



**BORLANMIŞ 17CrNiMo6 ÇELİĞİN  
AŞINMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK  
ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hüseyin ŞEN**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2023**

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BORLANMIŞ 17CrNiMo6 ÇELİĞİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ**  
**DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK ARAŞTIRILMASI**

**Hüseyin ŞEN**

**Danışman**

**Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEMMUZ 2023**

## TEZ ONAY SAYFASI

Hüseyin ŞEN tarafından hazırlanan “Borlanmış 17CrNiMo6 Çeliğin Aşınma Davranışlarının Deneysel ve Nümerik Olarak Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13 / 07 / 2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

**Başkan** : Prof.Dr. Kubilay ASLANTAŞ  
AKÜ, Teknoloji Fakültesi

**Üye** : Dr.Öğr.Üyesi Fatih ÇOLAK  
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER  
AKÜ, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun  
..... /..... /..... tarih ve  
..... Sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....  
Prof. Dr. İbrahim EROL  
Enstitü Müdürü

**BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI**  
**Afyon Kocatepe Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**Beyan ederim.**

**13 / 07 / 2023**

**Hüseyin ŞEN**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BORLANMIŞ 17CrNiMo6 ÇELİĞİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK ARAŞTIRILMASI

Hüseyin ŞEN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Bu çalışmada, borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin aşınma davranışları deneysel ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. İncelemeler için 17CrNiMo6 çeliğinden Ø30x10 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, zımparalama işlemlerinden geçirilerek Alümina solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır. Borlama işlemi, Ekabor-II bor tozu kullanılarak elektrik rezistanslı bir fırında 900, 950 ve 1000°C sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Borlanan numunelerin borür tabaka kalınlıkları Nikon MA100 marka optik mikroskop ile ölçülmüştür.

XRD analizi sonucunda borlama işlemiyle FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları elde edilmiştir. Borür tabaka kalınlıkları ise borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak 27-180 µm arasında değişmektedir. Mikro sertlik testleri Metkon Duroline M4 marka test cihazıyla 25 gram yük uygulanarak yapılmış ve borlanmış numunelerin mikro sertlik değerleri 1093-1483 HV<sub>0,025</sub> aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. Borlanmamış numunenin sertliği ise 260 HV<sub>0,025</sub> olarak belirlenmiştir. Aşınma testleri, kuru ortamda, oda sıcaklığında, 10 N yük altında, 0,3 m/s kayma hızında ve 500 metre mesafede bilye disk cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Aşınma sonucunda oluşan yüzeyler SEM ve EDS analizleriyle incelenmiştir. Borlama işleminin 17CrNiMo6 çeliğinin aşınma direncini artırdığı ve borlanmış ile borlanmamış çeliğin aşınma oranlarının  $4,24 \times 10^{-6}$ - $90 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm arasında değiştiği belirlenmiştir. Ayrıca, borlanmış çeliğin aşınma sırasında meydana gelen temas gerilmelerinin gözlemi için sonlu elemanlar analizi ANSYS yazılımıyla yapılmıştır. Tribotest sırasında meydana gelen yüzey ve yüzey altı gerilmelerinin

deneysel çalışmalardan elde edilen katsayılar üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

**2023, xiii + 92 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** 17CrNiMo6, Borlama, Aşınma, Mikro sertlik, Sürtünme katsayısı,  
Sonlu elemanlar metodu.



## **ABSTRACT**

M.Sc. Thesis

### **EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIORS OF BORONIZED 17CrNiMo6 STEEL**

Hüseyin ŞEN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Asst. Prof. Şükrü ÜLKER

In this study, the wear behavior of boronized 17CrNiMo6 steel was investigated using experimental and finite element methods. Ø30X10 mm samples were prepared from 17CrNiMo6 steel for the investigations. The samples were subjected to grinding processes and polished using Alumina solution with grit sizes of 240, 400, 600, and 800. The boronizing process was carried out in a solid medium using commercial Ekabor-II boron powder in an electric resistance furnace at temperatures of 900, 950, and 1000°C for 2, 4, and 6 hours, respectively. The thicknesses of the boride layers on the boronized samples were measured using a MA100 optical microscope.

XRD analysis revealed the formation of FeB and Fe<sub>2</sub>B phases as a result of the boronizing process. The thickness of the boride layers varied between 27 and 180 µm depending on the boronizing temperature and duration. Microhardness tests were conducted using a Metkon Durolin M4 test device with a 25-gram load, and the microhardness values of the boronized samples ranged from 1093 to 1483 HV<sub>0.025</sub>. The hardness of the untreated sample was determined to be 260 HV<sub>0.025</sub>. Wear tests were performed using a ball-on-disk apparatus under dry conditions at room temperature with a 10 N load and sliding speeds of 0,3 m/s over a distance of 500 meters. The worn surfaces of the 17CrNiMo6 steel samples were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray energy-dispersive spectroscopy (EDS). It was observed that the boronizing process increased the wear resistance of the 17CrNiMo6 steel, and the wear rates of the boronized

and untreated samples varied between  $4,24 \times 10^{-6}$ - $90 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/Nm. Furthermore, finite element analysis using ANSYS software was conducted to observe the contact stresses during the wear of the boronized steel. Two-dimensional finite element models were employed, and the influence of experimentally derived coefficients on the surface and subsurface stresses was investigated.

**2023, xiii + 92 pages**

**Keywords:** 17CrNiMo6, Boriding, Micro-hardness, Friction coefficient, Wear, Finite Elements Method



## TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın sonuçlarına ulaşmamda büyük bir katkısı olan tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER'e içten teşekkürlerimi sunarım. Kendisinin deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazım aşamasında yaptığı değerli öneri ve katkılar sayesinde bu çalışma başarıyla tamamlanmıştır. Aynı şekilde, bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Abdurrahman KARABULUT'a da teşekkür etmek istiyorum. Son olarak, analiz çalışmalarında bana büyük destek ve yardımlar sağlayan Atılğan ÖZŞİMŞEK'e teşekkürlerimi iletmek istiyorum. Kendisinin uzmanlığı ve katkıları, araştırmanın analiz sürecinin başarılı bir şekilde yürütülmesine yardımcı oldu. Bu çalışmanın tamamlanmasında emeği geçen herkese bir kez daha teşekkür ederim.

Araştırma süreci boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür etmek istiyorum. Onların destekleri, motivasyonumun yüksek kalmasını sağladı ve bu çalışmaya odaklanmamı kolaylaştırdı. Ailemin sürekli yanımda olduğunu bilmek, benim için büyük bir güç kaynağı oldu. Bu nedenle, araştırma boyunca bana sağladıkları destekler için aileme içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Hüseyin ŞEN  
Afyonkarahisar 2023

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                                   | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                        | i     |
| ABSTRACT .....                                                    | iii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                    | v     |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....                                           | vi    |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....                              | viii  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                                             | ix    |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....                                            | xii   |
| RESİMLER DİZİNİ .....                                             | xiii  |
| 1 . GİRİŞ.....                                                    | 1     |
| 2 . LİTERATÜR BİLGİLERİ .....                                     | 6     |
| 2.1 Borlama ve Özellikleri .....                                  | 6     |
| 2.2 Borlamada Kullanılan Yöntemler .....                          | 8     |
| 2.2.1 Katı Ortamda Borlama .....                                  | 9     |
| 2.2.2 Sıvı Ortamda Borlama.....                                   | 11    |
| 2.2.3 Gaz Ortamda Borlama.....                                    | 12    |
| 2.2.4 Alternatif Akım ile Borlama.....                            | 13    |
| 2.2.5 Plazma Pasta Borlama .....                                  | 14    |
| 2.3 Borlama İşleminin Avantajları.....                            | 15    |
| 2.4 Borlama İşleminin Dezavantajları .....                        | 16    |
| 2.5 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları .....         | 18    |
| 2.6 Borlama ile İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar .....            | 18    |
| 2.7 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Dezavantajları ..... | 21    |
| 3 . MATERYAL ve METOT .....                                       | 22    |
| 3.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler.....                        | 22    |
| 3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....                           | 23    |
| 3.3 Deney Parametreleri.....                                      | 28    |
| 3.4 Metalografik İşlemler.....                                    | 29    |
| 3.5 Tabaka Kalınlık Değeri Ölçümleri.....                         | 29    |
| 3.6 Sertlik Değeri Ölçümleri.....                                 | 29    |
| 3.7 XRD Analizi .....                                             | 29    |
| 3.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi .....              | 30    |

|                                                                                                   |                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 3.9 Aşınma Deneyleri .....                                                                        | 30                                      |
| 3.10 Sonlu Elemanlar Analizi .....                                                                | 31                                      |
| 3.11 Nümerik Analiz.....                                                                          | 31                                      |
| 3.12 Sınır Şartları ve Yüklemeler .....                                                           | 32                                      |
| 3.12.1 Sonlu Elemanlar Metodun Modeli .....                                                       | 33                                      |
| 4 . BULGULAR ve TARTIŞMA .....                                                                    | 36                                      |
| 4.1 Borlanmış 17CrNiMo6 Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu.....                                     | 36                                      |
| 4.2 Semantasyon Çeliğinin Borlanması Sonucunda Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları .....        | 41                                      |
| 4.2.1 Bor Tabakası SEM Mikroyapısı ve EDX Analizleri.....                                         | 41                                      |
| 4.3 Borlanmış Semantasyon Çeliğinin X-Işınları Difraksiyon Analizi .....                          | 57                                      |
| 4.4 Borlanmış Semantasyon Çeliğinin Mikro Sertlik Sonuçları.....                                  | 59                                      |
| 4.5 Borlanmış Semantasyon Çeliğinin Aşınma Özellikleri .....                                      | 64                                      |
| 4.5.1 Aşınma Deneyi Bulguları .....                                                               | 64                                      |
| 4.5.2 Aşınma Analizi.....                                                                         | 66                                      |
| 4.6 Semantasyon Çeliğinin Borlanması ile İlgili Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapılan Analizler..... | 73                                      |
| 4.6.1 Ağ örgüsü çalışması .....                                                                   | 73                                      |
| 4.7 Analiz Sonuçları.....                                                                         | 74                                      |
| 5 . SONUÇLAR.....                                                                                 | 85                                      |
| 6 . KAYNAKLAR.....                                                                                | 87                                      |
| 6.1 İnternet Kaynakları .....                                                                     | 91                                      |
| ÖZGEÇMİŞ.....                                                                                     | <b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b> |

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

|                    |                  |
|--------------------|------------------|
| $\mu\text{m}$      | Mikrometre       |
| $^{\circ}\text{C}$ | Santigrat derece |
| N                  | Newton           |
| $\varnothing$      | Çap              |
| %                  | Yüzde            |

### Kısaltmalar

|                                   |                                |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Al                                | Alüminyum                      |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$           | Alüminyum oksit                |
| AISI                              | Amerikan demir çelik enstitüsü |
| $\text{B}_4\text{C}$              | Bor karbür                     |
| C                                 | Karbon                         |
| Cr                                | Krom                           |
| CrB                               | Krom bor                       |
| EDS                               | Enerji dağılım spektrometrisi  |
| FeB                               | Demir bor                      |
| $\text{Fe}_2\text{B}$             | Demir (II) bor                 |
| Mo                                | Molibden                       |
| Mg                                | Magnezyum                      |
| $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ | Susuz boraks                   |
| NaBF                              | Sodyum bor florür              |
| NaF                               | Sodyum florür                  |
| Ni                                | Nikel                          |
| OM                                | Optik mikroskop                |
| SAE                               | Sementasyon çeliği             |
| SEM                               | Taramalı elektron mikroskobu   |
| SiC                               | Silisyum karbür                |
| VSD                               | (Vickers Sertlik Değeri)       |
| W                                 | Volfram (tungsten)             |
| XRD                               | X-ışını kırınımı               |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                                                                          | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 2.1 Demir-bor diyagramı.....                                                                                                                       | 7     |
| Şekil 2.2 Borlama sonucunda, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkisi a) İlave sertleştirme b) Tuz banyosunda c) Borlama.....                                    | 8     |
| Şekil 2.3 Katı borlama yöntemi.....                                                                                                                      | 10    |
| Şekil 3.1 Sınır şartları ve yüklemeler .....                                                                                                             | 32    |
| Şekil 4.1 900 °C sıcaklıkta borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin optik mikroskop altında incelenen kesit mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat .....  | 38    |
| Şekil 4.2 950 °C sıcaklıkta borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin optik mikroskop altında incelenen kesit mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat .....  | 39    |
| Şekil 4.3 1000 °C sıcaklıkta borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin optik mikroskop altında incelenen kesit mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat ..... | 40    |
| Şekil 4.4 Borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin borlama sıcaklığı ve saate bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişimi. ....                                     | 41    |
| Şekil 4.5 950 °C'de a)2 saat, b)4 saat, c)6 saatte borlanmış sementasyon çeliğinin bor tabakasının SEM mikro yapıları. ....                              | 42    |
| Şekil 4.6 900°C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.....                                               | 43    |
| Şekil 4.7 900 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.....                                                 | 43    |
| Şekil 4.8 950°C'de 2 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.....                                               | 46    |
| Şekil 4.9 950 °C'de 2 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.....                                                 | 46    |
| Şekil 4.10 950°C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.....                                              | 49    |
| Şekil 4.11 950 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.....                                                | 49    |
| Şekil 4.12 950°C'de 6 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları belirlenmiştir. ....                              | 52    |
| Şekil 4.13 950 °C 6 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.....                                                  | 52    |
| Şekil 4.14 1000 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.....                                            | 54    |
| Şekil 4.15 1000 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.....                                               | 54    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.16</b> 900 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saat borlanan numunelerin XRD analizi.....                                                                                                                                                                             | 57 |
| <b>Şekil 4.17</b> 950 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin XRD analizi.....                                                                                                                                                                           | 58 |
| <b>Şekil 4.18</b> 1000 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin XRD analizi...                                                                                                                                                                            | 59 |
| <b>Şekil 4.19</b> 900 °C’de 4 saatte borlanmış numune üzerinde mikro sertlik izleri. ....                                                                                                                                                                              | 59 |
| <b>Şekil 4.20</b> 900 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan sementasyon çeliğinin mikro sertlik verileri. ....                                                                                                                                                               | 60 |
| <b>Şekil 4.21</b> 950 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan sementasyon çeliğinin mikro sertlik verileri. ....                                                                                                                                                               | 61 |
| <b>Şekil 4.22</b> 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan sementasyon çeliğinin mikro sertlik verileri. ....                                                                                                                                                              | 62 |
| <b>Şekil 4.23</b> 900, 950, 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin mikro sertlik grafiği. ....                                                                                                                                                               | 63 |
| <b>Şekil 4.24</b> Borlanmış ve işlemsiz numunenin sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve aşınma hacmi grafiği.....                                                                                                                                                         | 65 |
| <b>Şekil 4.25</b> 900 °C’de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat .....                                                                                                                                                       | 66 |
| <b>Şekil 4.26</b> 950 °C’de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat .....                                                                                                                                                       | 67 |
| <b>Şekil 4.27</b> 1000 °C’de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat .....                                                                                                                                                      | 69 |
| <b>Şekil 4.28</b> a) 900°C’de b) 950°C’de ve c) 1000 °C’de 2 saat, sementasyon çeliğin SEM aşınma izi görüntüleri. ....                                                                                                                                                | 70 |
| <b>Şekil 4.29</b> a) 900°C’de b) 950°C’de ve c) 1000 °C’de 4 saat, sementasyon çeliğin SEM aşınma izi görüntüleri. ....                                                                                                                                                | 71 |
| <b>Şekil 4.30</b> a) 900°C’de b) 950°C’de ve c) 1000 °C’de 6 saat, sementasyon çeliğin SEM aşınma izi görüntüleri. ....                                                                                                                                                | 72 |
| <b>Şekil 4.31</b> Ağ örgüsü yapısı. ....                                                                                                                                                                                                                               | 73 |
| <b>Şekil 4.32</b> Ağ örgüsünün yakınlaştırılmış hali. ....                                                                                                                                                                                                             | 74 |
| <b>Şekil 4.33</b> 900 °C’de 2 saat borlanan numune için a) İlk temas b) Hareket halindeki, 900 °C’de 4 saat borlanan numune için c) İlk temas d) Hareket halindeki, 900 °C’de 6 saat borlanan numune için e) İlk temas f) Hareket halindeki, Von-Mises analizleri..... | 76 |
| <b>Şekil 4.34</b> 950 °C’de 2 saat borlanan numune için a) İlk temas b) Hareket halindeki, 950 °C’de 4 saat borlanan numune için c) İlk temas d) Hareket halindeki, 950 °C’de 6 saat borlanan numune için e) İlk temas f) Hareket halindeki, Von-Mises analizleri..... | 77 |
| <b>Şekil 4.35</b> 1000 °C’de 2 saat borlanan numune için a) İlk temas b) Hareket halindeki, 1000 °C’de 4 saat borlanan numune için c) İlk temas d) Hareket halindeki,                                                                                                  |    |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1000 °C’de 6 saat borlanan numune için e) İlk temas f) Hareket halindeki, Von-Mises analizleri. ....  | 78 |
| <b>Şekil 4.36</b> İşlemsiz numunenin a) İlk temas b) Hareket halindeki, Von-Mises analizleri. ....    | 79 |
| <b>Şekil 4.37</b> Borlanmış numunelerin Von-Mises grafiği. ....                                       | 79 |
| <b>Şekil 4.38</b> 900, 950 ve 1000 °C’de 2 saatte, 4 saatte ve 6 saatte Von-Mises grafiği. ....       | 80 |
| <b>Şekil 4.39</b> İşlemsiz numunelerin Von-Mises grafiği. ....                                        | 81 |
| <b>Şekil 4.40</b> 900, 950 ve 1000 °C’de 2 saatte, 4 saatte ve 6 saatte Von-Mises zaman grafiği. .... | 81 |
| <b>Şekil 4.41</b> İşlemsiz numunelerin Von-Mises zaman grafiği. ....                                  | 82 |
| <b>Şekil 4.42</b> 900, 950 ve 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte ortaya çıkan aşınma hacimleri grafiği. .... | 83 |
| <b>Şekil 4.43</b> İşlemsiz numunenin aşınma hacmi grafiği. ....                                       | 84 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                | Sayfa |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Çizelge 1.1 Bor elementinin özellikleri.....                                                   | 1     |
| Çizelge 1.2 Farklı ülkelerdeki bor rezervleri.....                                             | 2     |
| Çizelge 1.3 17CrNiMo6 sementasyon çeliğin ısıtılma işlem özellikleri.....                      | 3     |
| Çizelge 1.4 17CrNiMo6 sementasyon çeliklerin bileşim özellikleri. ....                         | 4     |
| Çizelge 1.5 17CrNiMo6 sementasyon çeliğin Jominy değeri tablosu. ....                          | 4     |
| Çizelge 1.6 17CrNiMo6 Çeliğinin kullanım yerleri.....                                          | 5     |
| Çizelge 1.7 17CrNiMo6 çeliğin mekanik özellikleri .....                                        | 5     |
| Çizelge 2.1 Ekabor II tozun malzeme özelliği .....                                             | 10    |
| Çizelge 2.2 Sıvı ortamda borlama yönteminde kullanılan esas bor kaynakları ve özellikleri..... | 11    |
| Çizelge 2.3 Gaz halindeki bor bileşiklerinin bazı özellikleri .....                            | 13    |
| Çizelge 3.1 17CrNiMo6 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).....                         | 22    |
| Çizelge 3.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler. ....                                | 28    |
| Çizelge 4.1 Aşınma hacmi (mm <sup>3</sup> ) .....                                              | 84    |

## RESİMLER DİZİNİ

|                                                                                 | Sayfa |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------|
| <b>Resim 3.1</b> Ø30 mm çaplarındaki DIN 17 CrNiMo6 sementasyon çeliği. ....    | 22    |
| <b>Resim 3.2</b> CNC tornalama tezgâhı. ....                                    | 23    |
| <b>Resim 3.3</b> 3D numunenin görünümü. ....                                    | 23    |
| <b>Resim 3.4</b> Isıl işlem fırını. ....                                        | 24    |
| <b>Resim 3.5</b> Numunenin zımparalama ve parlatma metalografik cihazı. ....    | 24    |
| <b>Resim 3.6</b> Optik mikroskop cihazı. ....                                   | 25    |
| <b>Resim 3.7</b> Mikro sertlik ölçüm cihazı. ....                               | 25    |
| <b>Resim 3.8</b> X-ışınları Difraksiyon Analiz Cihazı (XRD). ....               | 26    |
| <b>Resim 3.9</b> Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ....                        | 26    |
| <b>Resim 3.10</b> Aşınma cihazının görüntüsü. ....                              | 27    |
| <b>Resim 3.11</b> Aşınma deney programı. ....                                   | 30    |
| <b>Resim 3.12</b> Rugosimeter cihazından alınan aşınma bölgesinin grafiği. .... | 31    |
| <b>Resim 3.13</b> Numune ve bilye iki boyutlu olarak modellenmesi ....          | 33    |
| <b>Resim 3.14</b> Ağ örgüsü oluşumu. ....                                       | 33    |
| <b>Resim 3.15</b> Mesh görünümü ....                                            | 34    |
| <b>Resim 3.16</b> Parametrelerin tanımlanması ....                              | 34    |
| <b>Resim 3.17</b> Yük uygulama işlemi ....                                      | 35    |
| <b>Resim 3.18</b> Archard wear modelinin uygulanması ....                       | 35    |

## 1. GİRİŞ

Metal borür tozları meydana geldikleri önemli özellikler sonucunda (sertlik, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek çizilme ve çoğunlukla asitlere karşı savunma) yaşantımızda karşılaşmamız yüksektir (Usta 2006).

Borlama ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından keşfedilmiştir. Bu yöntem Metallerin sürtünme, aşınma ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uygulanan bir yüzey işlemidir. Borlama işlemi sonucunda uygulanan yüzeyde tek ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) ya da çok fazlı ( $\text{Fe}_2\text{B}+\text{FeB}$ ) tabakalar oluşur. Bu tabakalar, metallerin özelliklerini değiştirerek sertlik, dayanıklılık ve aşınma dayanımını artırır. Uygulama yapılan metal yüzeyinde bor atomları ısı ve elektrik enerjisi ile etkileşime girerek borür tabakasını meydana getirmektedir (Türkmen 2018, Sinha 1991).

Bor, periyodik tablonun 3A grubunda bulunan yarı iletkenidir. Diğer ismiyle sembolü "B" dir. Doğada saf olarak bulunması çok nadirdir; çoğunlukla bileşikler halinde bulunmaktadır. En yaygın bileşiği boraks olarak bilinir. Bor elementi, 1808 yılında Louis Joseph Gay-Lussac ve Louis Jacques Thénard tarafından keşfedilmiştir. Bor Çizelge 1.1’de bor elementinin özellikleri içermektedir (Sarı 2019).

**Çizelge 1.1** Bor elementinin özellikleri.

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Sembolü                   | B                      |
| Elementin Atom Numarası   | 5                      |
| Atom Kütlesi (ma)         | 10.811 g/mol           |
| Elementin Elektron Sayısı | 5                      |
| Elementin Hali            | Yarı Metal             |
| Tablodaki Periyodik Grubu | 3A                     |
| Yoğunluk (d)              | 2.34 g/cm <sup>3</sup> |
| Erime Noktası             | 2076 °C                |
| Kaynama Noktası           | 3927 °C                |
| Oda Koşulundaki Hali      | Katı                   |
| Görünümü                  | Siyah-Kahverengi       |

Dünyada ülkemiz bor rezervine en çok sahip durumundadır. Günümüzde bor üretiminin %18’ini Türkiye, %70’ini ABD ve %12’ini diğer ülkeler sağlamaktadır. Diğer ürün ve borun %70’ini Avrupa, Japonya, Rusya ve %30’unu ABD tüketmektedir (Sarı 2019).

Malzemenin borlama işlemi termokimyasal difüzyon işlemidir. Termo-kimyasal difüzyon, malzemelerin yüzeyinde kimyasal farklılığa neden olduğu için, yüzey özellikleri üzerinde fazla etkiye sahiptir. Bu sebeple, bu aşama, malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek kullanılan önemli yöntemdir. Çizelge 1.2’ de Farklı ülkelerdeki bor rezervleri verilmiştir.

**Çizelge 1.2** Farklı ülkelerdeki bor rezervleri (Balart 2002).

| Ülkeler          | Rezervler (Milyon Ton) | (%) Oranı |
|------------------|------------------------|-----------|
| Türkiye          | 803                    | 63        |
| A.B.D            | 209                    | 17,1      |
| Rusya            | 136                    | 11,5      |
| Şili             | 41                     | 3,2       |
| Çin Halk         | 36                     | 2,8       |
| Peru             | 19                     | 1,5       |
| Bolivya          | 9                      | 0,7       |
| Arjantin         | ~1                     | ~0,2      |
| Toplam<br>Miktar | 1254                   | 100       |

Birçok araştırmacılar bor bileşikleri önemli özelliklere sahip olduklarından dolayı bor üzerinde durmaktadır (Goeuriot 1981). Borlanmış malzemelerde, metal ve alaşımların mekanik zorlama işlemiyle, korozyon gibi ömrünü etkileyen dış tepkimelere karşı malzemenin direnç ömrünü artıran termo-kimyasal bir yüzey modifikasyon prosesidir. Borlanmış malzemenin yüzey sertliğini ve aşınma dayanaklığını artırmak için demir içermeyen alaşım birleşimlerine uygulanan önemli termo-kimyasal işlemidir. Borlama işlemlerinde bor atomları iş parçasının yüzeyine dağılır ve ana metal ile boridler oluşturulur. Borlama katı, sıvı ve gaz halinde yapılabilir. Çeşitli gazlı borlama prosesleri arasında en sık kullanılanı, endüstriyel borlama ağırlıklı olarak çelik ve demir alaşımlarına uygulanır.

Sürtünme ve aşınma dayanımı özelliği sistemle olmakla birlikte malzemenin sertliği direkt ilgilidir. Borlanmış numunelerin yüzeylerinde fazla sertlikle birlikte teflonun sürtünme katsayısına yaklaşık veriye ulaşılmaktadır. Makinada kullanılan parçalardaki aşınma kayıpların azaltılması sonuçları için çalışmalarda borlama alternatif bir işlemdir. Borlama makine parçalarında özellikle yüzeylerin sertleştirilme işlemi aşınma miktarını

azalmaktadır. Borun oksijenle bağı fazladır ve malzemenin yüzeyinde ince oksit tabaka meydana getirirler. Sürtünme aşamasında oksit filmi kaynak oluşumu engelleyip yağlayıcı görevi yapmaktadır (Özsoy 2014).

Sementasyon çelikleri, yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda elde edilen çelik türleridir. Bu çelikler, karbon içeriği düşük olan çeliklerin özelliklerine göre yüzey sertliği açısından üstünlük sağlarlar. Sementasyon çelikleri, birçok endüstriyel alanlarında uygulama için kullanılır. Bu uygulamalar arasında miller, dişliler, pervaneler, eksantrik miller, mil yatakları, krank milleri ve benzeri yüksek yüzey sertliği gerektiren bileşenler yer almaktadır.

**Çizelge 1.3** 17CrNiMo6 sementasyon çeliğin ısı işlem özellikleri.

| Malzeme No.              | DIN Normu  | SAE-AISI  | Şekil. Sıcaklığı (°C)           | Yumuşak Tavlama Sıcaklığı (°C) | Sementasyon Çeliğin Sıcaklığı (°C) |
|--------------------------|------------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 16587                    | 17NiCrMo6  | -         | 1150-850                        | 670-700                        | 900-950                            |
| Cidar Sertleştirme       |            |           |                                 |                                |                                    |
| (°C)                     | Su         | Yağ       | Sıcak banyo                     | Meneviş Sıcaklığı              |                                    |
| 800-830                  | +          | -         | -                               | 170-210                        |                                    |
| Sementasyon İşlemi Tarzı |            |           | Çekirdek Sertleştirme Sıcaklığı | Ara Tavlama Sıcaklığı          |                                    |
| Direkt Sert              | Basit Sert | Çift Sert |                                 |                                |                                    |
| -                        | -          | -         | 840-870                         | 630-650                        |                                    |

17CrNiMo6 sementasyon çeliği, temperleme ve sertleştirme işlemi ile karakterize edilir. İlk olarak, çelikte yüksek sıcaklıkta ısı işlem uygulanır. Bu işlem sonucunda, çeliğin yüzeyinde karbon yoğunluğunu artırarak sertleştirilmesine ve daha yüksek oranda yüzey sertliği elde edilmesine neden olur. Sementasyon çelikleri, yüksek dirençli ve aşınmaya karşı çok dayanıklı çeliklerdir. İşlemler sonucunda çelikte yüzey sertleşir ve aşınma dayanımı artar. Çizelge 1.4'te 17CrNiMo6 sementasyon çeliklerin bileşim özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 1.4** 17CrNiMo6 sementasyon çeliklerin bileşim özellikleri.

| Malzeme.<br>No. | DIN Normu     | SAE    | C             | Si   | Mn            | P.max | S.max | Cr            | Mo            | Ni            |
|-----------------|---------------|--------|---------------|------|---------------|-------|-------|---------------|---------------|---------------|
|                 |               | - AISI |               |      |               |       |       |               |               |               |
| 1.6587          | 17<br>NiCrMo6 | -      | 0.14-<br>0.21 | 0.04 | 0.50-<br>0.90 | 0.035 | 0.035 | 1.50-<br>1.80 | 0.25-<br>0.35 | 1,40-<br>1,70 |

Sementasyon çelikleri ayrıca, birleşimli çeliklerin üretimin alanlarında da kullanılır. Birleşimli çelikler, farklı çelik türlerinin birleştirilmesiyle oluşur. Farklı özelliklerin kullanılmasına da izin verir.

17CrNiMo6 çeliği, yüksek dirençli, yorulma dayanımı ve tokluğu nedeniyle özellikle makineler, makine parçaları dişliler, miller, makaralar, yüksek mukavemetli vidalar, pimler, çekiçler ve diğer ağır yük altındaki bileşenlerin üretimi alanlarında sıkça kullanılan bir sementasyon çeliğidir. 17CrNiMo6 sementasyon çeliği darbe dayanımı fazla olan piston ve dişliye benzeyen ürün gruplarında kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sertlik, mukavemet ve tokluk özelliklerine sahiptir.

Çeliğin yüzeyine karbon atomlarının difüzyonu yoluyla karbon tabakası eklenme işlemi içerir. Bu karbon tabakası, çelik yüzeyindeki sertliği artırarak, daha sağlam ve dayanıklı hale getirir. Çalışma genellikle düşük sıcaklıklarda (800-950°C) gerçekleşir ve işlem süresi, kalınlığı, karbon derinliğine ve sıcaklığa bağlı olarak değişebilir. Çizelge 1.5' de 17CrNiMo6 sementasyon çeliğin Jominy değer tablosu verilmiştir.

**Çizelge 1.5** 17CrNiMo6 sementasyon çeliğin Jominy değer tablosu.

| <b>Yüzeyden itibaren mesafe<br/>(mm)</b> | 1,5 | 3  | 5  | 7  | 9  | 11 | 13 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 |
|------------------------------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| <b>Maks. HRC.</b>                        | 48  | 48 | 48 | 48 | 47 | 47 | 46 | 46 | 44 | 43 | 42 | 41 | 41 |

17CrNiMo6 sementasyon çeliği için Jominy değeri, sertleşme profili ve sertleşme derinliğinin belirlenmesinde önemli bir faktördür. Bu değer, çeliğin soğutma hızına bağlı olarak değişmektedir ve çeliğin farklı bölgelerinde farklılık gösterebilir. Jominy deneyi sonuçları, çeliğin ısı işlemi ve son durumdaki mekanik özellikler üzerinde etkiye sahiptir.

Çizelge 1.6’ da 17CrNiMo6 Sementasyon çelikleri kullanım yerleri açıklanmıştır. Çizelge 1.7’ de 17CrNiMo6 çeliğin mekanik özellikleri gösterilmiştir.

**Çizelge 1.6** 17CrNiMo6 Çeliğinin kullanım yerleri.

| Malzeme.<br>No. | DIN Normu | SAE<br>AISI | Kullanım Bölgeleri                                                                                                                                                        |
|-----------------|-----------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.6587          | 17NiCrMo6 | -           | Aşınmaya maruz kalan parçaların kullanımında, özellikle zorlanan aktarma organı parçaları ve kalın kesitli çarklar gibi bileşenlerde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. |

**Çizelge 1.7** 17CrNiMo6 çeliğin mekanik özellikleri (Comertcelik 2023).

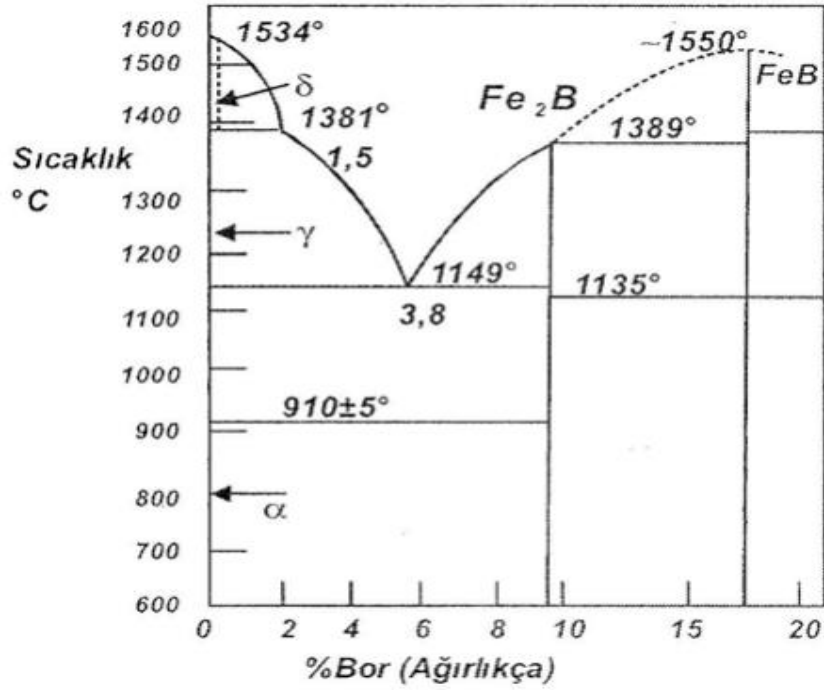
| KALİTE         |     | AKMA DAYANIMI     |     |     | ÇEKME DAYANIMI    |           |           |
|----------------|-----|-------------------|-----|-----|-------------------|-----------|-----------|
|                |     | Ø11               | Ø30 | Ø63 | Ø11               | Ø30       | Ø63       |
|                |     | N/mm <sup>2</sup> |     |     | N/mm <sup>2</sup> |           |           |
| 17CrNiMo6      |     | 229               | 835 | 785 | 685               | 1180-1420 | 1080-1320 |
| DARBE ENERJİSİ |     | UZAMA             |     |     | KESİT DARALMA     |           |           |
| Ø11            | Ø30 | Ø11               | Ø30 | Ø63 | Ø11               | Ø30       | Ø63       |
| joule          |     | %                 |     |     | %                 |           |           |
| 35             | 41  | 980-1270          | 7   | 8   | 8                 | 30        | 35        |

## 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

### 2.1 Borlama ve Özellikleri

Malzemenin borlanması, sıcaklık ve difüzyon etkisiyle meydana gelen yüzey sertleştirme yöntemidir. Başka ifadeyle; metalik ürünün yüzey kısmına dağıldığı sıcaklığa bağlı bir yayılım çalışmasıdır. Demir ve demir olmayan birden fazla alaşım ile sinter karbür, seramik ürünlerde de uygulanabilir. Borlanacak ürünlerin istenilen durumları göz önünde bulundurarak 750°C ve 1400°C sıcaklık verileri durumunda ve 1 ve 16 saat vakit kavramı durumunda katı, sıvı, ve gaz plazma, pasta elektro-kimyasal, daha düşük sıcaklıklar ve daha kısa sürelerde tozun tam yoğunluğa ulaştırılması ve lazer plazma işlemleri kullanılarak başka ortamlarda borlanma işlemi gerçekleştirilmektedirler (Çalık 2002, Ünüvar 2013). Borlama çalışması sonucunda borür fazların en önemli noktaları yüksek sertliğe (1420-5000HV) ve yüksek ergime sıcaklığına (1400-1550°C) sahip olmasıdır (Maragoudakis 2002, Topuz 2009).

Demir-bor denge diyagramında ağırlıkça %8,83 bor oranında  $Fe_2B$ , yine ağırlıkça %16,23 bor oranında  $FeB$  arabileşikleri meydana gelmektedir (Atik 2001). Şekil 2.1’de demir-bor denge diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Demir-bor diyagramı.

Hume-Rothery yasaları, alaşım oluşturan elementlerin için atomik çap boyutlarının bir dizi kuralıdır. Fe alaşım sistemlerinde yer alan Hume-Rothery yasalarına göre ergiyebilen veya ara yer elementi olarak yer alabilen alaşım elementleri atomik çap boyutlarına sahip olmalıdır. Atom büyüklüğü yasalar bağlamında en önemli faktördür. Borun atom çapı, demirin atom çapından %27 daha küçüktür. Bu fark, borun demir kristal yapısına katılabilmesini ve katı bir çözelti oluşturabilmesini sağlar (Ersöz 2008, Toprak 2019).

