

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AISI 1020 ÇELİĞİNİN ELEKTROKİMYASAL OLARAK BORLANMASI VE  
BORLAMA İŞLEMİNİN DARBELİ KAYMA AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RECEP GÜNER

TEZ DANIŐMANI  
PROF.DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2023

10564520

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AISI 1020 ÇELİĞİNİN ELEKTROKİMYASAL OLARAK BORLANMASI VE  
BORLAMA İŞLEMİNİN DARBELİ KAYMA AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RECEP GÜNER

TEZ DANIŐMANI  
PROF.DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2023

10564520

## BEYAN

“AISI 1020 Çeliğinin Elektrokimyasal Olarak Borlanması ve Borlama İşleminin Darbeli Kayma Aşınma Davranışına Etkisi” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve ahlak kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

|   |  |                            |  |
|---|--|----------------------------|--|
| Bu çalışmanın,<br>Bilimsel Araştırmalar Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir |  |                            |  |
| <b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>  |  | <b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b> |  |
|   |  | ✗                          |  |
| Destek alındı ise;  |  |                            |  |
| <b>Destekleyen Kurum: BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ</b>   |  |                            |  |
| <b>Desteğin Türü</b>  |  | <b>Proje Numarası</b>      |  |
| <b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>  |  |                            |  |
| <b>2- TÜBİTAK</b>   |  |                            |  |
| <b>Diğer; .....</b>   |  |                            |  |
| <b>ETİK KURUL onayı var</b>   |  |                            |  |
| <b>İse;</b>   |  |                            |  |
| <b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>   |  | ...../.....                |  |

**RECEP GÜNER**

... / ... / 2023

**İmza**

## ÖN SÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübeleriyle her daim yanımda olup, öneri ve eleştirileri ile yol gösteren, laboratuvar imkânları ile gelişimimi destekleyen, birlikte çalışmaktan onur duyduğum değerli tez danışman hocam sayın Prof. Dr. Harun MİNDİVAN'a

Yüksek lisans eğitimini almam için beni teşvik eden, bana güvenip destekleyen ve tecrübeleriyle ışık olan değerli komutanım Makine Yüksek Mühendisi Emekli Albay Muzaffer BAKI'ye,

Bugünlere gelmemde büyük emek ve fedakârlık gösteren, desteklerini, sevgilerini ve güvenlerini hiç eksik etmeyen kıymetli annem Satı GÜNER'e ve babam Osman GÜNER'e, yanımda olan kardeşlerime,

Son olarak sabır ve anlayışla sevgisini eksik etmeyen, her zaman yanımda hissettiğim değerli eşim Kevser GÜNER'e teşekkürlerimi sunarım.

Yapmış olduğum bu çalışmayı babama ithaf ediyorum.

**Recep GÜNER**

**2023**

## ÖZET

### AISI 1020 ÇELİĞİNİN ELEKTROKİMYASAL OLARAK BORLANMASI VE BORLAMA İŞLEMİNİN DARBELİ KAYMA AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

Darbeli kayma aşınması, darbe ve kayma hareketlerinden kaynaklanan, parçaların hızlı aşınma arızasına yol açabilen ve oldukça karmaşık bir hasar sürecine sahip yaygın bir kompozit aşınma türüdür. Bu tür aşınma, yüksek hızlı demiryolu katener sistemi, nükleer enerji santralleri, rulmanlar, dişliler, vana yatakları, matkap uçları, yapay eklem, demiryolu ray sistemi yön değiştiren bileşenler gibi geniş bir endüstriyel ekipman yelpazesinde yaygındır. Yüzey hasarı olarak bilinen aşınma, parçanın hizmet ömrünü azaltır, ekipmanın işletme maliyetlerini artırır ve kritik bileşenlerin arızası nedeniyle ölümcül hasarlara yol açabilir. Temel malzemenin özelliklerini değiştirmeyen yüzey iyileştirme teknikleri, parçaların aşınma direncini artırmak için giderek daha fazla araştırılıyor ve uygulanıyor.

Borlama, çeliklerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için genellikle iki (FeB ve Fe<sub>2</sub>B) tabakalı yapıdan oluşan sert demir borür tabakaları oluşturarak kullanılır. Ancak, özellikle FeB'nin termal genleşme katsayıları ve kırılgenliği, borlanmış çeliklerin çevrimsel yük altında temas yüzeylerinde kullanımını sınırlar. AISI 1020 çelikleri üzerinde yapılan geleneksel borlama uygulamalarıyla ilgili birçok çalışma yayınlanmış olmasına rağmen, oluşturulan kaplamalarda FeB'nin varlığı nedeniyle elde edilen sonuçlar endüstride uygulanamaz.

Bu çalışmanın amacı, AISI 1020 çeliğinin yüzey özelliklerini ergimiş tuz elektrolizi ile borlama uygulayarak iyileştirmek ve AISI 1020 çeliğinin darbeli-kayma aşınma davranışını incelemektir. Bu çalışmada, borlamanın AISI 1020 çeliğinin aşınma direnci üzerine etkisi, özel tasarlanmış bir darbeli-kayma aşınma test cihazı kullanılarak araştırılmıştır. Borlanmış ve işlem görmemiş numunelerin yapısal karakterizasyonu, X-ışını difraktometresi ve optik mikroskop kullanılarak yapılmış ve sertlikleri ölçülmüştür. Oda sıcaklığında darbeli-kayma aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma mekanizmasını belirlemek için aşınma izleri optik mikroskop altında incelenmiştir. Aşınma kayıpları, 2-D profilometre kullanılarak ölçülmüştür. Bu incelemelerin sonuçları, borlamanın AISI 1020 çeliğinin oda sıcaklığında darbeli-kayma aşınma direncini artırdığını ortaya koymuştur. Mikroyapı ve mikrosertlik analiz sonuçlarına göre, 950 °C'de 15 dk elektrokimyasal borlama (EB) ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yüzeyde yaklaşık 40 µm kalınlığında ve yüzey sertliği olarak 1450±50 HV<sub>0,05</sub> değerine sahip tek tabakalı (Fe<sub>2</sub>B) bir borür yapısı oluşmuştur. Ancak, 950 °C'de 30 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yaklaşık 140 µm kalınlığında ve yüzey sertliği olarak 1900±50 HV<sub>0,05</sub>

değerine sahip iki tabakalı (FeB+Fe<sub>2</sub>B) bir borür yapısı oluşmuştur. Özetle, borür yapıların aşınma direnci, darbe ve kayma bölgelerinde farklılık göstermiştir. Tek tabakalı (Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapı, darbe bölgesindeki tokluğu ve sünekliği nedeniyle daha iyi performans sergilemiş ve daha az aşınma derinliği elde edilmiştir. Ancak, iki tabakalı (FeB+Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapı, daha yüksek sertliği nedeniyle kayma bölgesinde daha iyi performans göstermiştir, ancak bu durum, çelik bilyanın yüzeyinde daha fazla aşınmaya neden olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrokimyasal Borlama, AISI 1020 Çelik, Darbeli-Kayma Aşınma.

## ABSTRACT

### **THE EFFECT OF BORIDING PROCESS ON IMPACT SLIDING WEAR BEHAVIOR OF ELECTROCHEMICAL BORIDED 1020 STEEL**

Impact-sliding wear, which is caused by impact and sliding motions, is a common type of composite wear that can quickly lead to rapid wear failure of parts and has a very complex damage process. This type of wear is common in a wide range of industrial equipment, including high-speed railway catenary systems, nuclear power plants, bearings, gears, valve seats, drag bits, artificial joints, railway track system turnouts, and other components. Wear failure as a type of surface damage reduces the service life of the part, raises the running costs of the equipment, and can even lead to catastrophic accidents owing to the breakdown of crucial components. Surface strengthening techniques that do not modify the properties of the base material are increasingly being explored and implemented to improve the wear resistance of parts.

Boriding is typically used to improve the surface properties of steels by forming layers of hard iron boride composed of dual FeB and Fe<sub>2</sub>B phases. However, structural distinctions between these borides, specifically the thermal expansion coefficients and brittleness of FeB, restrict the use of borided steels on contact surfaces under cyclic loads. Even though numerous studies on conventional boriding applications on AISI 1020 steels via pack boriding or plasma paste boriding have been published, their results cannot be implemented in industry due to the presence of FeB in the grown coatings.

The purpose of this study is to improve the surface properties of AISI 1020 steel by applying cathodic reduction and thermal diffusion-based boriding by forming thick single-phase Fe<sub>2</sub>B layer and dual phase boride structures composed of Fe<sub>2</sub>B (inner) and FeB (outer) on AISI 1020 steel, and then to examine the impact sliding wear behavior of samples. In the present study, the influence of boriding on the wear resistance of AISI 1020 steel was investigated by a homemade impact-sliding wear tester. Structural characterization of borided and bare samples was conducted using an X-ray diffractometer and optical microscope, along with hardness measurements. Wear tracks of samples subjected to an impact-sliding wear test at room temperature were examined under an optical microscope in order to determine their wear mechanism. A 2-D profilometer was also used to measure the wear loss. Results of these examinations revealed that boriding leads to an increment in the impact-sliding wear resistance of AISI 1020 steel at room temperature. On the basis of the microstructure and microhardness analysis results, it has been determined that a single-layered (Fe<sub>2</sub>B) borided structure with a

thickness of approximately 40  $\mu\text{m}$  and a surface hardness of  $1450\pm 50 \text{ HV}_{0.05}$  is formed on the surface of low carbon steel during 15 min at 950 °C with 45 min of soaking time. At EB in 30 min at 950 °C with 45 min of soaking time, however, a two-layered ( $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ ) borided structure with an approximate thickness of 140  $\mu\text{m}$  and a surface hardness of  $1900\pm 50 \text{ HV}_{0.05}$  is formed on the surface of the low-carbon steel. In summary, the wear resistance of the borided structures differed in the impact and sliding zones. The single-layered ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) structure showed better performance in the impact zone due to its toughness and ductility, resulting in less wear depth. Conversely, the two-layered ( $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ ) structure performed better in the sliding zone due to its higher hardness, but this led to more wear on the steel ball surface.

**Keywords:** Electrochemical boriding, AISI 1020 Steel, Impact-Sliding Wear.

# İÇİNDEKİLER

|  | Sayfa |
|--|-------|
| ÖN SÖZ.....  | i     |
| ÖZET.....  | ii    |
| ABSTRACT .....   | iv    |
| İÇİNDEKİLER.....   | vi    |
| TABLolar LİSTESİ.....                                      | viii  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                      | ix    |
| KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....                       | xi    |
| 1. GİRİŞ.....  | 1     |
| 2. BOR VE MİNERALLERİ.....                                 | 4     |
| 3. BORLAMA PROSESLERİ.....                                 | 7     |
| 3.1. Borlama ve Borür Tabakasının Yapısı.....              | 7     |
| 3.2. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması.....             | 11    |
| 3.3. Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları ..... | 15    |
| 3.3.1. Borlama İşleminin Avantajları .....                 | 15    |
| 3.3.2. Borlama İşleminin Dezavantajları.....               | 16    |
| 3.4. Borlama Yöntemleri.....                               | 17    |
| 3.4.1. Katı Ortam Borlama .....                            | 18    |
| 3.4.1.1. Kutu Borlama .....                                | 18    |
| 3.4.1.2. Pasta Borlama.....                                | 20    |
| 3.4.1.3. Akışkan Yataklı Borlama .....                     | 21    |
| 3.4.2. Sıvı Ortam Borlama .....                            | 22    |
| 3.4.2.1. Tuz Banyosunda Akımsız Borlama .....              | 23    |
| 3.4.2.2. Ergimiş Tuz Elektrolizi ile Borlama.....          | 24    |
| 3.4.3. Gaz Ortam Borlama.....                              | 26    |
| 3.4.4. Plazma Borlama .....                                | 26    |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....                            | <b>28</b> |
| <b>5. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....                               | <b>34</b> |
| <b>5.1. Deney Düzenegi ve Numune Hazirlanmasi</b> .....          | <b>34</b> |
| <b>5.2. Kaplama Tabakasinin Karakterizasyonu</b> .....           | <b>35</b> |
| <b>5.2.1. Optik Metal Mikroskop (OM) Calismalari</b> .....       | <b>35</b> |
| <b>5.2.2. X-Işınları Difraktometresi (XRD) Calismalari</b> ..... | <b>35</b> |
| <b>5.2.3. Mikrosertlik Ölçümleri</b> .....                       | <b>35</b> |
| <b>5.2.4. Aşınma Deneyleri</b> .....                             | <b>35</b> |
| <b>6. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA</b> .....                  | <b>37</b> |
| <b>6.2. Karakterizasyon Sonuçları</b> .....                      | <b>37</b> |
| <b>7. SONUÇLAR</b> .....   | <b>46</b> |
| <b>KAYNAKÇA</b> .....  | <b>47</b> |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|   | Sayfa |
|---|-------|
| <b>Tablo 2.1.</b> Bor Elementinin Bazı Fiziksel Özellikleri. ....                               | 4     |
| <b>Tablo 2.2.</b> Bor Elementinin Bazı Kimyasal Özellikleri. ....                               | 5     |
| <b>Tablo 2.3.</b> Bazı Önemli Bor Mineralleri ve Bulunduğu Yerler.....                          | 5     |
| <b>Tablo 3.1.</b> Farklı Borürler ve Bazı Özellikleri. ....                                     | 10    |
| <b>Tablo 3.2.</b> FeB ve Fe <sub>2</sub> B Tabakaların Bazı Özellikleri. ....                   | 14    |
| <b>Tablo 3.3.</b> Borlanmış Bazı Çeliklerin Sertliklerinin Karşılaştırılması. ....              | 15    |
| <b>Tablo 3.4.</b> Katı Bor Kaynaklarının Bazı Özellikleri.....                                  | 18    |
| <b>Tablo 3.5.</b> Sıvı Ortam Borlama İşleminde Kullanılan Temel Bor kaynakları ve Özellikleri.. | 23    |
| <b>Tablo 5.1.</b> AISI 1020 Çelik Kimyasal Bileşimi .....                                       | 34    |
| <b>Tablo 5.2.</b> Aşınma Deneyi Bilgileri .....   | 35    |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

|   | Sayfa |
|---|-------|
| Şekil 3.1. Borlama İşleminin Yüzey İşlemleri Arasındaki Yeri. ....  | 8     |
| Şekil 3.2. Borlama İşleminin Isıl İşlem Teknikleri Arasındaki Yeri. ....  | 8     |
| Şekil 3.3. Borür Tabakası Oluşum Aşaması. ....  | 9     |
| Şekil 3.4. Borlama İşlemi Sonucu Oluşan Demir Borür Fazlarının Görünümü. ....   | 11    |
| Şekil 3.5. Fe <sub>2</sub> B ile FeB Arasında Meydana Gelen Çatlak. ....  | 12    |
| Şekil 3.6. Borür Tabakası Çeşitleri. ....   | 13    |
| Şekil 3.7. Demir-Bor Denge Diyagramı. ....  | 14    |
| Şekil 3.8. Kutu Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü. ....  | 19    |
| Şekil 3.9. Kutu Borlama Prosesinde Zaman ve Sıcaklık. ....  | 19    |
| Şekil 3.10. Pasta Borlama Macunu. ....  | 20    |
| Şekil 3.11. Macunlanmış Numune. ....  | 21    |
| Şekil 3.12. Akışkan Yatakta Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü. ....  | 22    |
| Şekil 3.13. Elektrokimyasal Borlamada Kullanılan İlk Düzenek. ....  | 24    |
| Şekil 3.14. Gaz Ortam Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü. ....  | 26    |
| Şekil 3.15. Plazma Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü. ....   | 27    |
| Şekil 5.1. Elektrokimyasal Borlama Deney Düzeneği. ....   | 34    |
| Şekil 5.2. Darbeli Kayma Aşınma Deney Cihazının Genel Görünümü. ....  | 36    |
| Şekil 6.1. (a) 15 dk ve (b) 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Düşük ve Yüksek Büyütmeli OM Kesit Görüntüleri. .... | 38    |
| Şekil 6.2. 15 dk ve EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların XRD Paterni. ....  | 39    |
| Şekil 6.3. İncelenen Kaplamaların Kesit Sertlik Değişimi. ....  | 40    |
| Şekil 6.4. Numunelerin Yüzeylerinde Oluşan Aşınma İzinin Şematik Gösterimi. ....  | 40    |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Şekil 6.5.</b> Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların (a) Darbe ve (b) Kayma Bölgelerinin Temsili 2-D Profilleri. ....                           | <b>41</b> |
| <b>Şekil 6.6.</b> Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Darbe ve Kayma Bölgelerinin Aşınma Derinlikleri. ....                                      | <b>42</b> |
| <b>Şekil 6.7.</b> Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Darbe ve Kayma Bölgelerine Ait Aşınma Yüzeylerinin Düşük Büyütme Görüntüleri (x50). ....   | <b>43</b> |
| <b>Şekil 6.8.</b> Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Darbe ve Kayma Bölgelerine Ait Aşınma Yüzeylerinin Yüksek Büyütme Görüntüleri (x200). .... | <b>44</b> |
| <b>Şekil 6.9.</b> Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinde Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Çelik Bilyaların Görüntüleri (x50). ....   | <b>45</b> |

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**°C** : Celsius (Santigrat Derece)

**K** : Kelvin

**°F** : Fahrenheit

**µm** : Mikrometre

**cm<sup>2</sup>** : Santimetre kare

**cm<sup>3</sup>** : Santimetre küp

**mm** : Mili metre

**gr** : Gram

**kg** : Kilo gram

**dk** : Dakika

**sn** : Saniye

**GPa** : Gigapaskal

**XRD** : X-ray Diffraction

**SEM** : Scanning Electron Microscope

**OM** : Optik Mikroskop

**HV** : Vickers Sertliği

**A** : Amper

**N** : Newton

**AISI** : American Iron and Steel Institute

**kHz** : Kilohertz

**kJ** : Kilojoule

**Mol** : Moleküler

**ppm** : Parts Per Million

**PHEP** : Elektrokimyasal Faz Homejenizasyonu

**CRTD-bor** : Katodik İndirgeme ve Termal Difüzyon Esaslı Borlama

**PVD** : Fiziksel Buhar Biriktirme

**CVD** : Kimyasal Buhar Biriktirme

## 1. GİRİŞ

Yüzey işlemleri, agresif ortamlara ve şiddetli aşınma koşullarına maruz kalan mühendislik malzemelerinin tribolojik özelliklerini, oksidasyon ve korozyon direncini artırmak için kullanılan önemli bir yöntemdir. Adhesif ve abrasif aşınma birçok endüstriyel uygulamada meydana gelir ve makine parçalarının dayanıklılığının ve performansının azalmasına neden olur. Bu malzemelerin yüksek sertlik ve iyi korozyon direncine sahip yüzeylere ihtiyaç duyduğu durumlarda, yüzey işlemleri oldukça önemlidir. Malzeme verimli bir şekilde kullanılabilmesi için kabul edilebilir yüzey özelliklerine sahip olmalıdır. Bu özellikler, malzemenin kullanım ömrüyle yakından ilişkilidir ve elektriksel, optik, termal, mekanik ve elektrokimyasal olabilir. Tüm bu özellikler için kabul edilebilir değerlere sahip kütleli bir malzeme bulmak genellikle zordur veya çok pahalı olabilir. Bunun çözümü, gerekli yapısal özelliklere sahip olan daha ucuz malzemelerden mühendislik malzemeleri seçmek ve daha sonra yüzey işlemleri yoluyla gereken yüzey özelliklerini geliştirmektir. Mühendislik malzemelerine yüzey işlemleri uygulamak, aşınma direncini artırabilir, sürtünme katsayısını azaltabilir ve korozyon direncini artırabilir.

Düşük alaşımlı çelikler, uygulamada çok yönlüdür, maliyetleri ve bulunabilirlikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilir. Yüksek alaşımlı dolayısıyla daha pahalı olan bir malzemenin yerine yüzey işlemleri uygulanmış daha ucuz bir çelik kullanmak avantaj sağlayabilir. Düşük karbonlu çelikler birçok uygulamada yaygın olarak tercih edilmesine rağmen, düşük mekanik özelliklerinden dolayı modern imalat süreçlerinde kullanımı sınırlıdır. Ancak, ısıl işlem prosesleri, düşük karbonlu çeliklerin yüzeyindeki mekanik özellikleri korumak veya artırmak için kullanılabilir (Atık vd., 2003: 155; Campos-Silva vd., 2010: 2372; Krelling vd., 2017: 234). Mekanik performansta iyileştirme, karbürleme, karbonitrürleme, fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleriyle metal üzerine kaplama veya difüzyon yoluyla elde edilebilir. Ancak bu yöntemler aşınma performansını iyileştirse de sermaye maliyetinin yüksek olması ve taban malzemeyle yapışma sorunları gibi bazı olumsuz özelliklere sahiptir. Diğer yandan, daha az keşfedilmiş olsa da, difüzyon esaslı borlama işlemi aşınma direncini artırmak için iyi bir alternatif olabilir. Bu tür termokimyasal işlemler difüzyon tabakası ve taban malzeme arasında mükemmel yapışma bağına sahiptir (Cuao-Moreu vd., 2019: 204).

Borlama işlemi, yüksek sıcaklıklarda demir esaslı ve demir dışı malzemelerin yüzeyine bor atomlarının difüze edilmesini içeren termokimyasal bir işlemdir (Carrera-Espinoza vd., 2016: 1). İyi temizlenmiş bir malzeme yüzeyine 700 ile 1000 °C aralığında tercihen 1 ila 12

saat arayla katı, macun, sıvı veya gaz ortamında gerçekleştirilir (Sinha, 1991: 978). Borlama işleminin diğer benzer yöntemlere göre başlıca avantajları; yüksek sertlik, mükemmel aşınma direnci ve oksidasyon direnci sunmasıdır (Balusamy vd., 2013: 36). Borlanmış bir yüzeyin en belirgin özelliklerinden birisi de ısı işlem sonrası bile sertliğini muhafaza edebilmesidir. (Mindivan, 2023: 939). Borlama, otomotiv, madencilik, kimya ve metal-mekanik endüstrisinde malzemelerin ve aşınmaya maruz kalan mekanik parçaların dayanıklılığını artırmak için kullanılmaktadır (Rosas-Melendez vd., 2021: 1).

