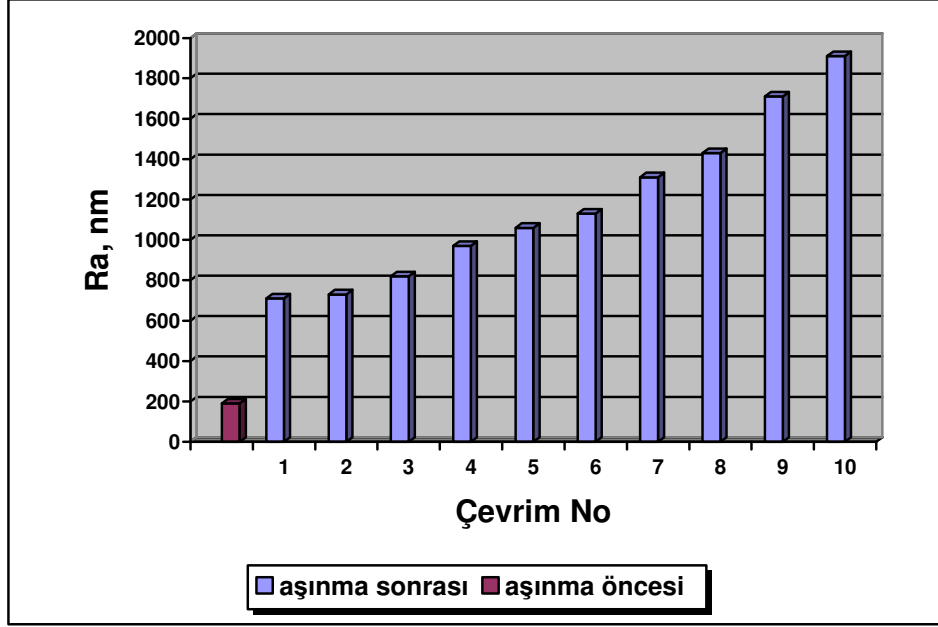




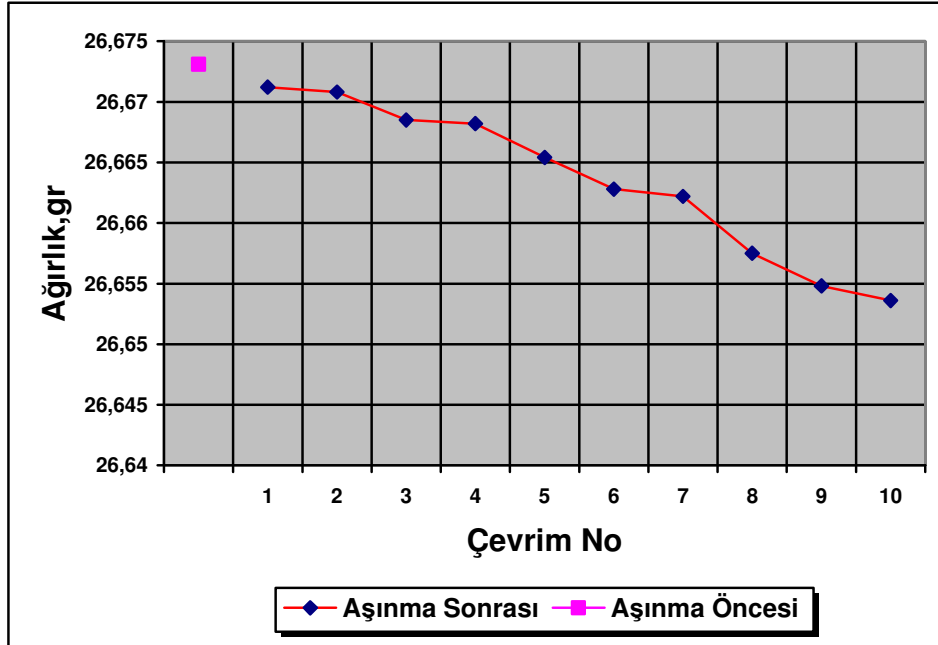
**Şekil 5.9.1.5.A:** 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



**Şekil 5.9.1.5.B:** 80'lik Zımpara ile Zımparalanmış, Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Ağırlık Değişimi Grafiği



**Şekil 5.9.1.6.A:** 240 'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği

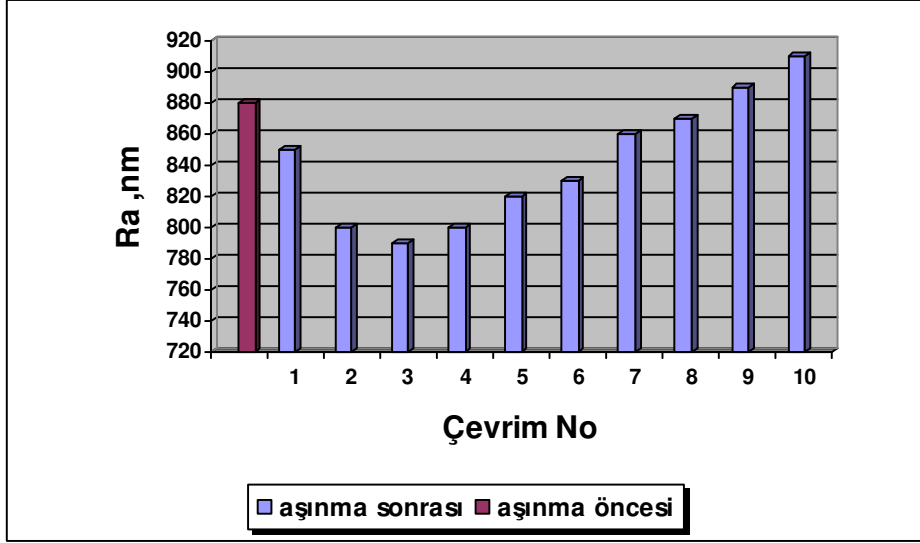


**Şekil 5.9.1.6.B:** 240 'lık Zımpara ile Zımparalanmış , Borlanmamış AISI 2344 Çeliğin Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

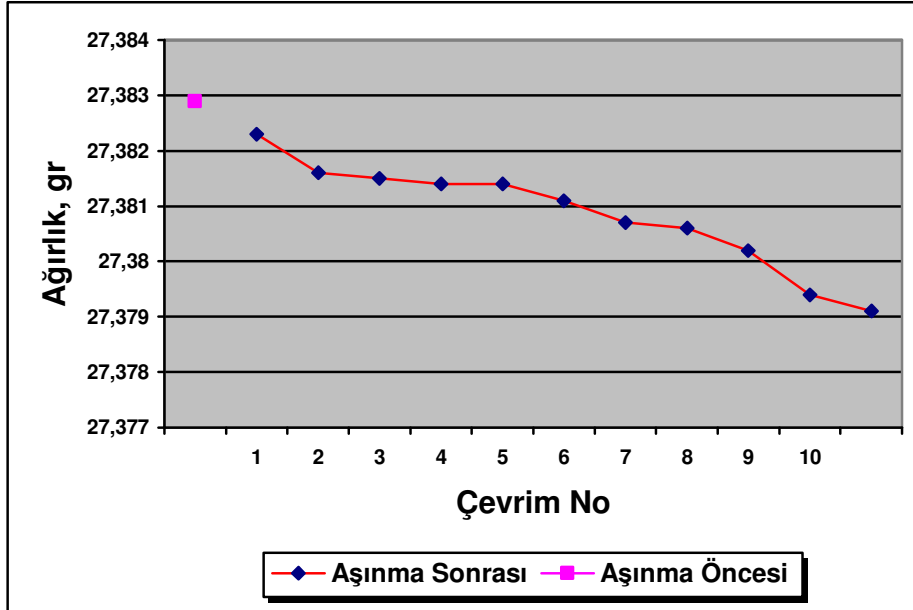
AISI 2344 borlanmamış çelikte aşınma sonrası pürüzlülük belirgin bir biçimde artmıştır.

80' lik zımpara ile zımparalanmış AISI 2344 borlanmamış çeliğın, aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0059** gr iken 240'lık zımpara ile zımparalanmış AISI 2344 borlanmamış çeliğın ağırlık kaybı **0,0774** gr'dır.

Şu ana kadar aşınma uygulana numunelerin tümüde aşınma uygulanmış ancak borlama yapılmamış örneklerdendi. Özellikle bu numunelerin deneye tabi tutulmasının amacı; borlama sonrası benzer numunelerin aşınmaya göstercekleri tepkileri kıyaslamaktır. Deney devamında aşınma işlemine tabi tutulacak numunelerin tümü ise borlanmıştır.



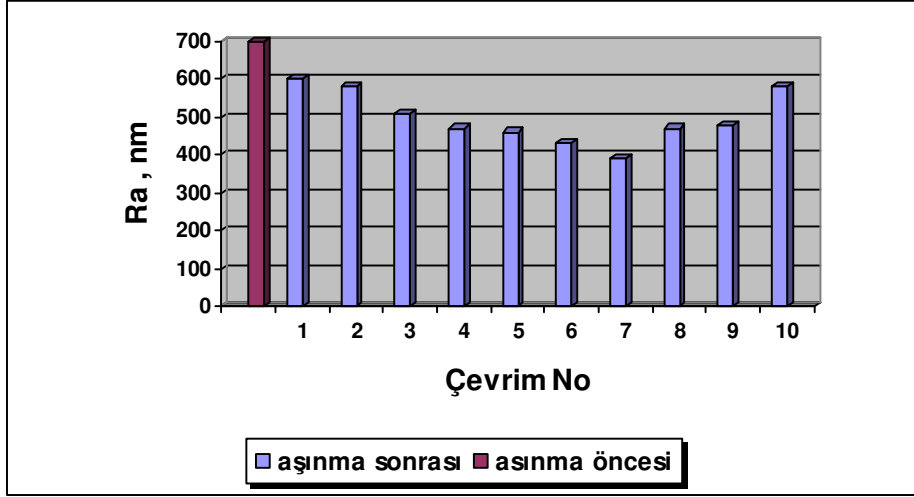
**Şekil 5.9.1.7.A:** 80'lik Zımpara ile Zımparalanmış ,2 saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğinin, Çentikli Yüzeyinin (1211) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



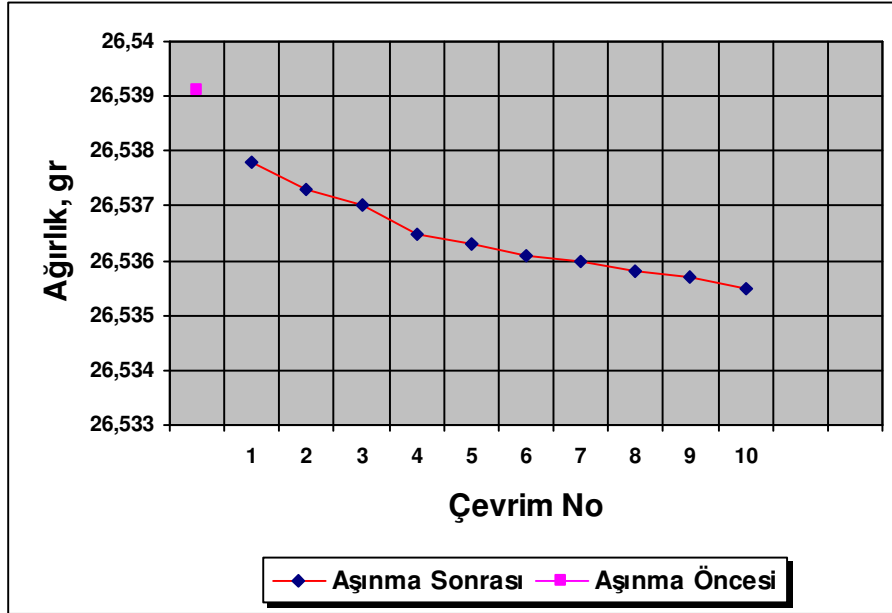
**Şekil 5.9.1.7.B:** 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğinin,Çentikli Yüzeyinin (1211) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1211 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzey pürüzlülüğü ilk 3 çevrim boyunca azalma gösterirken, belirli bir Ra değerinden sonra yüzeydeki pürüzlülük artan bir ivme ile belirgin bir biçimde artmıştır.

1211 no 'lu AISI borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0038 gr'** dir.



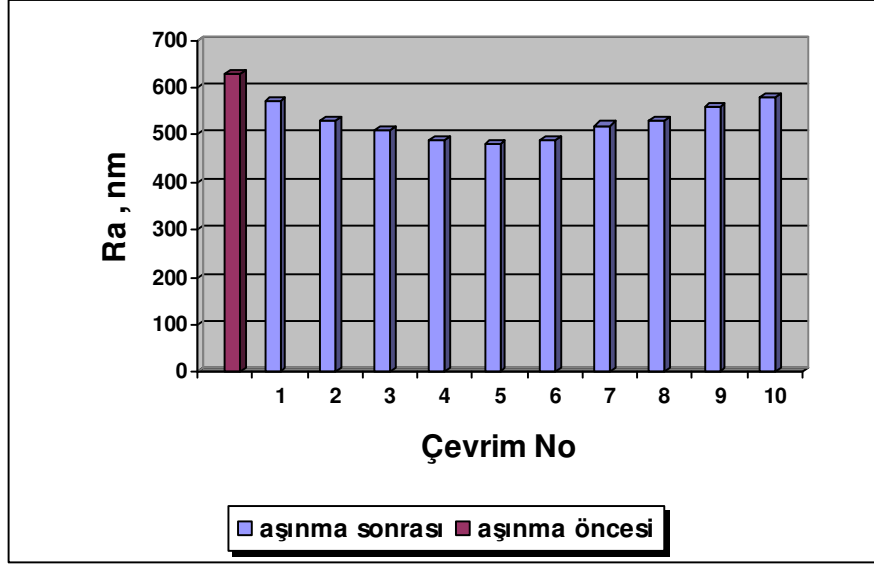
**Şekil 5.9.1.8.A:** 150 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 2 saat Borlama işlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğinin,Çentikli Yüzeyinin (1221) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



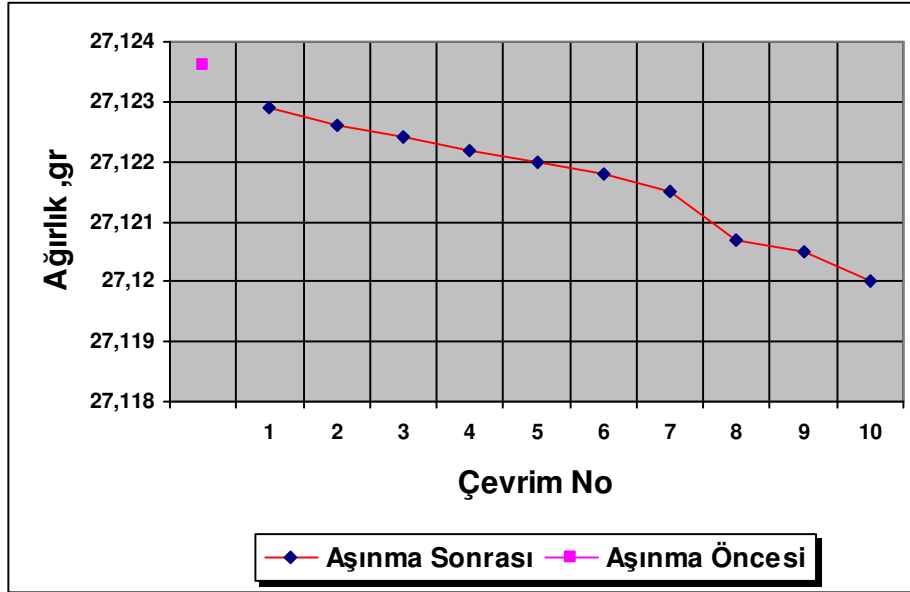
**Şekil 5.9.1.8.B :** 150' lik Zımpara ile Zımparalanmış , 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1221) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1221 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzeyindeki pürüzlülük ilk 7 çevrim boyunca azalırken, daha sonra artış gözlenmiştir.

