

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AISI H13 ÇELİĞİNİN KOROZYON, TRİBOLOJİK VE TRİBOKOROZYON  
PERFORMANSININ KUTU VE ELEKTROKİMYASAL ESASLI BORLAMA  
YÖNTEMLERİYLE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜMMET AYYILDIZ

TEZ DANIŞMANI  
PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2024

10614308

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AISI H13 ÇELİĞİNİN KOROZYON, TRİBOLOJİK VE TRİBOKOROZYON  
PERFORMANSININ KUTU VE ELEKTROKİMYASAL ESASLI BORLAMA  
YÖNTEMLERİYLE GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÜMMET AYYILDIZ

TEZ DANIŞMANI  
PROF. DR. HARUN MİNDİVAN

BİLECİK, 2024

10614308

## BEYAN

AISI H13 Çeliğinin Korozyon, Tribolojik ve Tribokorozyon Performansının Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlama Yöntemleriyle Geliştirilmesi adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik 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 Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda;<br>projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise<br>ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir. |  |                            |          |
| <b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                  |  | <b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b> | <b>X</b> |
| <b>Destek alındı ise;</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |                            |          |
| <b>Destekleyen kurum;</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |                            |          |
| <b>Desteğin Türü</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  | <b>Proje Numarası</b>      |          |
| <b>1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                |  |                            |          |
| <b>2- TÜBİTAK</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                         |  |                            |          |
| <b>Diğer;.....</b><br>.....                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |                            |          |
| <b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |                            |          |
| <b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                       |  | ...../.....<br>.....       |          |

**Öğrenci Adı ve Soyadı**

**Ümmet Ayyıldız**

**Tarih**

.....

**İmza**

.....

## ÖN SÖZ

Bu çalışmalar boyunca ve yüksek lisans eğitimimin her aşamasında büyük özveriyle bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Harun MİNDİVAN' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Ferda MİNDİVAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak gerek covid döneminde gerekse sonrasında çalışmalarda her zaman yanımda olan ve büyük desteklerini esirgemeyen başta eşim Zeynep AYYILDIZ'a ve Prometal Hafif Metaller Döküm Sanayi Ltd. Şti Genel Müdürü Sayın Burak AZMAN'a teşekkürlerimi sunarım.



**Ümmet Ayyıldız**

**2024**

## ÖZET

### AISI H13 ÇELİĞİNİN KOROZYON, TRIBOLOJİK VE TRIBOKOROZYON PERFORMANSININ KUTU VE ELEKTROKİMYASAL ESASLI BORLAMA YÖNTEMLERİYLE GELİŞTİRİLMESİ

AISI H13, yüksek sertlik, tokluk ve sertleşebilme özellikleri ile birlikte mükemmel yüksek sıcaklık performansına sahip olması nedeniyle poli(vinil klorür) (PVC) ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıp ve takım imalatında kullanılmaktadır. PVC içeren malzemelerin yüksek sıcaklıkta işlenmesiyle ilgili bir dezavantaj, korozyon ve aşınma hızını büyük ölçüde hızlandırabilen, C-Cl bağlarının parçalanmasından kaynaklanan serbest klorür türlerinin göz ardı edilemeyecek konsantrasyonudur. Bununla birlikte, dövme ve döküm gibi çoğu sıcak şekillendirme uygulamalarında tercih edilen H13 çeliğinin oda ve yüksek sıcaklıklarda aşınma ve korozyon direncinin iyileştirilmesi gereklidir. Sıcak şekillendirme uygulamaları sırasında kalıp ve takımlar, genellikle yüksek sıcaklıkta şiddetli statik/çevrimsel yüke maruz kalmaktadır ve bu durum, kalıp ve takım yüzeyinde erozyon, termal yorulma, kalıp ve takımın başlıca bölgelerinde abrasif/adhesif aşınmasına yol açabilir, bu da kalıp ve takımların servis ömrünü büyük ölçüde azaltabilir. Ayrıca, korozyon, sıcaklık ve agresif yağlayıcıların birleşik etkisi nedeniyle kalıplar ve takımlar hasara uğrayabilir.

H13 çeliğin zayıf korozyon ve aşınma direnci, tribolojik ve tribokorozyon performansı açısından geliştirilmesi gerekiyor. Bu sorunu çözmek için kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama potansiyel bir çözüm olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada, kutu (% 90 B<sub>4</sub>C ve % 10 KBF<sub>4</sub> toz karışımı içerisinde 950 °C’de 6 saat süre) ve elektrokimyasal (% 90 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> ve % 10 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> elektrolit içerisinde 950 °C sıcaklıkta 15 dakika 200 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda elektrokimyasal borlama ve 45 dakika bekletme) esaslı borlamanın H13 çeliğinin yüzey sertliğini ve kendi kendini yağlama performansını önemli ölçüde artırdığını ve aynı zamanda etkileyici korozyon ve tribokorozyon performansı sergileyebileceğini göstermektedir. Kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama yöntemleriyle H13 çeliğin yüzeyinde sırasıyla yaklaşık 59 µm ve 25 µm kalınlığında borlanmış bir tabaka elde edilmiştir. Borlanmış katman esas olarak FeB, Fe<sub>2</sub>B ve CrB’den oluşmaktadır. Kutu ve elektrokimyasal esaslı borlamadan sonra H13 çeliğin yüzey sertliği sırasıyla yaklaşık 1573 HV<sub>0,05</sub> ve 1805 HV<sub>0,05</sub>’ye ulaşmaktadır. İşlem görmemiş H13 çelik, % 3,5 NaCl çözeltisi altındaki aşınma hızının 25,6 x 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> Nm<sup>-1</sup> olduğu görülebilir, bu da kuru ortam koşullara kıyasla % 95 daha düşüktür. Kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik için % 3,5 NaCl çözeltisi altındaki aşınma hızı sırasıyla 8,38 x 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> Nm<sup>-1</sup> ve 1,66 x 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> Nm<sup>-1</sup> olup, bu da

kuru ortam koşullara kıyasla % 36 ve % 69 daha azdır. İşlem görmemiş H13 elik ile karşılaştırıldığında, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 eliğın aşınma hızı % 3,5 NaCl özeltisi koşullarında sırasıyla % 67 ve % 94 oranında azalmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** AISI H13 eliğı, Aşınma, Elektrokimyasal borlama, Kutu borlama, Korozyon, Tribokorozyon.



## ABSTRACT

### ENHANCING THE CORROSION, TRIBOLOGICAL AND TRIBOCORROSION PERFORMANCE OF AISI H13 STEEL BY THE PACK AND ELECTROCHEMICAL BASED BORIDING METHODS

AISI H13 is used in poly(vinyl chloride) (PVC) extrusion and injection mold and tool manufacturing due to its excellent high temperature performance along with high hardness, toughness and hardenability properties. One drawback associated with the high temperature processing of PVC-containing materials is the non-negligible concentration of free chloride species originating from the cleavage of C–Cl bonds, which may strongly accelerate corrosion and wear rates. Nevertheless, it is necessary to improve the wear and corrosion resistance of H13 steel, which is preferred in most hot forming applications such as forging and casting, at room and high temperatures. During hot forming applications, molds and tools are generally exposed to severe static/cyclic loads at high temperatures, and this can lead to erosion, thermal fatigue, and abrasive/adhesive wear in major areas of the mold and tool, which can significantly shorten the service life of the mold and tools. Additionally, molds and tools can suffer damage due to the combined effect of corrosion, temperature, and aggressive lubricants.

The weak corrosion and wear resistance of H13 steel pose challenges in terms of its tribological and tribocorrosion performance. To address this issue, pack and electrochemical-based boriding have been investigated as a potential solution. This study demonstrates that pack (using a mixture powder of 90% B<sub>4</sub>C and 10% KBF<sub>4</sub> at 950°C for 6 hours) and electrochemical (using a mixture of 90% Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> and 10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> electrolyte at 950°C for 15 min with an applied current density of 200 mA/cm<sup>2</sup>, followed by a 45-min soaking) based boriding can significantly enhance the surface hardness and self-lubrication performance of H13 steel, while maintaining impressive corrosion and tribocorrosion performance. The borided layer obtained through pack boriding is approximately 59 μm thick, and through electrochemical boriding, it is approximately 25 μm thick. The borided layer is primarily composed of FeB, Fe<sub>2</sub>B, and CrB. After pack and electrochemical boriding, the surface hardness of H13 steel reaches approximately 1573 HV<sub>0.05</sub> and 1805 HV<sub>0.05</sub>, respectively. The untreated H13 steel exhibits a wear rate of 25.6 × 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> Nm<sup>-1</sup> in a 3.5% NaCl solution, which is 95% lower than that under dry conditions. For pack and electrochemical borided H13 steel, the wear rates in a 3.5% NaCl solution are 8.38 × 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup> Nm<sup>-1</sup> and 1.66 × 10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>

$\text{Nm}^{-1}$ , respectively, representing a reduction of 36 % and 69 % compared to dry conditions. When compared to untreated H13 steel, the wear rates of pack and electrochemical borided H13 steel under 3.5% NaCl solution conditions are reduced by 67% and 94%, respectively.

**Keywords:** : AISI H13 Steel, Wear, Electrochemical boriding, Pack boriding, Corrosion, Tribocorrosion.



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

|                                                 |      |
|-------------------------------------------------|------|
| ÖN SÖZ.....                                     | i    |
| ÖZET.....                                       | ii   |
| ABSTRACT .....                                  | iv   |
| İÇİNDEKİLER.....                                | vii  |
| TABLolar LİSTESİ.....                           | vii  |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                           | viii |
| KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ .....           | xi   |
| 1. GİRİŞ.....                                   | 1    |
| 2. BORLAMA YÖNTEMİ .....                        | 3    |
| 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....                   | 7    |
| 4. MATERYAL VE YÖNTEM.....                      | 13   |
| 4.1. Deney Düzenegi ve Numune Hazırlanması..... | 13   |
| 4.2. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları .....  | 14   |
| 4.3. Sertlik Ölçümleri.....                     | 15   |
| 4.4. Aşınma Deneyleri.....                      | 15   |
| 4.5. Elektrolitik Korozyon Deneyleri .....      | 15   |
| 4.6. Tribokorozyon Deneyleri.....               | 16   |
| 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....         | 17   |
| 5.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları.....     | 17   |
| 5.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....               | 19   |
| 5.3. Aşınma Sonuçları.....                      | 20   |
| 5.4. Korozyon Sonuçları.....                    | 28   |
| 5.5. Tribokorozyon Sonuçları.....               | 33   |
| 6. SONUÇLAR.....                                | 40   |
| KAYNAKÇA.....                                   | 41   |

## TABLÖLAR LİSTESİ

|                                                                                                                | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Tablo 4.1.</b> İncelenen H13 çeliğinin kimyasal bileşimi .....                                              | 14    |
| <b>Tablo 4.2.</b> İncelenen numunelerin isimlendirilmesi .....                                                 | 14    |
| <b>Tablo 5.1.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Korozyon Verileri ..... | 32    |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                                                                                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 2.1.</b> Borlamada En Sık Kullanılan Malzemeler .....                                                                                                                                                          | <b>4</b>  |
| <b>Şekil 5.1.</b> (a) Kutu ve (b) Elektrokimyasal Esaslı Borlama Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Düşük ve Yüksek Büyütmeli OM Kesit Görüntüleri .....                                                                  | <b>18</b> |
| <b>Şekil 5.2.</b> İşlem Görmemiş H13, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlama Sonrası H13 Çeliği Üzerinde Oluşan Borür Tabakalarının XRD Paternleri .....                                                                | <b>19</b> |
| <b>Şekil 5.3.</b> Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğe Ait Enine Kesit Sertlik Profilleri .....                                                                                                          | <b>20</b> |
| <b>Şekil 5.4.</b> Yüke Bağlı Olarak (a) İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin ve (b) Kutu ve Elektrokimyasal Borlanmış H13 Çeliğin Aşınma Hacimleri.....                                                              | <b>21</b> |
| <b>Şekil 5.5.</b> (a) 3,75 N, (b) 7,5 N, (c) 15 N ve (d) 30 N Yük Altında İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin COF Eğrileri .....                                                                                    | <b>22</b> |
| <b>Şekil 5.6.</b> Yüke Bağlı Olarak İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin KSK Değişimi ...                                                                                                                            | <b>22</b> |
| <b>Şekil 5.7.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X50).....                                                              | <b>24</b> |
| <b>Şekil 5.8.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X200).....                                                             | <b>25</b> |
| <b>Şekil 5.9.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X1000).....                                                            | <b>26</b> |
| <b>Şekil 5.10.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüzeyinde Sürtünen Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Bilyenin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X50).....  | <b>27</b> |
| <b>Şekil 5.11.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüzeyinde Sürtünen Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Bilyenin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X100)..... | <b>28</b> |
| <b>Şekil 5.12.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin OCP Eğrileri .....                                                                                                              | <b>29</b> |

|                                                                                                                                                                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 5.13.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Tafel Eğrileri .....                                                                                                        | <b>30</b> |
| <b>Şekil 5.14.</b> Korozyon Deneyinden Sonra İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Düşük ve Yüksek Büyütme Korozyon Yüzey Görüntüleri .....                                          | <b>32</b> |
| <b>Şekil 5.15.</b> İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin (a) OCP ve (b) CoF'deki Değişim...                                                                                                                       | <b>34</b> |
| <b>Şekil 5.16.</b> Kuru Ortam ve % 3,5 NaCl Çözeltisi Koşullarında İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğe Karşı Sürtünen Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Bilyenin Aşınma Yüzeyleri..... | <b>35</b> |
| <b>Şekil 5.17.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Kuru Ortam ve % 3,5 NaCl Çözeltisi Koşullarında a) CoF Eğrileri b) KSK Değerleri.....                                       | <b>37</b> |
| <b>Şekil 5.18.</b> İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Kuru Ortam ve % 3,5 NaCl Çözeltisi Koşullarında Aşınma Hızları.....                                                         | <b>38</b> |
| <b>Şekil 5.19.</b> H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> 'ün Katmanlı Kristal Yapısının Şematik Gösterimi (Feng vd., 2023: 12)...                                                                                          | <b>38</b> |
| <b>Şekil 5.20.</b> Tribokorozyon Deneyinden Sonra İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Düşük ve Yüksek Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri.....                                        | <b>39</b> |

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**$\mu$**  : Sürtünme katsayısı  
 **$\mu\text{m}$**  : Mikrometre  
**cm** : Santimetre  
**nm** : Nanometre  
 **$\text{m}^2$**  : Metrekare  
**g** : Gram  
**dk.** : Dakika  
**ağ.** : Ağırlıkça  
**%** : Yüzde  
 **$^{\circ}\text{C}$**  : Celsius (Santigrat Derece)  
**N** : Newton  
**s** : Saniye  
 **$\text{Al}_2\text{O}_3$**  : Alümina  
**CoF** : Sürtünme Katsayısı  
 **$E_{\text{kor}}$**  : Korozyon Potansiyeli  
**EB** : Elektrokimyasal Borlama  
**EDS** : Enerji Dağılım Spektrometresi  
**EIS** : Elektrokimyasal Empadans Spektroskopisi  
**H13** : İşlem Görmemiş AISI H13 Çelik  
**HV** : Vickers sertlik  
 **$I_{\text{kor}}$**  : Korozyon Akım Yoğunluğu  
**GPa** : Gigapaskal  
**KB** : Kutu Borlama  
**KSK** : Kararlı Durum Sürtünme Katsayısı  
**MPa** : Megapaskal  
**OCP** : Açık Devre Potansiyeli  
**OM** : Optik Mikroskop  
**SEM** : Taramalı Elektron Mikroskobu  
**SMAT** : Yüzey Mekanik Aşındırma İşlemi  
**TPa** : Terapaskal  
**TRD** : Termo Reaktif Difüzyon

## 1. GİRİŞ

AISI H13 sıcak iş takım çeliği, yüksek sıcaklık difüzyon süreçleri (nitürleme ve borlama) için oldukça uygun bir malzemedir. Endüstri uygulamalarda krom-molibden AISI H13 çeliği, tüm sıcak iş takım çelikleri arasında en yaygın olarak kullanılanıdır. Nispeten daha az silisyum içeren diğer takım çelikleriyle karşılaştırıldığında H13 çeliğinin borlanmasının bazı dezavantajları olmasına rağmen, yüksek adhesif ve abrasif aşınma direnci sergilemesi gereken sıcak şekillendirme kalıpları gibi parçaların servis ömrünü uzatmak için bu çeliğe borlama yöntemi uygulanmaktadır. Kalıp ile deformasyona uğratılan metal arasında daha az adhesif aşınma olduğunda, kalıpların temizlenmesi için durma süresi de azalmaktadır (Krelling vd. 2015: 581).

Kutu, macun, plazma, akışkan yatak ve tuz banyosunda akımsız borlama gibi geleneksel borlama yöntemlerinde parçalar uzun süre yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadır. Ayrıca, bu geleneksel süreçler çok yavaştır ve enerji yoğunudur ve her bir işlem sırasında ve sonrasında büyük miktarda CO<sub>2</sub> emisyonu ve sıvı/katı atık oluşmaktadır. Bunun yanı sıra bu yöntemlerle yüzeyde yoğun ve kalın bir borür tabakası oluşturmak güçleşmektedir. Örneğin, başarılı geleneksel kutu borlama süreci için birkaç adım gerekir ve düşük karbonlu bir çeliğin yüzeyinde 40-50 µm kalınlığında bir borür tabakası oluşturmak için 6 ile 8 saatten fazla süreye ihtiyaç vardır. Operasyonel zorluklara, yüksek maliyet ve enerji ile karbon yoğunluklarına rağmen, endüstriyel parçaların kutu borlanması günümüze kadar yaygın olarak tercih edilmektedir. Kutu borlamada yaygın olarak kullanılan bor kaynağı veya tozlar arasında bor karbür (B<sub>4</sub>C), ferrobor ve amorf bor bulunmaktadır (Sista vd. 2011:1583). Toz karışımı aynı zamanda silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tozları gibi çeşitli seyrelticilerin yanı sıra sodyum fluoroborat (NaBF<sub>4</sub>), potasyum fluoroborat (KBF<sub>4</sub>), amonyum fluoroborat [(NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>BF<sub>4</sub>], amonyum klorür (NH<sub>4</sub>Cl), sodyum karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) ve baryum florür (BaF<sub>2</sub>) gibi birçok katalizör veya bor aktivatörü içermektedir (Rabeeh, 2015: 1499). Ayrıca, geleneksel kutu borlamada parçaları toz karışımına yerleştirmek ve ardından borlama işleminden sonra parçaları güvenli bir şekilde borlama tozlarından temizlemek için çok zaman ve çaba gerektirir. Temizlenen parçalar, 900 °C'nin üzerinde ısıtılır ve çeliğin kütleli sertliğini artırmak amacıyla su verme ve temperleme ısı işlemleri uygulanır (Nair vd. 2022: 9794). Bu ilave adımlar elektrokimyasal esaslı borlama yönteminin ayrılmaz bir parçası olarak borlama işleminden hemen sonra kesintisiz bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Geleneksel kutu borlama yönteminde işgücü yoğunudur. Başlangıçta iş parçalarını toz karışımına yerleştirmek, işyeri için ciddi çevresel sağlık ve güvenlik endişelerine neden

olmaktadır. Ayrıca, borlamadan sonra borlanmış karmaşık şekilli parçaların yüzeyinden yapışmış veya kaynaşmış tozların çıkarılması çok zordur. Yapışan tozları yüzeyden çıkarmak için kum püskürtme ve/veya taşlama gereklidir. Bu adımlarla bile yüzey genellikle pürüzlü olup, yüksek hassasiyetli uygulamalar için istenmeyen bir durumdur. Kutu borlamada uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalma nedeniyle nihai ürünlerde çarpılma ve geniş mikroçatlak oluşumuna yol açabilir. Geleneksel borlama ve diğer enerji yoğun yüzey işlemleri ile karşılaştırıldığında, elektrokimyasal esaslı borlama çevre dostu ve verimli bir teknolojidir. Herhangi bir gaz emisyonu üretmez, katı ve/veya sıvı atıklar da oluşmaz. Elektrokimyasal esaslı borlamada kullanılan ana madde ucuz, güvenli ve bol miktarda bulunan doğal boraks mineralidir (Kartal Sireli vd. 2023: 9504).