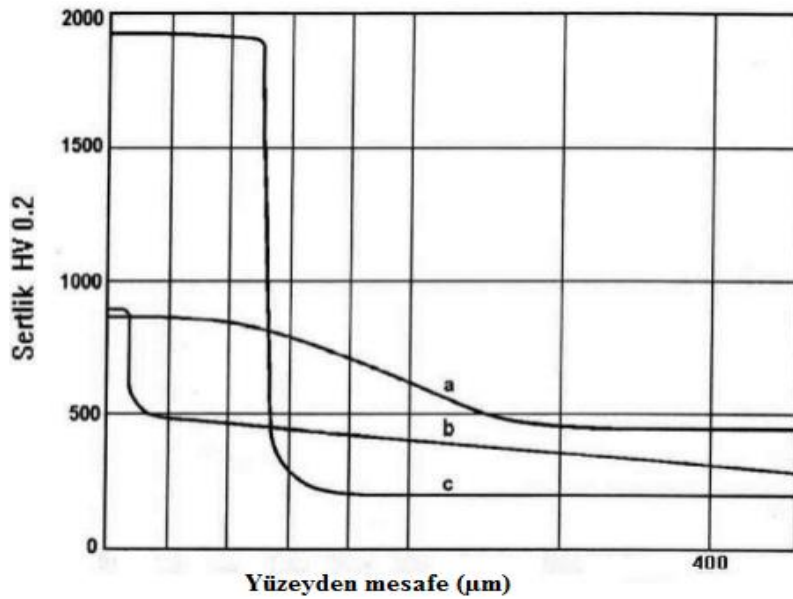
Bor kaplama işlemi, birçok endüstriyel alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlardan bazıları aşağıda ifade edilmiştir:

1. Şanzıman dişliler ve motor parçaları gibi yüksek aşınma dayanımı gerektiren parçalar için otomotiv endüstride borlama işlemi uygulanır.
2. Roketler jet motorları ve uçak parçaları gibi yüksek sıcaklık ve yüksek dayanım gerektiren parçalar için havacılık endüstride borlama işlemi uygulanır.
3. Tanklar, silahlar ve diğer savunma ekipmanları gibi yüksek aşınma dayanımı ve sertlik gerektiren parçalar için savunma endüstride borlama işlemi uygulanır.

## 2.2 Borlamada Kullanılan Yöntemler

Borlanmış malzemenin yüzeyinde ölçülen sertlik değeri, kullanılan çeliğin kimyasal bileşimi ve borlama işlemi parametrelerine bağlı olarak çoğunlukla 2000-2500 Vickers Sertlik Değeri (VSD) aralığına ulaşabilir (Özer 2011). Borlama, başka yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla önemli avantajlara sahiptir. Bunlar arasında malzemeye fazla yüzey sertliği, düşük sürtünme katsayısı, yüksek korozyon direnci kazanım elde edilmesi ve işlem sonrası ana malzemeye ısıl işlem uygulanabilmesi yer almaktadır (Varol 2002).

Farklı metotlar kullanılarak malzemelerin yüzeyine çeşitli kaplamalar uygulanmaktadır. Örneğin, karbürleme işlemi uygulandığında, sertleşmeden sonra sürekli bir geçişle sert kenar bölgesinden yumuşak çekirdek bölgesine doğru yapı oluşturulabilir. Tuz banyosunda nitro karbürleme yapıldığında ise nitrür tabakanın özellikleri yanında, tabaka altındaki yarı metal difüzyon bölgesi de önemli rol oynar. Diğer bölgelerde difüzyon işlemi ön planda değildir. Buna göre başka ısıl işlemler sonucu oluşan, yüzeyden itibaren sertlik ilişkileri Şekil 2.2’ de verilmektedir (Korkmaz 2020, Karaman 2003). Şekildeki a) 16MnCr5 çeliği için sementasyon işlemi ve yağda sertleştirme (1 saat 860 °C), b) C15 çeliğini 580 °C ‘de 90 dk tuz banyosunda nitro karbürleme, c) C45 çeliğini 900 °C de borlama, Durborid 2, 3 saat, yavaş soğutma yapılmıştır.



Şekil 2.2 Borlama sonucunda, sertlik-yüzeyden mesafe ilişkisi a) İlave sertleştirme b) Tuz banyosunda c) Borlama (Karaman 2003).

Termo-kimyasal borlama işlemi süre ve sıcaklığa bağlı olarak malzemenin yüzeylerindeki bor atomlarının difüzyonuna dayanmaktadır. Borlama işlemi farklı ortamlarda yapılabilir. Bunlar;

- Katı ortamda
- Sıvı ortamda
- Gaz ortamda
- Alternatif akım ile
- Plazma pasta borlama'dır.

Bu yöntemler, borlama işlemi için farklı uygulamalar ve gereksinimler sağlar. Borlama, yüzey sertleştirme, aşınma direncini artırma ve sürtünmeyi azaltma gibi amaçlarla kullanılan bir yüzey sertleştirme yöntemidir.

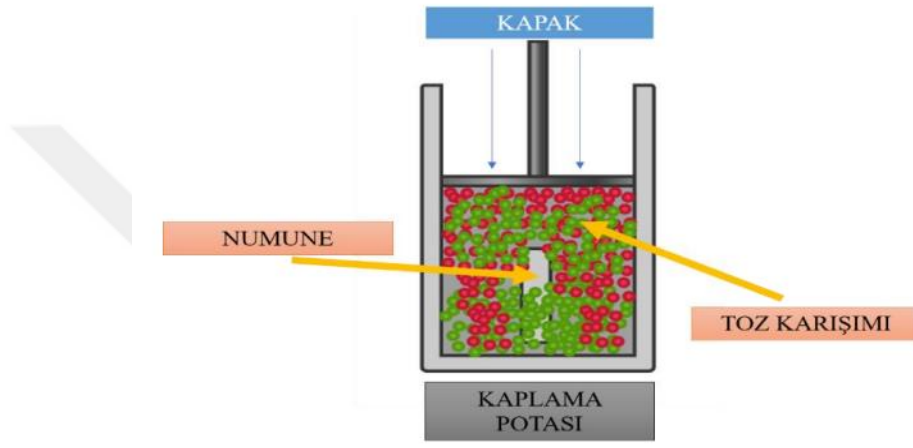
### **2.2.1 Katı Ortamda Borlama**

Kutu borlama çalışmasının çabuk uygulanması, ekonomik donanımlı, kimyasal kompozisyonunda kullanılan toz karışımın değişiklik yapılabilirliği nedeniyle güvenli borlama tekniklerinden biridir (Uluköy 2006).

Katı ortamda borlama işlemi, yüzeyi borlama ortamına maruz bırakarak borür tabakası oluşturma işlemidir. Katı (kutu) ortamda borlama işlemi, yüzey sertliğini artırır, aşınmaya dayanıklılığı artırır ve sürtünme katsayısını azaltır. Bu yapılan işlem, yüzeydeki aşınma ve korozyon direncini artırmak için birçok endüstriyel alanlarda kullanılır. Katı (kutu) ortamda borlama işlemi, yüzeyin özelliklerini daha çok iyileştirmek için geleneksel sertleştirme ve kaplama işlemlerine alternatif bir seçenek olarak da kullanılabilir. Bunun sebebi, borlama işleminin, yüzeyde daha çok homojen ve ince bir borür tabakası elde edilerek daha düşük işlem sıcaklıklarında gerçekleştirilebilmesidir.

Borlama işlemi için, borlanacak malzemenin etrafını en az 10-20 mm kaplayacak şekilde toz karışımı hazırlanmış potanın (kutu) içerisine yerleştirilir. Bu toz karışımının üzerine SiC gibi bir dolgu malzemesi eklenir. Üst kısmın oksitlenmeyi engellemek için kapak ile kapatılır (Şekil 2.3), böylece hava girişi engellenir. Pota hacmi, fırın hacminin %60'ını

geçmemelidir. Potanın ısıtıcılara yakın mesafede olmasından kaynaklanan yüksek iç gerilmeleri, çatlakları ve malzeme dökülmelerini önlemek için önemlidir. Ayrıca, işlem sırasında toz ilavesi gerektiğinde (%20-50 oranında), borlama işlemine aralıksız devam edilebilmesini sağlar. Borlama işleminde yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri arasında bor karbür ( $B_4C$ ), ferrobör ve amorf bordur bulunmaktadır. SiC ve  $Al_2O_3$  gibi malzemeler çözünmeye yardımcı olur. Borlama işleminde aktivatör olarak  $NaBF_4$ ,  $KBF_4$ ,  $(NH_4)_3BF_4$ ,  $NH_4Cl$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $BaF_2$  ve  $Na_2B_4O_7$  maddeler kullanılmaktadır (Sinha 1991).



**Şekil 2.3** Katı borlama yöntemi (Xu Lingyun 2007).

Piyasada Ekabor tozu gibi ticari bor sağlayıcıları da bulunmaktadır. Borlama işlemi için kullanılan Ekabor tozun malzeme özelliği, Çizelge 2.1'de detaylı şekilde belirtilmektedir. Bu tozların partikül boyutu azaldıkça temas alanı artar, bu da bor atomu difüzyonunu kolaylaştırır. Sonuç olarak, borlama işlemiyle oluşan borür tabakasının kalınlığı ve mikro sertliği artar. Bu durumda borlama, kaynaklı bağlantılarda iyi veriler elde edilen etkili bir tekniktir (Kara 2017).

**Çizelge 2.1** Ekabor II tozun malzeme özelliği (Şeşen 2007).

| Malzeme Tipi | Tane Boyutu ( $\mu m$ ) | Yoğunluk ( $gr/cm^3$ ) | Malzeme Özelliği                                                                                                                                                                                  |
|--------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ekabor-II    | $\leq 850$              | 1,70                   | Ekabor tozu granüllü bir yapıya sahiptir ve yüzey pürüzlülüğü açısından yüksek kalitededir. Bu özellikleri, düşük alaşımlı çeliklerin borlama işleminde kullanılmasında uygun hale getirmektedir. |

Borlama işleminde kullanılan Ekabor tozları borür tabakasının elde edilmesi için gerekli

olan bor elementi oluşmasını sağlayan tozlardır. Bu tozların özellikleri borlama işleminin kalitesini ve sonucunu etkileme durumu söz konusu olabilir. Tozların kalitesini belirlerken, borlama sırasında kullanılan tozların özellikleri dikkate alınmalı, borlama işleminin sonuçlarını ve oluşan borür tabakasının kalitesini doğrudan etki edebilir.

Borlama işlemi için Ekabor 2 kullanılan bir borür tozudur. Yüksek sıcaklıklarda kaliteli bir aşınma dayanımına sahip olduğu için Ekabor 2, borlama işleminde sıklıkla tercih edilen borür tozudur.

## 2.2.2 Sıvı Ortamda Borlama

Borlama işleminde, ortam sıvı halindedir. Borlanacak ürün, 800-1000 °C arasındaki sıcaklığa sahip bir borlu ortam içerisinde 2-6 saat boyunca bekletilerek bor yayılımı gerçekleştirilir (Selçuk 1994). Borlama işlemi, malzemenin elektrolitli ve elektrolitsiz veya derişik çözeltilerde gerçekleştirilebilir. Çizelge 2.2’de birkaçı sıvı borlama işleminde kullanılan bor kaynakları ve özellikleri belirtilmektedir (Sarı 2019).

**Çizelge 2.2** Sıvı ortamda borlama yönteminde kullanılan esas bor kaynakları ve özellikleri (Sarı 2019).

| Malzeme          | Formül                                                       | Molekül Ağırlığı (g/mol) | Teorik Bor Ağırlığı (%) | Ergime Sıcaklığı (°C) |
|------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Boraks           | $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ | 381,42                   | 11,35                   | -                     |
| Susuz Boraks     | $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$                            | 201,26                   | 21,5                    | 741                   |
| Metabor Asidi    | $\text{HBO}_2$                                               | 43,83                    | 24,69                   | -                     |
| Sodyum Bor Forid | $\text{NaBF}_4$                                              | 109,81                   | 9,85                    | -                     |
| Borik Oksit      | $\text{B}_2\text{O}_3$                                       | 69,64                    | 31,07                   | 450                   |
| Bor Karbür       | $\text{B}_4\text{C}$                                         | 55,29                    | 78,28                   | 2450                  |

Sıvı ortamda borlama, borlama işleminin bir varyasyonudur ve borlama işlemi sırasında malzeme ve borlama ortamı arasında kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği bir işlemdir. Bu işlem, sıvı borlama veya borlama sıvısı adı da verilen özel bir borlama ortamı kullanarak gerçekleştirilir. Sıvı borlama, malzemenin yüzeyine nüfuz ederek malzeme içinde bir katı

Çözelti tabakası oluşturur. Bu tabaka, malzeme yüzeyini korur ve yüzey sertliğini artırır. Ayrıca, sıvı borlama, işlemindeki aşındırıcı etkileri azaltır ve borlama işlemi sırasında daha az ısınmaya neden olur. Sıvı borlama, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılır. Bu işlem, yüzey sertleştirme, yüzey alaşımı, aşınma direnci ve korozyon direnci artırma gibi uygulamalar için ideal bir seçenektir.

Sıvı ortamda borlama yöntemi, kimyasal reaksiyonların daha hızlı gerçekleşmesi ve yüksek aktiviteye sahip olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlem normal atmosfer altında gerçekleştirilebilir ve koruyucu bir atmosfere ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca, kullanılan ekipman ve donanımın basit olmasıyla birlikte, gereken kimyasal maddeler de genellikle ekonomiktir. Ancak, borlama sonrasında parçaların temizlenmesi önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkar ( zsoy 2014).

Sıvı ortamda borlama yöntemi, yüksek aktivasyona sahip olmasını sağlayan hızlı kimyasal reaksiyonlar nedeniyle geniş çapta kullanılmaktadır. Bu işlem normal atmosfer altında gerçekleştirilir ve koruyucu atmosfere ihtiyaç duymaz. Ayrıca, kullanılan ekipman ve donanımın basit olmasıyla birlikte, gerekli kimyasal maddelerin maliyeti de düşüktür. Ancak, borlama sonrasında parçaların temizlenmesi önemli bir sorundur ve çözülmesi gereken bir problemdir (Yapar 2003).

### **2.2.3 Gaz Ortamda Borlama**

Bu borlama yönteminde, gaz ortamının bileşimi, basıncı ve gazın sistemden çıkan hızı gibi faktörler borlama işlemine etki etmektedir. Borlama için gaz ortamında kullanılacak olan bileşikler arasında bor halojenleri, diboran ( $B_2H_6$ ) ve borun organik bileşikleri yer almaktadır.  $BF_3$ ,  $BCl_3$ ,  $BBr_3$  gibi bileşikler saf halde veya su,  $B_2H_6$  gibi bileşiklerle birlikte kullanılabilir. Diboran, yüksek sıcaklıklarda ayrışabilen ve patlayıcı, zehirleyici özelliklere sahip olan bir bileşiktir. Diboranın hidrojenle incelenmesi de maliyetli bir işlemdir. Bu nedenlerle borlama işlemi karmaşık olabilir. Yinede, birçok araştırmacı gaz ortamında borlama yöntemini kullanmıştır. Bortrimetil ve bortrietil gibi organik bileşikler, fazla miktarda karbon içerikleri sebebiyle borlama işlemi sonrasında hem borür tabakası hem de karbonlu bor tabakası oluşumuna yol açabilir. Bu durum,

olumsuz sonuçlara neden olabilir. Çizelge 2.3’ de gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri verilmiştir (Sarı 2019, Yılmaz 2016).

**Çizelge 2.3** Gaz halindeki bor bileşiklerin bazı özellikleri (Yılmaz 2016).

| Malzeme       | Formül                                          | Molekül<br>ağırlığı<br>(g/mol) | Teorik Bor<br>Miktarı<br>(%) | Donma<br>Noktası<br>(°C) |
|---------------|-------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Bor Triflorid | BF <sub>3</sub>                                 | 67,82                          | 15,95                        | -128,8                   |
| Bor Triklorid | BCl <sub>3</sub>                                | 117,19                         | 9,23                         | -107,3                   |
| Bor Tribromid | BBr <sub>3</sub>                                | 250,57                         | 4,32                         | -46                      |
| Di-Boran      | B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>                   | 27,69                          | 39,08                        | -165,5                   |
| Bor Trimetil  | (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> B               | 55,92                          | 19,35                        | -161,5                   |
| Bor Trietil   | (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> B | 98,01                          | 11,04                        | -95                      |

Gaz borlama işlemi, malzemenin yüzeyine işleyerek malzeme içinde bir katı çözelti tabakası oluşturur. Malzeme yüzeyini korur ve tabadaki yüzey sertliğini artırır. Ayrıca, gaz borlama işlemi, aşındırıcı etkileri azaltır ve borlama işlemi sırasında daha az ısınmaya neden olur. Gaz borlama işlemi, havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi endüstri alanlarda yaygın olarak kullanılır. Bu işlem, yüzey sertleştirme, aşınma dayanımı ve korozyon direncini artırmak gibi uygulamalar için mantıklı tercihtir.

#### 2.2.4 Alternatif Akım ile Borlama

Xie vd. (2018), AISI 1045 çeliğini alternatif akım yapılarak kutu borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Farklı amper değerleri (1, 2, 4 ve 6 Amper) kullanarak borlama işlemini gerçekleştiren araştırmacılar, akım miktarının artmasıyla birlikte borlama kutusunun sıcaklık yükselme değerlerinde artışlar gözlemlemişlerdir. Yüksek amper değeri uygulandığında fırın sıcaklığını yaklaşık 100°C artıran araştırmacılar, düşük amper değeri uygulandığında ise sadece 20°C artış elde etmişlerdir. Araştırmacılar, 600°C sıcaklıkta geleneksel katı borlama işleminde yaklaşık 4 µm kalınlığında bir borür tabakası elde etmişken, 600°C+6 Amper alternatif akım uygulandığında 15 µm ve sadece 600°C'de 6 Amper alternatif akım uygulandığında 102 µm kalınlığında bir borür tabakası elde etmişlerdir. Benzer şekilde, 800°C sıcaklıkta yapılan geleneksel borlama işleminde yaklaşık 60 µm kalınlığında bir borür tabakası elde edilirken, 800°C fırın sıcaklığına 6 Amper alternatif akım uygulandığında 88 µm ve sadece 800°C'de 6 Amper alternatif akım uygulandığında yaklaşık 134 µm kalınlığında bir borür tabakası elde edilmiştir.

Araştırmacılar ayrıca uygulanan amper miktarının artmasıyla birlikte FeB ve Fe<sub>2</sub>B faz şiddetlerinde artışlar tespit etmişlerdir. Alternatif akım ile borlama işlemi, geleneksel borlama ile karşılaştırıldığında daha geniş bir borür difüzyon bölgesi elde edilmesini sağlamıştır (Xie 2018).

Malzemenin metal yüzeyindeki yüzey sertliğini artırmak için Alternatif akım (AA) ile borlama işlemi birçok çeşitli uygulamalarda kullanılır. Dişliler, rulmanlar, kesici aletler ve diğer yüksek aşınma direnci gerektiren parçaların üretim alanlarında yaygın olarak da kullanılmaktadır. Başka borlama yöntemleriyle karşılaştırıldığında daha hızlı ve daha ekonomiktir. Ayrıca, bu yöntem, işlenen malzemelerin daha ince olmasına izin verir ve işlenen parçaların boyutları daha küçük olduğunda daha uygundur. Ama, malzeme yüzeyindeki sertlik artışı nedeniyle işlem gören malzemelerde alternatif akım (AA) ile borlama işlemi sonucunda çatlaklar veya çarpıklıklar oluşma ihtimali bulunmaktadır. Bu sebeple, doğru işleme parametrelerinin seçilmesi önemlidir ve işlem öncesinde malzeme özellikleri dikkatlice incelenmesi ihmal edilmemelidir.

### **2.2.5 Plazma Pasta Borlama**

Plazma pasta borlama yöntemi, plazma ortamında farklı gaz karışımları ve oranlarıyla gerçekleştirilen bir borlama yöntemidir. Bu yöntemde borlama için boraks, borik asit, B<sub>4</sub>C ve farklı bor mineralleri gibi borlayıcılar kullanılabilir. Güneş (2010) AISI 8620 çeliğini, plazma pasta borlama yöntemiyle farklı boraks, borik asit, B<sub>4</sub>C ve SiC karışımları kullanarak borlanmıştır. Bu yöntemle, geleneksel borlama yöntemlerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda borlama işlemi gerçekleşmiştir. Plazma pasta borlama yöntemi, maliyet açısından diğer yöntemlere göre daha düşük olması dışında avantajlar sunmaktadır. Plazma ortamında gerçekleşen borlama sonucunda, katı borlamaya göre daha düşük sıcaklıkta daha büyük bir borür tabakası elde edilmiştir. Bu yöntem, borlama işlemini daha etkili bir şekilde gerçekleştirmekte ve daha geniş bir borür difüzyon bölgesi sağlamaktadır (Güneş 2010).

Plazma pasta borlama, metal yüzeylerin yüzey sertleştirilmesi, kaplanması ve aşınma direncinin artırılması için kullanılan bir yöntemdir. Borlama malzemesi olarak özel bir toz kullanımını içerir. Bu toz, plazma arkı ile eritilir. Yüksek sıcaklıkta ve yüksek hızlarda

gerçekleşir. Malzeme yüzeyi plazma arkı tarafından ısıtılır ve borlama malzemesi ile kaplanır. Borlama malzemesi, erimeye başladığında ve sıvı hale geldiğinde, malzemenin yüzeyinde katı çözelti tabakası oluşmaktadır. Yüksek sıcaklık ve yüksek hız nedeniyle plazma pasta borlama işlemi, malzemenin yüzeyinde çok ince bir tabaka oluşturur. Bu ince tabaka, malzeme yüzeyinin sertliğini, aşınma dayanımı artırır. Bu işlem, malzeme yüzeyinde düşük aşındırır ve yüzey kalitesini iyileştirir. Otomotiv, havacılık, tıbbi cihazlar ve diğer endüstri alanlarda yaygın olarak, kullanılır. Bu işlem, yüzey sertleştirme, borlama ve aşınma dayanımı artırma gibi uygulamalar için ideal bir seçenektir (Güneş 2010).

### **2.3 Borlama İşleminin Avantajları**

Borür tabakalarının benzersiz özellikleri, geleneksel tekniklerle oluşturulan tabakalara kıyasla önemli avantajlar sunmaktadır. Sertlik, aşınma direnci, kırılma tokluğu ve darbe direnci, borlama işlemiyle elde edilen borür tabakalarının mekanik davranışını etkileyen temel fiziksel özelliklerdir. Borür tabakaları, malzeme yüzeyine sağlam bir şekilde yapışması ve 1450-5000 HV arasında değişen yüksek yüzey sertliği sayesinde oksidasyon, aşınma ve yüzey yorulması gibi aşınma süreçlerine karşı dayanıklılık gösterir. Bu özellikler, borlanmış malzemelerin uzun ömürlü olmasını ve aşınma kaynaklı deformasyon ve yıpranmanın en aza indirilmesini sağlar. Borür tabakaları, özellikle endüstriyel uygulamalarda aşınma direnci gerektiren yüzeylerde ve aşınmaya maruz kalan parçalarda büyük bir fayda sağlar. Yüksek sertlikleri ve dayanıklılıkları sayesinde, malzemeleri korur ve ömrünü uzatır. Ayrıca, borür tabakaları mekanik gerilmelere karşı dirençli olduğundan, kırılma tokluğu ve darbe direnci açısından da önemli avantajlar sunar. Bu özellikler, borlanmış malzemelerin dayanıklılığını artırır ve performansını iyileştirir. (Boztepe 2014, Tarakci 2010) Bu özellik, kalıp üreticilerinin ana metali, daha kolay işlenebilir olan ve aynı zamanda orijinal malzemeden daha üstün aşınma direnci ve korozyon özelliklerine sahip olan çeliklerle değiştirmesine imkân sağlamıştır (Kayalı 2015).

Borlama işlemi, malzemenin ömrünü artırarak önemli avantajlar sağlar. Maliyeti yüklü miktarda olan numuneleri tercih edilmesinden çok daha düşük maliyetli ve performansı

dayanıklı ürünler ortaya çıkar. Aynı zamanda, borlanmış parçaların kullanılmasıyla parça bulma ve zaman sorunları da çözülerek büyük kazançlar elde edilir (Özbek 2002).

Borlama işleminin diğer avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Borlama işlemi, malzemenin yüzey sertliğini artırarak aşınma dayanımı artırır. Bu, malzemenin ömrünü uzatır ve bakım için maliyetlerini azaltır.
- Malzemenin yüzeyine koruyucu tabaka ile kaplar. Malzemenin dıştan meydana gelebilecek etkilere karşı daha dayanıklı olmasını sağlar.
- Malzemenin yüzeyindeki kimyasal özelliklerini ve yüzey tabakasının kalitesini iyileştirir. Malzemenin korozyona karşı daha dirençli olmasını sağlamaktadır.
- Malzeme yüzeyindeki gerilimi azaltarak yüzey yorulmasını azalmaktadır. Numunenin ömrünü uzatır.
- Borlama diğer yöntemlere kıyasla daha uygundur ve daha hızlı gerçekleştirilebilir.
- Borlama işlemi sonucunda, diğer malzeme borlama yöntemlerine karşılaştırıldığında uzun gerçekleşebilir. Bu sebeple, yüksek üretimlerde verimlilik oranı azalabilir.

## **2.4 Borlama İşleminin Dezavantajları**

Diğer termo kimyasal yüzey sertleştirme işlemleri olan plazma nitrürasyon ve gaz karbürizasyona kıyasla borlama işlemi daha yüksek işletim ve işçilik maliyetleri gerektirir. Ancak, korozyon direnci, yüksek sertlik ve kalıcı aşınma gibi özelliklerin önemli olduğu durumlarda, borlama işlemi tercih edilir. Borlama işlemine tabi tutulan malzemelerde, boyutsal olarak %5 ile %20 arasında bir artışla birlikte bor tabaka kalınlığı oluşur (Singhal 1977, Fichtl 1981).

- Borlama işlemi, karbürleme ve nitrürleme gibi difüzyonla kaplama yöntemlerine kıyasla daha yüksek maliyetlidir. Gaz karbürleme ve plazma nitrürleme işlemleri ise

esnek sistemlere sahiptir ve düşük bakım maliyetleri gerektirir. Başka işlemler daha az zamanda gerçekleşirler, bu nedenle yüksek sertlik ve bor tabakalarında aşınma ve korozyon direnci istendiği durumlarda mühendislik parçaları için daha uygun bir seçenektir (Berkold vd. 2005).

- Borlama işleminde tesis kurma maliyetleri pahalıdır ve bazı kimyasal maddeler oldukça miktarları yüksektir.
- Borlama işlemi sonucunda, malzemenin yüzeyindeki pürüzlülüğü azaltarak yüzey düzleşmesine neden olabilir. Bazı uygulamalarda bu durum istenmeyen sonuçlar olabilir.
- Borlama yüzeyini istenilen hassaslıkta parlatılabilir (Petrova 2005).

## 2.5 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

Borlanan numunede elde edilen borla kaplı malzemeler, birden farklı ortamlarda kullanılmaktadır. Borlama, malzemelerin ömründe büyük ölçüde artış sağladığından endüstride kılavuz kanalları, kesici takımlar, dişli, çarklar, kalıplar gibi çok çeşitli alanda yaygın olarak tercih edilen bir işlemdir (Fichtl 1981).

Borlama işlemi, yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve malzeme yüzeyinin korunması için birçok endüstriyel uygulama alanında kullanılır. Bazı örnekler şunlardır:

- Otomotiv sektöründe kullanılan yüksek dayanımlı çeliklerin aşınma direncini artırmak ve malzemenin yüzey sertliğini artırmak için kullanılır. Borlama işlemi, araçların motorda kullanılan parçalarının ömrünü artırmaya yardımcı olur.
- Borlama, makine sektöründe, malzemenin aşınma dayanımı ve sertliğini artırmak, malzemeye koruyucu tabakalar oluşturmak ve aşınma, korozyon ve erozyona karşı korunmayı sağlamak amacıyla kullanılır.
- Borlama, uzay ve havacılık endüstrisinde, yüksek mukavemetli alaşımların yüzey sertliğini ve aşınma direncini artırmak için yaygın bir yöntemdir.
- Borlama işlemi, gıda sanayisinde, mutfak ekipmanlarının ve diğer kesme aletleri yüzeylerinin hijyenik olması için kullanılır.
- Borlama işlemi, tıp endüstrisinde, ortopedik cihazlar, diş implantları, tıbbi ve diğer cerrahi aletlerin yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılır. Bu cihazların daha uzun dayanıklı olması ve daha az bakım gerektirmesini sağlar.

## 2.6 Borlama ile İlgili Yapılan Önceki Çalışmalar

AISI 403 Martenzitik paslanmaz çeliği kromlama ve borlama işlemlerine tabi tutulmuş ve bu dubleks tabakalı malzemenin mekanik özellikleri incelenmiştir. İlk olarak, AISI 403 çeliği 1100 °C'de 2 saat boyunca kromlama işlemine tabi tutulmuş, ardından Ekabor

3 tozuyla 950 °C'de 9 saat boyunca borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kromlama ve borlama işlemi sonucunda elde edilen tabaka sertliği yaklaşık olarak 2300 HV olarak ölçülmüştür. XRD analizi sonucunda FeB, Fe<sub>2</sub>B ve CrB fazlarının varlığı gözlemlenmiştir (Lee S 2004).

Teker ve Karakurt (2017) tarafından yapılan çalışmada, Fe-%1 Nb, Fe-%5 Nb ve Fe-%10 Nb (%at.) ikili alaşımların 950°C, 1050°C ve 1150°C sıcaklıklarında 3 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulduğu belirlenmiştir. Demir içine alaşımlandırılan niyobyumun münferit etkisi ve artan borlama sıcaklığının kaplamaya olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Borlama işlemi sonrası numunelerin ara yüzeyindeki mikroyapısal değişimler, optik mikroskop (OM), SEM ve EDX analizleriyle araştırılmıştır. Yüzey kaplamalarında testere dişi morfolojisi gözlenmiş ve kaplama sertlikleri ile kalınlıkları her bir numune için ayrı ayrı ölçülmüştür. Sonuçlar, elde edilen tüm kaplama sertliklerinin altlık malzemeye göre önemli ölçüde daha yüksek olduğunu göstermiştir. (Teker ve Karakurt 2017).

Aich vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, saf titanyum üzerine kutu borlama işlemi uygulandığı belirtilmiştir. 800 °C ve 1000 °C işlem sıcaklıkları ve 1 ve 24 saat süreleri kullanılmıştır. Borlama sonucunda 218 µm kalınlığında bir kaplama elde edildiği TiB<sub>2</sub> ve TiB fazlarının varlığının tespit edildiği belirtilmiştir (Aich 2002).

Khor vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada, %99 saflıkta 10 mm çapında tungsten çubuklar kullanılmıştır. Bu çubuklar 5 mm kalınlığında kesilerek diskler elde edilmiştir. Disklerin her iki yüzeyi düzeltilmiş ve asetonla temizlenmiştir. Borlama işlemi için SiC çözücü ve B<sub>4</sub>C bor kaynağından oluşan bir toz karışımı kullanılmıştır. Tungsten diskler 20 mm'lik borlama karışımına daldırılmıştır. Ardından Dr Sinter 1050 makinesinde farklı sıcaklıklarda (1000 °C, 1100 °C, 1200 °C, 1300 °C, 1400 °C) 30 dakika süreyle işlem görmüştür. Tungsten diskler, her iki tarafı da 5 mm olacak şekilde bir borlama paketine yerleştirilmiştir (Khor vd. 2005).

Bindal çalışmasında, az alaşımlı karbon çeliklerinde borlama işlemiyle oluşan borür tabakalarının özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada, borlama süresi, krom miktarı gibi

parametrelerin değişimine bağlı olarak krom borürlerin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Gözlemler, kromun miktarının azalmasının kırılma tokluğunu olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur (Bindal 1991).

Gidikova (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeliklerin yüzeyine vanadyumun termal difüzyonuyla başlayan bir süreç izlenmiştir. Ardından,  $B_4C$ ,  $Na_2B_4O_7$ ,  $NaCl$ ,  $NH_4Cl$  ve aktivatör olarak kloritlerin eklenerek toz ortamında 900 C ve 1000 C sıcaklıkta 5 ve 9 saatlik süreleriyle borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonucunda, numunenin yüzeyinde 26000 MPa sertlik değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, yapılan tabaka kalınlığı ölçümleri yaklaşık 400 m kalınlığında bir difüzyon tabakası olduğunu göstermiştir (Gidikova 2000).

Tian vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, N80 elik boruların kutu borlama yöntemiyle borlanması sonucu elde edilen mikroyapı ve buna bağlı çekme testi sonuçları dört farklı soğuma koşulunda incelenmiştir. Araştırmacılar, borlama sonucunda N80 eliğinin yüzeyinde  $Fe_2B$  ve  $FeB$  dişli borür tabakalarının olduğunu ve bu tabakaların 1220 HV-1600 HV sertlik aralığında olduğunu tespit etmişlerdir. Borlanmış numunelerin çekme mukavemetinin orijinal malzemeye göre daha düşük olduğunu, ancak uzama miktarının daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Borür tabakasının kırılğan olduğunu ve 479 MPa gerilim seviyesine ulaşıldığında çatlamaya başladığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, soğutma hızının mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelediklerinde, soğutma hızının artmasıyla akma ve çekme mukavemetinin belirgin şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Bu artışın nedeninin, soğutma hızının yükselmesiyle birlikte borür tabakasının kalınlığının ve tane boyutunun azalması, ayrıca daha yüksek mukavemete sahip perlit oranının artması olduğunu vurgulamışlardır (Tian 2009).

Gonzalez (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, tungsten metaline grafen yapısına benzer 2 boyutlu bor kaynağı kullanılarak borlama işlemi uygulanmıştır. Borlama sonucunda 4000 Hv sertlik değeri elde edilmiştir. Ayrıca, borlama işlemi sonucunda oluşan borür tabakalarının  $WB_3$  ve  $WB_4$  fazlarından oluştuğu gözlemlenmiştir (Gonzalez 2017).

Xie vd. (1990) tarafından yapılan çalışmada, kromlu çeliklerin malzemeye çeşitli ısı işlemler uygulanarak tek fazlı  $Fe_2B$  fazının aşınma dayanımı artık gerilmeler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Isıl işlemlerin artık gerilmeleri düzenli olarak değiştirdiği ve çeliklerin aşınma dayanımlarını önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir (Xie vd. 1990).

## **2.7 Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Dezavantajları**

Sonlu elemanlar metodu (FEM), karmaşık geometrik şekillere sahip olan yapıların analizinde son derece kullanışlıdır. Bu yöntem, çözüm bölgelerini alt bölgelere ayırabilir ve farklı boyutlarda çözüm üretebilme yeteneği sağlar. Hassas sonuçlara ihtiyaç duyulan bölgeler için gerekli hassas ölçümler ve hesaplamalar uygulanabilir. Hem fiziksel hem de matematiksel açıdan incelenmek istenen problemler bu yöntemle analiz edilebilir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra, istenen özelliklere basit bir şekilde indirgemek için parametre değişiklikleri ve sınır koşulları değişiklikleri yapılabilir. Sistem üzerindeki problemlerin çözümü bazen zor olabilir, ancak elde edilen sonuçların doğruluğu, kullanılan denklemlerin doğruluğuyla doğrudan ilişkilidir. Elde edilen sonuçların doğruluğu, gerçek dünya verileriyle paralel olmalıdır. Bu yöntemde elde edilen sonuçların önceden tahmin edilmesi ve analizlerin bu doğrultuda yapılması önemlidir (Karakoca 2022, Simitçioğlu 2016).

### 3. MATERYAL ve METOT

#### 3.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler

Bu çalışmada, deneylerde kullanılan 17CrNiMo6 (1.6587) çeliği Şekil 3.1'de gösterilen boyutlarda (çap: 30 mm, uzunluk: 10 mm) kullanılmıştır. Çelik çubuklar, Önerler Çelik tarafından temin edilmiştir. Çeliğin kimyasal bileşimi ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.



**Resim 3.1** Ø30 mm çaplarındaki DIN 17 CrNiMo6 sementasyon çeliği.

**Çizelge 3.1** 17CrNiMo6 çeliğinin kimyasal kompozisyonu (% ağırlık).

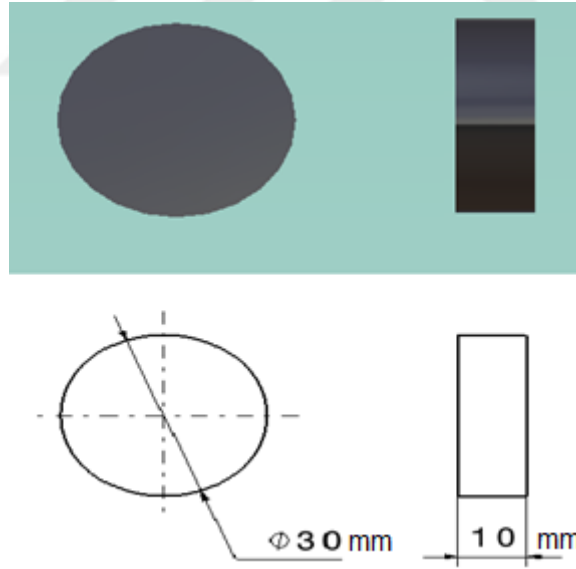
| Çelik     | C     | Si    | Mn   | P     | S     | Cr    | Mo    | Ni   |
|-----------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|
|           | 0,169 | 0,038 | 0,64 | 0,027 | 0,031 | 0,656 | 0,262 | 1,63 |
| 17CrNiMo6 | Al    | B     | Cu   | Nb    | Ti    | W     | Fe    |      |
|           | 0,023 | 0,011 | 0,2  | 0,026 | 0,007 | 0,086 | Kalan |      |

Borlama işleminden önce numuneler Ø30x10 mm boyutlarında CNC Tornada kesilerek hazırlanmıştır. Kesim işlemlerinin gerçekleştiği tezgâh Resim 3.2’de verilmiştir.



