



**4340 ISLAH ÇELİĞİNİN BİLYALI DÖVME VE  
KUTU BORLAMA ARDIŞIK UYGULAMALARIN  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**İsmail Buğra BOZKURT**

**2022  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**4340 ISLAH ÇELİĞİNİN BİLYALI DÖVME VE KUTU BORLAMA  
ARDIŞIK UYGULAMALARIN MİKROYAPI VE MEKANİK  
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**İsmail Buğra BOZKURT**

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

**Tez Danışmanı  
Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**KARABÜK  
Mayıs 2022**

İsmail Buğra BOZKURT tarafından hazırlanan “4340 ISLAH ÇELİĞİNİN BİLYALI DÖVME VE KUTU BORLAMA ARDIŞIK UYGULAMALARIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Okan ÜNAL

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/05/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Fuat KARTAL (KÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi A. Emrah ERDOĞDU (KBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hassan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

İsmail Buğra BOZKURT

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **4340 ISLAH ÇELİĞİNİN BİLYALI DÖVME VE KUTU BORLAMA ARDIŞIK UYGULAMALARIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**İsmail Buğra BOZKURT**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**Mayıs 2022, 43 sayfa**

Bu çalışmada, 4340 ıslah çeliği malzemesi üzerine öncelikle paslanmaz çelik bilyalarla fırlatma yöntemi ile bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Sonrasında paslanmaz çelik bir potada inert gaz ortamında 850-950-1050 °C sıcaklıklarda 4 saatlik bir süre boyunca kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur.

4340 ıslah çeliği malzemesinin üzerine uygulanan bilyalı dövme ve kutu borlama ardışık uygulamalarından sonra korozyona karşı davranışları ve mikroyapıları incelenmiştir. Demir Çelik sektöründe kullanılan bu malzemenin korozyon gibi deformasyonuna yol açan etkenlere karşı yapmış olduğumuz bu işlemlerle, malzemenin mevcut kullanım yerindeki malzemelere göre daha uzun ömürlü ve daha ucuz maliyetle daha iyi şartlarda performans sergilediği gözlemlenmiştir.

**AnahtarSözcükler** : Borlama, bilyalı dövme, çelik, korozyon.

**Bilim Kodu** : 91421

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF 4340 MASTERING STEEL OF BALL FORGING AND BOX BORING SEQUENTIAL APPLICATIONS ON MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES**

**İsmail Buğra BOZKURT**

**Karabük University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**May 2022, 43 pages**

In this study, firstly, ball forging process was applied on 4340 tempered steel material with stainless steel ball ejection method. Afterwards, the box was borided in a stainless steel crucible in an inert gas environment at temperatures of 850-950-1050 °C for a period of 4 hours.

After consecutive applications of ball forging and box boriding applied on 4340 tempered steel, their corrosion behavior and microstructures were investigated. It has been observed that, with these processes, which we have done against the factors that cause deformation of this material, such as corrosion, which is used in the Iron and Steel industry, it has been observed that the material performs in better conditions with a longer life and cheaper cost than the materials in the current place of use.

**Key Word** : Boronizing, ball forging, steel, corrosion.

**Science Code** : 91421



## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitim ve çalışmalarım boyunca, çalışmanın planlanması, hazırlanması ve uygulanmasında engin bilgilerinden yararlandığım, çalışma esnasında teknik, bilimsel, moral motivasyon anlamında her zaman beni destekleyen, yanımda olan danışman hocam Sayın Dç. Dr. Okan ÜNAL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan, desteklerini hiç bir konuda esirgemeyen sevgili eşim Yasemin BOZKURT' a ve enerjimi her zaman yüksek tutmamı sağlayan kızım Bilge BOZKURT' a sonsuz teşekkürler ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. YÜZEY İŞLEMLERİ.....	3
2.1.1. Isıl Yüzey İşlemleri.....	3
2.1.2. Mekanik Yüzey İşlemleri .....	3
2.1.2.1. Bilyalı Dövme İşlemi.....	4
2.1.2.2. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi.....	6
2.1.2.3. Lazer Dövme İşlemi.....	6
2.1.2.4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu .....	7
2.2. BORLAMA .....	7
2.2.1. Bor Elementinin Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	8
2.2.2. Borür Tabakası Özellikleri .....	9
2.2.3. Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları .....	11
2.2.3.1. Borlama İşleminin Avantajları.....	11
2.2.3.2. Borlama İşleminin Dezavantajları .....	12
2.2.4. Borlama Yöntemleri .....	13
2.2.4.1. Kutu Borlama.....	13

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.2.4.2. Pasta Borlama .....	15
2.2.4.3. Sıvı Borlama .....	15
2.2.4.4. Gaz Borlama .....	15
2.2.4.5. Plazma Borlama .....	16
BÖLÜM 3 .....	17
MATERYAL VE METOT .....	17
3.1. MALZEME .....	17
3.2. BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN UYGULANMASI .....	17
3.3. BORLAMA İŞLEMİNİN UYGULANMASI.....	18
3.4. TARAMALI ELEKTRON MIKROSKOP (SEM) ANALIZI .....	20
3.5. X IŞINLARI DIFRAKSİYON (XRD) ANALIZI.....	20
3.6. MİKRO-SERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	20
3.7. OPTİK GÖRÜNTÜ ANALİZİ .....	20
3.8. KOROZYON DENEYİ.....	20
BÖLÜM 4 .....	22
DENEY SONUÇLARI .....	22
4.1. İÇ YAPI İNCELEMELERİ.....	22
4.2. BORÜR TABAKASININ KALINLIKLARI .....	23
4.3. X IŞINLARI DIFRAKSİYON (XRD) SONUÇLARI.....	28
4.4. MİKRO SERTLİK SONUÇLARI .....	32
4.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN İNCELENMESİ.....	34
4.5. KOROZYON TESTİ.....	35
BÖLÜM 5 .....	38
SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	38
KAYNAKLAR .....	40
ÖZGEÇMİŞ .....	43

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi.....	4
Şekil 2.2. Farklı tip bilya resimleri.....	5
Şekil 2.3. Uygulama yapılan bilyaların çaplarına göre sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.4. Lazerle dövme işlemi şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.5. UNYM şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.6. Borür yapısının işlem sırasındaki gelişimi.....	10
Şekil 2.7. Farklı türde oluşan borür tabakalarının yapıları .....	10
Şekil 2.8. Fe-B ikili denge diyagramı.....	11
Şekil 2.9. (a) İnert gaz ortamında gerçekleşen kutu borlama işlemi, (b) Atmosfer şartlarında gerçekleşen kutu borlama işlemi .....	14
Şekil 2.10. Gaz borlama şematik gösterimi .....	16
Şekil 2.11. Gaz borlama şematik gösterimi .....	16
Şekil 3.1. 4340 numune malzemeler. ....	18
Şekil 3.2. Silindirik çelik kutu.....	19
Şekil 3.3. Borlama işleminde kullanılan ısıtma fırını.....	19
Şekil 4.1. Bilyalı dövme işleminin yapıldığı numunelerin mikroyapıları.....	22
Şekil 4.2. Farklı tip dövülen numunelerin ultra ince tane yapılarının kalınlıkları. 23	
Şekil 4.3. Bilyalı dövülmemiş borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı. ....	24
Şekil 4.4. A12 şiddetinde bilya ile dövülmüş sonrasında borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı. ....	24
Şekil 4.5. A18 şiddetinde bilya ile dövülmüş sonrasında borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı. ....	25
Şekil 4.6. A24 şiddetinde bilya ile dövülmüş sonrasında borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı. ....	25
Şekil 4.7. 4340 ıslah çeliğinin işlem görmemiş ve farklı bilya tipleriyle dövülmüş numunelerin borlama işlemi sonrası dağlama yapılmamış hallerinin iç yapıları.....	26
Şekil 4.8. 4340 ıslah çeliğinin işlem görmemiş ve farklı bilya tipleriyle dövülmüş numunelerin borlama işlemi sonrası dağlama yapılmış hallerinin iç yapıları.....	26
Şekil 4.9. Bilyalı dövülmüş 4340 çeliğin XRD incelenmesi.....	29
Şekil 4.10. 850 °C sıcaklıkta bilyalı dövülmüş 4340 çeliğin XRD pikleri .....	30

**Sayfa**

Şekil 4.11. 950 °C sıcaklıkta bilyalı dövülmüş 4340 çeliğın XRD pikleri. ....	30
Şekil 4.12. 1050 °C sıcaklıkta bilyalı dövülmüş 4340 çeliğın XRD pikleri. ....	31
Şekil 4.13. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş 4340 çeliğının mikro sertliğinin incelenmesi.....	33
Şekil 4.14. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş 4340 çeliğının yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi. ....	34

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Bor ve bor bileşiklerinin sertlik değerleri .....	8
Çizelge 2.2. Bor elementi kullanım alanları.....	9
Çizelge 2.3. Çeşitli yöntemlerle yüzeyleri sertleştirilen malzemelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması .....	12
Çizelge 2.4. Borlama işleminin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması .....	12
Çizelge 3.1. 4340 Islah çeliği standartları.....	17
Çizelge 3.2. 4340 Islah çeliği kimyasal bileşimi (%)......	17
Çizelge 3.3. Belirlenen Almen yoğunlukları için ark yüksekliği ve bilyalı dövme parametreleri.....	18
Çizelge 4.1. Farklı yüzey işlemlerinden sonra potansiyodinamik polarizasyon testleri sonrası korozyon verileri.....	36

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

B	: Bor
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Cr	: Krom
H <sub>2</sub>	: Hidrojen
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden
V	: Vanadyum
Cu	: Bakır
FeB	: Demir borür
Fe <sub>2</sub> B	: Demir di borür
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Bor oksit
B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	: Diboran
Ar	: Argon
kPa	: Kilopascal

### KISALTMALAR

AISI	: Amerikan Endüstriyel Normu
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
UNYM	: Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu
DIN	: Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

- EN : European Norm (Avrupa Normu)  
XRD : X-Işını Difraksiyon Spektrometresi  
SEM : Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope)  
HV : Vickers Sertliği



## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Islah çelikleri içinde bulundurduğu karbon miktarı bakımından sertleştirilmeye elverişli olması ve aynı zamanda ıslah işlemleri sonrasında istenilen tokluk değerlerinin elde edildiği çelik malzemelerdir. Islah işlemi yapıldıktan sonra yüksek mekanik özellikler sergileyen ıslah çelikleri endüstride makina, motor, miller, akslar, pistonlar, dişliler gibi çok geniş kullanım alanlarına sahiptir. Kullanım alanlarında yüksek performans sergilemesi beklenen bu çeliklerin korozyon, sürtünme ve aşınma gibi ömrünü doğrudan olumsuz yönde etkileyecek tribolojik nedenler bulunmaktadır. Korozyon nedeniyle tüm dünya ülkelerinde oluşan malzeme kayıpları milli hasılatlarının %3,5-5' i arasında bulunmaktadır.

Malzemelerin mekanik özelliklerini daha yüksek seviyelere çıkarılması için endüstride nitrürasyon, sementasyon, krom kaplama, borlama ve bilyalı dövme uygulamaları sıklıkla kullanılmaktadır. Kullanılan yöntemler arasında borlamanın çok iyi aşınma ve korozyon direncinin olması yanında aynı zamanda katı yağlayıcı görevi görmesi de diğer yöntemlere göre büyük avantaj sağlamaktadır.

Malzemenin mekanik özelliklerine etki eden yüzey pürüzsüzlüğü, sertlik, sıcaklık, ısıl işlem, talaşlı imalat, malzeme üzerinde oluşan kalıntı gerilmeler vb. gibi parametreler mevcuttur. Kalıntı gerilmelerin olumsuz yönlerinin yanında yorulma ömrüne olumlu yönde etki etmesi Bilyalı Dövme uygulaması kullanılarak malzemenin olumlu yönde etki etmesinin araştırılmasına kapı açmıştır.

Borlama işleminin geçmişi uzun yıllara dayanmaktadır. İlk kez bir çelikte borlama yöntemiyle yüzey sertleştirme işlemi Moissan tarafında 1895 yılında uygulanmıştır. Bu uygulama çalışmaları 1970 yılından itibaren hız kazanmıştır. Günümüzde

borlama işlemi teknolojik açıdan son derece gelişmiş ve kullanıldığı endüstride alternatif yüzey sertleştirme işlemleri arasında yerini almıştır.

Ülkemiz bor rezervlerinin % 70' ine sahip olup bor madeni bakımından oldukça zengindir. Çok sayıda bilim insanının "21. Yüzyılın petrolü" olarak adlandırdığı uzay sektörü, bilişim, metalurji, nükleer gibi kullanım alanı çok geniş olan bor madeninin stratejik açıdan ülkemize kattığı değerde çok yüksektir [31].

Yapmış olduğumuz bu çalışmada 4340 ıslah çeliği malzemesinin bilyalı dövme işlemi sonrasında 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda borla kaplanması işlemleri sonrası korozyon dayanımı incelenmiştir. Bilyalı dövme ve borlama yapılan bu malzemenin Mekanik özelliklerinin artması kullanım alanlarının genişlemesi ve aynı zamanda performans açısından muadillerine oranla artış sağlayacaktır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

#### 2.1. YÜZEY İŞLEMLERİ

##### 2.1.1. Isıl Yüzey İşlemleri

Endüstride kullanılan iş parçaları korozyona ve aşınmaya karşı dayanımı yüksek, sert ve tok olmalıdır. Bu şartları sağlayan iş parçalarını ısıl işlem uygulayarak elde etmek mümkün olmayabilir. Isıl işlem ile iş parçasında istenilen tokluğa ulaşılamayabilir. Korozyon ve aşınmanın daha fazla oluşacağı iş parçası yüzeyinin sertliğini artırmak, korozyonu ve aşınmasını azaltmak için yüzey sertleştirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Yüzey sertleştirme işlemi iş parçası yüzeyinin belli bir miktar derinliğine kadar yapılır. Parçanın orta kısmı kendi karakteristik özelliğini taşımaya devam etmektedir. Örnek olarak redüktör dişlileri, milleri vb. Korozyona ve aşınmaya maruz kalan iş parçalarında yüzey sertleştirme işlemleri kullanılır. Alevle ve indükasyonla yüzey ısıl işlemlerinde iş parçası yapısı bozulmazken, katı ve gaz karbürizasyon, gaz nitürasyon, gaz-karbo nitürasyon ve siyanürizasyon yüzey ısıl işlemlerinde iş parçası yapısı bozulmaktadır [1].