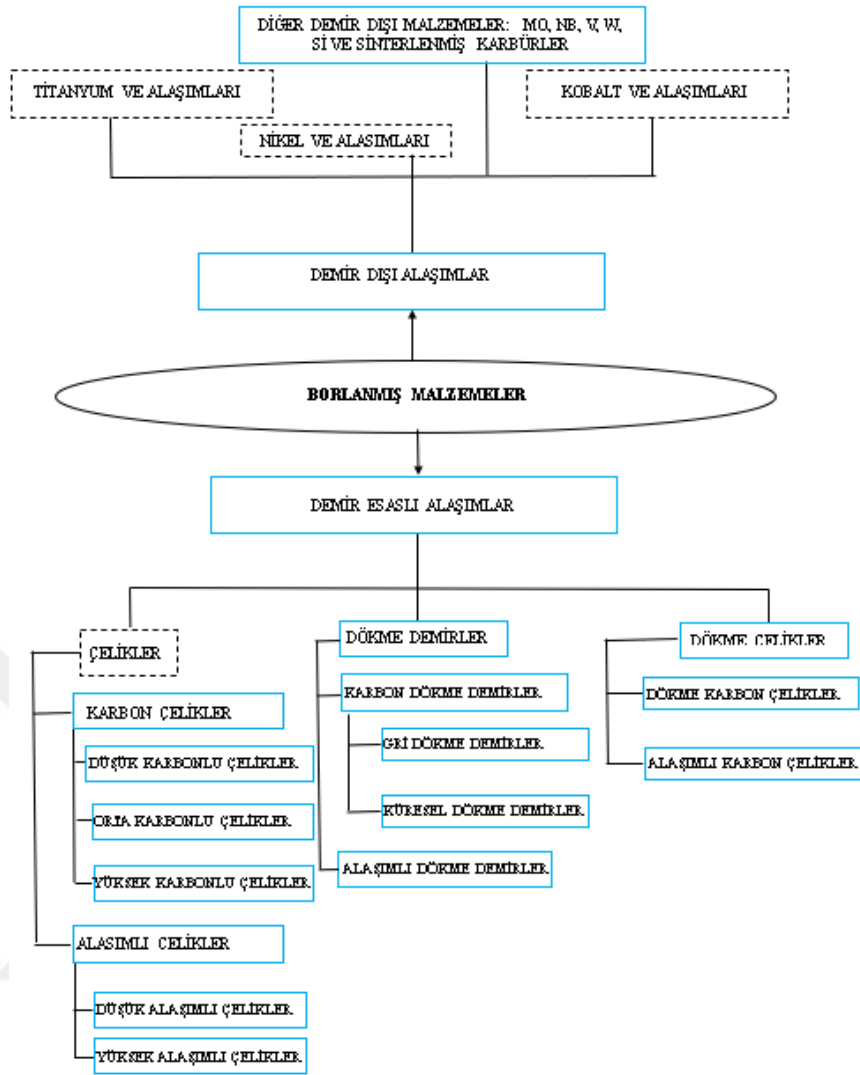
Elektrokimyasal esaslı borlamanın ürettiği borür tabakaları sadece çok kalın olmakla kalmaz, aynı zamanda yapısal olarak yoğun ve homojendir. Borür tabakaları mükemmel mekanik sertliğe ve çok zorlu çalışma koşulları altında bile aşınma ve korozyon direncine sahiptir. Karşılaştırma yapmak gerekirse, tipik bir nitrüleme ve/veya semantasyon yüzeyinin sertliği 6,5 ila 11 GPa arasında değişmektedir (Rabeeh, 2015: 1500). Kutu borlama, semantasyon ve nitrüleme gibi günümüzün uzun ısı bekletme teknolojilerine kıyasla elektrokimyasal esaslı borlama yüksek üretkenlik, düşük maliyet ve azalmış gaz emisyonları gibi birçok avantaj sunmaktadır.

Günümüzde ekonomik ve çevresel açıdan bakıldığında, hızlı, ucuz, temiz ve enerji açısından verimli yeni yüzey kaplama teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, kalıp sektöründe kullanılan AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, kutu ve elektrokimyasal hücreye dayalı borlama yöntemleri kullanılarak; yüksek aşınma ve korozyon direncine, yüksek sertliğe, kendinden yağlama, üstün tribokorozyon performans özelliklerine sahip, düşük maliyetli bir süreç ile kalın, sert ve homojen borür tabakanın oluşturulması amaçlanmaktadır.

## 2. BORLAMA YÖNTEMİ

Borlama yöntemi, yüksek yüzey sertliği, aşınma direnci, oksidasyon ve korozyon direnci açısından tercih edilmektedir. Borlanmış yüzeyler 1000 °C'ye kadar sertliklerini ve aşınma özelliklerini koruyabilmektedirler. Borlanmış yüzeyin en önemli özelliklerinden biri de, ilave ısı işleminden sonra bile sertliğini koruyabilmesidir. Elde edilebilen tüm bu üstün özelliklere rağmen, borlama yöntemi çeliklere uygulanan karbürleme, nitrürleme ve indüksiyonla sertleştirme gibi sertleştirme yöntemlerine nazaran daha az kullanılmaktadır. Hâlbuki ülkemiz, bor rezervi bakımından zengin bir ülke olup, bor kullanımının yaygınlaştırılması ve özellikle metal sanayinde borlama işlemlerinin getireceği üstün özelliklerinden yararlanılması gerekmektedir. Borür tabakalarının üretilmesinde en sık kullanılan malzemeler, demir ve demir dışı alaşımlar dahil olmak üzere Şekil 2.1'de belirtilmiştir. Mevcut borlama eğilimleri dikkate alındığında, en önemli malzemeler kesikli çizgili kutulara yerleştirilmiştir. Bu malzemelerin borlama süreçleri, aşağıda daha ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

Demir alaşımları, mühendislik alanında yaygın olarak kullanıldığından, borlama yöntemine tabi tutulan ilk malzemeler haline geldi. Çelikler, dökme demir ve dökme çelikler başarıyla borlanmıştır. Ancak, borlamanın etkileri, borür tabakasının kalitesi, mekanik özellikleri, ekonomik maliyet-etkinliği ve sürecin çevre üzerindeki etkisi göz önüne alınarak değerlendirilmektedir. Bu değerlendirme, kullanılan borlama yöntemine büyük ölçüde bağlıdır. Borür tabakaları, düşük karbonlu (Kartal vd., 2011), orta karbonlu (Kusmanov vd., 2016) ve yüksek karbonlu (He vd., 2015) çeliklerin yüzeyinde etkili bir şekilde oluşturulmuştur. Düşük alaşımlı (Sabuz vd., 2023) ve yüksek alaşımlı çeliklerde (Murathan vd., 2022) borlanmıştır. Gri dökme demir (Charmati vd., 2023), küresel dökme demir (Zhang vd., 2022), düşük alaşımlı veya yüksek alaşımlı dökme demirin (Toktaş ve Korkmaz, 2023) borlanmasıyla ilgili çalışmalar da rapor edilmiştir. Literatür verilerinde dökme çeliklerin borlanmasıyla ilgili örnekleri bulmak zor olsa da, bu malzemeler, borür tabakası oluşturmaının mümkün olması nedeniyle Şekil 2.1'de verilmiştir.



**Şekil 2.1.** Borlamada En Sık Kullanılan Malzemeler.

Fe-B denge diyagramına göre, bor elementinin demir kristal kafes yapısına difüzyonu ile demir esaslı malzemenin yüzeyinde tek veya çift fazlı bir tabaka oluşumu gözlemlenebilmektedir. Bor elementince zengin faz oluşumu yüzeyden başlarken, yüzeyden bor konsantrasyonunun azalması nedeniyle demirce zengin faz altlık malzeme ile borca zengin faz arasında yer almaktadır (Kartal vd., 2010; Kartal vd., 2011). FeB içeren bölge genellikle yüzeye yakın oluşmaktadır. Fe<sub>2</sub>B fazı, FeB fazının altında ortaya çıkmaktadır. Fe<sub>2</sub>B katmanının oluşturulması, çift katman (Fe<sub>2</sub>B + FeB) oluşumundan daha fazla tercih edilmektedir. Ağırlıkça % 16,23 B içeren FeB (ortorombik) fazı, ağırlıkça % 8,83 B içeren Fe<sub>2</sub>B (tetragonal) fazına göre daha kırılgandır ve ayrıca bu iki fazın termal genleşme katsayıları birbirinden farklıdır. Bu durum tabakaların ara yüzeyinde çatlak oluşumuna yol açmaktadır (Türkmen ve Yalamaç, 2018). Sonuç olarak, borür tabakasındaki FeB fazının varlığı, yüksek dış yüklere maruz kaldığında kırılmasına neden olan daha kırılgan yapısı

nedeniyle istenmeyen bir durumdur (Türkmen vd., 2019). Pomelnikova vd. (2011), çeliklerin sıvı borlanması sırasında rombik  $Fe_3B$  ve hegzagonal  $FeB_2$  borür yapının ortaya çıkabileceğini bildirmiştir. Bor ile lazer alaşımlandırma (Kulka vd., 2013) ve difüzyon esaslı borlanmış çeliklerin lazerle yeniden eritilmesi (Kulka ve Pertek 2003), borür ( $FeB$ ,  $Fe_2B$  ve  $Fe_3B$ ) ve martenzitten oluşan ötektik karışımın oluşmasına neden olmuştur. Yeniden eritme sırasında gerçekleşen bor'un segregasyonu nedeniyle, yeniden eritme bölgesinin bazı bölgelerinde denge dışı demirce zengin ortorombik  $Fe_3B$  fazı oluşmaktadır.

Mühendislik alanında yoğun gelişme, demir esaslı alaşımların dışında diğer malzemelerin kullanımına olan artan ihtiyacın da bir nedenidir. Bu nedenle, demir esaslı alaşımlarına kıyasla yüksek korozyon direnci, yüksek ısı direnci veya düşük yoğunluk gibi avantajlı özelliklere sahip olan demir dışı alaşımlar da ilgi çekmektedir. Ancak, bu alaşımlar aynı zamanda zorlu servis koşullarında yüksek sertlik ve aşınma direncine de sahip olmalıdır. Borlama yöntemi, korozyon direncinden ödün vermeden demir dışı alaşımlara iyileşmiş tribolojik ve/veya tribokorozyon özellikler sağlayabilen yüzey geliştirme yöntemlerinden biri haline geldi. Borlanmaya en çok tabi tutulan demir dışı alaşımlar sırasıyla titanyum ve alaşımları (Rahmatian vd., 2023), nikel ve alaşımları (Campos-Silva vd., 2019) ve kobalt ve alaşımları (Delgado-Brito vd., 2019)'dır. Ayrıca, literatür verileri, molibden (Akca ve Çalık, 2017), niyobyum (Mariani vd., 2017), vanadyum (Tarakci vd., 2010) ve tungsten (Usta vd., 2005) gibi saf metaller veya sinterlenmiş karbürler üzerinde oluşturulan borürlü yapıları rapor etti.

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tavakoli ve Khoie (2010), üç özel çeliğin korozyon direncini, termo reaktif difüzyon (TRD) ile iyileştirdi. Hazırlanan örneklerin kaplama işlemi, boraks, borik asit ve ferrosilisyumun karıştırıldığı bir grafit pota banyosunda 1220 K'de 6 saat boyunca gerçekleştirildi. Borlanmış örneklerin korozyon direnci, Tafel polarizasyonu ve elektrokimyasal empadans spektroskopisi (EIS) kullanılarak değerlendirildi. Sonuçlar, borlama işleminin çeliğin korozyon direncini artırabileceğini gösterdi.

Sista vd. (2011), AISI D2 takım çeliğinin yüzeyinde kalın ve sert borür tabakaları elde etmek için elektrokimyasal borlama yönteminin uygunluğunu ve potansiyel faydalarını araştırdı. AISI D2, yüksek krom içeriğine sahip havayla sertleşen bir takım çeliğidir ve özellikle yüksek sıcaklıklarda aşınma ve oksidasyona karşı iyi bir koruma sağlar. Geleneksel borlama yöntemleriyle AISI D2 çeliğinin yüzeyinde yoğun ve üniform kalınlıkta borür tabakalarını elde etmek zor olduğu için araştırmacılar erimiş boraks elektrolit içinde 850, 900, 950 ve 1000 °C'de 15 dakika ile 1 saat arasında değişen süreler boyunca elektrokimyasal borlama yöntemini kullanarak çok hızlı ve kalın bir borür tabakası oluşturma olasılığını gösterdi. 950 °C'de yaklaşık bir saat içinde 60 µm kalınlığında bir tabaka üretildi ki bu, geleneksel kutu borlama durumunda 45 µm kalınlığında tabakaların oluşturulması için 8 ila 10 saat süreye ihtiyaç vardır. Yüzeyde oluşan borür tabakaları, kutu borlama ile karşılaştırıldığında çok daha yoğun ve homojendir. Tabakalar çoğunlukla demir borür fazlarından (FeB ve Fe<sub>2</sub>B) oluşmaktadır, ancak aynı zamanda CrB fazı da içermektedir. Borür tabakası tipik olarak 1714±200 HV sertlik değerine sahip olup, sertleştirilmiş D2 çelikten çok daha serttir.

Telasang vd. (2015), AISI H13 takım çeliğinin aşınma ve korozyon direncini artırmak için lazer yüzey mühendisliğinin potansiyelini vurguladı. Lazer yüzey sertleştirilmiş bölge martenzit çıtalrı arasında dağılmış ince karışık karbürlerden oluşan bir mikroyapı sergilerken, lazerle yüzeyi eritilen mikroyapı ise kalıntı östenit, martenzit, dönüşmüş ledeburit ve dendritik bölgede çökelmiş ince karbürlerden oluşmaktadır. Lazer işlemi, yüzeyin sertliğini önemli ölçüde artırdı; en büyük gelişme, lazer yüzey eritme işlemine tabi tutulan numunelerde gözlemlendi. Aşınma direnci testi, lazer yüzey mühendisliğiyle üretilen numunelerde, alındığı taban malzemeye kıyasla önemli bir gelişme gösterdi. Ayrıca lazer yüzey mühendisliğiyle üretilen numunelerde korozyon direncinde önemli bir iyileşme elde edildi; en önemli gelişme, belirli lazer enerjisi yoğunluğu seviyeleriyle işlem gören numunelerde gözlemlendi.

Krelling vd. (2015), farklı borlama ajanları ile borlanmış AISI H13 çeliğinin tribolojik davranışını incelediler. Su verilmiş ve temperlenmiş numunelerle karşılaştırıldığında borlanmış numunelerin aşınma direncinde büyük bir gelişme gözlemlenmiştir. Ekabor 1-V2 ticari toz (ağırlıkça % 5 B<sub>4</sub>C, % 5 KBF<sub>4</sub> ve % 90 SiC) ile borlanan numunelerin tabaka kalınlığı, karışım tozla (ağırlıkça % 73,26 boraks, % 24,06 SiC, % 1,22 NH<sub>4</sub>Cl ve % 1,46 NaCl) borlanan numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Abrasif mekanizması tüm koşullarda tespit edildi ve su verme & temperleme işlemine tabi tutulan AISI H13 çeliğinde daha büyük ölçüde gözlemlendi. AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin borlanmasından sonra adhesif aşınma azalmaktadır ve borür katmanlarının dökülmesi, abrasif madde gibi hareket ederek aşınma direncini azaltan aşınma ürünlerinin oluşmasına yol açmaktadır.

Yang vd. (2016), yüzey mekanik aşındırma işlemi (SMAT) kullanarak AISI H13 çelik üzerinde nano yapıya sahip bir yüzey tabakası oluşturdu. SMAT örneklerinin borlama davranışları, iri taneli karşılaştırma örnekleriyle sistematik olarak incelendi. 600 °C'de 2 saat boyunca kutu borlama işlemi uygulanan SMAT örneğinin bor difüzyon derinliği yaklaşık 8 µm olup, iri taneli örneğinkinden çok daha derindir. SMAT örneğinde daha kalın bir borür tabakası, 600 °C'de başlayarak daha yüksek bir sıcaklıkta dubleks yüzey işlemiyle elde edildi. Borür tabakası, Fe<sub>2</sub>B'nin tek fazından oluşmaktadır ve büyümesi tercih edilen bir yönelim sergilemiştir. SMAT örneğindeki bor difüzyonu için aktivasyon enerjisi 140,3 kJ/mol iken, iri taneli karşılaştırma örneğindeki bu değer 209.4 kJ/mol olup, SMAT örneğinde borlama kinetiğinin, dubleks yüzey işlemi ile önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir. Ayrıca, termal yorulma testi, yüksek sıcaklıklarda mükemmel oksidasyon direnci ve mekanik dayanıklılığa sahip borür tabakasının termal yorulma çatlaklarının başlangıcını etkili bir şekilde geciktirebileceğini ve bunların yayılmasını engelleyebileceğini göstermektedir. Bu nedenle, dubleks yüzey işlemi uygulanan H13 çeliğin termal yorulma özelliği önemli ölçüde artırılabilir.

Shinde ve Dhokey (2017), AISI H13 sıcak iş takım çelikleri üzerinde sıfır altı işlemin karbür yoğunluğu ile yüzey pürüzlülüğü ve kuru kayma aşınması arasındaki ilişkiyi inceledi. AISI H13 numunelerine 1020°C'de yağda soğutmayı, 500°C'de çift temperleme işlemi ve -185°C'de 8 ila 32 saat arasında farklı sıfır altı bekletme süreleri uygulandı. Pim üzerinde diskte kuru kayma aşınması davranışı, 40 N yük altında, 3 m/s hızda, 6000 m kayma mesafesi için incelenmiştir. Karbür yoğunluğu ile yüzey pürüzlülüğü arasında bir ilişki kurulmuştur. AISI H13 çeliği için sıfır altı işlem süresini optimize etmeyi ve sıfır altı işlem gören numunelerde karbür yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğünü ve dolayısıyla aşınma hızını

etkilediği tespit edilmiştir. AISI H13 sıcak iş takım çeliği hafif ve yarı kararlı aşınma davranışı sergilemektedir. Hafif aşınmada, 16 saat sıfır altı işlem altında karbürlerin çekirdeklenmesinin baskın mekanizmasına atfedilirken, yarı kararlı aşınmada karbürlerin büyümesi hakimdir. Bu nedenle çekirdeklenme ve büyüme, karbür çökmesinin birbiriyle yarışan mekanizmalarıdır.