Günümüzde mühendislik parçaları kutu veya macun borlama, sıvı veya ergimiş tuz içerisinde borlama, elektrokimyasal borlama, plazma destekli borlama vb. gibi birçok borlama yöntemleri ile işlem görmektedir. Yaygın olarak kullanılan kutu borlama gibi borlama işlemlerinin en önemli dezavantajlarından biri, pahalı toz karışımlarının kullanımı ve uzun işlem sürelerinin gerekliliğidir. Diğer yandan, elektrokimyasal borlama, sistemde kullanılan kimyasalların maliyetinin çok daha düşük olması ve işlem süresinin çok daha kısa olması göz önüne alındığında, demir esaslı malzemelerin borlanmasında çok daha uygun maliyetli bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrokimyasal borlama ilk olarak Ornig ve Schaaber tarafından 1940'larda geliştirilmiştir. Elektrokimyasal borlama üzerine yapılan araştırmaların çoğu, elektrolit bileşimi, akım yoğunluğu ve borlama sıcaklığının oluşan borür tabakalarının yapısı ve bileşimine etkileri üzerine yoğunlaşmıştır (Kartal vd., 2011b: 6928).

Elektrokimyasal borlama sırasında, küçük boyutları ve yüksek hareketlilikleri nedeniyle bor atomları çelik yüzeyine difüze olur ve taban malzeme ile reaksiyona girerek demir borürler ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ ,  $FeB + Fe_2B$ ) oluştururlar. Çift fazlı borür tabakaları ( $FeB + Fe_2B$ ), borür tabakası boyunca yüzeyden taban malzemeye doğru giderek azalan sertlik profili nedeniyle tribolojik avantajlar sunmaktadır. Ancak, çeliğin borlama örneklerinde görüldüğü üzere üst kısımda daha yüksek bor içerikli faz ( $FeB$ ) mekanik ve tribolojik uygulamalar için ideal olmayabilir. Yüzeyde oluşan  $FeB$  üst tabakası çok sert olmasına rağmen kırılgandır ve önemli ölçüde farklı bir termal genleşme katsayısına sahiptir. Borlama işleminden sonra soğuma sırasında,  $FeB$  fazında yüksek çekme gerilmeleri oluşurken,  $Fe_2B$ 'de basma gerilmeleri oluşur; bu nedenle, yüksek  $FeB$  içeriğine sahip çelikler borlanmış yüzey tabakalarına paralel olarak geniş mikro ve makro çatlaklar oluştururlar. Ayrıca  $FeB$  tabakasının kırılganlığından dolayı yüksek normal veya yanal yük uygulandığında yüzeyde ciddi kabarma ve ayrılmalara neden olur. Sonuç olarak, ikili  $FeB + Fe_2B$  tabakası yerine tek bir  $Fe_2B$  tabakanın oluşturulması arzu edilir.  $FeB$  büyümesini önlemek için tercih edilen yöntemler şunlardır: (1) toz karışımlarının kutu borlama ile bor konsantrasyonunu seyreltmek, (2) çok daha ince bir borlama ajanı uygulamak veya (3)  $FeB$ 'yi

Fe<sub>2</sub>B fazına dönüştürmek için yeterince yüksek borlama sıcaklıklarında çalışmaktadır. Alternatif olarak, kutu veya sıvı borlama (kesikli borlama) sırasında termal çevrim uygulayarak FeB fazı oluşumunu engellenebilir. Ancak çelik taban malzeme yüzeyinde tek bir Fe<sub>2</sub>B borür tabakası büyütme için önerilen işlem uzun bir süre (4 veya 5 saat) gerektirir ve kutu borlama sırasında numune fırından 4 veya 5 kez çıkarılıp tekrar yerleştirilmelidir veya örnek bir sıvı borlama banyosundan çıkarılmalıdır. Borlama işleminden sonra oldukça kırılgan FeB faz miktarını azaltmak için başka umut verici bir yaklaşım ise lazer sonrası ısı işlemleri uygulamaktır. Ancak, bu işlem borür tabakasının yapısını ve bileşimini değiştirmenin yanı sıra borür tabakasının yüzey sertliğini 1800 HV'den yaklaşık 900 HV'ye düşürmektedir. Tüm bunlara karşın tek fazlı Fe<sub>2</sub>B tabakasını güvenli, hızlı ve yeşil bir şekilde elde etmenin yolu elektrokimyasal borlamada faz homojenizasyonu (PHEB) olarak bilinen yöntemdir. Bu yöntemde elektrokimyasal olarak borlanan numuneler aynı elektrolit içerisinde akım kesilerek belirli belirli bir süre bekletilerek faz homojenleştirme işlemi uygulanmaktadır ve bu sayede tek tabakalı Fe<sub>2</sub>B yapısı oluşturulmaktadır (Kartal vd., 2011c: 2005; Timur vd., 2015: 33).

Demir esaslı alaşımların oda sıcaklığındaki aşınma direncine borür tabakasının üstün katkısı rapor edilmiştir. Ancak, tek fazlı ve iki fazlı borlanmış yüzeylerin darbeli kayma aşınma performansıyla ilgili yayınlar açık literatürde mevcut değildir. Bu çalışma, borür tabakalarının faz yapılarına bağlı olarak darbeli kayma aşınma performansını incelemek amacıyla başlatılmıştır. Düşük karbonlu çeliğin yüzeyinde oluşturulan borür tabakalarının oda sıcaklığında sert ve yüksek aşınma direncine sahip olduğu bilinmesine rağmen (Türkmen vd., 2019: 8; Mindivan, 2023: 939), bu çalışma daha spesifik olarak düşük karbon içeriğine sahip AISI 1020 çeliğine elektrokimyasal borlama yöntemi ile yüzeyde tek (Fe<sub>2</sub>B) ve iki (Fe<sub>2</sub>B + FeB) tabakalı borür tabakası oluşumuna bağlı olarak darbeli kayma aşınma davranışına odaklanmıştır.

## 2. BOR VE MİNERALLERİ

Periyodik tabloda bor 'B' simgesi ile ifade edilen, 3A gurubunun en üstünde bulunan ve atom numarası 5 olan bir elementtir. Saf bor ilk olarak Fransız kimyager J.L. Gay-Lussac ve Baron L. J. Thenard ile İngiliz kimyager H. Davy tarafından 1808 yılında elde edilmiştir. 8, 10, 11, 12 ve 13B izotoplarından oluşur. 10 ve 11B en kararlı izotoplarıdır. Bu izotoplardan 10B izotopunun termal nötron yakalama özelliği yüksek olduğu için nükleer enerji santrallerinde ve nükleer malzemelerde kullanılırlar.

Ülkemizde çıkarılan bor cevherlerinin içeriğinde 10B izotoplarının oranı oldukça yüksektir. Bor elementi yaygın olarak kayalarda, suda ve toprakta bulunur. Ortalama olarak, 10-20 ppm toprakta, 0,5-9,6 ppm denizde ve 0.01-1.5 ppm tatlı sularda bulunur. Kimyasal ilgisi nedeniyle doğada bileşikler halinde bulunan, ısıya karşı dayanıklı ve nerdeyse elmas kadar sert olan bor elementinin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de verilmiştir (BOREN, 2022).

**Tablo 2.1.** Bor Elementinin Bazı Fiziksel Özellikleri.

|                  |                            |
|------------------|----------------------------|
| Atom ağırlığı    | 10,811 u                   |
| Ergime noktası   | 2.300 °C- 2.573 K- 4.172°F |
| Kaynama noktası  | 4.002°C- 4.275 K- 7.236°F  |
| Yoğunluk         | 2,34 gr/cm <sup>3</sup>    |
| Sertlik          | Mohs: 9,3                  |
| Elastik modülü   | Bulk: 320 GPa              |
| Buharlaşma ısısı | 489,7 kJ /mol              |
| Molar hacmi      | 4,68 cm <sup>3</sup> /mol  |
| Görünüş          | Sarı-Kahverengi            |

**Kaynak:** (BOREN, 2022)

**Tablo 2.2.** Bor Elementinin Bazı Kimyasal Özellikleri.

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Elektronegativite                 | 2,04   |
| Elektrokimyasal eşdeğer           | 0,1344 g/amp-hr                              |
| Valans elektron potansiyeli (-eV) | 190  |
| İyonizasyon potansiyeli           | Birinci: 8,298, İkinci: 25,15, Üçüncü: 37,93 |
| Füzyon ısısı                      | 50,2 kJ/mol                                  |

**Kaynak:** (BOREN, 2022)

Bor elementinin bazı metal ve ametaller ile oluşturduğu bileşiklerin sergilediği farklı özellikler endüstride çok çeşitli bor bileşiğinin kullanılmasını imkân vermiştir. Doğada yaklaşık olarak 230 çeşit bor mineralinin olduğu bilinmekte olup, başka elementlerle bileşik halinde, tuz şeklinde bulunur. Bu bor bileşikleri arasında yaygın olarak endüstride kullanılanlara boraks, kolemanit, üleksit, kernit örnek verilebilir.

Bor madenleri genellikle içerisindeki  $B_2O_3$  (boroksit) miktarı ile değer kazanır. Yüksek oranda bu içeriğe sahip olanlar değerli olarak kabul edilir (BOREN, 2022). Bazı önemli bor mineralleri ve bulunduğu yerler Tablo 2.3’de verilmiştir.

**Tablo 2.3.** Bazı Önemli Bor Mineralleri ve Bulunduğu Yerler.

| Mineral            | Formül                             | % $B_2O_3$ | Bulunduğu Bölge            |
|--------------------|------------------------------------|------------|----------------------------|
| Borasil            | $Mg_3B_7O_{13}Cl$                  | 62,2       | Türkiye                    |
| Sassolin           | $H_3BO_3$                          | 56,3       | İtalya                     |
| Kernit             | $Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$           | 50,9       | Arjantin, Amerika          |
| Kolemanit          | $Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$        | 50,8       | Türkiye, Amerika, Meksika  |
| Hidroborsit        | $CaMgBO_{11} \cdot 6H_2O$          | 50,5       | Türkiye, Rusya, Kafkasya   |
| Pandermit, Priceit | $Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7H_2O$     | 49,8       | Türkiye                    |
| Probertit          | $NaCaB_5O_9 \cdot 5H_2O$           | 49,6       | Amerika                    |
| Tinkalkonit        | $Na_2B_4O_7 \cdot 5H_2O$           | 47,8       | Türkiye, Amerika, Arjantin |
| Meyerhofferite     | $Ca_2B_6O_{11} \cdot 7H_2O$        | 46,7       | Türkiye                    |
| Hovlit             | $Ca_4B_{10}Si_2O_{21} \cdot 5H_2O$ | 44,4       | Türkiye, Meksiko           |
| Üleksit            | $NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$           | 43         | Türkiye, Peru Tibet, Şili, |
| Aşharit            | $Mg_2B_2O_5 \cdot H_2O$            | 41,4       | Çin, Sovyetler Birliği     |
| Inyonit            | $Ca_2B_6O_{11} \cdot 13H_2O$       | 37,6       | Arjantin, Kazakistan,      |

**Tablo 2.3.** (Devamı)

|                |                        |      |                            |
|----------------|------------------------|------|----------------------------|
| Inderite       | $Mg_2B_6O_{11}.15H_2O$ | 37,3 | Arjantin                   |
| Tinkal, boraks | $Na_2B_4O_7.10H_2O$    | 36,5 | Türkiye, Arjantin, Amerika |
| Datolit        | $Ca_2B_2Si_2O_9.H_2O$  | 21,8 | Kazakistan                 |

**Kaynak:** (Kartal, 2004: 7)

Bor madeni Türkiye’de genellikle Uludağ’ın güneyindeki bölgelerde çıkarılmaktadır. Eskişehir de Kırka, Kütahya da Emet ve Balıkesir de Hisarcık, Bigadiç, Susurluk, Kestelek ve Sultangazi civarında yoğun olarak çıkarılmaktadır. Dünya bor cevherinin % 70’i bu bölgeler oluşturmaktadır. Ülkemizde çıkarılan borun kalitesi diğer bölgelerdekine kıyasla daha iyi seviyededir.

Bor ürünleri endüstride, cam, elektronik ve bilgisayar, enerji ilaç, kâğıt, kimya, makine, nükleer, metalurji, otomobil, tarım, spor malzemeleri, tekstil, seramik, tıp ve havacılık sektörlerinde kullanılmaktadır (Özer, 2011: 4).

### **3. BORLAMA PROSELERİ**

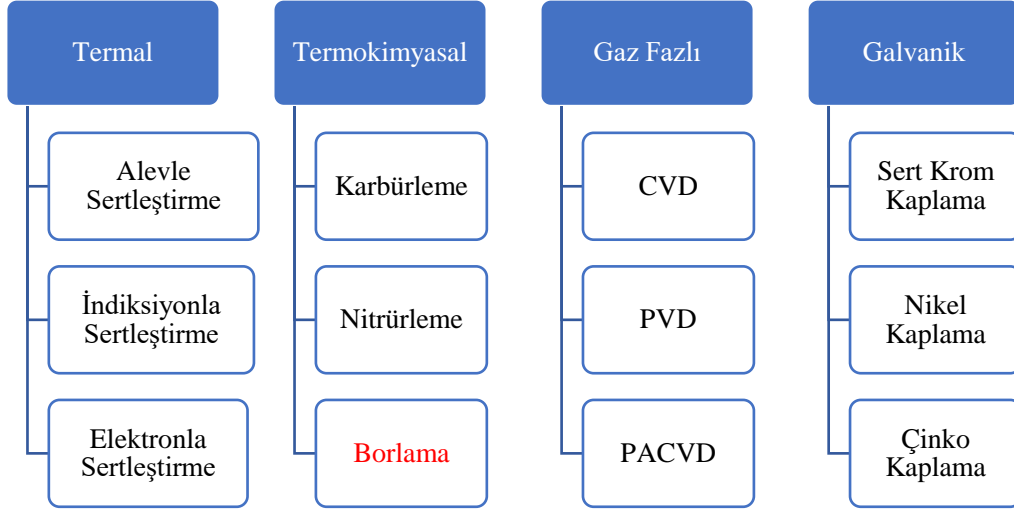
#### **3.1. Borlama ve Borür Tabakasının Yapısı**

Borlama, yüksek sıcaklıklarda bor elementinin malzeme yüzeyine difüzyonu ve kimyasal reaksiyonu ile üstün mekanik özellikler kazandıran kaplama ile sonuçlanan termokimyasal yüzey işlemidir. Bu işlem hem kimyasal hem elektrokimyasal yöntemlerle yapılabilir (Çelikkan vd., 2007: 5348). Katı, sıvı ve gaz ortamlarda yüksek işlem sıcaklığında (1073-1323 K) ve uzun sürelerde (1-12 saat) gerçekleştirilir (Nora vd., 2019:1).

Borlama, sürtünme ve aşınmanın önemli olduğu birçok tribolojik uygulamada yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisidir. Borlama, bor atomlarının malzeme yüzeyine yayılarak borürler oluşturmayı amaçlayan bir ısıl işlemdir. Nispeten küçük bir element olduğu için borlama işlemi, demirli ve demir dışı metaller, nikel ve kobalt alaşımlar, karbürler, aleve dayanıklı alaşımlar ve bazı süper alaşımlar gibi birçok malzemeye uygulanabilir. (Jain ve Sundararajan, 2002: 21; Tabur vd., 2009: 1106; Cengiz vd., 2015:339).

Diğer fiziksel kaplama işlemlerine kıyasla difüzyon işleminin doğası gereği borürlerin alt tabakaya daha iyi yapışmasını sağlayan borlama tekniği sayesinde malzemelerin aşınma, sürtünme, korozyon ve oksidasyon direnci gibi yüzey özellikleri mükemmel seviyelere getirilebilir. Borlama ile yüksek sertlik değerlerine ulaşılabilir (Gök vd., 2017: 54).

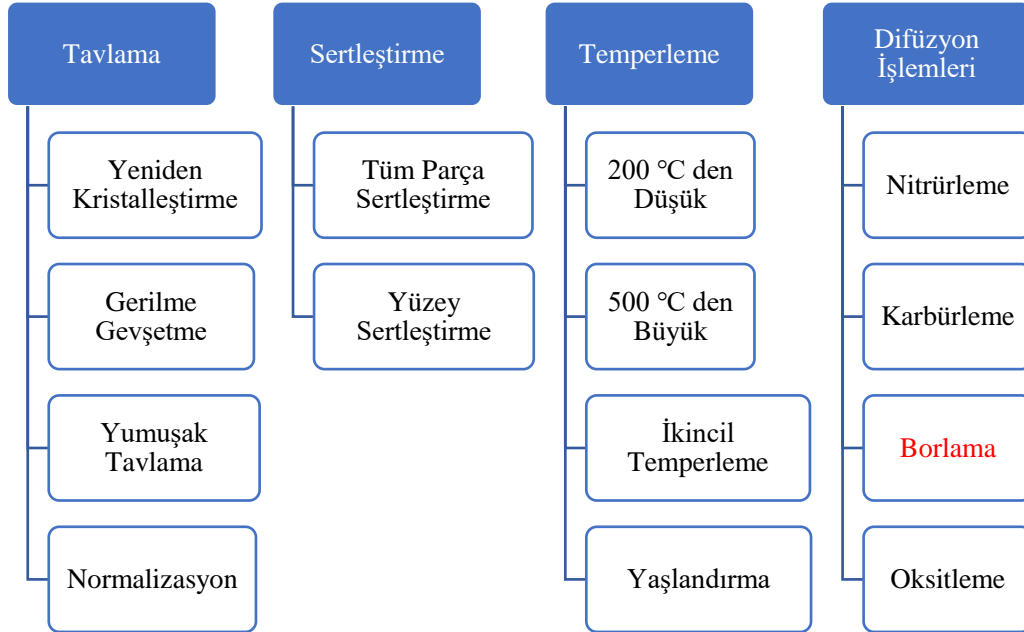
Borlama, difüzyon mekanizması ile tetiklenen ve ısıl aktivasyonla gerçekleşen bir yöntem olduğu için nitrürleme ve karbürleme ile benzerlik göstermektedir. Bundan dolayı borlama, nitrürleme ve karbürleme işlemleri termokimyasal yüzey işlemleri arasında gösterilmektedir. Yüzey işlemleri ise pratikte dört farklı yöntemle (termal esaslı, gaz fazlı, termokimyasal esaslı, galvanik esaslı) ayrılmıştır. Yüzey teknikleri arasında borlama işleminin yeri Şekil 3.1’de verilmiştir (Bolat, 2016: 8).



**Şekil 3.1.** Borlama İşleminin Yüzey İşlemleri Arasındaki Yeri.

**Kaynak:** (Bolat, 2016: 9)

Temelinde difüzyon mekanizması olması nedeniyle, yüksek sıcaklık seviyelerine çıkılması ve ısıl aktivasyon gerçekleşmesi tüm borlama işlemleri için temel zorunluluktur. Isıl işlem proseleri arasındaki borlamanın yeri Şekil 3.2’te gösterilmektedir.



**Şekil 3.2.** Borlama İşleminin Isıl İşlem Teknikleri Arasındaki Yeri.

**Kaynak:** (Bolat, 2016: 9)

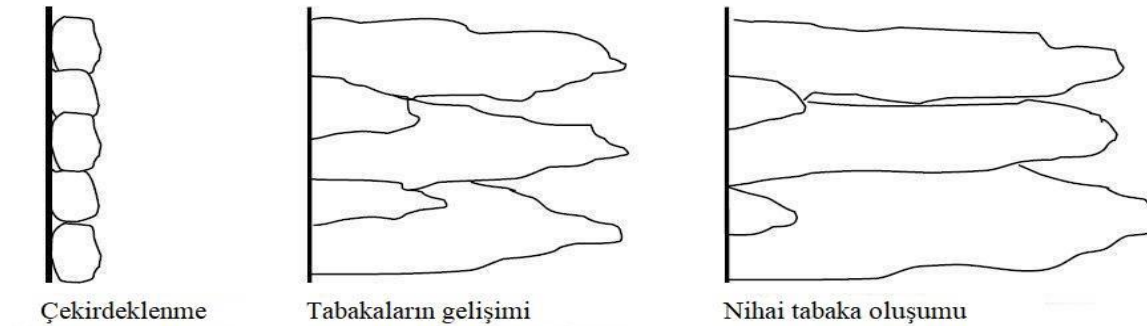
Borlama işlemi difüzyon ile gerçekleştiğinden sıcaklığın itici gücü önemli rol oynamaktadır. İşlem sürelerinin uzatılmasıyla yüksek sıcaklıklarda borlama işlemi yapılmaktadır. Genel olarak katı, sıvı ve gaz gibi uygulamaları mevcuttur. Bunların yanı sıra

plazma, iyon implantasyonu, fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme ve elektrokimyasal gibi yöntemlerle de borlama işlemi yapılmaktadır (Albayrak, 2021: 33).

Kaplama sonrası malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakasının faz yapısını; borlama ortamının bor potansiyeli, kaplama yapılacak olan malzemenin kimyasal içeriği, işlem sıcaklığı ve süresi belirler (Cimenoğlu vd., 2014; 152).

Borlama prosesi gerçekleştirilirken kullanılacak borun dışında aktivatörlerden, dolgu malzemelerinden ve deoksidanlardan faydalanılmaktadır. Kaplama tabakasının düzenli büyümesini aktivatör malzeme sağlar. Dolgu malzemeleri ve deoksidanlar oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturur ve malzemelerin taban malzemeye yapışmamasını sağlar (Kondul, 2020: 11).

Borlama işlemi işleyiş olarak iki kademedен oluşur. İlk olarak kaplama yapılacak yüzey ile bor veren ortam arasında etkileşim gerçekleşir ve çekirdekleşmeler oluşur. İkinci safhada ise sıcaklık ve süreye göre difüzyon gerçekleşir. Birbiri ardına gelişen bu sürecin sonunda borür tabakaları belirli bir kalınlığa ulaşır. Borür tabakasının oluşum mekanizması tüm borlama metotlarında benzer davranış gösterirler. Şekil 3.3'de borür tabakasının oluşum sırası gösterilmektedir (Ertürk, 2018: 14).