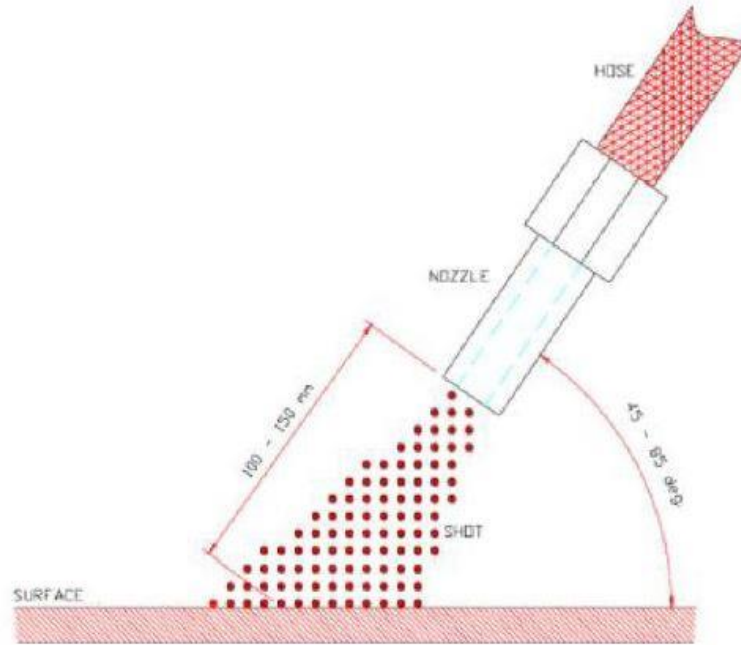
##### 2.1.2. Mekanik Yüzey İşlemleri

Sanayide uygulama alanlarında makina parçalarında oluşan arızaların bir çoğu malzeme yüzeyinde meydana gelmektedir. Bu sebeple iyileştirme amaçlı malzeme yüzeyinde mekanik yüzey sertleştirme işlemleri geliştirilmiştir. Yapılan mekanik yüzey sertleştirme sonucunda malzemenin aşınma, korozyon ve yorulma direncinin artması sağlanır. Çoğunlukla kullanılan mekanik yüzey sertleştirme işlemleri aşağıdaki gibidir [2].

- Bilyalı Dövme İşlemi
- Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi
- Lazer Dövme İşlemi
- Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu

### 2.1.2.1. Bilyalı Dövme İşlemi

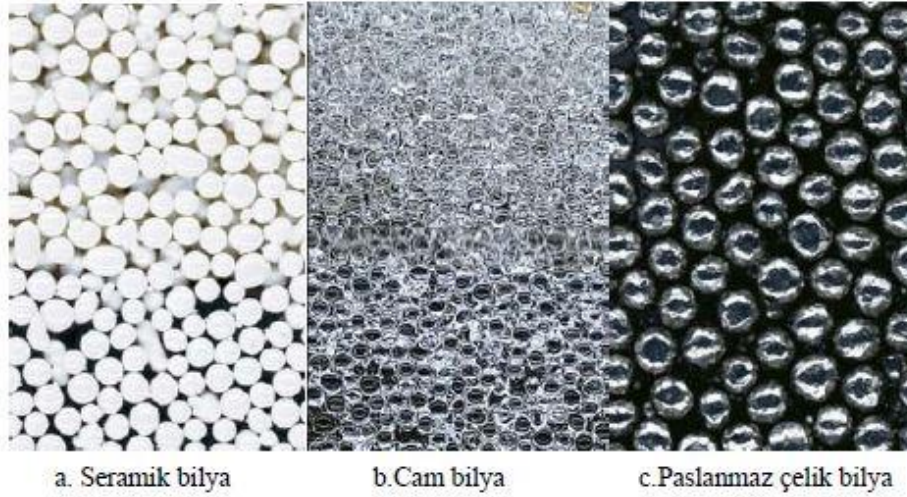
Daha çok metal parçaların yorulmaya karşı direnç artırımını sağlamak için kullanılan yöntemdir. Paslanmaz çelik, seramik veya cam malzemelerden oluşan bilyaların püskürtme veya fırlatma yoluyla metal yüzeyine uygulanmasıyla dövme işlemi gerçekleştirilir. Bilyanın malzeme üzerine çarpması sonucunda yüzeyde öncelikle bir çukur ve sonrasında da elastik bir bölge oluşur. Bilyanın çarptığı yüzeyden ayrılması sonucunda ise basma artık gerilme meydana gelir. Böylece yüeyde oluşacak çatlakların önüne geçilerek malzemenin yorulma ömrü iyileştirilmiş olacaktır. Bunun yanında yüzey pürüzsüzlüğü de hissedilir derecede artacaktır [3]. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi Şekil 2.1’ de görüldüğü gibidir.



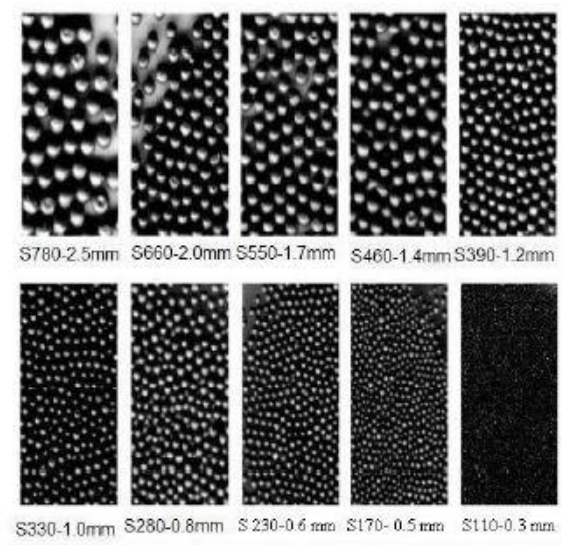
Şekil 2.1. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi [3].

## Bilyalı Dövme Parametreleri ve Uygulama Alanları

Dövme işlemi uygulamalarında kullanılan paslanmaz çelik, cam ve seramik bilyaların resimleri Şekil 2.2' de görüldüğü gibidir. Uygulamalarda kullanılan bu bilyalar belirli standartlara göre değerler almaktadır. Bilya çaplarının belirlenmesi dövme şiddetine göre değişiklik gösterir. Dövme işleminde kinetik enerjinin oluşmasında kütlenin doğrudan etkisinin olması sebebiyle bilya çapının belirlenmesi önemli bir etkidir. Aynı şekilde bilyalar büyüklüklerine göre de Şekil 2.3' de görüleceği üzere sınıflandırılmışlardır [4].



Şekil 2.2. Farklı tip bilya resimleri [5].



Şekil 2.3. Uygulama yapılan bilyaların çaplarına göre sınıflandırılması [6].

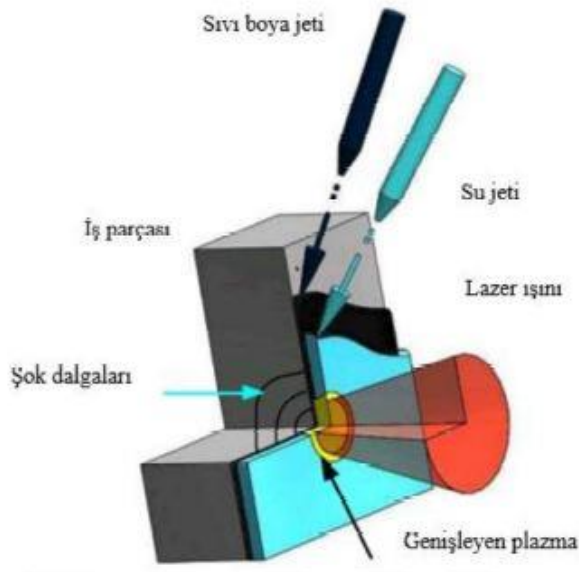
Endüstride birçok alanda uygulaması tercih edilen bilyalı dövme işleminin uygulama alanlarından bazıları; otomotiv, havacılık, enerji sektörlerinde türbin, kompresör, kanat, mil, yay, aşınma plakaları vb. birçok alanda kullanılmaktadır [7].

### 2.1.2.2. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi

Aşırı Bilyalı Dövme işlemi geleneksel bilyalı dövme işleminin daha yüksek Almen şiddeti ile uygulanması olarak tanımlanır. Almen şiddeti ise kullanılacak havanın basıncı, uygulama yapılacak bilyanın boyutu ve dövme işleminin süresi göz önüne alınarak belirlenir. Bu işlem sonucunda dövme işleminin yapıldığı parça yüzeyinde ultra ince yada nanotaneli yapılar gözlenmektedir. Buda malzemenin yorulma dayanımının artmasına neden olmaktadır [8].

### 2.1.2.3. Lazer Dövme İşlemi

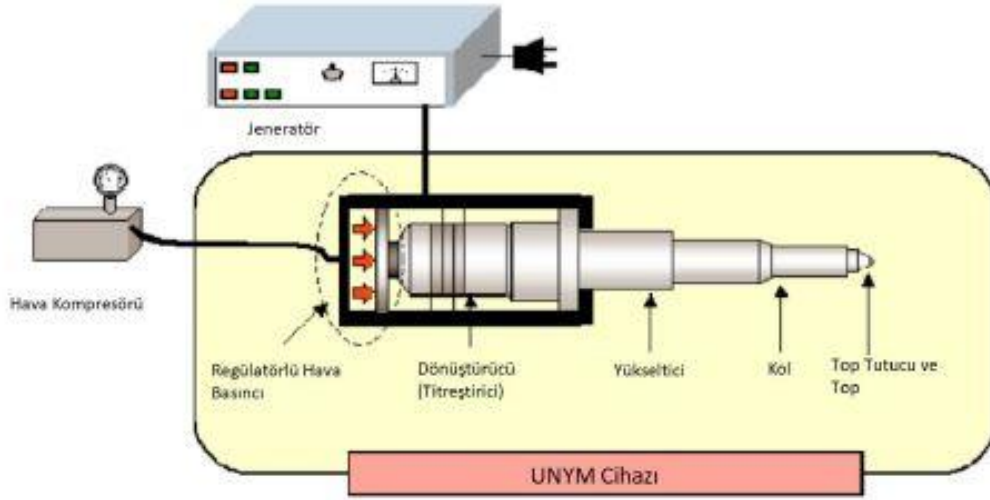
Bu yöntem lazerin meydana getirdiği şok dalgalarının malzeme üzerinde artık gerilme oluşturulması esasına dayanır. Klasik bilyalı dövme işlemine göre avantajı, malzeme yüzeyine temas olmamasından dolayı yüzey pürüzsüzlüğünün daha belirgin olmasını sağlar. Ayrıca bu işlemle daha karmaşık şekilli parçalarda kolaylıkla dövme işlemi yapılabilmektedir [9]. Şematik gösterimi Şekil 2.4' teki gibidir.



Şekil 2.4. Lazerle dövme işlemi şematik gösterimi [9].

#### 2.1.2.4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu

Bu yöntem metal ve alaşımlı malzeme yüzeylerinin iyileştirilmesinde ultrasonic enerjinin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Ekonomik bir yöntem olmasının yanında malzeme üzerine hassas etkinin oluşturulabilmesi, uygulamanın güvenli ve basit olması sebebiyle tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde malzeme yüzeyinde korozyon ve yorulma direncinin artırılması amaçlanır. Uygulandığı yüzeyde nano yapıları bir tabaka oluşturmaktadır. Boyutları 1-6 nm aralığında değişebilen, 20-40 kHz frekanslarında iş parçası yüzeyine yaklaşık olarak saniyede 20000 kadar darbe yapılarak uygulanır. UNYM şematik gösterimi Şekil 2.5' teki gibidir [10].



Şekil 2.5. UNYM şematik gösterimi [10].

## 2.2. BORLAMA

Borlama Moissan tarafından ilk kez 1895 yılında ortaya çıkarılmıştır. Metallerin tribolojik ve mekanik özelliklerini artırmak için uygulanan bir yüzey işlemidir. Borlama işlemi uygulanan yüzeyde tek ( $Fe_2B$ ) ya da çok fazlı ( $Fe_2B+FeB$ ) tabakalar oluşmaktadır. Uygulama yapılan metal yüzeyinde bor atomları ısı ve elektrik enerjisi ile etkileşim oluşturarak borür tabakası meydana getirir [11,12]. Bu işlem sonucunda malzemede sertlik, aşınma ve korozyon direnci yüksek düzeyde sağlanmış olur [13,14]. Borlama işleminin uygulama alanlarında alaşımlı ve alaşımsız çelikler,

demir/demir dışı metal ve alaşımları, dökme demir, paslanmaz ve takım çelikleri gibi birçok malzeme bulunmaktadır [15,16].

### 2.2.1. Bor Elementinin Özellikleri ve Kullanım Alanları

Periyodik tablonun III. grubunda, atom numarası, atom ağırlığı, ergime noktası ve çapı sırasıyla 5, 10.81 birim, 2400 °C ve 1.78 Å olarak bulunan elementtir. Bor ve bor bileşiklerinin sertlik değerleri Çizelge 2.1’ de bulunmaktadır [17,18].

Çizelge 2.1. Bor ve bor bileşiklerinin sertlik değerleri [18].

Malzeme	Mohs sertlik
Bor	9,3
Bor karbür	9,32
Bor nitrür	1,2
Elmas	10

Bor elmas elementinden sonra en sert elementtir. Isıya dayanıklılığı, kaynama ve ergime sıcaklığı yüksek bir elementtir. Elektrik iletkenliği 20°C’ ye kadar ısındıktan sonra artmaktadır. Sıcaklık 600°C’ ye kadar arttıkça elektrik iletkenli katsayısı da 100 kat artmaktadır [19].

Bor elementinin kullanım alanları Çizelge 2.2’ de gösterilmiştir.

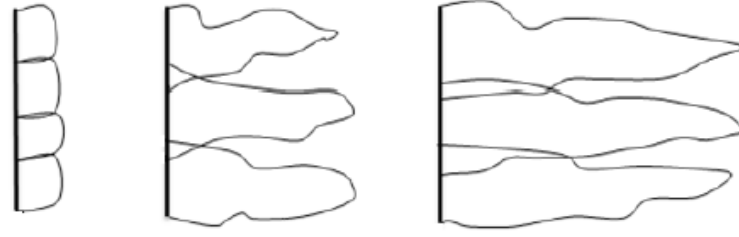


Çizelge 2.2. Bor elementi kullanım alanları [17].