Elmkhah vd. (2018), TiAlN çok katmanlı kaplama uygulayarak H13 çeliğinin metal şekillendirme uygulamaları için yüzey özelliklerini iyileştirmeyi amaçladı. Kaplamalar, 10 kHz frekansı, 470 °C kaplama sıcaklığı ve %33 görev döngüsü dahil olmak üzere sabit çalışma koşulları kullanılarak pulsed DC plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PACVD) yöntemiyle uygulanmıştır. Sonuçlar, üç katmanlı kaplamaların (TiN/TiAlN/Ti<sub>(2)</sub>N), tek katmanlı kaplamalardan (TiN veya TiAlN) daha yüksek yapışma ve aşınma direncine sahip olduğunu göstermiştir. TiN kaplamanın yüzey morfolojisi, tane boyutu ve sürtünme katsayısı, TiAlN kaplamadan daha düz, daha küçük ve daha düşüktür. Bu nedenle, Ti<sub>(2)</sub>N kaplamanın üst kaplama olarak kullanılmasının, nano yapıdaki TiAlN kaplamalarının tribolojik ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için uygun bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Miyamoto ve Abraha (2019), AISI H13 takım çeliği üzerindeki plazma nitrürleme süresinin tribolojik özelliklere etkisini incelediler. Geleneksel plazma nitrürleme işleminde numune nötr azot türleri kullanılmadan önce öncelikle azot iyonlarıyla işleme tabi tutulur. Azot iyonlarını kontrol etmek için yeni bir yöntem uygulanmış ve AISI H13 takım çeliğinin nitrürlenmesi, nötr azot türleri ve azot iyonları kullanılarak elektron ışını ile uyarılmış plazmada gerçekleştirildi. Farklı işlem süresinin, sert ancak kırılgan bir bileşik tabakanın oluşumu üzerindeki etkisi ve ardından malzemenin yüzeyindeki tribolojik değişim incelenmiştir. Sonuçlar, 6 saat boyunca nötr azot türleri kullanılarak nitrürlenmiş takım çeliğinin, difüzyona dayalı bir nitrürlenmiş tabaka (60 µm'ye kadar) oluşturduğunu göstermektedir. Bileşik katmanın oluşturulduğu numunenin yüzey pürüzlülüğü yüksektir. Ayrıca, işlem görmemiş AISI H13 çelik ile karşılaştırıldığında ( $2,9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ), iyon ve nötr nitrürlenmiş çeliğin aşınma hızları sırasıyla  $2,4\text{--}3,4 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ 'dir. İyonlar kullanılarak nitrürlenme, takım çeliği yüzeyinde pürüzlü, kırılgan bir bileşik tabaka oluşturmuştur. Bileşik tabakaya sahip numuneler, bileşik bir tabakaya sahip olmayanlara göre daha düşük bir sürtünme katsayısına sahiptir. Genel olarak, nötr nitrürleme işleminin takım çeliğinin tribolojik performansını iyileştirmede etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Günen vd. (2020), borlanmış AISI H13 sıcak iş takım çeliğinin korozyon özelliklerini araştırdı. Sıcak iş takım çeliği 2, 4 ve 6 saat boyunca çeşitli sıcaklıklarda (800, 900 ve

1000°C) kutu borlamaya (ağırlıkça % 95 B<sub>4</sub>C+% 5 NaBF<sub>4</sub>) maruz bırakılmıştır. Elde edilen borür katmanları çeşitli testler kullanılarak karakterize edildi. Borür katmanları 800°C’de tek fazlı bir yapı (Fe<sub>2</sub>B), daha yüksek sıcaklıklarda (900 ve 1000°C) çift fazlı bir yapı (FeB + Fe<sub>2</sub>B) gösterdi. Borür katmanları kompakt ve çatlaksızdır. Borlanmış AISI H13’ün işlem görmemiş AISI H13 ve martensitik AISI 431 çeliğine göre sırasıyla 33,5 kat ve 2,4 kat daha yüksek korozyon direnci göstermesi, korozyon sırasında B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumuna atfedilmiştir.

Fernandez-Valdes vd. (2021 a), sürekli ve kesintili kutu borlanmış AISI 316L çelikler üzerinde tekrarlı temas yükü altında sayısal-deneysel bir çalışma gerçekleştirdi. Kesintili borlama işlemiyle çoğunlukla Fe<sub>2</sub>B fazından oluşan tek katmanlı yapı 6,09 ±0,31 µm kalınlığında ve 22,3 ±1.4 GPa yüzey sertliğindedir. Bunun karşısında, sürekli borlama işlemiyle FeB-Fe<sub>2</sub>B fazlarından oluşan iki katmanlı yapının toplam kalınlığı 13,08 ±0,39 µm ve yüzey sertliği ise 26.3 ±2.1 GPa’dır. Yapışma testleri, tek katmanlı yapının daha iyi yapışma gösterdiğini ortaya koydu. Borlanmış çelik yüzeyine bir bilye yüklenerek tekrarlı temas testleri gerçekleştirildi. Borlanmış çelik yüzeyine uygulanan kritik yük (monoton yük) nedeniyle dairesel çatlaklar gözlemlendi. Kritik altı yükler, iki katmanlı yapı içeren çelikte kohezif hasara neden olurken, tek katmanın düşük kritik altı yüklerde hasar görmediği görüldü. Bunun aksine, her iki işlem koşulunda da yüksek kritik altı yüklerde dairesel çatlaklar gözlemlendi. İki katmanlı yapıda FeB fazının yüksek yüzdesi daha ciddi hasara neden oldu. Tek katmanlı borür tabakasının daha ince olması ve tek katman sistemindeki basma gerilmelerinin varlığı, temas yükü altında maksimum asal gerilmenin iki katman sistemine kıyasla bir azalmaya neden oldu. Bu nedenle, kesintili borlama sistemi, sürekli borlama sistemine göre tekrarlı temas yükleri altında daha iyi mekanik direnç gösterdi.

Fernandez-Valdes vd. (2021 b), AISI 316L paslanmaz çelik yüzeyinde oluşturulan FeB-Fe<sub>2</sub>B fazlarından oluşan iki katmanlı yapının tribolojik performansını disk üzerinde pin testini kullanarak değerlendirdiler. Aşınma testleri, 5 ve 10 N olmak üzere iki farklı yük altında ve sabit bir kayma mesafesi altında dairesel bir yol boyunca gerçekleştirildi. Aşınma katsayısı, Archard’ın modeli kullanılarak elde edildi. Sonuçlar, daha ince kalınlığa sahip FeB-Fe<sub>2</sub>B sisteminin daha şiddetli aşınma gösterdi. Disk üzerinde pin testinin başlangıcında ve sonunda temas bölgesindeki asal gerilme ve maksimum kayma gerilmesi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak değerlendirildi. Disk üzerinde pin testinin sayısal modelinde yüzey aşınması tarafından oluşturulan ağ bozulmasını düzeltmek için ağ doğrusal olmayan uyarlanabilirliği kullanıldı. Disk üzerinde pin testi ilerledikçe ve aşınma ürünleri uzaklaştıkça,

temas bölgesinde düzensiz bir temas basıncına neden oldu, bu da borür tabakalarının küçük alanlarında yüksek gerilme oluşturdu.

Riccardo vd. (2021), AISI H11 ve AISI H13 takım çeliklerinin dört farklı sıcaklıktaki (25, 200, 350 ve 550°C) izotermal düşük çevrim yorulma direncini araştırdı. Çeliklerin karakterizasyonu çekme ve sürünme testlerini içermektedir. 350 °C'ye kadar olan yorulma testleri, benzer gerilme-çevrim kırılma eğrileri ile sonuçlanırken, 550°C'de gerçekleştirilen testler önemli ölçüde farklıdır. Yorulmanın, sürünmenin ve oksidasyonun katkısını ayırt etmek için derin bir analiz yapıldı. 550°C'de yorulma ve oksidasyonun ana tahrik mekanizmaları olduğu bulunmuştur. Kırılma yüzeyleri hem stereo hem de SEM ile gözlemlendi. Özellikle yüksek sıcaklıkta yapılan testlerde çoklu çatlak çekirdeklenmesi gözlemlendi. Alüminyum alaşımının basınçlı döküme yönelik çeliklerin servis davranışı, maruz kaldıkları termal döngüden büyük ölçüde etkilenmektedir. Termal yorulma direncinin araştırılması, genellikle belirli termal döngüler oluşturmak için geliştirilen özel makineler tarafından gerçekleştirilen karmaşık deneysel testleri gerektirir.

Nair vd. (2022), eş zamanlı östenitlenme ve çok yönlü borlama işlemlerinin AISI H13 sıcak takım çeliğinin yüzey ve yüzey altına etkisini incelediler. AISI H13, kalıp, cam ve plastik imalatı gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için popüler bir malzemedir. Nitrürleme, karbürleme ve borlama gibi yüzey sertleştirme işlemleri, takım çeliği yüzeylerinin ömrünü uzatmak için kullanılır. Bu çalışmada, borlama işlemi, H13 takım çeliği kalıplarının ve tabana malzemenin yüzeyini geliştirmek için geleneksel ısıtma işlemleriyle birleştirilmiştir. Sonuçlar, kalıp çıkışlarındaki hızlı soğuma hızları, kalıbın orta kısımlarının büzülmesi ve sert katmanlar ile taban malzeme arasındaki termal uyumsuzlukların çatlak oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Borür katmanların altında silisyum'un birikimi nedeniyle düşük sertlikte karakterize edilen ferrit çukurlarının oluşumu gözlemlenmiştir. Borlama, çeşitli demir, demir dışı ve sermet malzemeler için kullanılan, mükemmel aşınma direnci, ısı/korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci sunan bir termokimyasal işlemdir.

Kartal Sireli vd. (2023), cam kesme makası olarak kullanılan AISI T1 çeliğinin yüzey performansını artırmaya odaklandılar ve bu amaçla hızlı, düşük maliyetli ve çevre dostu bir bor difüzyon tekniği olan katodik indirgeme ve termal difüzyon esaslı borlama (CRTD-Bor) ile yüzeylerini değiştirdiler. Kinetik hesaplamalar, AISI T1 çeliğinde borür büyümesinin aktivasyon enerjisini 179 kJ/mol olarak ortaya koymuştur. XRD analizleri, önceden oluşmuş karbürlerin yanı sıra demir borürlerinin varlığını göstermiş ve EDS analizleri ile desteklenen kesit SEM incelemeleri bu çoklu borlu ve karbür yapılarını doğrulamıştır. Faz

homojenleştirme (PH) aşaması, kırılğan FeB tabakasını ortadan kaldırmak için CRTD-Bor'a entegre edilmiştir. Optimizasyonların ardından, 60 dakikalık işlem (900°C'de 15 dakika CRTD-Bor ve 45 dakika PH) sonrasında çelik taban malzemeye iyi yapışma (HF1) ile 1700±200 HV sertlik sergileyen 24 µm kalınlığında bir Fe<sub>2</sub>B tabakanın büyütülmesi sağlandı. İdealize edilmiş borlama prosedürü, T1 çeliklerinin oksidasyon direncini de on kat artırmıştır.

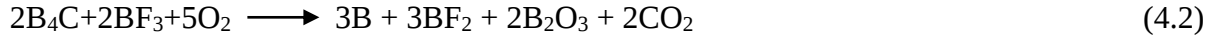


## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Deney Düzenegi ve Numune Hazırlanması

Bu çalışmada, AISI H13 sıcak iş takım çeliği, yüzey işlemi için altlık malzeme olarak seçildi. H13, yüksek sertlik, tokluk ve sertleşebilme özellikleri ile birlikte mükemmel yüksek sıcaklık performansına sahip olması nedeniyle kalıp ve takım imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır (Nair vd., 2022: 9792). Çapları 30 mm ve kalınlıkları 3 mm olan H13 numuneler hazırlandı; Tablo 4.1’de, H13’ün nominal kimyasal bileşimi verilmiştir. Bu malzemelere borlama işlemleri öncesinde standart metalografik işlemler uygulanmış ve nihai parlatma işlemi 1  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  ile yapılmıştır. Daha sonra bu hazırlanan deney numuneleri vibrasyonlu alkol içinde tutularak yüzey kirliliklerinden arındırılmıştır. Kalıp ve takım imalatında kullanılan H13 çeliğinin özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama yöntemleri kullanıldı. Kutu borlama yöntemi, Si içermeyen borlama karışımı (bor kaynağı olarak % 90  $\text{B}_4\text{C}$  + aktivatör olarak % 10  $\text{KBF}_4$ ) içinde gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri 304 kalite paslanmaz çelik kutu içinde bulunan borlama toz karışımının içine yerleştirilmiş ve kutunun ağzı kapatıldıktan sonra normal atmosfer koşullarında Protherm marka fırın içinde 950 °C’de 6 saat süre ile tutulmuştur. Elektroliz deneyleri ise elektrik direnç fırınında anot olarak bağlanmış olan grafit pota içerisinde elektrolit olarak çevresel ve geri dönüşüm olanakları dikkate alınarak optimize edilmiş % 90 boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) ve % 10 sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) bileşimi kullanılmış ve H13 çeliği de katot olarak polarize edilmiştir. Yüzeyde  $\text{FeB}$  +  $\text{Fe}_2\text{B}$  katmanlı borür tabakasını elde etmek için elektrokimyasal borlama işlemi 15 dakika, 200  $\text{mA}/\text{cm}^2$  akım yoğunluğunda, 950 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Daha sonra akım kesilerek (katot-anot polarizasyonu durdurulması) ve borlanmış AISI H13 çeliğe 950 °C sıcaklıktaki aynı elektrolitte 45 dakika bekletilmiştir. Bu çalışmada incelenen numunelerin isimlendirilmesi Tablo 4.2’de verilmiştir. H13, işlem görmemiş AISI H13 çeliktir. EB, AISI H13 çeliği % 90  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ve % 10  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  elektrolit içerisinde 950 °C sıcaklıkta 15 dakika 200  $\text{mA}/\text{cm}^2$  akım yoğunluğunda elektrokimyasal borlama ve 45 dakika bekletme koşunu temsil eder. KB ise AISI H13 çeliği % 90  $\text{B}_4\text{C}$  ve % 10  $\text{KBF}_4$  toz karışımı içerisinde 950 °C’de 6 saat süre ile kutu borlamayı ifade eder.

Kutu borlama yönteminde tercih edilen  $\text{B}_4\text{C}$  ve  $\text{KBF}_4$  toz karışımının yüksek sıcaklıkta borlanması sırasında aktif atomik bor (B) ve Fe’nin detaylı kimyasal reaksiyonları aşağıda verilmiştir (Zheng vd., 2023: 5):



Yukarıdaki reaksiyonlar, reaktif bor atomları oluşturmak üzere doğrudan ayrışabilen  $\text{BF}_2$ 'yi oluşturur. Ortaya çıkan  $\text{B}_2\text{O}_3$ , B'yi oluşmak üzere ayrışabilir:



Reaktif B, daha sonra H13 çelik üzerine adsorbe olur ve Fe ile aşağıdaki gibi reaksiyona girer:



**Tablo 4.1.** İncelenen H13 çeliğinin kimyasal bileşimi.

| Kimyasal Bileşim (% Ağırlık) |      |      |     |      |      |
|------------------------------|------|------|-----|------|------|
| C                            | Si   | Mn   | Cr  | Mo   | V    |
| 0,39                         | 1,00 | 0,40 | 5,1 | 1,30 | 1,00 |

**Tablo 4.2.** İncelenen numunelerin isimlendirilmesi.

| Kod | Tanım                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H13 | İşlem görmemiş AISI H13 çelik                                                                                                                                                                                                    |
| EB  | AISI H13 çeliği % 90 $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ve % 10 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ elektrolit içerisinde 950 °C sıcaklıkta 15 dakika 200 mA/cm <sup>2</sup> akım yoğunluğunda elektrokimyasal borlama ve 45 dakika bekletme |
| KB  | AISI H13 çeliği % 90 $\text{B}_4\text{C}$ ve % 10 $\text{KBF}_4$ toz karışımı içerisinde 950 °C'de 6 saat süre ile kutu borlama                                                                                                  |

## 4.2. Yapısal Karakterizasyon Çalışmaları

Mikroyapı incelemeleri için kaplamanın kesiti standart metalografik yöntemlerle zımparalanarak hazırlanan numuneler 1 µm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  solüsyon kullanılarak nihai parlatma işlemleri yapılmıştır. Kaplamaya ait mikroyapısal görünümeler Nikon marka Eclipse LV150 model optik metal mikroskobundan (OM) elde edilmiştir. Borür tabaka kalınlığı, kesin ölçüm

için OM ile belirlendi. H13 eliğin yüzeyindeki fazların varlığı, Panalytical/Empyrean kullanılarak yapılan X-ışını difraksiyon (XRD) analizleri ile doğrulandı (Cu-K $\alpha$  radyasyon  $\lambda = 0.154$  nm,  $2\theta$  aralığı  $30^\circ$  ila  $90^\circ$ ).

#### 4.3. Sertlik lmleri

Borlanan H13 eliğin yüzeyine dik yönde kesit boyunca kesilip metalografik işlemlemlerle hazırlandıktan sonra Shimadzu HVM mikrosertlik cihazında ASTM E384 standardına göre Vickers batıcı u kullanılarak 50 gram yük altında mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Yüzeyden itibaren 3 ila 4  $\mu$ m aralıkla her bir mesafede üçer adet mikrosertlik ölçümü yapılmış ve ortalaması verilmiştir.

#### 4.4. Aşınma Deneyleri

İşlem görmemiş ve borlanmış H13 eliğin kuru ortam aşınma davranışları ASTM G133 standartına göre oda sıcaklığında ve %  $35 \pm 5$  nem şartlarında doğrusal zıt yönlü dzlembilye aşınma (reciprocating ball-on-flat) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinde;  $20 \text{ mm s}^{-1}$  kayma hızı altında karşı malzeme olarak 10 mm çapında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bilye kullanılmıştır. Aşınma deneylerinde maksimum Hertz temas başınları sırasıyla işlem görmemiş H13 elik için 0,8; 1,01; 1,27 ve 1.6 GPa ve borlanmış H13 elik için 0,89; 1,13; 1.42 ve 1.79 GPa değerlerine karşılık gelen 3,75; 7,5; 15 ve 30 N yük altında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler, H13 eliğin zorlu koşullar altında tepkisini anlamak için akma mukavemetinden yüksek başınlarda da gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyi sırasında sürtünme katsayısı verisi sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma izlerinin 2 boyutlu profilleri Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile 3 boyutlu profilleri ise NIS-Elements görüntü analiz yazılımı ile elde edilmiştir. Her bir numune için profilometre sonuçlarından elde edilen aşınma hacmi uygulanan yüke ve kayma mesafesine bölünerek aşınma hızı elde edilmiştir. Aşınma mekanizmasını belirlemek için işlem görmemiş ve borlanmış numunelerin aşınma yüzeyleri üzerinde OM incelemeleri de yapıldı.