**Resim 3.2** CNC tornalama tezgâhı.

Deneysel çalışmalar için hazırlanan numunenin ölçüleri Resim 3.3’te gösterilmiştir.



**Resim 3.3** 3D numunenin görünümü.

### 3.2 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Çalışmalarda kullanılan cihazların görüntüleri aşağıda görüldüğü gibidir.

Fırında yapıldığı borlama işleminin Resim 3.4’te verilmiştir.



**Resim 3.4** Isıl işlem fırını.

Parlatma ve zımparalama işlemlerinin gerçekleştiği cihaz Resim 3.5’ te verilmiştir.



**Resim 3.5** Numunenin zımparalama ve parlatma metalografik cihazı.

Optik mikroskop ile mikro yapıların incelendiği cihazın Resim 3.6’ da verilmiştir. Yeşilova Holding Ar-Ge Merkezine bağlı Laboratuvar’da Nikon MA100 cihazı kullanılarak çeliğin optik mikroskop altında incelenen kesit mikro yapılarının görüntüleri elde edilmiştir.



**Resim 3.6** Optik mikroskop cihazı.

Malzemelerin sertlik değerlerinin ölçüldüğü mikrosertlik cihazı Resim 3.7’de verilmiştir. Yüzey sertliğini ölçmek için Metkon ve MTK kaplamada Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak, ölçümler 25 gram yük ve 10-15 saniye bekleme süresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



**Resim 3.7** Mikro sertlik ölçüm cihazı.

XRD cihazı resim 3.8’de verilmiştir. Borlanmış malzemenin yüzeydeki faz analizi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (TUAM) bulunan Shimadzu XRD-6000 cihazı kullanılarak CuK $\alpha$  ( $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ ) radyasyonu ile  $2\theta$  20-90° aralığında gerçekleştirilmiştir. Analiz, 900, 950 ve 1000 °C sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat sürelerinde numunelere uygulanmıştır.



**Resim 3.8** X-ışınları Difraksiyon Analiz Cihazı (XRD).

Malzemelerin tabaka kalınlıklarının ölçüldüğü, mikro yapılarının incelendiği ve SEM-EDX analizlerin yapıldığı cihazı resim 3.9’da verilmiştir. SEM ve EDX analizleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi bünyesinde bulunan İleri Teknolojiler Merkezinde (ILTEM) yapılmıştır.



**Resim 3.9** Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan aşınma testi gerçekleştirebilmek için bilye disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Numunelerin aşınma deneylerin yapıldığı aşınma cihazının Resim 3.10’da verilmiştir.



**Resim 3.10** Aşınma cihazının görüntüsü.

Aşınma testlerinde ASTM G99 standardına uygun olarak tasarlanmış bir bilye-disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Bu sistemde, bilye tutucu olarak kullanılan sabit bir parça ve karşısında dönme hareketi yapan bir disk bulunmaktadır. Aşınma işleminden önce her bir numunelerin kir ve kalıntılardan arındırmak için alkol ile temizlenmiştir.

Aşınma deneylerinde, 30 mm çapındaki 17CrNiMo6 sementasyon çelik numuneler, İtimat Rulman firmasından temin edilen 8 mm çapında ve ortalama 1895 HV sertliğe sahip WC-Co bilyelere karşı oda sıcaklığında aşındırılmıştır. Aşınma testleri, bilye-disk sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup kuru sürtünme koşullarında oda sıcaklığında, 382 dev/dk sabit hızda, 10 N yük altında, 0,3 m/sn kayma hızında ve 500 metre mesafe boyunca yapılmıştır.

Deney düzeneği içerisinde yer alan gömülü yazılım, deney süresince sürtünme katsayılarının ( $\mu$ ) anlık verilerini hesaplamıştır. Aşınma hızı denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Aşınma\ hızı = \frac{Aşınma\ hacmi}{Kayma\ mesafesi \times Uygulanan\ yük} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki aşınma hacmi için denklem 3.2 ve çevre hesaplaması için denklem 3.3 kullanılmıştır.

$$Aşınma\ hacmi = Aşınma\ alanı \times Çevre \quad (3.2)$$

$$Çevre = \pi \times d \quad (3.3)$$

Taylor Hubson marka tribometer cihazı kullanılarak aşınma alanları ölçülmüştür.

### 3.3 Deney Parametreleri

Tez çalışmasında 17CrNiMo6 (1.6587) çeliği kullanılmıştır. Ø30x10 mm boyutlarında işlenen çeliği borlama işlemi yapılmadan önce zımpara (sırası ile 240-400-600-800 işlemlerine tabi tutulmuş ve 1 µm alümina solüsyonunda zımpara işlemi yapıldıktan sonra parlatma yapılmıştır. Katı borlama işleminin gerçekleştirilmesi için, paslanmayan çelik bir kutu içerisine Ekabor-II tozu eklenmiştir. Numuneler, toz dolu kutunun içine yerleştirilmiş ve üzerlerine Ekabor-II tozu eklenerek tamamen kaplanmıştır. Isıl işlem sırasında oksijen girişi ve çıkışını önlemek için 2 mm ekrit tozu kullanılarak kutunun kapağı kapatılmıştır. Kapağın etrafı hava girişini engellemek için şamot çamuru ile örülerek sıkıca kapatılmıştır. Sıcaklık değişimleri elektrik rezistanslı fırında  $\pm 1^\circ\text{C}$  hassasiyetle kontrol edilebilmiş ve sırasıyla 900, 950 ve  $1000^\circ\text{C}$ 'de 2, 4 ve 6 saat süresiyle katı borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler, fırından çıkarılarak kutu içinde oda sıcaklığına kadar havada soğutulmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler Çizelge 3.2'te görülmektedir.

**Çizelge 3.2** Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler.

| <b>DENEY PARAMETRELERİ</b> |                                  |
|----------------------------|----------------------------------|
| Malzeme                    | Sementasyon Çelik                |
| İşlem Sıcaklığı            | 900, 950 ve $1000^\circ\text{C}$ |

**Çizelge 3.2 (Devam)** Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler.

|                  |                 |            |
|------------------|-----------------|------------|
| İşlem Süresi     | 2,4 ve 6 (Saat) |            |
| İz Çapı          | 15 (mm)         |            |
| Aşınma Deneyleri |                 |            |
| Uygulanan Yük    | Aşınma Mesafesi | Kayma Hızı |
| 10 N             | 500 m           | 0,3 m/s    |

### 3.4 Metalografik İşlemler

Borlama işlemi sonrası numunelerin kesiti alınarak kalıplama işlemine tabi tutulduktan sonra metalografik olarak zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonraki işlemde 1µm alümina solüsyon ile zımparalama ve parlatma işlemi gerçekleştirilecektir. Dağlama işlemi %3,5 içerikli nital dağlayıcı kullanılmıştır. Bu işlemler, metal yüzeylerdeki oksit tabakalarını giderir ve daha düzgün bir yüzey oluşturur.

Farklı özelliklerini bulmak için kullanılan tekniktir. Optik mikroskop, malzemenin yüzey detaylarını görüntülemek için kullanılır.

### 3.5 Tabaka Kalınlık Değeri Ölçümleri

Borlanmış malzemelerin tabaka kalınlıklarının ölçümünde Nikon MA100 optik mikroskobu kullanılarak 10 farklı noktadan alınan ölçü verilerin ortalaması kullanılmıştır.

### 3.6 Sertlik Değeri Ölçümleri

Malzemelerin yüzey kısmında oluşan sertlik ölçüm cihazı kullanılarak, bor tabakalarının sertlik ölçümleri 25 gr. yük uygulanarak Vickers sertlik ölçme yöntemi ile Metkon Duroline M4 cihazı ile ölçülmüştür.

### 3.7 XRD Analizi

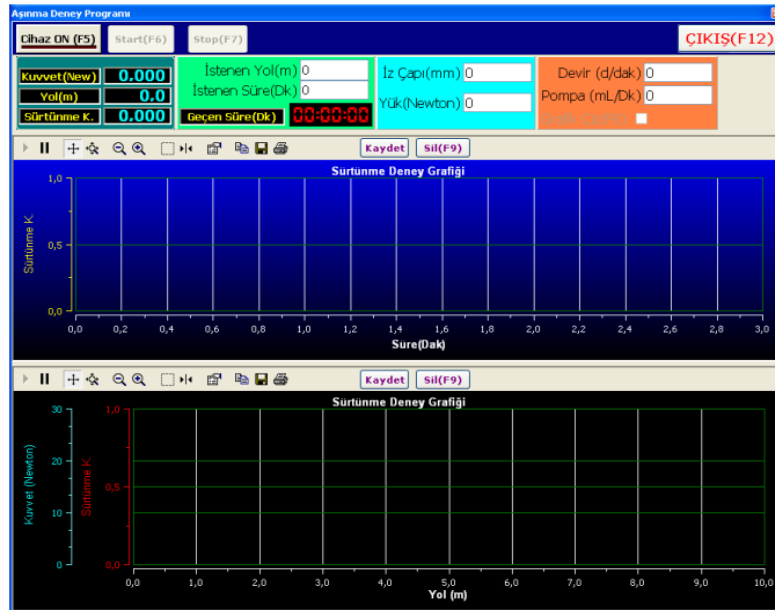
Malzemenin yüzey kısmında oluşan fazların analizlerin Shimadzu XRD-6000 marka ve modeli XRD cihazı kullanılarak belirlenmiş. XRD cihazında ışıın olarak CuKα radyasyonu kullanılarak malzemelerin yüzey kısımları, bu aralıkta analiz edilmiştir.

### 3.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

Bor işlemin aşınma işlemine tabi tutulan malzemelerin aşınma bölgelerindeki mikro yapının analizi taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir.

### 3.9 Aşınma Deneyleri

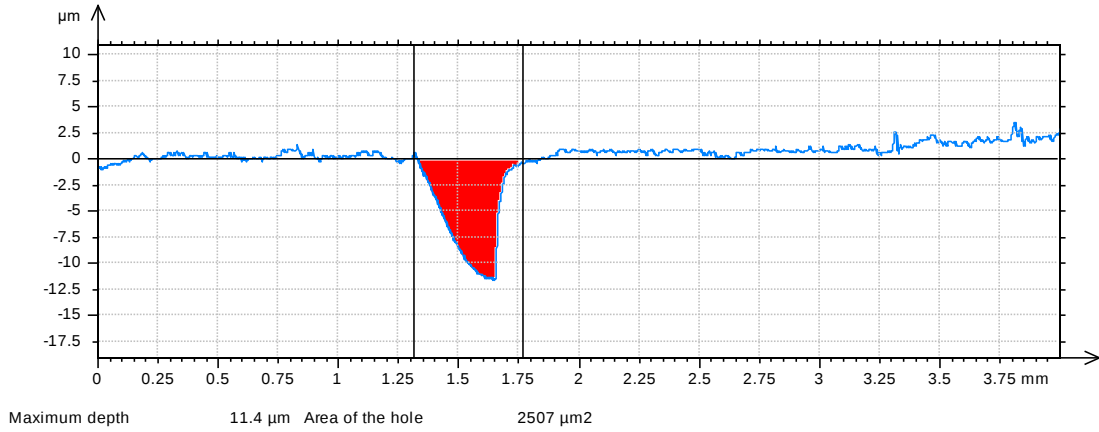
Farklı farklı deneylerde farklı aşındırma malzemesi referansını kullanılarak, aşındırma yüzey kısmında oluşabilecek bozulmalardan kaynaklanan hata kısımları ortadan kaldırılmıştır. Aşınma deneylerin sonunda malzemelerin aşınma hacimleri Rugosimeter adlandırılan cihazdan elde edilen aşınma kesit bölgedeki oluşan alanlarının, aşınma izinin çevresiyle çarpım işlemleri sonunda elde edilecektir. Aşınma hızı ve aşınan hacim miktarının kayma mesafesi ile uygulanan yük çarpımına bölünmesi ile hesaplanmıştır.



Resim 3.11 Aşınma deney programı.

Sürtünme katsayısı programı yardımıyla kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayıların değerleri elde edilmiştir. Aşınma deneylerin sonucunda değerler malzemelerin borlama işleminde kayma hızlarına süresine bağlı olarak sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlülüğü, aşınma oranı grafikleri elde edilmiştir.

1000 °C'deki 2 saat olan malzemenin ait aşınma grafiği Resim 3.12'de gösterilmiştir.



**Resim 3.12** Rugosimeter cihazından alınan aşınma bölgesinin grafiği.

### 3.10 Sonlu Elemanlar Analizi

Sonlu elemanlar metodu (FEM), mühendislik problemlerinin sayısal çözüm arayışında kullanılan bir yaklaşımı ifade eder. Bu yöntemde, çözülmesi gereken mühendislik problemleri belirli bölgelere ayrılır ve her bir bölgede aranan fonksiyonlar polinom şeklinde ifade edilir. Temel hedef, her bir alt bölgedeki polinom çözümün katsayılarını belirlemektir. Genel olarak, bu çözüm yöntemi, başlangıç değer problemlerini ve sınır değer problemlerini hesaplayarak çözmek amacını taşır (Karakoca 2022).

Farklı borür tabakalarının mekanik özelliklerinin deneysel ve FEM ile ayrıntılı olarak incelenmesi ve bulunan sonuçların karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak iki boyutlu olarak kabul edilmiş ve deneysel çalışmalardan elde edilen katsayıların yüzey ve yüzey altı gerilmeleri üzerinde etkisinin araştırılması incelenmiştir.

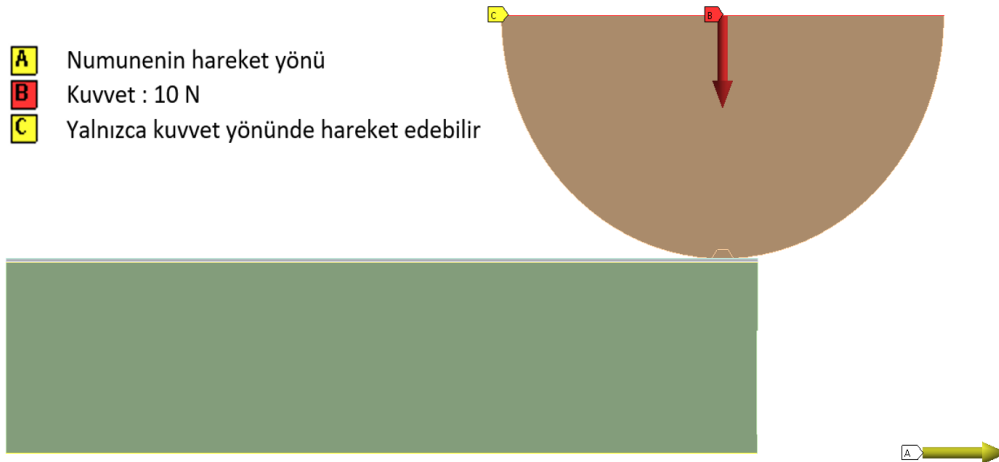
### 3.11 Nümerik Analiz

Gerçek dünya geometrisinin belirli sınır şartları ve yüklemeler altında davranışını içeren bir problemin analizi karmaşık bir süreç içerir. Bu gibi sistemlerin performansı deneysel veya sayısal yollarla elde edilebilir. Deneysel yöntem, belirli standartlara uygun farklı sistemlerle birlikte uygun şartlar altında gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilir. Sayısal yaklaşımda ise yüklemeler ve sınır şartları ile fiziğine uygun varsayımların nümerik olarak çözülmesini içerir. Yapısal sistemleri, yüklemeler altında karmaşık bir geometri olsa dahi sistemin davranışını nümerik olarak ölçülebilir kılan Sonlu Elemanlar Yöntemi

günümüzde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada aşınma davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanarak simüle edilmiştir. Sonlu elemanlar yazılımını kullanan ANSYS ticari yazılımında geometrinin basitleştirme işlemi, malzeme özelliklerinin belirlenmesi, sınır şartları ve yüklemelerin uygulanması ve sonuçların görselleştirilmesi dahil birçok işlem gerçekleştirilmiştir.

### 3.12 Sınır Şartları ve Yüklemeler

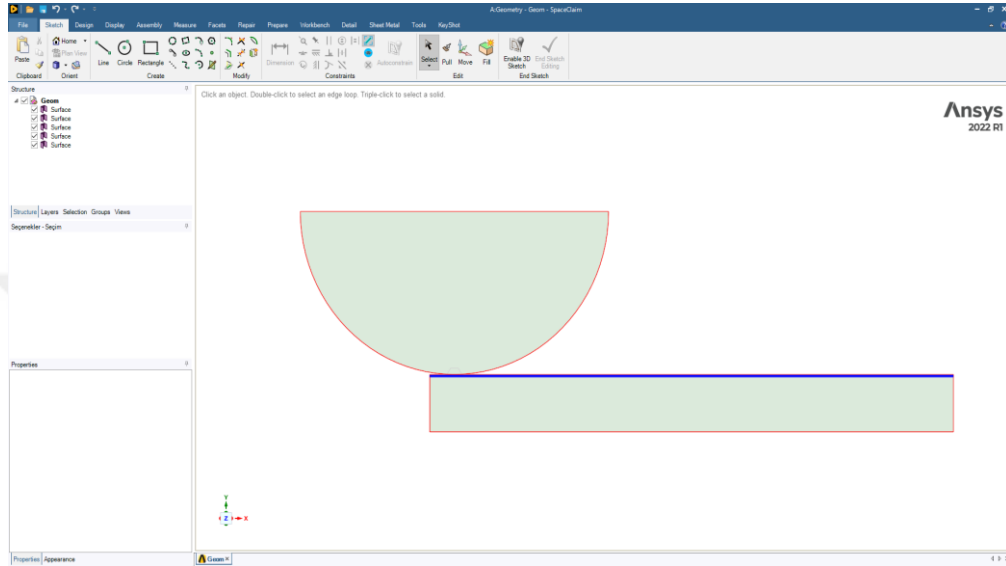
Model, bilye ve numuneden oluşmaktadır. Numune, gerilmenin geliştiği 20 mikronluk ilk üç katman ve ana gövdeden meydana gelmektedir. Bilye ise numuneye temas edecek şekilde yerleştirilmiş ve numuneye dönük yarısı modellenerek sisteme dahil edilmiştir. Bütün model 2b olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.1’de modelin yükleme ve sınır şartları gösterilmektedir. Bilyenin yarım kısmından numuneye doğru sabit 10 N’luk yükleme uygulanmıştır. Numune 382 devir/dakika hareket edecek şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 3.1 Sınır şartları ve yüklemeler

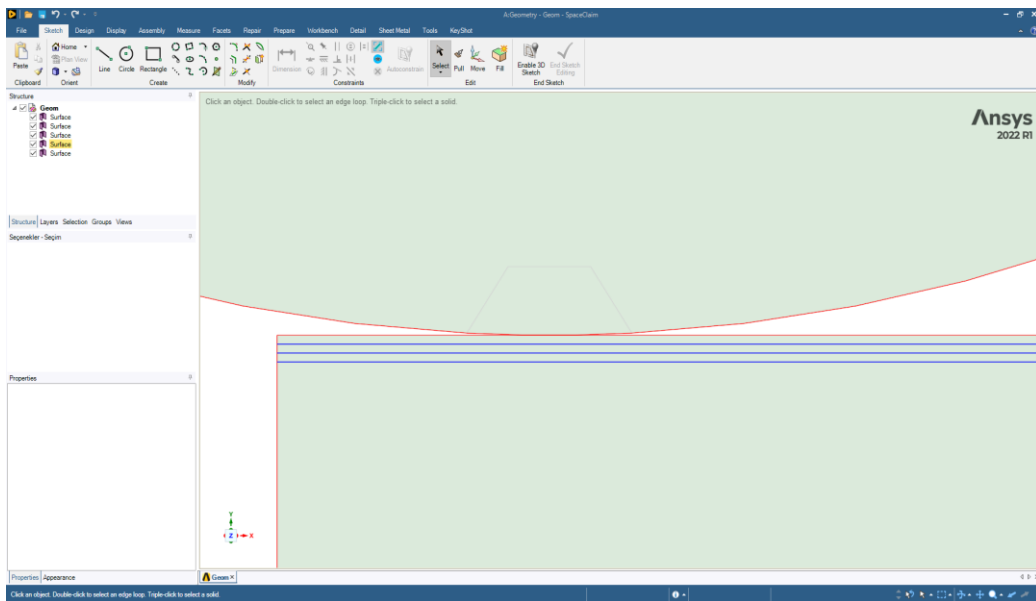
### 3.12.1 Sonlu Elemanlar Metodun Modeli

Resim 3.13'te numune ve bilyenin modellenmesi görülmektedir. Gerilme dağılımı içerisinde kalacak şekilde mesh sayısından tasarruf etmek için daraltıldı. Bilye de aynı şekilde yarım olarak modele dahil edildi.



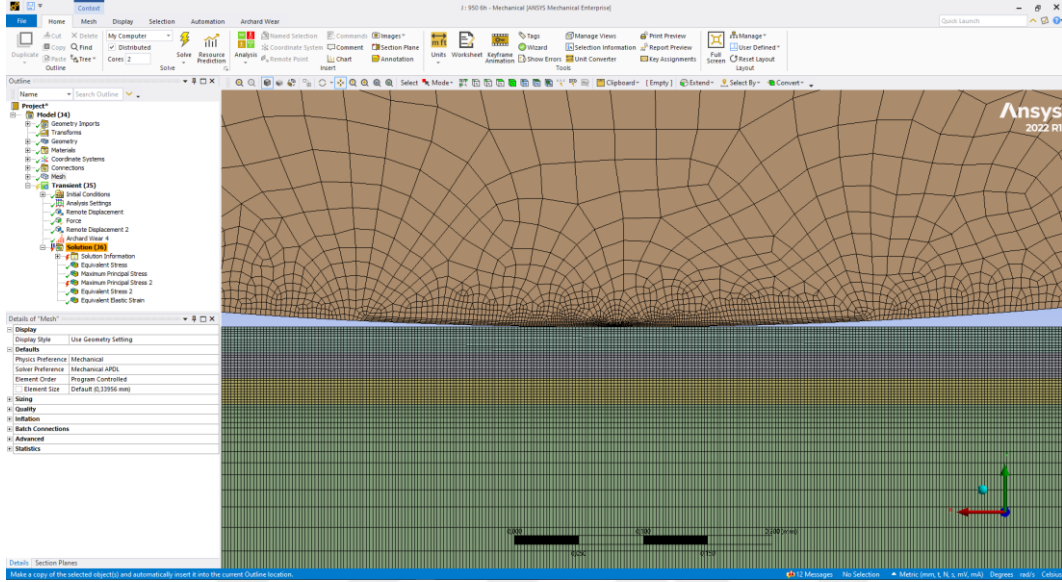
**Resim 3.13** Numune ve bilye iki boyutlu olarak modellenmesi

Numuneler her 20 mikronda bir ölçüm yapıldığı için ilk üç katman 20 mikronluk uzunlukta bölünerek mavi renkteki kenarlar boyunca ağ örgüsü komşu kenar ile paylaşılmıştır (Resim 3.14).



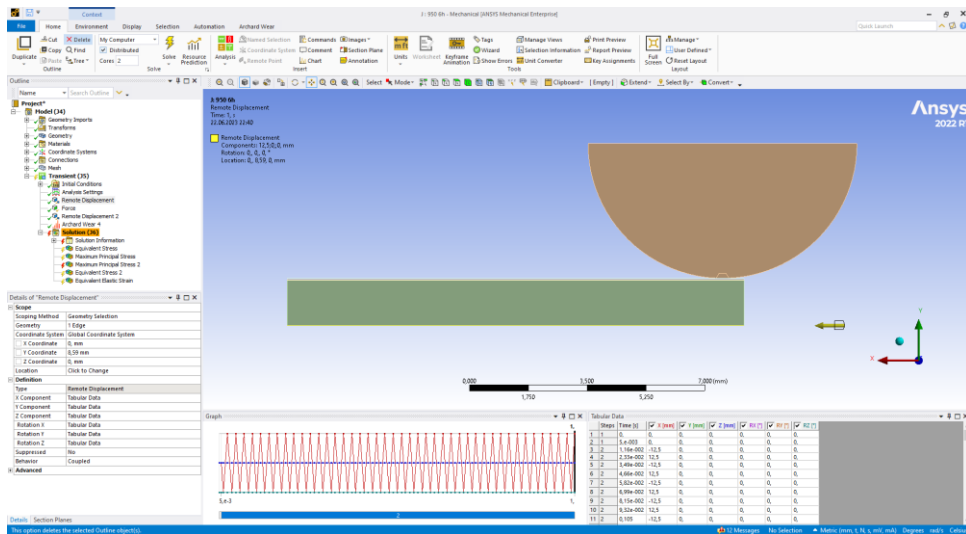
**Resim 3.14** Ağ örgüsü oluşumu.

Meshin genel görünümü Resim 3.15 te görüldüğü gibidir. Mesh in minimum eleman boyutunu maksimum gerilmenin değişmediği yere kadar küçültüp bütün çalışmalar bu mesh ile gerçekleştirilmiştir.



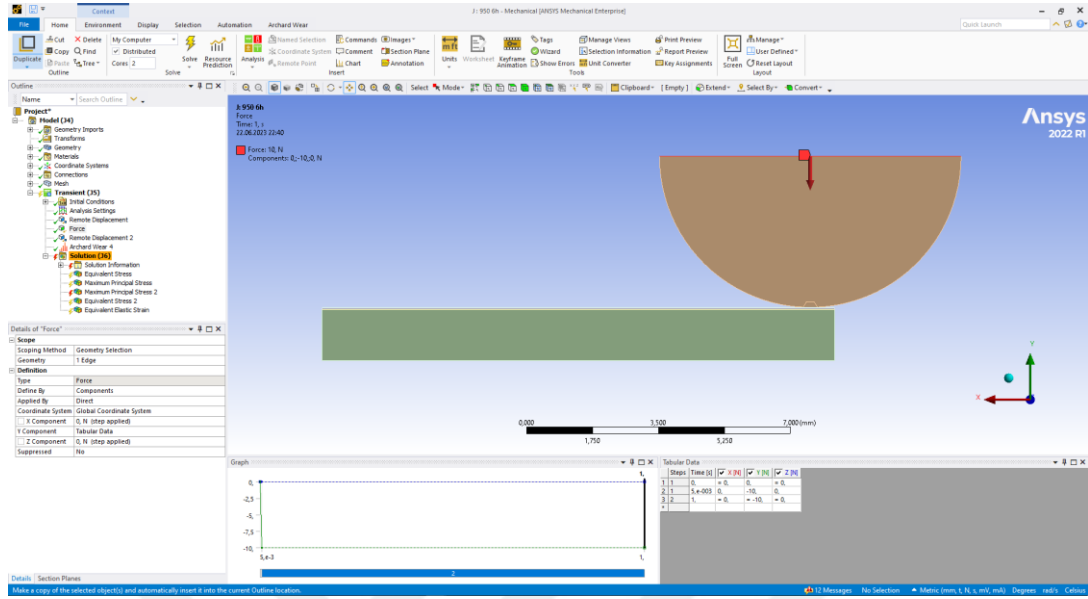
**Resim 3.15** Mesh görünümü

Zaman adımları 0,1684 olarak belirlendi. Bilyenin numune üzerindeki hareketini iki boyutlu olarak simüle edebilmek için numune üzerinde gerçekte birim zamanda ne kadar yol alıyorsa hızını ve alacağı yolu ayarlayıp gittiği yolu tekrar döneceği şekilde tanımlama yapılmıştı (Resim 3.16).



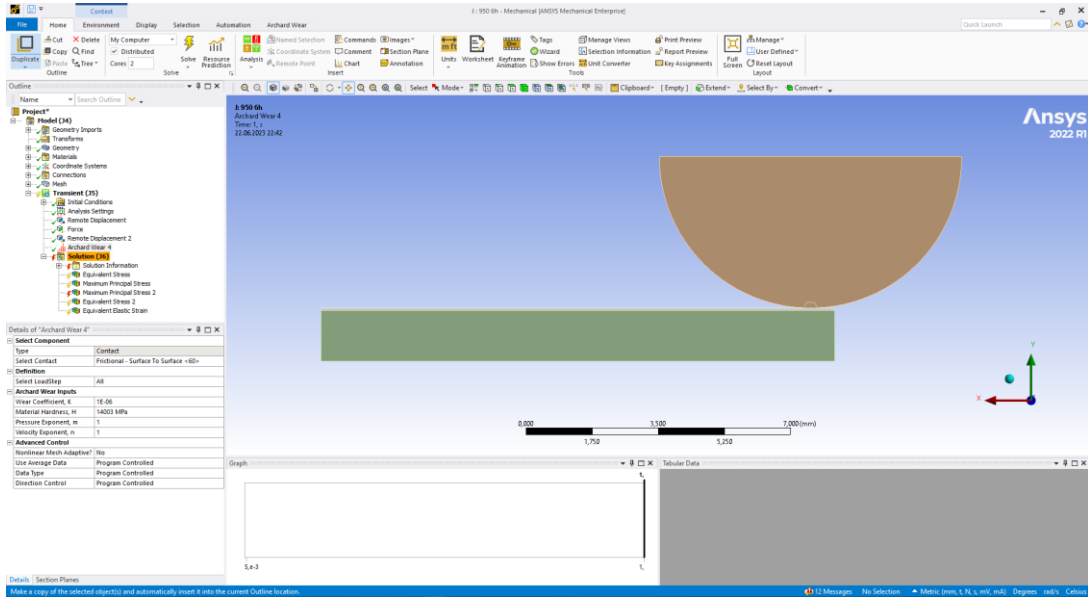
**Resim 3.16** Parametrelerin tanımlanması

Yükleme bilyenin simetrik yüzeyi üzerinden yapılmıştır (Resim 3.17).



Resim 3.17 Yük uygulama işlemi

Yüzey sertliğini modele dahil edebilmek ve aşınma hacmini bulabilmek için archard wear modeli kullanılmıştır. Ölçülen sertlik değeri hardness'a çevirilerek temas yüzeyine uygulanmıştır (Resim 3.18).



Resim 3.18 Archard wear modelinin uygulanması

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1 Borlanmış 17CrNiMo6 Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalar sonucunda 900 °C, 950 °C ve 1000 °C işlem sıcaklarında 2 saat, 4 saat ve 6 saatte Ekabor II tozuyla katı borlanmış numunelerin ara kesit mikroyapıları çıkarılmıştır.

Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, sementasyon çeliklerinin yüzeylerinde borür tabakalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, borlama işlemi sırasında görülen 900 °C, 950 °C ve 1000 °C sıcaklıklarında gerçekleştirilen tüm deney numunelerinin yüzeylerinde belirlenmiştir.

Borlama işlemi sonucunda numuneler üzerinde testere dişi şeklinde borür tabakalarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Optik mikroskop incelemeleri, koyu bölgelerin FeB fazını, açık renkteki bölgelerin ise Fe<sub>2</sub>B fazını temsil ettiğini ortaya koymuştur. Literatürde, çeliklerin borlanması sonucunda FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının oluştuğu ve bu fazların mikroyapı incelemeleriyle net bir şekilde ayrıştığı bilinmektedir (Culha 2008).

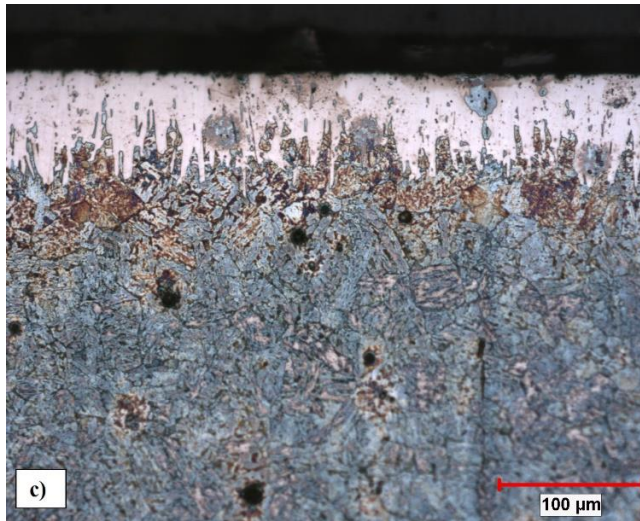
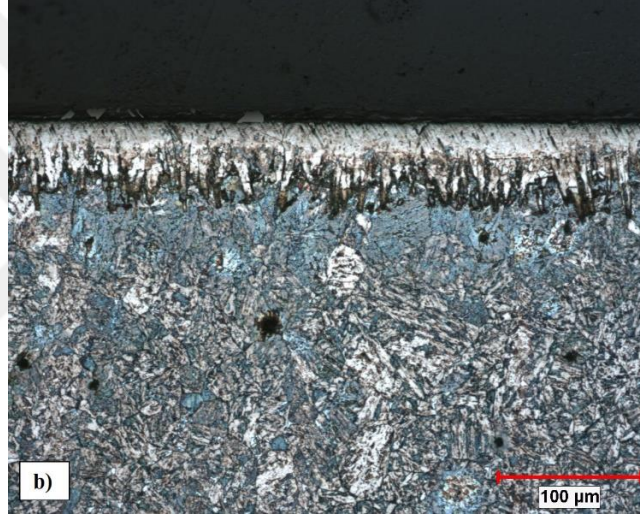
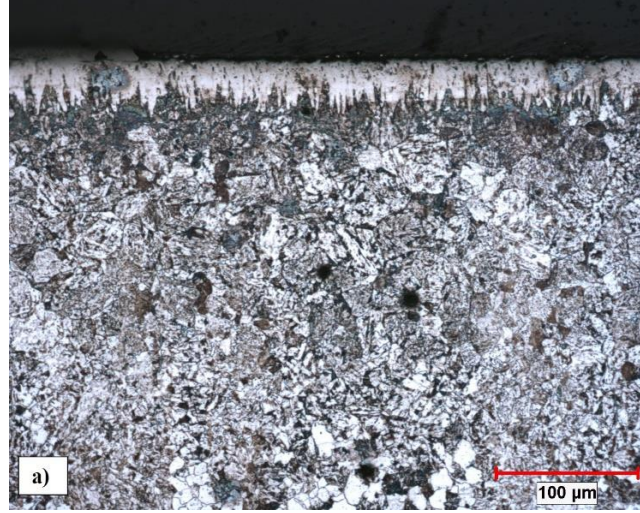
Borlama işleminde sabit bir borlama sıcaklığı kullanıldığında, borlama süresinin artmasıyla birlikte borür tabaka kalınlıklarında bir artış gözlenmiştir. Bu bulgu, literatürde de bahsedilen bir durumdur (Oliveira 2010, İzçiler 2009). Daha yüksek sıcaklık ve uzun borlama süreleri, daha kalın borür tabakalarının elde edilmesini sağlamaktadır (Ozdemir 2009).

Borlama işlemi sırasında, borun yüzeye yayılması sonucunda parçanın en üst yüzeyinde borlu bir bileşik tabaka oluşur. Bu tabakanın altında bir geçiş bölgesi bulunur ve en iç kısımda ise matris yer alır. Borlama sonucunda oluşan borür tabakasında üst kısımda FeB fazı, alt kısımda ise Fe<sub>2</sub>B fazı meydana gelir.

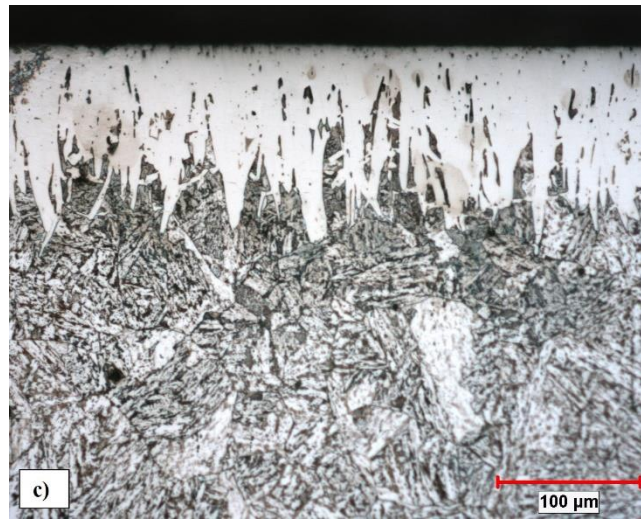
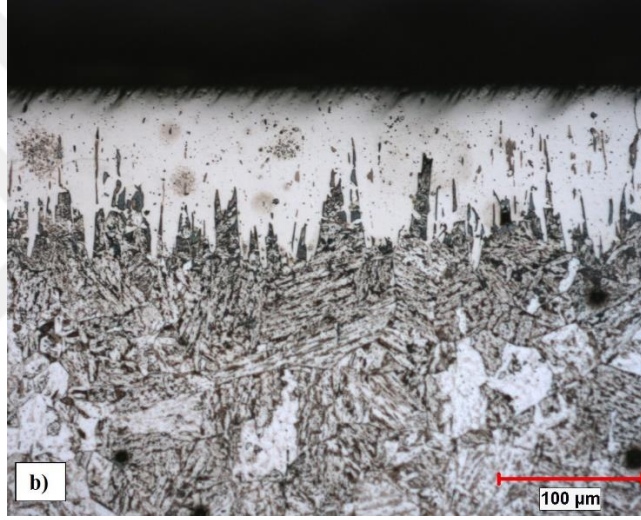
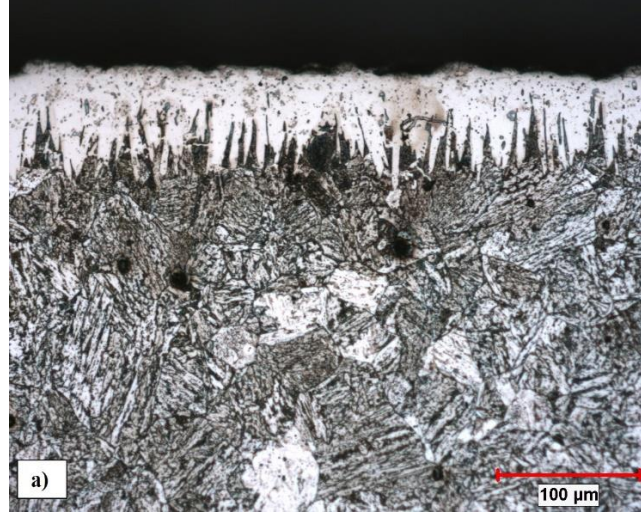
Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3'te 900, 950 ve 1000 °C'de 2, 4 ve 6 saatte borlama yapılan semantasyon çeliği numunelerin mikro yapı resimleri verilmiştir. Optik fotoğrafların incelenmesi sonucunda, 900 °C ve 950 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saat borlanan numuneler ile 1000 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saatte borlanan parçalar arasında karşılaştırma yapıldığında, 1000 °C işlem sıcaklığındaki numunelerin tabaka kalınlıklarının yanı sıra geçiş bölgelerinin kalınlıklarının da arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, 1000 °C işlem sıcaklığında 2, 4 ve 6 saat borlanan numuneler arasında yapılan karşılaştırmada, işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte 6 saatlik borlama işlemine tabi tutulan numunenin tabaka kalınlığının 4 saatlik işlem gören numuneden fazla olduğu, 4 saatlik işlem gören numunenin ise 2 saatlik işlem gören numuneden daha fazla tabaka kalınlığı gözlemlenmiştir.