Kullanım alanı	Kullanım
Savunma	Zırh sacları, namlular, plakalar.
Cam Sanayi	Bor alaşımlı camlar, elyaflar, otomotiv.
Enerji Sektörü	Türbinler, bor katkılı yakıtlar, enerji depolayıcıları.
Kimya Sanayi	Kimyasal indirgeyiciler, ilaçlar, çözeltiler, boya çeşitleri yapıştırıcı ve korozyona karşı önleyici.
Makine Sanayi	Aşındırıcı malzemeler, kompozit, tok, titreşim absorbe eden malzemeler, yağlayıcılar ve contalar.
Nükleer Sanayi	Nükleer atıkların depolanması, nükleer sanayide güvenlik amaçlı.
Metalurji	Kaplama malzemesi, refrakter tuğlalar, aşınma ve sürtünme dayanımı yüksek malzemeler, elektrotler, briket, lehim, döküm malzemeler ve kesici takımları.

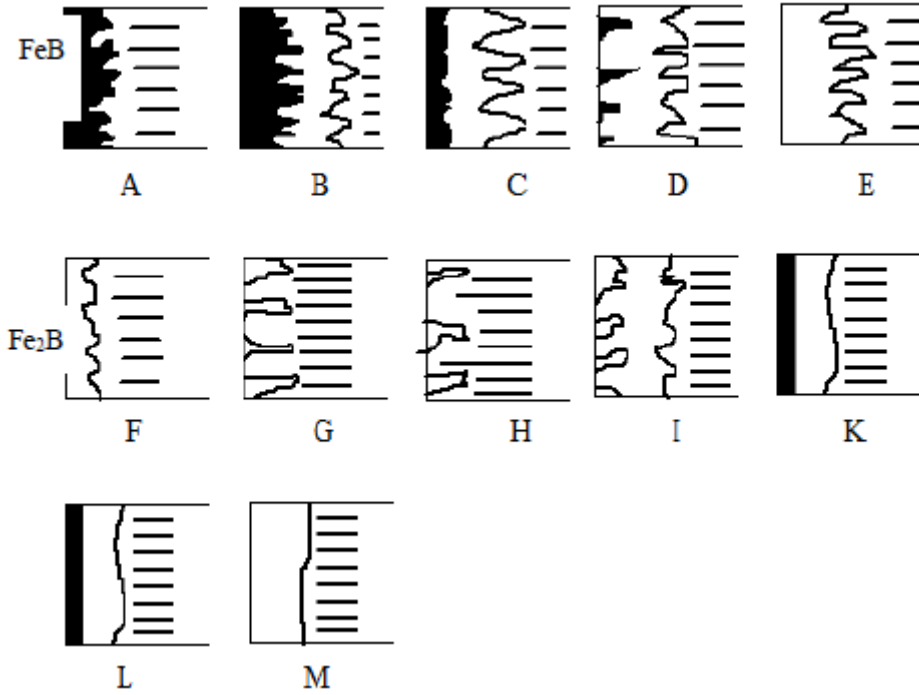
### 2.2.2. Borür Tabakası Özellikleri

Borlama işleminin en başında yüzey ile ortam arasında bir etkileşim meydana gelir. Bu etkileşim sonucunda yüzeyde çekirdeklenme oluşmaktadır. Oluşan çekirdek yapı bir müddet sonra borür tabakası şeklinde malzemenin iç bölgelerine kadar nüfuz eder. Tabakanın dış yüzeyinde FeB bulunurken alt kısmında ise Fe<sub>2</sub>B bileşenleri oluşur.



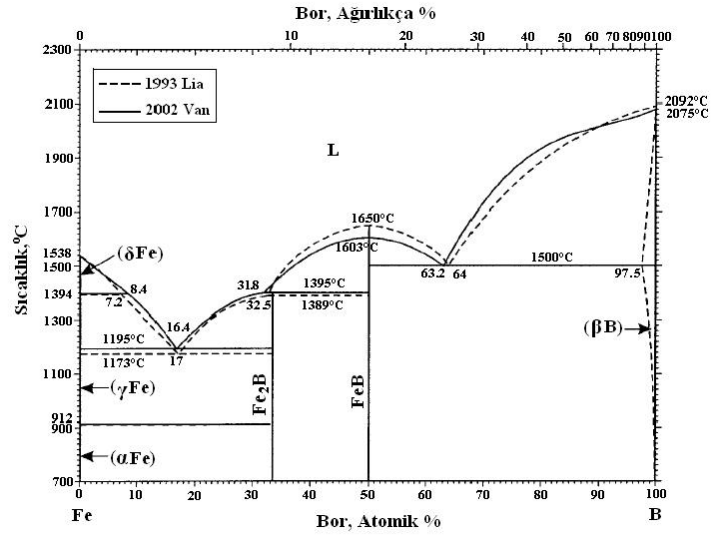
Şekil 2.6. Borür yapısının işlem sırasındaki gelişimi [20].

Malzeme üzerinde oluşan borür tabakasını etkileyen parametreler, uygulama yapılan toz bileşimi, borlama yapılan malzemenin özellikleri, borlamanın yapıldığı ortam şartlarıdır. Bu parametrelere bağlı olarak borür tabakasının yapısı düz şekilde veya parmaksı yapıda olabilir. Farklı yöntemlerle elde edilen borür yapılar Şekil 2.7’ de görüldüğü gibidir.



Şekil 2.7. Farklı türde oluşan borür tabakalarının yapıları [20].

Teorik bilgilere göre borür yapısının kalınlığı sınırsız olarak kabul görmektedir. Borür tabakası kalınlığını etkileyen parameter borlama işleminde geçen süre ve sıcaklıktır. İşlem esnasında kullanılması gereken sıcaklık ise demir bor denge diyagramından belirlenmekte olup, 1149 °C sıcaklığının üstüne çıkmaması gerekmektedir. Demir bor denge diyagramı Şekil 2.8’ de verilmiştir.



Şekil 2.8. Fe-B ikili denge diyagramı [21].

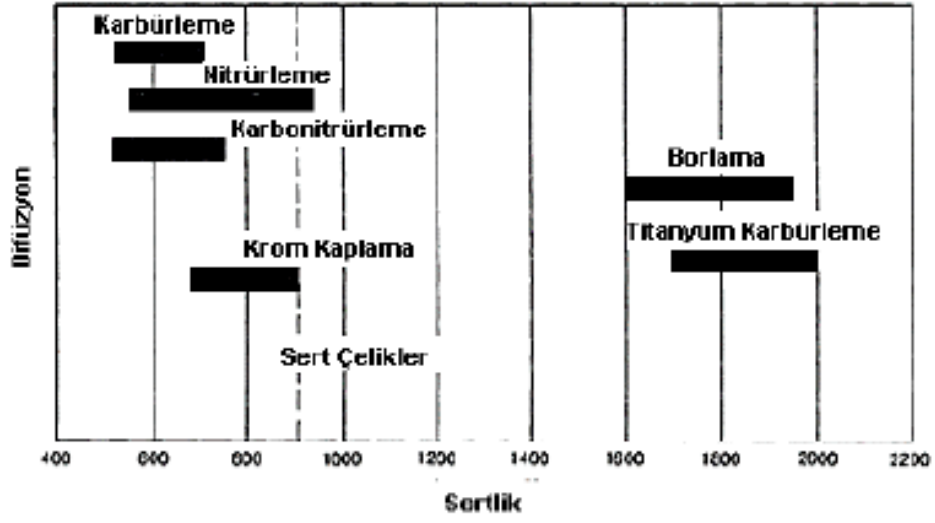
Borlama işleminin gerçekleştirilmesindeki en önemli sebep malzemede oluşturduğu sertlik, korozyon ve aşınma dayanımıdır. Borlama işlemi malzeme yüzeyindeki sertliği 2000-3000 HV değerleri aralığını sağlarken aynı zamanda korozyon ve aşınma katsayısında önemli oranda düşürmektedir [20].

### 2.2.3. Borlama İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

#### 2.2.3.1. Borlama İşleminin Avantajları

Borlanma sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakası, yüzeyinde sertleştirme yapılan malzemelere göre çok daha fazla avantaj sağlamaktadır. Borlanmış yüzeyin en büyük avantajı yüksek sertlik ve yüksek ergime sıcaklığının elde edilmesidir. Diğer metodlarla sertleştirilmiş malzemeler ile borlanmış malzemelerin yüzey sertliklerini gösteren veriler Çizelge 2.3' te görüldüğü gibidir. Tablo incelendiğinde borlanmış malzemenin yüzey sertliğinin diğer yöntemlerle sertleştirme uygulanan malzemelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun yanında tungsten karbürle hemen hemen aynı sertlikte olduğu da gözlenmiştir [22].

Çizelge 2.3. Çeşitli yöntemlerle yüzeyleri sertleştirilen malzemelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması [22].



### 2.2.3.2. Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işlemi diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre daha maliyetli ve süre bakımından daha zaman alıcı bir yöntemdir.

Çizelge 2.4' te borlama işlemlerinin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Borlama işleminin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması [23].

Borlama İşleminin Avantajları	Borlama İşleminin Dezavantajları
Borlama ısı işlemleri sonrasında elde edilen borür tabakalarının çok yüksek sertlik değerlerinde ve yüksek ergime noktalarına sahip olması.	Borlama yüzey sertleştirme işlemlerinden gaz karbürleme ve plazma nitrürleme gibi termokimyasal yüzey işlemlerine göre daha pahalıdır.
Düşük sürtünme katsayılarından dolayı abrasiv aşınmaya karşı çok dirençlidirler.	Kutu borlama da yüzey tabakası homojen olmamaktadır. Plazma'da kullanılan yöntemde oldukça zehirli ve patlama riski de bulunmaktadır.
Korozyon direncine sahiptirler.	Sıvı borlamada tuz kalıntısını yüzeyden kaldırma işlemi de oldukça maliyetlidir.
Yorulma ömürleri korozif ortamlarda %25 artmıştır.	Gaz borlama yönteminde, ortam zehirli olması ile beraber patlama riski de taşımaktadır. Ayrıca tesisatı maliyetlidir.
Düzensiz, karmaşık şekilli, uniform ve istenen bölgelere borlama yapılabilir.	Borlama kaplamasını elmaslarla işlemek mümkün değildir. Çünkü kaplama tabaka yapısını bozup, çatlamalara ve kırılmalara neden olabilir

#### **2.2.4. Borlama Yöntemleri**

Borun malzeme üzerinde oluşturduğu tabaka, prosesin uygulandığı sıcaklık, malzeme özelliği ve proses boyunca geçen süreye bağlı olarak değişim göstermektedir. Borlama işleminin yapıldığı ortam katı, sıvı veya gaz şekillerinden herhangi birinde olabilir. Yüksek kaliteli yüzey ve kolaylık açısından kutu borlama yöntemi en çok tercih edilen yöntemdir [24].

Yöntem olarak en çok kullanılan borlama yöntemleri aşağıdaki gibidir.

- Kutu Borlama
- Pasta Borlama
- Sıvı Borlama
- Gaz Borlama
- Plazma Borlama

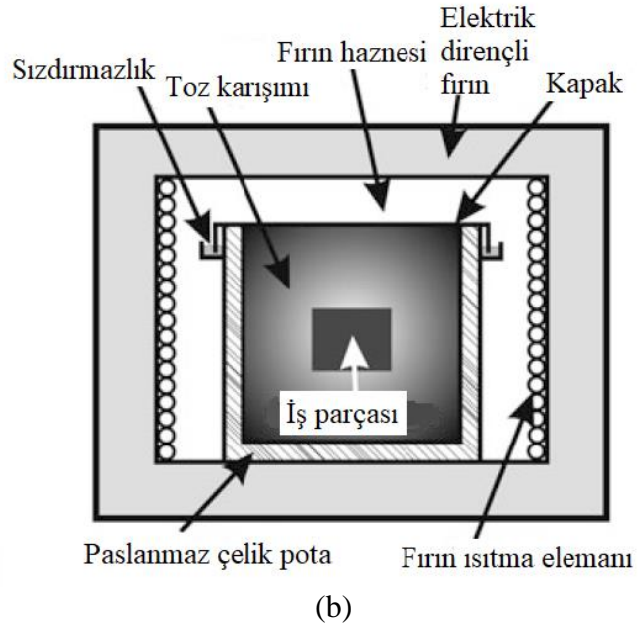
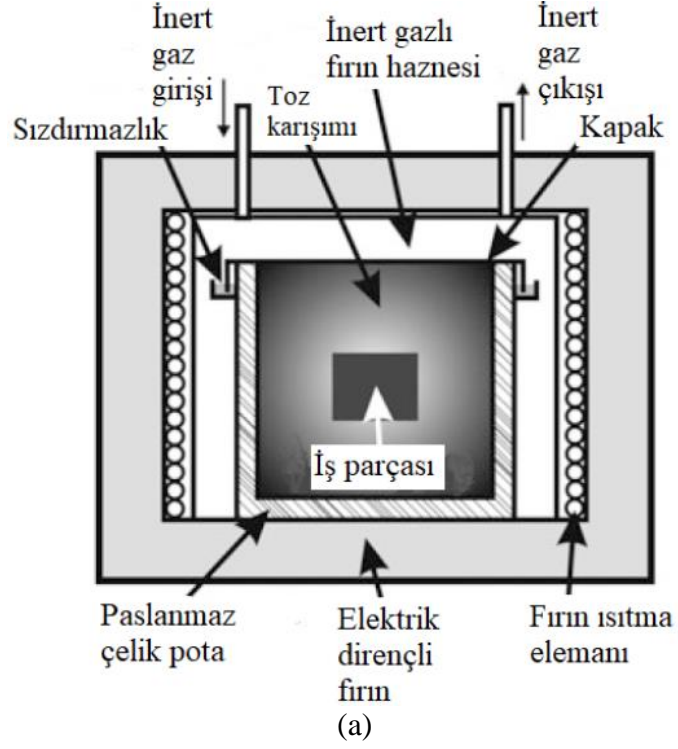
##### **2.2.4.1. Kutu Borlama**

Bu yöntemde uygulama yapılan ortamın fiziksel hali katıdır. Uygulama yönteminin karmaşık olmaması ve uygulama maliyetinin düşük olması sebebiyle oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Kutu borlama yönteminde uyarıcı madde ve çözücü içeren toz karışımı kullanılmaktadır.