#### 4.5. Elektrolitik Korozyon Deneyleri

Elektrokimyasal testlerde çalışma elektrotu olarak  $0,1017 \text{ cm}^2$ 'lik yüzey alanına sahip işlem görmemiş ve borlanmış H13 elik kullanılmıştır. Tüm testler % 3,5 NaCl elti ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde bilgisayar kontrollü bir potansiyostat/galvonastat cihazı kullanılmıştır. Korozyon deney hücresinde karşıt elektrot olarak grafit çubuk kullanılmış olup referans elektrot olarak da doğgun Ag/AgCl elektrotu seçilmiştir. Elektrokimyasal deneylerin tümünde başlangıçta denge potansiyeline 2700 sn süresince

ulaşılması beklenmiş, denge potansiyeline ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri -0,8 V'dan 0,4V'a kadar 1 mV/s tarama aralığında katodikten anodik yöne doğru potansiyeli tarayarak çizilmiştir.

Ayrıca, işlem görmemiş H13 çeliğin korozyon akım yoğunluğu değeri referans alınarak, borlanmış H13 çeliğin koruma verimliliği ( $\eta$ ) Eşitlik 4.10 kullanılarak hesaplandı. Burada  $i_{kor}^o$  işlem görmemiş H13 çeliğin korozyon akım yoğunluğu,  $i_{kor}$  ise borlanmış H13 çeliğin korozyon akım yoğunluğu değerleridir.

$$\% \eta = [1 - (i_{kor}/i_{kor}^o)] \times 100 \quad (4.10)$$

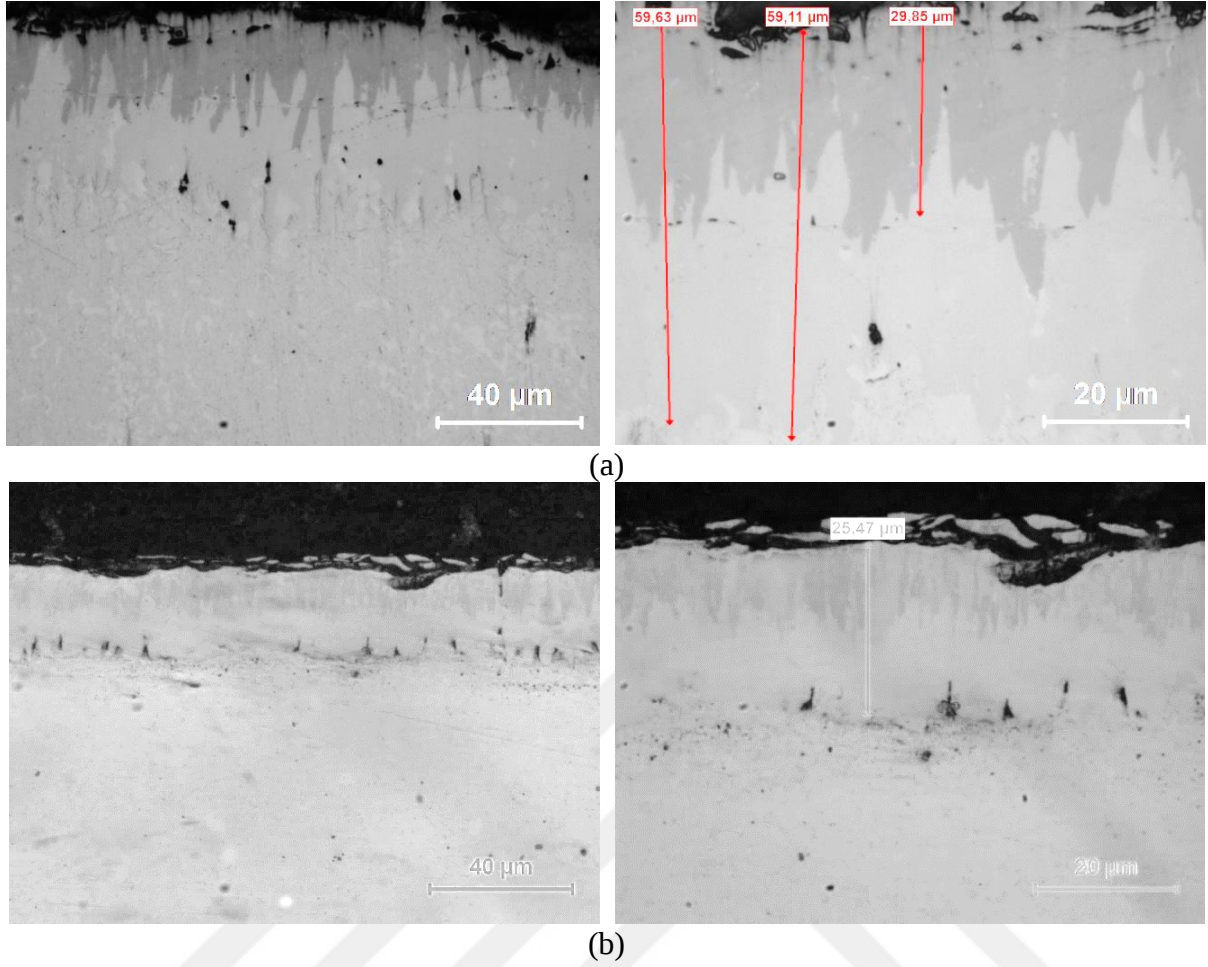
#### 4.6. Tribokorozyon Deneyleri

İşlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliğin tribokorozyon deneyleri, doğrusal zıt yönlü aşınma cihazına uygun olarak herhangi bir diğer yüzeyden gelen galvanik teması önlemek için polimer malzemeden üretilen korozyon hücresi içerisinde yapılmıştır. Yüzeylerin elektrokimyasal davranışlarını kontrol etmek için bilgisayar kontrollü bir potansiyostat/galvonostat cihazı kullanılmıştır. Tribokorozyon deneylerinde, özel olarak tasarladığımız ve imal ettiğimiz bir numune tutucusu kullanılmıştır. Bu tutucuda bulunan numunelerin çözelti ile temas eden yüzey alanları  $1,76 \text{ cm}^2$ 'dir. Tribokorozyon deneylerinde, yüksek sertliğe, yüksek aşınma direncine, kimyasal reaksiyona girmemesi ve yalıtkan olması nedeniyle karşı elaman olarak 10 mm çapında  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bilye kullanılmıştır.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bilye ve incelenen örnek, deney çözeltisine tamamen batırılmıştır. Tüm tribokorozyon deneyleri oda sıcaklığında, kuru ortam aşınma koşullarında kullanılan 30 N'luk yük/sürtünme parametreleri altında % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu tribokorozyon hücresinde numune çalışma elektrotu (WE), Ag/AgCl çubuk referans elektrotu (RE) ve grafit çubuk ise karşıt elektrot (CE) olarak kullanıldı. Tribokorozyon deneyleri açık devre şartlarında (OCP) yapılmıştır. Deneylerin öncesinde 600 sn süre ile OCP ölçümleri yapılarak numunelerin denge haline gelmesi beklenmiştir. Aşınmanın var olduğu tüm testlerde aşınma süresi 2880 sn, doğrusal zıt yönlü kayma hızı  $20 \text{ mm s}^{-1}$  ve aşınma izi uzunluğu 11,5 mm'dir. Aşınma deneyinden sonra 600 sn süre ile OCP ölçümleri tekrar yapılarak numunelerin denge haline gelmesi beklenmiştir. Aşınma deneyi sırasında sürtünme katsayısı verisi sürekli olarak kayıt edilmiştir. Polimer hücre, önceki deneylerden kaynaklanan aşınma ürünlerinden gelebilecek kirliliği önlemek için deneyler arasında temizlenmiştir. Korozyon çözeltisi tamamen boşaltıldıktan ve yüzey kurutulduktan sonra aşınma izlerinin 2 boyutlu profilleri Mitutoyo Surtest SJ-400 profilometre cihazı ile aşınma yüzeyleri ise OM ile incelenmiştir.

## 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

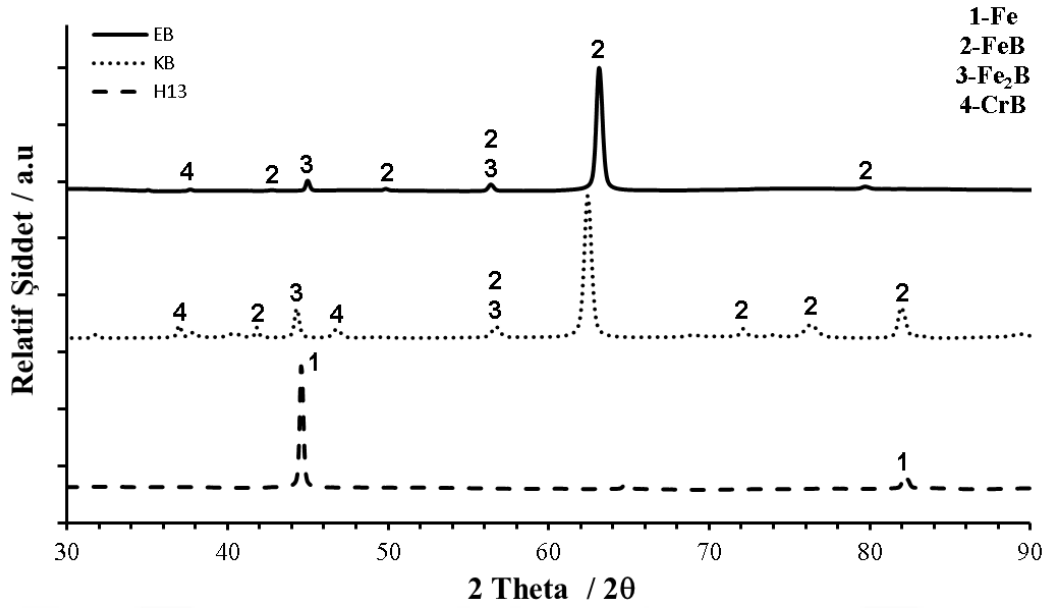
### 5.1. Yapısal Karakterizasyon Sonuçları

Şekil 5.1’de kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama için H13 çeliğin yüzeylerinde üretilen borür tabakalarının kesit OM görüntüleri verilmektedir. Elde edilen iki fazlı kaplamanın kesit mikroyapı incelemelerinde, üst koyu renkli katmanın FeB fazı, daha açık renkli alt katmanın ise Fe<sub>2</sub>B fazından oluştuğu ve FeB tabakasının kalınlığı hemen hemen Fe<sub>2</sub>B tabakasının kalınlığına eşit olduğu görülmüştür. Borür tabakaları, H13 çeliğindeki Cr, V ve Mo gibi alaşım elementlerinin varlığı nedeniyle tüm borlama koşullarında yoğun, sürekli ve kompakt bir yapıya sahiptir, arayüzeylerin dişli şekli daha azdır. Alaşım elementlerinin, bazı borlanmış alaşımlı çeliklerde görüldüğü gibi düz arayüzeylerin gelişimi üzerinde güçlü bir etkisi olduğu kabul edilmektedir (Boumaali vd., 2021: 42). Aslında, yüksek oranda alaşım elementinin varlığı, bor atomlarının aktif akışını azalttı ve borür tabakaları ile geçiş bölgesi arasındaki arayüzeyleri düzleştirme eğiliminde güçlü bir etkiye sahiptir. Her iki borlama sonucunda (Şekil 5.1) FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakaları arasında enine çatlaklar gözlemlenmemiştir. Borür tabakasının kalınlığı, 950 °C’de 15 dakika EB ve 45 dakika bekleme koşulunda ~25 µm değerine ulaştı. Elektrokimyasal esaslı borlama tekniğinde 0,42 µm/dk’lık bir büyüme hızı elde edilmiştir. H13 çeliğin 950 °C’de 6 saatte kutu borlanması ile 59 µm’lik bir tabakanın elde edildiği bu çalışmada 0,164 µm/dk’lık bir büyüme hızı belirlenmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında, elektrokimyasal esaslı borlama yöntemiyle 2,56 kat kaplama hızının arttığı tespit edilmiştir.



**Şekil 5.1.** (a) Kutu ve (b) Elektrokimyasal Esaslı Borlama Sonunda Elde Edilen Kaplamaların Düşük ve Yüksek Büyütmeli OM Kesit Görüntüleri.

İşlem görmemiş H13, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama sonrası H13 çeliği üzerinde oluşan borür tabakalarının XRD sonuçları Şekil 5.2’de verilmektedir. Bu sonuçlar, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlama sonrasında demir borür ( $\text{FeB}$ ), demir diborür ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) ve krom borür ( $\text{CrB}$ ) fazlarının oluştuğunu doğrulamaktadır. Mevcut fazlar arasında,  $\text{FeB}$ ’nin en baskın faz olduğu, onu  $\text{Fe}_2\text{B}$  ve  $\text{CrB}$  fazlarının takip ettiği görülmüştür. Alaşım elementi olarak Cr, H13 çeliğinde yaklaşık ağırlıkça % 5 bulunduğu için kutu ve elektrokimyasal borlama sırasında bor atomları ile reaksiyona girerek  $\text{CrB}$ ’yi oluşturmaktadır. Cr, borür tabakasının yapısını ve özelliklerini değiştirebilir. Cr’nin  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazındaki çözünürlüğü, Fe’den Cr’a değişimine neden olmaktadır ve yüzeyde  $(\text{Fe, Cr})\text{B}$  ve  $(\text{Fe, Cr})_2\text{B}$  oluşturabilir. Cr’nin aynı zamanda borür tabakasında  $\text{FeB}$  gibi borca zengin fazın oluşumunu teşvik ettiği rapor edilmiştir (Vera Cárdenas vd., 2016: 5). Örneğin, Boumaali vd. (2021), H13 çeliğinin yüzeyinde % 90  $\text{B}_4\text{C}$  ve % 10  $\text{NaBF}_4$  toz karışımını kullanarak  $800^\circ\text{C}$ ,  $900^\circ\text{C}$  ve  $1000^\circ\text{C}$ ’de 2, 4 ve 6 saat boyunca borlandığında  $\text{CrB}$  fazının varlığını belirlemişlerdir.

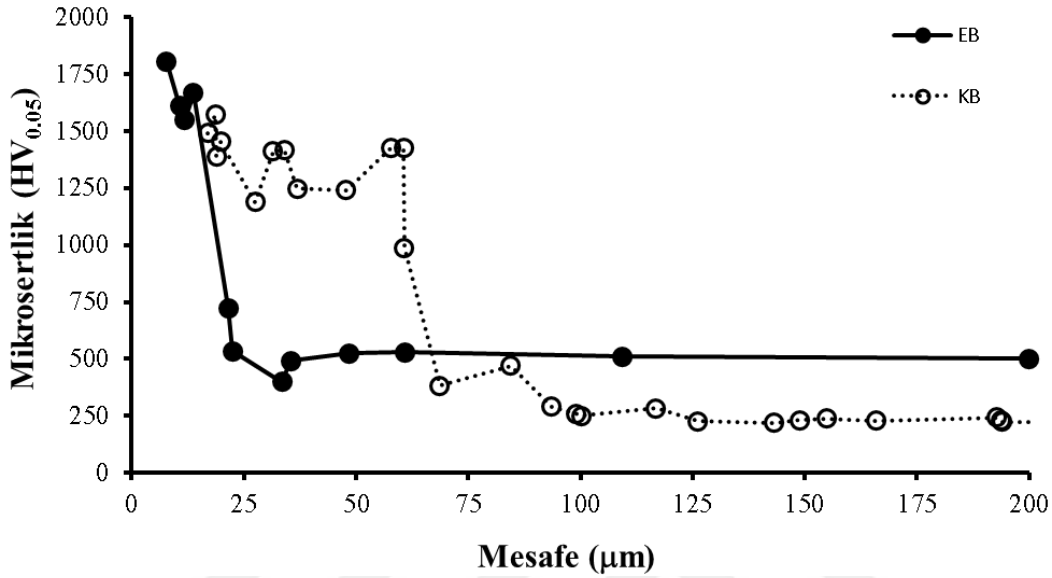


**Şekil 5.2.** İşlem Görmemiş H13, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlama Sonrası H13 Çeliği Üzerinde Oluşan Borür Tabakalarının XRD Paternleri.

## 5.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Şekil 5.3' de verildiği üzere kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin kesit sertlik ölçümleri sonucunda sertlik değerleri borür tabakasından matrise doğru azalmaktadır. En yüksek sertlik değeri elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelikte elde edildi ve tabakanın ortalama yüzey sertliği 1805 HV<sub>0,05</sub>'dir. Kutu borlanmış H13 çeliğin borür tabakasının yüzey altı sertliği (yüzeyden 18 µm uzaklıkta) 1573 HV<sub>0,05</sub> olup, yüzey sertlik değerinden (1493 HV<sub>0,05</sub>) daha büyük olduğu görülebilir. Bu durum, kutu borlanmış H13 çeliğin borür tabakasının yüzeyindeki gözeneklere bağlanabilir. Kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin yüzeyindeki borür tabakalarında oluşan fazların mikrosertlik değerleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Gök vd., (2017), krom borür (Cr-B) fazların dislokasyon hareketini engellediğini ve bu da kaplamanın sertliğini etkilediğini belirtmiştir. Bu fazların etkisi nedeniyle elektrokimyasal esaslı borlama sonucu elde edilen sertlik değerleri, kutu borlama sonucu elde edilen örnekten daha yüksektir. Krelling vd. (2015), Cr-B fazının tabakanın sertliği artırdığını rapor etmiştir. Elektrokimyasal esaslı borlamaya göre kutu borlamada borlama süresi 1 saatten 6 saat süreye artmasıyla difüzyon bölgesinin genişliğinde bir artış gözlenmiş olup, Si içeriği artmasından dolayı elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğe göre sertlik değerindeki düşüş, ferrit fazı oluşumuna bağlanabilir. Nair vd. (2022), sert borür yapının altında daha yumuşak tabakanın bulunmasının nedeni olarak, Si'nin güçlü bir ferrit oluşturmucu olması ve Si, borür yapıda neredeyse çözünmediği için üst borür

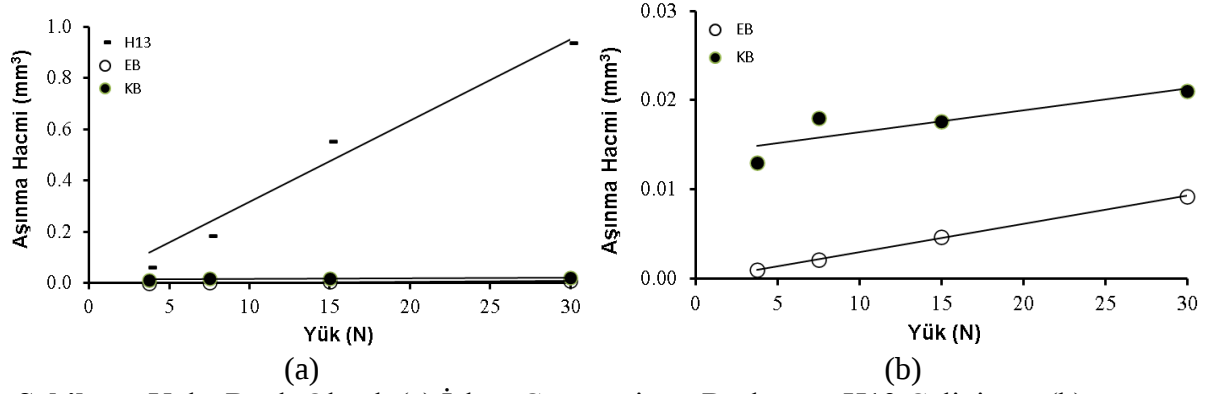
tabakalarının önüne geçtiğini ifade etmiştir. Yüzeyden itibaren 150  $\mu\text{m}$  derinlikte kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik sırasıyla yaklaşık 230  $\text{HV}_{0,05}$  ve 510  $\text{HV}_{0,05}$  çekirdek sertliği göstermiştir. Kutu borlanmış H13 çeliğin geçiş bölgesi, önemli miktarda silisyum ve karbon atomunun difüzyonu nedeniyle H13 altlık malzeme ve borür tabakasından daha düşük bir sertliğe sahiptir.