**Şekil 3.3.** Borür Tabakası Oluşum Aşamaları.

**Kaynak:** (Ertürk, 2018: 15)

Altlık taban malzemenin cinsine göre çeşitli bileşimlerde borür tabakası oluşturmak mümkündür. Borlama sırasında bor atomları malzeme yüzeyinin içerisine yayılarak altlık malzemenin atomları ile oluşturduğu yeni tabakanın kalınlığı, diğer difüzyon esaslı yüzey işlemlerinde olduğu gibi sıcaklık ve zamana bağlıdır (Kartal, 2011a: 4).

Borür tabakalarının büyüme kinetiği parabolik hız kanunu ile Denklem 3.1'de ifade edilmektedir.

$$d^2 = Kt \quad (3.1)$$

Bu denklemde ifade edilen; ‘K’ tabaka oluşum hız sabitini, ‘d’ borür tabakası kalınlığını ve ‘t’ borlama işlem süresini göstermektedir. Arrhenius bağıntısı olarak bilen ve denklem 3.2’de oluşum hız sabiti olarak ifade edilen ‘K’ işlem sıcaklığının derecesine ve bor atomlarının difüzyon seviyesine bağlıdır.

$$K = K_0 \exp(-Q/RT) \quad (3.2)$$

Denklemde; ‘K<sub>0</sub>’ üstel etken, ‘Q’ aktivasyon enerjisi, ‘T’ sıcaklık ve ‘R’ gaz sabitidir. Bu iki denklem kullanılarak belirli süre ve sıcaklıkta malzeme yüzeyinde oluşturulan borür tabakasının kalınlığı hesaplanabilir (Sista vd., 2011: 1582).

Borlama işlemi sonrasında oluşturulan borür tabakasının karakteristiği, borlanan malzemenin içerisindeki alaşım elementlerinin miktarından da etkilenmektedir. Alaşım elementlerinin içeriği arttıkça elde edilen borür tabakasının kalınlığı azalır ve borür tabakası ile malzeme yüzeyi arasındaki difüzyon düzleşir. Bunun nedeni alaşım elementlerinin bariyer gibi davranarak difüzyonun sınırlı gerçekleşmesine izin vermesidir (Ertürk, 2018: 15).

Malzeme türüne bağlı olarak oluşturulan farklı borür tabakalarının bazı özellikleri Tablo 3.1’ de verilmiştir (Kondul, 2020: 21).

**Tablo 3.1.** Farklı Borürler ve Bazı Özellikleri.

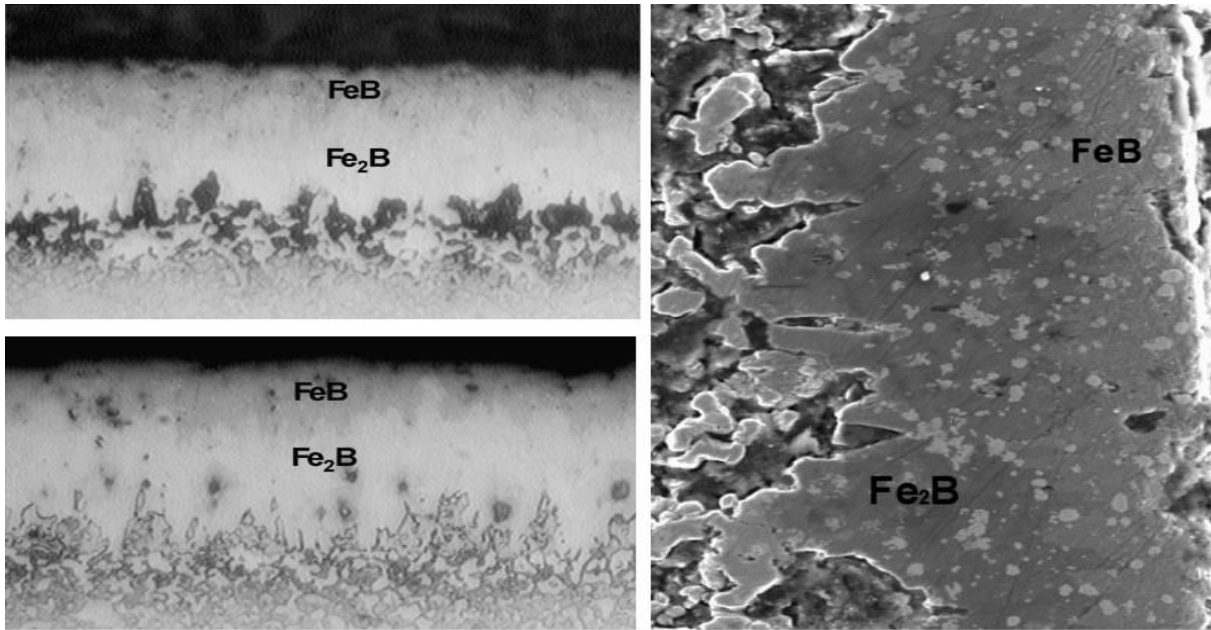
| Borür                  | Kristal Yapı | Yoğun. (gr/cm <sup>3</sup> ) | Ergime Sıkl. (°C) | Termal Genleşme (10 <sup>-6</sup> /K) | Termal İletkenlik (W/m.K) | Sertlik (GPa) | Elektrik Direnç (10 <sup>6</sup> Ωcm) |
|------------------------|--------------|------------------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------|---------------------------------------|
| <b>CrB</b>             | Tetra.       | 6,14                         | --                | 12,3 (27-1027 °C)                     | 20,1 (20 °C)              | 11,8          | 46                                    |
| <b>Cr<sub>2</sub>B</b> | Ortog.       | 6,58                         | 1870              | 14,2 (27-1027 °C)                     | 10,9 (20 °C)              | 13,2          | 107                                   |
| <b>FeB</b>             | Ortog.       | 6,73                         | 1650              | 12 (400-1000 °C)                      | 12 (20 °C)                | 16,2-18,6     | 80                                    |
| <b>Fe<sub>2</sub>B</b> | Tetra.       | 7,34                         | 1410              | ---                                   | 17,4                      | 13,1-17,7     | 38                                    |
| <b>NiB</b>             | Ortog.       | 7,17                         | 1590              | ---                                   | 21,9                      | 15,2          | 50                                    |
| <b>Ni<sub>2</sub>B</b> | Tetra.       | 8,05                         | 1225              | ---                                   | 58,4                      | 14            | 14                                    |
| <b>TiB</b>             | Ortog.       | 4,56                         | 2190              | ---                                   | ---                       | 22,7          | 40                                    |
| <b>Ti<sub>2</sub>B</b> | Hegz.        | 4,52                         | 3225              | ---                                   | 64,4 (27 °C)              | 33-25,5       | 9                                     |

**Kaynak:** (Kondul, 2020: 21)

### 3.2. Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması

Demir esaslı malzemelere, yüksek aşınma direnci kazandırmak, oldukça sert bir yüzey elde etmek, oksitleyici ve koroziv atmosferde daha uzun ömürlü kullanmak için borlama tercih edilmektedir (Allaoui vd., 2006: 3476).

Borlama prosesinde kullanılan malzemenin kimyasal içeriğine, borlama süresine, sıcaklığına ve borlama ortamındaki borun potansiyeline göre demir esaslı malzeme yüzeyinde iki tabakalı (FeB/Fe<sub>2</sub>B) veya tek tabakalı (Fe<sub>2</sub>B) borür tabakası oluşur (Türkmen ve Yalamaç, 2018: 659). Oluşan bu demir borürler, hem yüksek sertlik gibi seramiklerin özelliğine, hem de metallere beklenen yüksek elektrik iletkenlik yeteneğine aynı anda sunmaktadır (Toktaş vd., 2017: 450). Malzeme yüzeyinde oluşan iki tabakanın en dışta olanı bor bakımından daha yoğun olan FeB fazı, altındaki ise Fe<sub>2</sub>B fazı olarak isimlendirilir. Bu iki tabaka malzemedeki alaşım elementlerinin miktarına göre farklı şekillerde oluşmaktadır. Çelik malzemelerin çoğunda testere dişi şeklinde oluşurken, paslanmaz çeliklerde ve krom içeriği yüksek çeliklerde daha düz bir yapı olarak gözlenmektedir (Topuz vd., 2020: 12). Borlama işlemi sonunda oluşan demir borürlerin görüntüsü Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



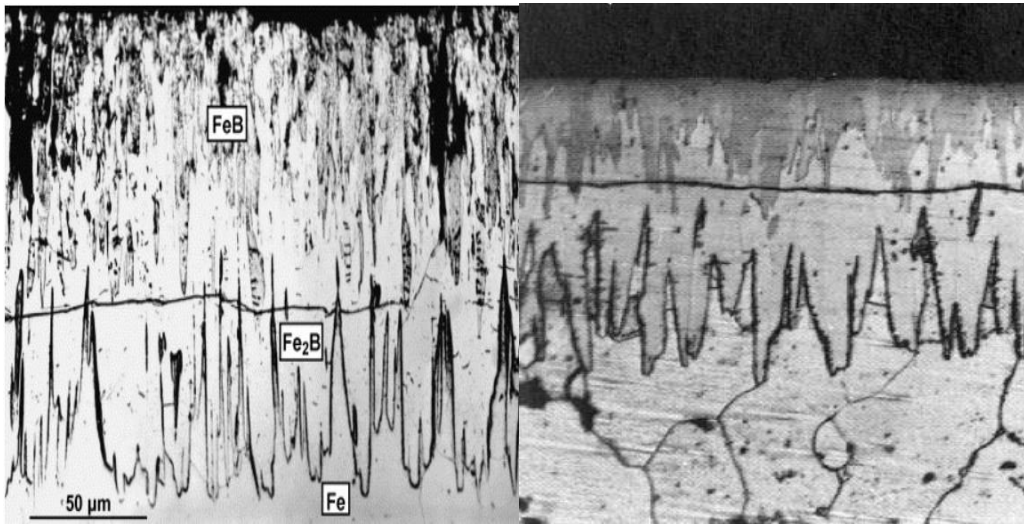
Şekil 3.4. Borlama İşlemi Sonucu Oluşan Demir Borür Fazlarının Görünümü.

**Kaynak:** (Campos vd., 2008: 2971)

Demir bor bileşiklerinin çekirdeklenmesi için malzeme yüzeyindeki en uygun yerler makro hatalar (çizikler, yüzey pürüzlülükleri vb.) ve mikro hatalar (dislokasyonlar, tane

sınırları, atom boşlukları vb.) olarak rapor edilmiştir. Bu bölgelerde çekirdekleşme başlar ve ince borür bölgeleri oluşur. Çekirdekleşmenin ilk safhası  $Fe_2B$  oluşumudur. Bu adımı borca daha zengin çekirdekleşme takip eder ve  $Fe_2B$  oluşumun dış yüzeyinde  $FeB$  bileşikleri meydana gelir (Uluköy ve Can, 2005: 194).

Endüstriyel uygulamalarda iki tabakalı ( $FeB$ ,  $Fe_2B$ ) oluşumu yerine tek tabakalı ( $Fe_2B$ ) oluşum tercih edilir. Bunun nedeni borca zengin olan  $FeB$  fazının sert olmasına rağmen  $Fe_2B$  fazından daha kırılğan olmasıdır (Mu ve Shen, 2013: 1; Mindivan, 2023: 939). Tercih sebeplerinden bir diğeri ise faz oluşum esnasında  $Fe_2B$  ve  $FeB$  fazlarının birbirlerine basma ve çekme gerilmeleri uygulamasıdır. Çoğu zamanda bu gerilmeler sonucunda iki faz arasında çatlaklar meydana gelmektedir. Çekme gerilmesini  $FeB$  oluştururken basma gerilmesini  $Fe_2B$  oluşturmaktadır. Mekanik zorlamalar sırasında bu yapılar zamanla ayrılarak yüzeyden kopmaya neden olabilir (Yu vd., 2005: 2362; Özer, 2011: 25). Ayrıca iki tabaka arasındaki ısıl genişleme katsayı farkının büyük olması da fazlar arasında çatlak oluşumuna neden olur.  $FeB$  için ısıl genişleme katsayı  $23 \times 10^{-6}/^{\circ}C$  iken  $Fe_2B$  için  $7,85 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 'dir (Ozdemir, 2006: 1391). Testere diş yapısına sahip olan iki tabakalı yapılarda testere dişlerinin çentik etkisinden dolayı çatlak başlayabilir. Şekil 3.5'te iki tabaka arasındaki çatlak görülmektedir.

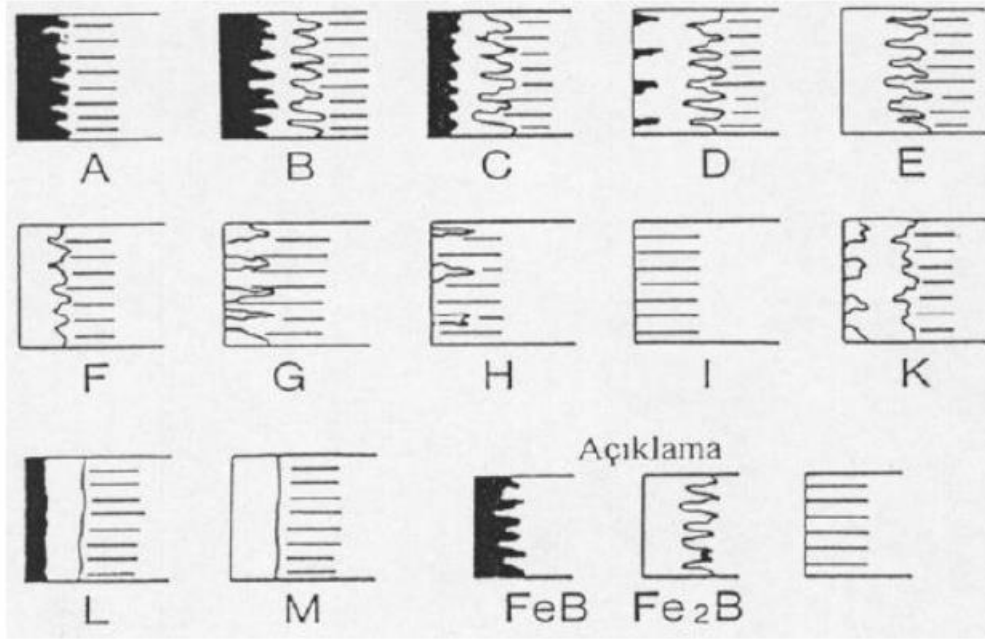


**Şekil 3.5.**  $Fe_2B$  ile  $FeB$  Arasında Meydana Gelen Çatlak.

**Kaynak:** (Martini vd., 2004: 610; Spence ve Makhoul, 2005: 128).

Borlama öncesi ve sonrası uygulanan karbürleme, lazer işlemi, su verme, iyon implantasyonu ve gaz nitürleme gibi yöntemler iki tabakalı borür tabakasının kırılğanlığını azaltmak için tercih edilir (Bejar ve Moreno, 2006: 352).

Çeşitli borlama teknikleri ile on dört farklı şekilde borür tabakası elde edilebilir. Schaaber ve Kunst tarafından geliştirilip sistematik olarak sınıflandırılması Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. Borür Tabakası Çeşitleri.

**Kaynak** (Matuschka, 1980: 15)

- A: Yoğun FeB tek tabakalı yapı,
- B: FeB ve Fe<sub>2</sub>B iki tabakalı yapı,
- C: daha ince FeB tabakasına sahip iki tabakalı yapı,
- D: İki tabakalı yapı (izole edilmiş FeB dişleri),
- E: Fe<sub>2</sub>B tek tabakalı yapı,
- F: Daha az dişli Fe<sub>2</sub>B tabaka,
- G: Özel tabaka (Fe<sub>2</sub>B dişli),
- H: İzole edilmiş Fe<sub>2</sub>B dişleri,
- I: Geçiş bölgesi,
- K: Bozulmuş tabaka,
- L: Düz iki fazlı tabaka,
- M: Tek fazlı tabaka.

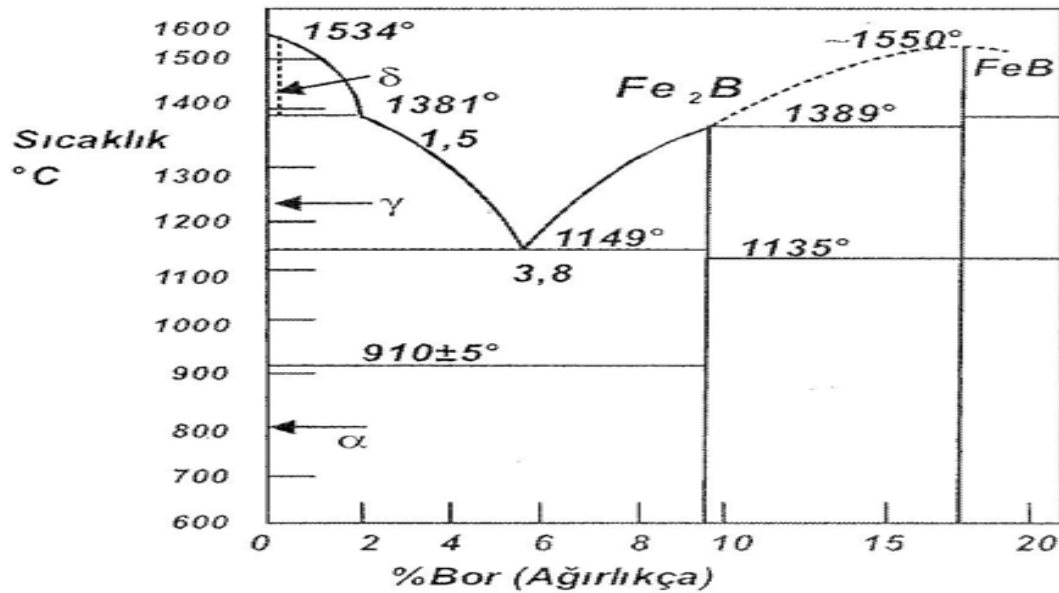
Demir esaslı malzemelerin yüzeyinde oluşan FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakalarının tipik özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Borlama işlemi ile demir esaslı malzemelerin yorulma dayanımı % 25, akma ve kopma dayanımları %10-20 ve yorulma ömrü %200 artarken, deformasyon kabiliyeti azalmıştır (Saygın, 2006: 27).

**Tablo 3.2.** FeB ve Fe<sub>2</sub>B Tabakaların Bazı Özellikleri.

| Özellik                                  | FeB                    | Fe <sub>2</sub> B |
|--|------------------------|-------------------|
| Mikrosertlik (GPa)                       | 19-21                  | 18-20             |
| Bor İçeriği (% ağırlıkça)                | 16,23                  | 8,83              |
| Yoğunluk(gr/cm <sup>3</sup> )            | 6,75                   | 7,43              |
| Ergime Sıcaklığı (°C)                    | 1540-1657              | 1389-1410         |
| Elektriksel Direnç (10 <sup>-6</sup> cm) | 80                     | 38                |
| Kristal Yapı                             | H. Merkezli Tetragonal | Ortorombik        |
| Elastisite Modülü (GPa)                  | 590                    | 280-295           |

**Kaynak** (Saygın, 2006: 26)

Bor atom çapı, demir atom çapından %25 daha küçük olduğundan dolayı bu iki element katı eriyik oluştururlar. Demir-bor denge sisteminde ağırlıkça %16,23 bor oranında FeB, yine ağırlıkça %8,83 oranında Fe<sub>2</sub>B bileşikleri meydana gelmektedir. Şekil 3.7’de demir-bor denge diyagramında ağırlıkça %3,8 bor oranında ve 1149 °C ergime sıcaklığında ötektik faz oluşmaktadır. Bu sebeple borlanmış yüzey bu sıcaklığa kadar ısıdan etkilenmemektedir.



**Şekil 3.7.** Demir-Bor Denge Diyagramı.

**Kaynak** (Delikanlı vd., 2003: 102)

### 3.3. Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

#### 3.3.1. Borlama İşleminin Avantajları

Termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama işleminin sağladığı bazı avantajlar şöyle sıralanabilir;

- Borlama işlemi sonrası son derece yüksek sertlik değerlerine (1450 ile 5000 HV arasında) ulaşılabilir. Borlanmış çeliklerin sert malzemelere ve farklı işlemlere göre sertlik değerleri Tablo 3.3’de gösterilmektedir. Bu tabloya göre çelik üzerinde oluşturulan borür tabakasının sertliğinin herhangi bir geleneksel yüzey sertleştirme metotları ile elde edilen sertlik değerlerinden çok daha fazla olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sertlik değeri; aşınma, tribo-oksidasyon, yapışma ve yüzey yorulma gibi ana aşınma mekanizmaları ile mücadeleye önemli katkı sağlar (Sinha, 1991: 979).

**Tablo 3.3.** Borlanmış Bazı Çeliklerin Sertliklerinin Karşılaştırılması.

| Malzeme  | Mikrosertlik (HV) |
|--|-------------------|
| Elmas  | >10000            |
| AISI A2 Çeliği (borlanmış)                         | 1900              |
| AISI H13 Takım Çeliği (borlanmış)                  | 1800              |
| Yumuşak Çelik (borlanmış)                          | 1600              |
| Krom Kaplama (sert)                                | 1000-1200         |
| Su Verilmiş Çelik                                  | 900               |
| BM42 (Yüksek Hız Çeliği)                           | 900-910           |
| H13 Kalıp Çeliği (Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş) | 540-600           |
| A2 Kalıp Çeliği (Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş)  | 630-700           |
| Çelik (Nitrülenmiş)                                | 650-1700          |
| Düşük Alaşımlı Çelik (Karbürlenmiş)                | 650-950           |

**Kaynak** (Sinha, 1991: 979)

- Borlama ile oluşturulan borür tabakasının yüksek sıcaklıklar altında sertliği değişmemektedir.
- Birçok farklı çeliğe borlama işlemi uygulanabilir.