Kutu borlama yönteminde kullanılan potaların özellikleri yüksek sıcaklık dayanımlı alumina, paslanmaz çelik veya alaşımsız çeliklerden imalatlarının yapılmış olmasıdır. Pota ebatlarının fırının iç hacminin en fazla %40 'ı olmalıdır. Borlama işlemi yapılacak malzeme potanın içerisine yerleştirilir. Potanın etrafı 10-20 mm borlama tozu ile doldurulmalıdır. Yöntemin atmosfer şartlarında uygulanması durumunda potanın ağzı tamamen kapatılarak sızdırmazlık sağlanmalıdır. İnert gaz ortamında gerçekleştirilen yöntemde ise herhangi bir sızdırmazlık sağlanmasına gerek duyulmamaktadır. Proses sıcaklığı ve süresi bazı parametrelere göre değişkenlik göstermekle beraber genel olarak 840 °C ile 1050 °C sıcaklıklar arasında

1-8 saat aralığında bir süre ile uygulanmaktadır. Sıcak ortam sonrası fırın haznesinden alınan potalar soğutulur [25].

Atmosfer şartlarında ve inert gaz ortamında gerçekleşen kutu borlama işlemleri ayrı ayrı Şekil 2.9(a) ve Şekil 2.9(b)' de gösterilmiştir.



Şekil 2.9. (a) İntert gaz ortamında gerçekleşen kutu borlama işlemi, (b) Atmosfer şartlarında gerçekleşen kutu borlama işlemi [25].

#### **2.2.4.2. Pasta Borlama**

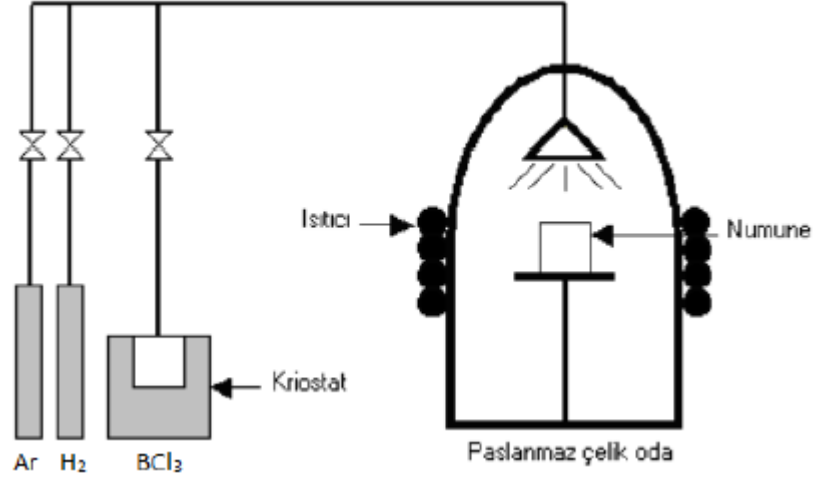
Bu yöntemde kutu borlamada kullanılan toz karışım bağlayıcı maddeyle yoğun bir kıvamda getirilir. Malzemenin gerekli yoğunluğa ulaştığı macun şeklini almasından anlaşılır. Bu macun borlamanın yapılacağı malzeme yüzeyine 2-5 mm aralığında uygulanır. Macunun sürüldüğü iş parçası kurumaya bırakılır. Kuruma sonrası belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılan fırına sürülür. Normal şartlarda 800 °C ile 1000 °C sıcaklıklarda 5 saat süreyle proses gerçekleştirilebilir. Bu yöntem sadece inert gain bulunduğu ortamlarda gerçekleştirilebilir. İner gaz dışında uygulama yapılan durumlarda istenilen kalitede borür tabakası sağlanamaz [26].

#### **2.2.4.3. Sıvı Borlama**

Bu yöntemin adı bor sağlayıcı ortamın sıvı olmasından gelmektedir. Borlayıcı olarak boraks ve boric asitten oluşan sıvılar kullanılmaktadır. Uygulama iş parçasının bor verici sıvıya 900-1100 °C sıcaklıkta ve 2-9 saat süreyle daldırılmasıyla gerçekleştirilir. Borlama işlemi elektrik akımı ile yapılıyorsa elektolizle borlama işlemi olarak adlandırılır. Bu yöntemin diğer yöntemlere göre uygulaması daha pahalı olması ve uygulama yapılan iş parçasının yüzeylerinde oluşan tuz tabakası gibi dezavantajları bulunmaktadır. Aynı zamanda uygulama sırasında ısı yayılımının her yerde eşit olmaması gibi durumla karşılaşırsa iş parçası yüzeyindeki borlanan kısımların kalınlıklarında da eşit bir şekilde dağılım olmamaktadır [27].

#### **2.2.4.4. Gaz Borlama**

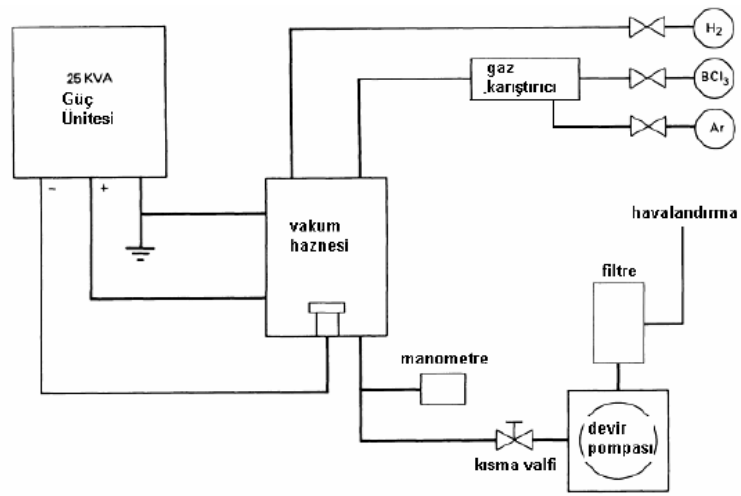
Bu yöntemde ortam gaz halindedir. Bor sağlayıcı olarak ortamda bor halojenleri, diboran B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ve organik bor bileşiklerinden yararlanılır. Uygulama esnasında iş parçası üzerine Ar ve H<sub>2</sub> gazları ve bor sağlayıcı gazın 700-950 °C sıcaklık aralığında 67 KPa (0,67 bar) basınçla gönderilmesiyle işlemin tamamlanması sağlanır. Şekil 2.10' da gaz borlama yönteminin uygulanma şekli bulunmaktadır [28].



Şekil 2.10. Gaz borlama şematik gösterimi [29].

#### 2.2.4.5. Plazma Borlama

Bor sağlayıcı olarak Ar, H<sub>2</sub> gazlarına ilaveten BCl<sub>3</sub>, B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, BF<sub>3</sub> veya B(OCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> (trimetilborat) gazlarının 800-1000 °C sıcaklık aralığında, 2-10 Pa basınçta plazma ortamında gerçekleştirilen bir yöntemdir. Enerji verimliliği ve iş parçası üzerinde oluşabilecek deformasyonların az olması sebebiyle avantajlı, pahalı ve kullanılan bir çeşit gazların zararlı olması yönünden dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Şekil 2.11' de gaz borlama yönteminin uygulanma şekli bulunmaktadır [24].



Şekil 2.11. Gaz borlama şematik gösterimi [30].



## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE METOT

#### 3.1. MALZEME

Yapılan çalışmada kullanılan endüstride makina, motor, miller, akslar, pistonlar, dişliler gibi çok geniş kullanım alanlarına sahip olan 4340 ıslah çeliğinin standart gösterimleri Çizelge 3.1' de, kimyasal bileşimleri ise Çizelge 3.2' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. 4340 Islah çeliği standartları.

DIN	AISI/SAE	EN
1.6582	4340	34CrNiMo6

Çizelge 3.2. 4340 Islah çeliği kimyasal bileşimi (%).

C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	Ni	V
0,30-0,38	0,15-0,40	0,40-0,70	0,035	0,035	1,40-1,70	0,15-0,30	1,40-1,70	-

#### 3.2. BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN UYGULANMASI

Bilyalı dövme işleminin uygulandığı numuneler 20 mm çapında ve 6 mm kalınlığında parçalar haline getirilerek farklı tip bilyalı dövme işlemini uygulanmıştır. Havalı tip Peenmatic 2000S bilyalı dövme makinesi kullanılarak yapılan bilyalı dövme işleminde Almen yoğunlukları A12, A18 ve A24 olan bilyalar kullanılmıştır. Bilyalı dövme işlemi uygulanarak belirlenen Almen yoğunluklarına ulaşılmıştır. Almen yoğunlukları, şeritlerde bulunan arkın yüksekliği ile bağlantılıdır. Bilyalı dövme ile ilgili parametreler Çizelge 3.3' te görülmektedir.

Çizelge 3.3. Belirlenen Almen yoğunlukları için ark yüksekliği ve bilyalı dövme parametreleri.

Almen Yoğunluğu	Bilya Buyutu	Doyurma Oranı	Süre (s)	Hava Basıncı (psi)	Ark Yüksekliği (mm)
A12	S230	200%	10	30	0,14
A18	S230	200%	15	60	0,25
A24	S230	200%	20	70	0,35

Bilyalı dövme işleminin yapıldığı numuneler enine kesitler halinde kesilmiş olup farklı derecelerde zımpara kağıtları ile zımparalanmıştır. 6 µm boyutunda elmas pasta ile parlatılan numuneler 90 saniye %3 Nital solüsyon ile dağlama işlemine tabi tutulmuştur.

### 3.3. BORLAMA İŞLEMİNİN UYGULANMASI

4340 kalite malzemeler Şekil 3.1' de görüldüğü gibi belirli ölçülerde kesilerek numuneler borlama için hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.2'de görülen silindirik çelik kutu içerisine Ekabor 2 bor tozu ilave edilerek numuneler bor tozu içerisine gömülmüştür.

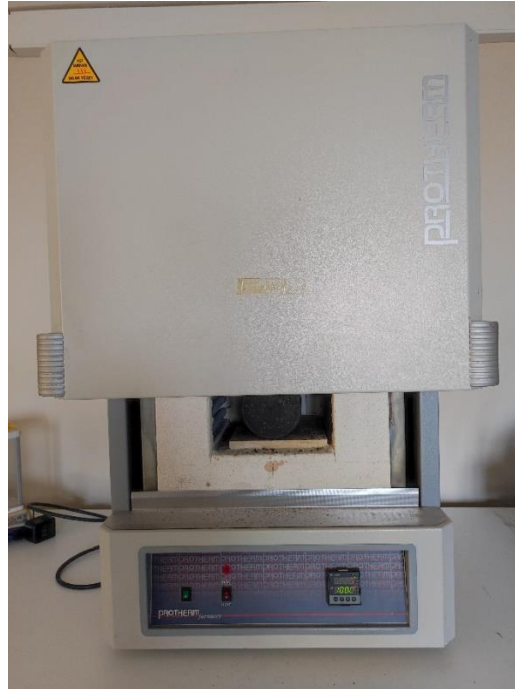


Şekil 3.1. 4340 numune malzemeler.



Şekil 3.2. Silindirik çelik kutu.

Katalizör görevi görmesi amacıyla bor oksit ( $B_2O_3$ ) kullanılmıştır. Bartın Üniversitesi Makine Laboratuvarında Şekil 3.3' te görülen Protherm 120/5 fırınında 850-950-1050 °C sıcaklıklarda 6-8-10 saatlik bir süre boyunca kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.3. Borlama işleminde kullanılan ısıtım fırını.

### **3.4. TARAMALI ELEKTRON MIKROSKOP (SEM) ANALIZI**

İşlem yapılan numunelerin mikroyapılarının incelenmesinde taramalı electron mikroskobu (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini FESEM) kullanılmıştır. Öncelikle borlama yapılan numune parçalardan 2,5 kx büyütme ile incelenmek üzere görüntüler alınmıştır. Alınan görüntüler sonucunda borür tabaka kalınlığı ölçülmüştür. Yapılan korozyon deneyleri sonrasında 2-7 kx büyütme ile yeni görüntüler alınmış ve korozyonun miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

### **3.5. X IŞINLARI DIFRAKSİYON (XRD) ANALIZI**

Kaplama yapılan numunelerde kaplama alaşımlarının ortaya çıkarılması için X Işınları Difraksiyonu (XRD) ölçümleri Cu K $\alpha$  radyasyonu (Rigaku Ultima IV) ile birlikte yapılmıştır. XRD Analizi ile borür tabakasının hangi fazlardan meydana geldiği ortaya çıkarılmıştır.

### **3.6. MİKRO-SERTLİK ÖLÇÜMLERİ**

Ölçümler borlanmış numunelerin mekanik karakterizasyonunu belirlemek amacıyla numunelerin merkez bölgesine Qness marka Vickers test cihazında 30  $\mu$ m aralıklarda 20 sn sürede 100 gr yükte 8 farklı bölgeden uygulanmıştır.

### **3.7. OPTİK GÖRÜNTÜ ANALİZİ**

Optik görüntü analizi 850 °C, 950 °C ve 1050 °C de 4 saat süre ile kutu borlama yöntemiyle borla kaplanan 4340 ıslah çeliğinin optik mikroskop görüntüleri LEICA DM750 marka optik mikroskopta 5 farklı bölgeden farklı yakınlaştırmalar kullanılarak yapılmıştır.

### **3.8. KOROZYON DENEYİ**

Potansiyodinamik polarizasyon testleri ağırlıkça %3,5 NaCl ortamında gerçekleştirilmiştir. Numuneler daha iyi izole edilmiş elektrik iletkenliği için epoksi

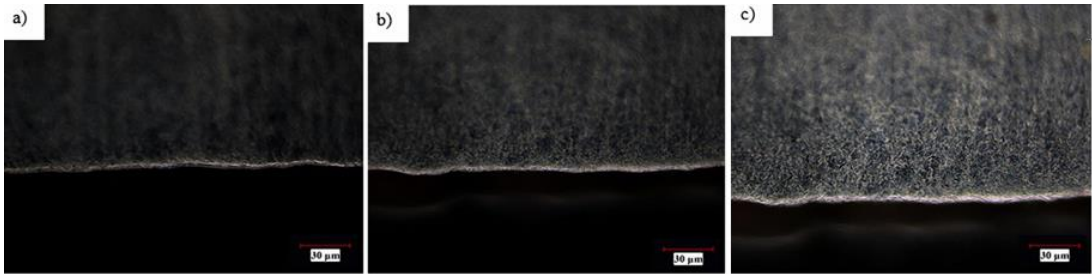
reçineli bir bakır çubuk üzerine yerleştirilmiştir. Elektrokimyasal ölçümler, oda sıcaklığında bir Parstat 4000 potansiyostat/galvanostat kullanılarak yapılmıştır. Doymuş kalomel içeren bir referans elektrot seçilmiş olup -1000 mV ila 1000 mV arasındaki potansiyel, 1 mV/s'lik bir tarama hızında 30 dakikalık bir süre boyunca açık devre potansiyelleri ile değerlendirilmiştir.