**Şekil 5.3.** Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğe Ait Enine Kesit Sertlik Profilleri.

### 5.3. Aşınma Sonuçları

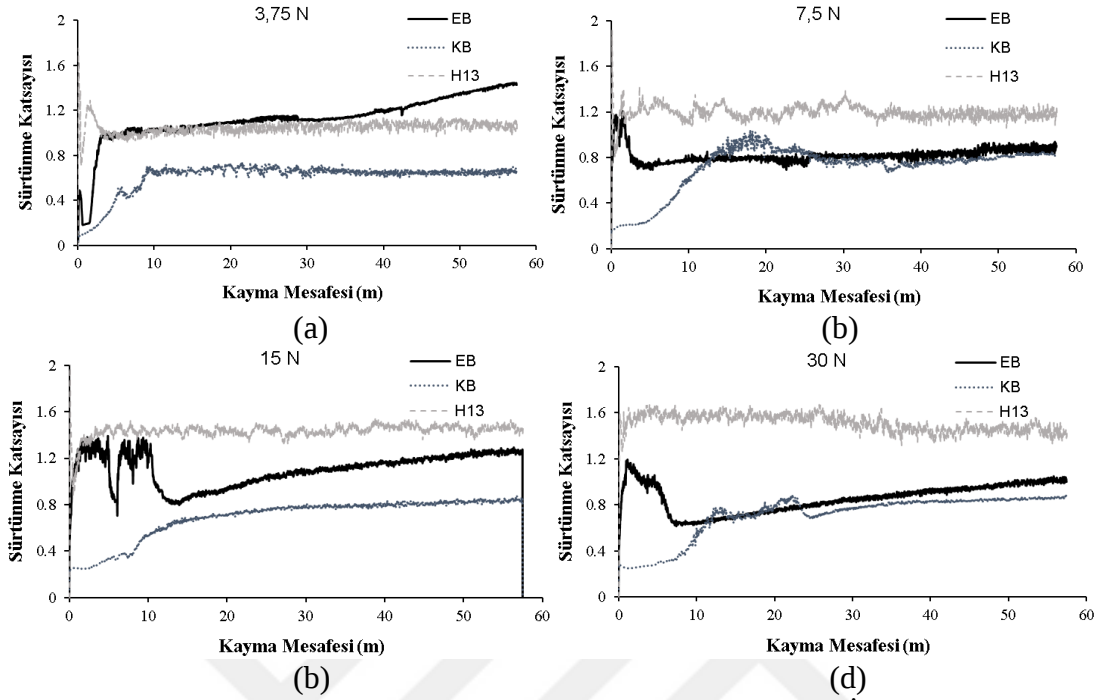
Aşınma deneylerinden sonra ölçülen aşınma hacimleri Şekil 5.4'de gibi dikkate değer bir farkı göstermektedir. Bu fark, özellikle daha düşük sertliği nedeniyle aşınmaya karşı daha az dirence sahip olan işlem görmemiş H13 çeliğin yüzeyinden kaynaklanmaktadır. Uygulanan yükün artmasıyla tüm numunelerin aşınma hacimleri artırmıştır. En düşük aşınma hacmi, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelikte gözlemlenmiştir (Şekil 5.4 a). Sert FeB,  $\text{Fe}_2\text{B}$  ve CrB fazlarının varlığı (Şekil 5.2) nedeniyle elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik, kutu borlanmış H13 çelikten daha yüksek aşınma direncine sahiptir (Şekil 5.4 b).



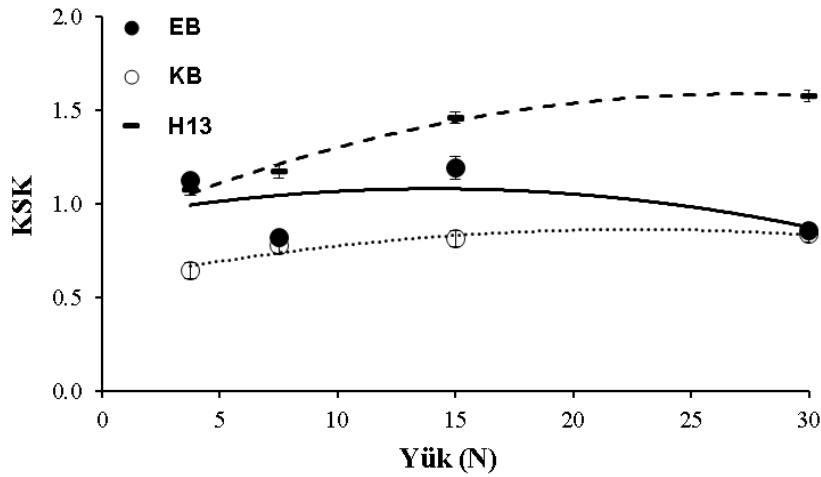
**Şekil 5.4.** Yüke Bağlı Olarak (a) İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin ve (b) Kutu ve Elektrokimyasal Borlanmış H13 Çeliğin Aşınma Hacimleri.

Şekil 5.5, işlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliğin 3,75; 7,5; 15 ve 30 N yük altında aşınma deneyleri sırasında kaydedilen sürtünme katsayısı (CoF) eğrilerini göstermektedir. Şekil 5.6'de verilen CoF eğrilerinden elde edilen kararlı durum sürtünme katsayısı (KSK) değerleri yüke bağlı Şekil 5.6'de verilmiştir. İşlem görmemiş H13 çelik için, CoF kayma mesafesi ile artar ve neredeyse sabit bir değere yaklaşır. Sürtünme eğrisindeki bu dalgalanmaların varlığı, H13 çeliğin daha yüksek plastik deformasyona uğraması nedeniyle aşınma ürünlerinin oluşumu ve ayrılmasına bağlanabilir (García-Leon vd., 2021: 7). İşlem görmemiş H13 çelikte yük arttıkça kararlı CoF değeri 1,07'den 1,57'ye artmaktadır (Şekil 5.6). Diğer yandan, kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çelikler başlangıçta tribo-çift oluşumundan dolayı CoF değerinde bir pik gösterir, ardından neredeyse sabit bir değere düşmektedir. Borlanmış H13 çeliğin sürtünme eğrileri ise çok az veya hiç dalgalanma olmadan değişmektedir. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi kutu borlanmış H13 çelikte yük arttıkça kararlı CoF değeri 0,64'ten 0,84'e artarken, elektrokimyasal borlanmış H13 çelikte ise yük arttıkça kararlı CoF değeri 1,12'den 0,85'e azalmaktadır. Elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin kararlı CoF değerlerindeki bu azalma, yüzeyin düzleşmesi ve/veya yüzeyde bir oksit filmi oluşumu ile ilişkili olabilir. Literatürde, CoF'nin yüzey sertliği, pürüzlülük ve gözeneklilik gibi yüzey özelliklerinden etkilendiği rapor edilmiştir (Zheng vd., 2023: 8). Ancak bu çalışmada elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin yüzeyindeki borür tabakası oksit filminin CoF üzerinde yüzey gözenekliliği ve pürüzlülüğü gibi faktörlere göre daha büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kutu ortam aşınma koşullarında, elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin yüzeyindeki borür tabakası yüksek yükte sürtünmeye maruz kaldığında ortaya çıkan aşınma ürünleri oksidasyona uğrar ve aşınma yüzeyinde birikerek katı yağlama sağlayan bir oksit filmi (öncelikle  $B_2O_3$ ) oluşturur. Şekil 5.9'da, 15 ve 30 N yük altında elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin borür tabakasının yüzeyinde oluşan katı yağlayıcı

oksit filminin (kırmızı daire içine alınan) sürekli yağlama sağladığını ve borlanmış H13 çeliği için kararlı bir CoF ile sonuçlandığını doğruladı.



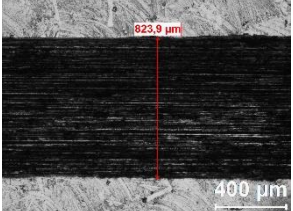
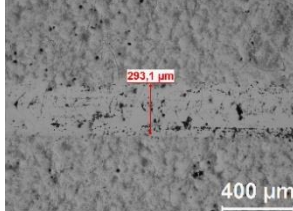
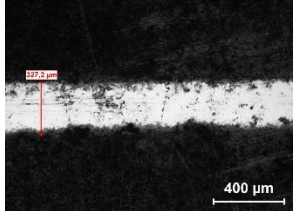
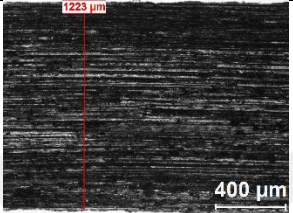
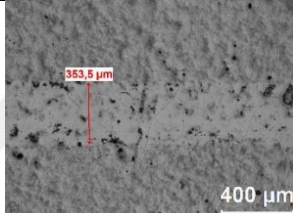
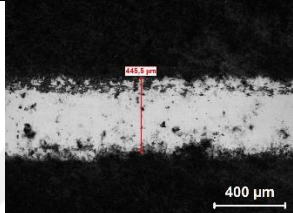
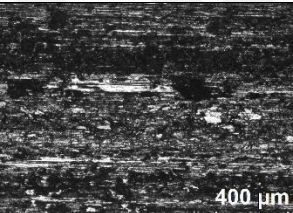
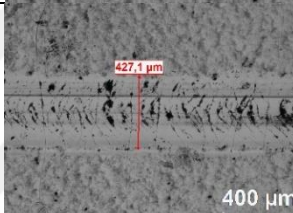
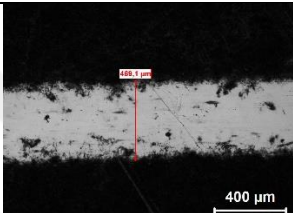
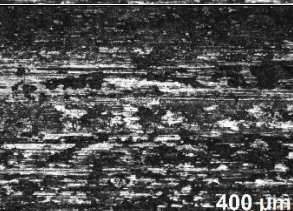
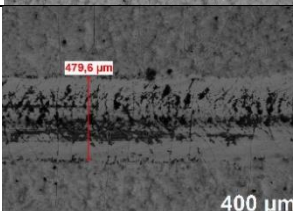
Şekil 5.5. (a) 3,75 N, (b) 7,5 N, (c) 15 N ve (d) 30 N Yük Altında İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin COF Eğrileri



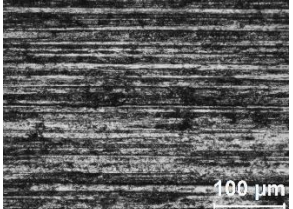
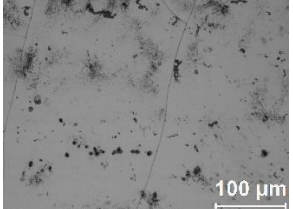
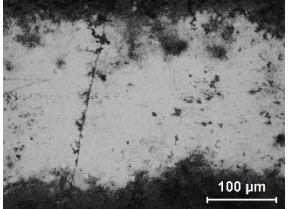
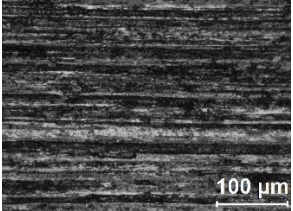
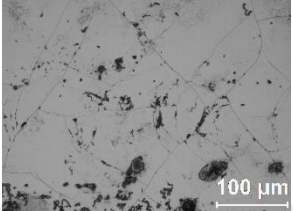
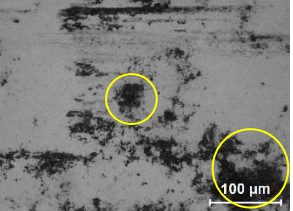
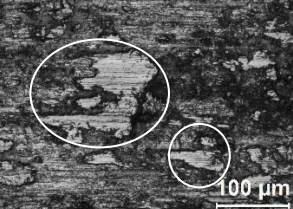
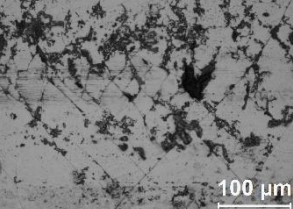
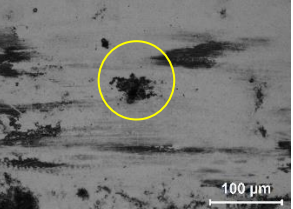
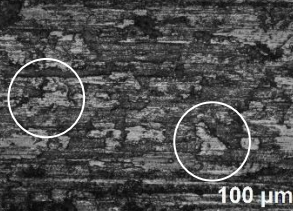
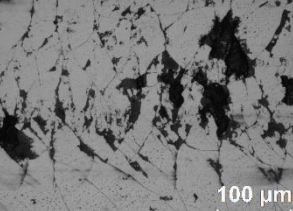
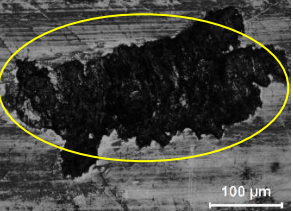
Şekil 5.6. Yüke Bağlı Olarak İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin KSK Değişimi.

Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9, işlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliğin aşınma izlerinin OM görüntüleri verilmektedir. Aşınma deneyleri sırasında uygulanan yük arttıkça aşınma izinin genişliğinin arttığı görülmektedir. H13 çeliğin aşınma yüzeyinde (Şekil 5.7-Şekil 5.9) yivler boyunca plastik deformasyonun yanı sıra yerel dökülme ve çukurların

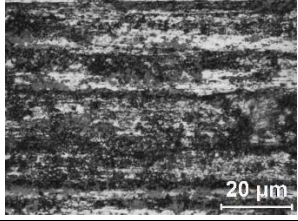
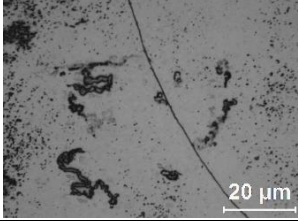
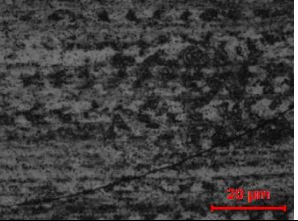
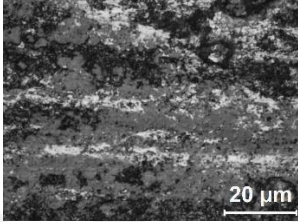
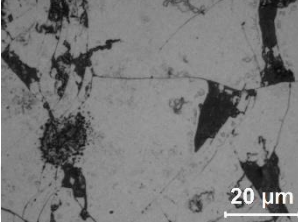
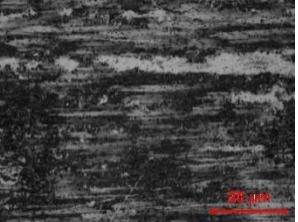
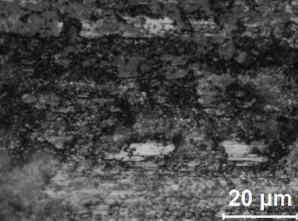
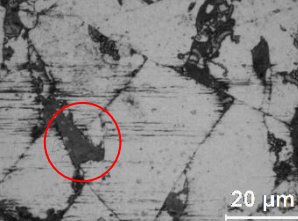
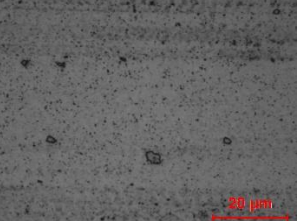
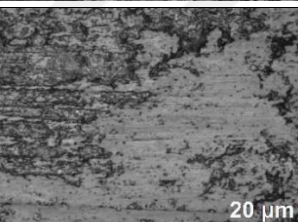
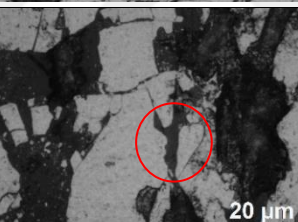
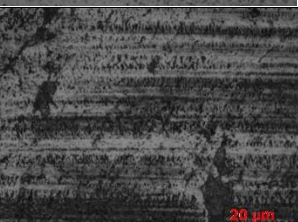
oluştugu gözlemlendi. Bunun nedeni, H13 çeliğinin düşük sertliği ve iyi şekillenebilirliğinden dolayı daha sert  $Al_2O_3$  bilyenin daha derine batmasına olanak tanıyarak plastik deformasyona ve yiv oluşumuna neden oldu. Bu sonuçlar, H13 çeliğinin ana aşınma mekanizmasının adhezif aşınma olduğunu gösterdi. Aşınma izinin çeşitli alanlarında beyaz daire içine alınan oksitler yüksek yük (15 ve 30 N) altında sürtünme sırasında oluşan sürtünme ısısına atfedilen bir oksidasyon reaksiyonunun meydana geldiğini göstermektedir. Plastik deformasyon ve oksidasyonun birleşik etkilerinin bir sonucu olarak, H13 çeliğinin yüzeyi kırılğan hale geldi ve bir oksit filmi oluşturdu. Bu oksit film, aşınma sırasında hızla uzaklaştı ve yeni bir film oluştu. Ayrıca plastik deformasyon nedeniyle oluşan mikroçatlaklar aşınma kaybına neden olabilir. İşlem görmemiş H13 çelik ile karşılaştırıldığında, borlanmış H13 çelik daha dar ve daha sık oyuklarla daha pürüzsüz bir aşınma yüzeyi sergiledi. Ancak kutu borlanmış H13 çeliğin aşınma yüzeyinde bazı parçalanmış alanlar ve rastgele dağılmış oyuklar (sarı daire içine alınan) hala görülebiliyor (Şekil 5.7 ve Şekil 5.8). Bunun nedeni, yüksek yük altında batmaya ve genişlemeye duyarlı olan, tabakanın lokal olarak soyulmasına ve pürüzlü aşınma yüzeyine neden olan borür tabakası tarafından oluşturulan zayıf B-B bağlarıdır. Uygulanan yük arttıkça elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin aşınma izinin içerisinde birbiriyle kesişen çatlakların yoğunluğu artarken (Şekil 5.8), kutu borlanmış H13 çeliğin aşınma izinin içerisinde yüzey yorulmasının bir sonucu kayma yönüne dik boyuna uzamış çatlaklara neden olan temas gerilimi ile temas yüzeyinden belirli bir derinlikte paralel çatlaklara neden olan kayma geriliminin kombinasyonu, temas yüzeyinde delaminasyon sonucu çukurların oluştuğu görülmektedir. Tekrarlı yük altındaki gerilmelerin neden olduğu yorulma nedeniyle oluşan mikroçatlaklar ve bu çatlakların ilerlemesi nedeniyle oluşan çukurlar ve aşırı plastik deformasyon sürtünme katsayısının artmasına (Şekil 5.6) neden olmaktadır (Erdogan, 2019: 891). Erdogan (2019) yüksek yerel gerilmelerin borlanmış H13 çelikte yorulmaya bağlı delaminasyona neden olduğunu ifade etmiştir. Bu yüzey morfolojisi gözlemleri, işlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliğin aşınma hızlarıyla uyumlu olup (Şekil 5.4), her bir deney sonrasında karşı malzeme olarak kullanılan  $Al_2O_3$  bilyelerin aşınma yüzeyleri incelenmiştir.  $Al_2O_3$  bilyelerin temas yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin boyutu, işlem görmemiş ve borlanmış H13 çelik üzerinde oluşan aşınma izlerinin boyutuyla orantılıdır; bu, bilyenin aşınmasının temas alanlarının boyutu tarafından kontrol edildiğini göstermektedir (Şekil 5.10-5.11).