1221 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0036 gr'** dir.



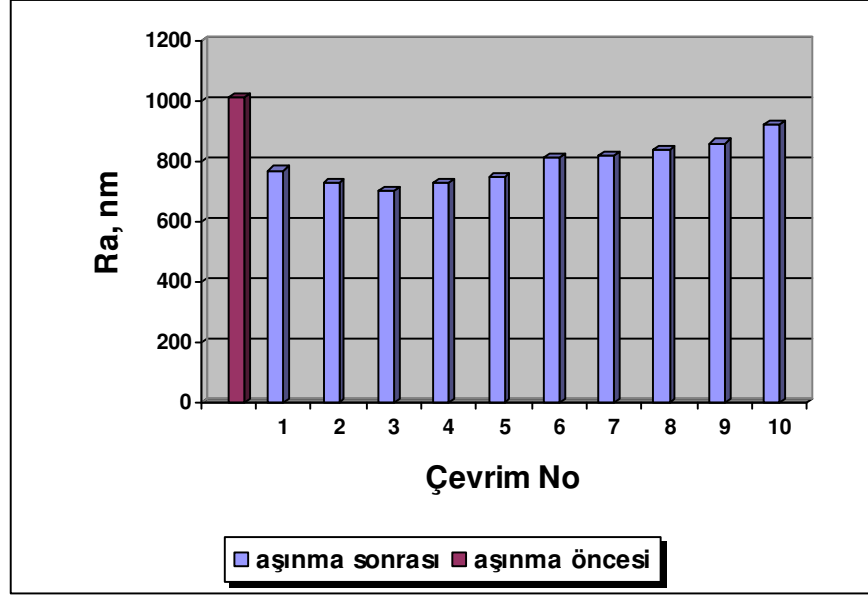
**Şekil 5.9.1.9.A:** Keçelenmiş , 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin,Çentiksiz Yüzeyinin (1262) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



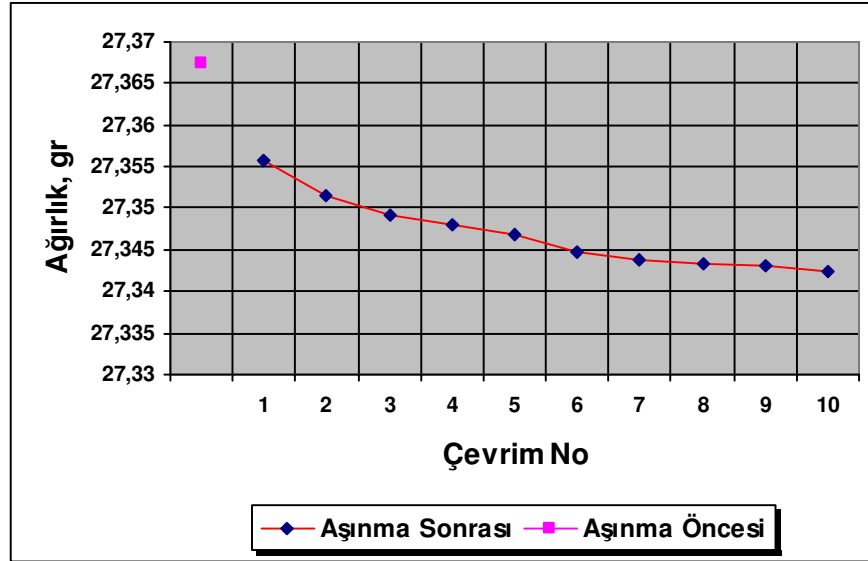
**Şekil 5.9.1.9.B:** Keçelenmiş, 2 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentiksiz Yüzeyinin (1262) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1262 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzey pürüzlülüğü ilk 5 çevrim boyunca azalırken, daha sonra artış gözlenmiştir.

1262 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0036** gr'dır.



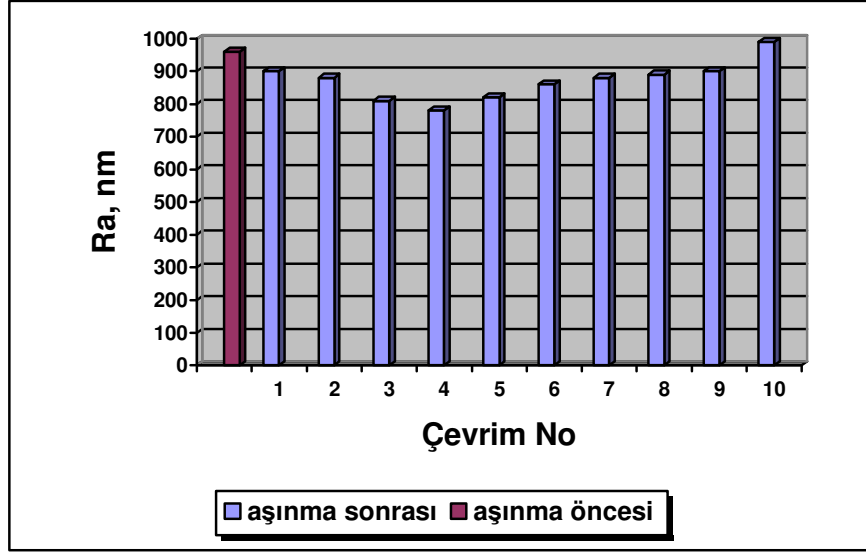
**Şekil 5.9.1.10.A:** 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1411) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



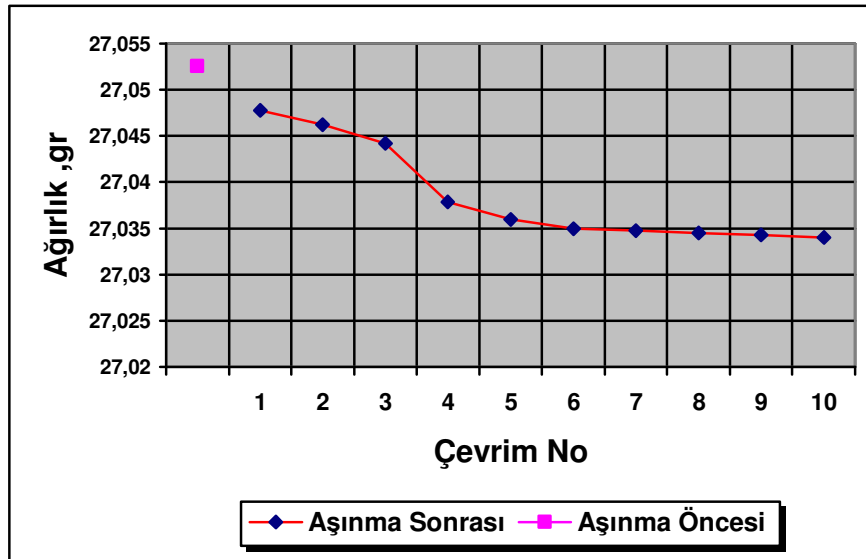
**Şekil 5.9.1.10.B:** 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1411) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1411 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzey pürüzlülüğü ilk 3 çevrim azalırken daha sonraki çevrimlerde artış gözlemlenmiştir.

1411 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,025** gr 'dir.



**Şekil 5.9.1.11.A:** 150 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentiksiz Yüzeyinin (1422) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği

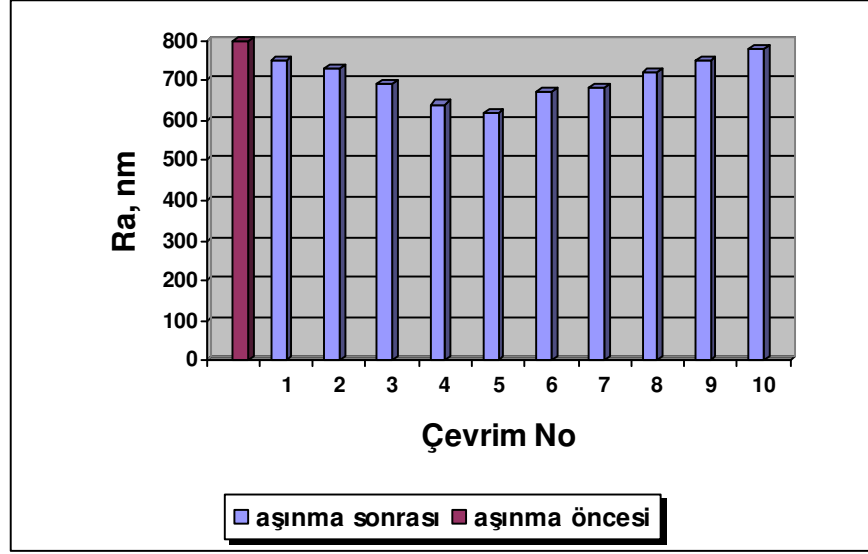


**Şekil 5.9.1.11.B:** 150 'lik Zımpara ile Zımparalanmış , 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentiksiz Yüzeyinin ( 1422) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

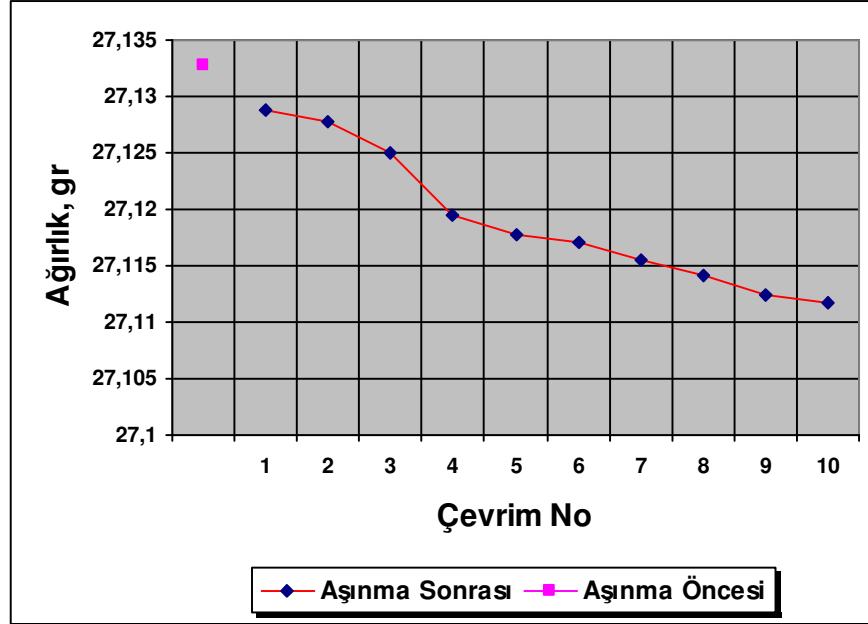
1422 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzey pürüzlülüğü ilk 4 çevrim azalırken sonraki çevrimlerde artış görülmüştür.

1422 no' lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,022 gr'** dir.





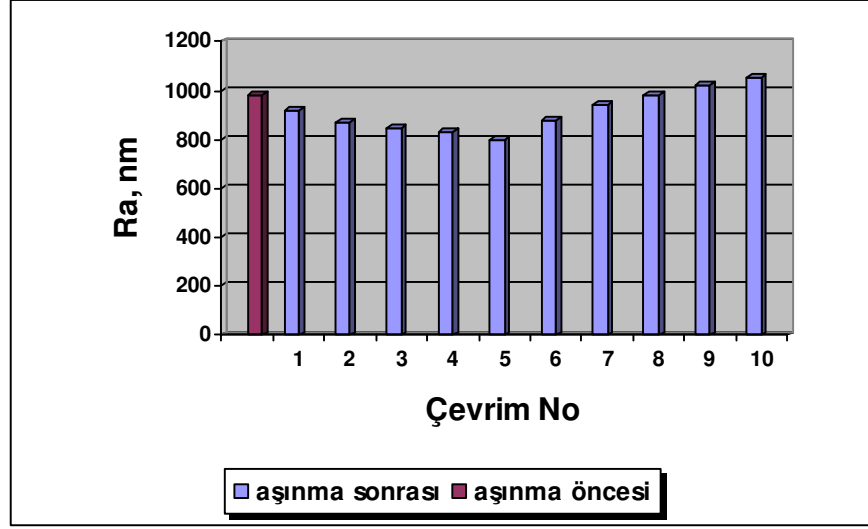
**Şekil 5.9.1.12.A:** 1000'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğinin, Çentikli Yüzeyinin (1451) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



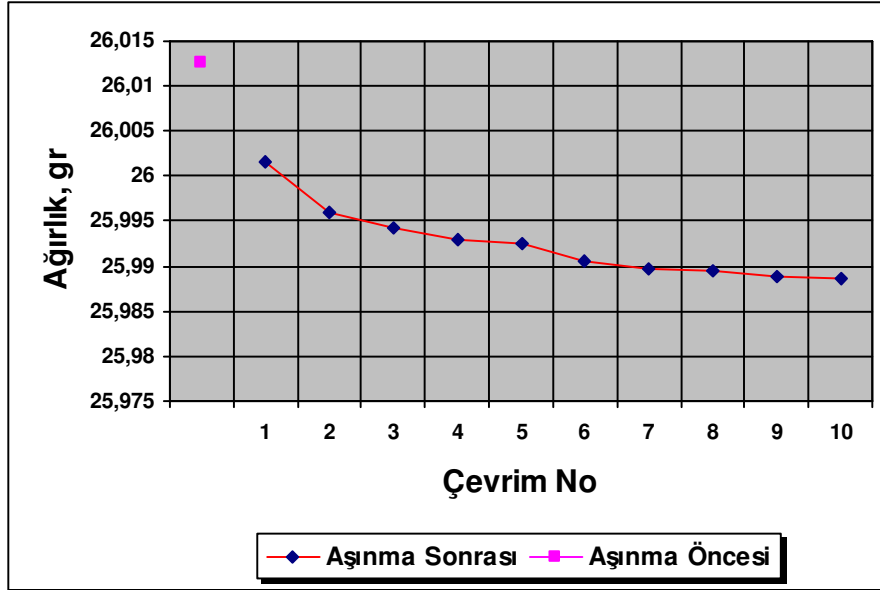
**Şekil 5.9.1.12.B:** 1000'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 4 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğinin, Çentikli Yüzeyinin (1451) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1451 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzeydeki pürüzlülüğü ilk 5 çevrim azalırken daha sonraki çevrimlerde pürüzlülük artmıştır.