## BÖLÜM 4

### DENEY SONUÇLARI

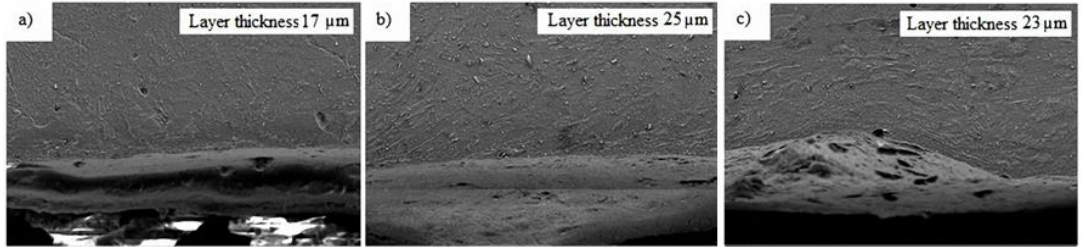
#### 4.1. İÇ YAPI İNCELEMELERİ

Farklı tiplerde bilyalı dövme işlemlerinin yapıldığı numuneleri karşılaştırmak için optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. A12, A18 ve A24 Almen şiddetinde bilyalı dövme işleminin yapıldığı numunelerin mikroyapıları sırasıyla Şekil 4.1a, b ve c de görüldüğü gibidir. Şekil 4.1a'da yüzeyin düzgün ve plastik deformasyonun olduğu tabakanın daha ince olduğu görülmektedir. Optik mikroskopla yeterli büyütmenin mümkün olmaması ve bulanık görünmesi nedeniyle ultra ince taneli katman kalınlıkları net olarak belirlenememiştir. Literatürde mikroskopların karanlık alan görüntü işlenmesi, tane sınırlarının belirlenmesini ve karakterize edilmesini sağlar. Şekil 4.1 bilyalı dövme işleminin yapıldığı numunelerin karanlık alan dijital mikroskop görüntülerini (kontrast görüntü) göstermektedir. Bilyalı dövme işleminin uygulandığı numunelerin karanlık alan görüntüsü, çok fazla sayıda dengesiz tane sınırı varlığından dolayı ultra ince taneli tabakayı ve kaba iç kısmı çok etkili bir şekilde ayırt edilmektedir. Görüntü, büyük denge dışı tane sınırlarının oluşumunu ve bilyalı dövme (plastik deformasyon oranı) artışıyla tabaka kalınlığının arttığını göstermektedir.



Şekil 4.1. Bilyalı dövme işleminin yapıldığı numunelerin mikroyapıları.

Şekil 4.2' de görüntüler farklı tip bilyalarla dövülmüş numunelerin yeterli büyütme ve ayrıntılı analiz yoluyla deforme olmuş ultra ince tane yapısının kalınlığını içermektedir. Almen yoğunluğu artışına paralel tabaka kalınlığının arttığı da görüntülerden ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.2a' da A12 Almen yoğunluklu bilya ile dövülen numunede deforme olmuş katman kalınlığı yaklaşık 17  $\mu\text{m}$ 'dir. Diğer koşullarda (Şekil 4.2b, c) katman kalınlığı 25  $\mu\text{m}$ ' ye kadar yükseldiği görülmektedir.

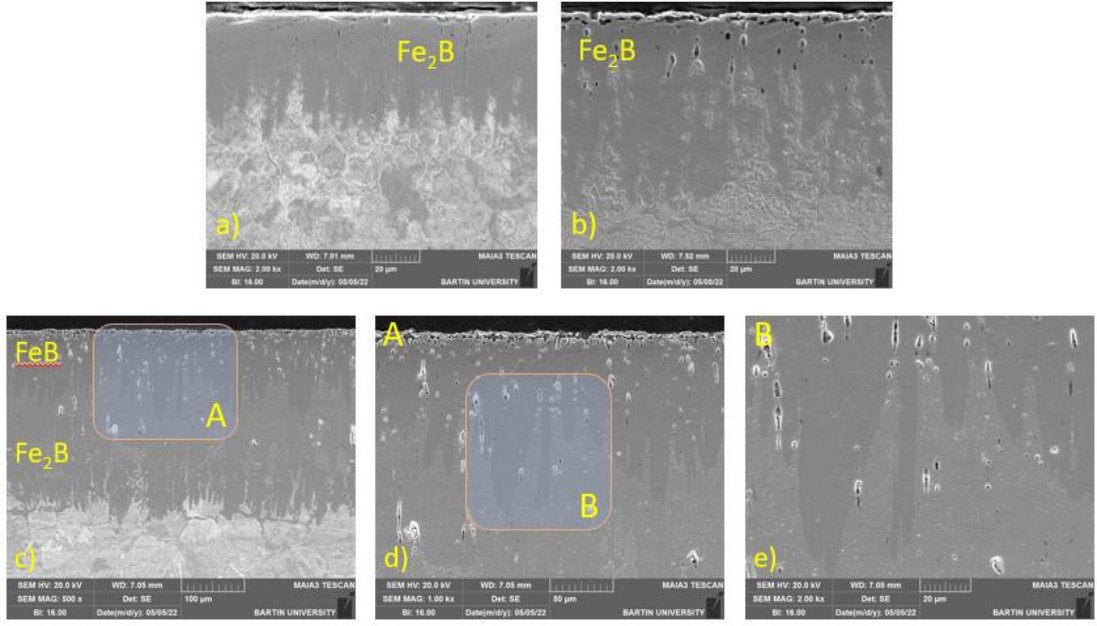


Şekil 4.2. Farklı tip dövülen numunelerin ultra ince tane yapılarının kalınlıkları.

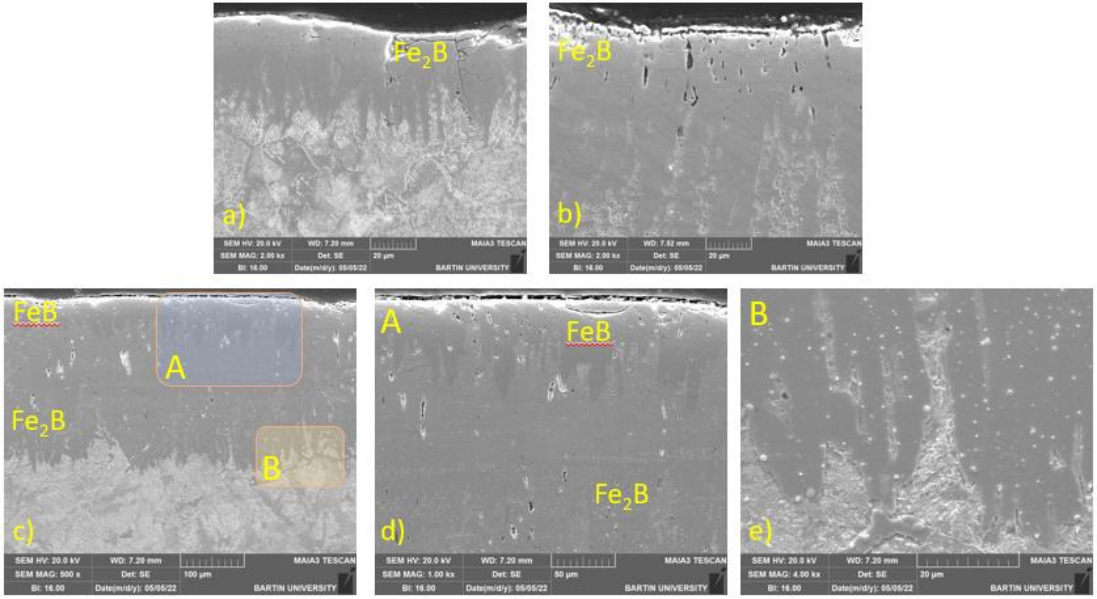
Yolcu 2018 yılında metal matrisli kompozitlerin bilyalı dövme ve ultrasonik dövme yöntemleri ile dövülerek yüzey özelliklerinin incelenmesi için yapmış olduğu çalışmada dövme sonrası elde edilen numunelerin mikro yapılarını ve tane yapılarını incelemiştir. Bilyalı dövme işleminde numune üzerindeki darbelerin bilya şekline benzediğini gözlemlenmiş ve SiC takviyesinin artışı ile partikül oluşumlarının, pürüzlülüğün ve porozitenin arttığı görülmüştür [9].

#### 4.2. BORÜR TABAKASININ KALINLIKLARI

Bor atomları ve baz malzemenin etkileşime girmesiyle borür tabaka meydana gelmektedir. Borür tabakada malzemenin türüne göre fazlar farklılık gösterebilir. Bu tabakalar tek faz ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) veya çift fazlı ( $\text{FeB}$  ve  $\text{Fe}_2\text{B}$ ) olarak karşımıza çıkmaktadır. 850, 950 ve 1050  $^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda 4 saat boyunca borlanmış numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' de görüldüğü gibidir. İşlem görmeyen malzemedeki  $\text{Fe}_2\text{B}$ , A12 şiddetinde bilya ile dövülmüş malzemedeki  $\text{FeB}$  -  $\text{Fe}_2\text{B}$  katmanlarının oluştuğu gözlenmektedir. Dövme şiddetine bağlı olarak bor nüfuziyetinin ve faz oluşumunun değişiklik gösterdiği gözlemlenmektedir.

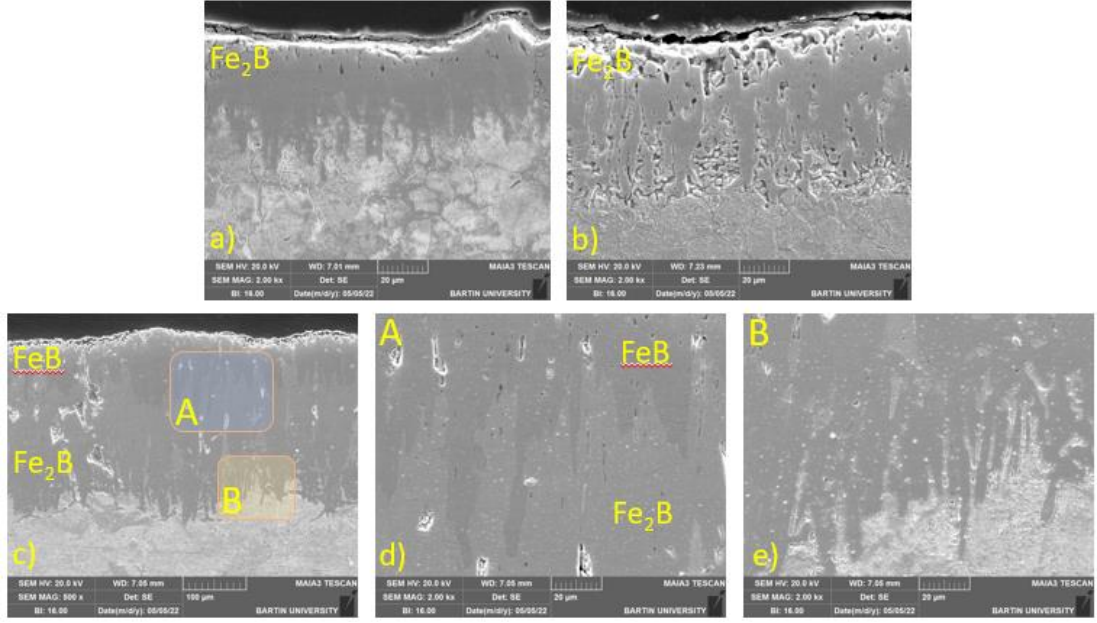


Şekil 4.3. Bilyalı dövülmemiş borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı.

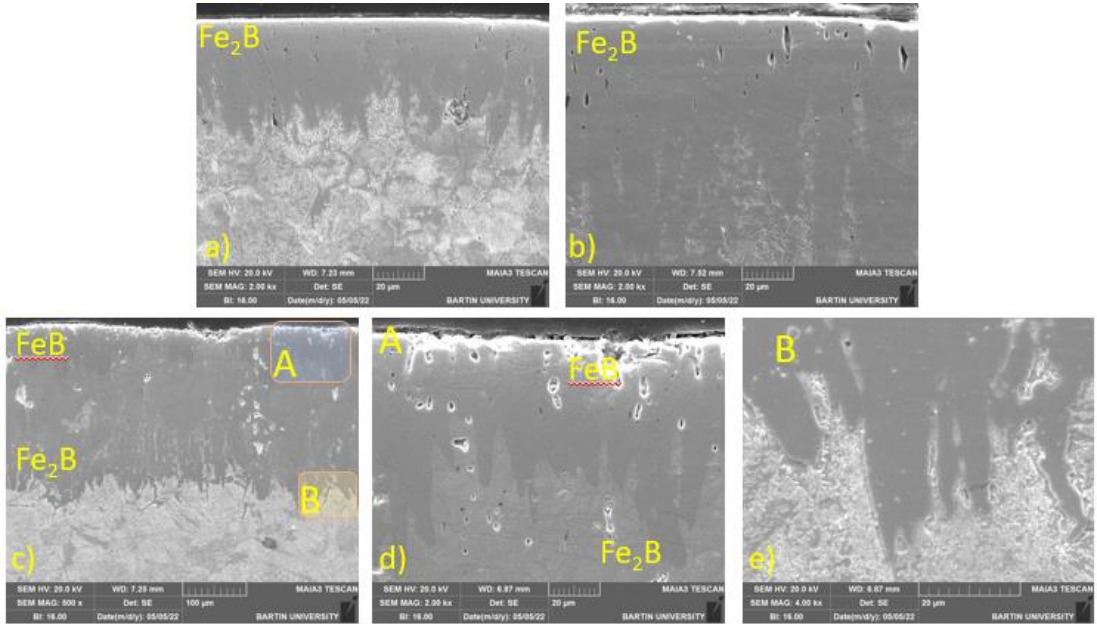


Şekil 4.4. A12 şiddetinde bilya ile dövülmüş sonrasında borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı.