- Borlanmış yüzeyler 850 °C kadar oksidasyona karşı dirençlidirler.
- Borlanan malzemeler aşındırıcı ve oksitleyici ortamda yüksek yorulma ömrüne ve servis performansına sahiptirler (Sinha, 1991: 981).
- Borlama sonrası, oksitleyici olmayan seyreltik asitler ve alkali ortamdaki demirli malzemelerin korozyon-erozyon direnci artar (Oliveira vd., 2010: 792).
- Sürtünme ve aşınmanın öncelikli olduğu geniş tribolojik uygulamalar için yapılan borlama işlemi, düşük karbonlu çelik, düşük alaşımlı-çelik, takım çeliği ve paslanmaz çelik dahil olmak üzere çok çeşitli çelik alaşımlarına uygulanabilir. Ayrıca kobalt ve nikel esaslı alaşımlar, molibden ve titanyum gibi malzemeler borlanarak yüzeylerinde çok yüksek sertlik ve aşınma direnci elde edilebilir. Düşük alaşımlı çeliğin fosforik, hidroklorik ve sülfürik asitler gibi asitlere karşı direncini artırabilir. Östenitik paslanmaz çelik borlama sonrasında hidroklorik aside karşı mükemmel bir dirence sahip olur. Borlama farklı geometrideki malzemelere uygulanabilir (Ozbek vd., 2004: 643).

### **3.3.2. Borlama İşleminin Dezavantajları**

Borlama işleminin avantajları yanı sıra istenmeyen dezavantajları da mevcuttur. Bu sınırlamalar şöyle sıralanabilir;

- Esnek bir yöntem değildir, diğer termokimyasal yüzey işlemlerine göre (plazma nitrasyonu ve gaz ortamında sementasyon) maliyeti yüksektir. Özel ekipmanlarla yoğun emek isteyen prosestir. Yüksek sertlik, yüksek korozyon ve aşınmanın direnci istenilen durumlarda tercih edilmektedir.
- Hassas toleranstaki çalışmalarda, kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkündür. Geleneksel tekniklerle işleme yapılması durumunda kaplama tabakasında kırılmalar meydana gelmektedir.
- Borlanmış çeliğin yuvarlanma temaslı yorulma özellikleri nitrasyon ve sementasyonla çelikle karşılaştırıldığında çok zayıftır. Bundan dolayı borlama dişli üretiminde sınırlı kullanıma sahiptir (Sinha, 1991: 983).
- Borlanan malzemelerin oksitleyici olmayan  $H_2SO_4$  gibi asitlere karşı korozyon direnci iyi olmasına karşın,  $HNO_3$  gibi oksitleyici asitlere karşı zayıftır.

- Borlama sonrası ısıtılma işlemine tabi tutulacak çeliklerde kaplama tabakasının özelliklerini devam ettirmesi için vakum veya inert atmosfere ihtiyaç vardır (Kutucu, 2013: 9).
- Borlama prosesi sıcaklığı arttıkça elde edilen tabaka kalınlığı da artmaktadır. Bu tabaka kalınlığının artması ise yüzeyde porozite oluşumunu artırmaktadır. Artan porozite miktarı borür tabakasının gevrek olmasını yol açmaktadır.
- Borlama işlemi sonrasında yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.
- Kutu borlama sonrasında oluşan atık ürünler doğaya karşı zarar vericidir (Öztürk, 2021: 25).
- Borlama işlemi görmüş malzemelerin eğme gibi deformasyon kabiliyeti kısıtlanır (Kondul, 2020: 12).

### 3.4. Borlama Yöntemleri

Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi olarak tanımlanan borlamada bor atomları malzeme yüzeyine ısı enerjisi ile yayılarak altlık taban malzemenin atomları ile uygun borürler oluştururlar. Borlanacak malzemenin yüzeyinden iç kısmına doğru bor atomunun difüzyonu ile gerçekleşir. Borlama ortamında amorf bor,  $B_4C$ ,  $Na_2B_4O_7$ ,  $B_2H_6$  vb. gibi bor kaynakları yanı sıra bürür tabakasının düzenli ilerlemesine yardımcı olan aktivatörler ( $KBF_4$ ,  $NH_4F$  vb.) ve oksijeni keserek redükleyici ortam oluşturan ve borlama malzemesinin altlık malzemeye yapışmasını engelleyen dolgu ve deoksidantlar ( $SiC$ ,  $Al_2O_3$ ) kullanılır. Borlama yöntemi, borlama malzemesi bileşimi, borlanacak malzemenin cinsi, proses süresi ve sıcaklığı elde edilecek borür tabakasına etki eden faktörlerdir (Arat, 2011:3:4).

Geleneksel termokimyasal borlama metotları (kutu, pasta, sıvı ve gaz borlama) yanı sıra teknolojik gelişmelere bağlı olarak akışkan yataklı borlama ve plazma borlama gibi tekniklerde kullanılmaktadır. Ayrıca termokimyasal olmayan iyon biriktirme, plazma sprey, kimyasal buhar biriktirme ve fiziksel buhar biriktirme yöntemleri ile de borlama yapılmaktadır (Bora, 2017: 11). Düşük maliyeti, çevreye duyarlılığı ve uygulanabilirliği açısından kolay ve kısa sürelerde kalın ve homojen borür tabakalarının oluşturulabildiği, elektrokimyasal borlama faz homojenizasyon (PHEB) yöntemi klasik yöntemlere alternatif olarak geliştirilmiştir (Kartal vd, 2011c: 2008; Mindivan, 2023: 939).

### 3.4.1. Katı Ortam Borlama

#### 3.4.1.1. Kutu Borlama

Güvenli olması, basit ekipman gerektirmesi ve işlemde kullanılan toz karışım oranının değiştirilerek ayarlanabilmesi avantajlarından dolayı en yaygın olarak kullanılan borlama tekniğidir. Kutulama, ısıtma, soğutma ve temizleme aşamalarından oluşur. Kutu borlama prosesinde borlanacak numuneler toz halindeki geleneksel borlama karışımına veya Ekabor tozu olarak bilinen ticari karışım içerisine, numune aralarında en az 20 mm mesafe olacak şekilde gömülürler. Kutu içerisindeki toz karışımı borlanacak numunelerin etrafını 10-20 mm kalınlığında çevrelemelidir. Borlama tozu üzerine dolgu malzemeleri olarak silis kumu ( $\text{SiO}_2$ ), alüminyum oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) veya Ekrit (ticari adı) tozu doldurulur. Potanın ağzı sisteme hava girişini engellemek için kapakla kapatılır (Aydoğmuş, 2019: 8).

Katı bor kaynağı, aktivatörler ve akışkanlar toz karışımını meydana getiren bileşenlerdir. Amorf bor, bor karbür ( $\text{B}_4\text{C}$ ) ve ferro bor yaygın olarak kullanılan bor kaynaklarıdır. Amorf borun pahalı olması, ferro bor ise yeterli saflıkta üretilmemesinden dolayı bor karbür endüstriyel uygulamalarda daha çok kullanılmaktadır. Tablo 3.4'te katı bor kaynaklarının bazı özellikleri verilmiştir (Bora, 2017: 13).

**Tablo 3.4.** Katı Bor Kaynaklarının Bazı Özellikleri.

| Bor Kaynağı | Formülü                  | Molekül ağırlığı | Bor oranı (%) | Ergime skk. (°C) |
|-------------|--------------------------|------------------|---------------|------------------|
| Amorf bor   | (B)                      | 10,82            | 95 - 97       | 2050 °C          |
| Bor karbür  | ( $\text{B}_4\text{C}$ ) | 55,29            | 77,28         | 2450 °C          |
| Ferrobör    | -                        | -                | 17 - 19       | -                |

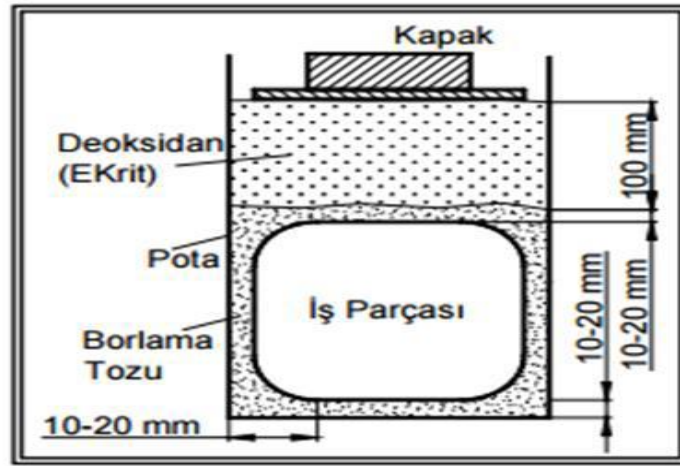
**Kaynak** (Bora, 2017: 13)

Aşağıda borlama işleminde kullanılan ticari tozların bileşimleri verilmiştir (Bora, 2017: 13).

- ( $\text{B}_4\text{C}$ - %5) + ( $\text{SiC}$ -%90) + ( $\text{KBF}_4$ -%5),
- ( $\text{B}_4\text{C}$ - % 50) + ( $\text{SiC}$ -%45) + ( $\text{KBF}_4$ -%5),
- ( $\text{B}_4\text{C}$ - % 85) + ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ -%15),
- ( $\text{B}_4\text{C}$ -% 95) + ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - %5),
- ( $\text{B}_4\text{C}$ -% 84) + ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - % 16),
- (%95- 97 B) Amorf bor,
- (Amorf bor-%95) + ( $\text{KBF}_4$ -%5),

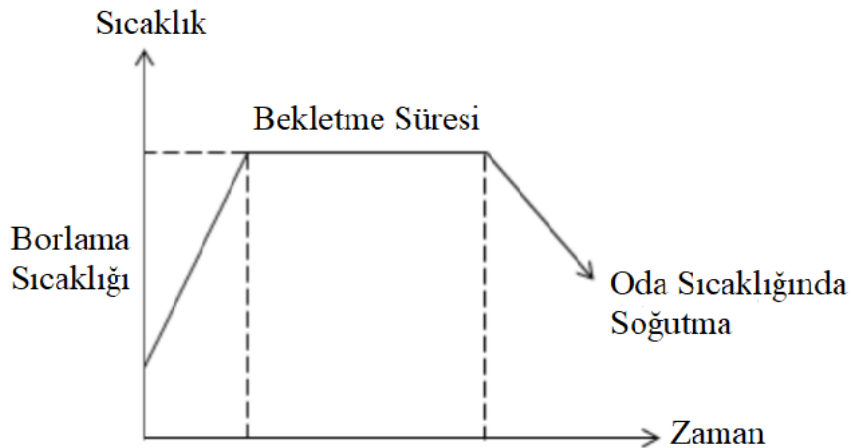
- $(B_4C- \%79) + (Na_2B_4O_7- \%16) + (KBF_4- \%5)$ ,

Kutu borlama prosesi önceden hazırlanmış atmosfer kontrollü ısıl işlem fırınında gerçekleştirilir. Kutu borlama prosesi için önemli parametreler sıcaklık ve zamandır. Bu süre ve sıcaklık borlanacak malzeme cinsine göre değişmektedir. Genellikle 800 ile 1000 °C sıcaklık aralığında 1-10 saat sürelerde borlama işlemi gerçekleştirilir. Belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılan numuneler istenilen süre kadar fırında bekletilir. Fırın içerisinde bırakılan kutu ortam sıcaklığına gelene kadar soğutulur ve sonrasında fırından çıkartılır. Kutu borlama sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.8’de, zaman ve sıcaklığa bağlı prosesin şematik gösterimi ise Şekil 3.9’da gösterilmiştir (Öztürk, 2021: 18).



Şekil 3.8. Kutu Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü.

**Kaynak** (Öztürk, 2021: 18)



Şekil 3.9. Kutu Borlama Prosesinde Zaman ve Sıcaklık.

**Kaynak** (Öztürk, 2021: 19)

Etkili bir borlama kalınlığına ulaşmak için yüksek işlem sıcaklığı (850-1050 °C) ve uzun işlem süresine (3-16 h) ihtiyaç duyulması sistemin en belirgin dezavantajıdır (Xie vd., 2012: 2839).

### 3.4.1.2. Pasta Borlama

Pasta borlama işlemi kutu borlama işleminin zaman aldığı, pahalı ve zor olduğu durumlarda tercih edilmektedir. Bu işlemde bor karbür (%45 B<sub>4</sub>C), kriyolit (%55 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) veya geleneksel toz karışımı (B<sub>4</sub>C, SiC, KBF<sub>4</sub>) ile bağlayıcı ajanlar (etil silikat (hidrolize edilmiş), metil selülozun sulu çözeltisi veya bütil asetatta çözülmüş nitroselüloz) kullanılmaktadır (Kartal, 2004: 21). Macun haline getirilen karışım borlama yapılacak olan numune yüzeyine 1-2 mm olacak şekilde püskürtülür veya fırça ile sürülür. Macunlanmış numune maksimum 150 °C sıcaklıkta kurutma fırınında, ön ısıtma odasında veya sıcak hava akımında kurutulmalıdır. Sonrasında macunla kaplanmış ve kurutulmuş numuneler önceden ısıtılmış fırında borlama sıcaklığına kadar ısıtılır. Borlanan numuneler fırından çıkarıldıktan sonra soğutulur ve yüzeye yapışmış olan atıklar temizlenir. Kaliteli borür tabakası elde etmenin yolu borlama işleminin koruyucu atmosfer ortamında gerçekleştirilmesi ile mümkündür (Ünal, 2013: 21).

Pasta borlama işlemi demir esaslı malzemelerde geleneksel fırınlar da N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> veya Ar gibi koruyucu atmosfer altında 5 saat süre ile 800-1000 °C aralıklarında veya 4 saat süreyle 900 °C de indüksiyon veya dirençli fırınlarda gerçekleştirilir. İndüksiyon veya dirençli bir fırında 1000 °C'de 20 dk'da 50 µm'dan fazla kalınlıkta bir tabaka elde edilebilir (Boztepe, 2014: 23). Şekil 3.10'da pasta borlama macununun görüntüsü ve Şekil 3.11'de üzerine borlama macunu sürülmüş numune gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Pasta Borlama Macunu.

**Kaynak** (Aydoğmuş, 2019: 11)



**Şekil 3.11.** Macunlanmış Numune.

**Kaynak** (Dinç, 2013: 17)

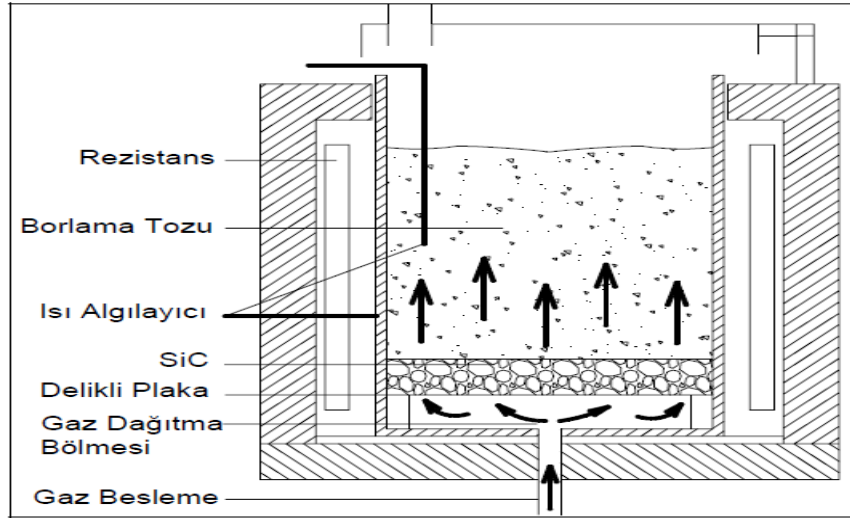
### **3.4.1.3. Akışkan Yataklı Borlama**

Katı ortam borlama yönteminin bir çeşidi olan akışkan yataklı borlamada akıcı ortam olarak özel bir borlama tozu (büyük taneli silisyum karbür parçacıkları, Ekabor) kullanılır. Kullanılan bu toz oksijensiz bir gaz ( $N_2-H_2$ ) ile akıcı hale getirilir. Borlama prosesi, borlama tozu ve oksijensiz gazın taban malzemesini ihtiva eden akışkan bir yatak içerisinde gerçekleştirilir. Tabanda daha hızlı bir ısı transferi ortamı oluşturmak için elektrik ısı kaynağı olarak kullanılmaktadır (Topuz, 2009: 19).

Bu işlemin bazı avantajları şöyle sıralanabilir;

- Maliyeti düşük bir yöntemdir
- Akış ve ısıtmada yüksek hız ile işlem kısa sürede gerçekleştirilir
- Sürekli üretimde kullanılabilir, yakın tolerans ve düzgün yüzey eldesi
- Gaz akışının yukarı olmasından dolayı yatak sızdırmazdır
- Borlama prosesi sonrasında işlemin devamı olarak su verme işlemi yapılabilir
- Isı dağılımı homojen olarak gerçekleşir.

Akışkan yatakta borlamanın dezavantajı, bor ajanlarının devamlı olarak retortlarda inert gazla birlikte suyla yıkanmasıdır. Atık gazı florür içermektedir ve kesinlikle temizlenmelidir (Sinha, 1991: 994). Şekil 3.12’de akışkan yatakta borlama işleminin şematik gösterimi verilmiştir.



**Şekil 3.12.** Akışkan Yatakta Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü.

**Kaynak** (Kutucu, 2013: 14)

### 3.4.2. Sıvı Ortam Borlama

Borlama işlemi; 2-6 saat sürelerde bekletilerek, 800-1000 °C arasındaki sıcaklıklarda sıvı ortamda gerçekleştirilir. Bu işlem aktivatör madde, bor bileşikleri ve redükleyici maddelerden oluşan ergimiş tuz çözeltisine, borlanacak numunenin daldırılması yöntemidir. Borlama prosesinin süresi daldırma süresidir. Banyo içeriğinde genellikle redükleyici madde olarak B<sub>4</sub>C ve SiC tozları, bor kaynağı olarak ise boraks kullanılır. Borlama işlemi esnasında elektrik akımı veriliyorsa elektrolitik borlama, elektrik akımı uygulanmıyor ise normal sıvı ortamda borlama olarak ifade edilir (Alparslan, 2011: 45).

Sıvı ortam borlama işlemi normal atmosfer ortamında gerçekleştirilir. Sıvı ortamdan dolayı kimyasal reaksiyon hızlı gerçekleşir bu yüzden sıklıkla tercih edilir. Kullanılan malzemeler basittir (Yamanel, 2018: 12). Borlama banyo sıcaklığının 850 °C'nin altına düşmesi durumunda banyo akışkanlığı azalacağı için borlama işleminin gerçekleşmesi mümkün olmayacaktır. Bu yüzden sıcaklık bu yöntemin dezavantajıdır. Borlama prosesinin başarılı olarak neticelendirilmesi için borlama ortamının vizkozitesi artmamalıdır. Bu sebepten ötürü banyoya tuz (bor verici karışım) eklemesi yapılmamalıdır. Borlama sonrasında numune yüzeyinde tuz birikintileri oluşmaktadır ve temizlenmesi zaman ve maliyet açısından dezavantajdır. (Matuschka, 1980: 18).

Sıvı ortamda yapılan borlama işlemi tuz banyosu içerisinde akımsız borlama ve ergimiş tuz elektrolizi yöntemi ile borlama olmak üzere iki grupta yapılır (Kartal, 2004: 21). Bu sıvı

ortamda borlama tekniklerinde kullanılan ana bor bileşikleri ve özellikleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

**Tablo 3.5.** Sıvı Ortam Borlama İşleminde Kullanılan Temel Bor kaynakları ve Özellikleri.

| Malzeme                 | Formül   | Molekül ağı.<br>(%) | Teorik bor<br>miktarı ((%) | Erime skk.<br>(°C) |
|-------------------------|--|---------------------|----------------------------|--------------------|
| <b>Borax</b>            | (Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> · 10H <sub>2</sub> O) | 381,42              | 11,35                      | -                  |
| <b>Susuz borax</b>      | (Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> )                     | 201,26              | 21,50                      | 741°C              |
| <b>Metabor asidi</b>    | (HBO <sub>2</sub> )  | 43,83               | 24,69                      | -                  |
| <b>Sodyum borflorit</b> | (NaBF <sub>4</sub> )   | 109,81              | 9,85                       | -                  |
| <b>Borik asit</b>       | (B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                                     | 69,64               | 31,07                      | 450°C              |
| <b>Bor karbür</b>       | (B <sub>4</sub> C)   | 55,29               | 7,28                       | 2450°C             |

**Kaynak** (Matuschka, 1980: 19)

### 3.4.2.1. Tuz Banyosunda Akımsız Borlama

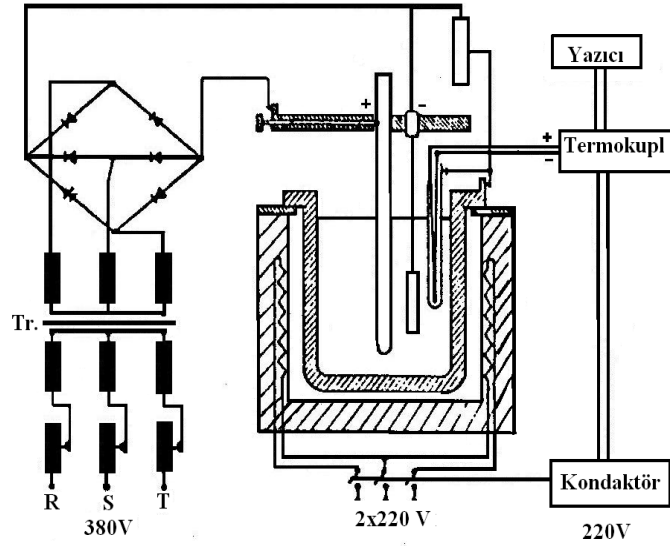
Ortamda ana bileşen olarak boraks, aktivatör olarak ise B<sub>4</sub>C, SiC, Zr, amorf B vb. kimyasallar kullanılır. Bu borlama işlemi boraks, borik asit, sodyum sülfat ve ferrosilis esaslı tuz banyolarında yapılmaktadır. Çok fazla deneyim gerektirmeyen maliyeti düşük olan bir sistemdir. Çok büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanamaması, termal şok ve borlamadan sonra parçanın temizlenmesinin zor olması yöntemin dezavantajları olarak gösterilebilir. Genelde 800 - 1000°C sıcaklık aralığında ve 2 - 6 saat bekleme sürelerinde borlama işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemde kullanılan bazı banyo içerikleri şöyle sıralanabilir (Kartal, 2004: 22).