1451 no' lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0209** gr'dır



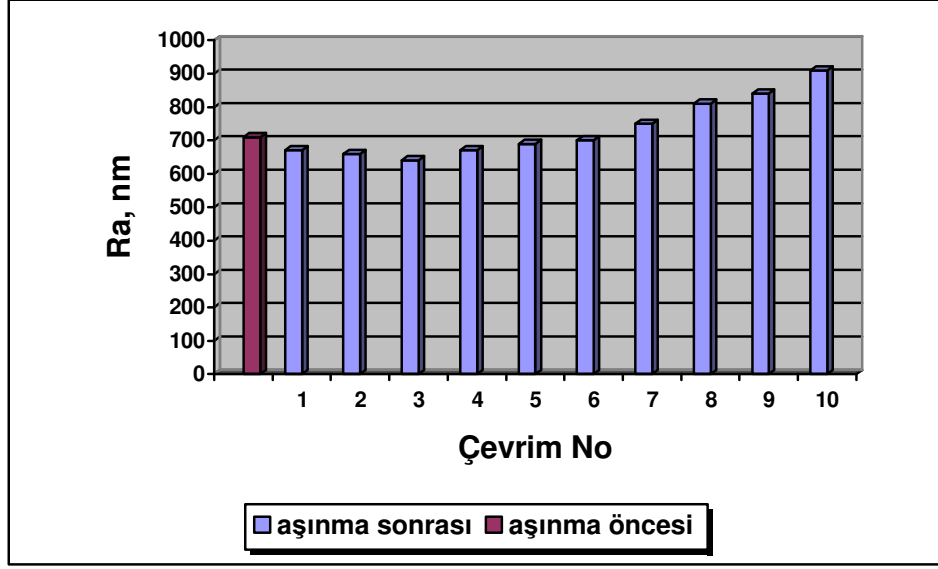
**Şekil 5.9.1.13.A:** 80 'lik Zımpara ile Zımparalanmış, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış , AISI 1020 Çeliğin ,Çentikli Yüzeyinin (1611) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



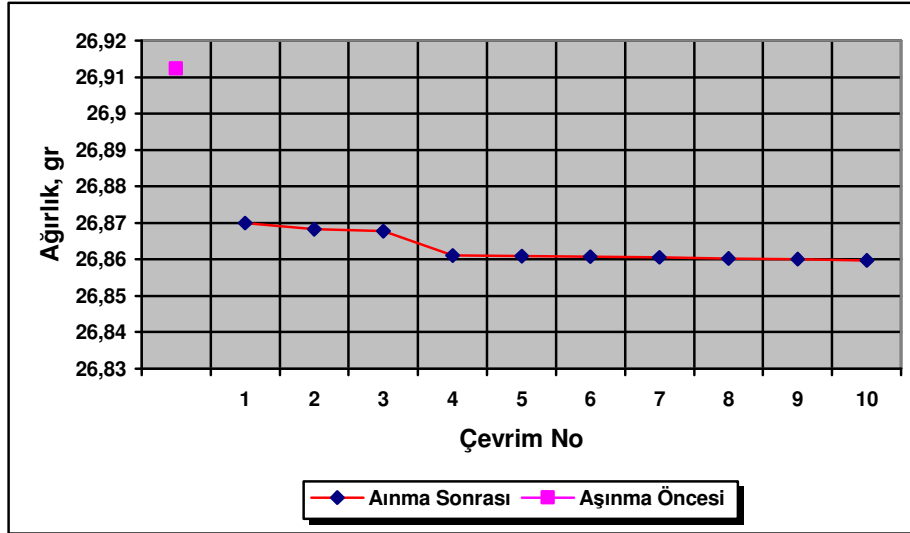
**Şekil 5.9.1.13.B:** 80 'li k Zımpara ile Zımparalanmış, 6 Saat Borlama İşlemi uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1611) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1611 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzey pürüzlülüğü ilk 5 çevrim boyunca azalırken daha sonraki çevrimlerde artış gözlemlenmiştir

1611 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,024** gr'dır. Bunun 0.0109 gr'ı ilk çevrimde düştü. Nedeni ise numuneden parka kopmasıdır.



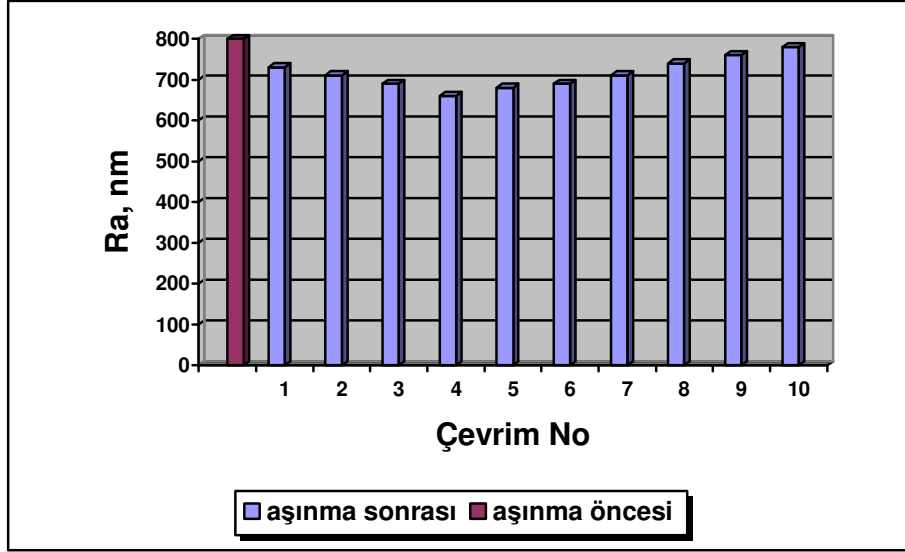
**Şekil 5.9.1.14.A:** 600 'lük Zımpara ile Zımparalanmış, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin ,Çentikli Yüzeyinin (1641) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



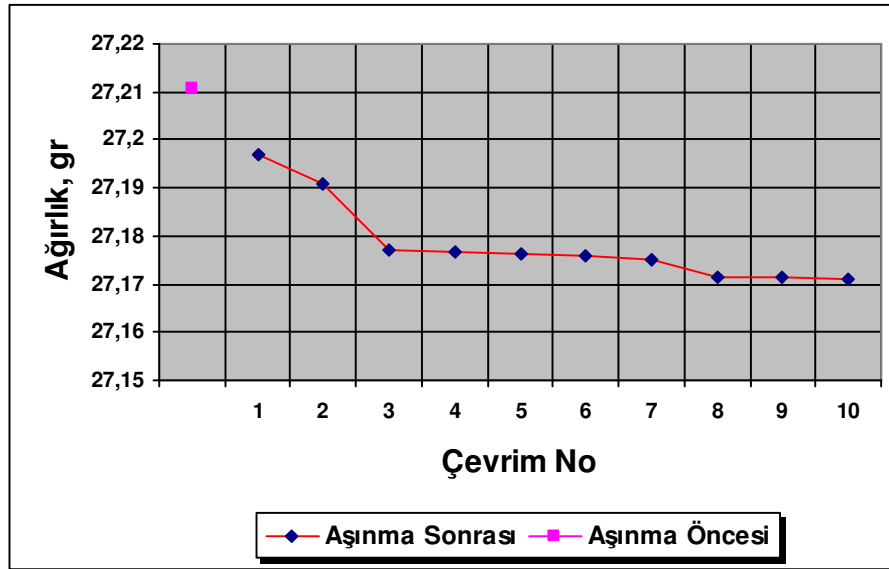
**Şekil 5.9.1.14.B:** 600 'lük Zımpara ile Zımparalanmış , 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1641) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1641 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzeyindeki pürüzlülük ilk 3 çevrim azalırken daha sonraki çevrimlerde belirgin bir artış görülmüştür.

1641 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0527** gr'dır. Bunun ilk çevrimdeki kaybı 0,0425 gr'dır. Nedeni ise numuneden parka kopmasıdır.



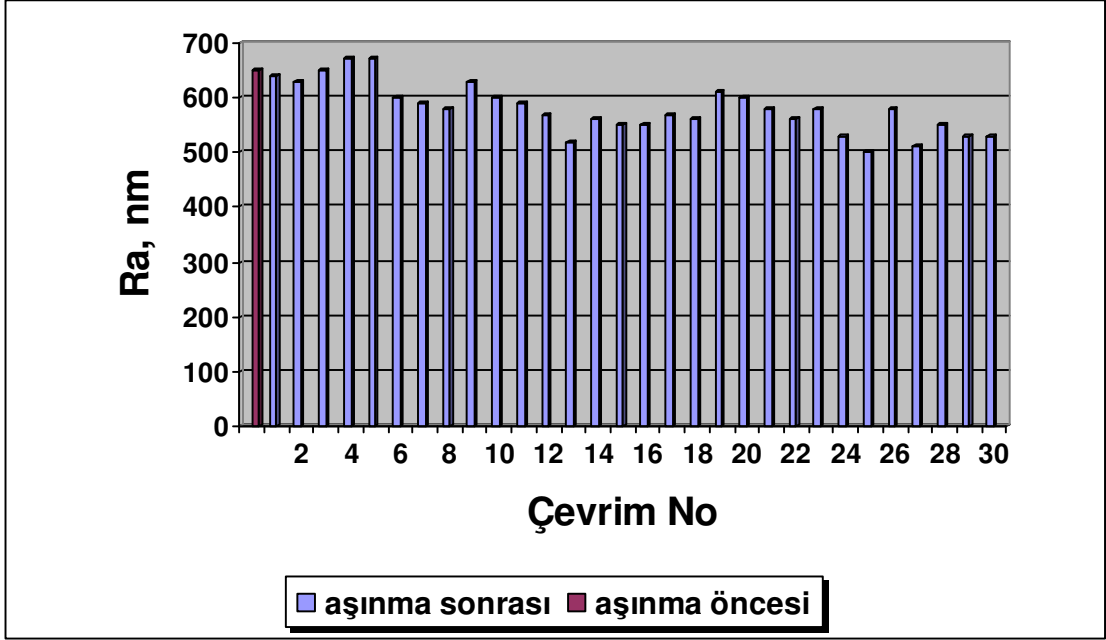
**Şekil 5.9.1.15.A:** Keçelenmiş, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1661) Aşınma Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü Değişimi Grafiği



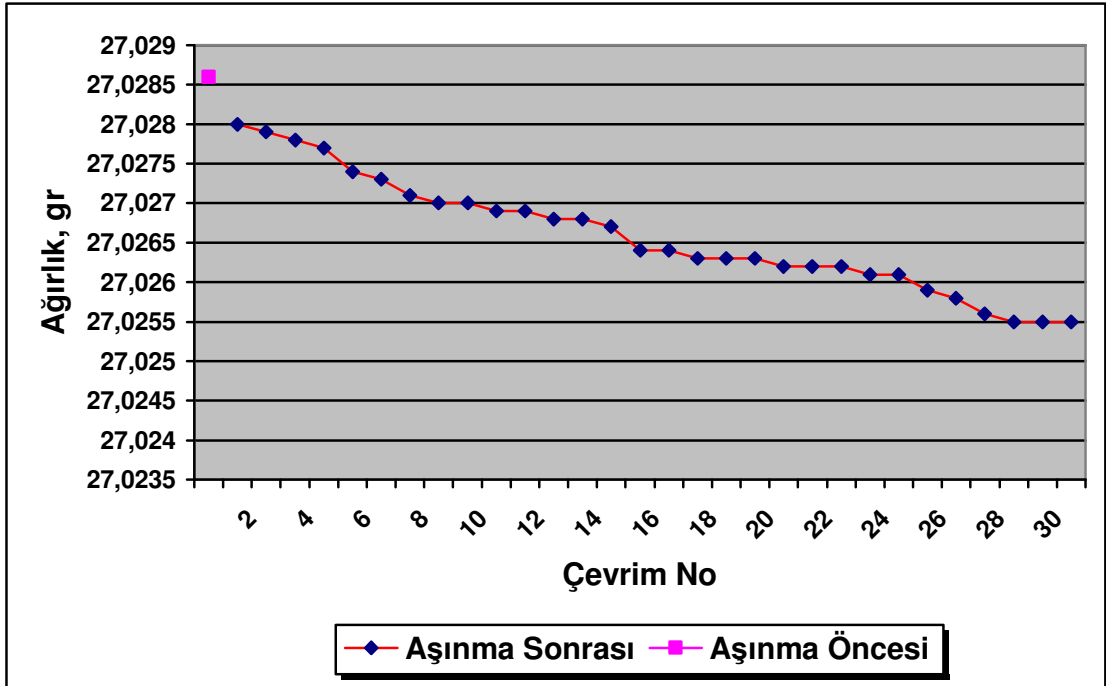
**Şekil 5.9.1.15.B:** Keçelenmiş, 6 Saat Borlama İşlemi Uygulanmış, AISI 1020 Çeliğin, Çentikli Yüzeyinin (1661) Aşınma Sonrası Ağırlık Değişimi Grafiği

1661 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin yüzey pürüzlülüğü ilk 4 çevrim boyunca azalma gösterirken daha sonraki çevrimlerde artış gözlemlenmiştir.

1661 no'lu AISI 1020 borlanmış çeliğin aşınma sonrası ağırlık kaybı **0,0395** gr'dır. Numuneden ilk çevrimde kopma sonucu 0,0136 gr kopma olmuştur.