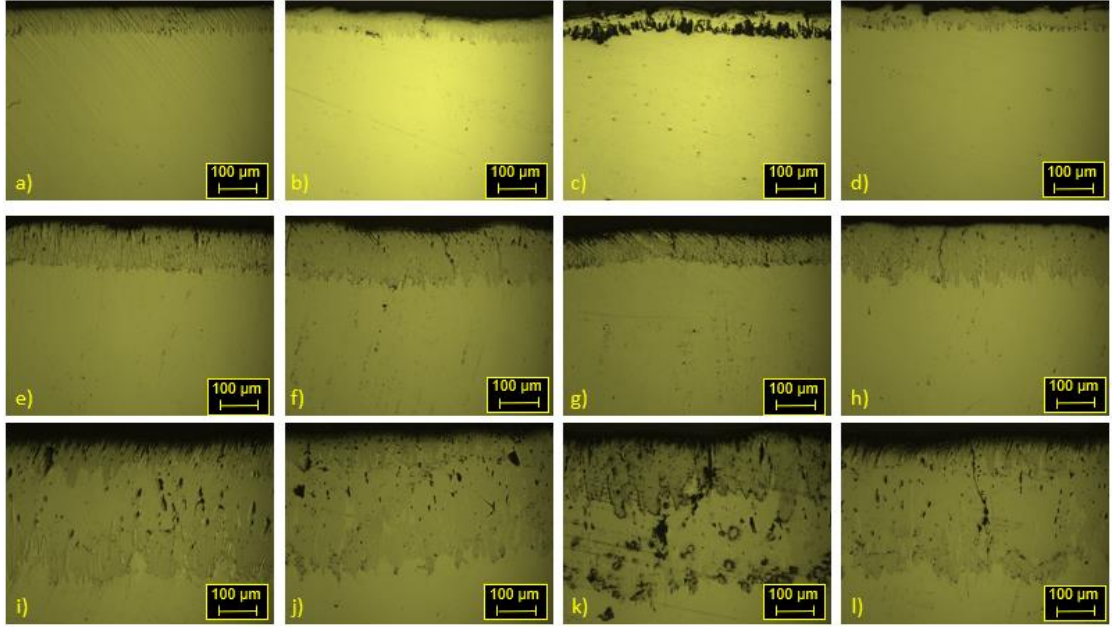




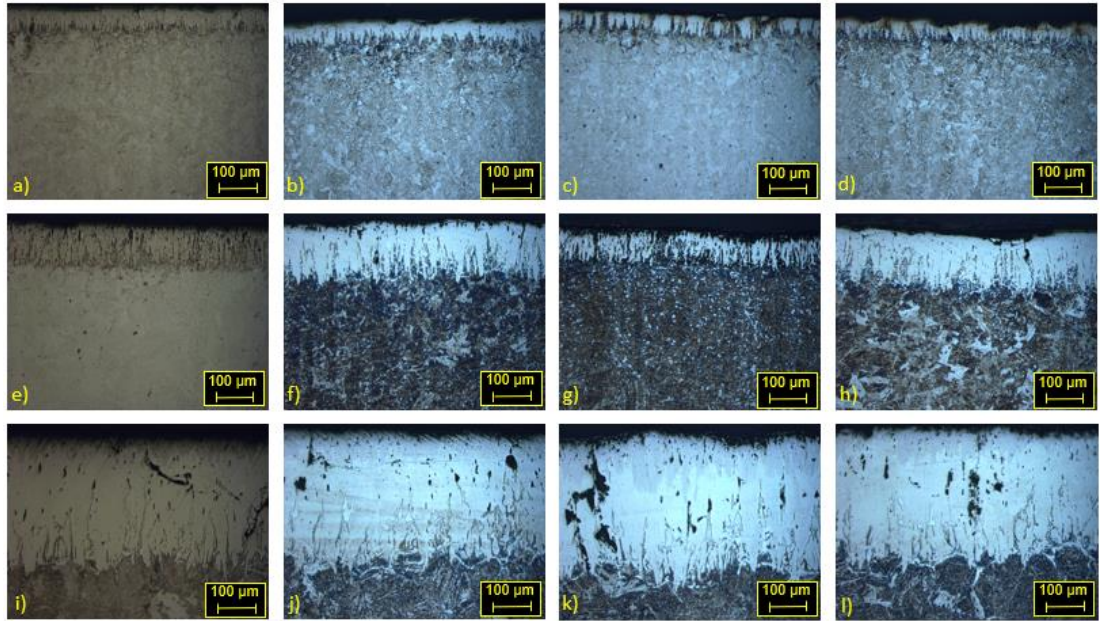
Şekil 4.5. A18 şiddetinde bilya ile dövülmüş sonrasında borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı.



Şekil 4.6. A24 şiddetinde bilya ile dövülmüş sonrasında borlanmış 4340 ıslah çeliğinin iç yapısı.



Şekil 4.7. 4340 ıslah çeliğinin işlem görmemiş ve farklı bilya tipleriyle dövülmüş numunelerin borlama işlemi sonrası dağlama yapılmamış hallerinin iç yapıları.



Şekil 4.8. 4340 ıslah çeliğinin işlem görmemiş ve farklı bilya tipleriyle dövülmüş numunelerin borlama işlemi sonrası dağlama yapılmış hallerinin iç yapıları.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' de işlenmemiş, A12, A18 ve A24 Almen yoğunluklu bilyalarla dövülmüş numunelerin 850, 950 ve 1050 ° C sıcaklıklarda 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan numunelerin dağlama öncesi ve dağlama sonrası iç

yapıları görülmektedir. 1050 °C’de 4 saat sürede borlama işleminin uygulanması sonucu yüzeyde yaklaşık 40 µm’lik bir kaplama kalınlığı oluştuğu gözlemlenmektedir. Kaplamaların görüntüleri dış tarağı şeklindedir. Dövme işleminin uygulanmadığı numunede yüzeyde oluşan kaplamanın daha düzgün homojen biçimde olduğu görülmektedir. Şekil 4.7.b’ de A12 şiddetinde yapılan bilyalı dövme uygulamasında kalınlaşmış dış tarafları ve homojenliğin dışına çıkan siyah renkli çökelti şeklinde birikintiler oluşmuştur. Görülen bu yapıda dislokasyon yoğunluğunun artması yüzeyde oluşan deformasyon sonrası çatlakların oluştuğu görülmüştür. Difüzyonun kusurlu bölgelerde daha hızlı oluştuğu bilyalı dövme işlemi ile ilişkilendirilebilir. Yüksek büyütmelelerde deformasyon yönü, borlama dış tarafları ve difüzyon yönlerinin değiştiği gözlemlenmektedir. Bilyalı dövme şiddetinin artması ile bor kaplama kalınlıkları arasında belirgin bir değişiklik gözlenmektedir. Kaplama kademelerinin arttığıda gözlenmiştir. Bu durum malzemelerin mekanik özelliklerini borlama öncesine göre önemli derecede arttıracığı öngörülmektedir.

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 incelendiğinde kaplama tabakasında görülen değerlerin birbirlerini doğruladığı açıkça görülmektedir. Borlama tabakasının gelişimi alaşım elementlerinin artışıyla olumsuz etkilendiği gözlenmiştir. Borlama tabakasının en yüksek görüldüğü kısım 1050 °C’ de 4 saatte borlama işlemine tabi tutulan numunede olduğu görülmektedir.

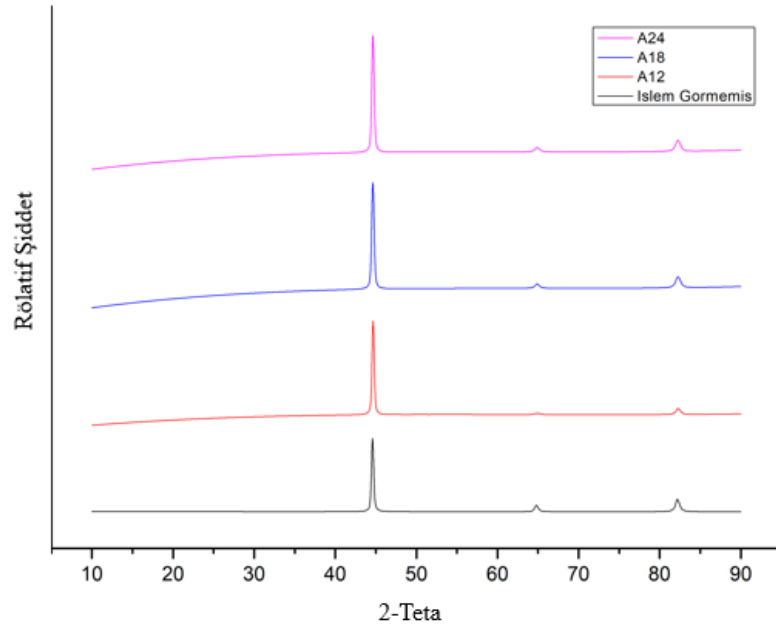
Sarı 2019 yılında sementasyon çeliğinin kutu borlama yöntemiyle kaplanması mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması konusunda yapmış olduğu çalışmada borlama işlemi sonrasında oluşan kaplama morfolojisi ve kalınlıklarını incelemek amacıyla SEM cihazını kullanarak incelemelerini yapmıştır. Yapılan çalışmada oluşan bor tabakasının kalınlıkları incelendiğinde 850 °C de 6 saat uygulanan numunede kalınlığın 47.50 µm, 8 saatte 52.27 µm ve 10 saatte 51.51 µm olduğu görülmüştür. Bu sonuçlardan yola çıkarak meydana gelen borür tabakasının artması borlama süresinin uzunluğu ile paralellik gösterdiği tespit edilmiştir [22].

Ünal 2013 yılında küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ile ilgili yapmış olduğu çalışmada 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 1,2 ve 4 saatlik sürelerde borlama işlemlerini gerçekleştirmiştir. Borlama işleminin yapıldığı sıcaklık ve sürenin artmış olması bor tabakası kalınlığının artmasına sebebiyet verdiğini tespit etmiştir [24].

Arslan 2020 yılında borlanmış AISI 304L çeliğinin yüzey karakterizasyonu ve mekanik özelliklerinin incelenmesi için yapmış olduğu çalışmada farklı sıcaklıklarda farklı sürelerde borlama işleminin yapıldığı numuneleri optik mikroskop ile farklı boyutlarda incelemiştir. Yapmış olduğu incelemede sıcaklık ve sürelerin borür tabakası üzerinde FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarının oluştuğunu görülmüştür. 850 °C’de 2 ve 4 saat süreyle borlanmış numunelerde çift faz oluşumu neredeyse görülmemiş, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda farklı sürelerde borlanan numunelerin tamamında çift faz oluşumu görülmüştür. Borür tabakasının kalınlığının sıcaklıkla ve uygulanan süreyle artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada tespit edilen bu sonuç yapmış olduğumuz çalışma ile benzerlik göstermektedir [32].

#### **4.3. X IŞINLARI DIFRAKSİYON (XRD) SONUÇLARI**

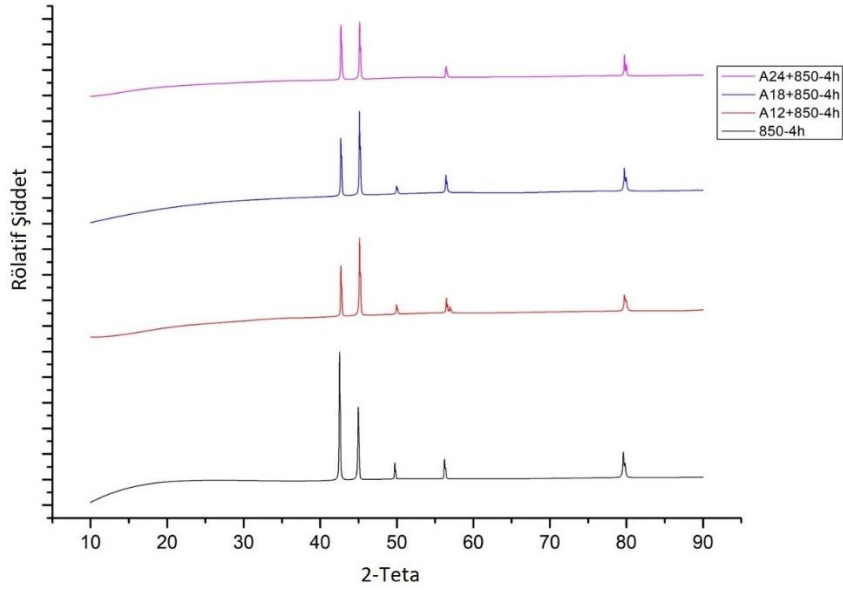
Bilyalı dövülmüş numunelerin Xrd incelemelerinde AISI 4340 ıslah çeliği için standart demir pikleri izlenmiştir. İşlem görmemiş numunede pik yükseklikleri bilyalı dövülmüş numunelere göre daha yüksek olup piklerin orta bölgesindeki genişlik (FWHM) daha düşüktür. Bilyalı dövme ile pik şiddetlerinin daha düşük olduğu ancak piklerin genişlediği ve orta bölgesindeki genişliği (FWHM) arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda FWHM’nin genişlemesinin plastik deformasyon sebebiyle tane boyutundaki incelmeler olduğu raporlanmış olup bilyalı dövme işleminin yüzeyde herhangi bir kimyasal değişikliğe sebep olmadan mekanik olarak tane boyutunu incelttiği, yüzey morfolojisini ve mekanik özelliklerini değiştirdiği sonucunu ortaya koymaktadır.



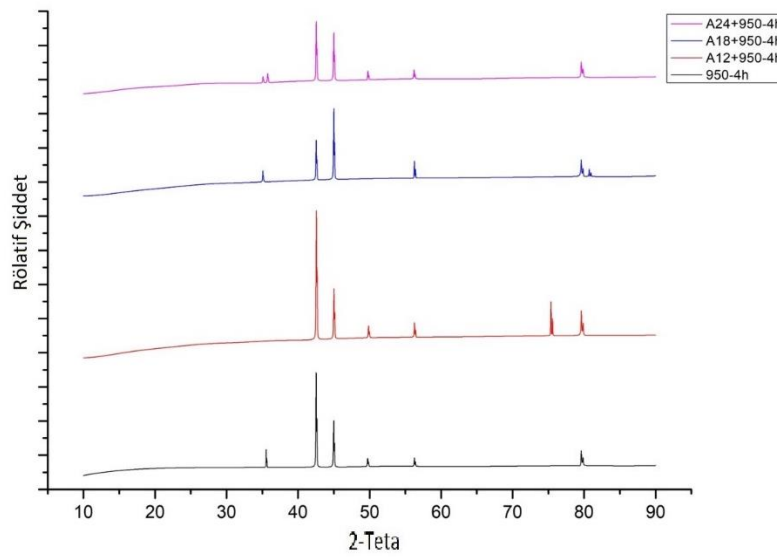
Şekil 4.9. Bilyalı dövülmüş 4340 çeliğin XRD incelenmesi.