- (KBF<sub>4</sub>-%75) + (KF-%25),
- (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O-%73-79) + (NaCl-%15-209 + (B- %6-7)
- (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O-%70) + (SiC-%30),
- (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O-%70) + (B<sub>4</sub>C-%30),
- [(Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O-%85) + (NaCl-%55)]- %65 + (Kalsit-%35),
- (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·10H<sub>2</sub>O-%55) + (Ferrobor-%40-50) + (Ferro-alüminyum-%4-5),

- $(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} - \%55) + (\text{SiC} - \%45)$  karışımı ile 1:1 oranında  $\text{BaCl}_2$  ve  $\text{NaCl}$  kullanılarak,
- $(\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O} - \%10) + (\text{B}_4\text{C} - \%40)$ ,

### 3.4.2.2. Ergimiş Tuz Elektrolizi ile Borlama

Günümüze kadar ulaşan ve halen kullanılan ergimiş tuz elektrolizi ile borlama yöntemi ilk olarak Orgin ve Schaaber tarafından tanımlanmıştır. Yapılan işlemden önce boraks içerisinde anot olarak grafit çubuk ve katot olarak da borlanacak malzeme kullanılmıştır. Ergimiş tuz elektrolizi sistemine (elektrokimyasal borlama) ait ilk düzenek Şekil 3.13'de verilmiştir (Kartal, 2011a: 10).



Şekil 3.13. Elektrokimyasal Borlamada Kullanılan İlk Düzenek.

**Kaynak** (Kartal, 2011a: 10).

Elektrokimyasal borlama, borik asit veya boraks gibi bor ve aktivatörler ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{SiC}$ , Potasyum, Lityum vb.) içeren bir çözeltiden bor atomlarının, katot görevini yapan malzemenin üzerine elektrolitik olarak biriktirilmesi yöntemidir (Alparslan, 2011: 47).

Bu teknik ile gerçekleştirilen borlama işlemi; 0,5-6 saat sürelerde, 600-1000 °C sıcaklık aralığında ve 0,15-0,7 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğu değerlerinde gerçekleştirilebilir. Düşük alaşımlı çeliklerde yüksek akım ile kısa süre içerisinde çok ince kaplamalar elde edilebilirken, yüksek alaşımlı çelikler de kalın kaplama tabası elde etmek için düşük akım yoğunluğu ve uzun süre borlama işlemi gerektirir. İşlem sırasında kullanılan elektrolit ana bileşenler boraks ve borik asittir ve yapılan araştırmalar neticesinde buna ilaveten korozif özelliğın azaltılması için,

$B_2O_3+MOH$ ,  $B_2O_3+MF$ ,  $B_2O_3+M_2CO_3$  ( $M=Li, Na, K$ ) bileşimleri de geliştirilmiştir. Aşağıda ergimiş tuz elektrolizinde kullanılan çeşitli banyo içerikleri verilmiştir (Kartal, 2004: 26).

- $(KBF_4) + (LiF) + (NaF) + (KF)$  karışımı; 600 °C - 900 °C arasında,
- $(KF- \%20) + (NaF- \%30) + (LiF- \%50) + (BF_2- \%0,7)$  karışımı (% mol): 800 °C - 900 °C arasında ( $N_2- \%90$ ) + ( $H_2- \%10$ ) ortamında,
- $[(KF + LiF)- \%90] + (KBF_4- \%10)$  karışımı argon ortamında,
- $[(LiF- \%30) + (KF- \%70)- \%90] + (KBF_4- \%10)$  karışımı 700°C - 850°C arasında,
- $(Na_2CO_3- \%90) + (Na_2B_4O_7- \%10)$ ,
- $(Na_2B_4O_7- \%80) + (NaCl- \%20)$  karışımı 800°C - 900°C arasında,
- $(Na_2B_4O_7- \%30) + (B_2O_3- \%40) + (Na_2CO_3- \%30)$ ,
- $(Na_2SO_4- \%30) + (Na_2B_4O_7- \%70)$ ,
- $(Na_2PO_4- \%15) + (Na_2B_4O_7- \%85)$ ,
- $(NaOH- \%10) + (Na_2B_4O_7- \%90)$ ,

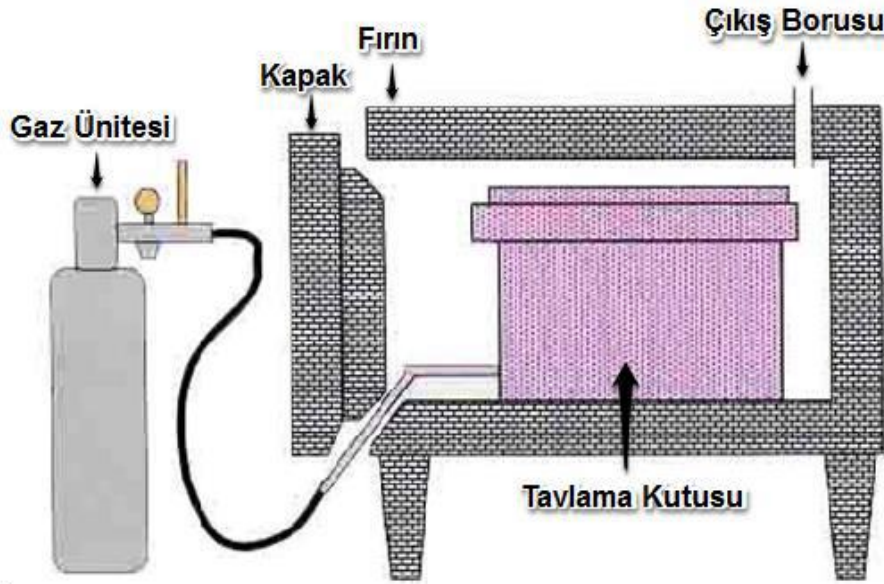
Elektrokimyasal borlamanın en önemli avantajı kutu ve tuz banyosunda akımsız borlama ile kıyaslandığında çok kısa sürelerde daha kalın borür tabakası elde edilebilmesidir. Yöntemin diğer avantajları ise; birçok altlık malzemeye uygulanabilirliği, endüstrideki en büyük sorunlardan olan yüksek sıcaklık oksidasyonu ve korozyona karşı dayanıklı olması, farklı mekanik özellikler içeren sertlikte yüzeylerin elde edilmesi olarak sıralanabilir. Ayrıca bu yöntemde malzeme yüzeyine difüzyon gerçekleştiği için malzeme kendisi gibi davranmaktadır ve kaplama yüzeye daha iyi tutunmaktadır (Aypar, 2010: 19).

Yöntemin dezavantajları olarak; sistemin 850 °C üzerinde çalışma gerekliliği (ergimiş boraksın yüksek vizkozitesi nedeniyle) ve banyonun içerisinde homojen sıcaklık dağılımının zorluğu, kompleks yapıları parçaların kaplanmasında farklı akım yoğunluğu nedeniyle homojen olmayan borür tabakası kalınlığı elde edilmesi, malzemenin her yanının homojen kaplanabilmesi için döndürülmesi veya hareket ettirilmesi, işlem sonunda parça yüzeyinde oluşan tuzların giderilme zorunluluğu gösterilebilir. Tüm bu zorluklarla ek olarak sistemin kurulum maliyeti de bir dezavantajdır. Ayrıca parçada anot yüzeyine bakan kısımda daha kalın borür tabakası elde edilebilir ve farklı borür kalınlıkları dezavantaj oluşturur.  $B_2O_3$  ve  $NaCl$  ilavesi ile kısmen de olsa bu sorunlar giderilebilir. Bu ilaveler ile borlama sonrası temizlenmesi kolaylaşmakta ve homojen akım dağılımı sağlanabilmektedir (Kartal, 2004: 25).

### 3.4.3. Gaz Ortam Borlama

Organik bor bileşiklerinin, diboran ve bor halojenürlerin kullanıldığı bu teknikte borun malzeme yüzeyine difüzyonu gaz sirkülasyonu ile yapılmaktadır. En önemli avantajı sirkülasyon sonucunda üniform bor dağılımı sağlanabilmesidir. Bu borlama tekniğinde bor potansiyelinin kontrol edilmesinden dolayı tek fazlı borür tabakası elde etmek diğer bir avantajdır. Gazın basıncı, akış hızı ve gaz ortamının bileşimi gaz ortam borlama prosesinin en önemli parametreleridir.

Tekniğin dezavantajlarına bakacak olursak; teknikte borlama bileşikleriyle çalışmak için özel cihazlar gereklidir. Diboran, temel bileşik olmasına karşın zehirlidir ve hidrojene kıyasla bile çok pahalıdır. Bor halojenürleri ise korozyona sebep olabilirler. Yüksek oranda karbon içermeleri den dolayı trietilbor ve trimetilbor ile yapılan borlamada karbürizasyon söz konusudur. Şekil 3.14'te gaz ortam borlama sisteminin şematik gösterimi verilmiştir (Gülsün, 2016: 18).



Şekil 3.14. Gaz Ortam Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü.

**Kaynak** (Çelik, 2020: 25)

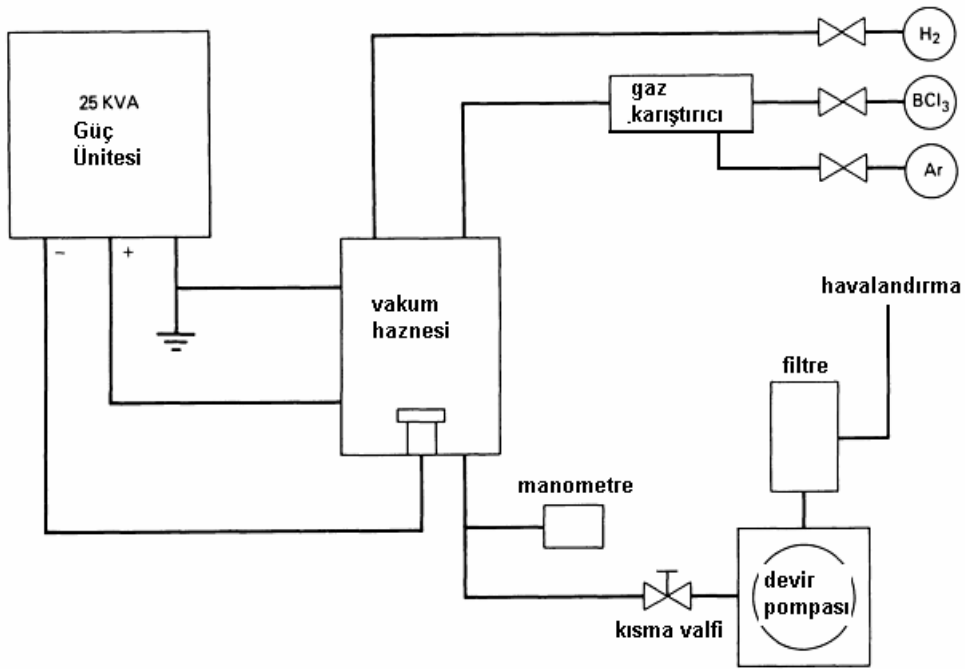
### 3.4.4. Plazma Borlama

Uzun yıllardır borlama işlem sıcaklığının ve süresinin düşürülmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan çalışmalara göre bu parametreleri, iyon implantasyonu borlama ve plazma borlama işlemleri ile azaltılabildiği gösterilmiştir. Plazma borlama prosesi geleneksel borlama proseslerine göre üstün avantajlara sahiptir. Plazma borlama esnasında üretilen yüksek

enerji sayesinde düşük sıcaklıkta borlama işlemi gerçekleştirilebilmekte ve şekil bozulmaları en aza indirilmektedir. Ayrıca gaz karışım oranları kontrol edilebildiği için FeB miktarı azaltılarak, tek tabakalı Fe<sub>2</sub>B tabakasını oluşturulması mümkün kılınmaktadır. Plazma borlama tekniğinin dezavantajı olarak borlama da kullanılan gazların (BCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), zehirli, patlayıcı ve pahalı olması gösterilebilir. Bir diğer dezavantaj ise BCl<sub>3</sub> ortamında gerçekleştirilen borlama işleminde borür tabakasının gözenekli olmasıdır (Güneş vd., 2011: 2380).

Plazma ve gaz borlama prosesindeki dezavantajlar, plazma pasta borlama yöntemi ile ortadan kaldırılabilir. Bu işlemde kullanılan macun çevreye zararsız bor minerallerinden oluşması ve gazları genellikle hidrojen, argon ve azot gibi inert özelliklere sahip olmasıdır (Güneş, 2013: 662).

Plazma borlama işlemi diğer borlama yöntemleriyle mümkün olmayan 600 °C gibi düşük sıcaklıkta, Ar, H<sub>2</sub> gazları ve BCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> gibi bor bileşikleri kullanılarak Şekil 3.15’de gösterilen sisteme göre gerçekleştirilir (Sinha, 1991: 993).



Şekil 3.15. Plazma Borlama Sisteminin Şematik Görüntüsü.

**Kaynak** (Sinha, 1991: 993)

#### 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kartal Sireli vd. (2020), Katodik İndirgeme ve Termal Difüzyon Esaslı Borlama (CRTD-Bor) adı verilen elektrokimyasal esaslı borlama ile elektrolit içerisinde 200 mA/cm<sup>2</sup> sabit akım yoğunluğunda ve 950 °C sıcaklıkta 1 ile 30 dk. arasında değişen sürelerde düşük karbonlu çelik numuneleri borlamıştır. Yüksek borür büyüme hızı ve çevre dostu olmasından dolayı CRTD-Bor yöntemi tercih edilmiştir. Endüstride yaygın olan ve taban malzemeye mükemmel şekilde yapışan tek fazlı Fe<sub>2</sub>B fazlı borür tabakasının 5 dk'da bile elde edilebildiği ve 15 dk borlama ardından yüzeyde istenmeyen FeB tabakası oluştuğu gözlenmiştir. 30 dk'lık borlama ile yaklaşık 120 µm kalınlığında borür tabakası ölçülmüştür. Borlama işlemi ile yüzey sertliği en az yedi (7) kat artmıştır. Yüksek işlem sıcaklığı tane büyümesini teşvik ettiğinden artan borlama süresi ile akma mukavemeti değerleri azaldığından CRTD-Bor yöntemi ile daha kısa sürede gerçekleştirmek mümkündür. Daha uzun borlama süresi ile eğme mukavemeti artmıştır bu da endüstride çelik sacların mukavemet değerlerinden ödün vermeden daha ince borür tabakalı sacların kullanılabilmesi öne sürülmüştür.

Fernández-Valdés vd. (2020) yaptıkları çalışmada, disk şeklindeki AISI 316L çelik numuneleri kutu borlama yöntemi ile 2 ve 6 saat sürelerde 900 °C'de borlayarak numune yüzeyinde elde edilen demir borür tabakasının aşınma davranışını incelemiştir. Deneysel sonuçlarına göre borlanmış numunelerde aşınma, borlanmamış numunelere göre yaklaşık 10 kat daha azalmıştır. Ayrıca 5 N'luk normal bir yük altında borlu numunelerin aşınma yüzeyi elastik davranış gösterirken, borlanmamış numunelerin aşınma yüzeyi ise plastik davranış sergilemiştir.

Alaeddine ve Khedidja (2019), Ti-6Al-4V alaşımını %90 boraks (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) ve %10 sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) içeren ergimiş bir tuzda elektrokimyasal borlama tekniği ile 950 °C sabit sıcaklıkta 30 dk ve 500 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 100-500 kHz aralığında elektromanyetik frekansta başarılı bir şekilde borlamışlardır. Çok kısa sürede yaklaşık 55 µm kalınlığında tek fazlı bir tabaka (Ti<sub>2</sub>B) oluşturulmuştur. Bu yöntemle oluşturulan borür tabakasının kalınlığı macun borlama ile karbon çeliğinin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasına göre daha incedir. Yüzeyden taban malzemeye doğru borür tabakasının sertliği 1440 ile 2260 HV arasında değişirken, bu sertlik değeri karbon çeliği üzerinde oluşturulan borür tabakasından daha sert olduğu bildirilmiştir.

Krelling vd. (2017), AISI 1020 çeliğine 1000 °C'de 4 saat kutu borlama işlemi uygulamıştır. XRD analizlerinde borlanmış numunenin yüzeyinde Fe<sub>2</sub>B fazı belirlenmiştir. Yüzeyde oluşan borlu tabakanın kalınlığı 177 µm olup, yüzey sertliği ise 2100 HK<sub>0.01</sub> olarak ölçülmüştür. Mikro abrasiv aşınma deneylerinde abrasiv partiküllerin sertliği Fe<sub>2</sub>B tabakasının sertliğine yakın olduğundan borlanmış numunenin aşınma direncini azaltmıştır.

Kul vd.'nin (2016), GGG60 dökme demir numunelerini 950 °C'de 4 saat süre ile kutu ve tuz banyosu ortamlarında borlama işlemine tabi tutmuştur. Bu çalışmada, borlama ajanlarının ve bileşimlerinin borür tabakasının oluşumu ve morfolojisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda borür tabakasının sertliği ve kalınlığının kaplanacak taban malzemesine, borlama bileşiğinin borlama potansiyeline, borlama süresi ve sıcaklığına, borlama ortamı ve bileşimlerine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Yüzeyden taban malzemeye doğru kesit sertlik ölçüm sonuçlarına göre dökme demirin kutu borlanmasında en uygun bileşim %85 B<sub>4</sub>C ve %15 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> iken tuz banyosunda akımsız borlama için ise en uygun iki bileşim (%65 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, %25 Fe-Si, %10 NaOH ve %70 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, %30 B<sub>4</sub>C) belirlenmiştir.

He vd. (2015), ark ergitme prosesi ile yüksek karbonlu çelik numune yüzeyinde aktif bir difüzyon bölgesi oluşturularak nispeten düşük sıcaklıkta (780 °C) borlama işlemi gerçekleştirdi. Borlama işlemi öncesi numune yüzeyleri, bir tungsten elektrota 5 saniye süreyle 90 A akım uygulanarak argon atmosferinde uygulandı. Ön işleme tabi tutulmuş numuneler seramik bir potada 780 °C'de 2, 4, 12 ve 24 saat sürelerde bor içerikli ortamda sırayla yaklaşık 60, 130, 400 ve 420 µm kalınlığında borür tabakaları elde edilmiştir ve 12 saat sonunda optimum kalınlık tespit edilmiştir. Borlanmış çeliğin sertliği 1070 HV olup, referans çeliğe göre yaklaşık %57 artış göstermiştir. Ayrıca borlanmış yüzeyin aşınma direnci de artmıştır.

Feridun vd. (2015) molibden plakaları ergimiş Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> elektroliti içinde 900, 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda, 0,5 A/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 30-180 dk arasında elektrokimyasal olarak borlama gerçekleştirmiştir. Tuz banyosunda akımsız borlama ile 7 saat süre sonucunda 16 µm kalınlığında bir tabaka elde edilirken, tuz banyosundan 1 saat süre içinde akımla borlama sonucunda 38 µm kalınlığında bir borür tabakası oluşturulabileceği gözlenmiştir. XRD analizi ile yüzeyde Mo<sub>2</sub>B<sub>4.027</sub> ve Mo<sub>2</sub>B<sub>5</sub> borür fazları tespit edilmiştir. Borlama işlemi sonucunda yüksek sertlik değerleri (1900-3250 HV) ölçülmüştür. Elektrokimyasal borlama yöntemi ile oluşturulan borür tabakalarının kalın, sert, yoğun ve homojen olduğu ifade edilmiştir.

Şeşen ve Özgen (2014), içeriğinde çok az alaşım elementi bulunan arayer atomu içermeyen IF çeliğini elektrokimyasal olarak borlamışlardır. Kalsine edilmiş sodyum borakstan

oluşan tuz banyosu içerisinde IF çeliği, 900 ve 1020 °C sıcaklıklarda 15-90 dk sürelerinde 50-400 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluklarında elektrokimyasal olarak borlanmıştır. Yüzeyde Fe<sub>2</sub>B, FeB, Fe<sub>3</sub>B ve Fe<sub>3,5</sub>B demir borür tabakaları gözlenmiştir. Çoğu borlama işleminin aksine, borür tabakası ile taban malzeme arasında geçiş bölgesi oluşmamıştır ve bunun sebebi olarak IF çeliğinde düşük karbon içeriğinin geçiş bölgesini oluşturmak için yetersiz olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Borür tabakasının kalınlığı ve sertliği uygulanan akım yoğunluğuna, süre ve sıcaklığa bağlı olarak artmıştır. 1020 °C'de 200 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda 45 dk sonucunda 135 µm kalınlığında borür tabakası elde edilmiştir.

Turku vd. (2014), düşük karbonlu mikro alaşımlı çelik numuneleri Ekabor-2 tozu içerisinde 850 °C'de 2, 4, 6 ve 8 saat farklı sürelerde kutu borlama yöntemi ile borlanmıştır. XRD analizi sonuçlarına göre yüzeyde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları oluşmuştur. Borür tabakasının kalınlığının borlama süresi arttıkça artmaktadır. Yüzeyi borlanan çeliğin sertliği borlanmamış çeliğe göre dokuz (9) kat artmıştır.

Sista vd. (2013), Inconel 600 plakaları 950°C de 200 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda ergimiş Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> esaslı elektrolitik içinde 5, 10 ve 15 dk borlanmıştır. Geleneksel kutu borlama ile 10 saatlik bir süre sonucunda 50 µm borür tabakası kalınlığı elde edilirken, bu yöntem sayesinde 5 ile 15 dk gibi kısa sürede 30-80 µm arasında borür tabakası oluşturulmuştur. Borlama sonrası yüzeyin sertliği 1600-2100 HV arasında olup, çözelti içerisinde bekleme prosesi sırasında tabakaların ayrılması taban malzeme olarak kullanılan Inconel 600 (11,4x10<sup>-6</sup>/°C) ile iki borür tabakası (Ni<sub>2</sub>B için 7,64x10<sup>-6</sup>/°C, Ni<sub>3</sub>B için 7,64x10<sup>-6</sup>/°C) arasındaki termal genişleme katsayısı farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Altınsoy vd. (2013), AISI 1020 çeliği 800, 875 ve 950°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde Ekabor 1 tozu içerisinde kutu borlama gerçekleştirdi. XRD analizi ile Fe<sub>2</sub>B borür fazı tespit edilmiştir. Borür tabaka kalınlıkları 20,5 ile 216 µm arasında ve kaplama yüzey sertliği ise 1300 ile 1650 HV arasında ölçülmüştür. SEM incelemelerinde ise AISI 1020 çeliğin yüzeyinde oluşan borür tabakası düşük sıcaklık ve kısa sürelerde sütunlu bir yapı sergilemiştir. Ancak yüksek sıcaklık ve borlama süresi artınca çeliğin yüzeyinde yoğun ve daha kompakt bir tabaka tespit edilmiştir.