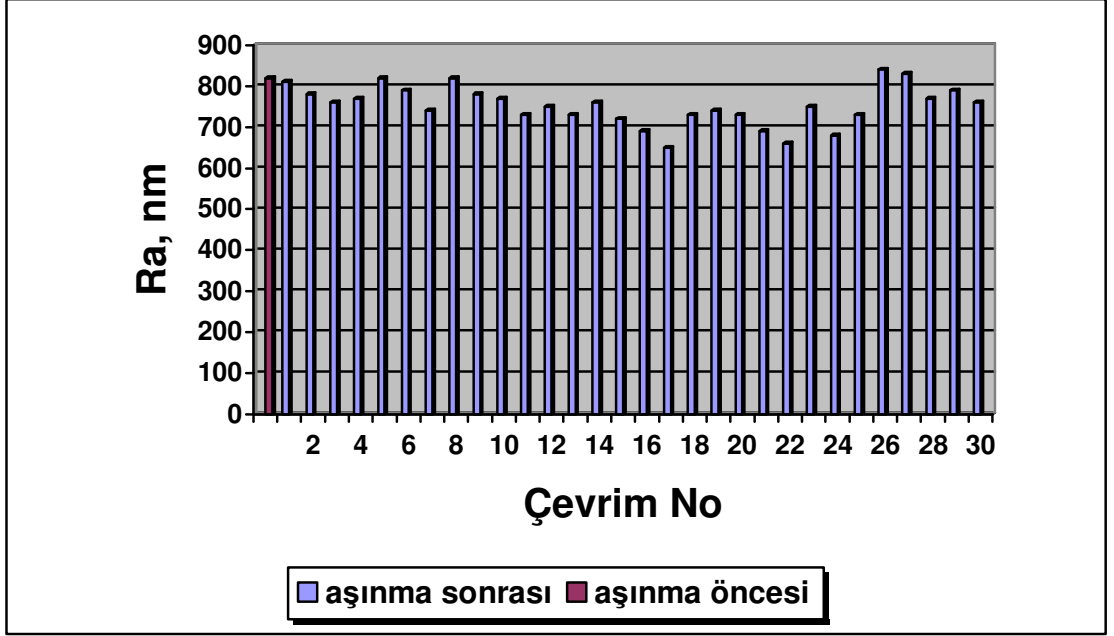
**Şekil 5.9.1.16.A:** Yüzeyi 240'lık zımpara ile geçilmiş, 2 saat borlanmış, AISI 1040 çeliğinin, Çentikli yüzeyinin (2231) aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğü değişim grafiği



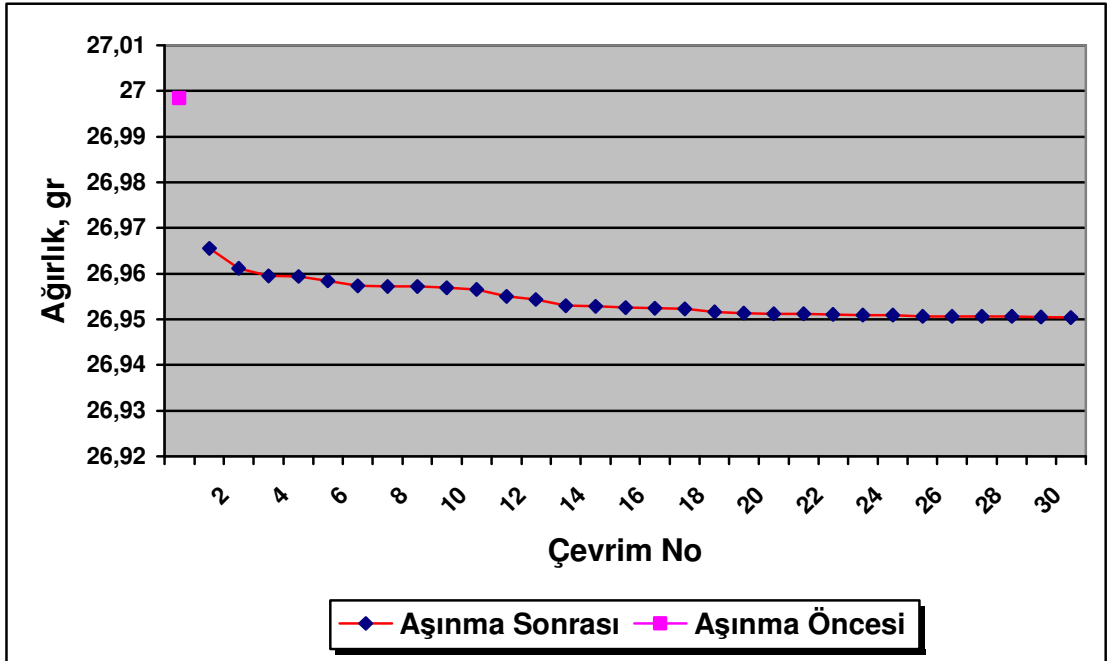
**Şekil 5.9.1.16.B:** Yüzeyi 240'lık zımpara ile geçilmiş, 2 saat borlanmış, AISI 1040 çeliğinin, Çentikli yüzeyinin (2231) aşınma sonrası ağırlık değişim grafiği

Yukarıdaki numunemizin belirli çevrimler sonunda yüzey pürüzlülüğünün arttığını, ancak 6. çevrimden sonra kademeli olarak düşüşe geçtiğini görmekteyiz.

Numunenin aşınma sonrası ağırlık kaybı 0.0022 gr'dır.



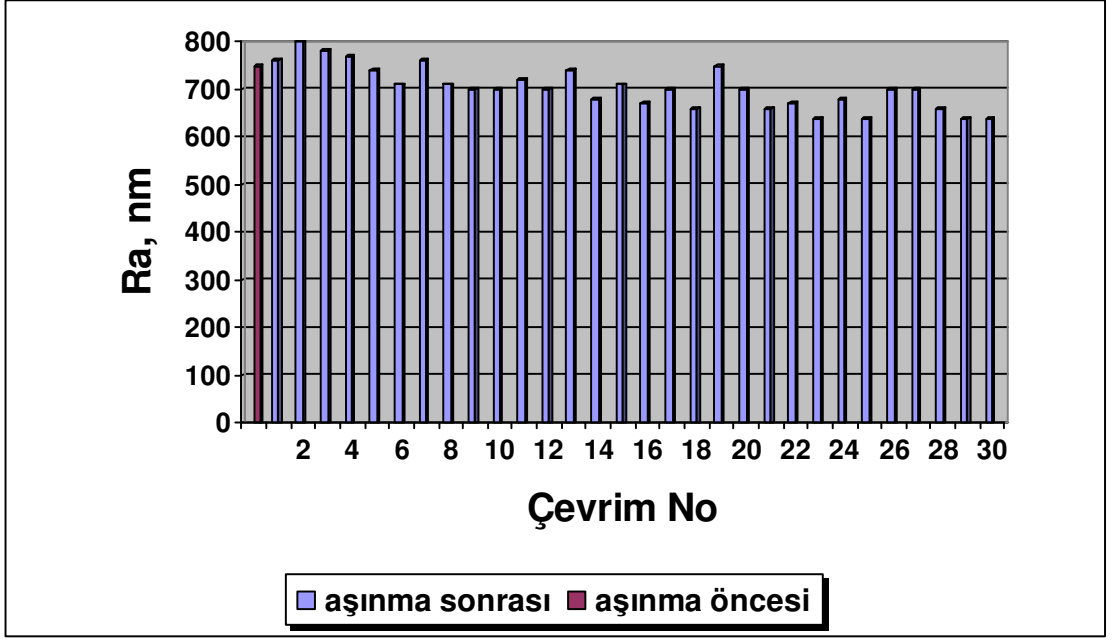
Şekil 5.9.1.17.A: Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, çentikli yüzeyinin (2661) aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişim grafiği



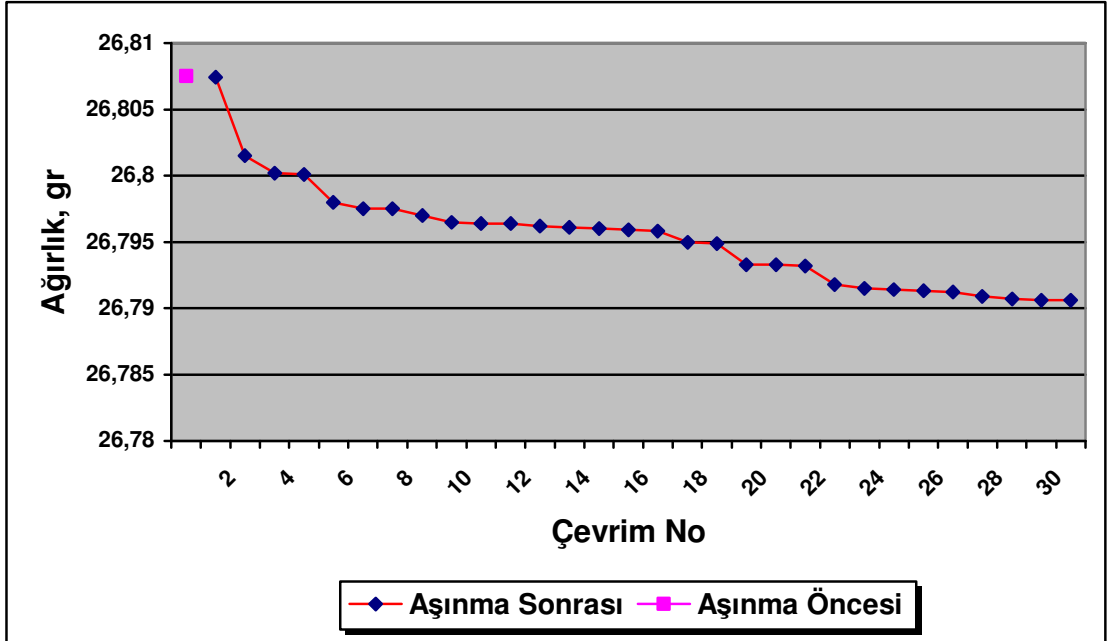
Şekil 5.9.1.17.B: Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, çentikli yüzeyinin (2661) aşınma sonrası ağırlık değişim grafiği

Numunemizin yüzey pürüzlülüğü sürekli değişse de belirli bir değer aralığında değişmektedir.

Aşınma sonrası ağırlık kaybı 0.0480 gr'dır.

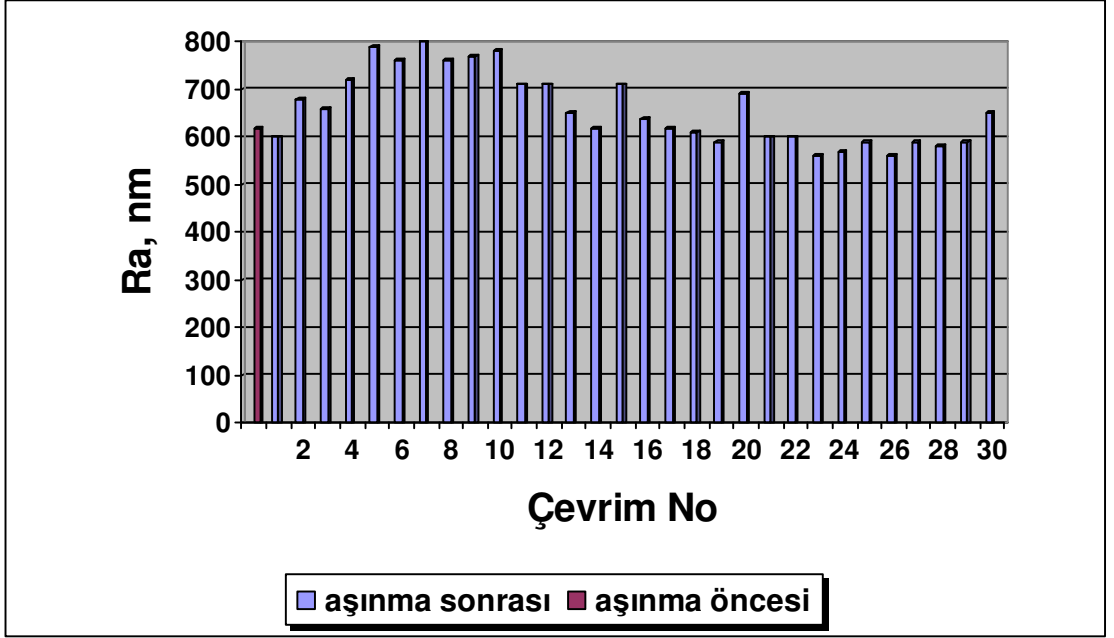


**Şekil 5.9.1.18.A:** (2461) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 4 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişim grafiği

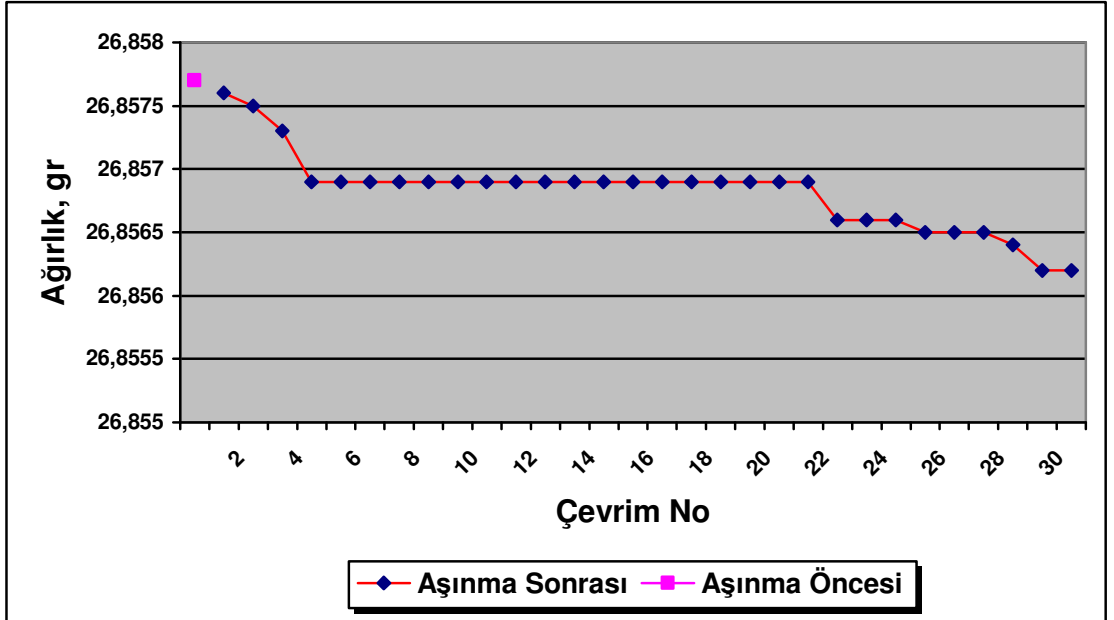


**Şekil 5.9.1.18.B:** (2461) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş, 4 saat borlanmış, 1040 çeliğinin, aşınma sonrası ağırlık değişim grafiği

Numunemizin yüzey pürüzlülüğü 3. çevrime kadar artsada sonar düşüşe geçmektedir. Numunemizin ağırlık kaybı ise 0,0169 gr'dır. Bunun 0,0075 gr'ı ise ilk çevrimde kopmayla oldu.