Farklı deformasyonlarda bilyalı dövme işlemi ardından süre sabit tutularak farklı sıcaklıklarda borlama işleminin yapılması işlem görmemiş numunenin XRD pikleri ile kıyaslandığında yüzeyde kimyasal seviyede bir morfoloji değişikliğinin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Fazlar incelendiğinde faz yapılarının büyük ölçüde FeB ve Fe<sub>2</sub>B bileşiklerinden oluştuğu görülmektedir. Burada dikkat çeken husus 850°C borlama koşulunda bilyalı dövme işleminin piklerin şiddeti ve FWHM farklılıkları haricinde herhangi bir değişiklik göstermediği dikkat çekmektedir. Ancak piklerin şiddetinden anlaşılacağı üzere bilyalı dövme işleminin tabakada FeB ve Fe<sub>2</sub>B yoğunluğunu belirli oranlarda değiştirdiği bu durumun X-ışını difraksiyonuna yansıdığı sadece mekanik bir etki bırakan bilyalı dövme işleminin termal bir yüzey işlemi ile birleştirildiğinde yüzeyde kimyasal afiniteyi değiştirme kabiliyetine sahip olduğu bu durumun literatürde önemli bir yaklaşım oluşturabileceği kanaatine varılmıştır. 950°C 4 saat uygulaması incelendiğinde sadece borlama işlemi uygulanmış numune difraksiyonları ile ön işlem olarak uygulanmış bilyalı dövme difraksiyonları karşılaştırıldığında pik ve FWHM değişimlerinin yanı sıra bazı piklerin kaybolduğu yeni piklerin de oluştuğu izlenmiştir. Bu durum mekanik bir etki olarak kabul edilen bilyalı dövmenin termal bir yüzey işlemle kıyaslandığında kimyasal etki bırakabileceği var olan kimyevi oluşumları değiştirebileceği ve bu durumda fiziksel, mekanik ve benzeri özellikleri

doğrudan değiştirilebileceği sonucu ortaya çıkmıştır. 1050°C uygulamasında A12 şiddetinde herhangi bir pik değişimi gözlemlenmezken deformasyon şiddeti arttıkça A18 ve A24 uygulamalarında yeni piklerin varlığı görülmektedir. 1050°C’de A12 dövme şiddetinin etkisinin kaybolduğu ancak deformasyon şiddeti arttıkça A18 ve A24 koşullarına ulaştığında bilyalı dövmenin 1050°C gibi yüksek kabul edilen bir sıcaklıkta bile etkisinin difraksiyonlarla halen görülebildiğini göstermektedir.

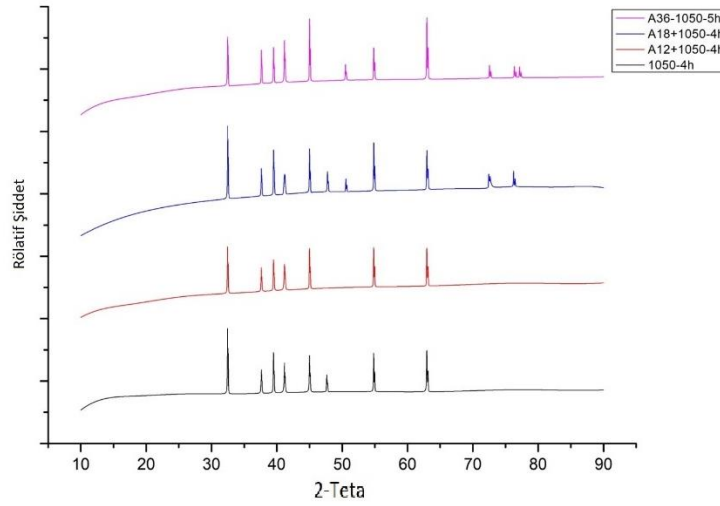


Şekil 4.10. 850 °C sıcaklıkta bilyalı dövülmüş 4340 çeliğin XRD pikleri.



Şekil 4.11. 950 °C sıcaklıkta bilyalı dövülmüş 4340 çeliğin XRD pikleri.





Şekil 4.12. 1050 °C sıcaklıkta bilyalı dövülmüş 4340 çeliğin XRD pikleri.

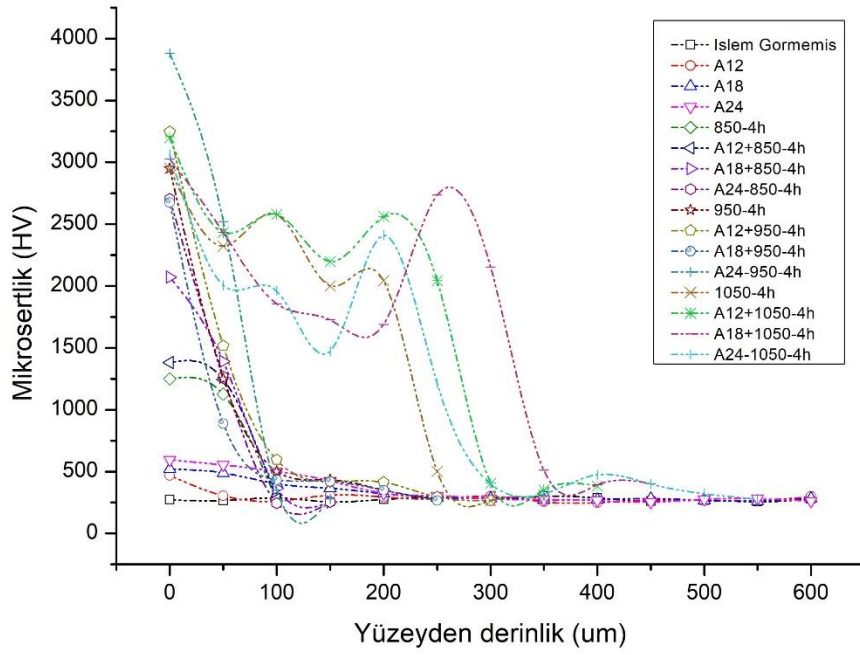
Yamanel 2018 yılında borlanmış SAE 5140 çeliğinin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi için yapmış olduğu çalışmasında bor ile kaplanan yüzeyin borür yapısını incelemek amacıyla XRD cihazı kullanarak 2.000derece/dk tarama hızı, 2theta/theta tarama eksenini ile XRD incelemesini gerçekleştirmiştir. Yapılan borlama işlemi sonucu FeB, Fe<sub>2</sub>B, α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşiklerinin görüldüğünü tespit etmiştir. Borlama süresinin artmasına paralel FeB ve Fe<sub>2</sub>B bileşiklerinin arttığı, 4 saati aşan uygulamalarda ise Fe<sub>2</sub>B fazının FeB ye dönüştüğü görülmüştür. Borlama işleminin uygulandığı numunelerin sertlik değerleri işlem görmemiş numunelere oranla 4-5 kat daha fazla olduğu tespit edilmiş ve maksimum sertlik değeri en yüksek sıcaklıkta 8 saat süre ile borlanan numunede daha fazla olduğu görülmüştür [20].

Ayter 2005 yılında borlama işleminin çelik yüzeylere etkisi ile ilgili yapmış olduğu çalışmada numuneleri 900 °C de 2, 4 ve 6 saat sürelerle borlama işleminden geçirmiştir. XRD cihazlarında yapılan incelemede hiçbir parametrede ayırım yapılmadan gözlemlendiğinde bor tabakalarında tek bir FeB fazının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu çalışma yapmış olduğumuz çalışmada faz yapılarının genellikle FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarından oluşması sebebiyle farklılık gösterdiği görülmektedir [33].

#### 4.4. MİKRO SERTLİK SONUÇLARI

İşlem görmemiş 4340 ıslah çeliğinin ortalama sertlik değeri yaklaşık olarak 250-260 HV seviyesindedir. Mikrosertlik grafiği incelendiğinde sadece bilyalı dövme uygulanmış numunelerde yüzeyde %40'a varan deformasyon şiddetine göre sertlik artışları meydana gelmiş ve bilyalı dövme kaynaklı sertlik artışı 250 µm derinlikte tamamıyla kaybolmuştur. Bu derinlikten sonra malzemede bilyalı dövmenin etkisinin varlığını söylemek mümkün değildir. 850°C-4 saat borlama uygulanmasıyla yüzey sertliği yaklaşık olarak 1200 HV seviyesine çıkmış özellikle A18 ve A24 bilyalı dövme ön işlemi uygulanmış numunelerde yüzey sertliği 2000 HV seviyesini görmüştür. Bilyalı dövme işleminde dislokasyon oluşumlarının artması ve bor elementinin daha rahat difüze olabilecek bir ortam oluşturması sayesinde yüzey sertlikleri önemli derecede yükselmiştir. Optik ve mikroyapı SEM incelemelerine paralel olarak 850°C-4 saat borlama koşulunda bilyalı dövme işlemi fark etmeksizin yaklaşık 100-150 µm derinlikten sonra bir mekanik-termal yüzey işleminin etkisinin varlığı kaybolmuştur. Ancak 950°C borlama sıcaklıklarında sertlik değeri yüzeyde 3000 HV seviyesine ulaşmış ve sertlik derinliği yaklaşık olarak 300-350 µm seviyesinde izlenmektedir. Optik ve SEM görüntülerinde de bor tabakası derinliğinin 200-250 µm seviyelerine ulaştığı dikkate alındığında sertlik sonuçlarının da mikroyapı görüntülerine paralel olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Sertliğin çok yüksek olması sebebiyle bilyalı dövme işleminin yüzey sertliği bağlamındaki etkisi belirli oranda azalmış olup ancak 1050°C sıcaklık öncesi A24 işlemi uygulanan numunede yüzey sertliği 4000 HV seviyesine çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda X ışını difraksiyonu sonuçlarına paralel olarak sertlikte de bilyalı dövmenin etkisi halen izlenmektedir.





Şekil 4.13. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş 4340 çeliğinin mikro sertliğinin incelenmesi.

Kondul 2020 yılında borlanmış ray çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi için yapmış olduğu çalışmada 7 farklı noktadan 50 gr yükü 15 sn sürede Vickers test cihazında malzeme merkezine 150  $\mu\text{m}$  aralıklarla mikrosertlik ölçümleri yapmıştır. Öncelikle işlenmemiş numune yapılan mikrosertlik ölçümleri değeri  $\sim 300$  HV dir. 700-800-900  $^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda 4 saat borlama işlemi uygulanmış numunelerde ise sertlikler 1886, 2145 ve 2590 HV olarak tespit edilmiştir. Buradan hareketle borlama sıcaklığının artmasıyla beraber paralel olarak sertliğinde arttığı sonucu ortaya çıkmaktadır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar ile karşılaştırıldığında benzer sonuca varılmıştır [15].

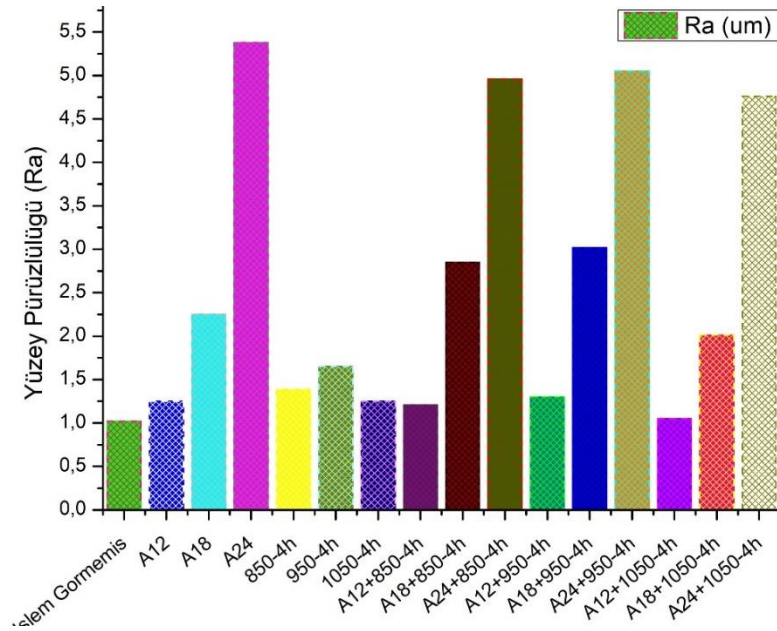
Aşgın 2018 yılında borlanmış tungstenin aşınma davranışının incelenmesi için yapmış olduğu çalışmada bor ile kaplanan numunelerin yüzeyindeki sertlik değerlerini 100 gr yük altında ölçmüştür. 900, 950 ve 1000  $^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda 2,4 ve 6 saat sürelerle uygulanan borlama işlemlerinde en yüksek sertlik değerine (4295 HV) 1000  $^{\circ}\text{C}$  de 6 saat uygulanan numunede rastlanılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar tezde elde edilen sonuçları destekler niteliktedir [28].

Ekinci 2021 yılında borlanmış Fe-Ni ikili alaşımlarının manyetik ve mekanik özelliklerinin araştırılması için yapmış olduğu çalışmada 50 gr yük altında sertlik

ölçme işlemini gerçekleştirmiştir. 800 ve 950 °C de 4,5 ve 6 saat sürelerle uygulanan borlama işlemi sonrası yüzey sertlikleri incelendiğinde en iyi sonucun 950 °C de 6 saat borlanan numunede görüldüğü tespit edilmiştir [34].

#### 4.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN İNCELENMESİ

4340 ıslah çeliği için bilyalı dövme işlemlerinin uygulanması yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Almen şiddetinin artmasıyla deformasyon şiddeti artmış bilyaların yüksek basınç ve hızla yüzeye vurması sonucu yüzeyde daha derin ve daha yüksek çukurcuk ve tepelerin oluşması yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Ancak borlama işleminin yüzey pürüzlülüğünü değiştirdiği noktada kayda değer bir farklılıklar gözlenmemiştir. Bir ön işlem olarak uygulanan bilyalı dövmenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde borlamaya göre daha baskın oluşu ve yüzey pürüzlülüğünün etkisini önemli ölçüde değiştirdiği raporlanmıştır. Yüzey işlem olarak uygulanan mekanik ve termal yüzey işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünün farklı olması tamamıyla bilyalı dövme işleminin baskın karakterli olmasıyla ilişkilidir. Yüzey pürüzlülüğünün aşınma korozyon ve yorulma gibi yüzey esaslı hasarlarda etkin olduğu yapılan birçok çalışmada ortaya konulmuştur.