Şahin (2009), AISI 1020, 1040 ve 2714 çeliklerinin 900°C sıcaklıkta 2 ve 4 saat boyunca Ekabor I tozuyla borlanması sonucunda yapılan çalışmada, AISI 1020 ve 1040 çeliklerinde borür tabaka kalınlığının numune boyutlarına göre %2 arttığı belirlenmiştir. Buna karşılık, AISI 2714 çeliğinde bu oranın %3,33 olduğu gözlemlenmiştir. Borlama süresinin uzamasıyla birlikte, AISI 1020 ve 1040 çeliklerinde yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı ancak AISI 2714 çeliğinde 2 saatten sonra sabit kaldığı görülmüştür. Ancak, 2 saatten sonra boyutlardaki artış hızının yavaşladığı tespit edilmiştir (Şahin 2009).

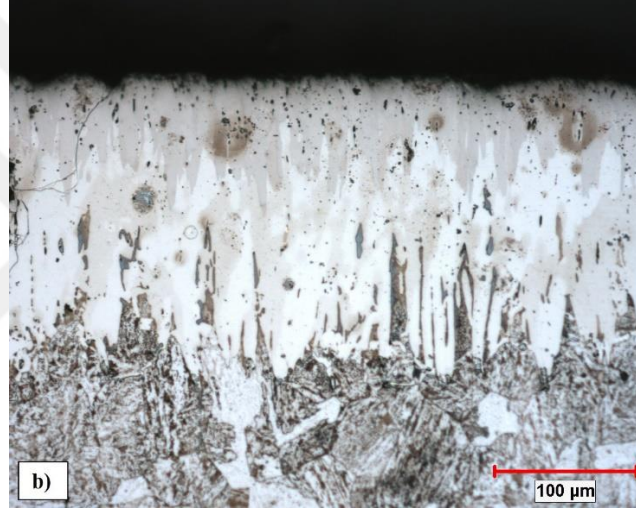
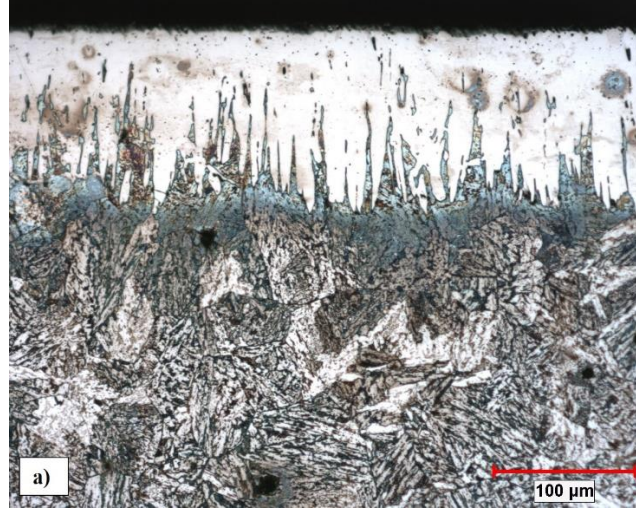
Taktak (2007), AISI H13 ve 304 paslanmaz çeliklerinin farklı sıcaklık ve sürelerde %60 boraks, %20 kalsine borik asit ve %20 ferro silisyum karışımı atmosferik şartlarda borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi sonucunda, 900°C sıcaklıkta 5 saatlik borlama süresinde AISI H13 ve 304 çeliğinde FeB, Fe<sub>2</sub>B, CrB ve Ni<sub>3</sub>B fazları tespit edilmiştir. Ayrıca, borlama işlemi sonucunda AISI H13 ve 304 çeliğinin bor tabaka kalınlıkları sırasıyla 8-58 µm ve 4-42 µm olarak ölçülmüştür. Mikro sertlik değerleri de borlama sonrasında AISI H13 için 1860 HV ve 304 çeliği için 2150 HV olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, borlama işlem süresi ve sıcaklığı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma, AISI H13 ve 304 paslanmaz çeliğinin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve yüzey sertliğini artırmak için borlama işleminin etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 4.1** 900 °C sıcaklıkta borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin optik mikroskop altında incelenen kesit mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat



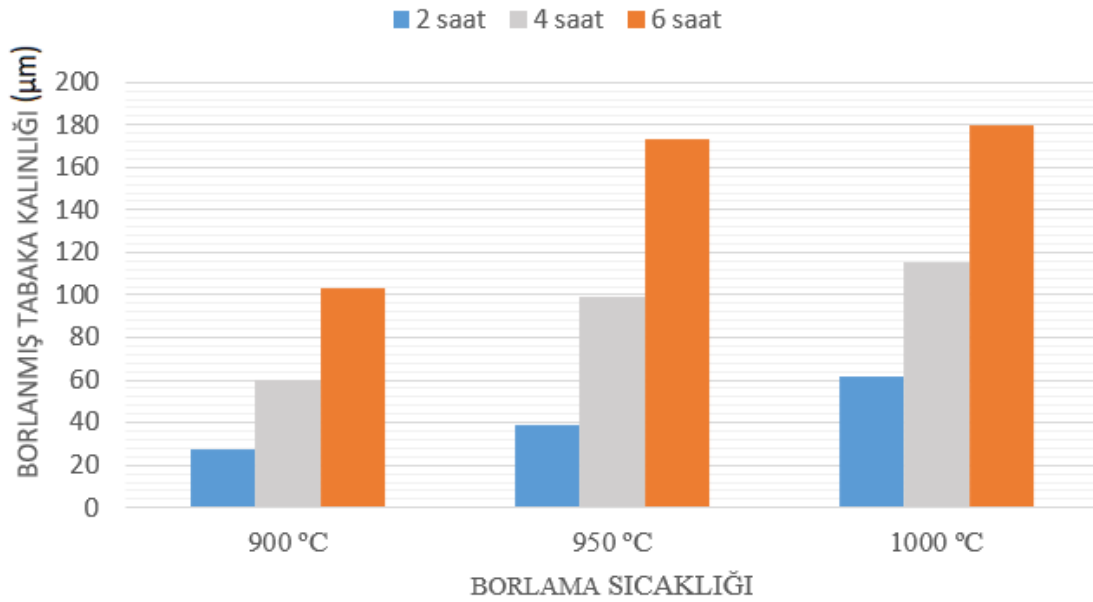
**Şekil 4.2** 950 °C sıcaklıkta borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin optik mikroskop altında incelenen kesit mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat



**Şekil 4.3** 1000 °C sıcaklıkta borlanmış 17CrNiMo6 çeliğinin optik mikroskop altında incelenen kesit mikro yapıları, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat

## 4.2 Semantasyon Çeliğinin Borlanması Sonucunda Elde Edilen Borür Tabaka Kalınlıkları

900 °C, 950 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat borlanmış 17CrNiMo6 çeliğın bor tabaka değışimlerini gösteren grafik, Şekil 4.4'te verilmiştir. 900°C'de 2 saat borlanmış 17CrNiMo6 çeliğının (27.3 µm), en düşük tabaka kalınlığı elde edilmiştir. 1000°C'de 6 saat (180 µm), en yüksek tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Elde edilen değler literatür değlerle uyumludur (Campos-Silva 2010, Taktak 2006, Ozbek 2011, Kartal 2011).

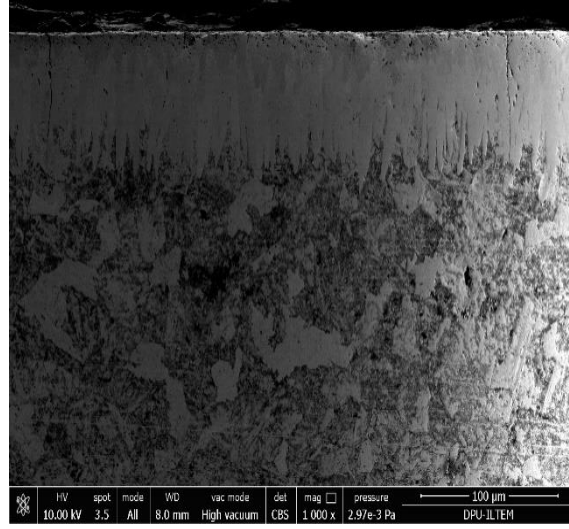


Şekil 4.4 Borlanmış 17CrNiMo6 çeliğının borlama sıcaklığı ve saate bağı olarak tabaka kalınlığındaki değışimi.

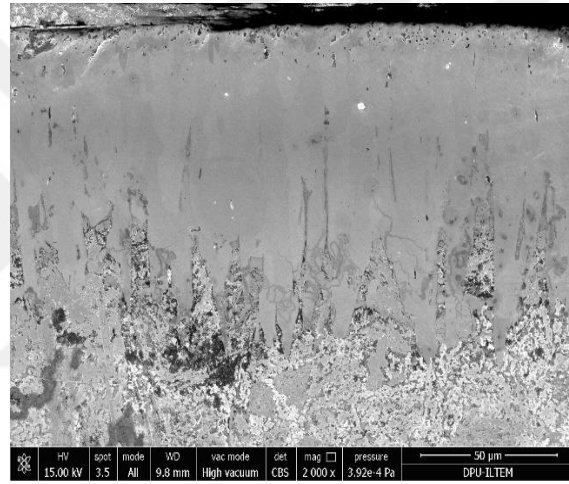
### 4.2.1 Bor Tabakası SEM Mikroyapısı ve EDX Analizleri

Borlama işleminin sıcaklığı ve süresinin artması, borür tabaka kalınlığının artmasına neden olmuştur. Bu sonuç, yapılan çalışmalarla literatürde uyumlu bir şekilde gösterilmiştir (Ueda 2000, Günen 2017).

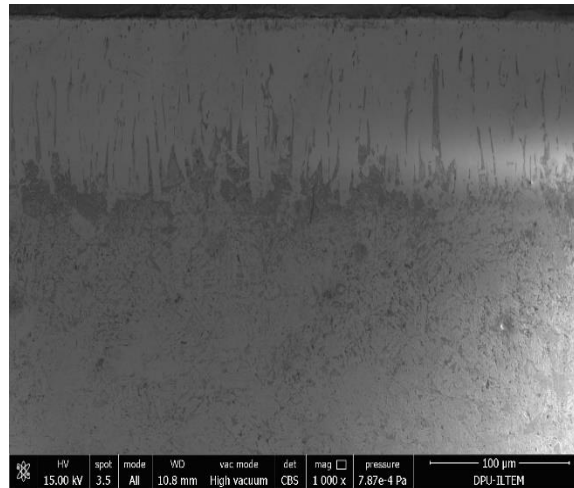
Şekil 4.5'te, 950 °C'de 2, 4 ve 6 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan numunelerin SEM mikroyapı fotoğrafları sunulmuştur. Burada tabakalar testere dişli yapıya sahip olduğu görülmektedir.



(a)



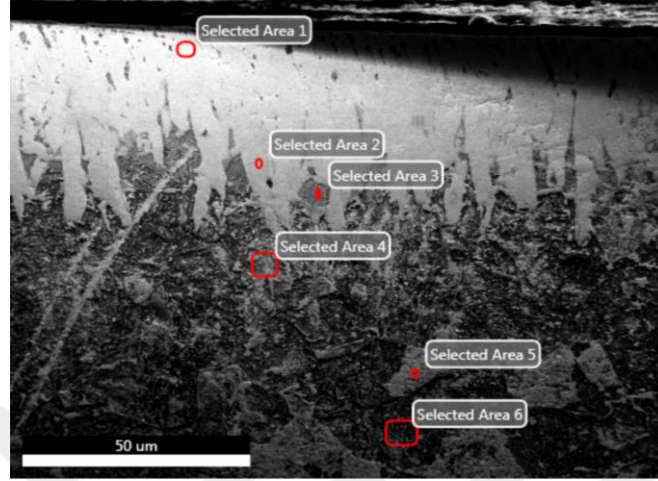
(b)



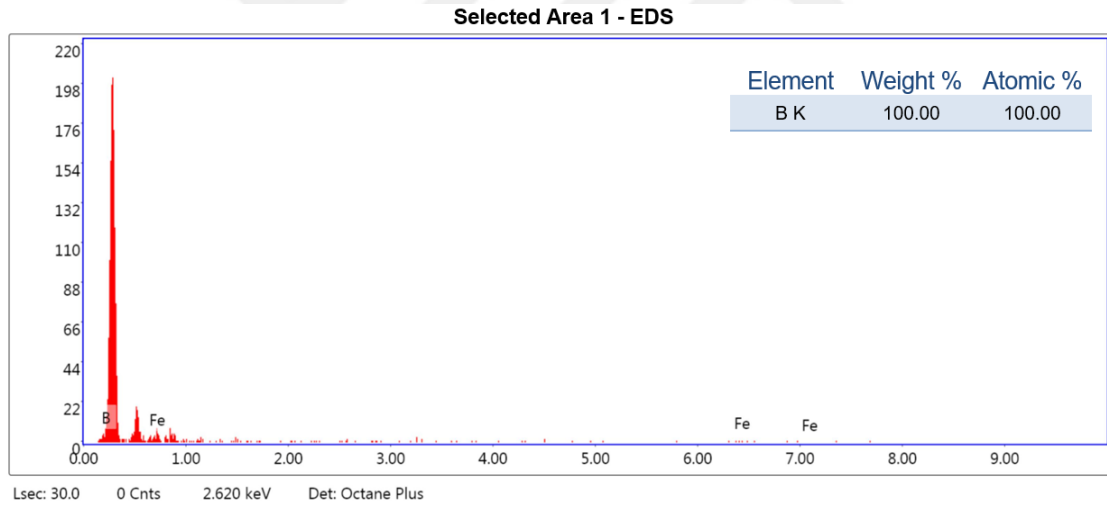
(c)

**Şekil 4.5** 950 °C’de a)2 saat, b)4 saat, c)6 saatte borlanmış sementasyon çeliğinin bor tabakasının SEM mikro yapıları.

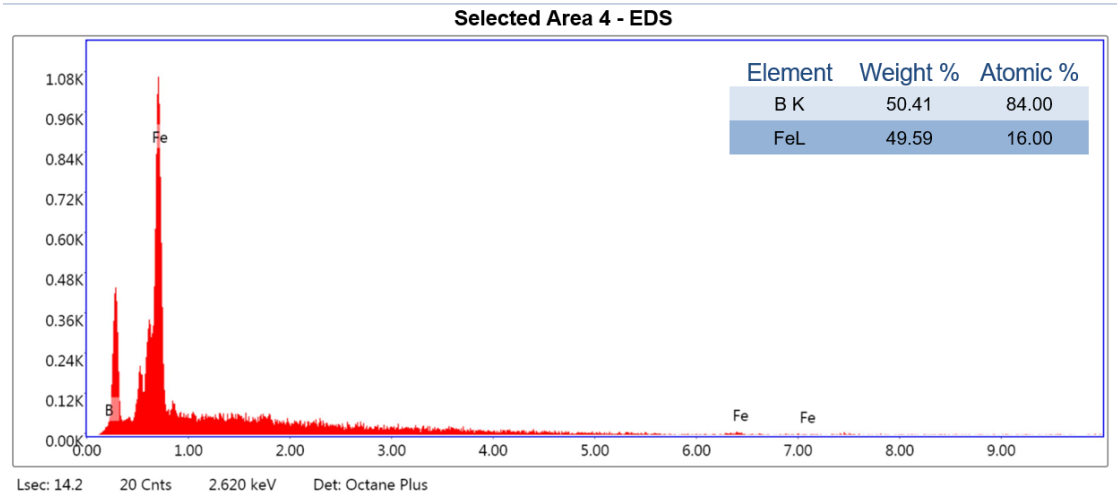
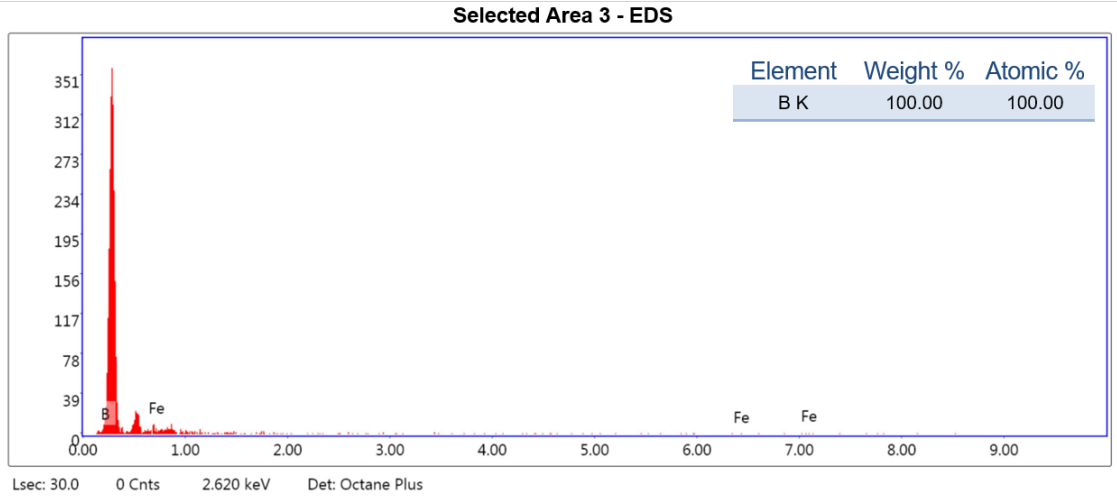
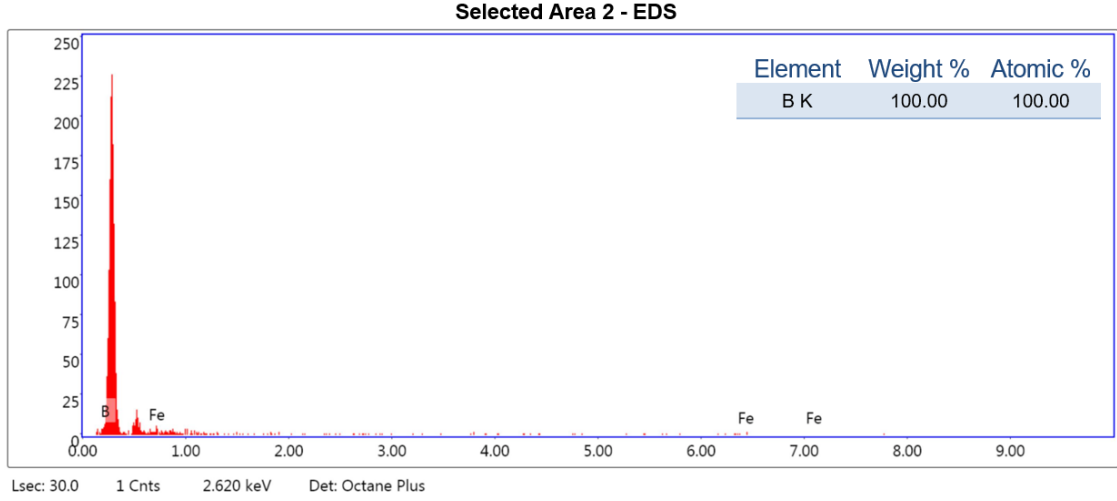
900 °C sıcaklığında ve 4 saat olan numunenin borür tabakasının ara kesitinden alınan EDS verilerin Şekil 4.6 ve 4.7’de ayrıntılı olarak verilmiştir.



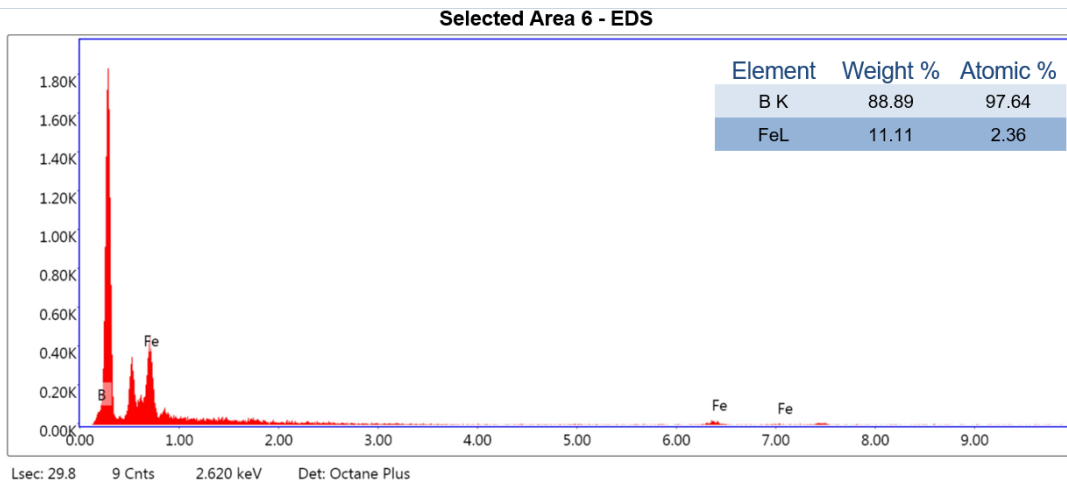
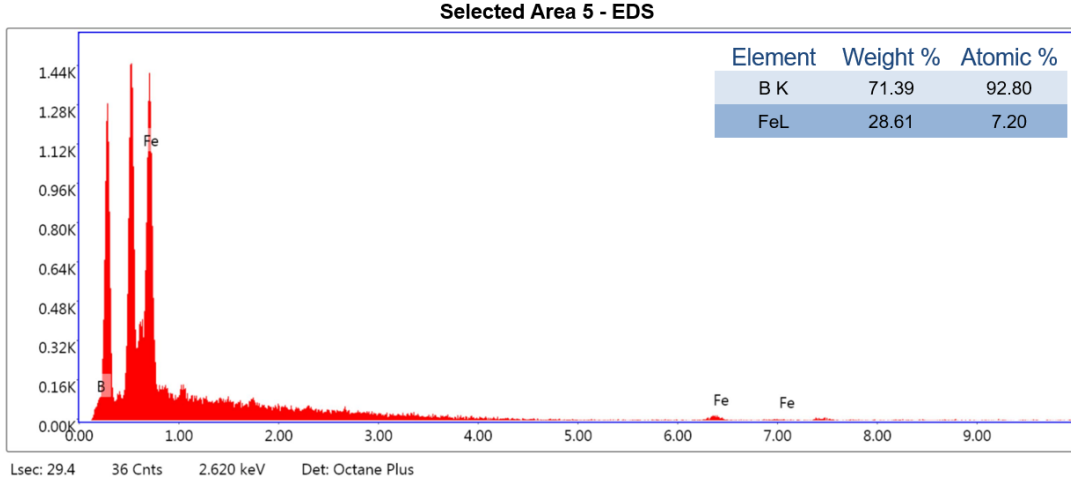
Şekil 4.6 900°C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.



Şekil 4.7 900 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.



**Şekil 4.7 (Devam)** 900 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.



**Şekil 4.7 (Devam)** 900 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.

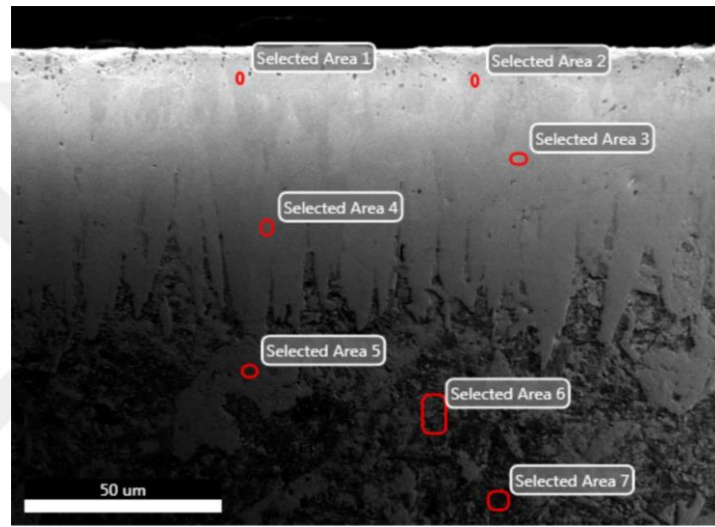
Literatürde belirtildiği üzere, tane sınırları, dislokasyonlar ve mikro boyuttaki hataların bulunduğu bölgelerin borür fazlarının oluşumunda başlangıç noktaları olduğu ve bu bölgelerde devam ettiği ifade edilmiştir. Borlama işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin optik görüntüleri incelendiğinde, 900 °C işlem sıcaklığına sahip tüm numunelerin borür tabakasında üç farklı bölge olduğu görülmüştür.

Elementel analiz sonuçlarına göre, yüzeydeki demir konsantrasyonunun azalması sonucunda bor tabakası meydana gelmiştir. Bu durum,  $Fe_2B$  fazlarının varlığını doğrulamaktadır.

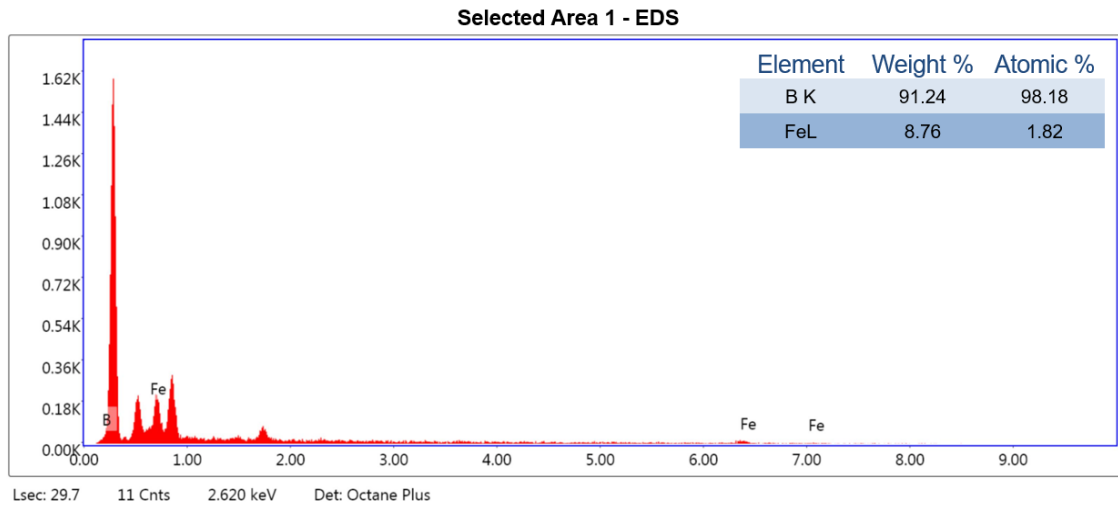
EDS verileri incelendiğinde, 900 °C işlem sıcaklığının difüzyon olayını sağladığı görülmektedir. Bu durum, kaplama ve numune arasındaki difüzyonun kolaylaştığını

göstermektedir. Numunenin yüzeyine doğru ilerledikçe, element difüzyonunun azaldığı ve malzemelerin kendi içyapılarında bulunan yüzdelere yakın değerlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, borür tabakasında en yüksek bor miktarı tespit edilirken, geçiş bölgesinde bu miktarın azaldığı ve ana metalde bor elementine rastlanmadığı belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda, borür tabakası ve geçiş bölgesinde  $Fe_2B$  fazlarının oluştuğu doğrulanmıştır.

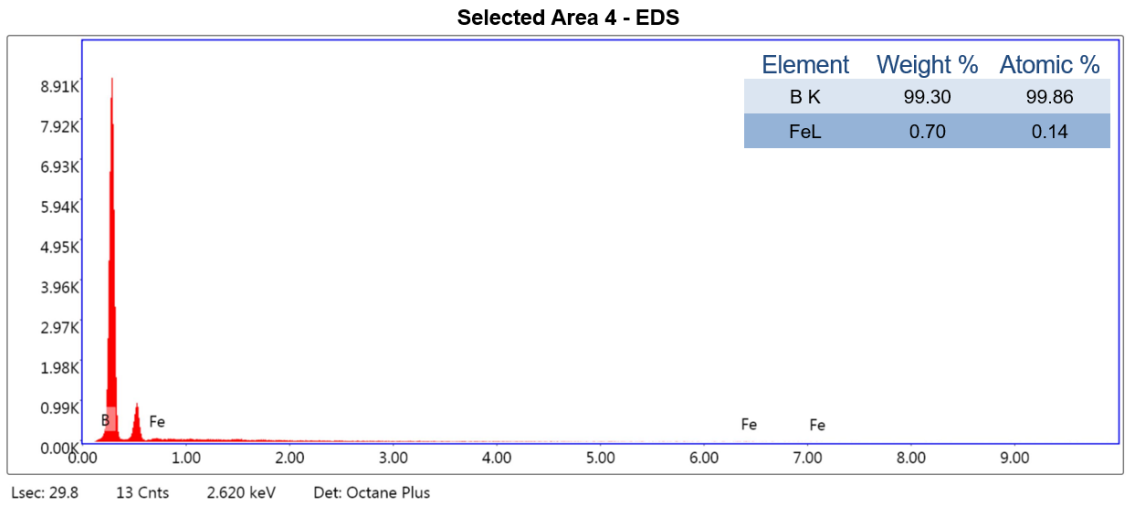
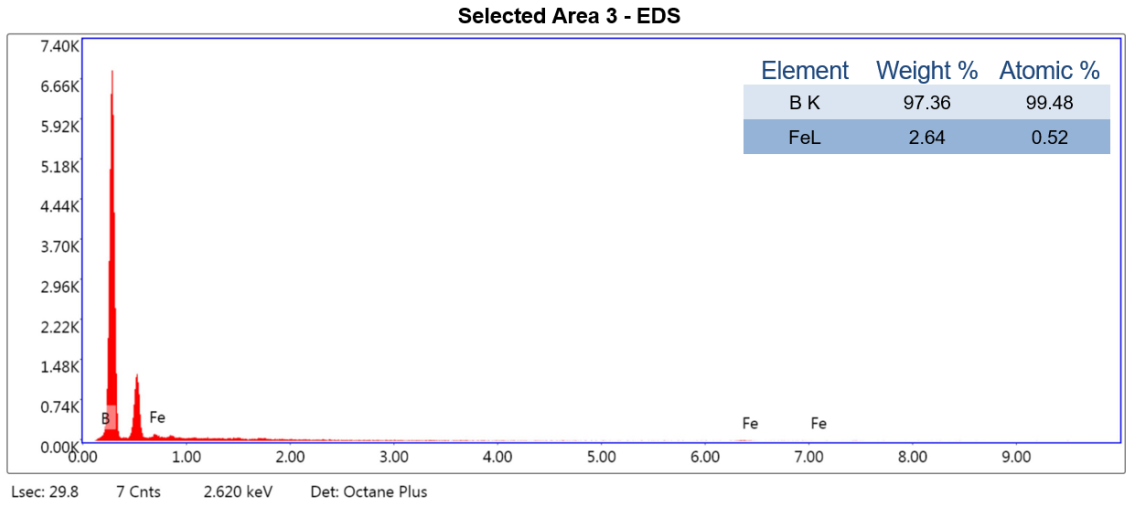
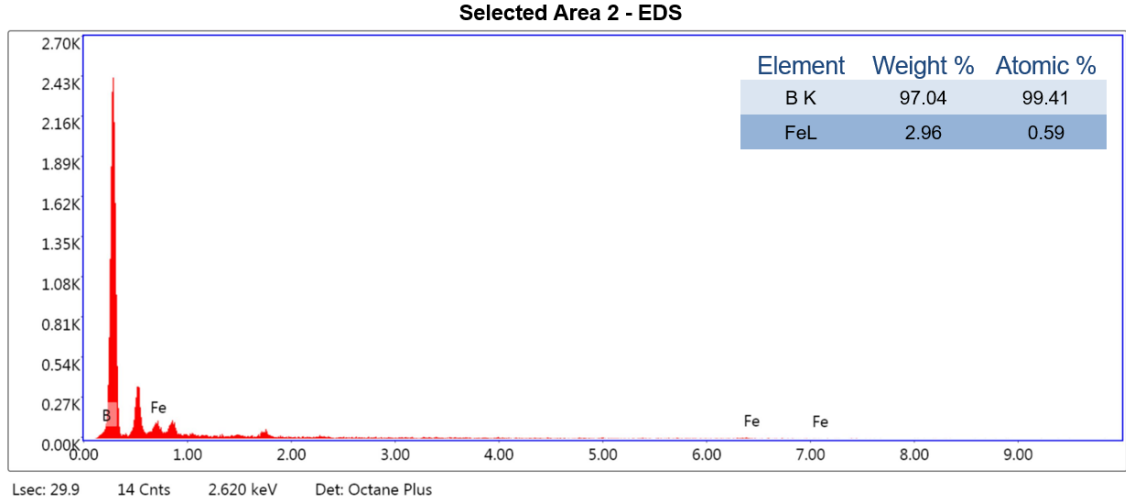
950 °C sıcaklığında ve 2 saat olan numunenin borür tabakasının (Şekil 4.8) ara kesitinden alınan EDS verileri Şekil 4.9’da ayrıntılı olarak verilmiştir.



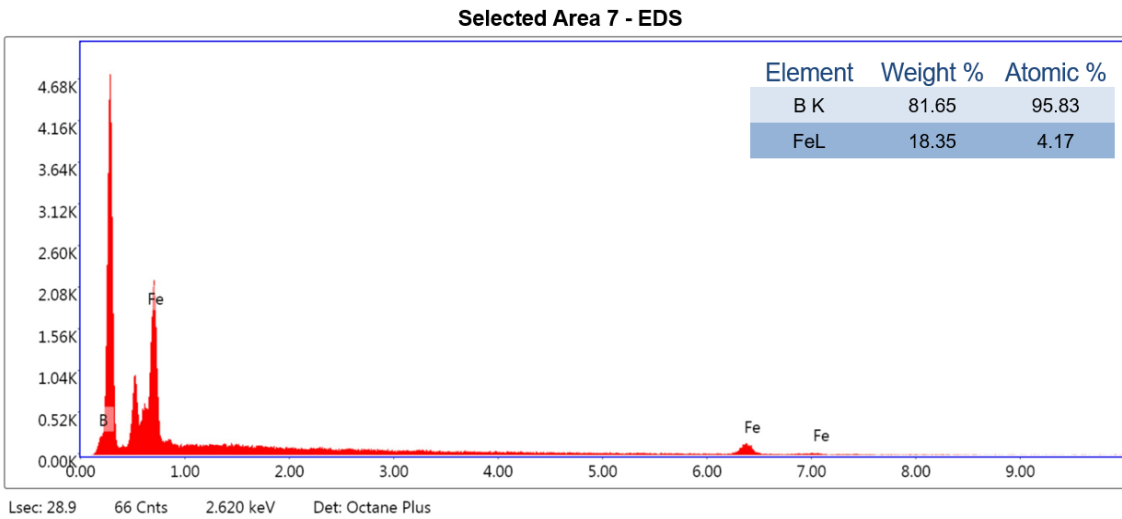
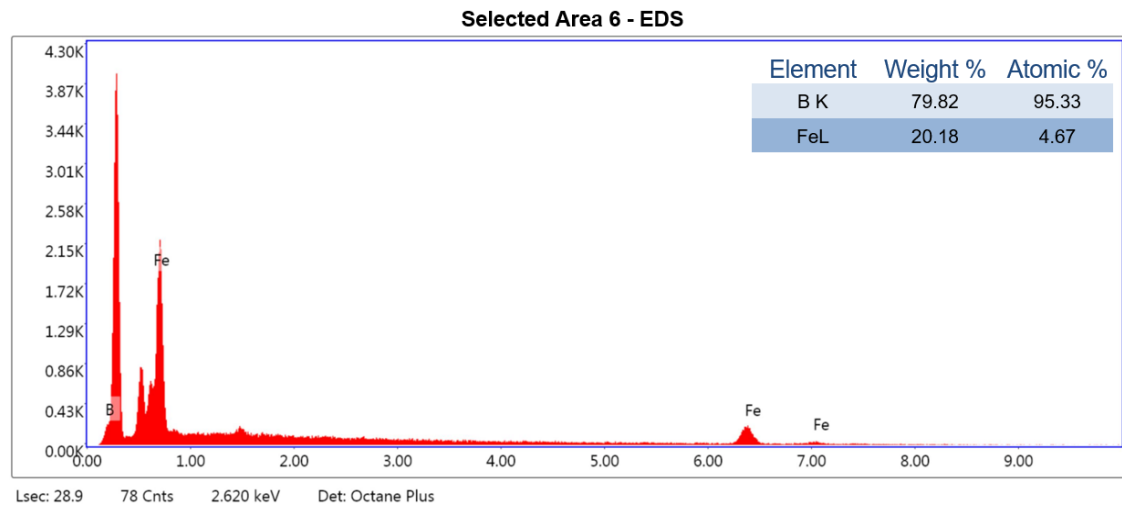
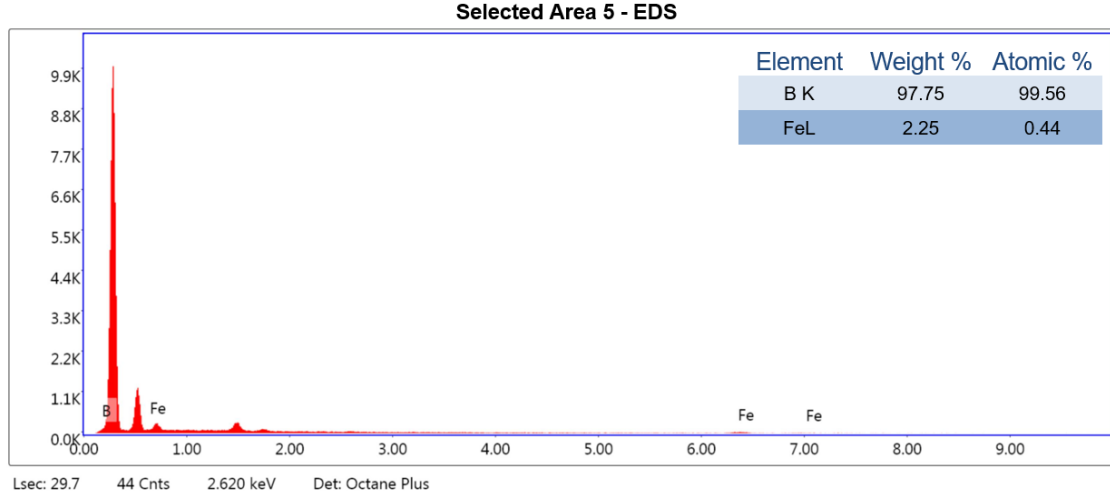
**Şekil 4.8** 950°C'de 2 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.