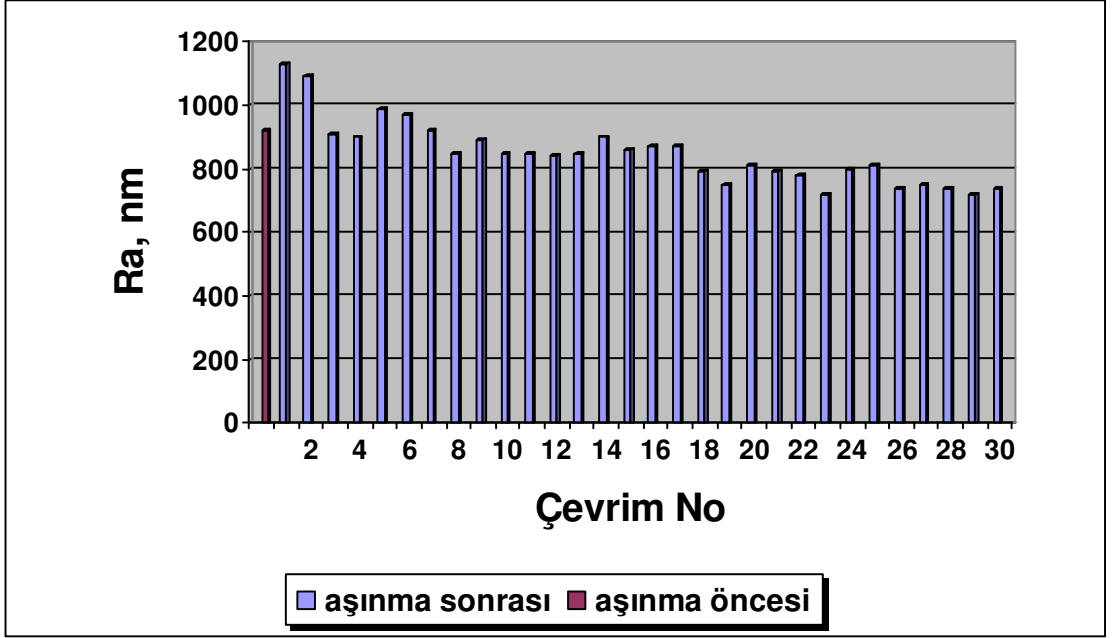
**Şekil 5.9.1.19.A:** (2261) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 1020 çeliğinin, aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişimini veren grafik



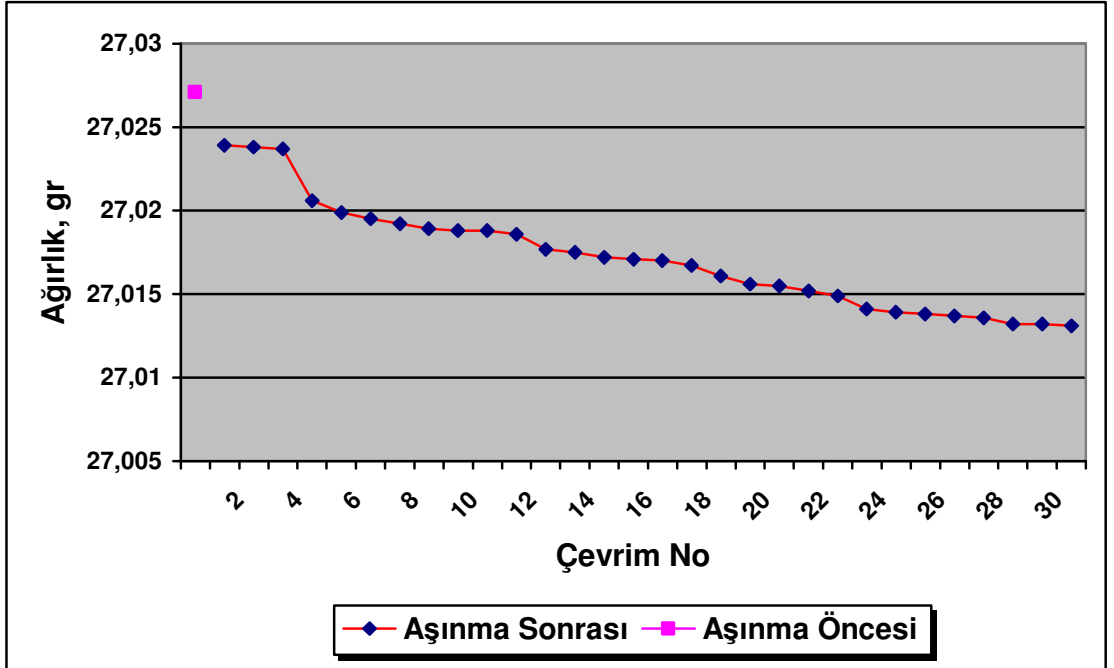
**Şekil 5.9.1.19.B:** (2261) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 1020 çeliğinin, aşınma sonrası ağırlık değişimini veren grafik

Numunemizin yüzey pürüzlülüğü 10. çevrime kadar artsada, sonrasında belirli bir düşüş göstermektedir ve sonrasında tekrar artmaktadır. Numunenin ağırlık kaybı ise 0.0015 gr'dır.



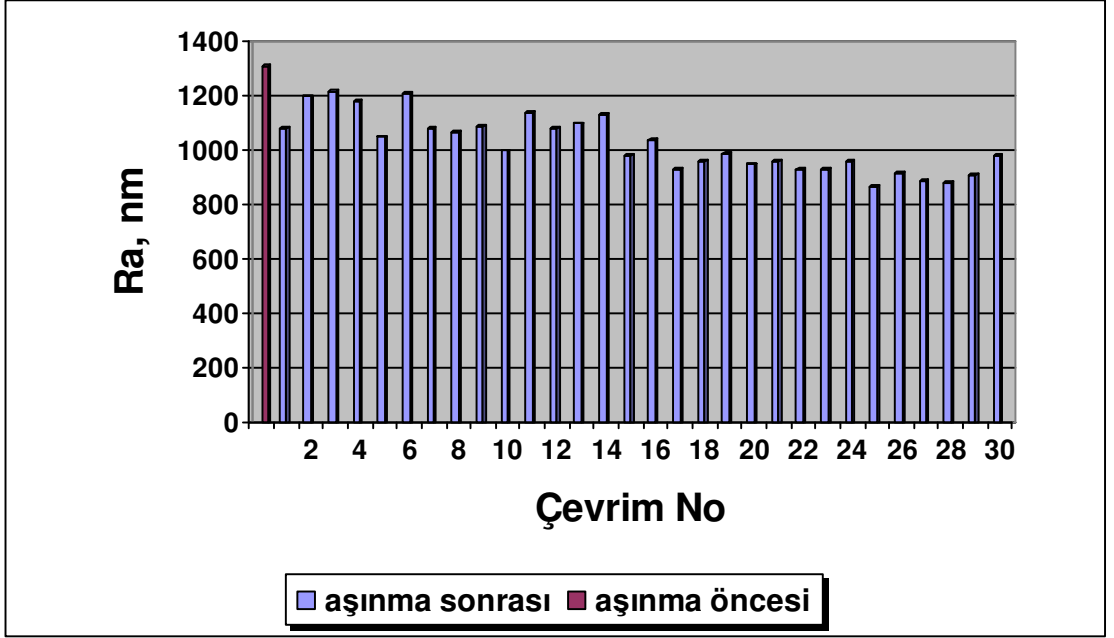


Şekil 5.9.1.20.A: (2411) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 4 saat borlanmış 1040 çeliğinin aşınma sonrası değişen yüzey pürüzlülüğünü veren grafik

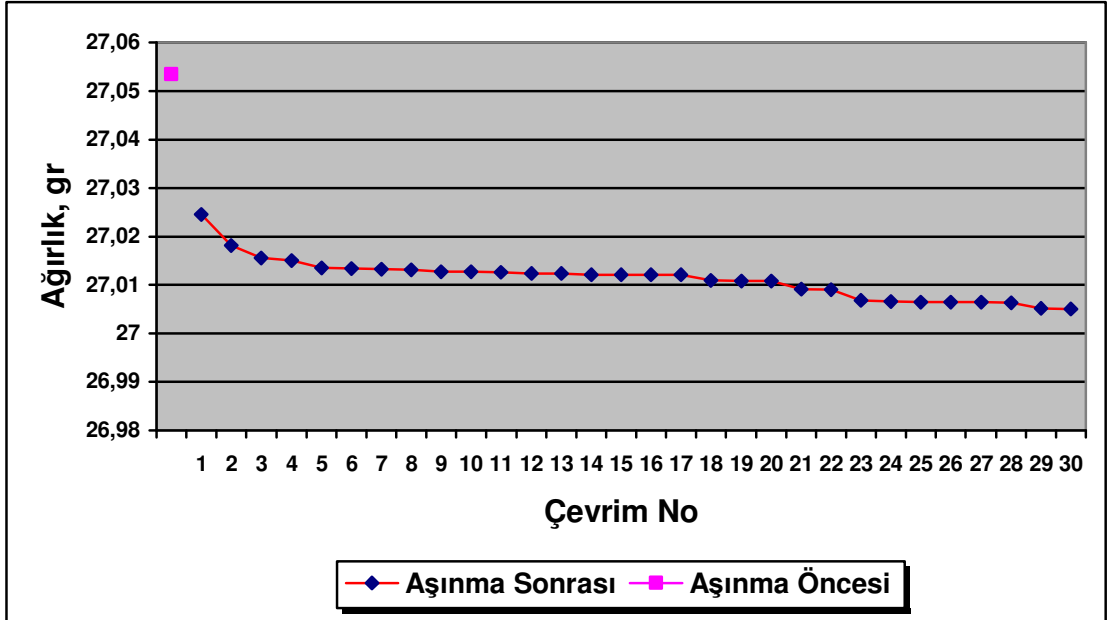


Şekil 5.9.1.20.B: (2411) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 4 saat borlanmış 1040 çeliğinin aşınma sonrası aşınma değişimini veren grafik

Numunenin yüzey pürüzlülüğü 3. çevrime kadar yükselse, sonrasında kararlı şekilde düşmektedir. Numunenin ağırlık kaybı ise 0,0140 gr'dır.

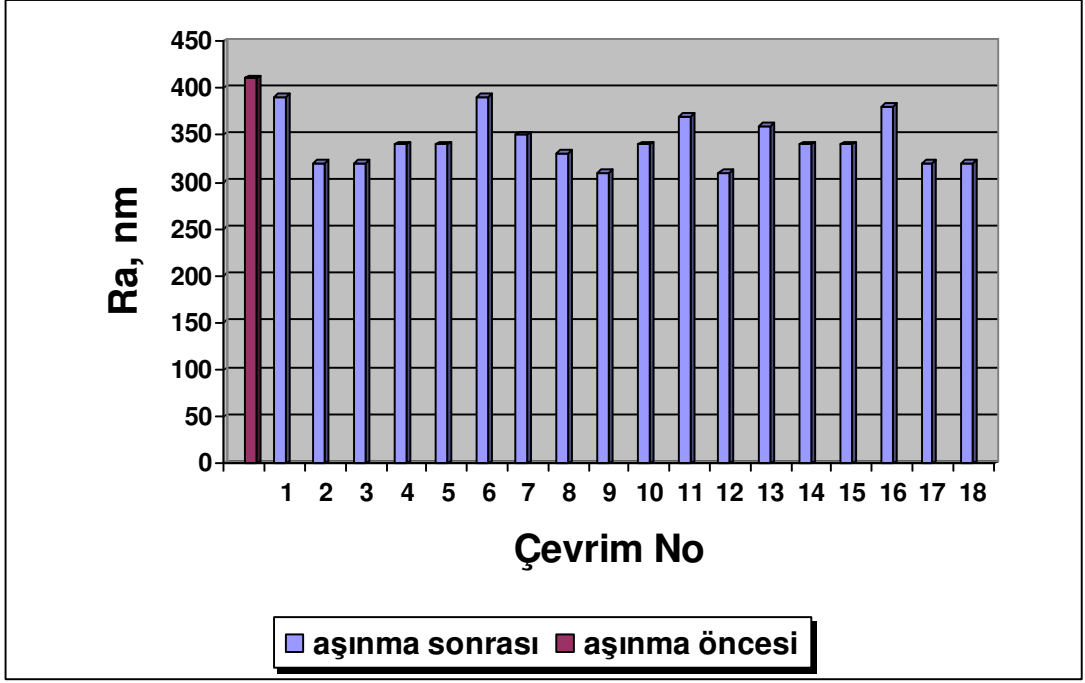


**Şekil 5.9.1.21.A: (2611)** 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğünü gösteren grafik

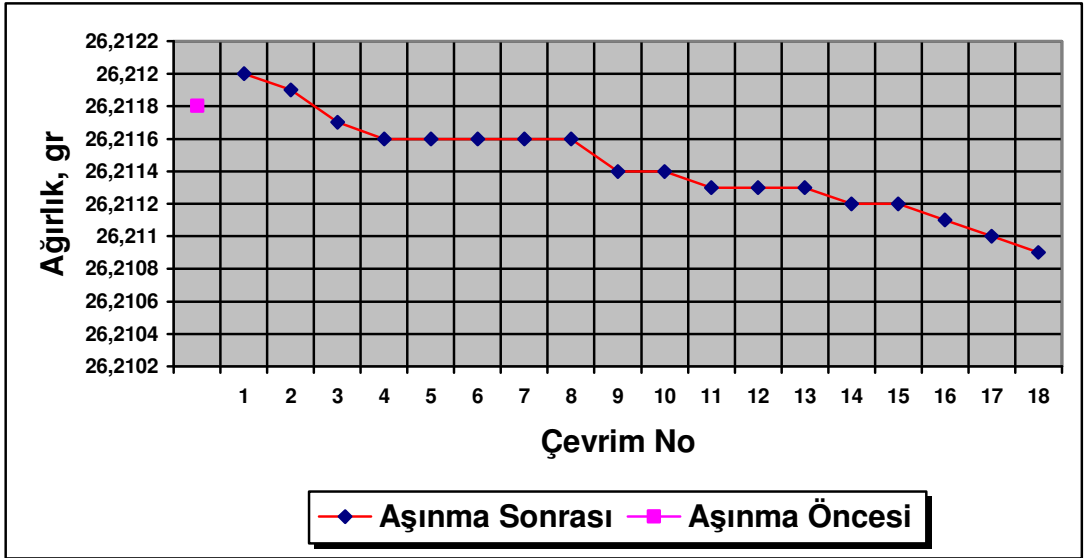


**Şekil 5.9.1.21.B: (2611)** 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 6 saat borlanmış, 1040 çeliğinin aşınma sonrası ağırlık değişimini gösteren grafik

Numunemizin yüzey pürüzlülüğü ilk çevrimden itibaren bariz şekilde düşüşe geçmektedir. Numunemizin aşınma sonrası ağırlık kaybı 0,0483 gr'dır. Kopmayla 0,0300 gr kayıp edilmiştir.

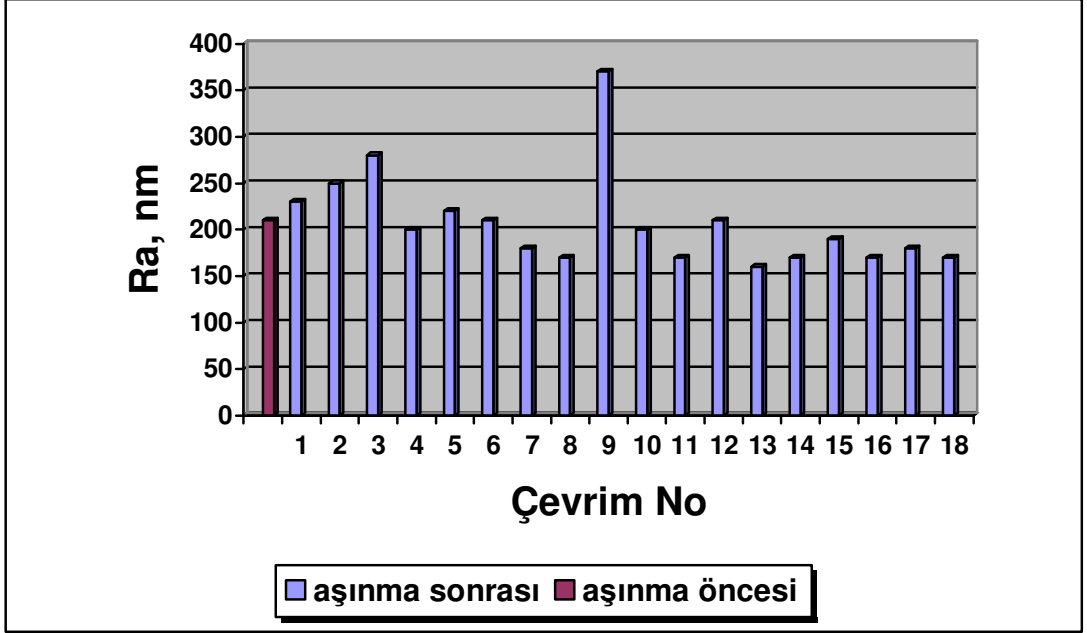


Şekil 5.9.1.22.A: (3211) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişimini veren grafik