Şekil 4.14. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş 4340 çeliğinin yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi.

Fırtına 2019 yılında dökme demirlerin borlanması ve karakterizasyonu için yapmış olduğu çalışmada farklı sıcaklıklarda 4 saat sürede borlama işleminin uygulandığı numunelere yüzeylerindeki kalıntıları temizlemiştir. Sonrasında zımpara kâğıdı ile zımparalanarak parlatılmıştır. Bu işlemlerden sonra yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Yapılan çalışmada malzeme yüzeyinin zımparalanıp parlatılmasına rağmen altlık malzemeye göre daha pürüzlü olduğu görülmüştür. Tespit edilen yaklaşık 2-3 kat pürüzlülük değerinin artmasının sebebi olarak, borlama yapılırken numune yüzeylerine borlama karışım tozlarının yapışması olduğu düşünülmüştür. Sonuçların genellikle birbirlerine yakın 1 µm değerinin altında olduğu görülmüştür [23].

Türkmen 2018 yılında borlama işlemlerinin geliştirilmesi ile ilgili yapmış olduğu çalışmada SAE 1020 çeliğine 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda ve 4, 8 ve 12 saat sürelerde borlama işlemi yapılmıştır. Çalışma sonucunda sıcaklık ve sürenin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünde arttığı görülmüştür. Ayrıca bor bileşiminin numune yüzeyine yapışması ve numune yüzeyindeki porozitelerin pürüzlülük değerini artırdığını tespit etmiştir [11].

#### **4.5. KOROZYON TESTİ**

850°C sıcaklıkta borlanmış numunenin korozyon hızı 0,097 iken 950 °C’de bu değer 0,127’ye 1050 °C’de ise 0,563’e çıkmıştır. Sabit sıcaklıkta borlama sıcaklığının artması korozyon hızının artmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla düşük sıcaklıkta borlama işleminin korozyon direncine daha olumlu yönde etki ettiği söylenebilir. 850 °C’de borlama işlemi öncesi yapılan farklı Almen şiddetlerinde bilyalı dövme işlemleri sonrası korozyon hızlarında belirli oranlarda artış gözlemlenmiştir. Özellikle deformasyon şiddetinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artmış olup korozyon hızının arttığı görülmektedir. 950 °C’de ön işlem olarak uygulanan bilyalı dövme işleminde 850 °C’nin aksine daha düşük bilyalı dövme şiddetlerinde daha iyi korozyon performansının izlendiği raporlanmıştır. 1050 °C’de bilyalı dövme işinin uygulanması ile yüzey pürüzlülüğünün artması korozyon performansını olumsuz yönde etkilemiş ve deformasyon şiddetinin artmasıyla korozyon hızının arttığı raporlanmıştır. Ancak işlemler bütünüyle değerlendirildiğinde mekanik ve termal yüzey işlemler bütününe işlem görmemiş malzemeye göre korozyon hızının

oldukça düşük olduğu ve korozyon performansının daha olumlu seyrettiği sonuçlarda görülmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı yüzey işlemlerinden sonra potansiyodinamik polarizasyon testleri sonrası korozyon verileri.

İşlem Türü	Yüzey Alanı (cm <sup>2</sup> )	EW (g)	d (g/cm <sup>3</sup> )	CC (µA)	CCD (µA / cm <sup>2</sup> )	Korozyon Hızı (mm / yıl)	E <sub>corr</sub> (V)
850C-1	0.12	18,615	7,87	4,41	36,75	0,284	-0,791
850C-2	0.12	18,615	7,87	1,87	15,58	0,121	-0,682
850C-3	0.12	18,615	7,87	10,73	89,42	0,692	-0,799
850C-İG	0.12	18,615	7,87	1,51	12,58	0,097	-0,651
950C-1	0.12	18,615	7,87	51,86	432,17	3,343	-0,153
950C-2	0.12	18,615	7,87	2,84	23,67	0,183	-0,664
950C-3	0.12	18,615	7,87	4,11	34,25	0,265	-0,734
950C-İG	0.12	18,615	7,87	1,97	16,42	0,127	-0,558
1050C-1	0.12	18,615	7,87	7,11	59,25	0,458	-0,661
1050C-2	0.12	18,615	7,87	16,44	137	1,06	-0,798
1050C-3	0.12	18,615	7,87	14,78	123,17	0,953	-0,768
1050C-İG	0.12	18,615	7,87	8,73	72,75	0,563	-0,718
İşlem görmemiş (İG)	0.12	18,615	7,87	854	7117	55,047	-0,364

Korkmaz 2020 yılında borlanmış dökme demirin kırılma tokluğunun ve korozyon davranışının incelenmesi için yapmış olduğu çalışmasında Formik ve Nitrik asit çözeltileri kullanılarak numunelerin korozyon direncine karşı etkisi incelenmiştir. İşlem görmemiş ve borlanmış numuneler %10 luk Formik ve Nitrik asit çözeltilerinde bekletilmiş belirli süreden sonra çözeltilerden çıkarılarak tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Nitrik asitin korozif etkisinin Formik asite göre daha fazla olduğu görülmüş ve formik asitteki yüzey kayıplarının en yüksek % 0,302 ve % 9,101 olduğu, nitrik asitte ise bu değerlerin % 14,43 ve % 33,12 olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda deneylerin yapıldığı en yüksek sıcaklık 900 °C de en uzun süre 8 saat borlanan numunede kütle kaybının yani korozyon etkisinin diğer parametrelerde işlem gören numunelere göre 25,5 kat daha az olduğu tespit edilmiştir [17].

Kabadayı, 2013 yılında yüksek krom ve nikelli dövme çeliklerin korozyon özellikleri ile ilgili yapmış olduğu çalışmada numunelere 3, 6, 9, 12, ve 15 saat, 850, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulamıştır. Sonrasında %10 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> çözeltisinde korozyon testlerini yapmıştır. Bu çalışma sonunda 850 °C de 3 saat ve 15 saatlik borlama işlemine tabi tutulan numunelerin korozyon dayanımlarının daha iyi olduğu diğer parametrelerde pullanarak dökülmeler olduğu tespit edilmiştir [35].

Uzun 2002 yılında borlama işlemi yapılan çeliklerin korozyona karşı dayanımı ile ilgili yapmış olduğu çalışmada Ç1040 çeliğine 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda 3 ve 5 er saatlik borlama işlemi uygulanan numunelerin korozyon direncini incelemiş, borlama işlemine tabi tutulan numunelerin borlama işlemi yapılmayan numunelere göre 8 kat daha fazla korozyon direncinin yüksek olduğunu tespit etmiştir [31].

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan bu çalışma kapsamında 4340 ıslah çeliğinin farklı şiddetlerde bilyalı dövme işlemi yapılmış sonrasında farklı sıcaklıklarda 4 saat süreyle borlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemlerin yapıldığı numunelerin iç yapıları, mikro sertlikleri ve yüzey pürüzsüzlükleri incelenmiştir. Tüm işlemleri sırasıyla yapılan numunelere korozyon testi uygulanmış elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda belirtilmiştir.

- Borlama tabakasının gelişimi alaşım elementlerinin artışıyla olumsuz etkilendiği gözlenmiştir. Borlama tabakasının en yüksek görüldüğü kısım 1050 °C’ de 4 saatte borlama işlemine tabi tutulan numunede olduğu görülmektedir.
- Yapılan çalışmalarda FWHM’nin genişlemesinin plastik deformasyon sebebiyle tane boyutundaki incelmeler olduğu raporlanmış olup bilyalı dövme işleminin yüzeyde herhangi bir kimyasal değişikliğe sebep olmadan mekanik olarak tane boyutunu incelttiği, yüzey morfolojisini ve mekanik özelliklerini değiştirdiği sonucunu ortaya koymaktadır.
- Optik ve SEM görüntülerinde de bor tabakası derinliğinin 200-250 µm seviyelerine ulaştığı dikkate alındığında sertlik sonuçlarının da mikroyapı görüntülerine paralel olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Sertliğin çok yüksek olması sebebiyle bilyalı dövme işleminin yüzey sertliği bağlamındaki etkisi belirli oranda azalmış olup ancak 1050°C sıcaklık öncesi A24 işlemi uygulanan numunede yüzey sertliği 4000 HV seviyesine çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda X ışını difraksiyonu sonuçlarına paralel olarak sertlikte de bilyalı dövmenin etkisi halen izlenmektedir.

- 4340 ıslah çeliği için bilyalı dövme işlemlerinin uygulanması yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Almen şiddetinin artmasıyla deformasyon şiddeti artmış bilyaların yüksek basınç ve hızla yüzeye vurması sonucu yüzeyde daha derin ve daha yüksek çukurcuk ve tepelerin oluşması yüzey pürüzlülüğünü artırmıştır. Ancak borlama işleminin yüzey pürüzlülüğünü değiştirdiği noktada kayda değer bir farklılıklar gözlenmemiştir.
- Tek aşamalı ısıt işlemlere kıyasla hibrit proseslerin daha düşük korozyon performansı, yüksek yüzey pürüzlülüğü, tane boyutu ve yüzeydeki sertlik performansının oldukça benzer olduğu tespit edilmiştir.
- Bilyalı dövme ve borlama için en iyi korozyon performansı 850°C-4 saat uygulamadan sonra elde edilmiştir. Genel olarak mekanik ve termal yüzey işlemler bütününe işlem görmemiş malzemeye göre korozyon hızını düşürdüğü ve korozyon performansını arttırdığı ortaya konulmuştur.

## KAYNAKLAR

1. A. Serkan, "Farkli Parametrelerde Perdahlama İşleminin Alaşimli Çeliklerin Yüzey Özelliklerine Etkisi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
2. B. Fatih, "50CrV4 Çeliğın Yüzeyinde Oluşturulan Yapay Yüzey Kusurlarına Bilyalı Dövme İşleminin Etkilerinin İncelenmesi", *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
3. D. Turan, "Titreşim Destekli Yüzey Aşırı Plastik Deformasyon Cihazı Tasarımı ve İmalatı", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
4. Ü. Okan, "Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi", *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
5. URL-2 (2010) <http://www.electronics-inc.com/products.html> Electronics-Inc Shot Peening Control (21.07.2010)
6. S. Savas, "Monitoring variation of surface residual stresses in the shot-peened steel components by magnetic barkhausen noise method, *ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).
7. M. Onur, "AISI 304 Paslanmaz Çeliğinde Çok Adımlı Bilyalı Dövme Uygulamalarının Mikroyapı ve Malzeme Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi", *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
8. E. Yusuf, "AA7075 Alüminyum Alaşımının Farklı Tip Yüzey İşlemleri ile Yorulma Davranışlarının İyileştirilmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
9. Y. Coşkun, "Metal Matrisli Kompozitlerin Farklı Dövme Yöntemleri İle Dövülerek Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
10. K. İbrahim, "Aşırı Plastik Deformasyon Uygulanmış S500MC Otomotiv Çeliğinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
11. Türkmen, İ., " Farklı Bor Türüleri İle Alternatif Borlama Bileşimlerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu ", *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).



12. Sinha, A. K. Boriding (Boronizing) of Steels, ASM Handbook, Heat Treatment 4, 437–447, (1991).
13. Sert, M., “Aısı 304l Paslanmaz Çeliğın Krtd-Bor Yöntemi İle Borlanması”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
14. Suwattananont, N., *Multi-component boron coatings on low carbon steel AISI1018*. (Doctoral dissertation). Available from ProQuest Dissertations and Theses database (UMI No. 3489309) (2010).
15. Kondul, B., " Borlama ile Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi "*Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
16. Nişli, G., "Bortemperlenmiş AISI 1040 Çeliğinin Yüzey Özelliklerinin ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
17. Korkmaz, S., " Borlanmış Küresel Grafitli Dökme Demirin Kırılma Tokluğunun Ve Korozyon Davranışının İncelenmesi ", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
18. A. Taşçı, “Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları”, *İstanbul Üniv.*, İstanbul, (1993).
19. <http://www.periodensystem-online.de/> . Erişim tarihi: 05.07.2011.
20. Y. Bünyamin, “Farklı Sıcaklıklarda Menevişlenmiş Ve Borlama İşlemine Tabi Tutulmuş Sae 5140 Çeliğinin Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
21. K. Yusuf, “Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğın Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
22. S. Murat, “Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, *Adıyaman Üniv.*, (2019).
23. F. Özge, “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borik Asit Esaslı Alternatif Borlama Karışımı ile Borlanması Ve Karakterizasyonu”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
24. Ü. Fatma, “Cam Kalıplarında Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (Kgdd) Borlanması”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
25. Kulka, M. Current Trends in Boriding Techniques. Part of the Engineering Materials Book Series. Springer, Cham, Switzerland, 2019, 282s.

26. Gissler, W., Jehn, H. A. Advanced Techniques for Surface Engineering. Springer Netherlands, 402, (1992).
27. Y. Mehmet, “Borlama İşleminin 34crnimo6 Çeliğinin Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
28. A. A. Malik, “Borlanmış Tungstenin Aşınma Davranışının İncelenmesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
29. Arat, M. “Paslanmaz Çelik 310 Ve 316 Metalinin Plazma Borlama Ve Nitrürleme Metodu İle Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
30. Sinha A.K., Boriding (Boronizing) ASM handbook. Journal of Heat Treating, 4:437e47 [OH, USA] (1991).
31. U. Hasan Ali, “Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2002).
32. A. Dilek, “Mikrodalga Hibrit ve Konvansiyonel Isıtma ile Kutu Borlama Uygulanmış AISI 304L Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
33. A. Tarkan, “Borlama İşleminin Çeliklerin Yüzey Kalitesi ve Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
34. E. Cihan, “Borlanmış Fe-Ni İkili Alaşımlarının Manyetik ve Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
35. K. Ergun, “Yüksek Krom ve Nikelli Dökme Çeliklerin Mekanik ve Korozyon Özelliklerine Yaşlandırma ve Borlama Isıl İşleminin Etkisi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).

## ÖZGEÇMİŞ

İsmail Buğra BOZKURT ilk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamladı. Karabük Cumhuriyet Lisesi Fen Bölümü'nden mezun oldu. 2010 yılında Aksaray Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2014 yılında mezun oldu. İş hayatında 2015 yılından 2017 yılına kadar imalat, üretim, çelik konstrüksiyon işleri yapan farklı firmalarda çalıştı. 2017 yılında işe başlamış olduğu KARDEMİR AŞ. firması Yüksek Fırınlık Müdürlüğü ünitesinde halen Mekanik Bakım Mühendisi olarak görev yapmaktadır.