| Yük (N) | H13                                                                                 | EB                                                                                   | KB                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 3,75    |    |    |    |
| 7,5     |    |    |    |
| 15      |   |   |   |
| 30      |  |  |  |

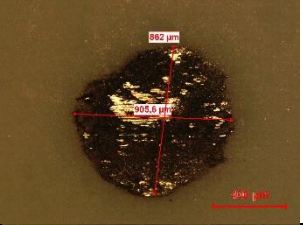
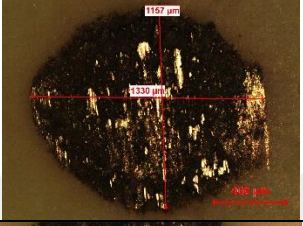
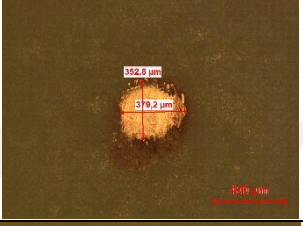
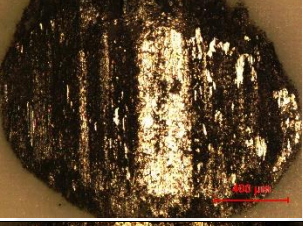
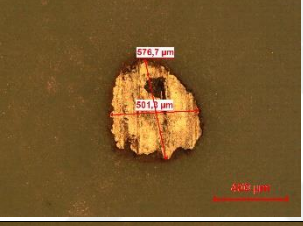
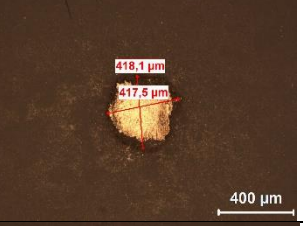
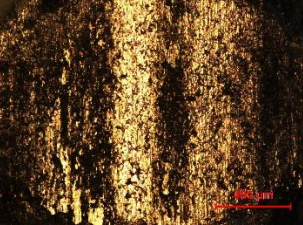
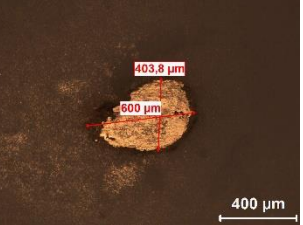
**Şekil 5.7.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X50).

| Yük (N) | H13                                                                                 | EB                                                                                   | KB                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 3,75    |    |    |    |
| 7,5     |    |    |    |
| 15      |   |   |   |
| 30      |  |  |  |

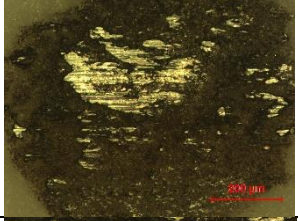
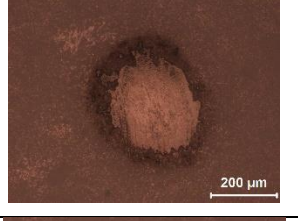
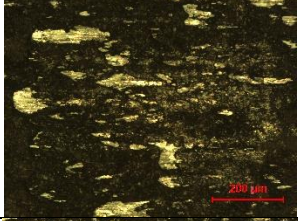
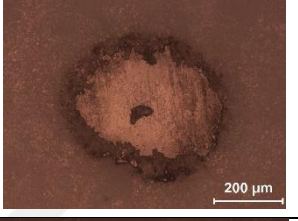
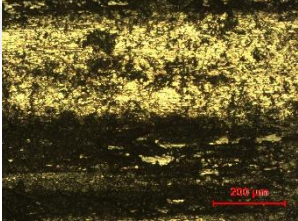
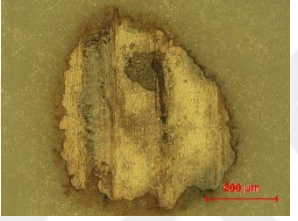
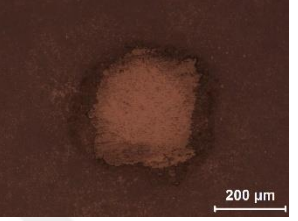
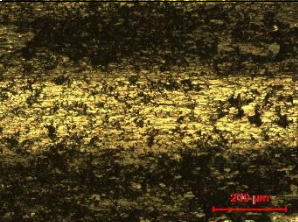
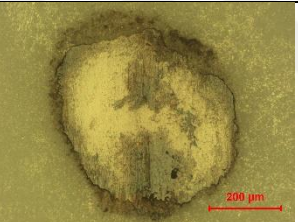
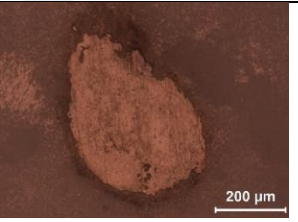
**Şekil 5.8.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X200).

| Yük (N) | H13                                                                                 | EB                                                                                   | KB                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 3,75    |    |    |    |
| 7,5     |    |    |    |
| 15      |   |   |   |
| 30      |  |  |  |

**Şekil 5.9.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X1000).

| Yük (N) | H13                                                                                 | EB                                                                                   | KB                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 3,75    |    |    |    |
| 7,5     |    |    |    |
| 15      |   |   |   |
| 30      |  |  |  |

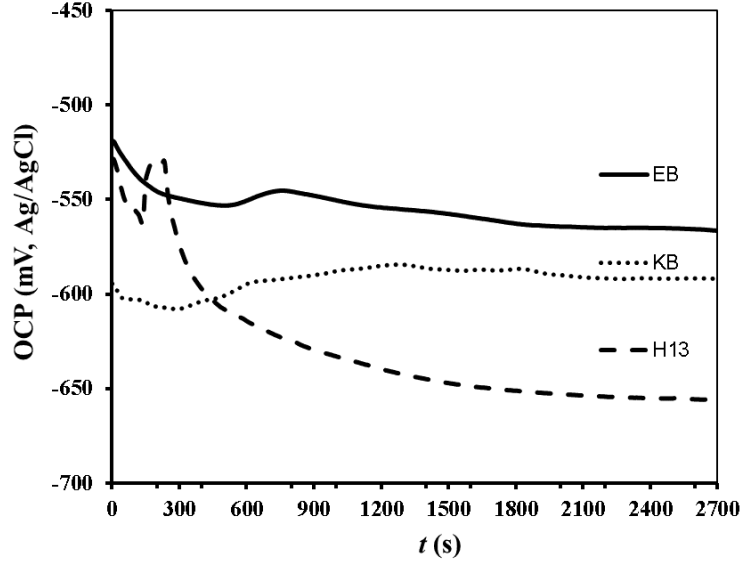
**Şekil 5.10.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüzeyinde Sürtünen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Bilyenin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X50).

| Yük (N) | H13                                                                                 | EB                                                                                   | KB                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 3,75    |    |    |    |
| 7,5     |    |    |    |
| 15      |   |   |   |
| 30      |  |  |  |

**Şekil 5.11.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Yüzeyinde Sürtünen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Bilyenin Yüke Bağlı Olarak Düşük Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri (X100).

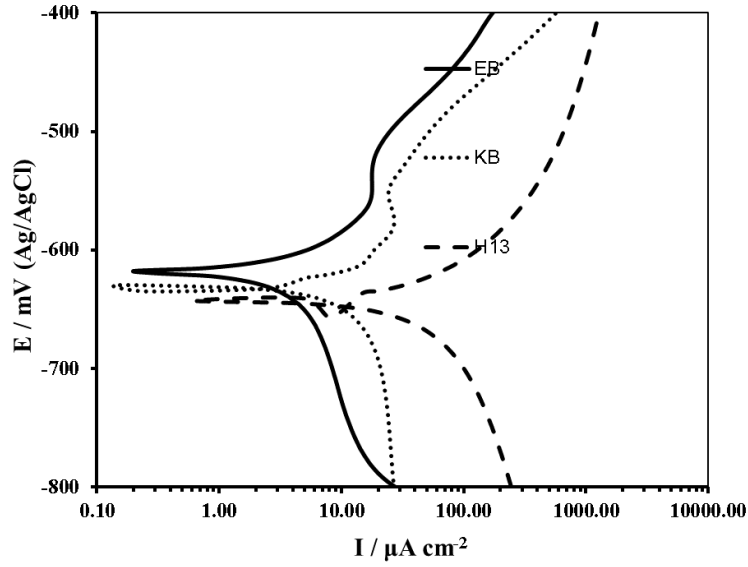
#### 5.4. Korozyon Sonuçları

Şekil 5.12’de işlem görmemiş ve borlanmış H13 çelikler için Açık Devre Potansiyel (OCP) ölçümleri verildi. Kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin potansiyel değerleri, işlem görmemiş H13 çelikten daha yüksek olduğundan, daha soy bir davranış sergiledi.



**Şekil 5.12.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin OCP Eğrileri.

İşlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliklerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 5.13’de verilmiştir. İlk gözlemler, borlanmış H13 çeliklerin anodik ve katodik davranışlarının benzer olduğunu göstermektedir. Kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliklerin korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ) değerleri birbirine yakın iken, işlem görmemiş H13 çeliğin  $E_{kor}$  değerinin borlanmış H13 çeliklere göre daha negatif olduğu dikkat çekmektedir. İncelenen numunelerin  $E_{kor}$  (mV) değerleri: -619 (EB) > -630 (KB) > -644 (H13); korozyon akım yoğunluğu ( $\dot{I}_{kor}/\times 10^{-6}$  A cm<sup>-2</sup>) değerleri ise: 13,4 (EB) < 70 (KB) < 71 (H13), en iyi borlama yöntemi ile H13 çelik arasında yaklaşık 25 mV’lik bir  $E_{kor}$  farkı ve  $\dot{I}_{kor}$  değerinde yaklaşık 5 kat fark olduğu görülmektedir. Bu nedenle, elektrokimyasal borlama, % 3,5 NaCl çözeltisinde H13 çeliği korozyona karşı korumak için en iyi performansı gösterdi, çünkü en pozitif  $E_{kor}$  değerine ve en düşük  $\dot{I}_{kor}$  değerine sahiptir. Bu durum, elektrokimyasal borlamanın % 3,5 NaCl çözeltisinde işlem görmemiş H13 çelik için bir koruma bariyeri olarak hareket edebileceği anlamına gelir.

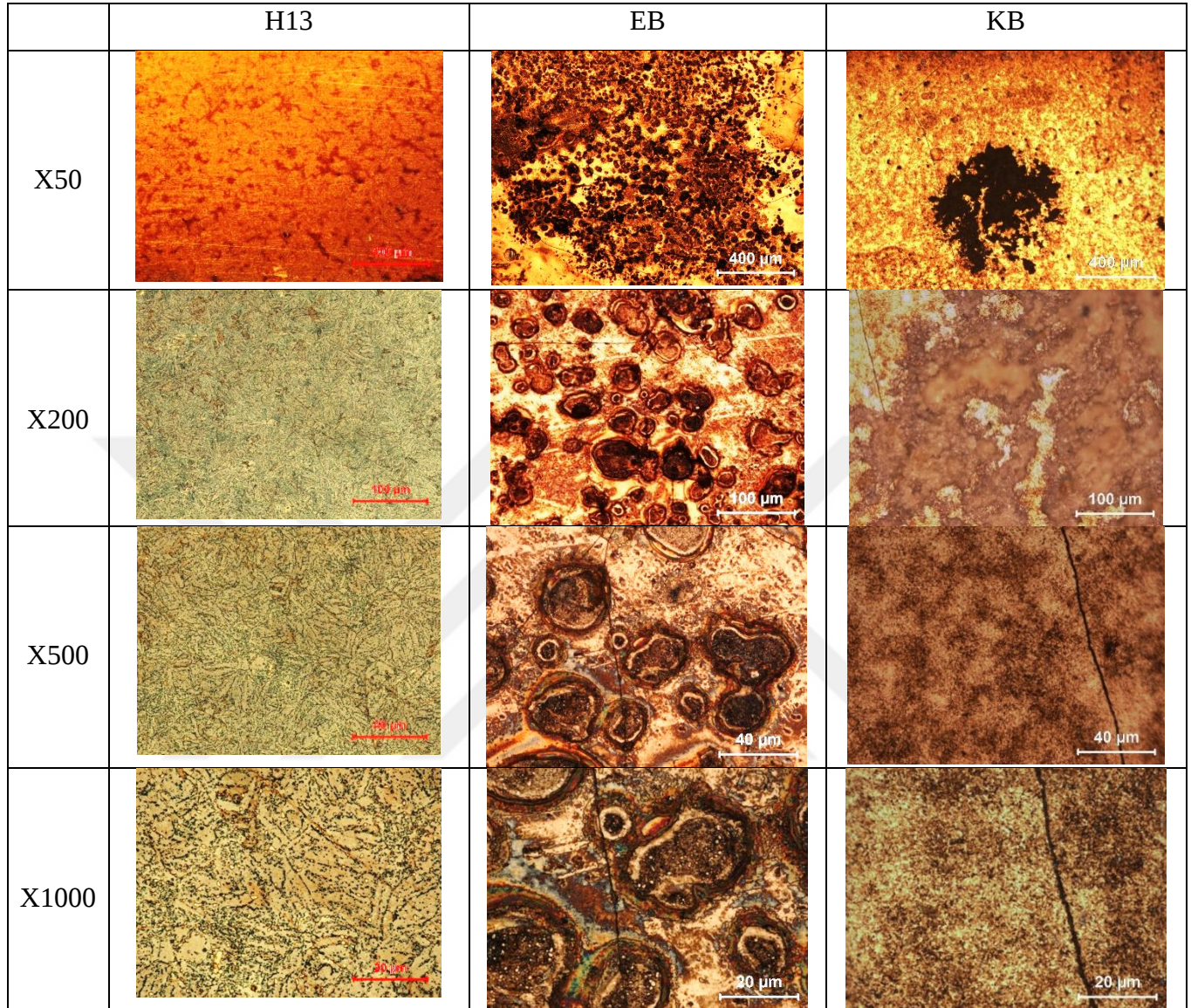


**Şekil 5.13.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Tafel Eğrileri.

Şekil 5.14, korozyon deneyi sonrasında işlem görmemiş, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliklerin yüzeylerini göstermektedir. H13 çeliğin yüzeyinde koruyucu bir pasivasyon filmin oluşmaması H13 çeliğin yüzeyinde ciddi bir korozyon oluştuğunu göstermektedir. İşlem görmemiş H13 çelik, yoğun korozyon nedeniyle dağlanmış bir yapı olarak görünmektedir. Önceki çalışmalara göre H13 çeliğin ferrit/karbür arayüzlerinde çukurcukların gelişebileceği ve karbürler daha ince ve daha yoğun bir şekilde dağıldığında korozyona uğrayan bölgelerin artacağı bildirilmiştir (Kariofillis vd., 2006: 24). Borlanmış yüzey, borlanmış ve borlanmamış katmanlar arasındaki termal uyumsuzlıklardan kaynaklanan çekme ve basma gerilmelerinden kaynaklanan yönlendirilmiş çatlaklarla karakterize edilir. 950 °C sıcaklıkta 15 dakika 200 mA/cm<sup>2</sup> akım yoğunluğunda elektrokimyasal borlama ve 45 dakika bekletme koşulunda elde edilen ~25 µm kalınlığındaki borür tabakasının % 3,5 NaCl çözeltisine karşı korozyon direnci, 950 °C’de 6 saat süre ile kutu borlama ile elde edilen 59 µm kalınlığındaki borür tabakasından daha iyidir. Bu durum, kısa borlama süresi nedeniyle borür tabakasının kalınlığının karşılaştırmalı olarak daha az olmasından kaynaklanıyor ve sonuç olarak, kaplamalardaki gözenekler, demirin oksidasyon ürünleri ile dolmuş ve metalin korozyonla temasından dolayı daha az korozyona neden olmuştur (Zheng vd., 2023: 15). Ayrıca, mikroçatlaklar ve borür tabakasında oluşan fazlar arasındaki termal gerilme farkı nedeniyle, Cl iyonları, borür tabakasının kalınlığı arttıkça H13 çeliğin yüzeyine daha kolay erişilebilir hale gelir. Borlanmış H13 çeliklerin korozyon direnci genellikle kaplamaların karakteristik özellikleri olan mikroçatlaklar ve gözeneklerin miktarına bağlıdır. Bu tür

kaplamalardaki gözenekler, kaplamaların rijitliğini olumsuz etkileyebilir ve korozyon direncini önemli ölçüde azaltabilir. Gözenek miktarı, borür tabakasının mikroyapısı ile ilgilidir (Kayali vd., 2019: 15). Korozyon koruma verimliliği ( $\% \eta$ ) değerleri, eşitlik (4.10) ile hesaplanmıştır. Tablo 5.1’de gösterildiği gibi, elektrokimyasal borlanmış H13 çelik  $\% 81,13$  yüksek korozyon koruma verimliliği sergiledi ve  $13,4 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  düşük korozyon akım yoğunluğu değerine sahiptir. Ancak kutu borlanmış H13 çeliğin  $i_{kor}$  değeri, işlem görmemiş H13 çeliğe yakın olduğundan kutu borlanmış H13 çeliğin korozyon koruma verimliliği  $\% 1,4$  olarak hesaplandı.





**Şekil 5.14.** Korozyon Deneyinden Sonra İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Düşük ve Yüksek Büyütme Korozyon Yüzey Görüntüleri.