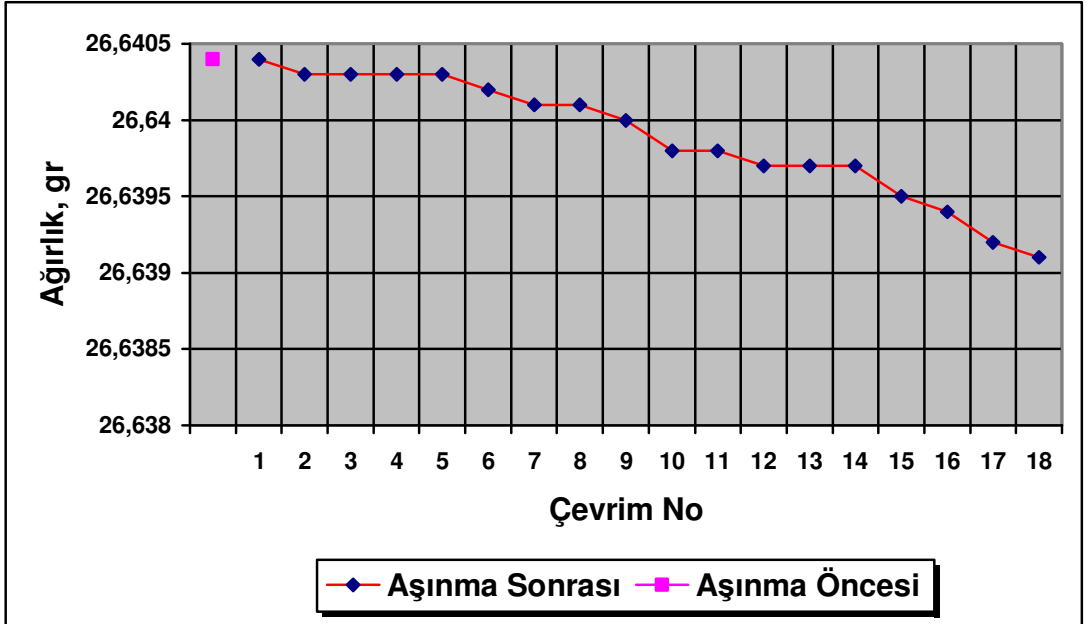


Şekil 5.9.1.22.B: (3211) 80'lik zımpara ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulmuş ve 2 saat borlanmış 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası ağırlık değişimini veren grafik

Numunemizin yüzey pürüzlülüğü ilk çevrimde bariz düşme göstermektedir, sonrasında ise dalgalanma gösterebilir belirli aralıklar arasında inip çıkmaktadır. Numunemizin aşınma sonrası ağırlık kaybı ise 0,0009 gr'dır. Numuneden kopma ile kayıp oluşmamıştır.



Şekil 5.9.1.23.A: (3261) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulan ve 2 saat borlanan 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değişimini veren grafik

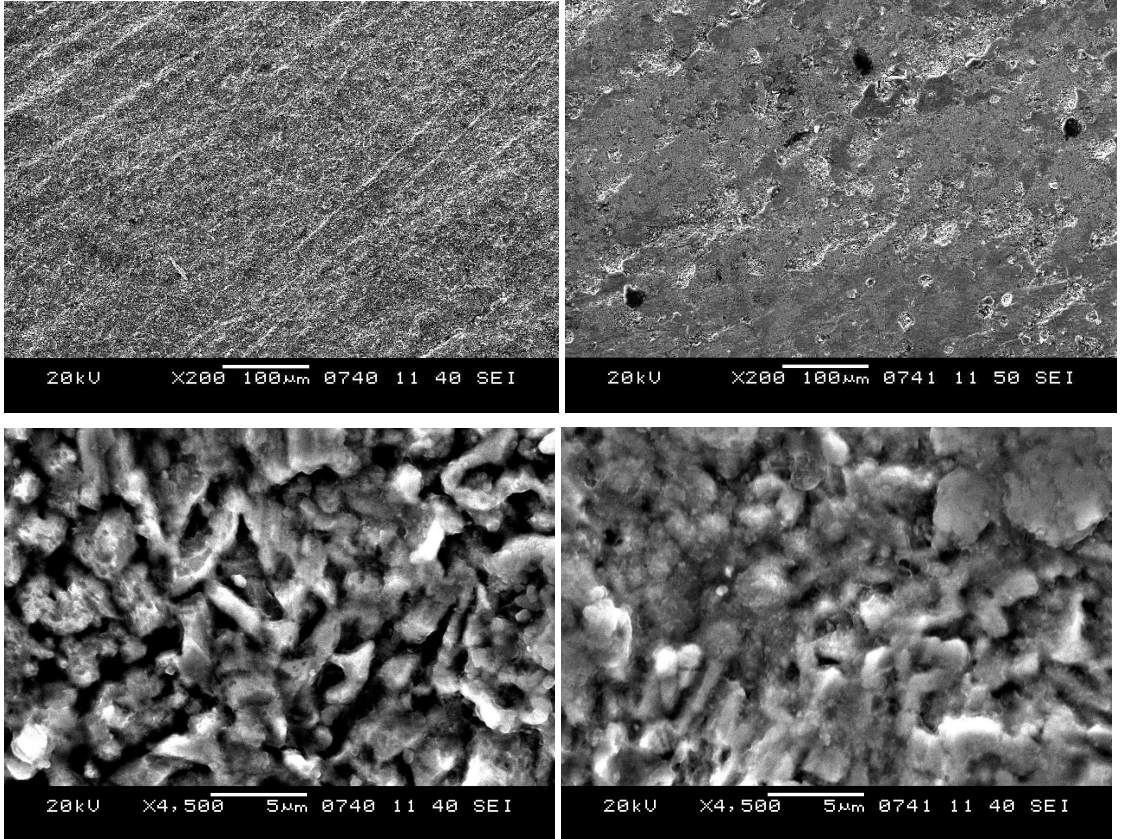


Şekil 5.9.1.23.B: (3261) Keçe ile yüzey pürüzlülüğü oluşturulan ve 2 saat borlanan 2344 sıcak iş çeliğinin aşınma sonrası aşınma değişimini veren grafik

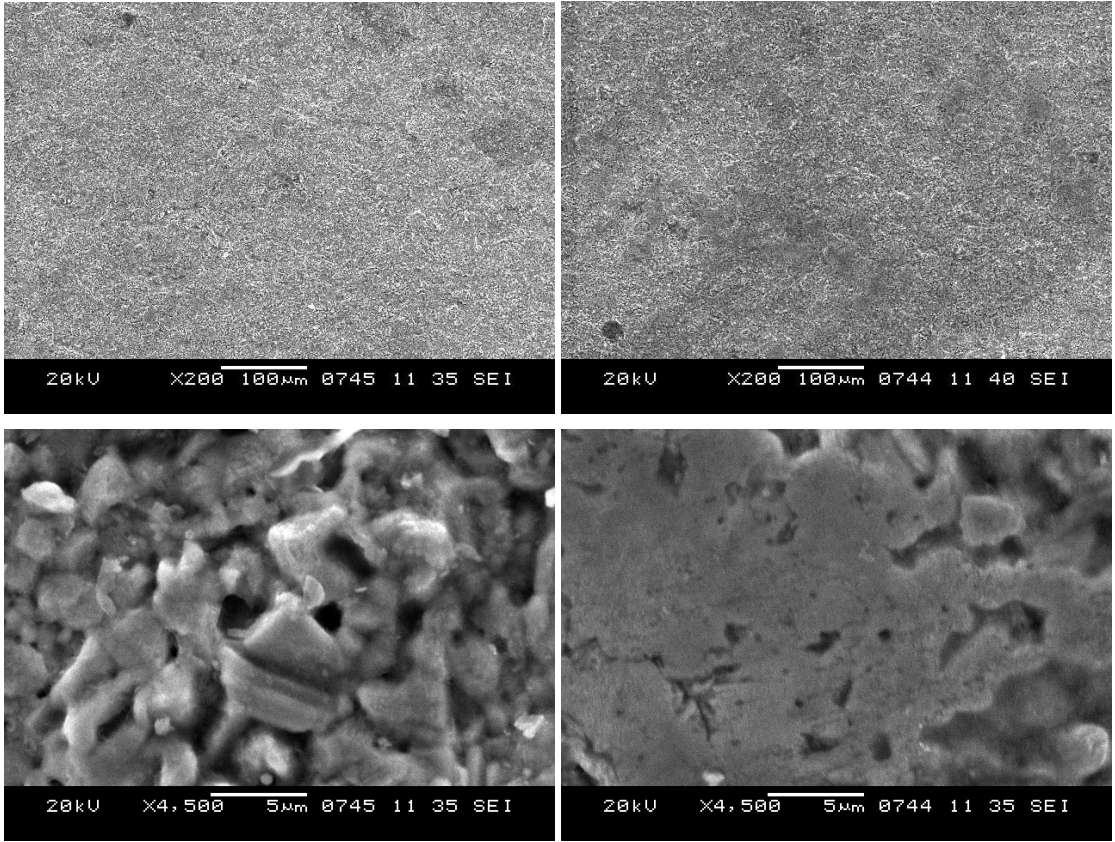
Numunemizin yüzey pürüzlülüğü 3. çevrime kadar artsada, sonrasında kademeli olarak düşmektedir. Numunemizin aşınma sonrası ağırlık kaybı 0.0013 gr'dır ve numuneden kopma sonucu ağırlık kaybı yoktur.

### 5.10. SEM Fotoları

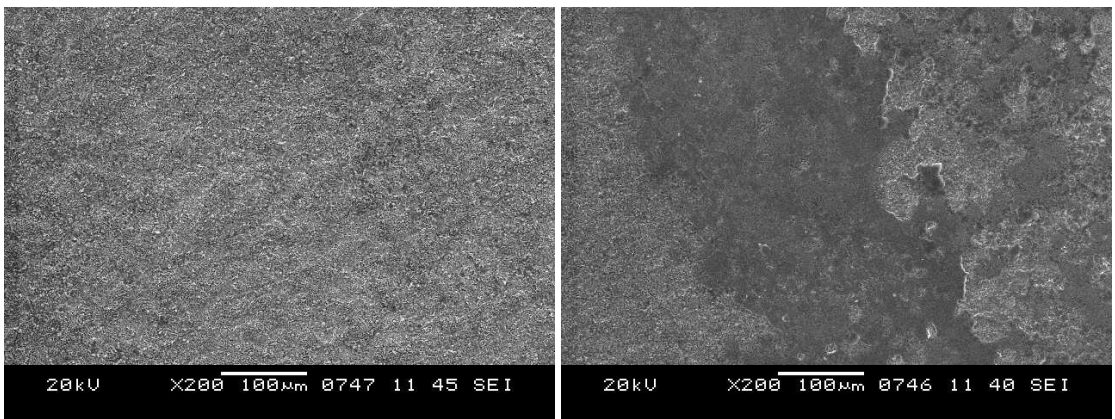
Aşınma deneylerimiz sonunda; numunelerimizin borlanmış yüzey görüntüleri ile aşınmış bölgelerin gösterdiği değişimi inceleyebilmek amacıyla SEM fotoları çekildi. SEM fotoları sayesinde değişik parametrelerin denendiği numunelerin yüzeyinde nasıl bor tabakaları oluştuğu görüntülenebildi. Buna ek olarak aşındırılan bölgelerin, aşınma sonrası yüzeylerinde meydana gelen izlerdeki tabaka değişimide görüntülenerek değişimler kıyaslandı.

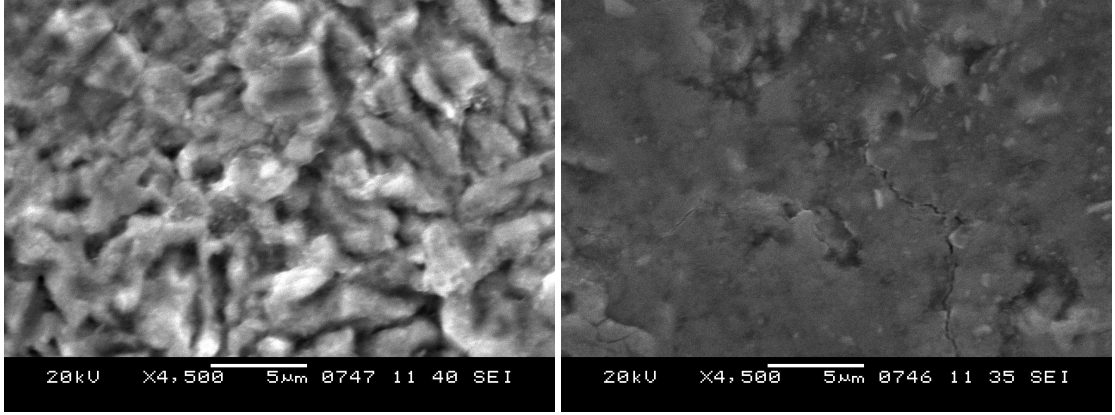


Şekil 5.10.1: 1211 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)

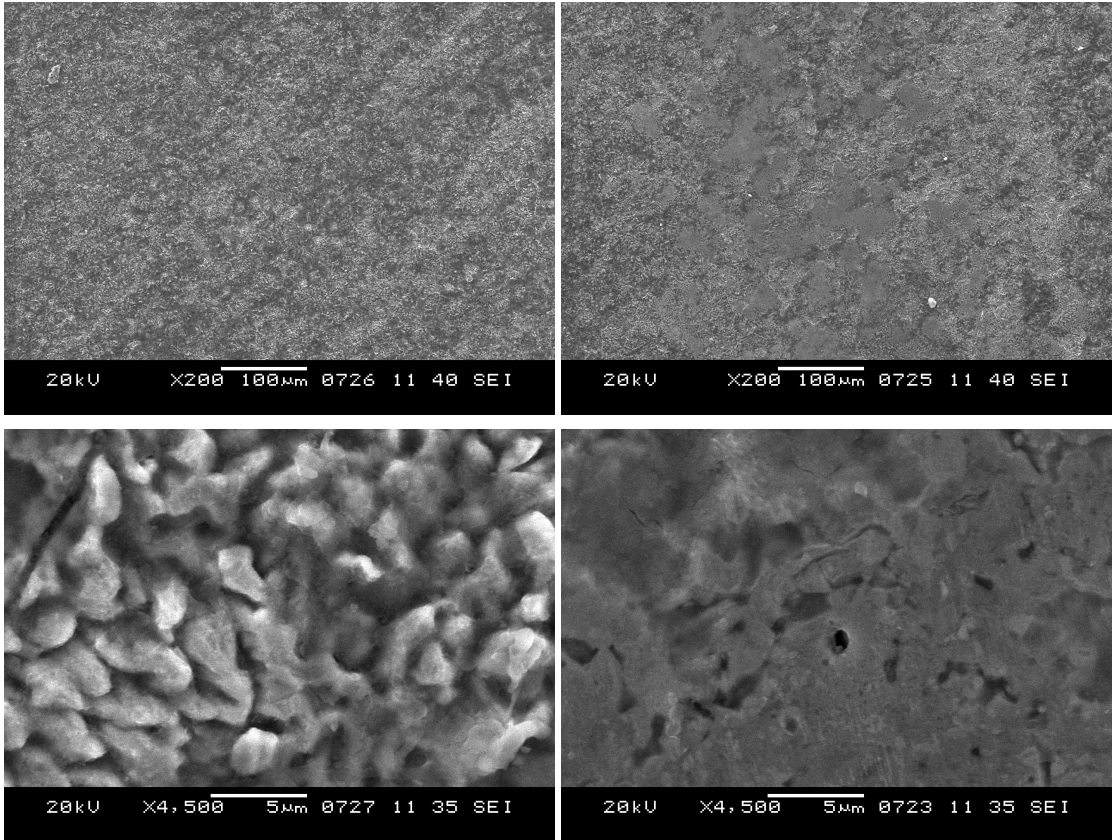


Şekil 5.10.2: 1611 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)