**Şekil 4.9** 950 °C'de 2 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.



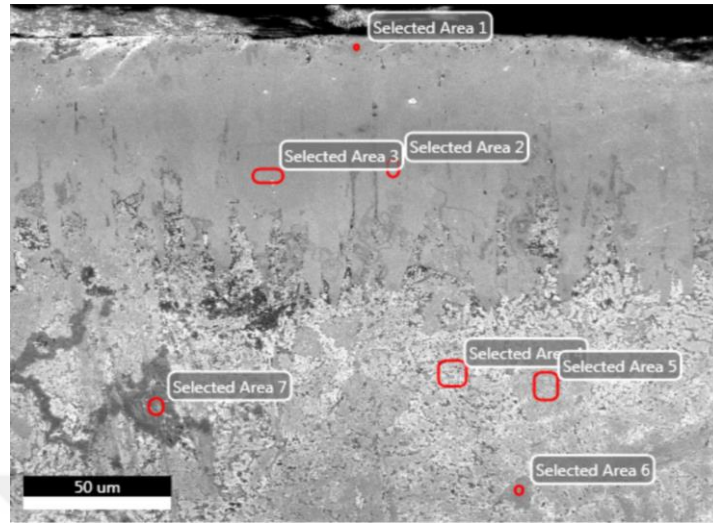
**Şekil 4.9 (Devam)** 950 °C'de 2 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.



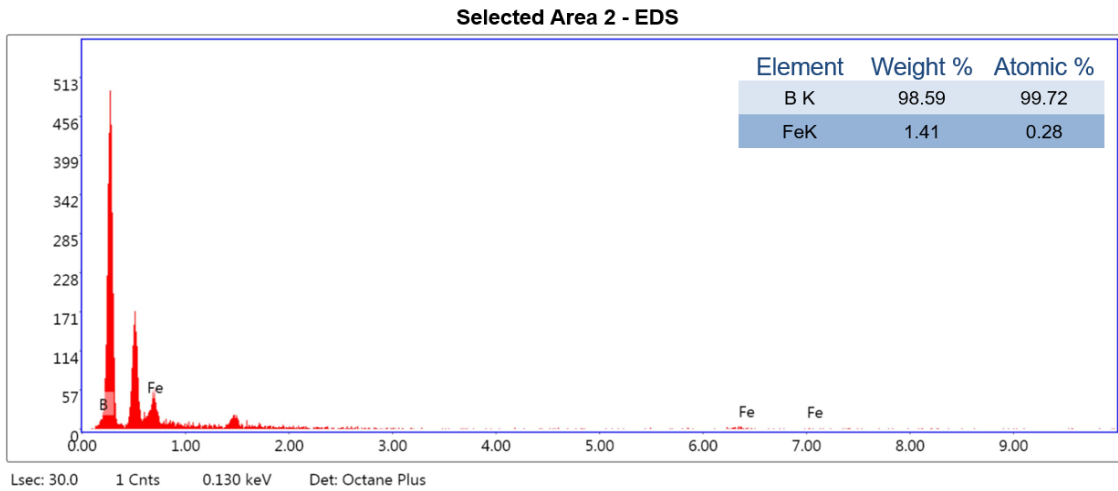
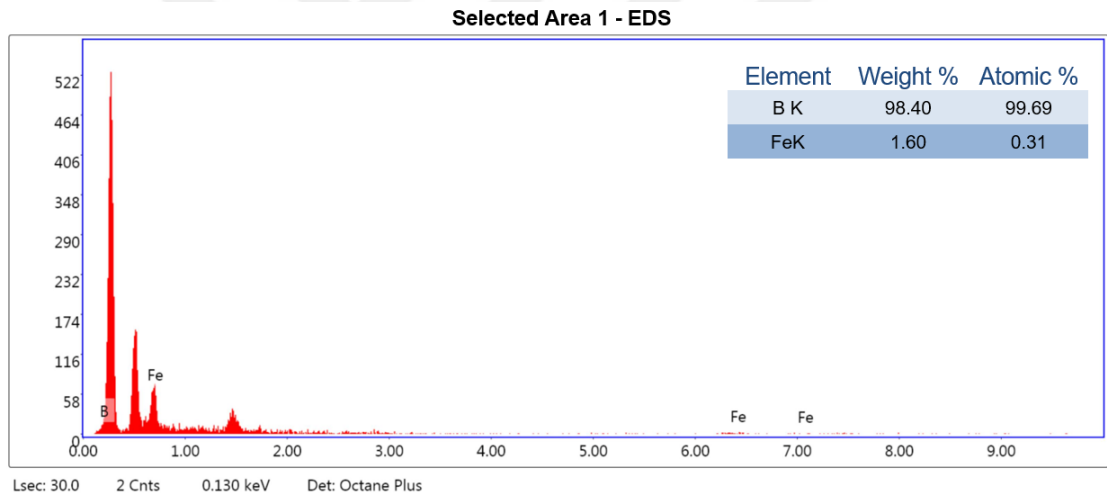
**Şekil 4.9 (Devam)** 950 °C'de 2 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.

950 °C sıcaklığında ve 4 saat olan numunenin borür tabakasının (Şekil 4.10) ara

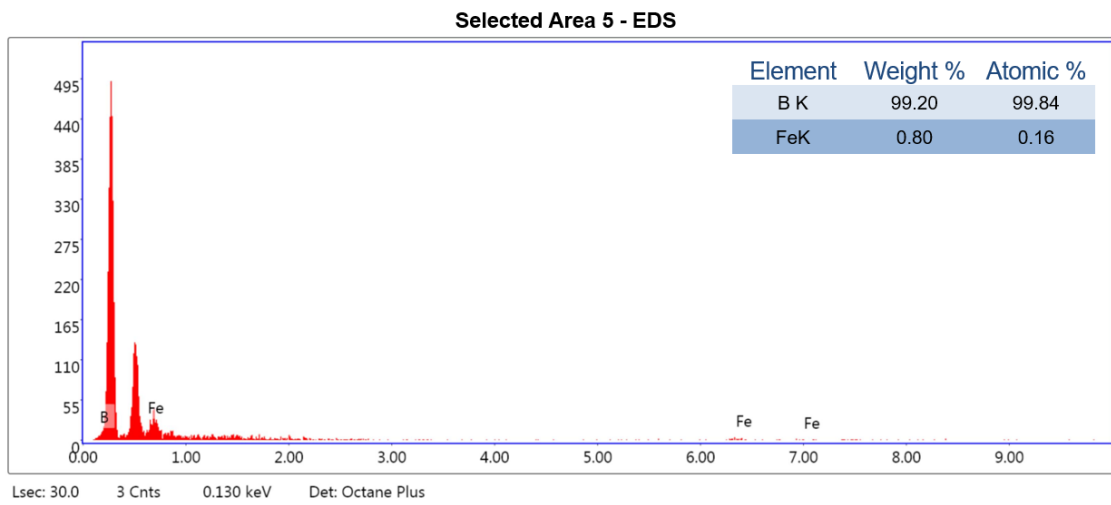
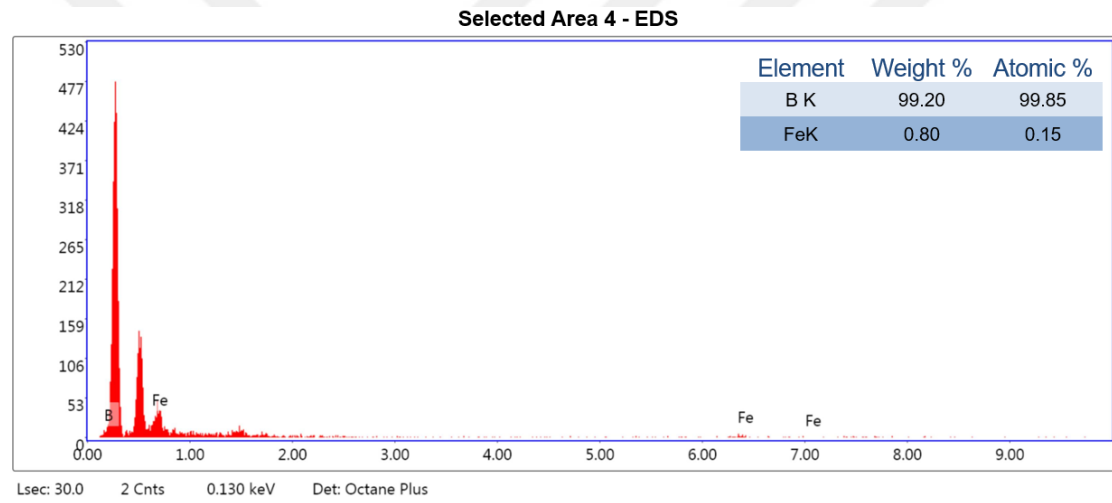
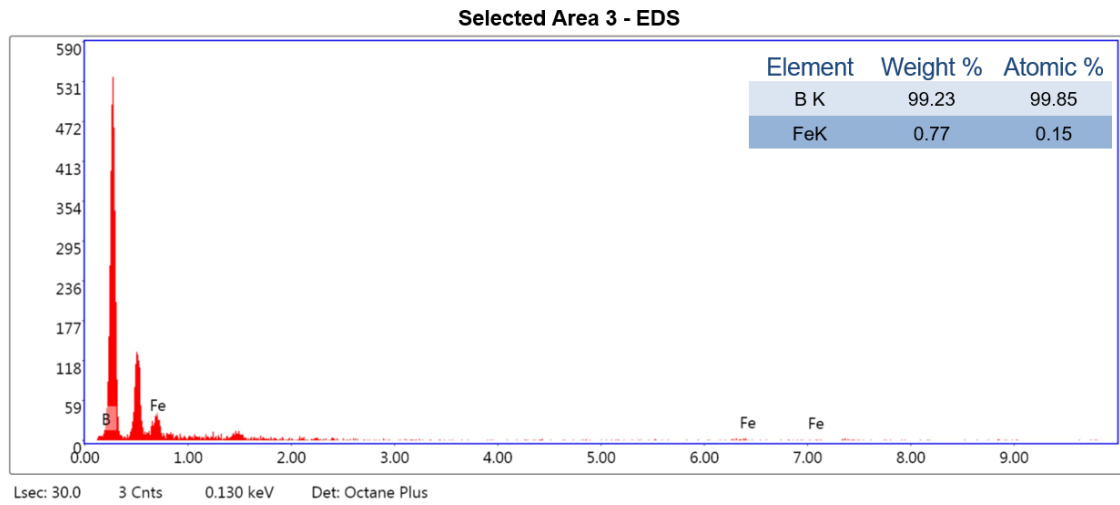
kesitinden alınan EDS verileri 4.11’de ayrıntılı olarak verilmiştir.



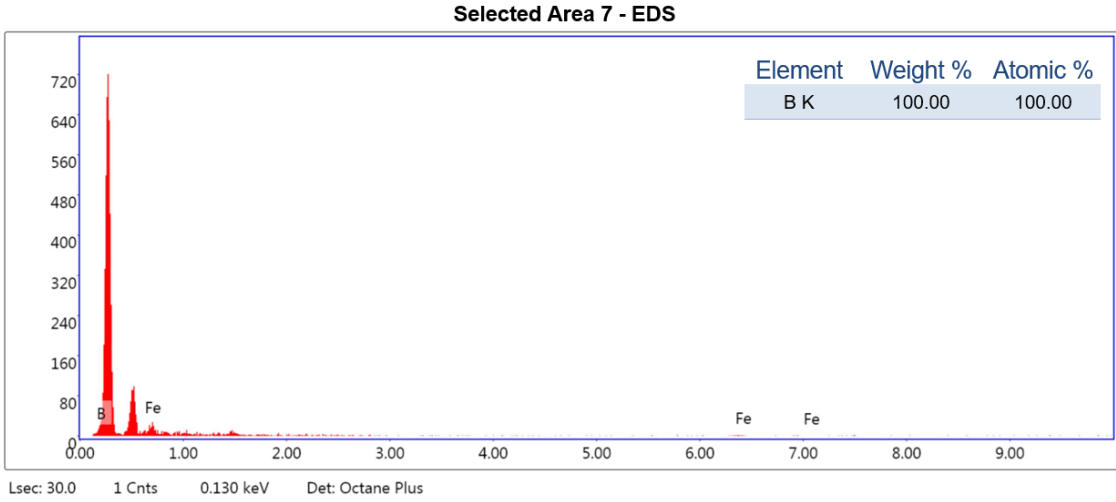
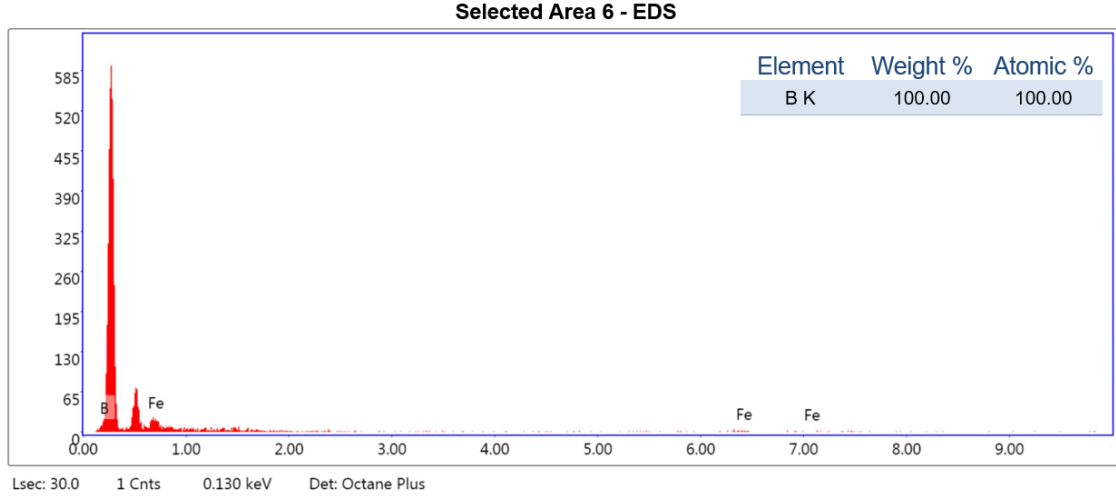
**Şekil 4.10** 950°C’de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.



**Şekil 4.11** 950 °C’de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.

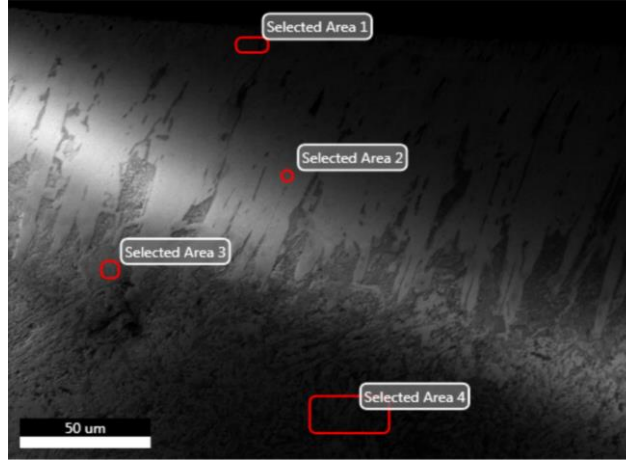


**Şekil 4.11 (Devam)** 950 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.

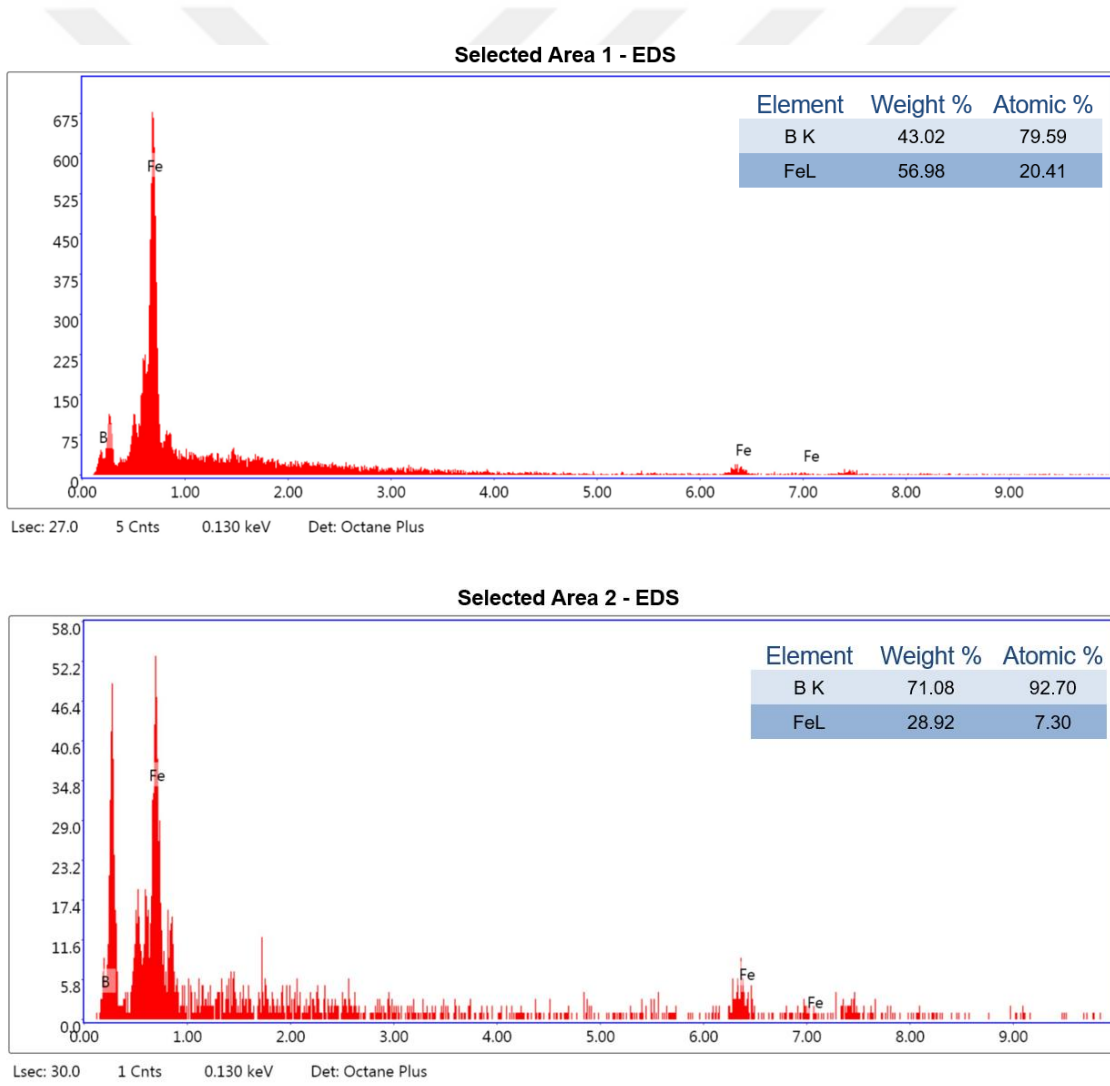


**Şekil 4.11 (Devam)** 950 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.

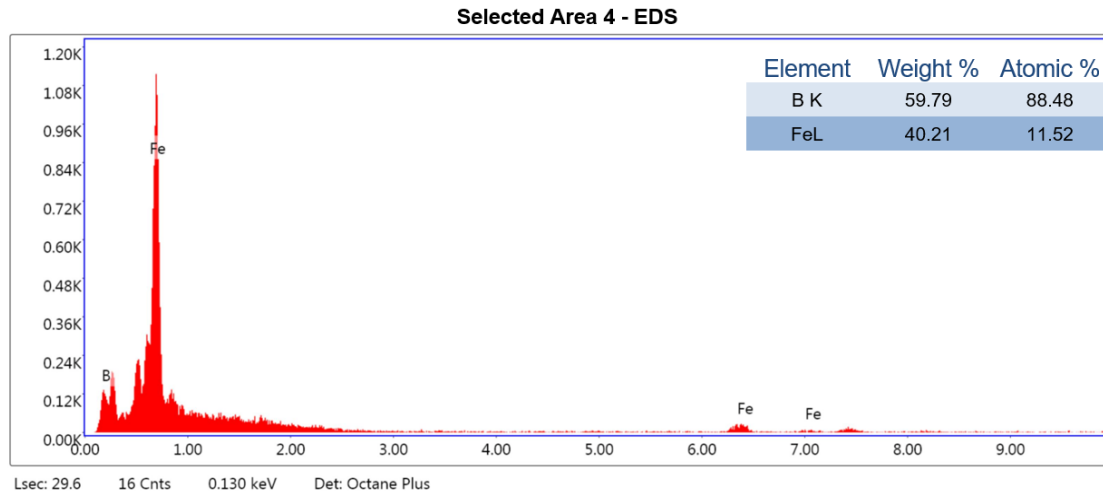
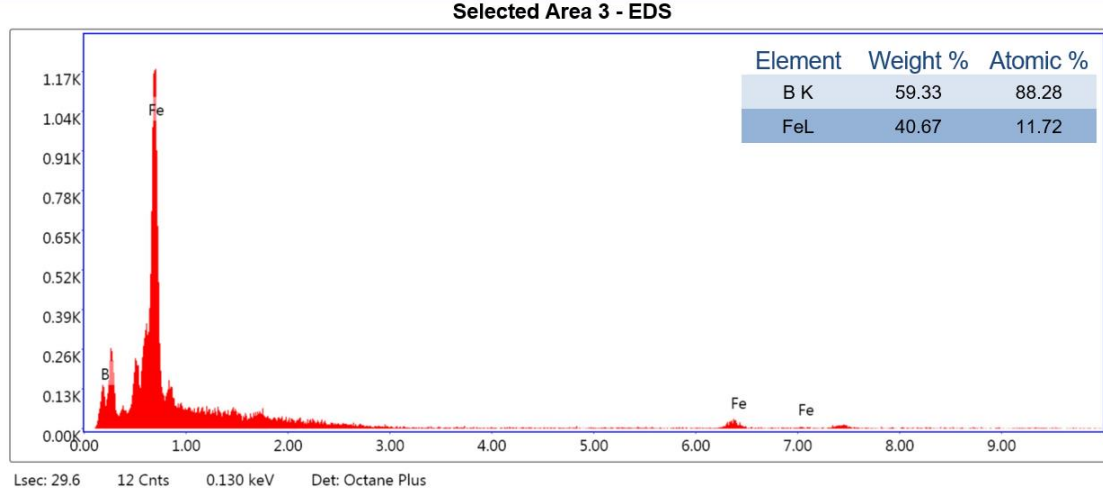
Şekil 4.12 950 °C sıcaklıkta ve 6 saatte işlenen numunenin borür tabakasının ara kesitinden alınan EDS verileri (Şekil 4.13) detaylı olarak sunulmuştur.



**Şekil 4.12** 950°C'de 6 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları belirlenmiştir.



**Şekil 4.13** 950 °C 6 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.



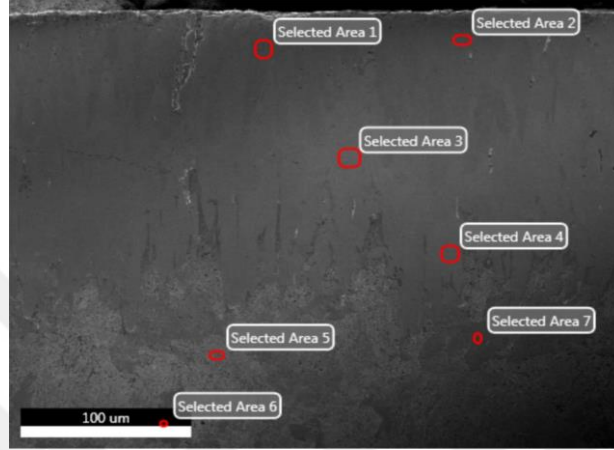
**Şekil 4.13 (Devam)** 950 °C 6 saat işlem proseslerinde borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları.

950 °C işlem sıcaklığında işlem gören numunelerin görüntülerinden açıkça görüldüğü üzere, kaplama ve geçiş bölgelerinin kalınlıkları daha fazladır. 2, 4 ve 6 saatlik işlem sürelerine sahip numunelerde ise 6 saatlik borlama işlemi uygulanan numunede kaplama kalınlığının daha fazla olduğu gözlenmektedir. Ayrıca, 4 saatlik borlama işlemine tabi tutulan numunenin kaplama kalınlığı, 2 saatlik borlama işlemi gören numuneden daha fazladır.

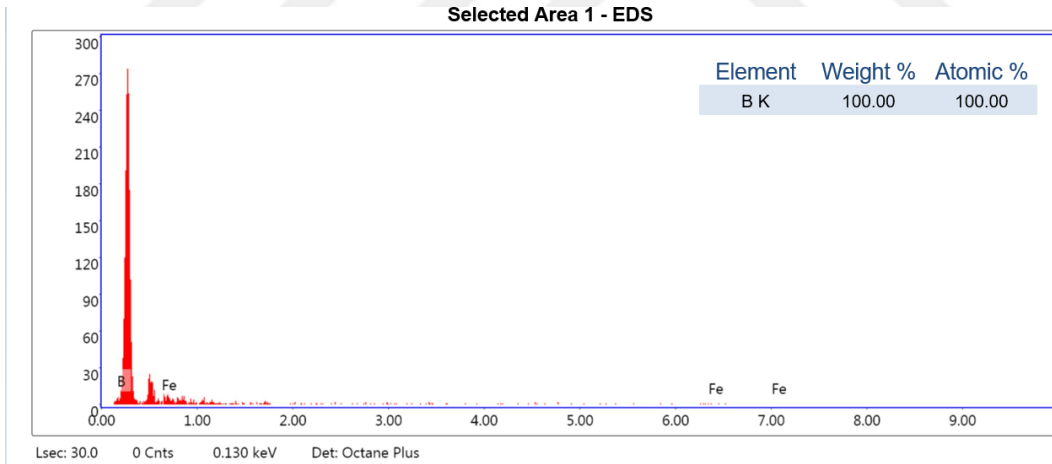
950 °C sıcaklıkta borür tabakasının kesitinde daha fazla ve kolay difüzyon beklenmektedir. EDS analizleri, 950 °C sıcaklıkta yapılan numunelerin borlama işlemi sonucunda borür tabakasında ve geçiş bölgesinde oluşan  $Fe_2B$  fazlarının daha derin bir bölgeye ulaştığını göstermektedir. Bu sonuçlar, 950 °C sıcaklıkta yapılan numunelerin,

900 °C sıcaklıkta yapılan numunelere kıyasla daha geniş bir bölgede borlama işlemi sonucunda Fe<sub>2</sub>B fazlarının oluştuğunu ortaya koymaktadır.

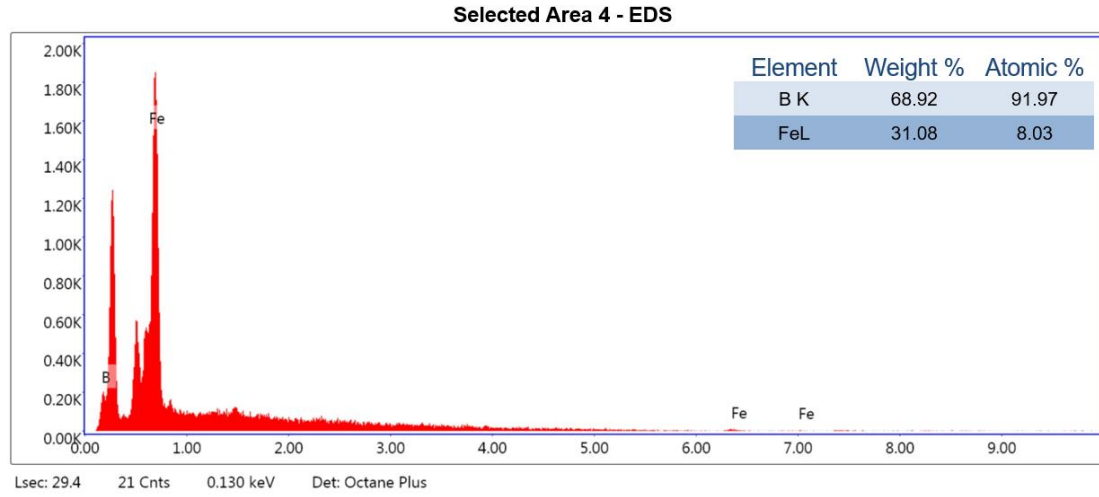
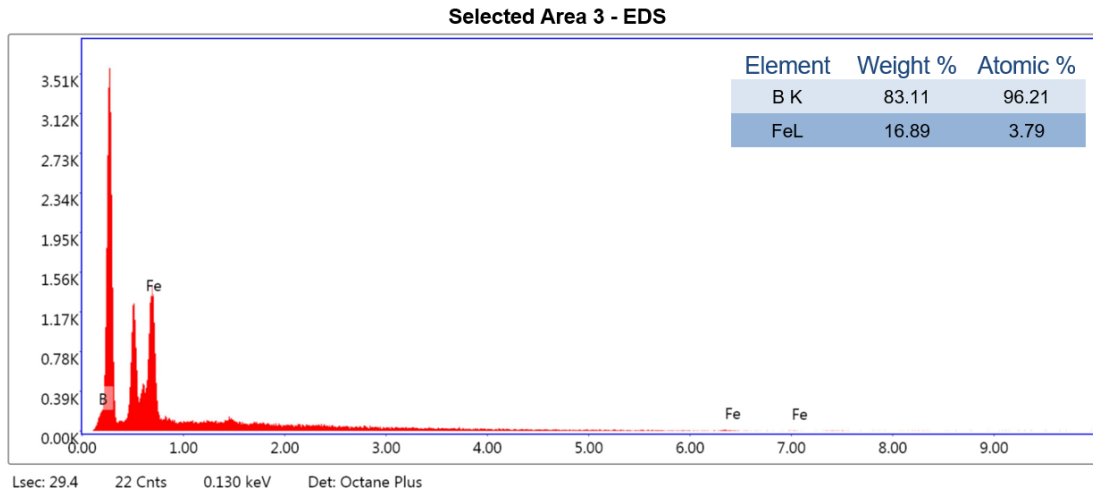
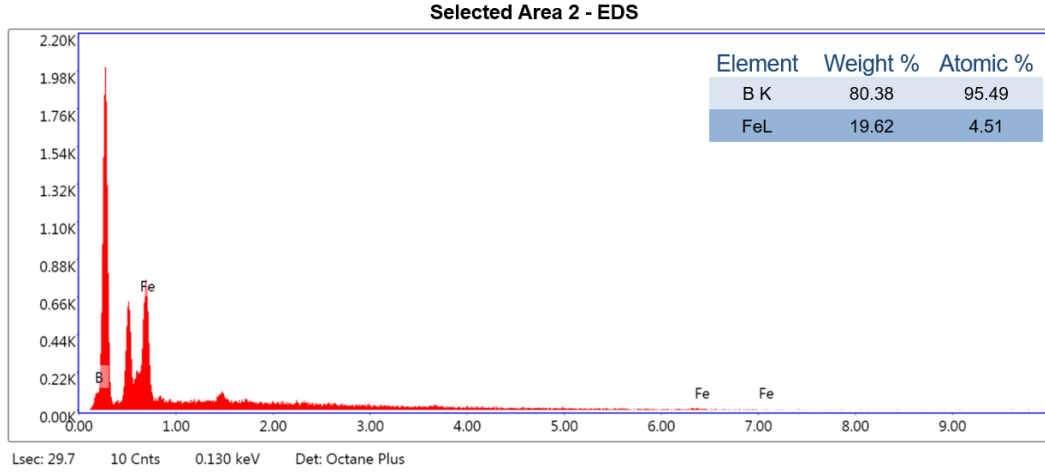
Şekil 4.14 ve 4.15'te, 1000 °C sıcaklıkta ve 4 saatte borlanan numunenin borür tabakasının kesitinden alınan EDS verileri detaylı olarak sunulmuştur.



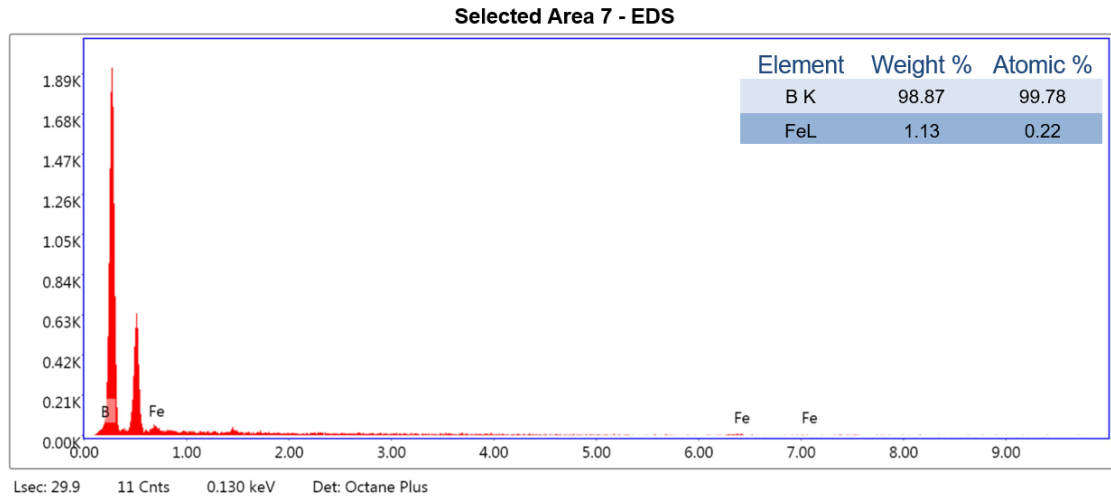
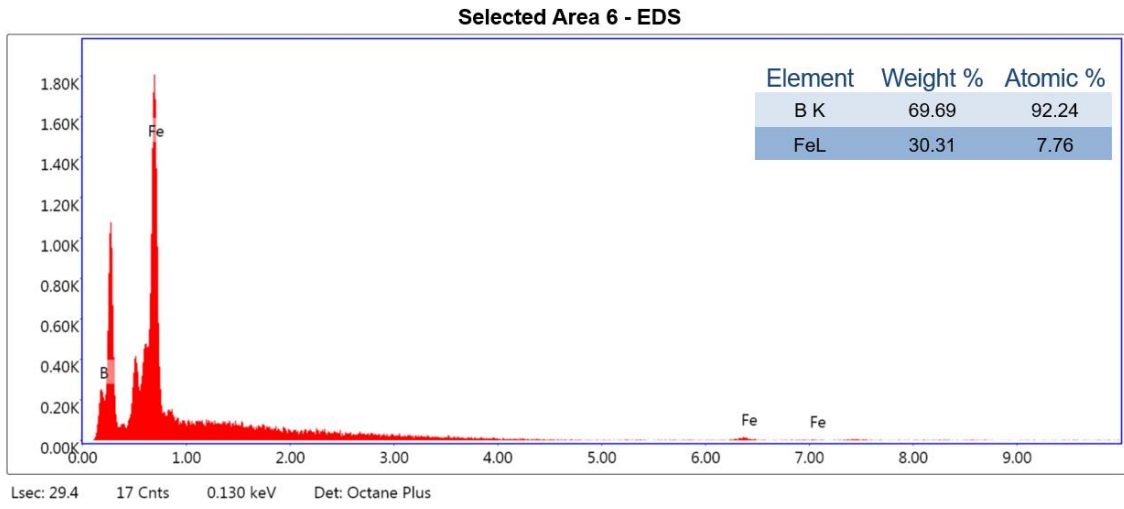
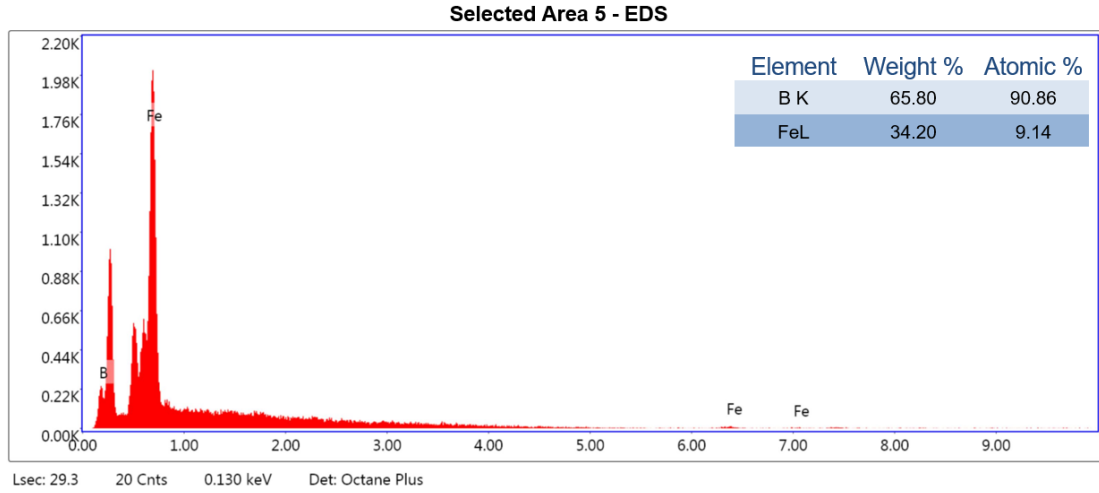
Şekil 4.14 1000 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin SEM görüntüsünde EDS analiz noktaları.