Kartal vd. (2011b), düşük karbonlu AISI 1018 çeliği %90 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> ve %10 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içeren banyoda 200 mA/cm<sup>2</sup> sabit akım yoğunluğunda geniş bir sıcaklık (850-1000 °C) ve süre (5-120 dk) aralığında borlanışlardır. Bu çalışmada elektrokimyasal olarak oluşturulan borür tabakasının büyüme kinetiği incelenmiştir. Yüzeyde Fe<sub>2</sub>B ve FeB fazlarının oluştuğu XRD

analizi ile tespit edilmiştir. Elektrokimyasal borlama ile, nispeten düşük sıcaklıklarda beş (5) dk'lık elektrokimyasal borlamadan sonra bile düşük karbonlu çeliğin yüzeyinde çok yoğun ve kalın borür tabakaları oluşturulabildiği, borlama sıcaklığının bor difüzyonu ve borür tabakalarının morfolojisi üzerinde güçlü bir etkisi olduğu, elektrokimyasal borlamadan sonra çelik taban malzemeye göre yüzey sertliği yaklaşık 10 kat arttığı, elektrokimyasal borlamadaki aktivasyon enerjisinin macun veya kutu borlama işlemlerine göre yaklaşık %24 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Kartal vd. (2011c), AISI 1018 düşük karbonlu çelik numuneleri % 90  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ve %10  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  içeren tuz banyosunda  $950\text{ }^\circ\text{C}$ 'de  $200\text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda 15 dk borlamıştır. Daha sonra akım kesilerek numuneler ergimiş çözültide  $950\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 15, 30 ve 45 dk'lık sürelerde bekletilmiştir. Düşük karbonlu çeliğin yüzeyinde tek fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$  tabakası oluşturmak için çeliğin yüzeyinde oluşan  $\text{FeB}$  fazının  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazına dönüştürmek için numuneler ergimiş banyoda akım kesilerek bekletilmiştir. Bu bekleme işlemine elektrokimyasal faz homojenizasyon (PHEB) adı verilmiştir. Düşük karbonlu çeliğin yüzeyinde yoğun, homojen,  $75\text{ }\mu\text{m}$  kalınlığında tek fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$  borür tabakası oluşturulmuştur. Borür tabakası taban malzemeye mükemmel yapışmıştır. Ayrıca uygulanan bu yöntem geleneksel kutu borlama ile kıyaslandığında 6 kata kadar daha hızlı ve daha çevreci olduğu iddia edilmiştir.

Sista vd. (2011), AISI D2 takım çeliğinin yüzeyine susuz  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  içerisinde  $850, 900, 950$  ve  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  de 15 dk ile 1 saat arasında değişen sürelerde  $200\text{ mA/cm}^2$  sabit akım yoğunluğunda elektrokimyasal borlama işlemini gerçekleştirdiler. Geleneksel kutu borlama ile 8 ila 10 saat süre sonunda  $45\text{ }\mu\text{m}$  kalınlığında borür tabakası elde edilirken, bu yöntem sayesinde AISI D2 takım çeliğinin yüzeyinde  $950\text{ }^\circ\text{C}$ 'de yaklaşık 1 saat süre sonunda  $60\text{ }\mu\text{m}$  kalınlığında borür tabakası oluşturulmuştur. Elde edilen borür tabakası  $\text{FeB}$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$  ve  $\text{CrB}$  fazlarından oluşmaktadır ve yüzeydeki borür tabakasının sertliği  $1714\pm 200\text{ HV}$ 'dir. Yüzeyde bulunan  $\text{FeB}$  tabakası üzerinde Daimler-Benz protokolüne göre gerçekleştirilen Rockwell C testine göre geniş çatlaklar ve ayrılmalar gözlenmiştir. Bu durum bu tabakanın çok düşük kırılma tokluğuna sahip olduğunu gösteriyor. Tuz banyosunda akımsız ve kutu borlama için gerekli aktivasyon enerjisi sırasıyla  $170\text{ KJ/mol}$ ,  $176\text{ KJ/mol}$  iken, bu yöntem ile gerekli olan aktivasyon enerjisi  $137.86\text{ KJ/mol}$ 'dur.

Kartal vd. (2010a), düşük karbonlu çeliğinin yüzeyini  $900\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık ve  $200\text{ mA/cm}^2$  akım yoğunluğunda %90  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ve %10  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  içeren ergimiş bir tuzda borlamıştır. Bu çalışmada, borlama süresinin borür tabakasının bileşimi, kalınlığı ve morfolojisi üzerine etkileri incelenmiştir. Borlama süresine bağlı olarak yüzeyde  $\text{FeB}$  ve  $\text{F}_2\text{B}$  fazları oluşmaktadır ve 15

dk'ya kadar gerçekleştirilen borlama sonucu yüzeyde  $F_2B$  fazı gözlenirken, borlama süresi arttırıldığında  $FeB$  fazıda oluşmaya başlamıştır. Yüzeyde  $FeB$  fazının olduğu durumda sertlik 19GPa iken, kesit boyunca sertlik 14 ila 16 GPa arasında taban malzemeye doğru kademeli olarak azalırken bu sertlik aralığı  $Fe_2B$  fazına karşı gelmektedir.

Kartal vd. (2010b), ticari saf titanyum'un (CP-Ti-Grade 2) yüzeyini 950 °C sıcaklıkta ve 300 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda %90  $Na_2B_4O_7$  ve %10  $Na_2CO_3$  içeren ergimiş tuz içerisinde elektrokimyasal olarak borlamıştır. 5 dk'lık kısa bir borlama sonucunda bile yüzeyde  $TiB$  ve  $TiB_2$  fazları tespit edilmiştir. Bu yöntem sayesinde 2 saatlik borlama işlemi sonrasında elde edilen kalınlık, 24 saat kutu borlama yöntemi ile elde edilebilecek kalınlıktan 12 kat fazla olduğu görülmüştür. 1 saat elektrokimyasal borlama ile yüzeyde 4,5 µm kalınlığında  $TiB_2$  fazı ve taban malzemeye doğru  $TiB$  whisker'den oluşan borür tabakası gözlenmiştir ve sertliği ise 40 GPa'dır. Bu çalışmada uygulanan elektrokimyasal borlama yöntemi ile yüzeyde kalın ve sert borür tabakasının kısa sürede üretilebileceği, kaplama sırasında gaz emisyonu veya katı atığın oluşmadığı tespit edilmiştir.

Çelik vd. (2008), AISI 1030 çeliği Ekabor-2 tozu içerisinde kutu borlamıştır. Borlama sıcaklığı ve süresinin borür tabakasının kalınlığı, sertliği ve aşınma davranışları üzerine etkileri incelenmiştir. Gerçekleştirilen borlama işlemi 900-1050 °C sıcaklık aralığında 2, 4 ve 6 saatlik sürelerde yapılmıştır. İnceleme sonunda numune yüzeyinde gözeneksiz üniform dağılmış testere dişli borür tabakası ( $FeB+Fe_2B$ ) elde edilmiştir. Borlama süre ve sıcaklığının artması ile yüzey kalitesinin düştüğü çatlakların oluştuğu gözlenmiştir. Yine aynı şekilde borlama süre ve sıcaklığının artışına bağlı olarak kaplama tabaka kalınlığı ve sertlik değerleri de artmıştır. Elde edilen kaplama kalınlığı 80,6-340,9 µm arasında, sertlik değerleri ise 1227-1625 HV aralığında ölçülmüştür. Yapılan aşınma deneylerine göre; karşı malzeme olarak kullanılan  $Al_2O_3$  bilye ile yapılan deneylerde borlu numunelerdeki aşınmanın borlanmamış numuneye göre 24,5 kat daha az olduğu, karşı malzeme olarak  $SiC$  bilye ile yapılan deneylerde ise aşınmanın borlanmamış numunelere göre 5,4 kat daha az olduğu rapor edilmiştir.

Taktak (2007), yüksek krom içeriğine sahip mühendislik uygulamalarında yaygın kullanılan sıcak iş takım çeliği (AISI H13) ile paslanmaz çeliği (AISI 304) 800 ve 950 °C sıcaklıklarda, boraks, borik asit ve ferrosilikondan oluşan tuz banyosunda 3, 5 ve 7 saat sürelerde tuz banyosunda akımsız borlamıştır. XRD analizine göre AISI H13 çeliğin yüzeyinde  $Fe_2B$ ,  $FeB$  ve  $CrB$  fazları oluşurken, AISI 304 çeliğin yüzeyinde  $Fe_2B$ ,  $FeB$ ,  $Ni_3B$  ve  $CrB$  fazları tespit edilmiştir. Borlanmış AISI H13 ve AISI 304 çeliklerin yüzey pürüzlülüğü borlama sıcaklığı ve süresi ile artmaktadır. Borür tabakasının kırılma tokluğu ve yapışma direnci artan

borlama süresi ve sıcaklığına bağı olarak yüzeyde sert ve gevrek karakterde olan FeB esaslı tabakanın artmasından dolayı azalmaktadır.

Kartal vd. (2005), düşük karbonlu çeliğin yüzeyinde farklı akım aralığında (50–700 mA/cm<sup>2</sup>), farklı banyo sıcaklıklarında (800–1000°C), sabit elektroliz süresinde ve elektrolit bileşiminde elektrokimyasal borlama işlemi gerçekleştirdiler. Düşük karbonlu çeliğin borlanması en uygun akım yoğunluğu ve elektrolit sıcaklığının sırasıyla 200mA/cm<sup>2</sup> ve 900 °C olduğu belirlenmiştir.

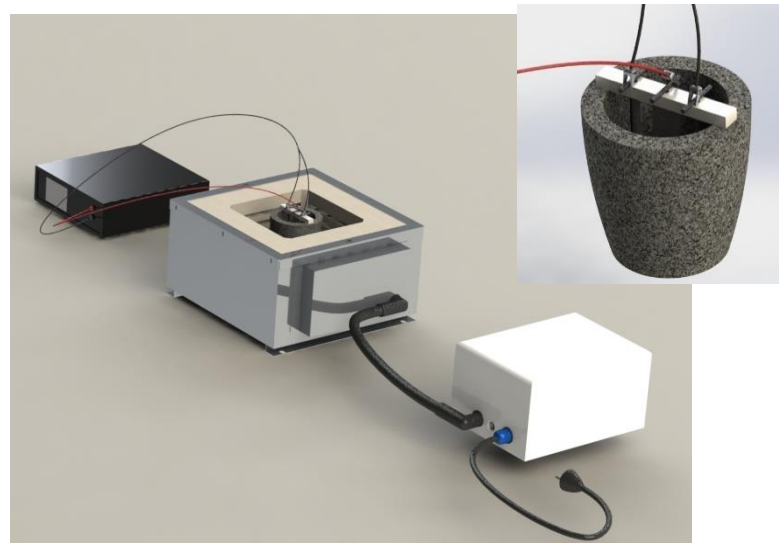
## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

### 5.1. Deney Düzenegi ve Numune Hazirlanmasi

Bu çalışmada kullanılacak olan düşük karbonlu AISI 1020 çeliği makine ve imalat sektöründe sıklıkla kullanılmasının yanı sıra yüzey sertleştirme çalışmalarına da uygun bir malzemedir. Borlama işleminin yapılması için altlık malzeme olarak kullanılan bu düşük karbonlu çelik malzemenin kimyasal bileşimi % ağırlıkça Tablo 5.1’de verilmiştir. Dikdörtgen şeklinde (40x20x10 mm) kesilerek hazırlanan numuneler eriyik içerisine daldırılabilmesi için delinmiştir. Numunelerin yüzeyi standart metalografik olarak hazırlandıktan sonra saf suyla yıkandı, asetonla ultrasonik temizlendi ve alkolle durulandı. Elektroliz deneyleri, elektrik direnç fırınında anot olarak hizmet veren bir grafit pota içinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzenegimiz Şekil 5.1’de verilmiştir. Elektrolit olarak çevresel ve geri dönüşüm olanakları dikkate alınarak %90 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> ve %10 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> bileşimi kullanılmıştır. AISI 1020 çelik ise katot olarak polarize edilmiştir. Elektrokimyasal borlama (EB) işlemi 15 ve 30 dk, 200 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda ve 950 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Bu sayede yüzeyde FeB + Fe<sub>2</sub>B tabakalı borür tabakası oluşturulmuştur. Ardından akım kesilerek ve borlanmış AISI 1020 çeliği aynı elektrolitte 950 °C sıcaklıkta 45 dk bekletilmiştir.

**Tablo 5.1.** AISI 1020 Çelik Kimyasal Bileşimi.

| Element | C    | Si   | Mn   | Cr    | P     | S     | Fe     |
|---------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| Ağ.%    | 0,24 | 0,29 | 0,62 | 0,043 | 0,020 | 0,011 | 98,776 |



**Şekil 5.1.** Elektrokimyasal Borlama Deney Düzenegi.

## 5.2. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu

### 5.2.1. Optik Metal Mikroskop (OM) Çalışmaları

Mikroyapı incelemeleri için kaplamanın kesiti standart metalografik yöntemle hazırlanmıştır. Kaplamaya ait mikroyapısal görünümler Nikon marka Eclipse LV150 model optik metal mikroskobundan (OM) elde edilmiştir.

### 5.2.2. X-Işınları Difraktometresi (XRD) Çalışmaları

Kaplama yapısını oluşturan fazların belirlenmesi için  $\text{CuK}_\alpha$  radyasyonlu Panalitical marka X-ışınları difraksiyon (XRD) analiz cihazı kullanılmıştır.

### 5.2.3. Mikrosertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri için Shimadzu HVM mikrosertlik cihazı kullanılmış olup, 0,05 kg maksimum yükte 15 sn bekleme süresinde kesitten, 22 farklı mesafeden 3 farklı noktada sertlik ölçülmüştür. Ölçüm alınan noktalar arası mesafe  $\sim 3 \mu\text{m}$ 'dur. Bu çalışmada sertlik ölçüm sonuçlarının istatistiksel ortalaması kullanılmıştır.

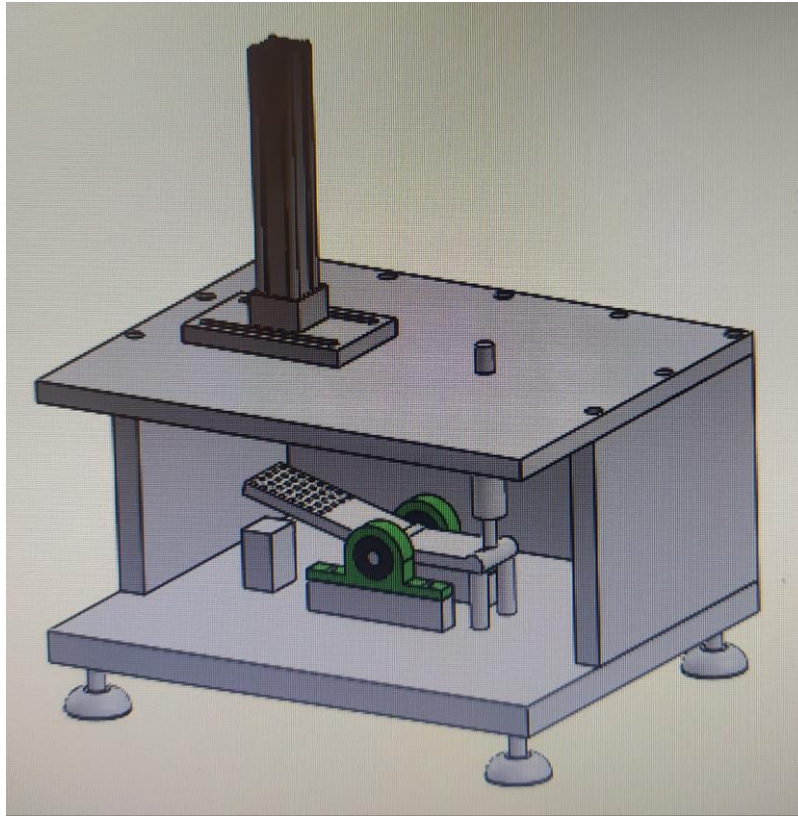
### 5.2.4. Aşınma Deneyleri

Karakterizasyon işlemleri tamamlandıktan sonra işlem görmemiş 1020 çelik, yüzeyde tek ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) ve iki ( $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ ) tabakalı borürlü yapı oluşturulan numuneler atmosferik koşullarda, Tablo 5.2'de verilen bilgiler doğrultusunda darbeli kayma (impact sliding wear) aşınma deneylerine tabi tutulmuştur.

**Tablo 5.2.** Aşınma Deneyi Koşulları.

|                    |  |
|--------------------|--|
| Cihaz              | Darbeli kayma aşınma cihazı  |
| Yük                | 24 kg pnömatik silindir kuvveti  |
|                    | 4 kg yay kuvveti   |
| Kayma Mesafesi     | 60 m   |
| Karşı Malzeme      | 10 mm çapında rulman çeliği (AISI 52100)   |
| Deney Sıcaklıkları | 25 °C  |
| Nem                | % 35±5   |
| Numuneler          | İşleme görmemiş 1020 çeliği<br>Tek ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) tabakalı borürlü yapı<br>İki ( $\text{Fe}_2\text{B} + \text{FeB}$ ) tabakalı borürlü yapı |

Darbeli kayma aşınma deneyleri ise Şekil 5.2’de görülen cihaz ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, 24 kg pinomatik silindir kuvveti ile 4 kg yay kuvveti olmak üzere yük kombinasyonu kullanılmıştır. Test için karşı malzeme olarak 10 mm çapa sahip sertleştirilmiş çelik bilye (AISI 52100 kalite rulman çeliği) kullanılmıştır. Deneyler, bir çevrimin pinomatik silindir yardımıyla uygulanan darbe yüklemesi ve yay yardımıyla uygulanan kayma yüklemesinin birbirini takip edeceği şekilde ayarlanan toplam 4297 çevrimde (60 m) gerçekleştirilmiştir. Doğrusal zıt yönlü düzlem-bilye ve darbeli kayma aşınma deneyleri sonrası numuneler üzerinde oluşan aşınma izleri Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile incelenip aşınma izlerinin 2 boyutlu profilleri elde edildikten sonra numunelerin aşınma kayıpları hesaplanmıştır. Numuneler üzerinde oluşan aşınma izleri ve karşı malzemenin temas yüzeyi OM yardımıyla incelenip yüzeylerde meydana gelen aşınma karakterize edilmiştir.

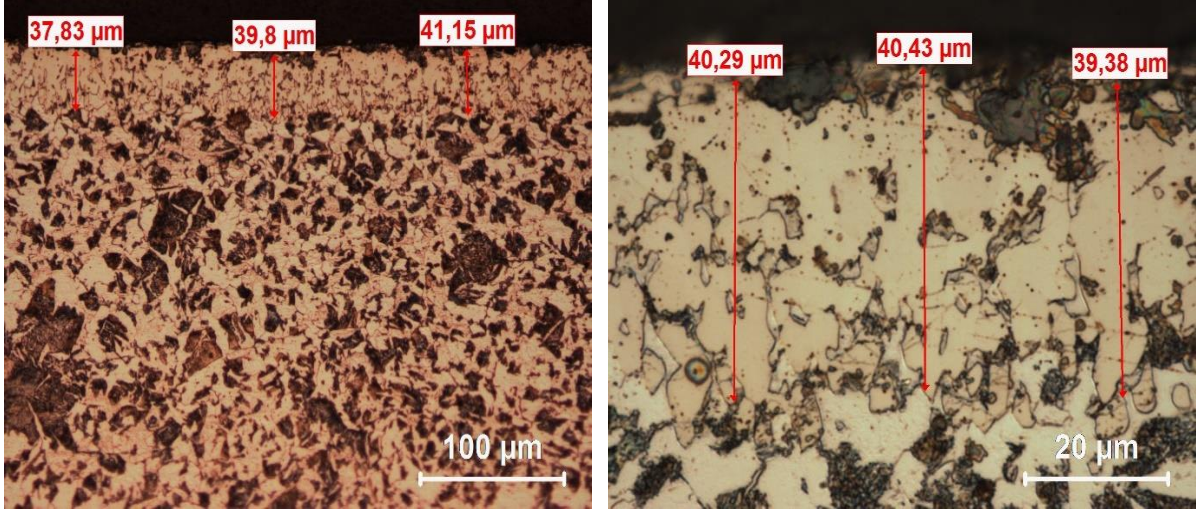


**Şekil 5.2.** Darbeli Kayma Aşınma Deney Cihazının Genel Görünümü.

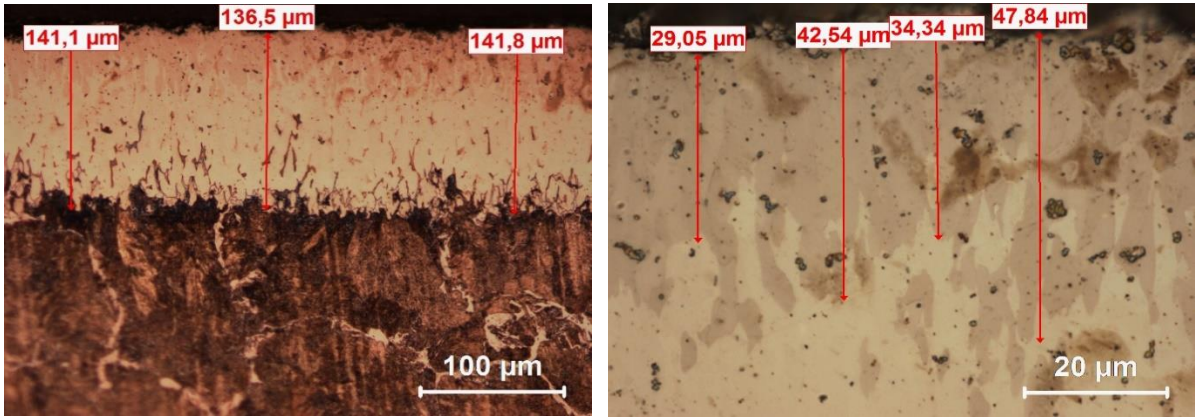
## 6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

### 6.1. Karakterizasyon Sonuçları

Elektrokimyasal borlama yöntemi (15 ve 30 dk EB ve 45 dk bekleme) sonunda elde edilen tek ( $Fe_2B$ ) ve iki ( $Fe_2B + FeB$ ) tabakalı borürlü yapının kesit görüntüleri Şekil 6.1’de verilmiştir. Elde edilen bor kaplamanın kesit mikroyapı incelemelerinde, tek tabakalı  $Fe_2B$  tabakasının oldukça homojen, yoğun ve yüzeyden ayrılmadığı görülmüştür. 950 °C’de 15 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda ~40 µm’lik tek tabakalı  $Fe_2B$  kalınlığı üretilmiş ve 0.66 µm/dk.’lık bir büyüme oranı elde edilmiştir. G. Kartal vd’ nin yapmış oldukları çalışmada (Kartal vd., 2011c: 2008), düşük karbonlu çelik yüzeyinde tek ( $Fe_2B$ ) tabakalı borürlü yapı elde etmek için 15 dakika EB ve 45 dakika bekleme süresinin yeterli olduğu tespit edilmiştir. 950 °C’de 30 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda ~140 µm’lik iki tabakalı  $FeB+Fe_2B$  kalınlığı üretilmiş ve 1.86 µm/dk.’lık bir büyüme oranı elde edilmiştir. AISI 1020 çeliğin 950 °C’de 12 saatte kutu borlanma ile 215 µm’lik bir tabakanın elde edildiği bir çalışmada 0.298 µm/dk.’lık bir büyüme hızına karşı gelmektedir (Türkmen ve Yalamaç, 2018: 665). Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, bu çalışmada 2,21 ve 6,24 kat kaplama hızının arttığı tespit edilmiştir. 15 dk EB ve 45 dk bekleme sonunda AISI 1020 çelik yüzeye ait XRD paterni tek fazlı  $Fe_2B$  tabakası oluşumunu onaylamaktadır (Şekil 6.2).