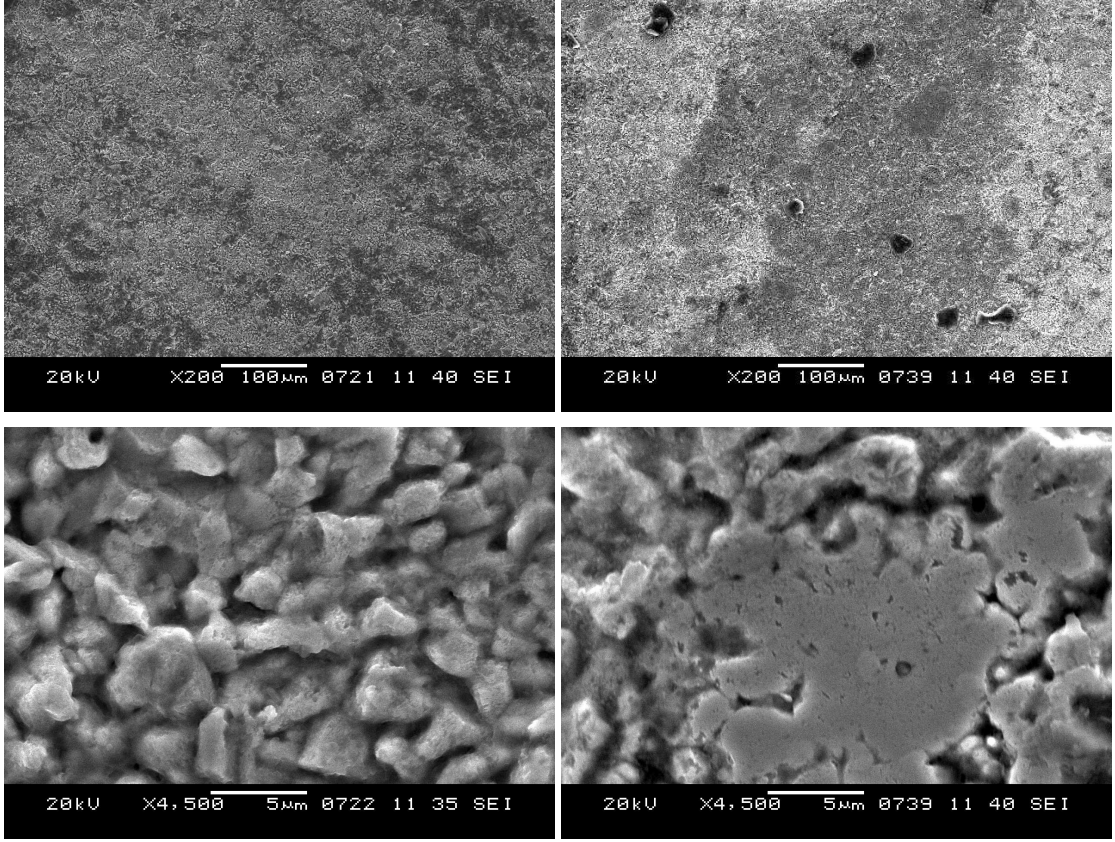




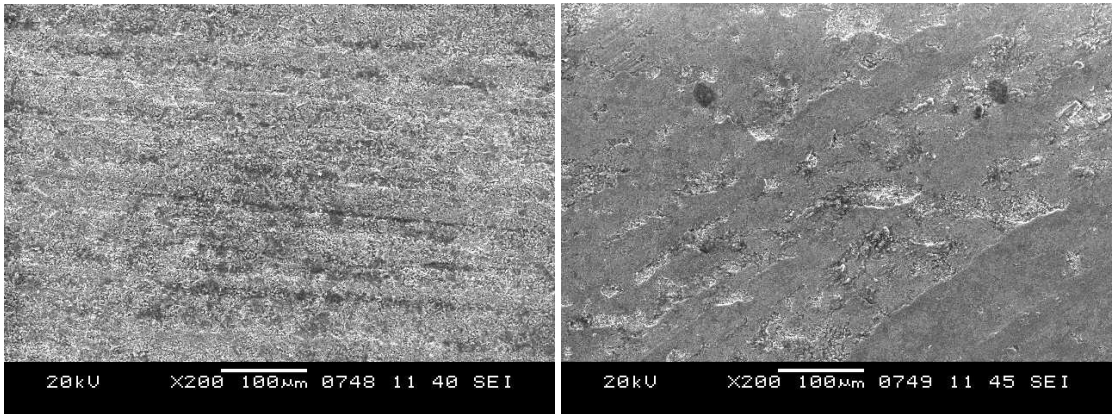
Şekil 5.10.3: 1262 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)



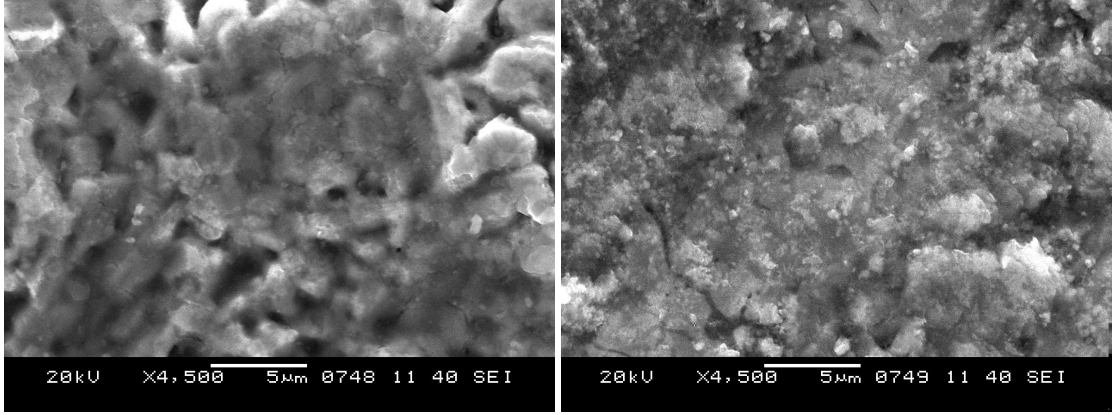
Şekil 5.10.4: 1661 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)



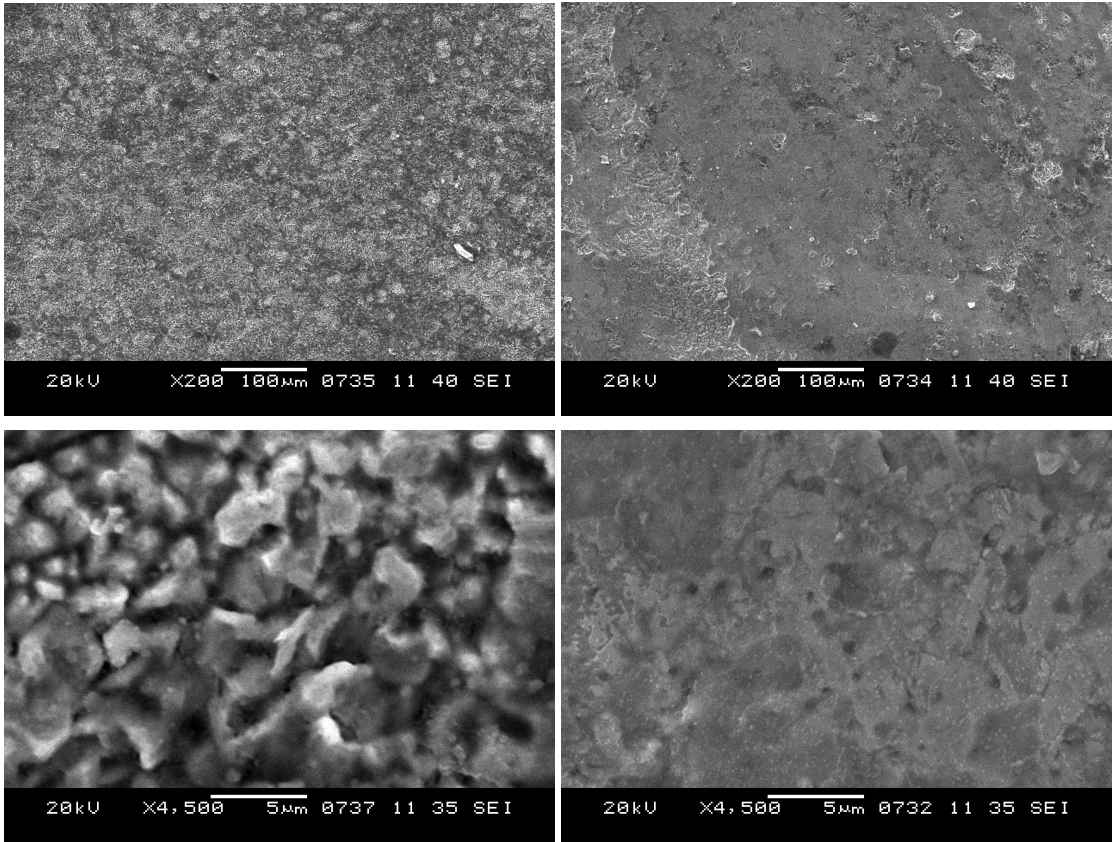
Şekil 5.10.5: 2231 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)



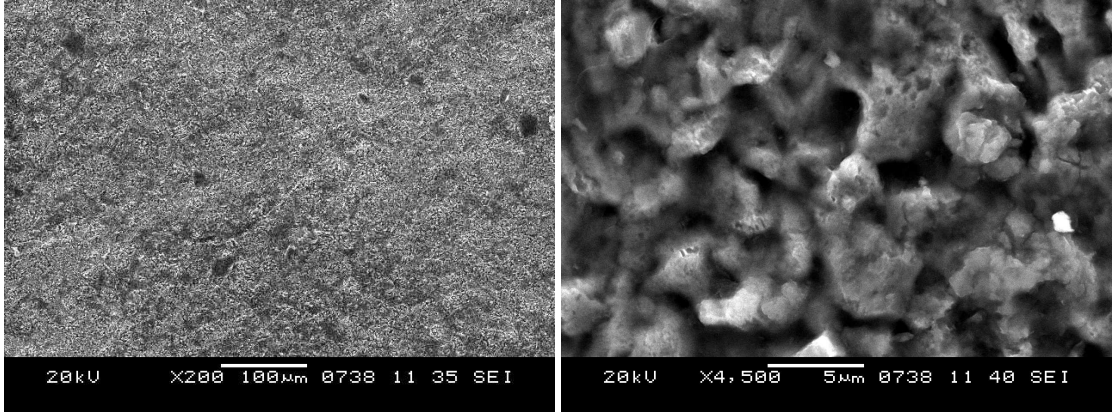




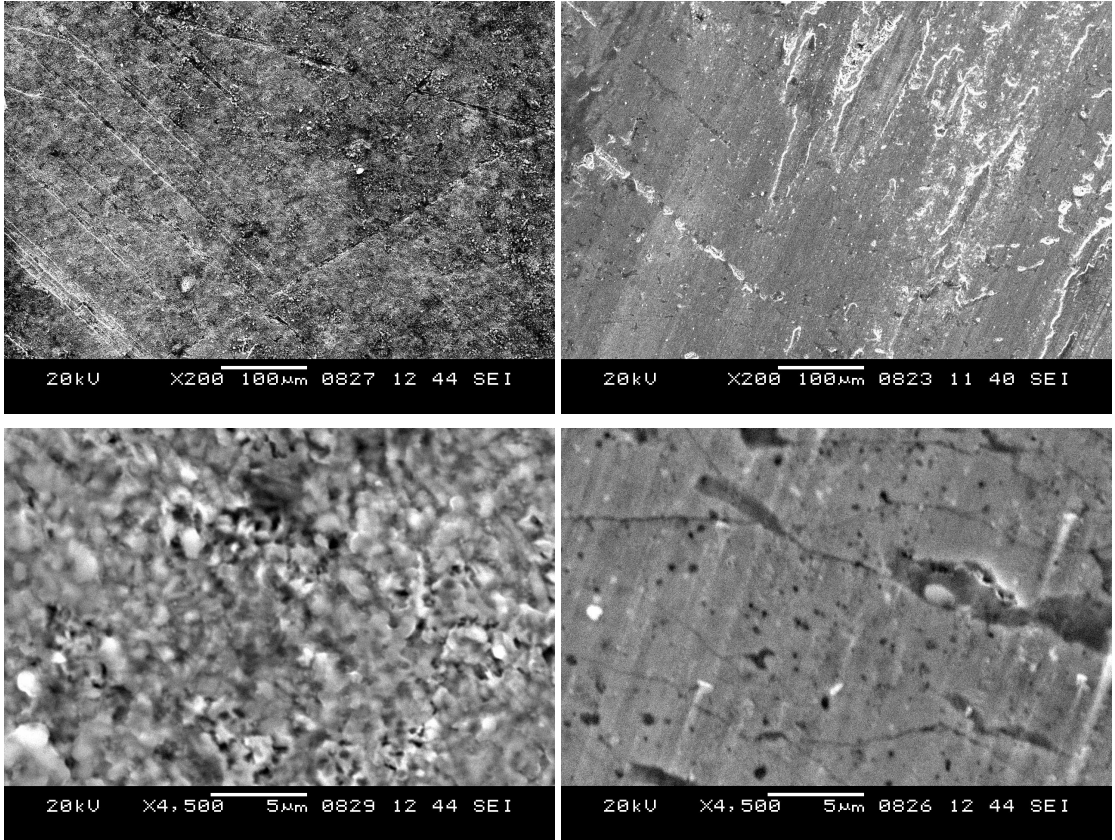
Şekil 5.10.6: 2611 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)