Şekil 4.15 1000 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları



**Şekil 4.15 (Devam)** 1000 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları



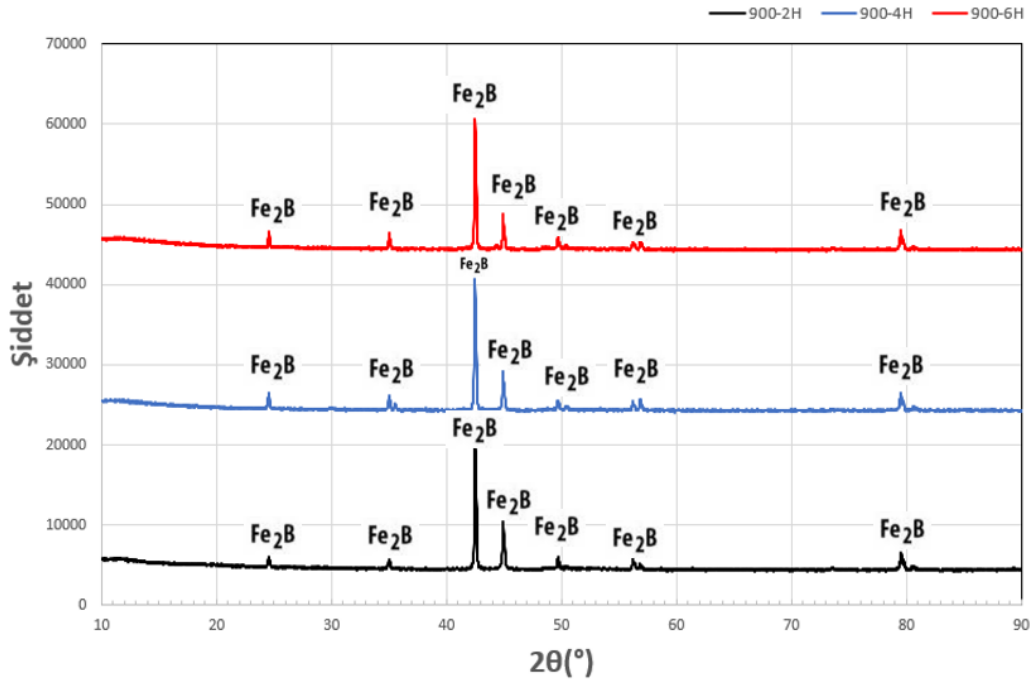
**Şekil 4.15 (Devam)** 1000 °C'de 4 saatlik işlem süresiyle borlanan numunenin EDS analiz grafikleri ve sonuçları

EDS verilerinin analizi, 1000 °C işlem sıcaklığında ve 4 saat borlanan numunenin bor konsantrasyonunun, 900 ve 950 °C işlem sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat işlenen numunelerin bor konsantrasyon derinliğinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durumun nedeni, artan sıcaklık ve süreyle birlikte difüzyonun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 4.3 Borlanmış Sementasyon Çeliğinin X-Işınları Difraksiyon Analizi

17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan borlama sonucunda yüzeylerinde  $Fe_2B$  fazları oluşmuştur. Bu fazlar numunenin sertliğini artırmıştır. Borlama sıcaklık açısından incelendiğinde, XRD analizleri  $Fe_2B$  fazının şiddetinin uygulanan sıcaklık arttıkça değiştiğini göstermiştir. Daha yüksek sıcaklıklarda yapılan borlamalar  $Fe_2B$  fazının daha belirgin bir şekilde oluşumuna yol açmıştır.

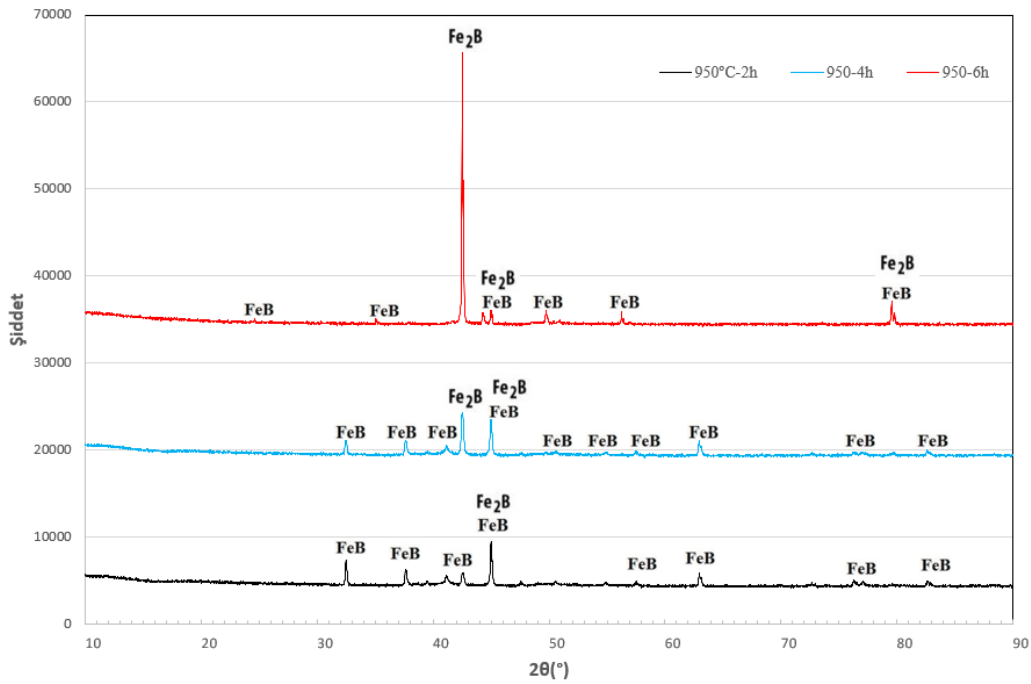
Şekil 4.16'de, 900 °C işlem sıcaklığında farklı sürelerde (2, 4 ve 6 saat) borlanmış olan sementasyon çeliğinin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Analiz sonuçları, piklerin incelenmesiyle belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır ki, bu sürelerde sadece  $Fe_2B$  fazının ana faz olarak meydana geldiği açıkça gözükmemektedir.



Şekil 4.16 900 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saat borlanan numunelerin XRD analizi

XRD analizi sonucunda pikler incelendiğinde, sadece  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının olduğu görülmektedir. Borlama işlemi sırasında kullanılan sıcaklık ve süre,  $\text{FeB}$  oluşumu için gereken reaksiyona izin vermemiştir. Bu durum, difüzyon için en önemli parametre olan sıcaklık ve sürenin,  $\text{Fe}_2\text{B}$  oluşumu açısından önemli aşamadır.

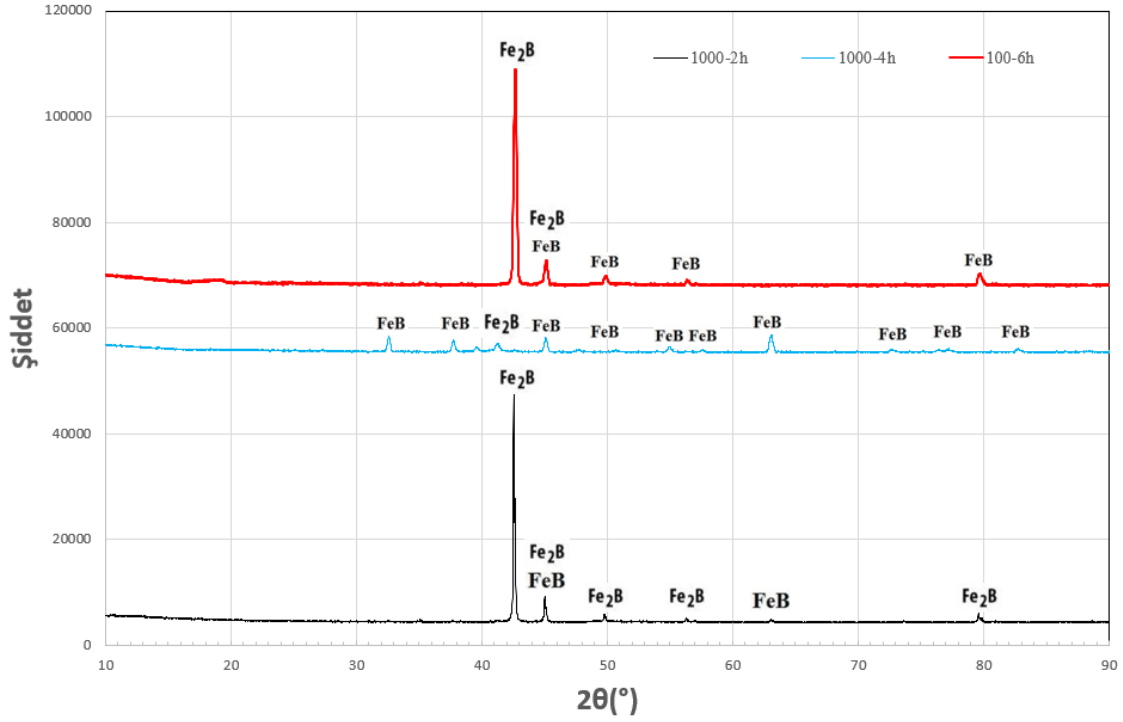
Şekil 4.17'te 950 °C işlem sıcaklığında farklı sürelerde (2, 4 ve 6 saat) borlanmış olan sementasyon çeliğinin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Özellikle 4 saatte XRD analizi incelendiğinde, artan sıcaklık ve süre artma sonucunda meydana gelen  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının şiddetinde azalma olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, işlem sıcaklığı 950 °C olan ve 4 saat sürenin kullanıldığı borlama işleminde  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının miktarının azaldığını göstermektedir.



**Şekil 4.17** 950 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin XRD analizi

Şekil 4.18'de, 1000 °C 'de 2-4-6 saat sürelerinde borlanan numunelerin XRD analiz sonuçları görülmektedir. Tüm numunelerde  $\text{FeB}$  ve  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazlarının olduğu görülmüştür. 4 saatlik numunelerde  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazının şiddetinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda ilave olarak işlemlerde 950 °C ve 4 saatte borlanan numune ile işlem sıcaklığında 1000 °C ve 6 saatte borlanan numune birbirine analiz edildiğinde artan işlem

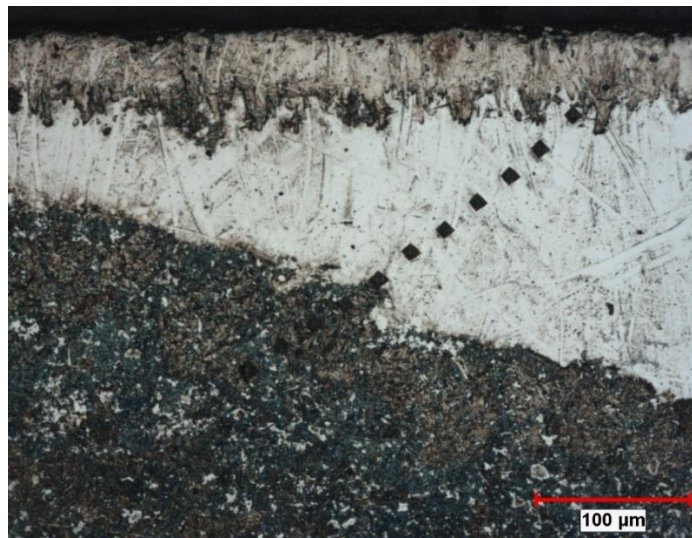
sıcaklığı ve süresine bakılarak Fe<sub>2</sub>B piklerinin şiddetlerinde artma gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18 1000 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin XRD analizi

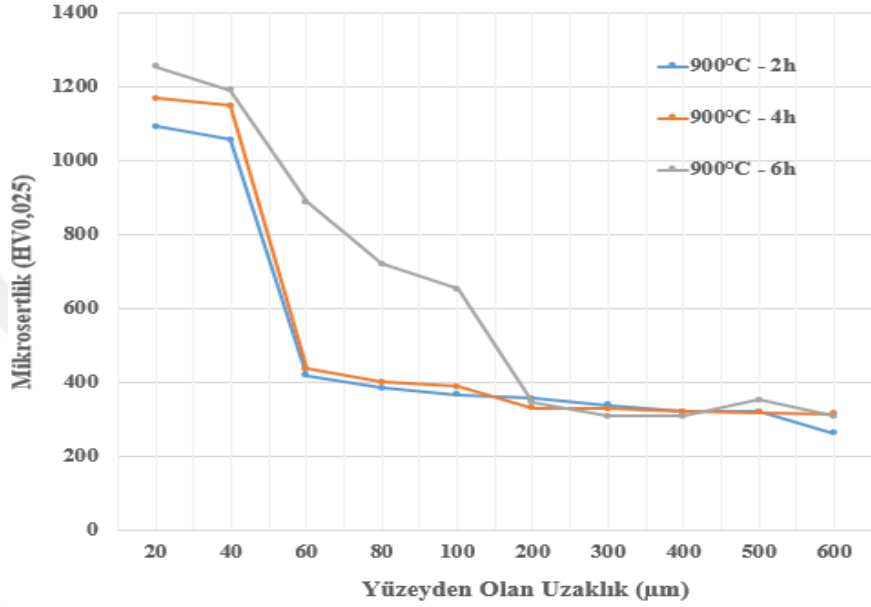
#### 4.4 Borlanmış Semantasyon Çeliğinin Mikro Sertlik Sonuçları

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi, mikro sertlik ölçümünün gerçekleştiği yüzey ve indentörün bıraktığı yapı, 900 °C’de 4 saatte borlanmış parçanın mikro yapısı üzerinde gösterilmiştir.



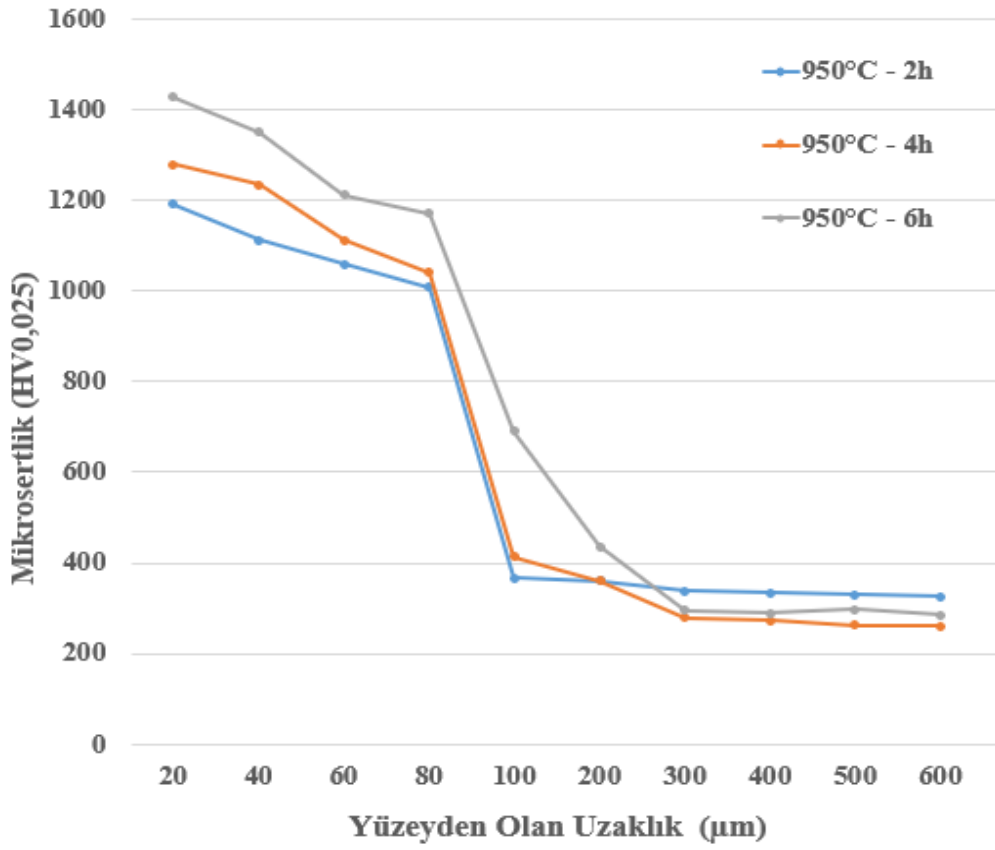
Şekil 4.19 900 °C’de 4 saatte borlanmış numune üzerinde mikro sertlik izleri.

900°C’de 2, 4 ve 6 ’şar saatte borlanmış numunelerin Şekil 4.20’de sertlik verilerini gösteren grafikler elde edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; borlanmış sementasyon çeliğin mikro sertlik verilerin 1093-1483 HV<sub>0,025</sub> arasında değiştiği analiz edilmiştir. 900 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sırasıyla 1093, 1169 ve 1255 HV<sub>0,025</sub> sertlik verileri elde edilmiştir.



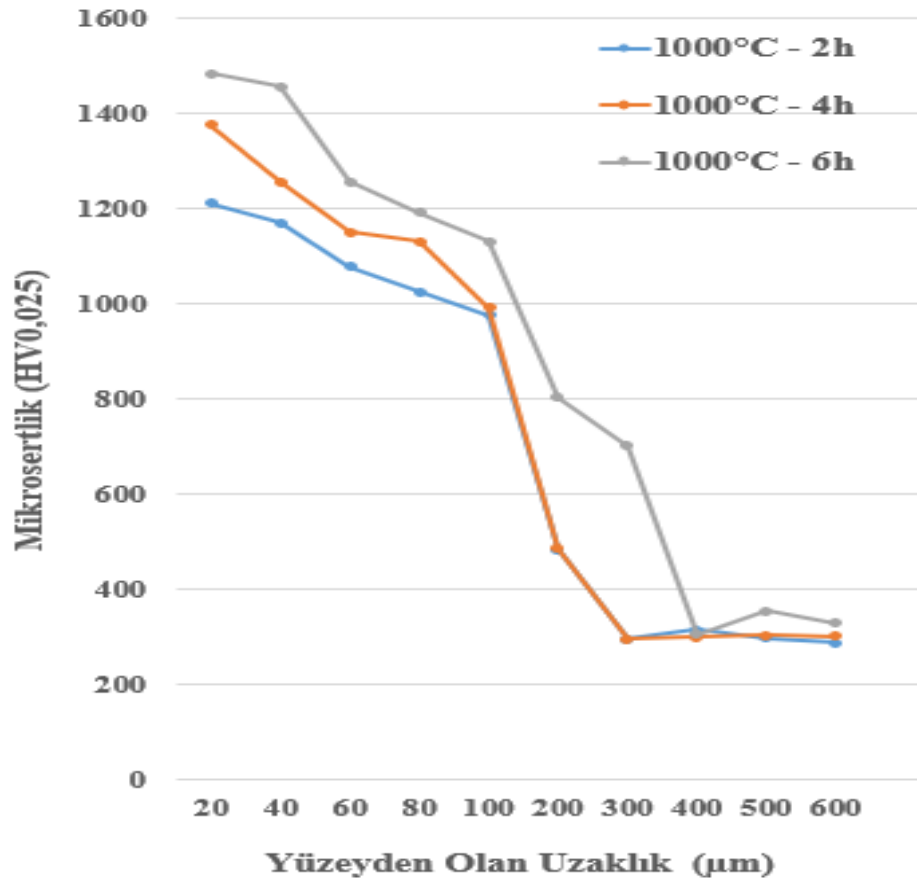
Şekil 4.20 900 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan sementasyon çeliğinin mikro sertlik verileri.

950 °C’de 2, 4 ve 6 ’şar saatte borlanmış numunelerin Şekil 4.21’ de sertlik verilerini gösteren grafikler elde edilmiştir. 950 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sırasıyla 1190, 1277 ve 1427 HV<sub>0,025</sub> sertlik verileri edilmiştir.



Şekil 4.21 950 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan sementasyon çeliğinin mikro sertlik verileri.

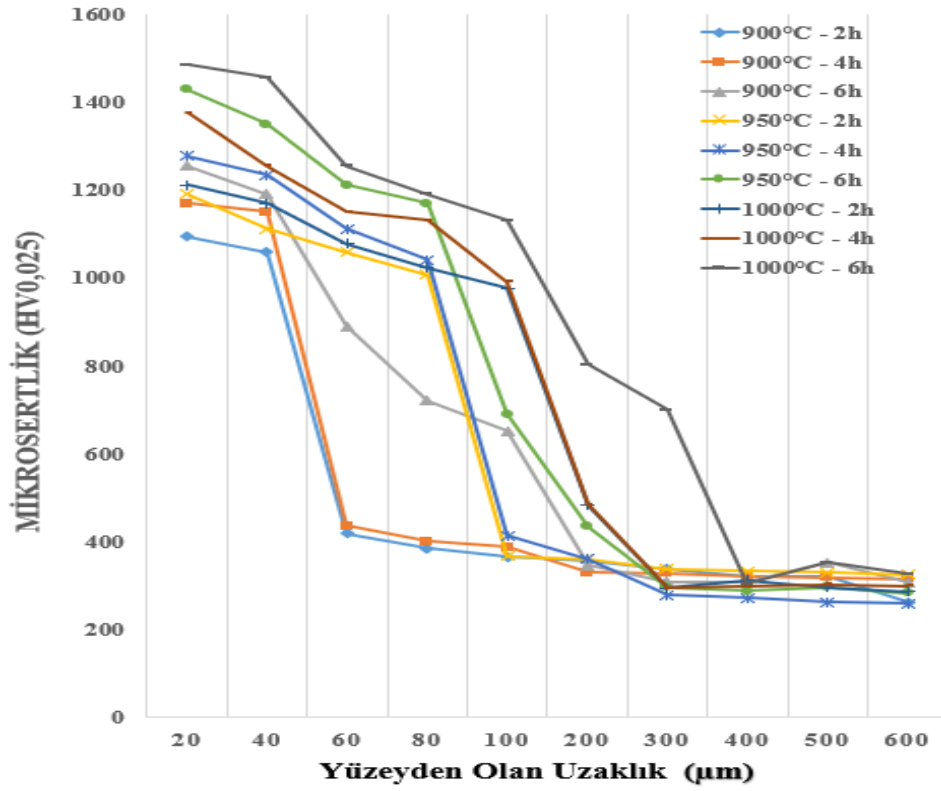
1000 °C’de 2, 4 ve 6 ’şar saatte borlanmış numunelerin Şekil 4.22’ de sertlik verilerini gösteren grafikler elde edilmiştir. 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanmış numunelerin sırasıyla 1210, 1375 ve 1483 HV<sub>0,025</sub> sertlik verileri elde edilmiştir. Sıcaklık ve sürenin artmasıyla birlikte sertlik değerlerinde bir artış gözlenmektedir.



Şekil 4.22 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan sementasyon çeliğinin mikro sertlik verileri.

Bu deneylerde, en yüksek borlama parametrelerine sahip olan 1000 °C’de borlanan tüm malzemelerin en fazla sertliğe sahip olmuştur.

900, 950 ve 1000 °C’de 2, 4 ve 6 ’şar saatte borlanmış numunelerin tamamının sertlik değerleri Şekil 4.23’ te verilmiştir.



Şekil 4.23 900, 950, 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin mikro sertlik grafiği.

Gözlemlerimiz, borlama sıcaklık ve süre artmasıyla birlikte bor tabakalarının sertlik değerlerinin arttığını göstermektedir. Bulgu, literatürde yapılan çalışmalarla uyumlu bir şekildedir ve borlama işleminin çeliğin yüzey sertliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu doğrulamaktadır (Genel 2006).

Sıcaklık arttıkça, her iki bölgedeki (esas metal ve borür tabakası) sertlik değerlerinde artış gözlenmektedir. Örneğin, 900 °C’de 2 saat işlem süresiyle borlanan numunedeki esas metalin sertliği 250 HV iken, 1000 °C’de aynı süreyle borlanan numunedeki esas metalin sertliği 355 HV’a yükselmiştir. Aynı sıcaklıkta (örneğin 900 °C) işlem süresi arttıkça hem esas metalin hem de borür tabakasının sertliğinde artış gözlenmektedir. Örneğin, 900 °C’de 2 saat işlem süresiyle borlanan numunedeki borür tabakasının sertliği 1100 HV iken, 6 saat işlem süresiyle borlanan numunedeki borür tabakasının sertliği 1250 HV’a yükselmiştir. Bu durumda, sıcaklık sabitken işlem süresinin uzaması, yüzey sertliğinde artışa neden olmuştur. Sıcaklık artışı sertlikte %42’lik bir artışa neden olmuşken, süre artışı sertlikte %13,6 ile %24 arasında değişen artışlara yol açmıştır. Bu sonuçlar, sıcaklık ve süre değişikliklerinin sertlik üzerinde farklı yüzdelik etkileri olduğunu göstermektedir.

Daha yüksek sıcaklıkta işlem süresi sabit tutulsa bile, sertlikte artış gözlenmiştir. Ancak, süre arttıkça sertlikteki artış daha azdır. Bu sonuçlar, borlama işleminde sıcaklık ve süre parametrelerinin dikkatle kontrol edilmesinin, istenen mekanik özelliklere ulaşmak için önemli olduğunu göstermektedir.

Genel (2006), H13 çeliği Ekabor I tozuyla 800, 900 ve 1000°C sıcaklıklarında 1 ila 5 saat arasında değişen sürelerle borlanmıştır. Bu borlama işlemi sonucunda elde edilen sertlik değerleri 1650 ile 2000 HV arasında değişen değerler elde edilmiştir (Genel 2006). Yapılan çalışmada, AISI 440C ve AISI 52100 çelikleri, 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 2, 4 ve 8 saat sürelerde katı borlama işlemine tabi tutulmuştur. Elde edilen mikrosertlik sonuçlarına göre, AISI 440C çeliğinin sertliği 1530-2170 HV aralığında değişirken, AISI 52100 çeliğinin sertliği 1620-1989 HV arasında değiştiği belirtilmiştir (Kayali 2012).

#### **4.5 Borlanmış Semantasyon Çeliğinin Aşınma Özellikleri**

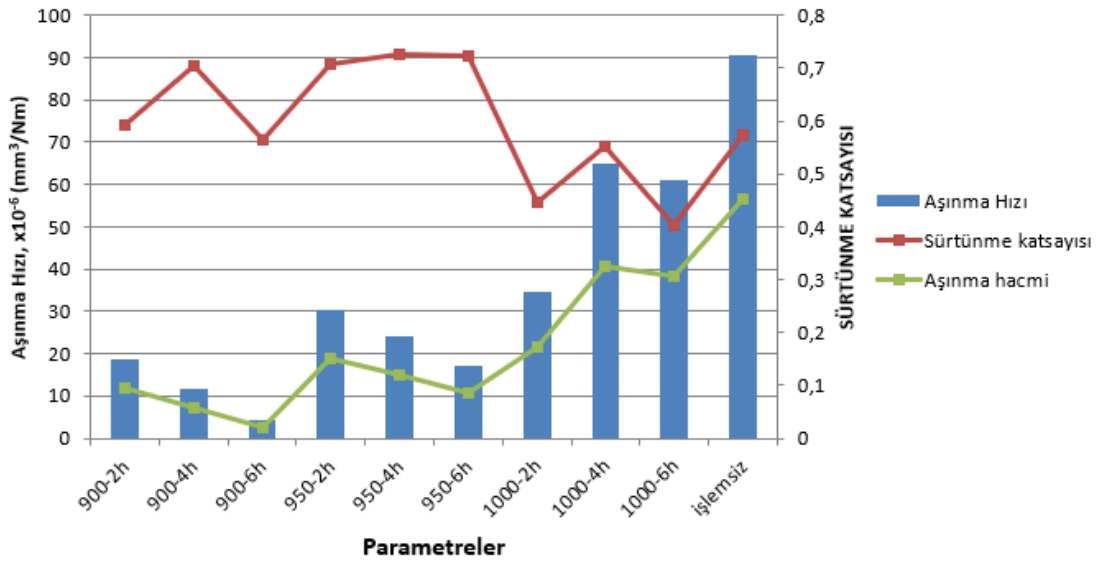
##### **4.5.1 Aşınma Deneyi Bulguları**

Borlama, termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir ve yüksek sıcaklıklarda malzeme yüzeyinde bor atomlarının temasta bulunduğu sert borür tabakalarının oluşumuna yol açar. Borlama işleminden sonra ek bir ısıtma işlemine ihtiyaç duyulmaması, düşük sürtünme katsayısı ve çok sert yüzey tabakası gibi özellikler, borlamanın diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre önemli avantajlarından biridir. Borlanmış çelikler, yüksek aşınma direnci ve yüzey sertliği ile öne çıkar. Bu nedenle, özellikle yüksek düzeyde erozyon, yapışma ve aşındırmaya maruz kalan makine parçalarının borlanması, sistem ve bileşenlerin servis ömürlerinin uzamasına katkı sağlar (Nair 1996).

900, 950 ve 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte aşınma deneyi sonucunda elde edilen değerlerin alınarak Şekil 4.24’te sürtünme katsayısı ve aşınma hızı grafiği verilmiştir. 900°C sıcaklık ve 2-4-6 saatlerde yapılan borlama sonucu elde edilen tek fazlı yapıdan dolayı diğer parametrelerle karşılaştırıldığında daha iyi aşınma direnci elde edildi 900 °C’de oluşan iz genişlikleri ve aşınma derinlikleri, 950-1000 °C’deki tüm durumlarla karşılaştırıldığında, net sonuç vermektedir.

Şekil 4.24 incelendiğinde aşınma hızları 900 °C numunelerin 950 °C numunelerine, 950 °C numunelerin 1000 °C numunelerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Sabit sıcaklıkta sürenin artmasıyla aşınma direncinin iyileştiği fakat sıcaklığın artmasıyla birlikte oluşan çift fazlı borür tabakasının varlığından dolayı aşınmanın biraz daha fazla olduğu görülmüştür.

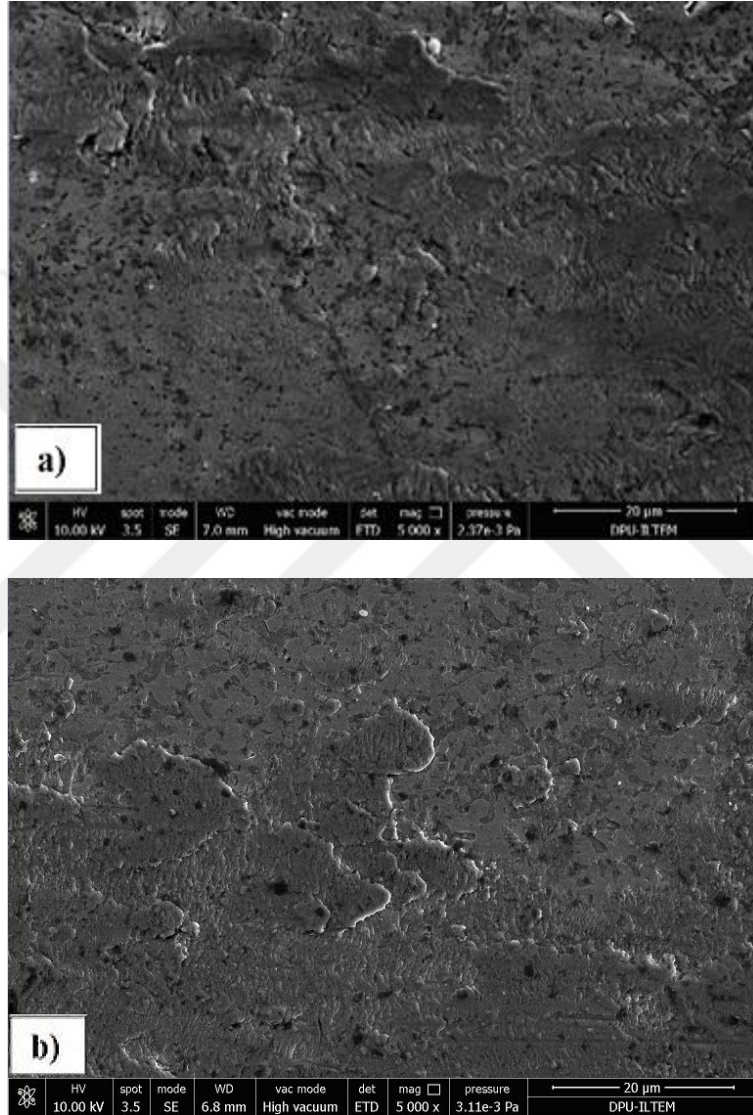
Sürtünme katsayıları incelendiğinde en düşük 1000 °C de 6 saat borlama sonucu 0,402, işlemsiz numunenin ise 0,574 olarak tespit edilmiştir. Sürtünme katsayıları ve aşınma hızları arasında doğrudan bir bağlantı kurulamamıştır. Fakat 1000 °C de borlanıp aşındırılan numunelerin sürtünme katsayılarının diğer sıcaklık ve sürelerle göre borlanan numunelerin sürtünme katsayılarına göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.



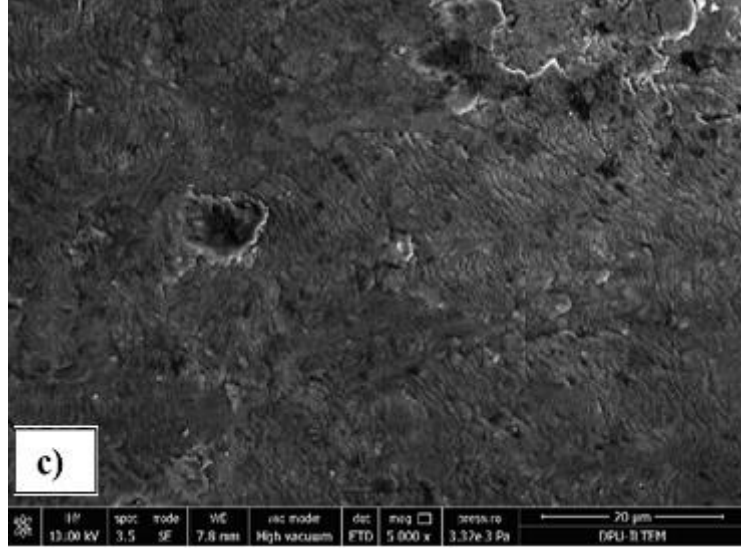
**Şekil 4.24** Borlanmış ve işlemsiz numunenin sürtünme katsayısı, aşınma hızı ve aşınma hacmi grafiği.

#### 4.5.2 Aşınma Analizi

Şekil 4.25'te, 900°C'de 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin aşındırılması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM analiz görüntüleri sunulmuştur. Görüntüler incelendiğinde sahil izi şeklinde yorulma izlerinin olduğu gözlenmiştir.