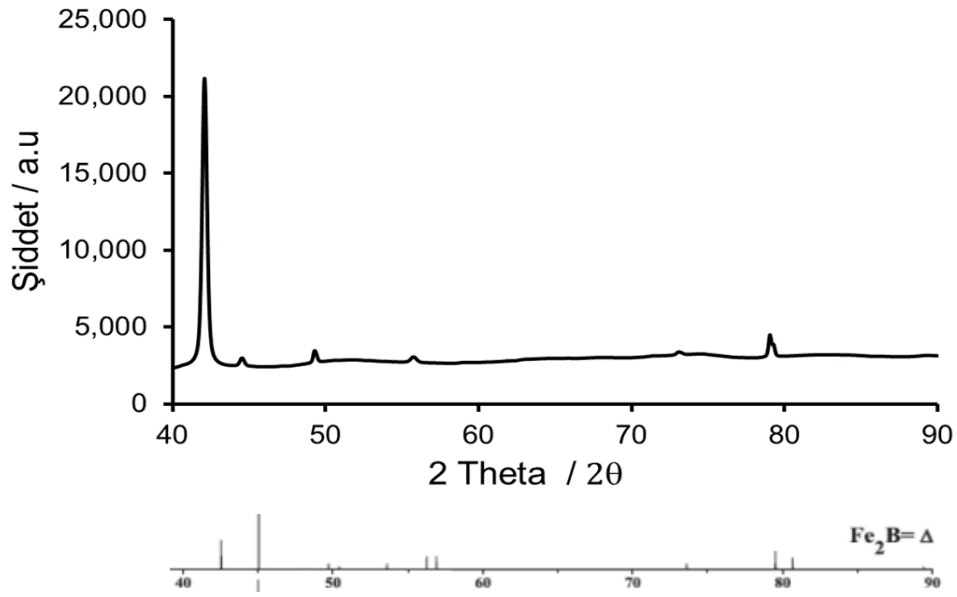


(a)



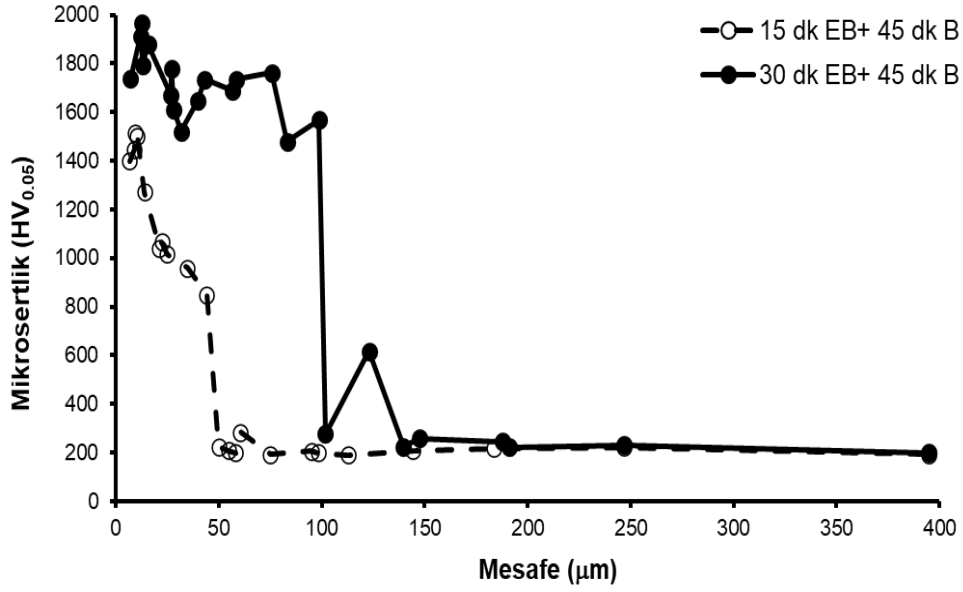
(b)

**Şekil 6.1.** (a) 15 dk ve (b) 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Düşük ve Yüksek Büyütmeli OM Kesit Görüntüleri.



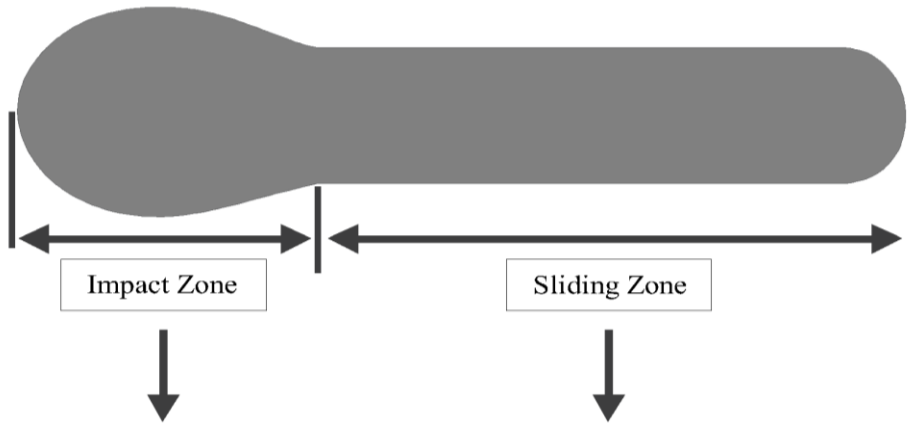
**Şekil 6.2.** 15 dk ve EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların XRD Paterni.

950 °C’de 15 dk ve 30 dk EB ardından 45 dk bekleme sonunda elde edilen kaplamaların kesit sertlik incelemesi Şekil 6.3’de verilmiştir. 15 dk EB işlemi ve 45 dk bekleme işlemi ile oluşan homojen tek tabakalı ( $Fe_2B$ ) yapının sertliği  $1450 \pm 50$   $HV_{0.05}$  değerleri arasında değişmekte olup, çelik taban malzemeye doğru kademeli olarak azalmaktadır. Ancak 30 dk EB işlemi ve 45 dk bekleme işlemi ile iki tabakalı ( $FeB+Fe_2B$ ) yapının sertliği  $1900 \pm 50$   $HV_{0.05}$  değerleri arasında değişmekte olup, geniş bir aralıkta çelik taban malzemeye doğru kademeli olarak azalmaktadır. Kesit sertlik sonuçlarının mikroyapı analizini destekler nitelikte olduğu yapılan ölçümlerle belirlenmiştir. Bütün bu veriler göz önüne alındığında, numunelere yapılan analiz sonuçları birbirleriyle uyum içerisindedir.

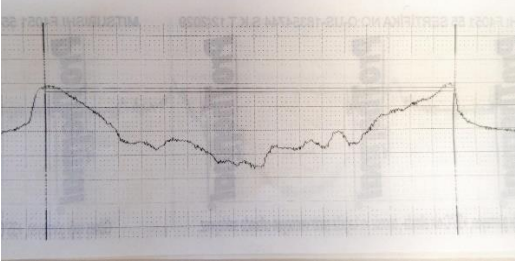
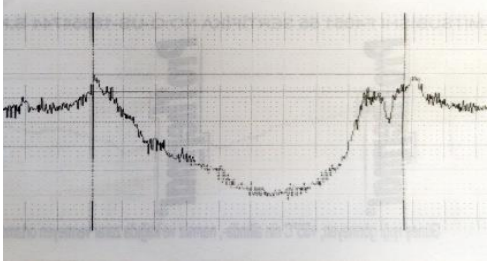
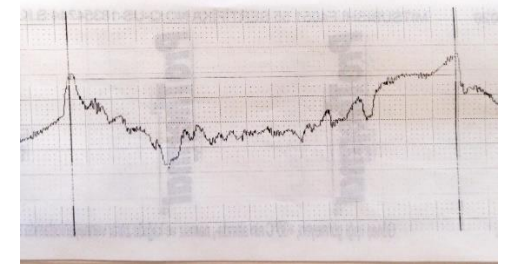
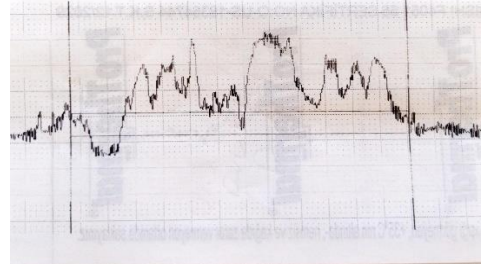
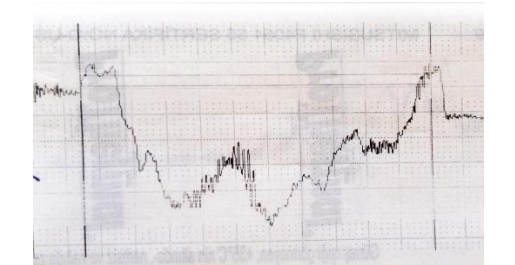
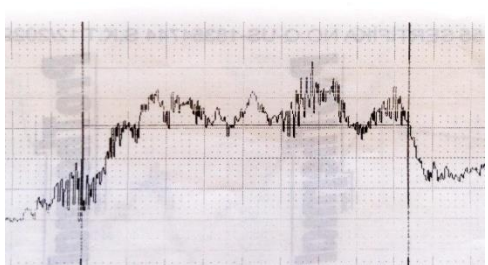


Şekil 6.3. İncelenen Kaplamaların Kesit Sertlik Değişimi.

Darbeli kayma aşınma testi sonrasında, numunelerin yüzey profilometre cihazında aşınma derinlikleri ve aşınma genişlikleri ölçülerek aşınma hızları hesaplanmıştır. Ölçümler, darbe ve kayma bölgesinden yapılmıştır. Numune yüzeylerinde oluşan aşınma izine ait şematik gösterim Şekil 6.4’de verilmiştir. İşlem görmemiş 1020 numune ile 15 dk ve 30 dk EB ardından 45 dk bekleme sonunda elde edilen kaplama yüzeylerine yapılan darbeli kayma aşınma deneylerinden sonra elde edilen darbe ve kayma bölgelerine ait temsili 2-D profiller Şekil 6.5’de verilmiştir.

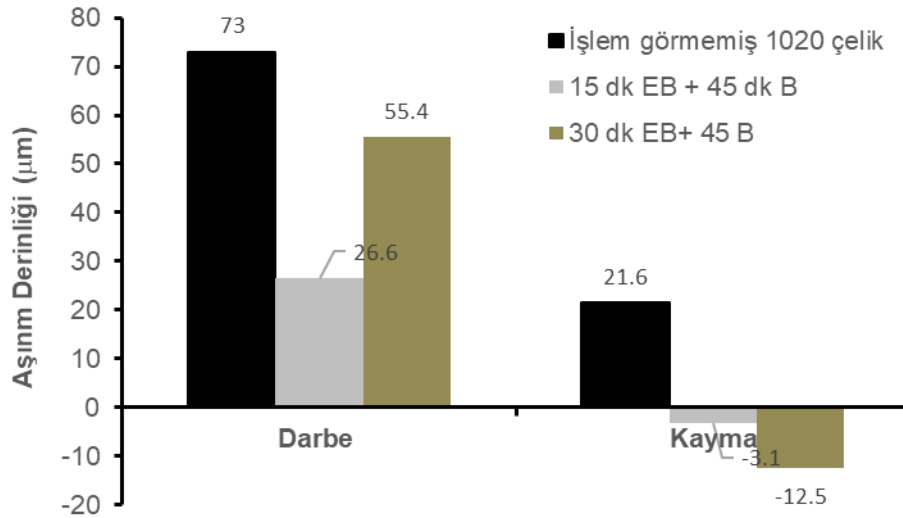


Şekil 6.4. Numunelerin Yüzeylerinde Oluşan Aşınma İzinin Şematik Gösterimi.

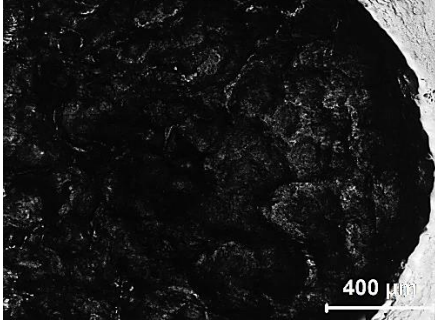
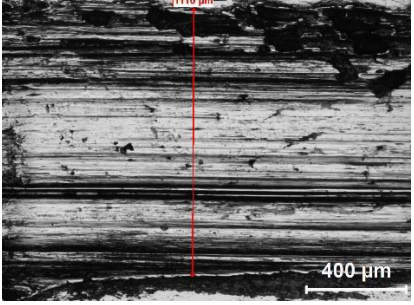
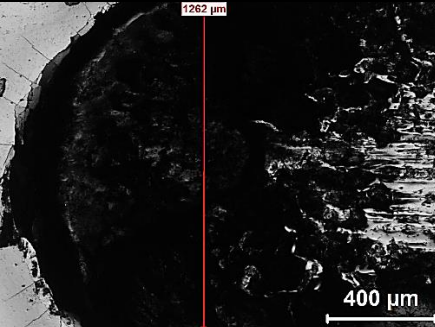
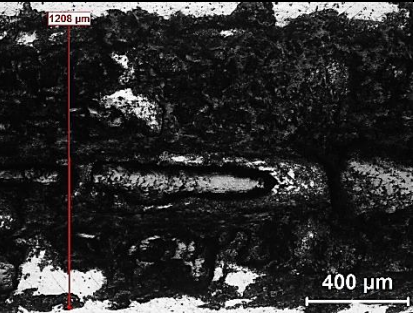
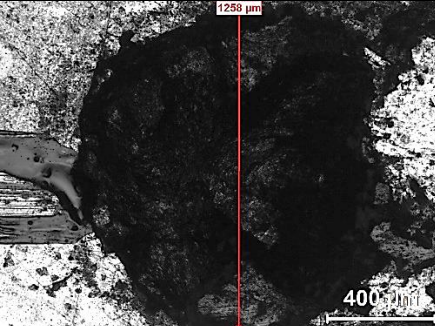
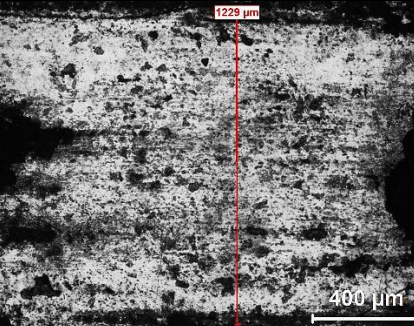
| (a)   | (b)  |
|---|--|
| <p><b>İşlem Görmemiş 1020</b><br/> Aşınma İz Genişliği :1730 <math>\mu\text{m}</math><br/> Aşınma İz Derinliği: 73 <math>\mu\text{m}</math></p> | <p><b>İşlem Görmemiş 1020</b><br/> Aşınma İz Genişliği :960 <math>\mu\text{m}</math><br/> Aşınma İz Derinliği: 21,6 <math>\mu\text{m}</math></p> |
|    |    |
| <p><b>15 dk EB +45 dk B</b><br/> Aşınma İz Genişliği :1450 <math>\mu\text{m}</math><br/> Aşınma İz Derinliği: 26,6 <math>\mu\text{m}</math></p> | <p><b>15 dk EB +45 dk B</b><br/> Aşınma İz Genişliği :1240 <math>\mu\text{m}</math><br/> Aşınma İz Derinliği: -3,1 <math>\mu\text{m}</math></p>  |
|   |   |
| <p><b>30 dk EB +45 dk B</b><br/> Aşınma İz Genişliği :1050 <math>\mu\text{m}</math><br/> Aşınma İz Derinliği: 55,4 <math>\mu\text{m}</math></p> | <p><b>30 dk EB +45 dk B</b><br/> Aşınma İz Genişliği :850 <math>\mu\text{m}</math><br/> Aşınma İz Derinliği: -12,5 <math>\mu\text{m}</math></p>  |
|    |    |

**Şekil 6.5.** Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların (a) Darbe ve (b) Kayma Bölgelerinin Temsili 2-D Profilleri.

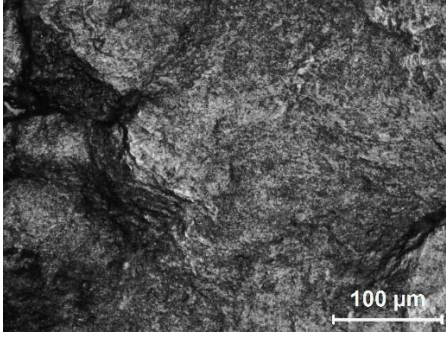
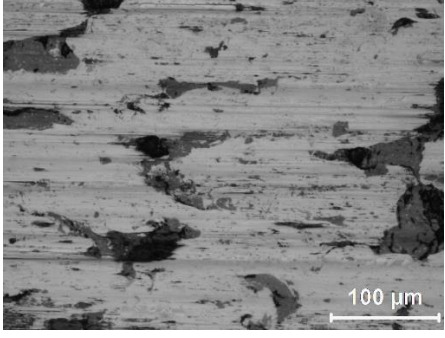
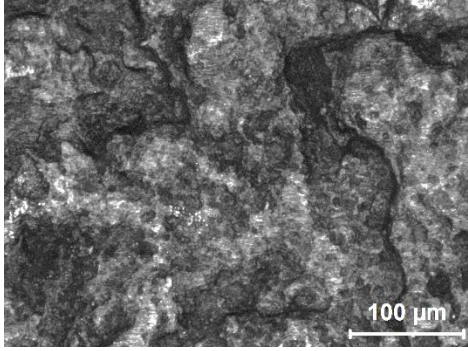
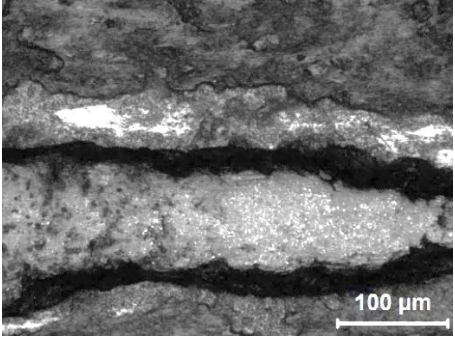
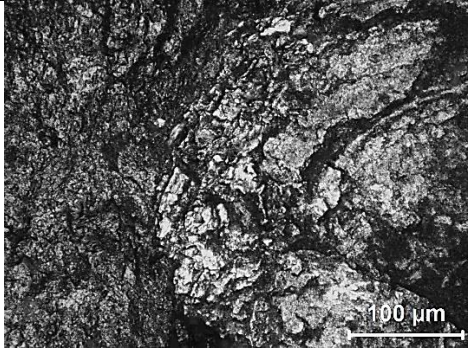
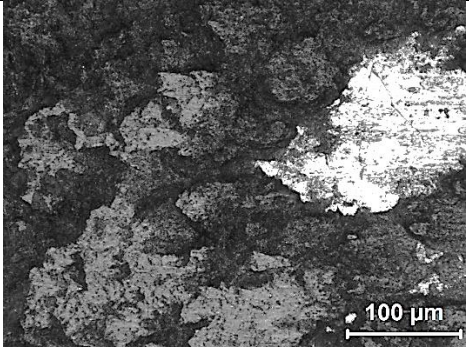
Aşınma profillerinden elde edilen aşınma derinlikleri Şekil 6.6’da gösterilmektedir. Tek tabakalı (Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapının darbe bölgesinin kenarlarında çatlaklar oluşurken (Şekil 6.7) iz derinliği ise 26,6 µm ölçülmüştür. İşlem görmemiş 1020 çelik ve iki tabakalı (FeB+Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapıda iz derinliği sırasıyla 73 µm ve 55,4 µm olup tek tabakalı (Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapıya göre daha fazla plastik deformasyona maruz kaldığını düşündürmektedir (Şekil 6.7 ve Şekil 6.8). Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de görüldüğü gibi işlem görmemiş 1020 çeliğin aşınma yüzeyinin kayma bölgesinde yine plastik deformasyon ve oksitlenme mevcut iken tek (Fe<sub>2</sub>B) ve iki tabakalı (FeB+Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapının kayma bölgesinde karşı malzeme çelik bilyanın sıvandığı (smearing) tespit edilmiştir (Şekil 6.9). Tek tabakalı (Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapıya nazaran daha sert olan iki tabakalı (FeB+Fe<sub>2</sub>B) borürlü yapının kayma bölgesinde çelik bilyanın daha yoğun sıvandığı gözlenmiştir. 2-D profillerde görülen aşınma derinliklerindeki bariz fark aşınma yüzey görüntüleriyle birbirini destekler niteliktedir.