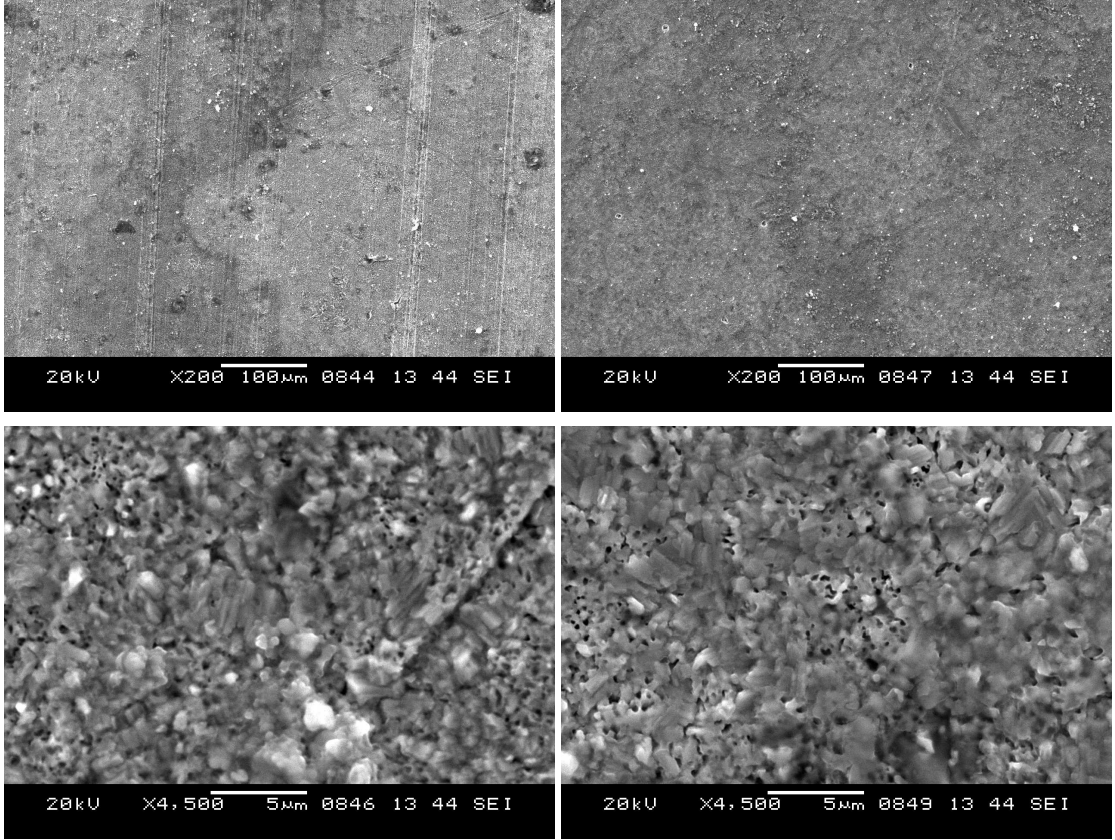
Şekil 5.10.7: 2261 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)



**Şekil 5.10.8:** 2661 nolu numunenin SEM fotoları (iz görülemediği için sadece yüzeyden çekildi)



**Şekil 5.10.9:** 3211 nolu numunenin SEM fotoları (soldakiler yüzeyden, sağdakiler izden)



Şekil 5.10.10: 3611 nolu numune nin SEM fotoları (soldakiler izden, sağdakiler yüzeyden)

## 6.GENEL SONUÇLAR

Yapmış olduğumuz tüm deneyler sonucunda vardığımız sonuçlar:

- Borlama işlemi yüzey pürüzlülüğü değiştirmektedir.
- Genel itibariyle, istisnalar olsa da; borlama süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünde artar.
- Her çelik malzemenin, belirli bir saat borlanmış numuneleri için belirlenmiş Kritik Yüzey Pürüzlülük değerleri vardır. Bu değer aynı malzeme ve borlama saati için sağlanan yaklaşık numune yüzey pürüzlülüğü sonuçlarından meydana gelmektedir. Borlama öncesi yüzey pürüzlülüğü, kritik pürüzlülük değerinin altında olan numunelerin; borlama sonrası pürüzlülük artışı çok yüksektir. Borlama öncesi yüzey pürüzlülük değeri bu kritik değer üzerinde olan numuneler içinse bu artış oranı daha düşüktür.
- Borlama süresi arttıkça boyut değişimide artar.
- AISI 1020 çeliği diğer çelikler ile aynı şartlar altında, daha büyük boyut değişimi oluşturmaktadır. Bu verileri AISI 1040 ve 2344 takip etmektedir. AISI 1020 çeliğinin diğer çeliklerden daha fazla boyut değişimine sahip olabilmesi alaşımsız yapısı ve daha az (C) oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. AISI 1040 çeliğide alaşımsız çeliklerden sayılsa da, 1020 çeliğine oranla neredeyse 2 kat (C) oranına sahip olması nedeniyle, borun çelik içine difüzyonu zorlaşmaktadır. AISI 2344 çeliğinin bor gelişimini olumsuz etkileyen ise yapısındaki alaşım elementlerinin çokluğudur.
- Mikro yapı fotolarından da gördüğümüz üzere: aynı malzemeye ait, yine aynı borlama işlemi saatine tabi tutulan ancak farklı başlangıç yüzey pürüzlülüklerine sahip numuneler yinede aynı kalınlıkta bor tabakası oluşturmaktadır. Kısacası başlangıç yüzey pürüzlülüğü, bor tabakası kalınlığına etki etmemektedir.
- Bor tabakası; aynı çelik numuneleri için, süre artışı ile yükseliş göstermektedir. En düşük bor tabakası 2 saatlik borlamada, en geniş bor tabakası ise 6 saatlik borlamada meydana gelmektedir.
- Malzeme çeşidi, borlama saati ve ilk yüzey pürüzlülüğü; ayrımı göstermeksizin, oluşan tüm numunelerin bor tabakaları ağırlıklı olarak tek faz oluşturmuştur. XRD analizinde tanımlanan bu faz FeB'dir.
- Pürüzlülük değişimi borür tabakası kalınlığı ile orantılı olarak değişmektedir.
- 6 saatlik borlanmış numuneler, 2 saatlik borlanmış numunelerden daha geniş bor tabakası oluşturduğundan dolayı, 6 saatlik numuneler – 2 saatliklere oranla ana malzemenin içine doğru daha yüksek mikrosertlikler göstermektedir. Mesafeler karşılaştırıldığında ise AISI 1020 çeliklerinin, AISI 1040 çeliğine ve AISI 2344 çeliğine karşı daha derin mesafelere dek mikro sertlik yüksekliğini koruduğu görülmektedir.

- Aşınma sonucu numunelerin yüzey pürüzlülükleride, ağırlıklarında değişime uğramaktadır. Pürüzlülük değişimi numunelere göre fark etsede, ağırlık değişimi tüm numuneler için düşme eğilimlidir.
- Aynı malzeme ve borlama saati, farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip numuneler arası yaptığımız kıyaslamalarda: yüzeyi daha pürüzlü olan malzemenin aşınmayla ağırlık kaybının daha fazla olduğunu gördük. Yine aynı numunelerin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük ve ağırlık kaybı grafiklerinin benzer olduğunu gördük.

**KAYNAKLAR**

1. Salih Uğur Bayça, Salim Şahin, Borlama (makale), Mühendis ve Makine Dergisi, Mayıs 2004
2. Babushkin, B. V., Polyakov, B. Z., Residual Stresses in Steel After Boriding From Melts, Met. Sci. Heat Treat., 15: 577-580, 1973
3. Badini, C., Gianoglio, C., Paradelli, G., The Effects of Carbon, Chromium and Nickel on the Hardness of Borided Layers, Surfaces and Coatings Tech., 30: 157-170, 1987
4. Badini, C., Gianoglio, C., Pradelli, G., Borurazione Di Acciai: Contributo Allo Studio Del Meccanismo Di Diffusione Del Boro, La Metallurgia Italiana, No.10: 747-756, 1987
5. Banerji, S.K., Morall, J.E., Boron in Steel, International Symposium, Milwaukee, Wisconsin, September 18, 1979
6. Barin, İ., Thermochemical Data of Pure Substances, VCH Verlagsgesellschaft GmbH, 1989
7. Bazille, P., Connaissances Actuelles Sur La Boruration, Traitement Thermique, 111: 31-38, 1977
8. Bels'kii, E. I., Stekovich, M. V., Rogov, V. A., Kryukov, V. P., Chemicothermal Treatment of Dies, Met. Sci. Heat Treat., 22: 398-401, 1980
9. Bindal, C., Az Alaşımli ve Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzey Kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tesbiti, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil. Enst., İstanbul, 1991
10. Biddulph, R. H., Boronizing for Erosion Resistance, Thin Solid Films, 45: 341-347, 1977
11. Bozkurt, N., Üçışık, A. H., Safoğlu, R. A., Çeliklerde Bor ile Yüzey Sertleştirme, 3. Ulusal Metalurji Kongresi, O.D.T.Ü., 1979
12. Bozkurt, N., Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul, 1984
13. Carbucicchio, M., Sambogna, G., Influence of Chromium on Boride Coatings Produced on Iron Alloys, Thin Solid Films, 126: 299-305, 1985
14. Carbucicchio, M., Palombarini, G., Effect of Alloying Elements on the Growth of Iron Boride Coating, J. Mater. Sci. Let., 6: 1147-1149, 1987
15. Fichtl, W., Boronizing and its Practical Application, Materials in Engineering, 2:276-286, 1981
16. Fichtl, W., Trausner, N., Matuschka, A.G., Boronizing with Ekabor, Elektroschmelzwerk Kempten GmbH, 6 p., 1987
17. Fiedler, H. C., Sieraski, R. J., Boriding Steel for Wear Resistance, Metal Progress: 101-107, 1971

18. Geller, Y., Tool Steels, ( Trans. Afanasyev, V. V.), Mir Publishers, 666p., Moscow, 1978
19. Goeuriot, P.Y., Fillit, P., Thevenot, F., Driver, S. H., Bruyas, H., The Influence of Alloying Element Addition on the Boriding of Steels, Mat. Sci. And Eng. : 9 – 19, 1982
20. Hamada, T., Methods of Production and Using Amorphous Mother Alloy, US Patent, No. 4505745, 19 March 1985
21. Han, S. H., Chun, J. S., A Study on the Electroboronizing of Steel by Superimposed Cycling Current, Journal of Materials Science, 15: 1379-1386, 1980
22. Hansen, M., Constitution of Binary Alloys, Mc Graw – Hill Company Inc.:247-253, 1958
23. Hayashi, Y., Sugeno, T., Nature of Boron in  $\alpha$  - iron, Akta. Met., Vol. 18 : 693 – 697, 1970
24. Hunger, H.J., Trute, G., Boronising to Produce Wear – Resistant Surface Layers., Heat Treatment of Metals, 2: 31-39, 1994.
25. İleri, S., Bor Bileşikleri, Yeryuvarı ve İnsan, Kasım 1976
26. Karamış, M. B., Nair, F., Selçuk, B., Borlanmış Malzemelerin Tribolojik Özellikleri, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 1995.
27. Katkhanov, B. B., Selection of Crucible Material for Electrolyte Boriding, Met. Sci. Heat Treat., 28: 869-871, 1987
28. Knotek, O., Lugscheider, E., Leuschen, K., Surface Layers on Cobalt Base Alloys by Boron Diffusion, Thin Solid Films, 45: 331 – 339, 1977
29. Krzyminski, H., Kunst, H. T., Borieren Refraktärer Metalle, Harterei Technische Mitteilungen, 28: 100-112, 1973
30. Kunst, H., Schaaber, O., Beobachtungen Beim Oberflächen Borieren Von Stahl III, HTM.22 Heft 4: 275 – 292, 1967
31. Lakhtin, Y. M., Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment, (Trans. Weinstein,N.), Mir Publishers, 426 p., Moscow, 1983
32. Linial, A. V., Lavella J. P., New Processes for Obtaining Increased Metal Hardness and Reduce Friction Properties by Boronizing-I, Industrial Heating, December 1974
33. Long, S., Mc Gurie, G. E., The Boriding of Chromium Photomasks for Increased Abrasion Resistance, Thin Solid Film, 64:433-438, 1979
34. Lovshenko, F. G., Vysotskii, V. T., Voroshnin, L.G., Lovshenko, Z. M., Diffusional Boronizing of Sintered Steels, Sov. Powder Metall. Met. Ceram., 17: 113-115, 1978
35. Lyakhovic, L. S., Kosachevskii, L. N., Dolmanov, F. V., Krukovich, M. G., Liquid Processes of Chemical Heat Treatment without Electrolysis, Met. Sci. Heat Treat., 14: 156-157, 1972
36. Matuschka, A.G., Boronizing, Carl Hanser Verlag, München Wien, 1980
37. Mineral Industry Surveys, Boron ,U.S. Geological Survey, 1998

38. Özsoy, A., Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi, Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bil. Enst., Eskişehir, 1996
39. Palombarini, G., Carbucicchio, M., High Boron Phases on Borided Iron and Iron Alloys, J. Materials Science Letters, 4: 170-172, 1985
40. Palombarini, G., Carbucicchio, M., Growth of Boride Coatings on Iron, J. Mater. Sci. Let., 6: 415-416, 1987
41. Permyakov, V. G., Yakovchuk, Y. E., Cherepin, V. T., Amirkhanova, T. V., Maifet, Y. P., Effect of Silicon on Formation of Boride Coatings, Met. Sci. Heat Treat., 15: 251-253, 1973
42. Poslu, K., Bor Mineralleri ve Bileşiklerine Genel Bakış, Bor Mineralleri Zenginleştirme Semineri, D.E.Ü., İzmir, 1994
43. Quing'en, M., Zaizhi, C., Boronization Process in Steel: Theory of Diffusion Channel, Model of Boron Atoms, Heat Treatments, 3. International Congress on Heat Treatment of Materials, Shanghai, China, 1983
44. Rile, M., Reasons for the Formation of Cracks in Boride Coatings on Steel, Met. Sci. Heat Treat., 16: 836-839, 1974
45. Riss, M., Khodorovsky, Y., Production of Ferro Alloys, Mir Publishers, Moscow: 260 – 262, 1967
46. Sarıtaş, S., Açılış Konuşması, 1. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı Bildiri Kitabı, Ankara, 1996
47. Selçuk, B., Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, E. Ü. Fen Bil. Enst., Kayseri, 1994
48. Selçuk, B., İpek, R., Karamış, M. B., AISI 5115 ve AISI 1020 Çeliklerinin Çekme Özelliklerine Borlamanın Etkisi, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu, 1995
49. Sinha, A. K., Heat Treating, ASM Handbook, 4: 437-446, 1982
50. Şen, U., Bindal, C., Yılmaz, F., Termokimyasal Yöntemle Bor Kaplama ve Kaplama Özellikleri, 8. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 1995
51. Türkiye Sınai ve Kalkınma Bankası A.Ş., Bor ve Bor Bileşikleri, Kimya Sektörü Araştırması, Şubat 1980
52. Ullmanns, Encyklopaedia der Technischen Chemi, Bor and ferrobör, Band 8: 644 – 675, 1974
53. Uygur, E.M., Dünya'da ve Türkiye'de Toz Metalurjisi, ODTÜ Uygulamalı Araştırmalar Dergisi, C. 2, S. 5, Ankara, 1979.
54. Ünlü, N., Öveçoğlu, L., Toz Metalurjisinin Yaygın Kullanım Alanları, Metal Dünyası, 1994
55. Vasil'eva, E.V., Yukov, I.I., Uralpov, A.M., Mel'nichuk, G.A., Structure and Properties of Borided Chromium Stainless Steel, Met.Sci. Heat Treat., 27: 391 – 394, 1985
56. Werner, D.H., Bor und borlegierte Stähle, Verlag Stahleisen GmbH, 1990
57. Yakhnina, V.D., Kozlov, A.M., Luk'yanitsa, A.Ö., Physicochemical Characteristics of Powder Boronizing, Sov. Powder Metall. Met. Ceram., 18: 237 – 240, 1979



58. Yücel, O., Kabotermik Ferrobor Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul, 1992
59. Yüksel, M., Can, A.Ç., Özmen, Y., X210Cr12 Takım Çeliğinin Tuz Banyosunda Borlanması, Araştırma Projesi Raporu, Denizli, 1991.
60. [www.periodensystem.net.de](http://www.periodensystem.net.de)
61. Şahin, Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobor Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Manisa, 1999