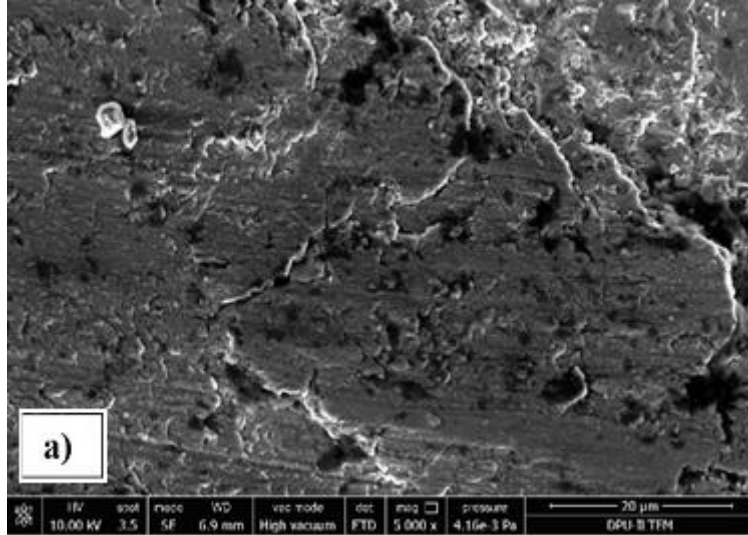


Şekil 4.25 900 °C'de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat

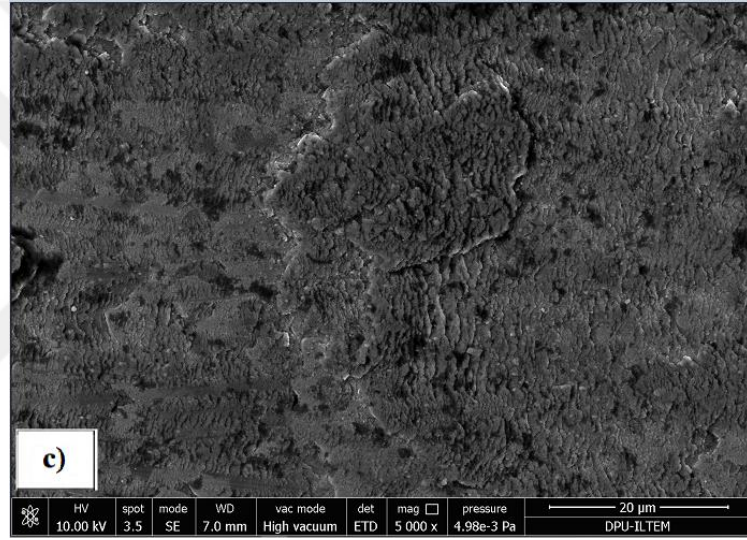
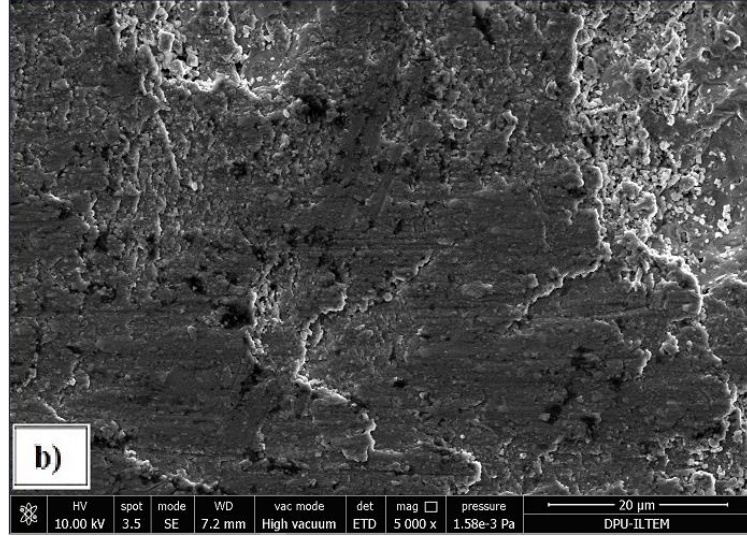


**Şekil 4.25 (Devam)** 900 °C’de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat

Şekil 4.26’da 950°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin aşındırılması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM analiz görüntüleri gösterilmektedir. a) görüntüsü incelendiğinde abrasif aşınmanın yanında küçük çatlaklar tespit edilmiştir. b) görüntüsüne bakıldığında çatlak ve sağ tarafta küçük kopmaların olduğu, c) fotoğrafında ise sahil izi şeklindeki yorulmanın yanında çok küçük çatlak tespit edilmiştir.

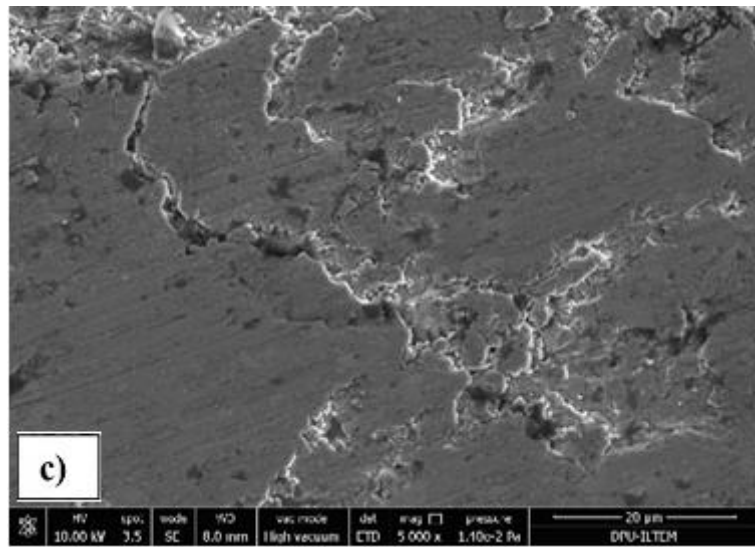
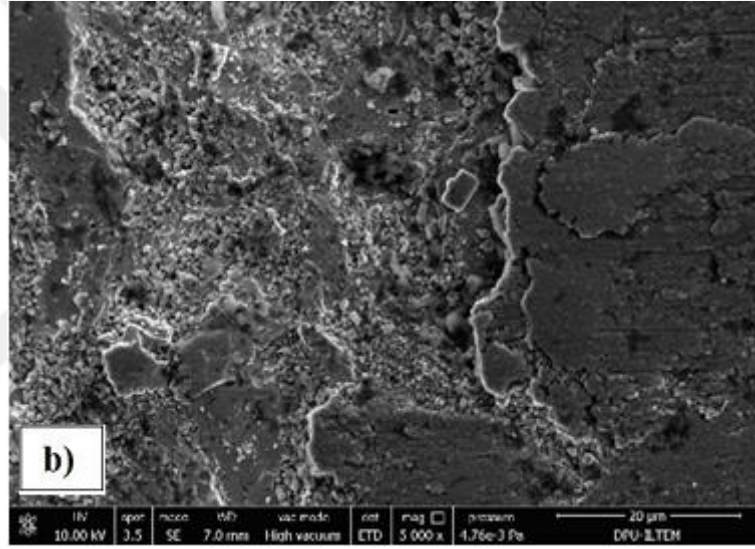
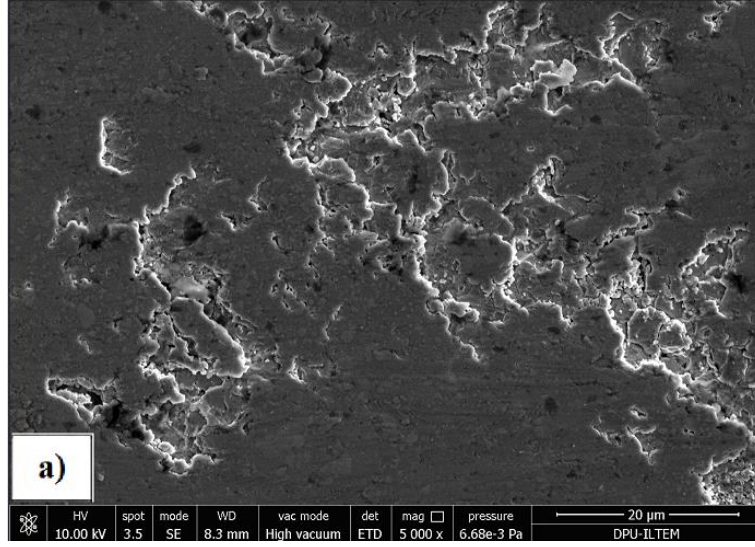


**Şekil 4.26** 950 °C’de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat



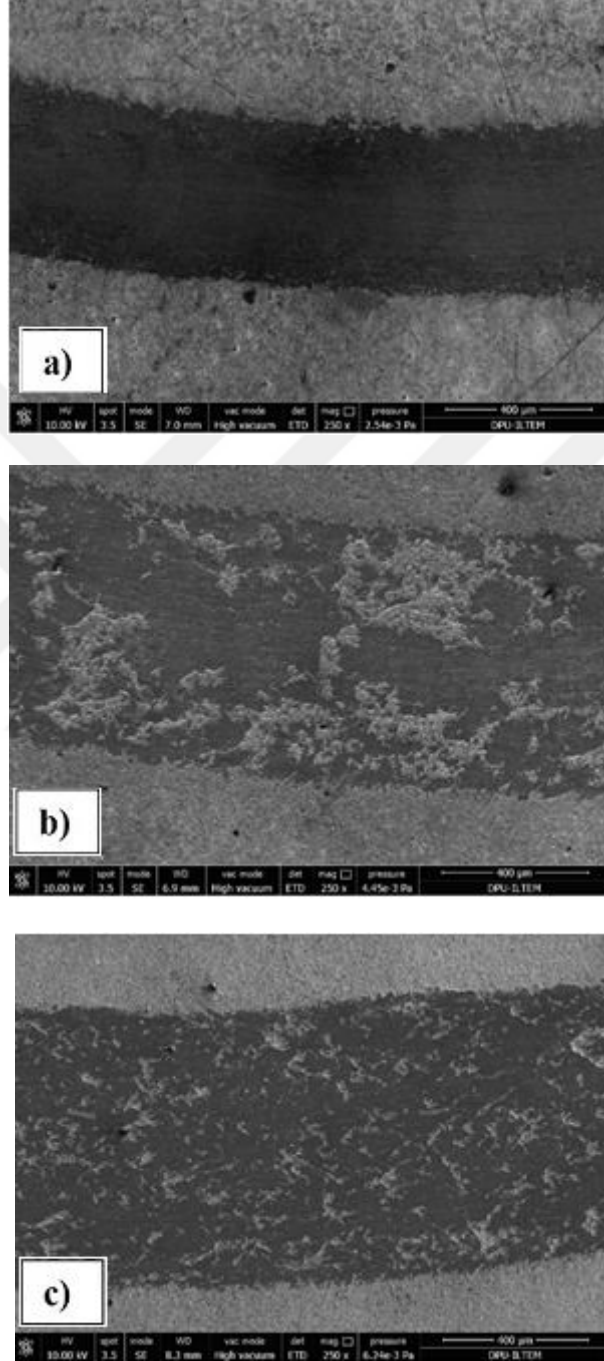
**Şekil 4.26 (Devam)** 950 °C’de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat

1000°C’de 2, 4 ve 6 saatte borlanan numunelerin aşındırılması sonucu elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM analiz görüntüleri de Şekil 4.27’de bulunmaktadır. Çatlaklar ve parça kopmaları net bir şekilde görülmektedir.

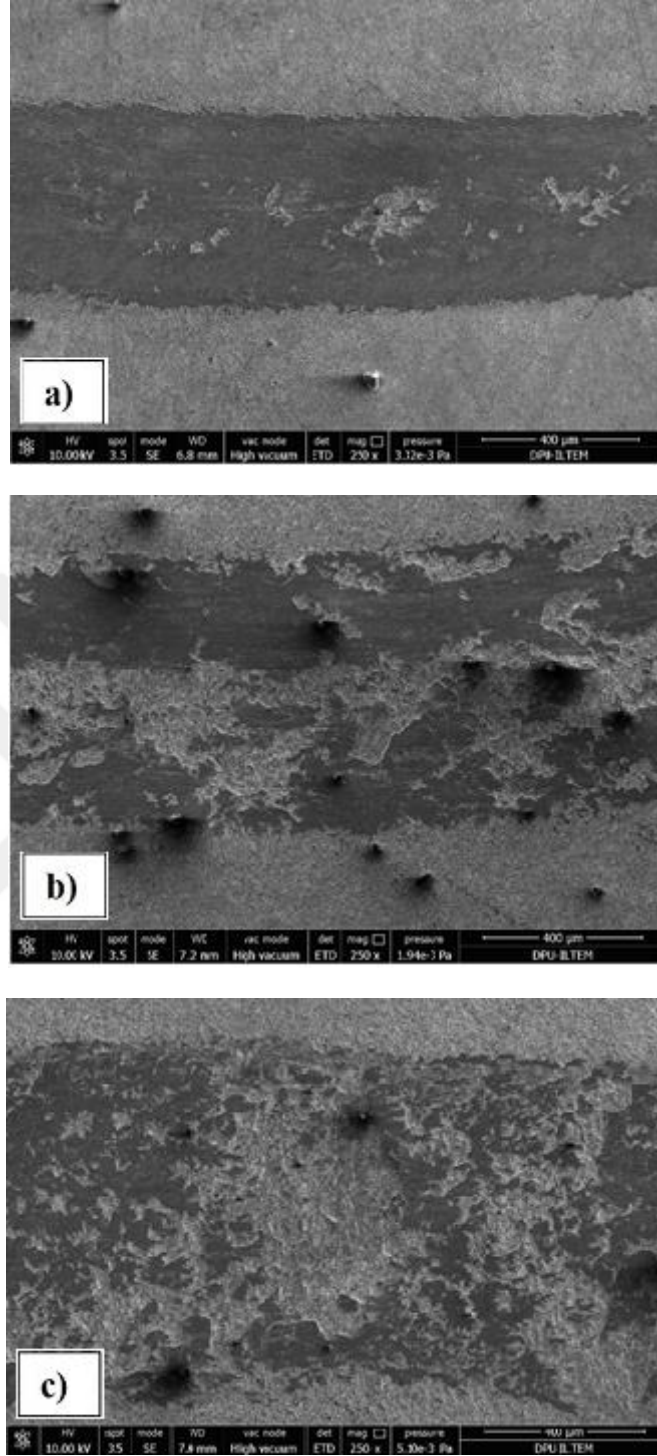


Şekil 4.27 1000 °C’de borlanan sementasyon çeliklerin SEM görüntüsü, a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat

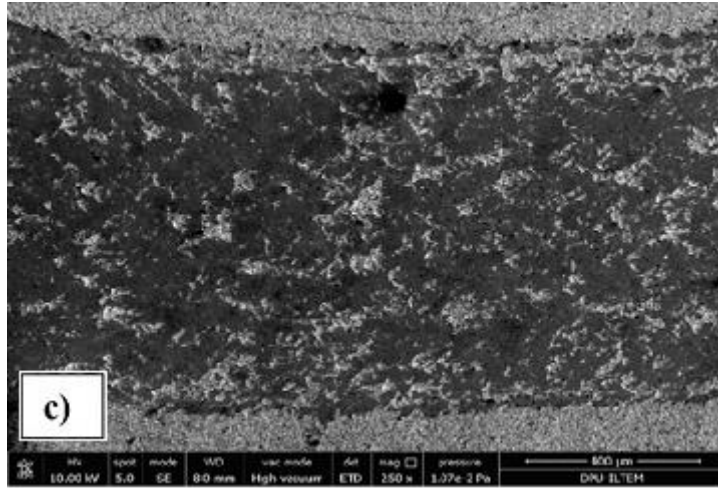
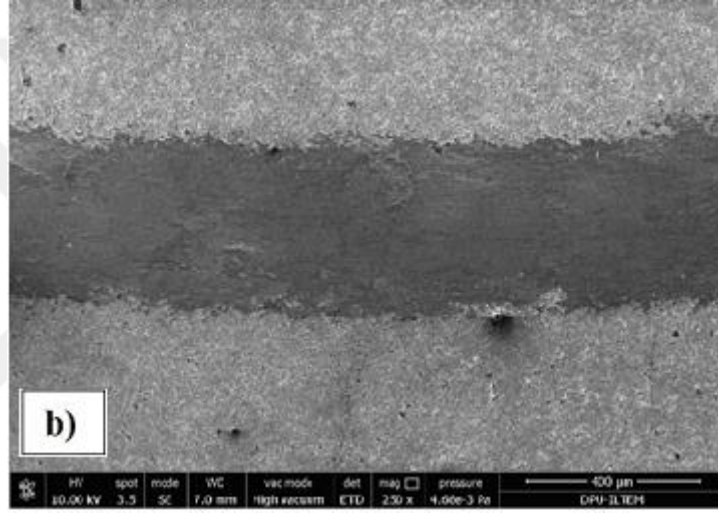
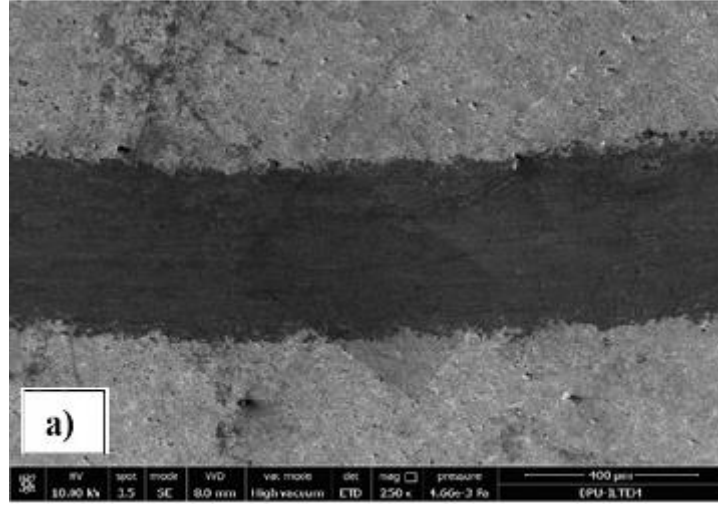
Şekil 4.28’de 900, 950 ve 1000 °C’de 2 saat, Şekil 4.29’da 900, 950 ve 1000 °C’de 4 saat, Şekil 4.30’da 900, 950 ve 1000 °C’de 6 saatte aşınma yüzeylerinin SEM analiz görüntüleri, vermiştir.



Şekil 4.28 a) 900°C’de b) 950°C’de ve c) 1000 °C’de 2 saat, semantasyon çeliğin SEM aşınma izi görüntüleri.



Şekil 4.29 a) 900°C’de b) 950°C’de ve c) 1000 °C’de 4 saat, semantasyon çeliğin SEM aşınma izi görüntüleri.



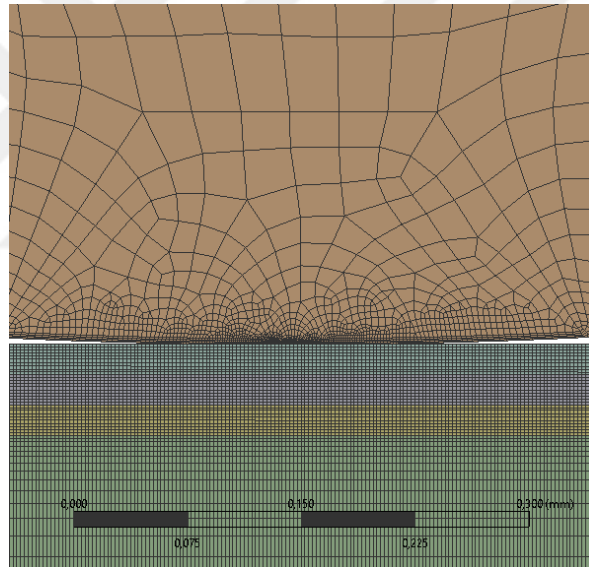
Şekil 4.30 a) 900°C’de b) 950°C’de ve c) 1000 °C’de 6 saat, semantasyon çeliğin SEM aşınma izi görüntüleri.

## 4.6 Semantasyon Çeliğinin Borlanması ile İlgili Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Yapılan Analizler

### 4.6.1 Ağ örgüsü çalışması

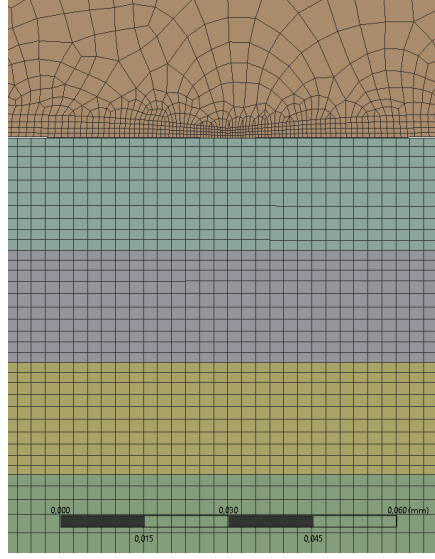
ANSYS ticari yazılımı Hexahedral ve Tetrahedral elemanlar kullanarak sayısal model oluşturur. TET eleman HEX elemana göre daha uzun çözüm süresine ihtiyaç duyar. Buna karşın karmaşık geometriler TET elemanla çok daha hızlı ve düşük maliyetle meshlenebilir.

Bütün model iki boyutlu hex eleman kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Elemanlar arası düzen için kontrollü mesh teknikleri uygulanmıştır. Şekil 4.31’de görüldüğü üzere atılan mesh haritalandırılarak daha kaliteli ve düzgün ağ örgüsü oluşturulmuştur.



**Şekil 4.31** Ağ örgüsü yapısı.

Bilye ve numune arasında gerçekleşen nokta temasını simüle edebilmek için olabildiğince küçük elemanlar kullanılması gerekir. Eleman ne kadar küçükse nokta temas ile gerçekleşen etki gerçeğe o kadar yakın sonuç ortaya çıkarır. Gerilme dağılımının oluştuğu 80 mikronluk kalınlık için 0,0025 mm kısa kenar uzunluğunda elemanlarla ağ örgüsü oluşturulmuştur. Ağ örgüsünün yakınlaştırılmış hali Şekil 4.32’de yer almaktadır.



**Şekil 4.32** Ağ örgüsünün yakınlaştırılmış hali.

Katmanların oluşması, farklı sertlik değerlerinin karşılığında meydana gelir. Görseldeki katmanlar saatlerdeki sertlik değerlerini göstermektedir ve farklı renklerle temsil edilmişlerdir. En üst katmandan başlayarak aşağı doğru gidildiğinde sertlik değerleri azalmaktadır, yani en sert katman en üstteki katmandır. Bu katmanlardaki saatler aynı katmanda bile farklı sıcaklıklara sahiptir; çünkü her saat için sıcaklık farklı bir işlemle belirlenmiştir. Bu uygulama tüm sıcaklıklar için geçerlidir.

Kahve renginde gösterilen katman bilye, diğer yandan, en alttaki yeşil renkli katman ise kullandığımız numunenin kendisidir.

#### **4.7 Analiz Sonuçları**

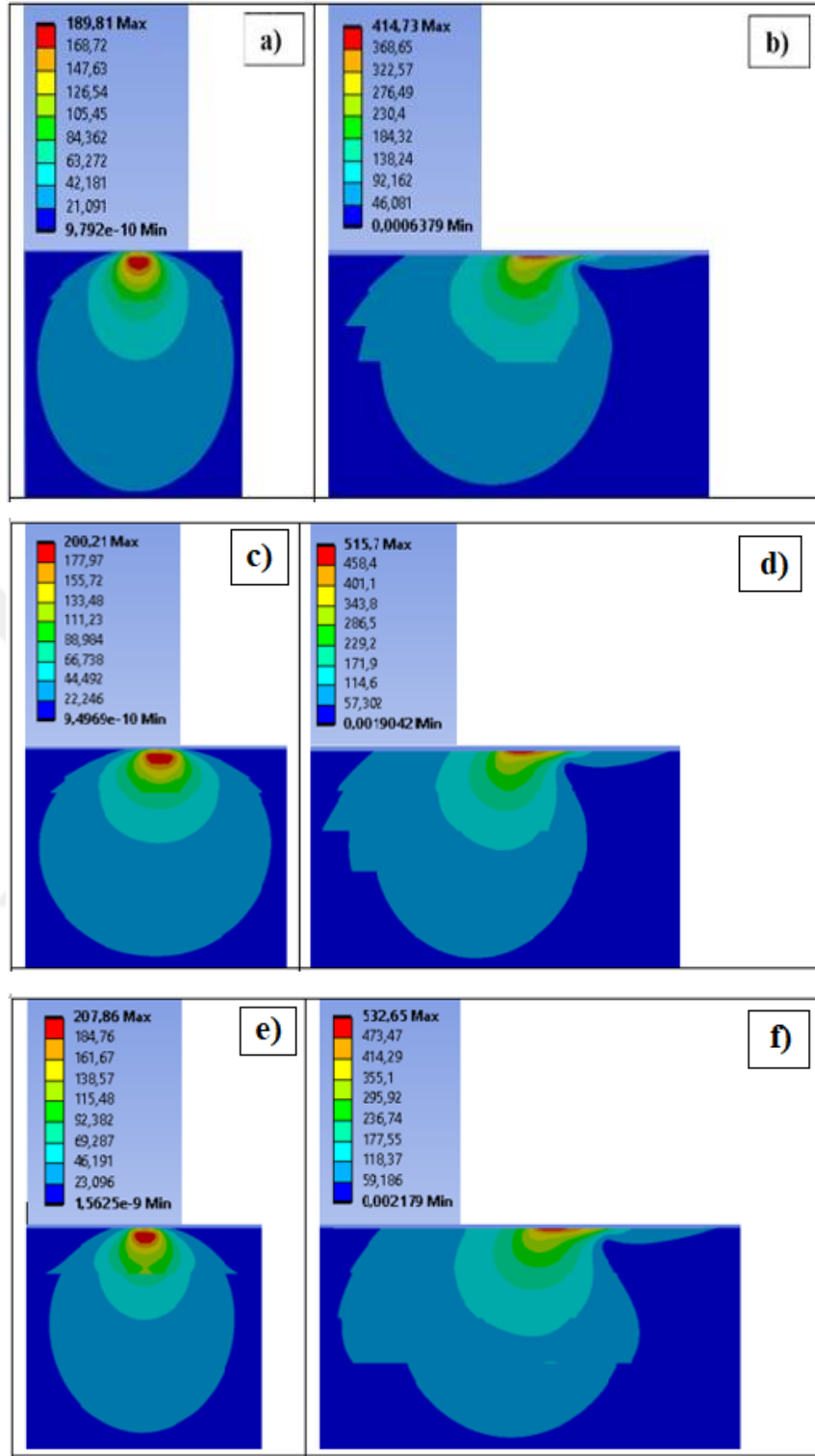
Tam yükleme ve malzeme üzerinde bilyenin hareketi sırasında oluşan gerilmelerin dağılımı Şekil 4.33'te 4.34'te ve 4.35'te gösterilmektedir. Bilyenin numuneye batırıldığı ve hareket ettiği anlar dikkate alınmıştır. Bilye, numuneye nokta teması ile etki ettiği anda gerilmeler yüzeyden temas edilen nokta boyunca yayılmaktadır. Bilye hareketine ve yönüne bağlı olarak numune içerisindeki gerilme dağılımı şekillenir. Katmanlar ve temas ara yüzünde meydana gelen von misses gerilmeleri gösterilmektedir. Katmanlar arasında gerilim dağılımlarında yerel süreksizlikler görülmektedir. Bu, 20 mikron aralıklarla tanımlanan katmanların farklı mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bütün numunelerde temas yüzeyine yakın katman olan 20 mikronluk en sert yüzey içerisinde

maksimum gerilme değerleri okunmaktadır. Gerilme temas yüzeyinden itibaren yumurta Őeklinde numunenin ić kısımlarına doğru inmektedir. Katmanların sahip olduğu sertlik değerleri karŐılık gelen elastisite modülü değerleri numunenin mekanik karakteristiğini belirler. Katmanlar arasında elastisite değeri farklılığı sadece gerilmeyi değil aynı zamanda birim Őekil deęiŐtirme oranını da etkilemektedir. Numunenin yüzeyinden aŐaęıya doğru inildikće birim Őekil deęiŐtirme değeri malzemenin sertliğinin de azalması ile artmaktadır. Bunun sonucunda 10 N'luk tam yük altında bilyenin numuneye batırılması ve hareketi ile bilyenin hareketi yönünde gerilme dağılımı Őekil alır. Hareket halindeyken maksimum gerilme değeri yüzeye daha ćok yaklaŐarak temasta yığılma meydana getirir.

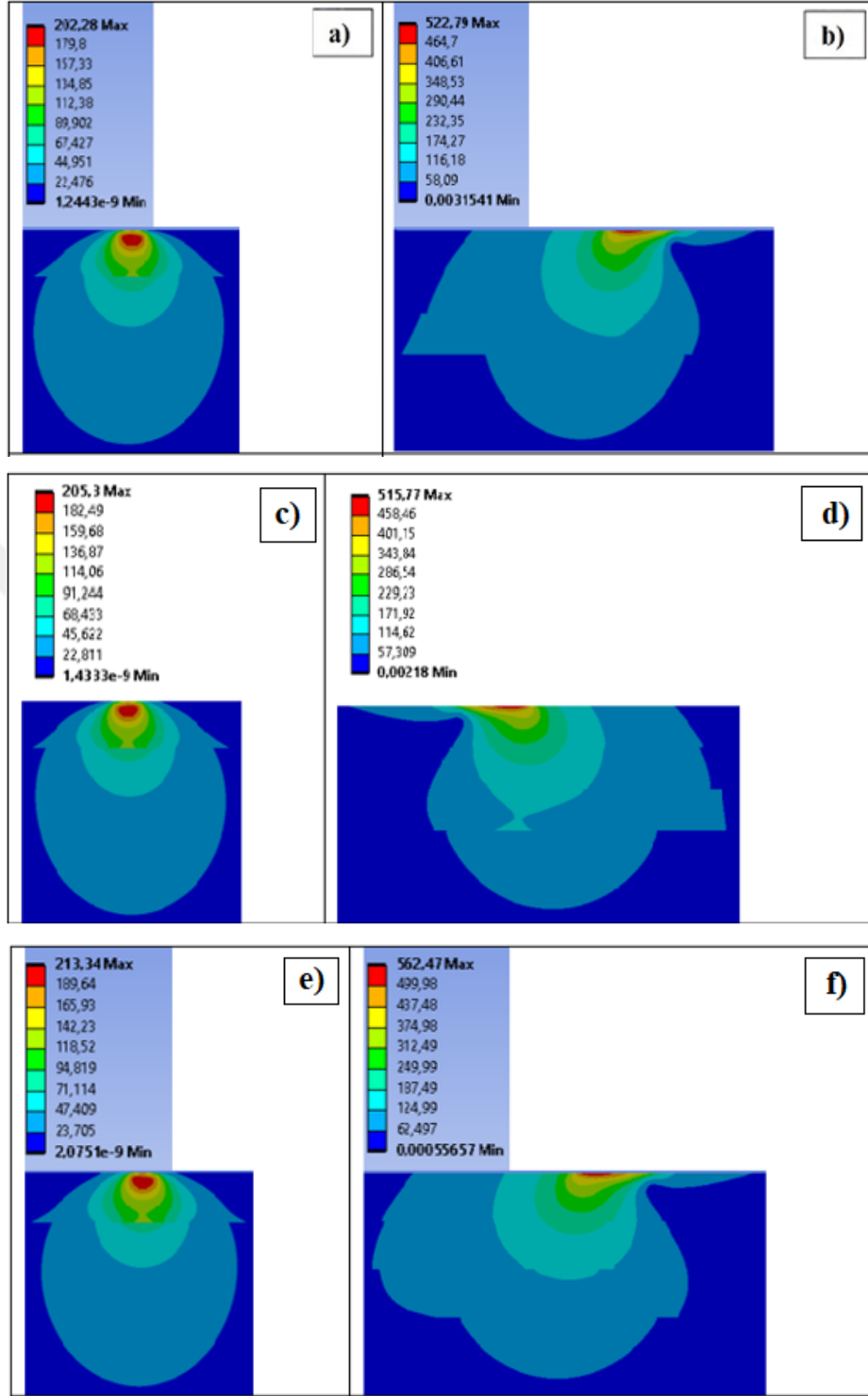
900 °C 2, 4 ve 6 saat borlanmış hareketli numuneler incelendięinde; 900 °C 2 saat borlanan numune ićin Max. Gerilme 414,73 MPa olarak bulunurken, bu gerilme 4 saat ićin 515.7 MPa ve 6 saat ićin 532 MPa olarak bulunduęu görülmektedir. Bu sonućlara göre borlanma süresi arttıkća yüzeyde oluŐan gerilmenin arttıkćı gözlenmiŐtir. 1000 °C 2, 4 ve 6 saat borlanmış hareketli numuneler incelendięinde aynı kanıya varıldıęı görülecektir.

950 °C 2, 4 ve 6 saat borlanmış hareketli numuneler incelendięinde; 950 °C 2 saat borlanan numune ićin Max. Gerilme 522,79 MPa olarak bulunurken, bu gerilme 6 saat ićin 562,42 MPa olarak bulunduęu görülmektedir. Bu sonućlara göre borlanma süresi arttıkća yüzeyde oluŐan gerilmenin arttıkćı gözlenmiŐtir.

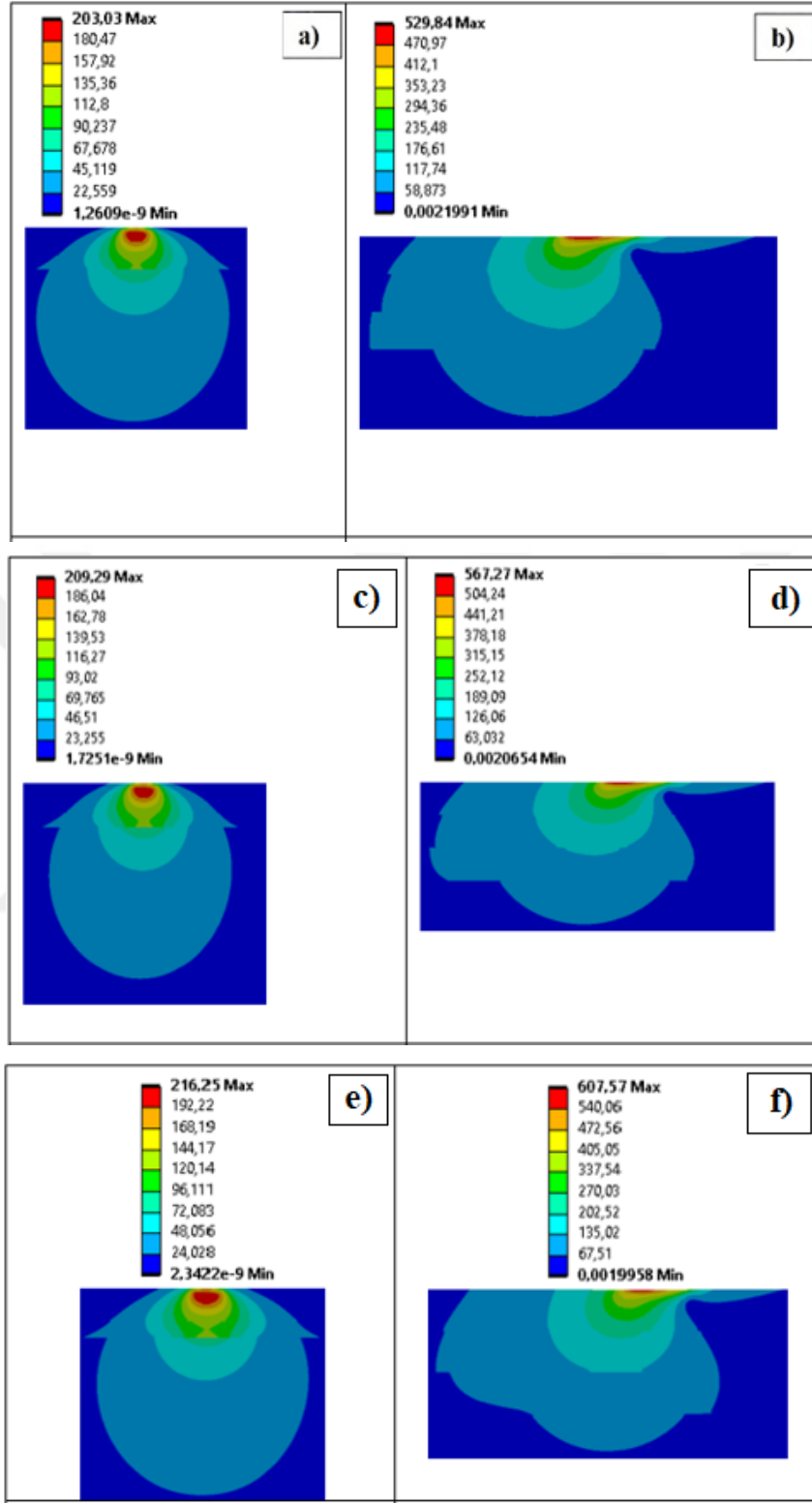
İŞlemsiz numune incelendiğinde; Max. Gerilme 402,56 MPa olarak bulunmuştur.



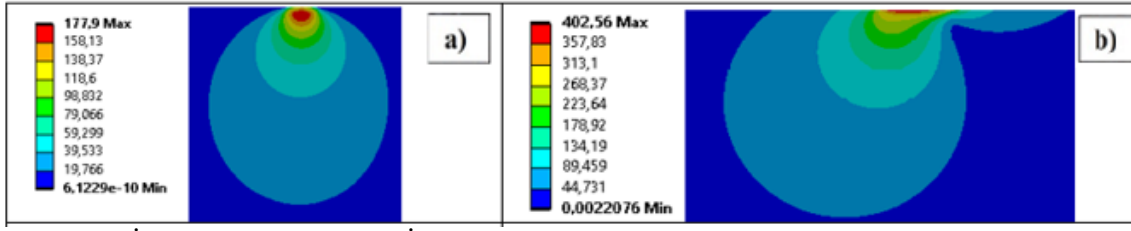
Şekil 4.33 900 °C’de 2 saat borlanan numune için a) İlk temas b) Hareket halinde, 900 °C’de 4 saat borlanan numune için c) İlk temas d) Hareket halinde, 900 °C’de 6 saat borlanan numune için e) İlk temas f) Hareket halinde, Von-Mises analizleri.