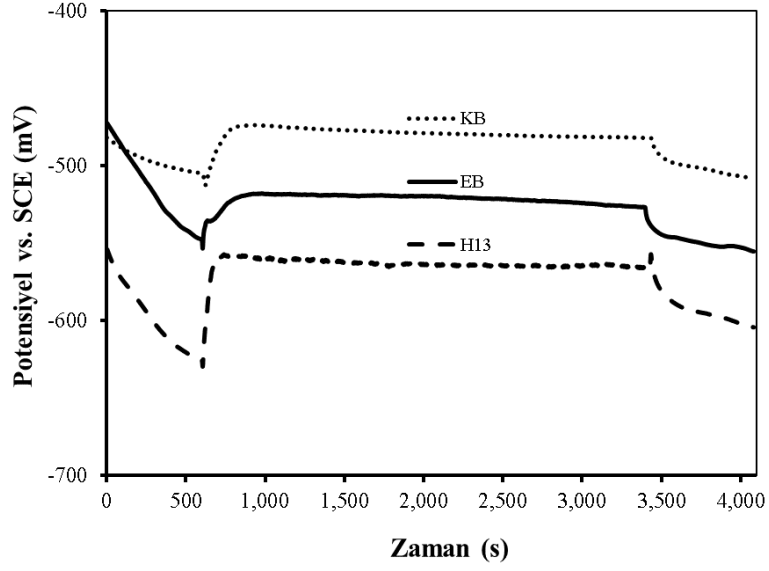
**Tablo 5.1.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Korozyon Verileri.

| Malzeme Kodu   | E <sub>kor</sub> (mV) | İ <sub>kor</sub> (x10 <sup>-6</sup> A/cm <sup>2</sup> ) | C <sub>R</sub> (mpy) | %η    |
|----------------|-----------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|-------|
| İşlem Görmemiş | -644                  | 71                                                      | 10,61                | -     |
| EB             | -619                  | 13,4                                                    | 5,88                 | 81,13 |
| KB             | -630                  | 70                                                      | 30,72                | 1,4   |

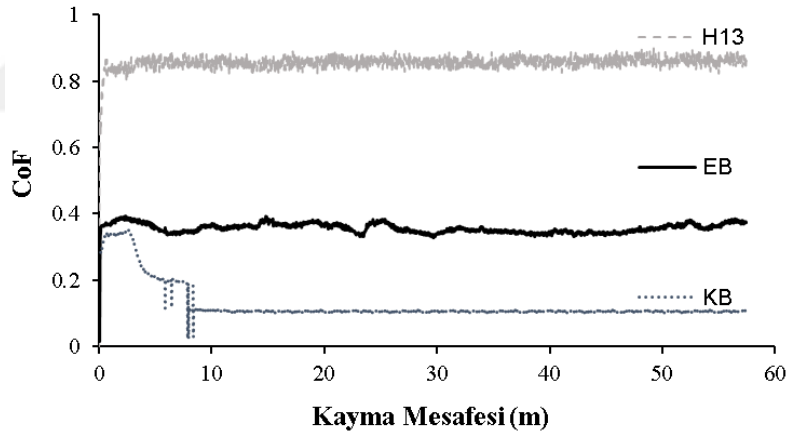
### 5.5. Tribokorozyon Sonuçları

Tribokorozyonun neden olduğu elektrot yüzeyinin elektrokimyasal durumu elektrodun OCP'sini büyük ölçüde etkilemektedir. Şekil 5.15, işlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliğin tribokorozyon sırasında OCP ve CoF'un değişim eğrilerini göstermektedir. Aşınma deneyine başlamadan önce örnekler, daha kararlı bir elektrokimyasal durum elde etmek için % 3.5'lik NaCl çözeltisine 10 dakika boyunca batırıldı. Şekil 5.15 a'da, aşınma başladığında tüm örneklerde potansiyelde hızlı bir artış görülmüştür. İşlem görmemiş H13 çeliğindeki artış, kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çelikten daha belirgindir. Bu, sürtünme altında karbon çeliklerinin, pasif malzemelerin aksine, aşınma izinin içinden ziyade dışı yoğun bir şekilde korozyona maruz kaldığı gerçeğine bağlanabilir (Alkan vd. 2024: 10). Pasif malzemelerde mekanik etkilerin bir sonucu olarak aşınma izindeki oksit film kırılması potansiyeli azaltabilir. Bu durum, yüzeyinde güçlü bir pasif tabaka oluşturamayan karbon çelikleri için geçerli değildir. Ancak, aşınma başladığında, kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çeliklerin potansiyelleri Şekil 5.15 a'da önce hızla artar ve sonra aşınma sırasında zamana bağlı kararlı olarak devam etmektedir, bu da borür tabakaların belirli bir ölçüde pasifleşme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Aşınma başlamadan önce, aşınma sırasında ve aşınma tamamlandıktan sonra borlanmış H13 çeliklerin potansiyeli, işlem görmemiş H13 çelikten daha pozitifdir.

Kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin OCP şartlarında CoF değerleri işlem görmemiş H13 çelikten daha düşük bir eğilim gösterdi (Şekil 5.15 b). Ancak, Şekil 5.15 b'de ilginç bir gözlem elde edildi: kutu borlanmış H13 çeliğin CoF'si, ilk 3 m'de 0,33'lik bir artışın ardından 3 m ile 8 m arasında kademeli bir azalma gösterdi ve CoF 0,1 olacak şekilde daha iyi bir kararlılık sergiledi. CoF'deki bu azalma, borik asidin yağlama etkisine atfedilmiştir (Da Costa Aichholz vd., 2018: 271). Borlanmış H13 çeliğin yüzeyindeki oksit tabakası, tribo-çiftler arasında bir yağlayıcı tampon görevi görmektedir. Bu tabaka, CoF'un azalmasını kolaylaştırır ve  $Al_2O_3$  bilyenin borlanmış yüzey boyunca düzgün hareketini desteklemektedir (Şekil 5.16). Tribolojik etkileşim sırasında bu yağlayıcı filmin gelişimi, sulu koşullar altında borlanmış yüzeyde  $B_2O_3$  ve borik asit filmi oluşturulması konseptine benzemektedir (Feng vd., 2023: 12). Bununla birlikte, oksit tabakası kırılabilirlik gösterebilir, bu da mikroçatlakların oluşmasına ve nihai olarak aşınmaya neden olabilir. Kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çeliklerin CoF değerlerindeki farklar, borür tabakasının yüzey pürüzlülüğündeki değişikliklere ve borür tabakasındaki fazlara bağlanabilir (Alkan vd., 2024: 12).

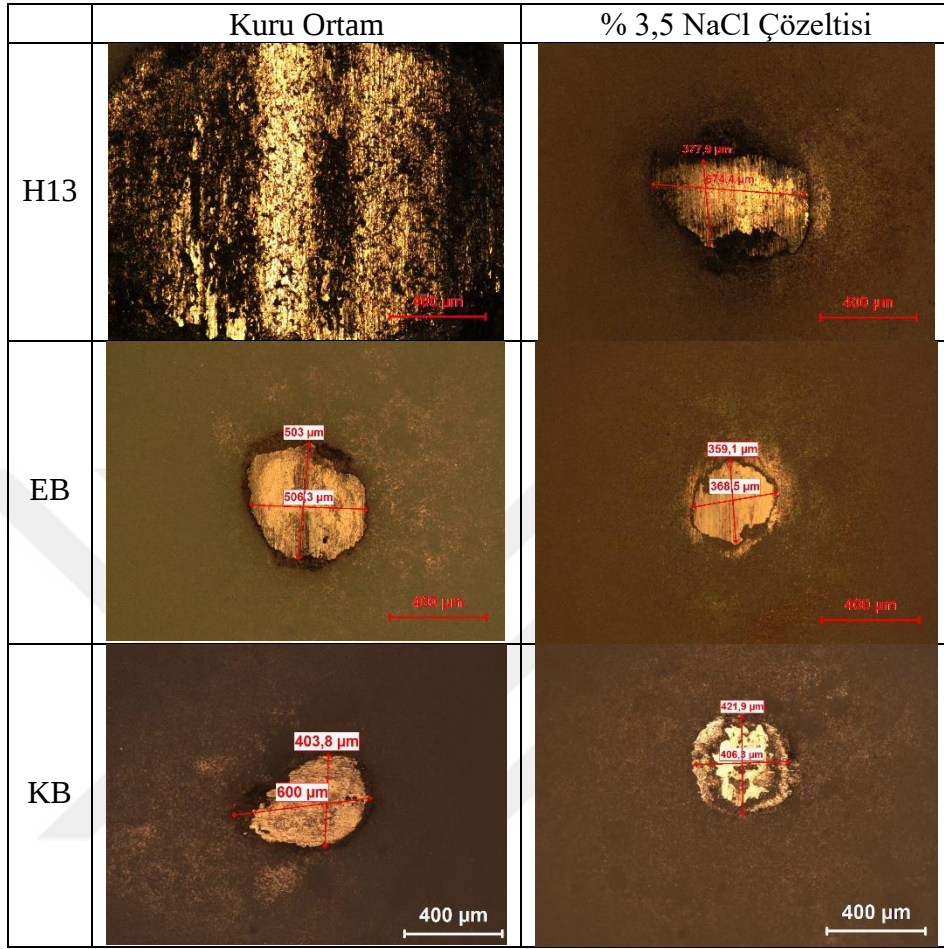


(a)



(b)

**Şekil 5.15.** İşlem Görmemiş ve Borlanmış H13 Çeliğin (a) OCP ve (b) CoF'deki Değişim.



**Şekil 5.16.** Kuru Ortam ve % 3,5 NaCl Çözeltisi Koşullarında İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğe Karşı Sürtünen  $Al_2O_3$  Bilyenin Aşınma Yüzeyleri.

H13 çeliği, borlama sonrasında dikkat çekici bir düşük sürtünme katsayısı göstermektedir. Şekil 5.17’de gösterildiği gibi, % 3,5 NaCl çözeltisi altındaki kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin kararlı sürtünme katsayısı (KSK) sırasıyla 0,1 ve 0,35’dir, bu da işlem görmemiş H13 çelikten yaklaşık % 75 ile % 64 daha düşüktür. Kuru ortam koşullarda % 45’lik bir sürtünme azalması elde edilir. Sonuç olarak, borlanmış H13 çelik kuru ortam koşullara kıyasla % 3,5 NaCl çözeltisi altında daha düşük sürtünme katsayısı sergilemektedir.

Şekil 5.18 işlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliğin aşınma hızını göstermektedir. İşlem görmemiş H13 çelik, % 3,5 NaCl çözeltisi altındaki aşınma hızının  $25,6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$  olduğu görülebilir, bu da kuru ortam koşullara kıyasla %95 daha düşüktür. Kutu ve

elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik için % 3,5 NaCl çözeltisi altındaki aşınma hızı sırasıyla  $8,38 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$  ve  $1,66 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$  olup, bu da kuru ortam koşullara kıyasla % 36 ve % 69 daha azdır. İşlem görmemiş H13 çelik ile karşılaştırıldığında, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin aşınma hızı % 3,5 NaCl çözeltisi koşullarında sırasıyla % 67 ve % 94 daha azdır. Bu nedenle, elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik % 3,5 NaCl çözeltisi koşullarında en düşük aşınma hızını göstermektedir. Şekil 5.17'deki dikkat çekici sürtünme katsayısı azalması ile birlikte, borlanmış H13 çeliğin % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde mükemmel kendi kendini yağlamaya sahip olduğu görülebilir. Bu durum, kayan yüzeyde bor içeren bir yağlayıcı film oluşumuna bağlanabilir, bu da su altında sürtünmeyi ve aşınmayı azaltır (Feng vd., 2023: 5).

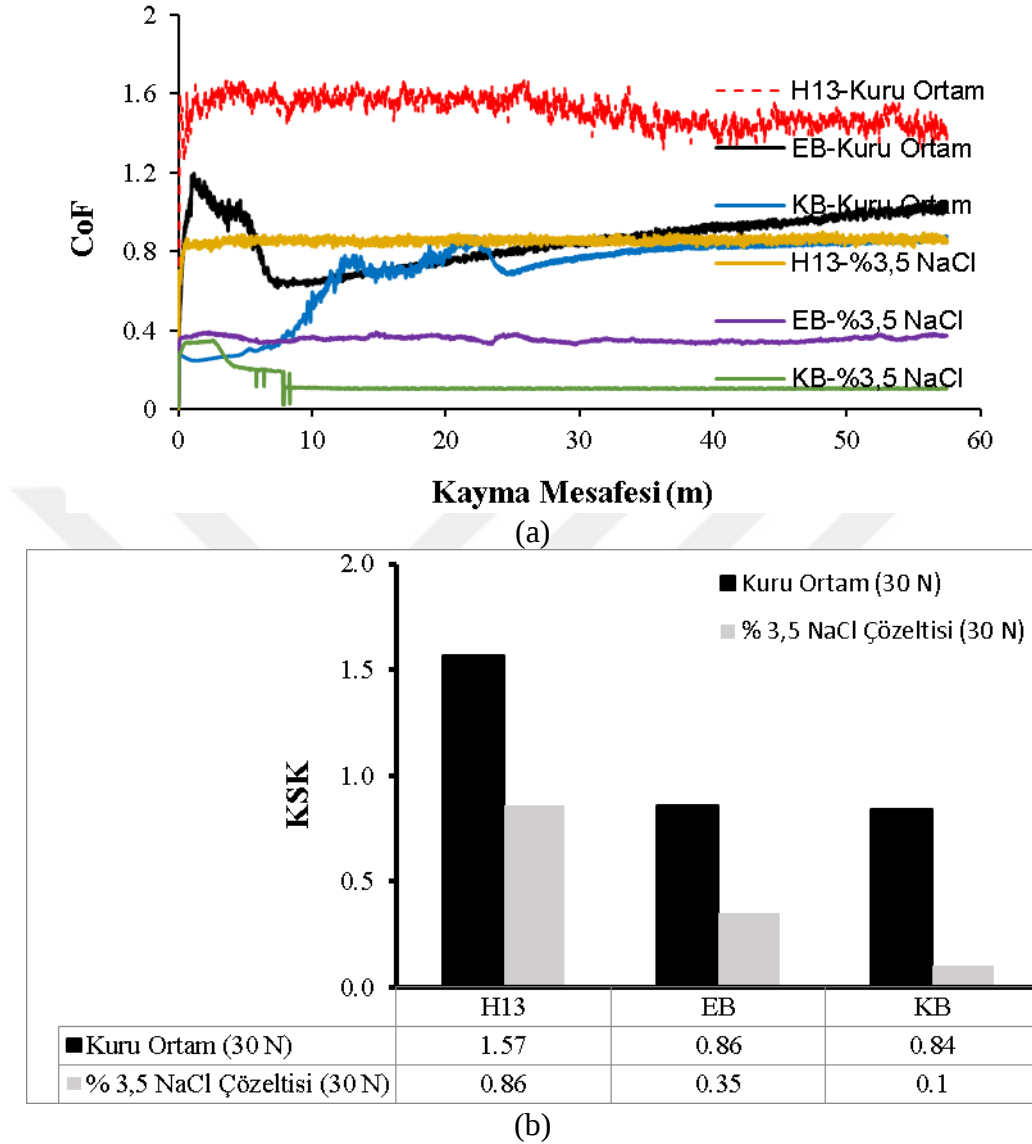
Borlanmış H13 çeliğin yüzeyinde belirgin bir aşınma ürünü oluşmamaktadır. Alaşımın sertliği ve sünekliği sürtünme sırasındaki malzeme kaybını önemli ölçüde etkilemektedir. Kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik daha yüksek sertliğe ve daha düşük plastisiteye sahip olmaları, yüzeyde aşınma ürünü oluşumunu engeller. Ayrıca, kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin aşınma izi derinliği yaklaşık  $1 \mu\text{m}$ 'dir ve bu, işlem görmemiş H13 çelikten ( $10 \mu\text{m}$ ) daha düşüktür.

Suda gerçekleştirilen sürtünme çalışmaları, borlanmış yüzeylerin yüksek temas basınçları altında temas yüzeyinde oluşan oksit filmi genellikle metal oksitler ve  $\text{B}_2\text{O}_3$ 'ten oluşmaktadır  $\text{B}_2\text{O}_3$ , su ile kendiliğinden reaksiyona girebilir ve borik asidi oluşturabilir (Feng vd., 2023: 8). İlgili reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:

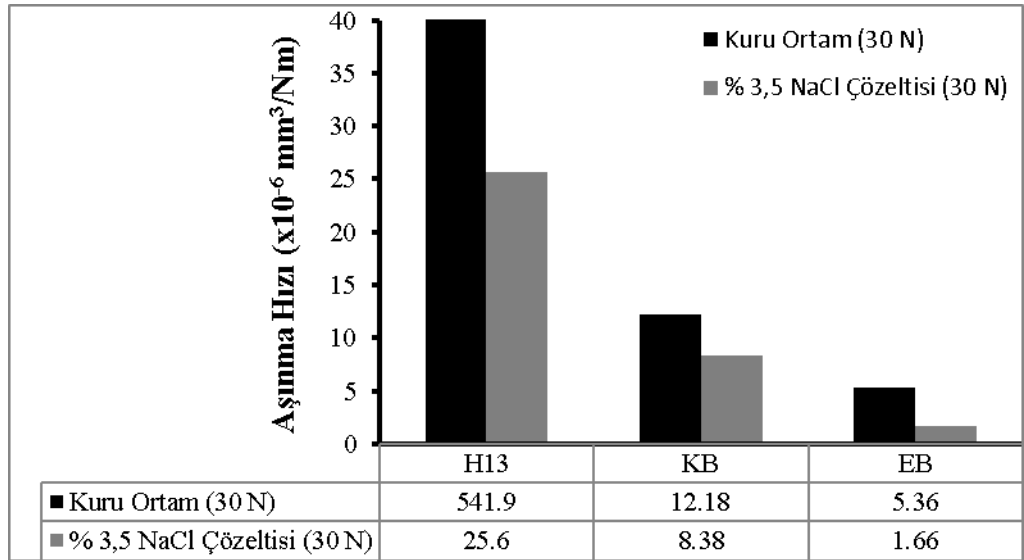


Şekil 5.19'da gösterildiği gibi, borik asit, grafit ve  $\text{MoS}_2$ 'ye benzer paralel katmanlı bir yapıya sahiptir. Paralel moleküler katmanlar, zayıf van der Waals bağlarıyla (yaklaşık  $2-20 \text{ KJ mol}^{-1}$ ) birbirine bağlıdır, her katman ise güçlü kovalent, iyonik ve hidrojen bağlarıyla (yaklaşık  $10-40 \text{ KJ mol}^{-1}$ ) bir arada tutulur. Paralel moleküler katmanlar arasındaki kayma kuvveti daha küçüktür ve borik asit oluşumu, sürtünme çiftleri arasındaki doğrudan teması daha da engeller. Bu nedenle, kayma kuvveti altında, levha benzeri borik asit, göreceli hareket yönüne paralel bir şekilde düzenlenir. Bir kez kayma gerçekleştiğinde, nispeten kolaylıkla başka bir tabakaya doğru kayabilirler, böylece CoF azaltır. Kısacası, nemli ve sulu koşullar altında borlanmış yüzey önemli bir sürtünme önleyici rol oynayacaktır. Su ortamında,

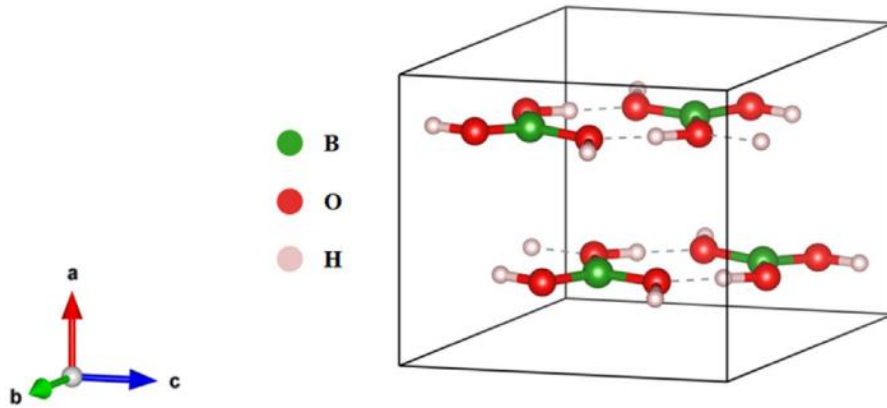
borlanmış yüzey üzerinde kendi kendini yağlama özelliklerinin gerçekleşmesini destekleyebilecek uygun bir yağlama filmi oluşacaktır.