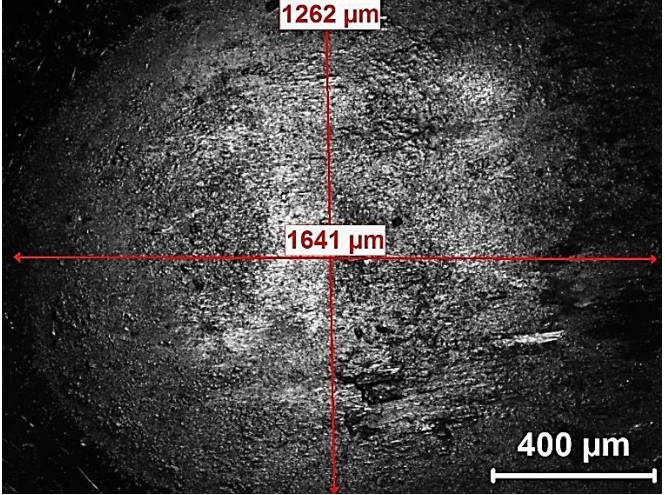
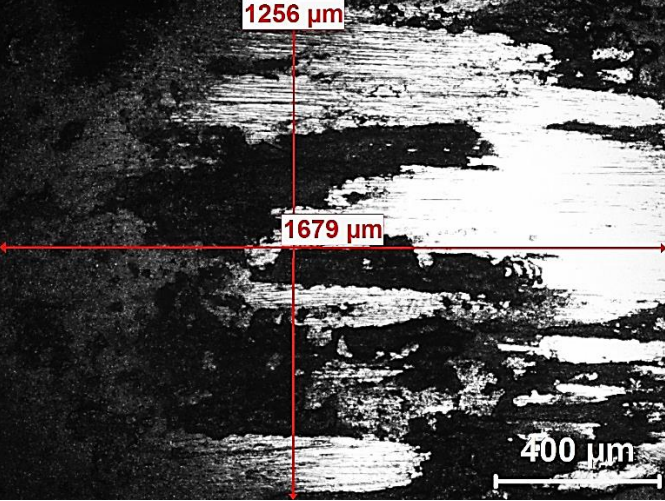
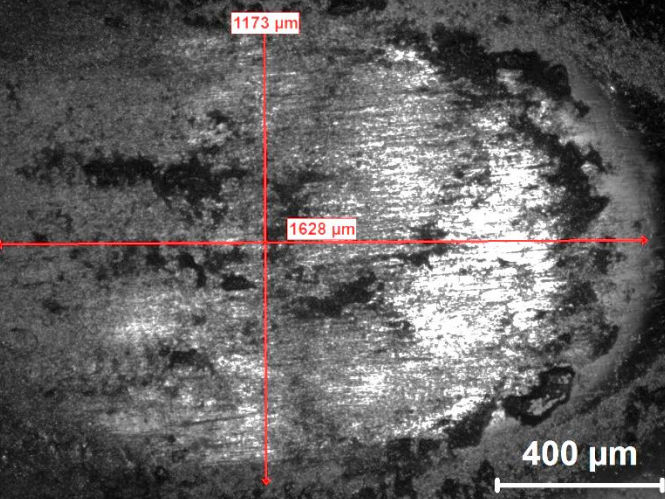
**Şekil 6.6.** Darbeli Kayma Aşınma Deneylelerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Darbe ve Kayma Bölgelerinin Aşınma Derinlikleri.

|                           | Darbe Bölgesi   | Kayma Bölgesi  |
|---------------------------|---|--|
| İşlem<br>Görmemiş<br>1020 |    |    |
| 15 dk EB<br>+45 dk B      |    |    |
| 30 dk EB<br>+45 dk B      |  |  |

**Şekil 6.7.** Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Darbe ve Kayma Bölgelerine Ait Aşınma Yüzeylerinin Düşük Büyütme Görüntüleri (x50).

|                           | Darbe Bölgesi  | Kayma Bölgesi   |
|---------------------------|--|---|
| İşlem<br>Görmemiş<br>1020 |   |   |
| 15 dk EB<br>+45 dk B      |   |   |
| 30 dk EB<br>+45 dk B      |  |  |

**Şekil 6.8.** Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinden Sonra İşlem Görmemiş 1020, 15 dk ve 30 dk EB Ardından 45 dk Bekleme Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Darbe ve Kayma Bölgelerine Ait Aşınma Yüzeylerinin Yüksek Büyütme Görüntüleri (x200).

|                           | Karşı Malzeme  |
|---------------------------|--|
| İşlem<br>Görmemiş<br>1020 |    |
| 15 dk EB<br>+45 dk B      |   |
| 30 dk EB<br>+45 dk B      |  |

Şekil 6.9. Darbeli Kayma Aşınma Deneylerinde Karşı Malzeme Olarak Kullanılan Çelik Bilyaların Görüntüleri (x50).

## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, işlem görmemiş 1020 çelik, tek ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) ve iki tabakalı ( $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ ) borürlü yapının darbeli kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Aşınma deneylerinden önce malzemelerin yapısal karakterizasyon çalışmaları; XRD ile faz analizi, OM ile mikroyapı analizi ve mikrosertlik ölçümlerini kapsamaktadır. Daha sonra numuneler darbeli kayma aşınma deneyine tabii tutulmuştur. Yapılan incelemeler neticesinde elde edilen bulgular aşağıda listelenmiştir.

1. Mikroyapı ve mikrosertlik analiz sonuçlarına göre düşük karbonlu çeliğin yüzeyinde  $950\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 15 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda yüzeyde  $1450\pm 50\text{ HV}_{0.05}$  sergileyen  $\sim 40\text{ }\mu\text{m}$  kalınlığında tek tabakalı ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) borürlü yapının oluştuğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan  $950\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dk EB ve 45 dk bekleme koşulu sonucunda ise yüzeyde  $1900\pm 50\text{ HV}_{0.05}$  sergileyen  $\sim 140\text{ }\mu\text{m}$  kalınlığında iki tabakalı ( $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ ) borürlü yapının oluştuğu belirlenmiştir.
2. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen darbeli kayma aşınma deneyleri sonucunda oluşan aşınma izlerinin 2-D profilleri incelendiğinde darbe bölgesinde daha tok ve sünek olan tek tabakalı ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) borürlü yapının aşınma derinliğinin daha az olduğu, kayma bölgesinde ise daha sert olan iki tabakalı ( $\text{FeB}+\text{Fe}_2\text{B}$ ) borürlü yapının aşınma yüzeyine karşı malzeme çelik bilyanın daha fazla sıvandığı görülmüştür.
3. Yapısal, sertlik ve darbeli kayma aşınma deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde; borlanmış yüzeyler arasında darbe bölgesinde aşınmayı kontrol eden mekanizma tokluk iken, kayma bölgesinde ise aşınmayı kontrol eden mekanizma sertliktir.

## KAYNAKÇA

- Alaeddine, K., & Khedidja, B.** (2019). Electrochemical Boriding of Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6407-6412.
- Albayrak, M. G.** (2021). *Düşük karbonlu Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Borlama*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Allaoui, O., Bouaouadja, N., & Saindernan, G.** (2006). Characterization of Borinezed Layers on a XC38 Steel. *Surface and Coatings Technology*, 201(6), 3475-3482.
- Alparslan, E.** (2011). *Tekstil Endüstrisinde Borlama Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Altınsoy, I., Çelebi Efe, F. G., Ipek, M., Ozbek, I., Zeytin, Z., & Bindal, C.** (2013). An Investigation on Borided AISI 1020 Steel. *AIP Conference Proceedings*, 1569, 43-46.
- Arat, M.** (2011). *Paslanmaz Çelik 310 ve 316 Metalinin Plazma Borlama Nitriürleme Metodu ile Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Atık, E., Yunker, U., & Meriç, C.** (2003). The effects of Conventional Heat Treatment and Boronizing on Abrasive Wear and Corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 Steels. *Tribology International*, 36(3), 155-161.
- Aydoğmuş, T.** (2019). *Tungsten Karbür Kesici Takımların Borlanması ve Karakterizasyonu*. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Aypar, A.** (2010). *Elektrokimyasal Yöntemle Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Borlanması ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Balusamy, T., Narayanan, T. S. N. S., Ravichandran, K., Park, I. S., & Lee, M. H.** (2013). Pack Boronizing of AISI H11 Tool Steel: Role of Surface Mechanical Attrition Treatment. *Vacuum*, 97, 36-43.
- Bejar, M. A., & Moreno, E.** (2006). Abrasive Wear Resistance of Boronized Carbon and Low-Alloy Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 173(3), 352-358.
- Bolat, Ç.** (2016). *Orta Karbonlu DIN CK45 Çeliğinin Elektrokimyasal Yöntemle Borlanması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Bora, A. B.** (2017). *Alaşımsız Düşük Karbonlu Yassı Mamullerin Elektrokimyasal Olarak Borlanması ve Borlama İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Bor Araştırma Enstitüsü (BOREN)** [Erişim: 24.09.2022, <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/bor-elementi.html> ]

**Boztepe, M. H.** (2014). *Effect of Boronizing Temperature and Time On Abrasion and Corrosion Resistance of AISI 1050 Steel*. MSc Thesis, Çukurova University, Institute of Natural and Applied Sciences, Adana.

**Campos, I., Farah, M., Lopez, N., Bermudez, G., Rodriguez, G., & VillaVelazquez, C.** (2008). Evaluation of the Tool Life and Fracture Toughness of Cutting Tools Boronized by the Paste Boriding Process. *Applied Surface Science*, 254(10), 2967-2974.

**Campos-Silva, I., Ortiz-Dominguez, M., Lopez-Perrusquia, N., Meneses-Amador, A., Escobar-Galindo, R., & Martinez-Trinidad, J.** (2010). Characterization of AISI 4140 Borided Steels. *Applied Surface Science*, 256(8), 2372-2379.

**Carrera-Espinoza, R., Figueroa-Lopez, U., Martinez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Hernandez-Sanchez, E., & Motallebzadeh, A.** (2016). Tribological Behavior of Borided AISI 1018 Steel Under Linear Reciprocating Sliding Conditions. *Wear*, 362-363, 1-7.

**Cengiz, S., Gençer, Y., Tarakçı, M., & Azaklı, Y.** (2015). Influence of Copper Amount on the Pack Boronizing Behaviour of Fe-Cu Binary Alloys. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(3), 339-349.

**Cimenoğlu, H., Atar, E., & Motallebzadeh, A.** (2014). High Temperature Tribological Behaviour of Borided Surfaces Based on the Phase Structure of the Boride Layer. *Wear*, 309(1-2), 152-158.

**Cuao-Moreu, C. A., Hernandez-Sanchez, E., Alvarez-Vera, M., Garcia-Sanchez, E. O., Perez-Unzueta, A., & Hernandez-Rodriguez, M. A. L.** (2019). Tribological Behavior of Borided Surface on CoCrMo Cast Alloy. *Wear*, 426-427, 204-211.

**Çelik, O. N., Akbayır, Ö., Gaşan, H., Er, Ü., & Aydınbeyli, N.** (2008). Borlanmış AISI 1030 Çeliğinin Abrasif Aşınma Özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 21(1), 71-86.

**Çelik, Ü. A.** (2020). *Mekanik Alaşım Yöntemi ile Demir Bor Alaşımının Üretimi ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

**Çelikkan, H., Öztürk, M. K., Aydın, H., & Aksu, M. L.** (2007). Boriding Titanium Alloys at Lower Temperatures Using Electrochemical Methods. *Thin Solid Films*, 515(13), 5348-5352.

**Delikanlı, K., Çalık, A., & Uzun, H. A.** (2003). Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama özelliklerinin İncelenmesi. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5.1

**Dinç, H.** (2013). *Inconel 718 Süper Alaşımının Termokimyasal Borlanması*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Ertürk, L.** (2018). *GR-2 ve GR-5 Titanyum Alaşımının Borlama Yöntemi ile Yüzey Kalitesinin İyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.

**Feridun, O. K., Sista, V., Eryılmaz, O. L. & Erdemir, A.** (2015). Electrochemical Boriding of Molybdenum in Molten Borax. *Surface Engineering*, 31(8), 575-580.

**Fernández-Valdés, D., Meneses-Amador, A., López-Liévano, A., & Ocampo-Ramírez, A.** (2020). Sliding Wear Analysis in Borided AISI 316L Steels. *Materials Letters*, 285, 129138. 4

**Gök, M. S., Küçük, Y., Erdoğan, A., Öge, M., Kanca, E., & Günen, A.** (2017). Dry Sliding Wear Behavior of Borided Hot-Work Tool Steel at Elevated Temperatures. *Surface & Coatings Technology*, 328, 54-62.

**Güneş, I., Ulker, S., & Taktak, S.** (2011). Plasma Paste Boronizing of AISI 8620, 52100 and 440C Steels. *Meteriasl and Design*, 32, 2380-2386.

**Güneş, I.** (2013). Wear Behaviour of Plasma Paste Boronized of AISI 8620 Steel with Borax and B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Paste Mixtures. *J. Mater. Sci. Technol.*, 29(7), 662-668.

**Gülsün, K.** (2016). *Yüzey Borlanmış ve Farklı Matriks Yapılı Küresel Grafitli Dökme Demirin Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

**He, X., Xiao, H., Özyayın, M. F., Balzuweit, K., & Liang, H.** (2015). Low Temperature Boriding of High Carbon Steel. *Surface and Coatings Technology*, 263, 21-26.

**Jain, V., & Sundararajan, G.** (2002). Influence of the Pack Thickness of the Boronizing Mixture on the Boriding of Steel. *Surface and Coatings Technology* 149, 21-26.

**Kartal, G.** (2004). *Ergimiş Tuz Elektroliz Yöntemiyle Çeliklerin Borlanması Proses Parametrelerinin Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Kartal, G., Timur, S., & Arslan, C.** (2005). Effects of Process Current Density and Temperature on Electrochemical Boriding of Steel in Molten Salts. *Journal of Electronic Materials*, 34(12), 1538-1542.

**Kartal, G., Timur, S., Eryilmaz, O. L., & Erdemir A.** (2010a). Influence of Process Duration on Structure and Chemistry of Borided Low Carbon Steel. *Surface and Coatings Technology*, 205(5), 1578-1583.

**Kartal, G., Timur, S., Urgen, M., & Erdemir, A.** (2010b). Electrochemical Boriding of Titanium for Improved Mechanical Properties. *Surface and Coatings Technology*, 204(23), 3935-3939.

**Kartal, G.** (2011a). *Katodik Redüksiyon-Termal Difüzyon Yöntemi ile Metallerin Borlanması (KRTD-BOR) ve Süreçlerin Optimizasyonu*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Kartal, G., Eryilmaz, O. L., Krumdick, G., Erdemir, A., & Timur, S.** (2011b). Kinetics of Electrochemical Boriding of Low Carbon Steel. *Applied Surface Science*, 257(15), 6928-6934.

**Kartal, G., Timur, S., Sista, V., Eryilmaz, O. L., & Erdemir, A.** (2011c). The Growth of Single Fe<sub>2</sub>B Phase on Low Carbon Steel Via Phase Homogenization in Electrochemical Boriding (PHEB). *Surface and Coatings Technology*, 206(7), 2005-2011.

**Kartal Sireli, G., Bora, A.S., & Timur, S.** (2020). Evaluating the Mechanical Behavior of Electrochemically Borided Low-Carbon Steel. *Surface and Coatings Technology*, 381, 125177.

**Kondul, B.** (2020). *Borlama İle Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşınma davranışının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

**Krelling, A. P., Da Costa, C. E., Milan, J. C. G., & Almeida, E. A. S.** (2017). Micro-abrasive Wear Mechanisms of Borided AISI 1020 Steel. *Tribology International*, 111, 234-242.

**Kul, M., Oskay, K. O., Temizkan, A., Karaca, B., Kumruoğlu, L. C., & Topçu, B.** (2016). Effect of Boronizing Composition on Boride Layer of Boronized GGG-60 Ductile Cast Iron. *Vacuum*, 126, 80-83.

- Kutucu, Y. K.** (2013). *Yüksek Alaşımli Çeliklerin Borlanması Sonucunda Oluşan Isıl Artık Gerilmelerin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Martini, C., Palombarini, G., Poli, G., & Prandstaller, D.** (2004). Sliding and Abrasive Wear Behaviour of Boride Coatings. *Wear*, 256(6), 608-613.
- Matuschka, A.G.** (1980). *Boronizing*, Heyden, 11-45.
- Mindivan, H.** (2023). High-Temperature Wear and Oxidation Behaviour of Electrochemically Borided Low Carbon Steel. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 38(2), 937-945.
- Mu, D., & Shen, B.** (2013). The Kinetics and Dry-Sliding Wear Properties of Boronized Gray Cast Iron. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Materials Science and Engineering*,
- Nora, R., Zine, T. M., Abdelkader, K., Youcef, K., Ali, O., & Jiang, X.** (2019). Boriding and Boronitrocarburising Effects on Hardness, Wear and Corrosion Behavior of AISI 4130 Steel. *Materia*, 24(1).
- Oliveira, C. K. N., Casteletti, L. C., Neto, A. L., Totten, G. E., & Heck, S. C.** (2010). Production and Characterization of Boride Layers on AISI D2 Tool Steel. *Vacuum*, 84(6), 792-796.
- Ozbek, I., Sen, S., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S., & Ucişik, A. H.** (2004). A Mechanical Aspect of Borides Formed on the AISI 440C Stainless-Steel. *Vacuum*, 73, 643-648.
- Ozdemir, O., Usta, M., Bindal, C., & Ucisik A. H.** (2006). Hard Iron Boride (Fe<sub>2</sub>B) on 99.97 wt% Pure Iron. *Vacuum* 80, 1391-1395.
- Özer, M.** (2011). *Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İçyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Öztürk, K.** (2021). *Plastik Kalıp Çeliklerinin Korozyona Karşı Korunmasında Kutu Borlama İşleminin Etkileri*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Rosas-Melendez, S. A., Elias-Espinosa, M., Reyes-Retana, J. A., & Cervantes-Sodi, F.** (2021). Friction and Wear of Borided AISI O1 Steel With Carbon Nanomaterial Deposit. *Materials Letters*, 282, 128798.

**Saygın, M.** (2006). *AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

**Sinha, A. K.** (1991). *Boriding (Boronizing) of Steel*, ASM Handbook, Volume 4, Heat Treating, 978-1000.

**Sista, V., Kahvecioğlu, O., Eryılmaz, O. L., Erdemir, A., & Timur, B.** (2011). Electrochemical Boriding and Characterization of AISI D2 Tool Steel. *Thin Solid Films*, 520(5), 1582-1588.

**Sista, V., Kahvecioğlu, O., Kartal, G., Zeng, Q. Z., Kim, J. H., Eryılmaz, O. L., & Erdemir, A.** (2013). Evaluation of Electrochemical Boriding of Inconel 600. *Surface and Coatings Technology*, 215, 452-459.

**Spence, T. W., & Makhlof, M. M.** (2005). Characterization of the Operative Mechanism in Potassium Fluoborate Activated Pack Boriding of Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 168(1), 127-136.

**Şeşen, F. E., & Özgen, Ö. S.** (2014). A Study on Electrothermochemical Boronizing of an IF Steel. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 32(3), 334-347.

**Tabur, M., Izciler, M., Gul, F., & Karacan, I.** (2009). Abrasive Wear Behavior of Boronized AISI 8620 Steel. *Wear*, 266, 1106-1112.

**Taktak, S.** (2007). Some Mechanical Properties of Borided AISI H13 and 304 Steels. *Materials & Design*, 28(6), 1836-1843.

**Timur, S., Kartal, G., Eryılmaz, O. L., Erdemir, A.** (2015). Ultra-Fast Boriding of Metal Surfaces for Improved Properties, Patent No: US 8951402B2.

**Toktaş, G., Toktaş, A., & Gülsün K.** (2017). Effect of Matrix Structure and Boriding Time on the Wear Behaviour of Cu-Ni-Mo Alloyed Ductile Iron. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(2), 449-457.

**Topuz, P.** (2009). *Akışkan Yataklı Fırında Farklı Çeliklerin Borlanması ve Borlama Parametrelerinin Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Topuz, P., Aydın, Ö., Aydoğmuş, T., & Çiçek, B.** (2020). Borlanmış AISI 316 Üzerinde Oluşmuş Fe<sub>x</sub>B Tabakalarının Kırılma Tokluklarının İncelenmesi. *Journal of Steel Research and Development*, 12-16.

**Turku, N., Dođan, Ő., Uçar, N., & Çalık, A.** (2014). The Effect of Boriding Time on Hardness Values of Low Carbon Micro Alloyed Steels. *SDU Journal of Science (E-Journal)*, 9(2), 147-151.

**Türkmen, İ., & Yalamaç, E.** (2018). Growth of the Fe<sub>2</sub>B Layer on SAE 1020 Steel Employed a Boron Source of H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> During the Powder-Pack Boriding Method. *Journal of Alloys and Compounds* 744, 658-666.

**Türkmen, İ., Yalamaç, E., & Keddami, M.** (2019). Investigation of Tribological and Diffusion Model of Fe<sub>2</sub>B Layer Formed by Pack-Boriding on SAE 1020 Steel. *Surface & Coatings Technology* 377, 124888.

**Ulukoy, A., & Can, A. Ç.** (2005). Çeliklerin Borlanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 189-198.

**Ünal, F.** (2013). *Cam Kalıplarında Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (KGDD) Borlanması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Xie, F., Sun, L., & Pan, J.** (2012). Characteristic and Mechanism of accelerating Pack Boriding by Direct Current Field at Low and Moderate Temperatures. *Surface and Coatings Technology*, 206(11-12), 2839-2844.

**Yamanel, B.** (2018). *Farklı Sıcaklıklarda Menevişlenmiş ve Borlama İşlemine Tabi Tutulmuş SAE 5140 Çeliğinin Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.

**Yu, L. G., Chen, X. J., Khor, K. A., & Sundararajan, G.** (2005). FeB/Fe<sub>2</sub>B Phase Transformation During SPS Pack Boriding: Boride Layer Growth Kinetics. *Acta Materialia*, 53(8), 2361-2368.