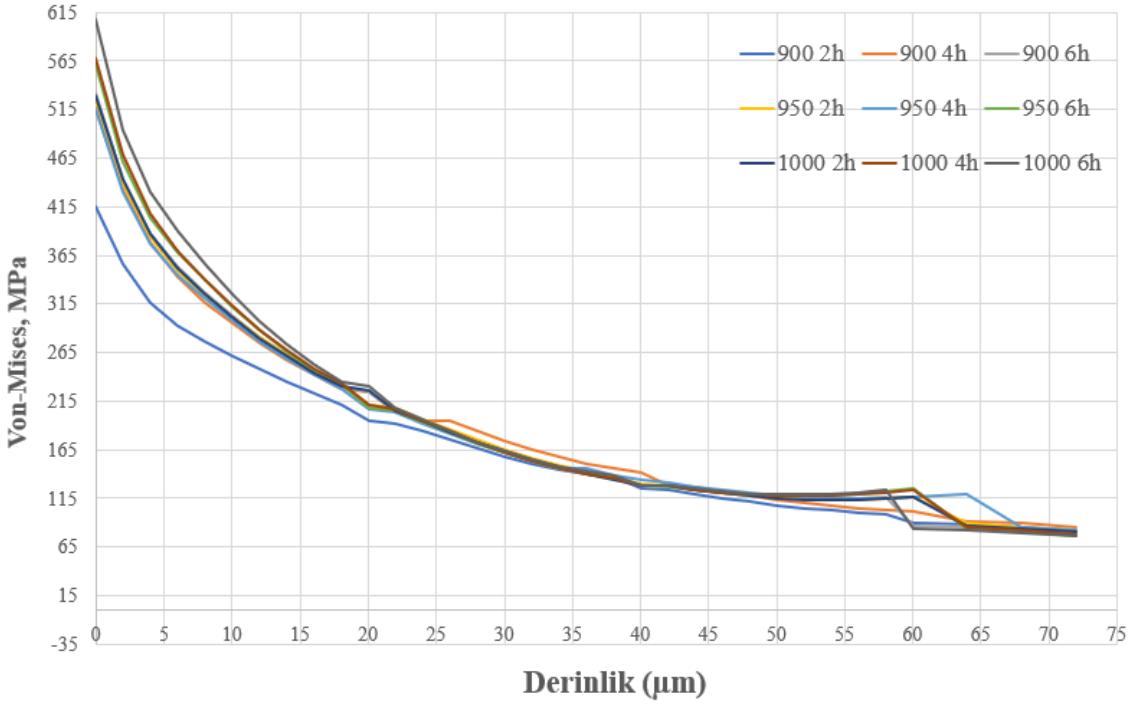
Şekil 4.34 950 °C’de 2 saat borlanan numune için a) İlk temas b) Hareket halindeki, 950 °C’de 4 saat borlanan numune için c) İlk temas d) Hareket halindeki, 950 °C’de 6 saat borlanan numune için e) İlk temas f) Hareket halindeki, Von-Mises analizleri.



**Şekil 4.35** 1000 °C’de 2 saat borlanan numune için a) İlk temas b) Hareket halindeki, 1000 °C’de 4 saat borlanan numune için c) İlk temas d) Hareket halindeki, 1000 °C’de 6 saat borlanan numune için e) İlk temas f) Hareket halindeki, Von-Mises analizleri.



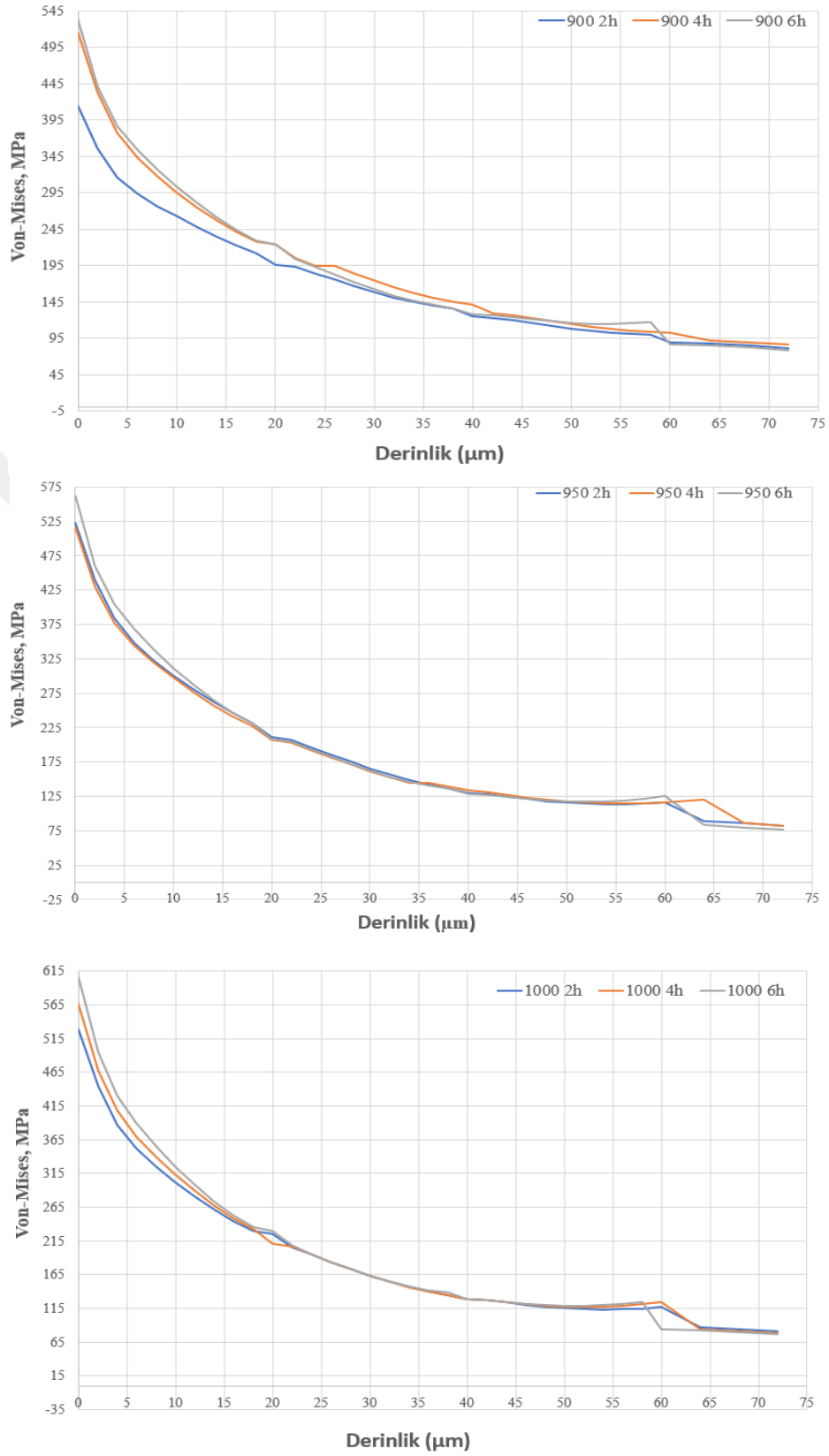
Şekil 4.36 İşlemsiz numunenin a) İlk temas b) Hareket halindeki, Von-Mises analizleri.



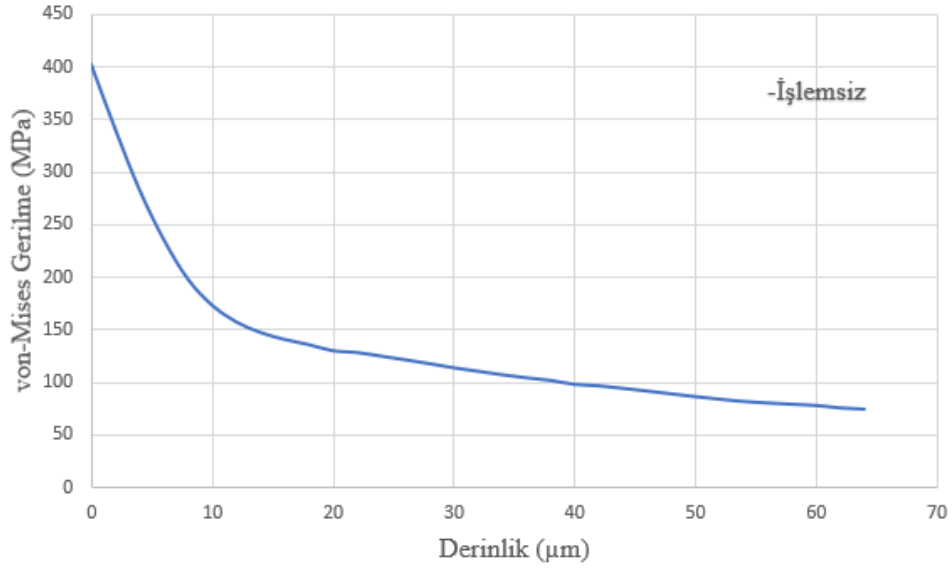
Şekil 4.37 Borlanmış numunelerin Von-Mises grafiği.

Malzemenin iç kısmından borlanmış yüzeye gidildikçe sertliği artmaktadır. Artan malzeme sertliği nedeni ile malzemenin elastite modülü de artar. Bunun sonucunda yüzey de birim alana etki eden kuvvet malzeme yüzeyinde, içerisine göre daha yüksek gerilme değerleri ile sonuçlanacaktır.

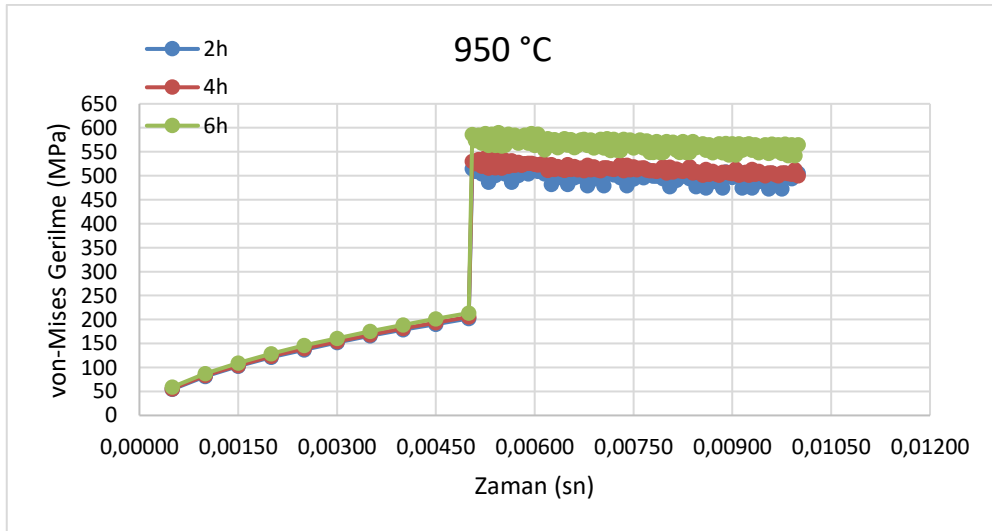
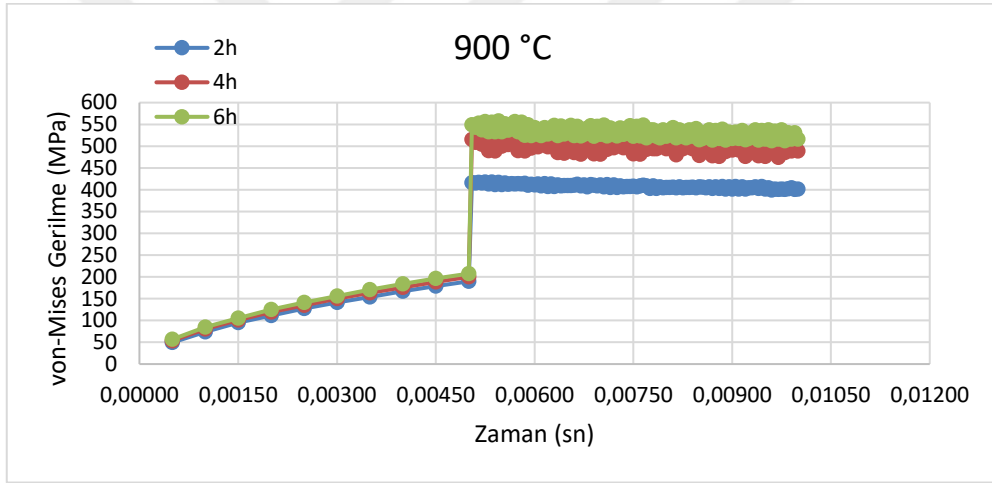
Borlama sıcaklığı 900 °C'den 1000 °C'ye arttıkça yüzey sertliği de artmaktadır. Yüzey sertliğine bağlı olarak katmanların kuvvet etkisi ile ortaya çıkan gerilmelerde artmakta olduğu görülür. Sonlu elemanlar analizleri ile bilye hareketsiz ve hareketli durumdaki gerilme dağılımı incelenmiştir.



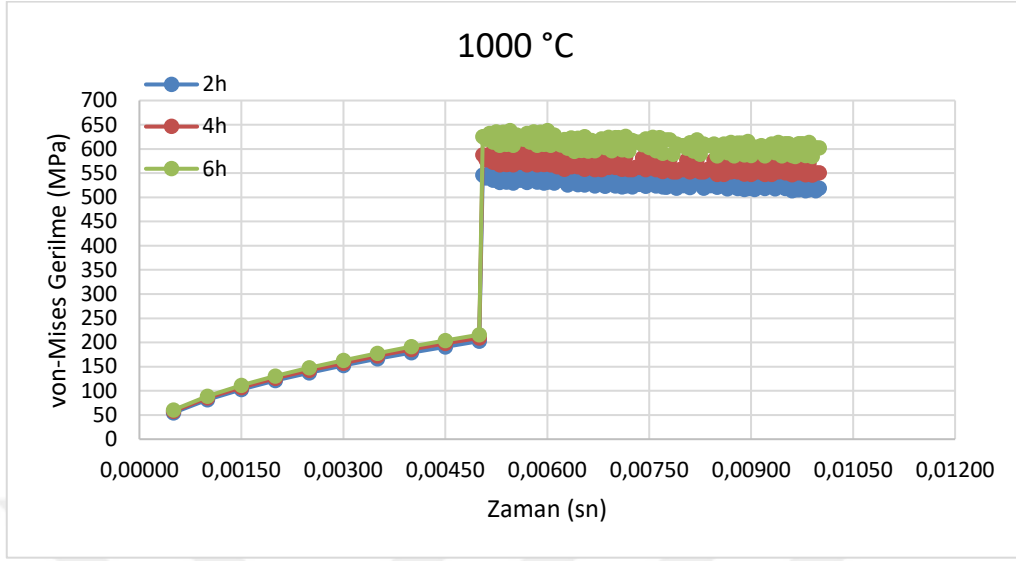
Şekil 4.38 900, 950 ve 1000 °C’de 2 saatte, 4 saatte ve 6 saatte Von-Mises grafiği.



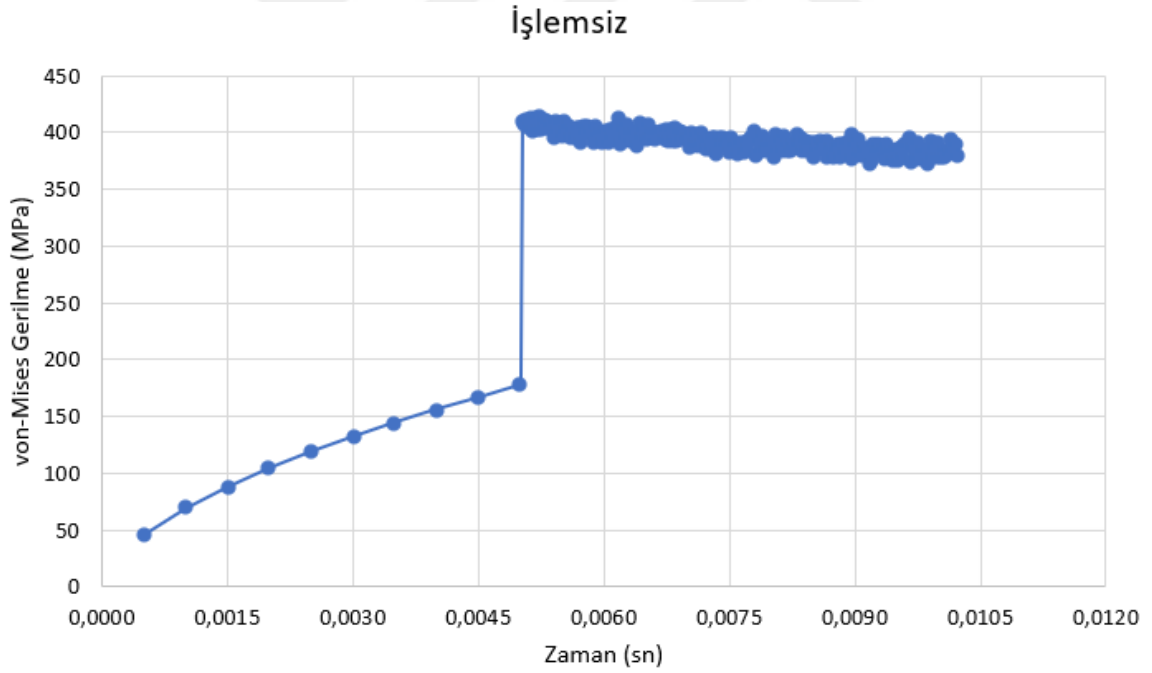
Şekil 4.39 İşlemsiz numunelerin Von-Mises grafiği.



Şekil 4.40 900, 950 ve 1000 °C’de 2 saatte, 4 saatte ve 6 saatte Von-Mises zaman grafiği.

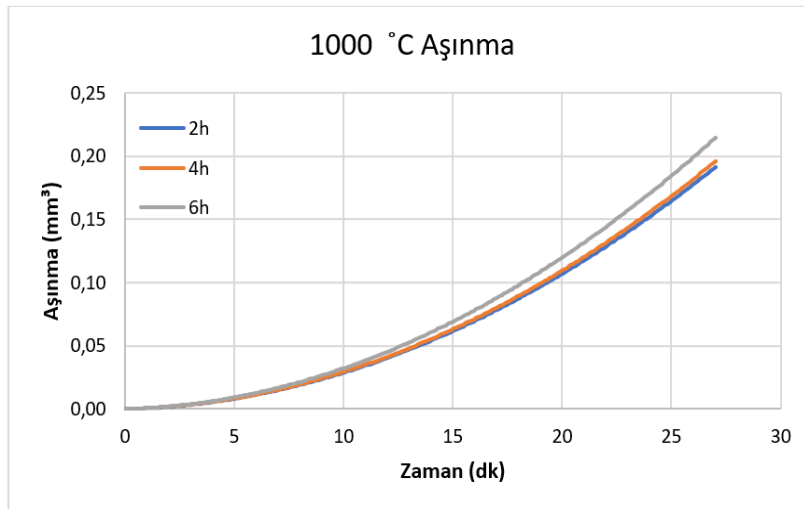
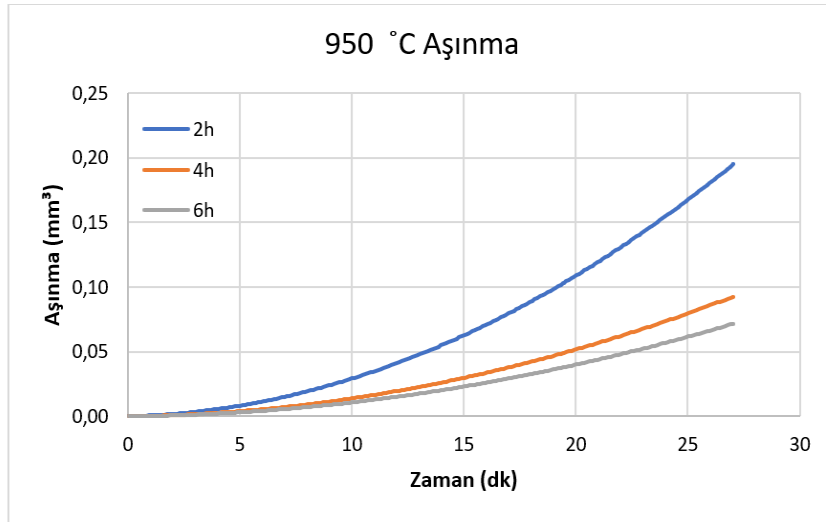
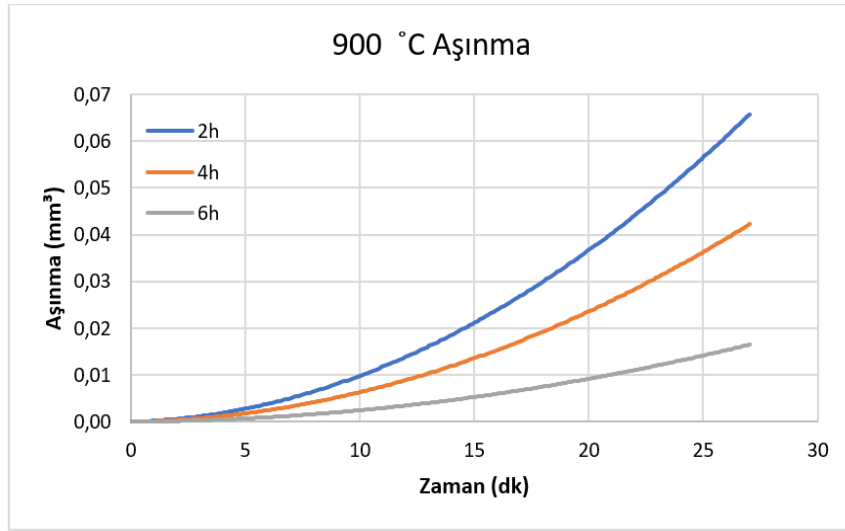


Şekil 4.40 (Devam) 900, 950 ve 1000 °C’de 2 saatte, 4 saatte ve 6 saatte Von-Mises zaman grafiği.

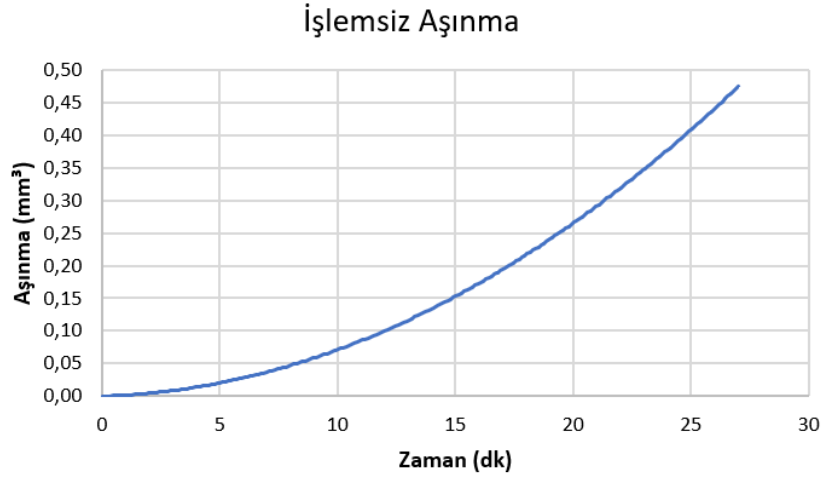


Şekil 4.41 İşlemsiz numunelerin Von-Mises zaman grafiği.

Sürekli olarak aynı yere yapılan tekrarlı hareketler, aşınma sürecini tetikler ve zamanla artan bir aşınma hızına neden olur. Katmanlar arasındaki farkın büyümesiyle birlikte, Von-Mises gerilme değeri dalgalanmaya başlar. Bu durum, aşınma sonucu malzeme yüzeyindeki zorlanmaların değişkenlik gösterdiğini gösterir.



Şekil 4.42 900, 950 ve 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saatte ortaya çıkan aşınma hacimleri grafiği.



**Şekil 4.43** İşlemsiz numunenin aşınma hacmi grafiği.

900, 950 ve 1000 °C’de işlem süreleri artıkça aşınma hızları düşmektedir. Zamana bağlı malzemenin toplam aşınma hacmi artmaktadır.

Aşınma hacminin deneysel ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması ile Çizelge 4.1’deki gibi elde edilmiştir. Çizelgeye göre deneysel ve analiz sonuçları birbirleriyle paralel olarak değişmektedir.

**Çizelge 4.1** Aşınma hacmi (mm³)

|                         | <b>Deneysel</b> | <b>Analiz</b> |
|-------------------------|-----------------|---------------|
| <b>900°C-2 saatte</b>   | 0,094           | 0,068         |
| <b>900°C-4 saatte</b>   | 0,059           | 0,043         |
| <b>900°C-6 saatte</b>   | 0,021           | 0,018         |
| <b>950°C-2 saatte</b>   | 0,151           | 0,199         |
| <b>950°C-4 saatte</b>   | 0,120           | 0,098         |
| <b>950°C-6 saatte</b>   | 0,085           | 0,075         |
| <b>1000°C-2 saatte</b>  | 0,173           | 0,217         |
| <b>1000°C -4 saatte</b> | 0,324           | 0,199         |
| <b>1000°C -6 saatte</b> | 0,306           | 0,198         |
| <b>İşlemsiz</b>         | 0,452           | 0,475         |

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 17CrNiMo6 sementasyon çeliği üzerinde 900-950-1000 °C sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat işlem süreleriyle katı (kutu) borlama işlemi uygulanmış ve elde edilen kaplama bölgesi üzerindeki yapısal etki deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- 900 °C, 950 °C ve 1000 °C sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat sürelerinde borlanan numuneler ile 1000 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saatte borlanan numuneler karşılaştırıldığında, 1000 °C'de borlanan numunelerin tabaka kalınlıklarının ve geçiş bölgelerinin kalınlıklarının arttığı tespit edilmiştir.
- Aşınma deneyleri sonucunda, borlanmış çeliklerin sürtünme katsayılarının 0,40 ile 0,72 arasında değiştiği görülmüştür.
- İncelenen 17CrNiMo6 sementasyon çeliği için, bor tabaka kalınlığı, borlama sıcaklığı ve süresiyle birlikte artış göstermektedir. Oluşan bor tabakası, 900 °C sıcaklıkta 27-103 µm arasında değişirken, 1000 °C sıcaklıkta ise 61-180 µm arasında değişmektedir.
- 900 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saatte numunelerin borlama işleminin sonucunda Fe<sub>2</sub>B fazları görülmüştür. 950 °C ve 1000 °C sıcaklığında borlama işleminde Fe<sub>2</sub>B fazının miktarının azaldığını gözlemlenmiştir. 950 °C ve 1000 °C sıcaklığında 2, 4 ve 6 saatte numunelerin borlama işleminin sonucunda FeB fazları görülmüştür.
- Borür tabakasında yüksek miktarda bor elementine rastlanmıştır. Bu oran, geçiş bölgesinde azalmış ve ana metalde ise bor elementi tespit edilmemiştir.
- 950 °C işlem sıcaklığında elde edilen tüm numuneler için, tüm sertlik değerleri 900 °C'deki tüm numunelerden daha büyüktür. Bu durum, işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte sertlik değerlerinde bir artış olduğunu göstermektedir.

- 900 °C 2 saat borlanan numune için Max. Gerilme 414,73 MPa olarak bulunurken, bu gerilme 4 saat için 515.7 MPa ve 6 saat için 532 MPa olarak bulunduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre borlanma süresi arttıkça yüzeyde oluşan gerilmenin arttığı gözlenmiştir. Diğer sıcaklıklarda borlanan numuneler için ve hareketsiz deneylerin sonuçları incelendiğinde aynı kanıya varılmıştır.
- İşlemsiz numune incelendiğinde; Max. Gerilme 402,56 MPa olarak bulunmuştur.
- Sonlu elemanlar analizleri ile bilye hareketsiz ve hareketli durumdaki gerilme dağılımı incelenmiştir. Hareketli durumda gerilmeler yüzeye yaklaşmış ve artmıştır. Bu sonuçlara göre borlanma süresi arttıkça yüzeyde oluşan gerilmenin arttığı gözlenmiştir.
- Sıcaklık ve işlem süreleri arttıkça oluşan çift fazlı tabakadan dolayı aşınma hızı artmıştır.

## 6. KAYNAKLAR

- Aich S, Ravi Chandran K. S, 2002, Katı Hal Difüzyonu ile Titanyum yüzeylerde TiB Bıyık Kaplama: Sentez, Mikroyapı ve Mekanik Özellikler, Metalurji ve Malzeme İşlemleri A, 33, 3489-3498.
- Atik E, 2001, Farklı Bir Yüzey Sertleştirme Yöntemi: Borlama, Makina Metal Dergisi, 117, 86-90.
- Balart M. J, Davis C. L, Strangwood M, 2002, Fracture Behaviour in Medium-Carbon Ti-V-N and V-N Microalloyed Ferritic-Pearlitic and Bainitic Forging Steels With Enhanced machinability, Materials Science and Engineering: A, 328, 48-57.
- Berkold A, Büttgenbach T, Greinwald S, Illich B, Jacobs F, Kolodziej A. W, vd., Wolff U, 2005, Geoelektrik, Geophysik, 71-387.
- Bindal C, Bindal C, 1991, Az Alaşımlı Çelikler ve Ticari Karbon Çeliklerinde Borlama ile Yüzeye Kaplanan Borür Tipi Seramik Kompozitlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Boztepe M. H, 2014, Effect Of Boronizing Temperature And Time On Abrasion and Corrosion Resistance of AISI 1050 Steel Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Çalık A, Özsoy A, 2002, Termal Çevirimli Borlama İşleminin Ç1010 Çeliğine Etkileri" 11. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi, Bildiriler Kitabı, CD'si İstanbul, 1281-1288.
- Campos-Silva I, Ortiz-Domínguez M, López-Perrusquia N, Meneses-Amador A, Escobar-Galindo R, Martinez-Trinidad J, 2010, Characterization of AISI 4140 Borided Steels, Applied Surface Science, 256, 2372-2379.
- Culha O, Toparli M, Sahin S, Aksoy T, 2008, Characterization and Determination of FexB layers' mechanical Properties, Journal of Materials Processing Technology, 206, 231-240.
- Ersöz A, 2008, Elektrokimyasal Borlama İle Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Fichtl W, 1981, Boronizing and its Practical Applications, Materials Design, 2, 276-286.

- Genel K, 2006, Boriding İnetics of H13 Steel, Vacuum, 80, 451-457.
- Gidikova N, 2000, Çelik Üzerine Vanadyum Borür Kaplamalar, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği: A, 278, 181-186.
- Goeuriot P, Thevenot F, Driver J. H, 1981, Surface Treatment of Steels: Borudif, a New Boriding Process, Thin Solid Films, 78, 67-76.
- Gonzalez Szwacki N, 2017, Borofen Bazlı Bir Bileşik olan Tungstenin En Yüksek Boridinin Yapısı ve Sertliği, Bilimsel Raporlar , 7, 4082.
- Günen A, Kanca E, 2017, Farklı Bor Kimyasalları ile Borlanmış Inconel 625 Alaşımının Karakterizasyonu, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23, 411-416.
- Güneş İ, 2010, AISI 8620 Çeliğinin Değişik Pasta Karışımlarında Plazma Pasta Borlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon.
- Kara G, 2017, Farklı Kristal Yapılardaki Titanyum ve Alaşımlarının Borlanması ve Borlamanın bu Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Biyouyumluluk Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi.
- Karakoca M. R, 2022, AA 6061-T6 Alaşımının Darbeli Aşınma Davranışın Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Karabük.
- Karaman Y, 2003, Endüstriyel Borlama Ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama, SD. Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 121s, Isparta.
- Kartal G, Eryılmaz O. L, Krumdick G, Erdemir A, Timur S, 2011, Kinetics of Electrochemical Boriding of Low Carbon Steel, Applied Surface Science, 257, 6928-6934.
- Kayalı Y, 2015, Investigation of Diffusion Kinetics of Borided AISI P20 Steel in Micro-Wave Furnace.
- Kayali Y, Güneş İ, Ulu S, 2012, Diffusion Kinetics of Borided AISI 52100 and AISI 440C Steels, Vacuum, 86, 1428-1434.
- Khor K. A, Yu L. G, Sundararajan G, 2005, Formation of Hard Tungsten Boride Layer By Spark Plasma Sintering Boriding, Thin Solid Films, 478, 232-237.
- Korkmaz S, 2020, Borlanmış Küresel Grafitli Dökme Demirin Kırılma Tokluğunun ve Korozyon Davranışının İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri

- Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.
- Lee S. K, Lee SY. Kim, 2004, AISI 403 Paslanmaz Çelik Üzerinde Kromlama ve Borlama İşlemi ile Oluşturulan Dubleks Tabakanın Mekanik Özellikleri, Yüzey ve Kaplama Teknolojisi, 177, 178-184.
- Maragoudakis N. E, Stergioudis G, Omar H, Pavlidou E, Tsipas D N, 2002, Boro-Nitriding of Steel US 37-1, Materials Letters, 57, 949-952.
- Nair F, 1996, Koruyucu gaz atmosferinde macun borlama tekniği ile çelik yüzeylerinin sertleştirilmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Oliveira C. K, Casteletti L. C, Neto A. L, Totten G. E, Heck S. C, 2010, Production and Characterization of Boride Layers on AISI D2 Tool Steel, Vacuum, 84, 792-796.
- Ozbek I, Bindal C, 2011, Kinetics of Borided AISI M2 High Speed Steel, Vacuum, 86, 391-397.
- Özbek I, Konduk B. A, Bindal C, Ucisik A. H, 2002, Characterization of Borided AISI 316L Stainless Steel İmplant, Vacuum, 65, 521-525.
- Ozdemir O, Omar M. A, Usta M, Zeytin S, Bindal C, Ucisik A. H, 2008, An İnvestigation on Boriding Kinetics of AISI 316 Stainless Steel, Vacuum, 83, 175-179.
- Özer M, 2011, Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İçyapı ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir.
- Özsoy A, 2014, Çeliğin Borlanması Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.
- Petrova R. S, Suwattananont N, 2005, Surface Modification of Ferrous Alloys With Boron, Journal of Electronic Materials, 34, 575-582.
- Şahin S, 2009, Effects of Boronizing Process On The Surface Roughness and Dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714, Journal of Materials Processing Technology, 209, 1736-1741.
- Sarı M, 2019, Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı ve mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Adıyaman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman.
- Selçuk B, 1994, Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Erciyes Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,

- Kayseri.
- Şeşen F. E, 2007, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalürji Mühendisliği Bölümü, Elektrik Ark Fırını ile Çelik Üretimi Ders Notları.
- Simitçioğlu G, 2016, Dinamik Sonlu Eleman Analizleri Yardımıyla Otobüslerde Kullanılan Polietilen Yakıt Tanklarının Dayanımının İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Singhal S. C, 1977, A Hard Diffusion Boride Coating For Ferrous Materials, Thin Solid Films, 45, 321-329.
- Sinha A. K, 1991, Boriding (Boronizing) ASM Handbook, Heat Treating, 4, 437.
- Taktak S, Tasgetiren S, 2006, Identification of Delamination Failure of Boride layer on Common Cr-Based Steels, Journal of Materials Engineering and Performance, 15, 570-574.
- Tarakci M, Gencer Y, Calik A, 2010, The Pack-Boronizing of Pure Vanadium Under a Controlled Atmosphere, Applied Surface Science, 256, 7612-7618.
- Teker T, Karakurt E. M, 2017, Demir-Niobyum İkili Alaşımların Kutu Borlamasında Artan İşlem Sıcaklığının Borür Tabakasının Oluşumu Üzerindeki Etkisi, Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 4, 13-19.
- Tian Y, Tian X, Yang YL, Sun SJ, An J, Lu Y, ve Wang ZG, 2009, Farklı Yöntemlerle Soğutulan Borlanmış N80 Çelik Borunun Çekme Özellikleri, Malzeme Mühendisliği ve Performans Dergisi, 18, 162-167.
- Toprak M, 2019, Katı Borlamanın Hardox 450 ve Hardox HiTuf Çeliklerin Yüzey Özelliklerine Etkisi/The Effect of Solid Boronizing on The Surface Properties of Hardox 450 and Hardox HiTuf Steels, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Topuz P, 2009, Akışkan Yataklı Fırında Farklı Çeliklerin Borlanması ve Borlanma Parametrelerinin Geliştirilmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Türkmen İ, 2018, Farklı Bor Türevleri ile Alternatif Borlama Birleşimlerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu. Manisa Celal Bayar Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa.
- Ueda N, Mizukoshi T, Demizu K, Sone T, Ikenaga A, Kawamoto M, 2000, Boriding of Nickel by the powder-pack method, Surface and Coatings Technology 126, 25-

30.

- Uluköy A, Can A. Ç, 2006, Çeliklerin Borlanması, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 189-198.
- Ünüvar F, 2013, Saf Kobaltın Borlama Özelliklerinin İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Usta M, Ozbek I, Bindal C, Ucisik A. H, Ingole S, Liang H, 2006, A Comparative Study of Borided Pure Niobium, Tungsten and Chromium Vacuum, 80, 1321-1325.
- Varol R, Yılmaz S, S Tunay R. F, 2002, “Borlamanın T/M çelik parçaların mikroyapı ve yüzey sertliğine etkisi”, III. In International Powder Metallurgy Conference.
- Xie C, Xie CX, Ouyang ML, 1990, Artık Gerilmenin Borürlenmiş Çeliğin Aşınma Direnci Üzerindeki Etkisinin Mekanik Bir Açıklaması, Giyin, 137, 151-159.
- Xie F, Cheng J, Wang S, 2018, Effects and Mechanisms of an Alternating Current Field on Pack Boriding, Vacuum, 148, 41-47.
- Xu Lingyun, Wu Xiaochun, Wang Hongbin, 2007, Yüzey Nano-Yapılı İşlemin H13 Çeliğinin Paket Borlamasında Etkisi, Materials Science and Technology , 23, 525.
- Yapar U, 2003, Düşük ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama ile Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Yılmaz S. O, Teker T, Karataş S, 2016, Wear Behavior of Iron Boride Coating on AISI 4140, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 52, 119-127.

## 6.1 İnternet Kaynakları

- 1- <https://hascelik.com/celiklerin-siniflandirilmesi/sementasyon-celikleri.html/>, 05.02.2023
- 2- <http://www.nsccelik.com/sementasyoncelikleri.html/>, 05.03.2023
- 3- <http://www.comertcelik.com/sementasyon-celikleri/Urunler/17crnimo6/>, 05.04.2023