**Şekil 5.17.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Kuru Ortam ve % 3,5 NaCl Çözeltisi Koşullarında a) CoF Eğrileri b) KSK Değerleri.



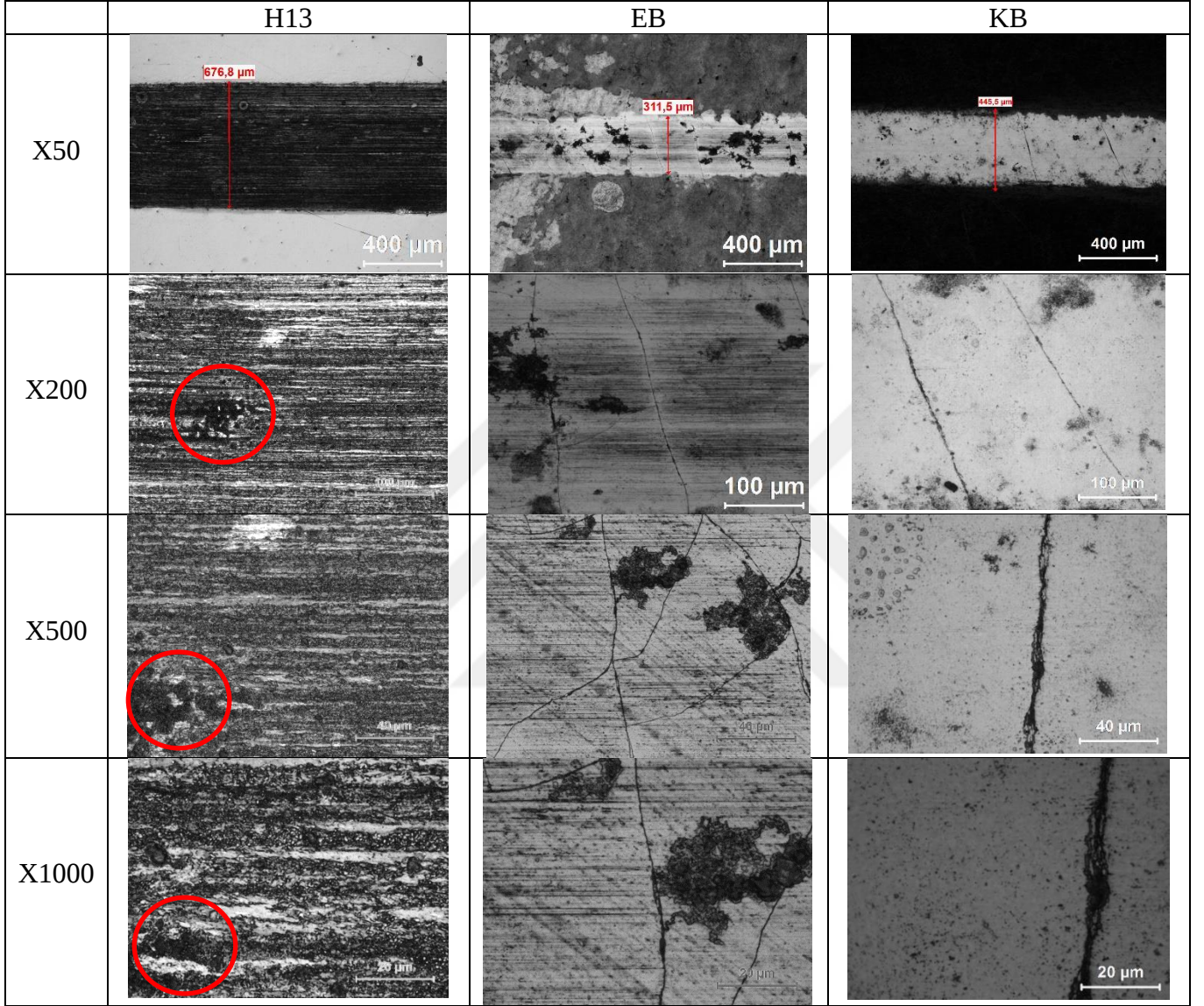
**Şekil 5.18.** İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Kuru Ortam ve % 3,5 NaCl Çözeltisi Koşullarında Aşınma Hızları.



**Şekil 5.19.** H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>'ün Katmanlı Kristal Yapısının Şematik Gösterimi (Feng vd., 2023: 12).

Şekil 5.20’de tribokorozyon deneylerinden sonra işlem görmemiş ve borlanmış H13 çeliğin OM görüntüleri verilmektedir. İşlem görmemiş H13 çelik, kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çelikten belirgin bir şekilde daha pürüzlü aşınma yüzeylerine sahiptir. İşlem görmemiş H13 çeliğin aşınma izi içerisinde sürüklenme izleri ve çukurlar (kırmızı daire içine alınan) mevcut iken kutu borlanmış H13 çeliğin yüzeyinde kayma yönüne dik çatlaklar olmasına rağmen herhangi bir korozyon ürünü mevcut değildir. Ancak elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin yüzeyinde birbiriyle kesişen çatlakların üzerinde korozyon ürünleri gözlenmiştir. Ayrıca, kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin yüzeyinde delaminasyon ve dökülme bulunmamıştır. Kutu borlanmış H13 çeliğin aksine, elektrokimyasal borlanmış

H13 çeliğin yüzeyinde hafif sürükleme izleri görülebilmektedir (Şekil 5.20). Bu durum, Şekil 5.17’de belirtilen daha yüksek CoF katkıda bulunabilir.



**Şekil 5.20.** Tribokorozyon Deneyinden Sonra İşlem Görmemiş, Kutu ve Elektrokimyasal Esaslı Borlanmış H13 Çeliğin Düşük ve Yüksek Büyütme Aşınma Yüzey Görüntüleri.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kutu ve elektrokimyasal borlanan H13 sıcak iş takım çeliğinin yapısal özellikleri, kuru ortam aşınma davranışı, korozyon ve tribokorozyon davranışı belirlenmiştir. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Mikroyapı ve mikrosertlik analiz sonuçlarına göre H13 çeliğin yüzeyinde kutu ve elektrokimyasal borlama sonucunda yüzeyde sırasıyla 1573 HV<sub>0,05</sub> ve 1805 HV<sub>0,05</sub> sergileyen 59 µm ve 25 µm kalınlığında FeB, Fe<sub>2</sub>B ve CrB'den oluşan borürlü yapı elde edilmiştir.
2. Kuru ortam koşullara kıyasla % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde kutu ve elektrokimyasal borlama sonucunda H13 çeliğin sürtünme katsayısı ve aşınma hızı işlem görmemiş H13 çeliğe göre iyileşmiştir. En düşük aşınma hızı elektrokimyasal borlama sonucunda gözlemlendi. Kutu ve elektrokimyasal borlanmış H13 çeliğin % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde sürtünme katsayısı sırasıyla 0,1 ve 0,35'dir, bu da işlem görmemiş H13 çelikten yaklaşık % 75 ile % 64 daha düşüktür. Kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik için % 3,5 NaCl çözeltisi içerisindeki aşınma hızı sırasıyla  $8,38 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$  ve  $1,66 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ Nm}^{-1}$  olup, bu da kuru ortam koşullara kıyasla % 36 ve % 69 daha azdır.
3. İşlem görmemiş H13 çelik ile karşılaştırıldığında, % 3,5 NaCl çözeltisi içerisinde kutu ve elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çeliğin aşınma hızı sırasıyla % 67 ve % 94 daha azdır. Bu nedenle, elektrokimyasal esaslı borlanmış H13 çelik % 3,5 NaCl çözeltisi koşullarında en düşük aşınma hızını göstermektedir.
4. Borlanmış yüzeyde kendi kendine yağlama performanslarının gerçekleşmesi, sürtünme reaksiyonunun neden olduğu bir tribofilm oluşumundan kaynaklanmıştır.
5. Borlama yöntemi H13 çeliğin korozyon direncini arttırdı. İyi korozyon direnci için en uygun borlama koşulu elektrokimyasal borlama olarak bulunmuştur.

## KAYNAKÇA

- Alkan, S., Günen, A., Gülen, M., & Gök, M. S.** (2024). Effect of Boriding on Tribocorrosion Behaviour of HSLA Offshore Mooring Chain Steel. *Surface and Coatings Technology*, 476, 1-18.
- Akca, B., & Çalık, A.** (2017). Characterization of Borided Pure Molybdenum Under Controlled Atmosphere. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 53, 511-517.
- Boumaali, B., Nait, A. Z., & Keddami, M.** (2021). Characterization of Bilayer (FeB/FeB) on AISI H13 Work Tool Steel. *KOM–Corrosion and Material Protection Journal*, 65 (2), 40-48.
- Campos-Silva, I., Contla-Pacheco, A. D., Figueroa-López, U., Martínez-Trinidad, J., Garduño-Alva, A., & Ortega-Avilés, M.** (2019). Sliding Wear Resistance of Nickel Boride Layers on An Inconel 718 Superalloy. *Surface and Coatings Technology*, 378, 1-13.
- Charmati, D., Tlili, S., Touhami, M. Z., Bourebia, M., & Kaleli, E. H.** (2023). Investigation of the Influence of Fe<sub>2</sub>B Layer Thickness on The Enhancement of Tribological Behavior of Borided EN-GJL-250 Cast Iron: A Comprehensive Investigation Under Optimized Lubrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-11.
- Chen, T., Koyama, S., & Yu, L.** (2021). Improvement of Mechanical, Tribological, and Friction Reduction Properties of Pure Titanium By Boriding. *Applied Sciences*, 11(11), 4862, 1-18.
- Da Costa Aichholz, S. A. C. , Meruvia, M. S., Júnior, P. C. S., & Torres, R. D.** (2018). Tribocorrosion Behavior of Boronized AISI 4140 Steel. *Surface and Coatings Technology*, 352, 265-272.
- Delgado-Brito, A. M., López-Suero, D., Ruiz-Ríos, A., García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Oseguera-Peña, J., & Campos-Silva, I.** (2019). Effect of The Diffusion Annealing Process in The Indentation Properties of Cobalt Boride Layer. *Ceramics International*, 45 (6), 7767-7777.
- Elmkhah, H., Mahboubi, F., Abdollah-Zadeh, A., & Rouhaghdam, A. S.** (2018). A New Approach to Improve the Surface Properties of H13 Steel for Metal Forming Applications by Applying the TiAlN Multi-Layer Coating. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 873-877.

**Erdoğan, A.** (2019). Investigation of High Temperature Dry Sliding Behavior of Borided H13 Hot Work Tool Steel with Nanoboron Powder. *Surface and Coatings Technology*, 357, 886-895.

**Feng, N., Wu, H., Li, P., Dong, J., Chen, Y., Hua, K., & Wang, H.** (2023). Microstructure Characterization and Robust Lubrication Performance of CoCrNi Medium Entropy Alloy with Advanced Electrochemical Boronizing Treatment. *Advanced Engineering Materials*, 25 (24), 1-12.

**Fernández-Valdés, D., Vasquez-De la Rosa, O., Rodríguez-Castro, G. A., Meneses-Amador, A., López-Liévano, A., & Ocampo-Ramírez, A.** (2021a). A Numerical-Experimental Study of AISI 316L Borided Steels Under Cyclic Contact Loading. *Surface and Coatings Technology*, 423, 1-11.

**Fernández-Valdés, D., Meneses-Amador, A., Ocampo-Ramírez, A., López-Liévano, A., Figueroa-López, U., Rodríguez-Castro, G. A., & Campos-Silva, I.** (2021b). A Numerical-Experimental Study of Wear Resistance of FeB/Fe<sub>2</sub>B Systems. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 839-849.

**García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Figueroa-López, U., & Guevara-Morales, A.** (2021). Development of Tribological Maps on Borided AISI 316L Stainless Steel Under Ball-On-Flat Wet Sliding Conditions. *Tribology International*, 163, 1-14.

**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 and Coatings Technology*, 328, 54-62.

**Günen, A., Karahan, İ. H., Karakaş, M. S., Kurt, B., Kanca, Y., Çay, V. V., & Yıldız, M.** (2020). Properties and Corrosion Resistance of AISI H13 Hot-Work Tool Steel with Borided B<sub>4</sub>C Powders. *Metals and Materials International*, 26, 1329-1340.

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

**Kariofillis, G. K., Kiourtsidis, G. E., & Tsipas, D. N.** (2006). Corrosion Behavior of Borided AISI H13 Hot Work Steel. *Surface and Coatings Technology*, 201 (1-2), 19-24.

**Kartal Sireli, G., Yuce, H., Arslan, M., Karimzadehkhoei, M., & Timur, S.** (2023). Improving the Surface Performance of Discarded AISI T1 Steel by Cathodic Reduction and

Thermal Diffusion-Based Boriding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-11.

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

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

**Kayali, Y., Barut, N., Talaş, Ş., & Büyüksağış, A.** (2018). Investigation of Corrosion and Wear Behavior of Borided AISI P20 Steel in Micro-Wave Furnace. *Materials Research Express*, 6(1), 1-22.

**Krelling, A. P., Milan, J. C. G., & Da Costa, C. E.** (2015). Tribological Behaviour of Borided H13 Steel with Different Boriding Agents. *Surface Engineering*, 31 (8), 581-587.

**Kulka, M., & Pertek, A.** (2003). Microstructure and Properties of Borided 41Cr4 Steel After Laser Surface Modification with Re-Melting. *Applied Surface Science*, 214 (1-4), 278-288.

**Kulka, M., Makuch, N., & Pertek, A.** (2013). Microstructure and Properties of Laser-Borided 41Cr4 Steel. *Optics & Laser Technology*, 45, 308-318.

**Kusmanov, S. A., Tambovskiy, I. V., Sevostyanova, V. S., Savushkina, S. V., & Belkin, P. N.** (2016). Anode Plasma Electrolytic Boriding of Medium Carbon Steel. *Surface and Coatings Technology*, 291, 334-341.

**Mariani, F. E., Takeya, G. S., Casteletti, L. C., Lombardi, A. N., & Totten, G. E.** (2017). Kinetics of Layers Produced on Niobium by Salt Bath Boriding. *Materials Performance and Characterization*, 6(4), 467-474.

**Miyamoto, J., & Abraha, P.** (2019). The Effect of Plasma Nitriding Treatment Time on The Tribological Properties of The AISI H13 Tool Steel. *Surface and Coatings Technology*, 375, 15-21.

**Murathan, Ö., Kocatepe, K., & Erdogan, M.** (2022). Effect of Ultra-High Boron Additions on Microstructure and Mechanical Properties on High Chromium Steel. *Materials Testing*, 64(12), 1836-1842.

- Nair, F., Zafar, H. M. N., Cerit, A. A., & Karamış, M. B.** (2022). Analyzing the Influence of Simultaneously Austenitization and Multi-Directional Boriding on the Surface and Subsurface of H13 Tool Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(12), 9791-9801.
- Padikova, F., Nedeva, D., Dunchev, V., Stoyanov, B., Ormanova, M., Nedyalkov, N., & Valkov, S.** (2023). Fabrication and Characterization of Titanium Borides by Electron Beam Surface Alloying. *Coatings*, 13(11), 1941, 1-14.
- Pomelnikova, A. S., Shipko, M. N., & Stepovich, M. A.** (2011). Features of Structural Changes due to the Formation of the Boride Crystal Structure in Steels. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 5(2), 298-304.
- Rahmatian, B., Ghasemi, H. M., Sohi, M. H., & De Baets, P.** (2023). Tribocorrosion and Corrosion Behavior of Double Borided Layers Formed on Ti-6Al-4V Alloy: An approach for applications to bio-implants. *Corrosion Science*, 210, 1-18.
- Riccardo, G., Rivolta, B., Gorla, C., & Concli, F.** (2021). Cyclic Behavior and Fatigue Resistance of AISI H11 and AISI H13 Tool Steels. *Engineering Failure Analysis*, 121, 1-13.
- Sabuz, E. H., Noor-A-Alam, M., Haider, W., & Shabib, I.** (2023). Improving the Mechanical and Electrochemical Performance of Additively Manufactured 8620 Low Alloy Steel via Boriding. *Corrosion and Materials Degradation*, 4(4), 623-643.
- Shinde, T., & Dhokey, N. B.** (2017). Influence of Carbide Density on Surface Roughness And Quasi-Stable Wear Behaviour of H13 Die Steel. *Surface Engineering*, 33(12), 944-952.
- Sista, V., Kahvecioglu, O., Eryilmaz, O. L., Erdemir, A., & Timur, S.** (2011). Electrochemical Boriding and Characterization of AISI D2 Tool Steel. *Thin Solid Films*, 520 (5), 1582-1588.
- Tarakci, M., Gencer, Y., & Calik, A.** (2010). The Pack-Boronizing Of Pure Vanadium Under A Controlled Atmosphere. *Applied Surface Science*, 256(24), 7612-7618.
- Tavakoli, H., & Khoie, S. M.** (2010). An Electrochemical Study of The Corrosion Resistance of Boride Coating Obtained by Thermo-Reactive Diffusion. *Materials Chemistry and Physics*, 124(2-3), 1134-1138.
- Telasang, G., Majumdar, J. D., Padmanabham, G., & Manna, I.** (2015). Wear and Corrosion Behavior of Laser Surface Engineered AISI H13 Hot Working Tool Steel. *Surface and Coatings Technology*, 261, 69-78.

**Toktaş, G., & Korkmaz, S.** (2023). Indentation Fracture Toughness of Boronized Unalloyed and Alloyed Ductile Iron. *Materials Chemistry and Physics*, 296, 1-7.

**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., & Keddari, M.** (2019). Investigation of Tribological Behaviour and Diffusion Model of Fe<sub>2</sub>B Layer Formed by Pack-Boriding on SAE 1020 Steel. *Surface and Coatings Technology*, 377, 1-12.

**Usta, M., Ozbek, I., Ipek, M., Bindal, C., & Ucisik, A. H.** (2005). The Characterization of Borided Pure Tungsten. *Surface and Coatings Technology*, 194 (2-3), 330-334.

**Vera Cárdenas, E. E., Lewis, R., Martínez Pérez, A. I., Bernal Ponce, J. L., Pérez Pinal, F. J., Domínguez, M. O., & Rivera Arreola, E. D.** (2016). Characterization and Wear Performance of Boride Phases over Tool Steel Substrates. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(2), 1-10.

**Yang, H., Wu, X., Cao, G., & Yang, Z.** (2016). Enhanced Boronizing Kinetics and High Temperature Wear Resistance of H13 Steel With Boriding Treatment Assisted by Air Blast Shot Peening. *Surface and Coatings Technology*, 307, 506-516.

**Zhang, D., Li, Y., Du, X., Fan, H., & Gao, F.** (2022). Microstructure and Tribological Performance of Boride Layers on Ductile Cast Iron Under Dry Sliding Conditions. *Engineering Failure Analysis*, 134, 1-15.

**Zheng, Q., Mei, S., Xiao, Z., Hu, Z., Chen, Z., Xu, Q., ... & Lygdenov, B.** (2023). Tribological, oxidation and corrosion properties of ceramic coating on AISI H13 steel by rare earth-Cr composite boronizing. *Ceramics International*. 1-17.