



**MİKRO DALGA FIRININDA BORLANMIŞ
P20 ÇELİĞİNİN ELEKTROKİMYASAL
KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nusrettin BARUT

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Yusuf KAYALI

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

Ocak 2018

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MİKRO DALGA FIRININDA BORLANMIŞ P20 ÇELİĞİNİN
ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Nusrettin BARUT

DANIŞMAN

Yrd. Doç. Dr. Yusuf KAYALI

METALURJİ ve MALZEME MÜHENDSİLİĞİ ANABİLİM DALI

Ocak 2018

TEZ ONAY SAYFASI

Nusrettin BARUT tarafından hazırlanan Mikrodalga Fırınında Borlanmış P20 Çeliğinin Elektrokimyasal Korozyon Davranışının İncelenmesi adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 30/01/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Yusuf KAYALI

Başkan : Prof.Dr. Şükrü TALAŞ
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yusuf KAYALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Yrd. Doç.Dr. Rıza KARA
Uşak Üniversitesi, Teknik Bilimler M.Y.O

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.

30.01.2018

Nusrettin BARUT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MİKRO DALGA FIRININDA BORLANMIŞ P20 ÇELİĞİNİN ELEKTROKİMYASAL KOROZYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Nusrettin BARUT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Yusuf KAYALI

AISI P20 çeliği endüstrinin birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Kullanıldığı yerlerde tribolojik yüzey hasarlarına maruz kalmaktadır. Karşılaştığı bu olaydan dolayı malzeme kaybını azaltmak için birçok yüzey sertleştirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada; bor kaplamaya müsait olan AISI P20 çeliğini 800, 850 ve 900°C sıcaklıklarında 2, 4 ve 6 saat bekletme sürelerinde mikrodalga fırınında kutu borlama yöntemi ile borlanmıştır. Deneylerin sonucunda, metal yüzeylerinde oluşan borürlerin morfolojisi optik mikroskobu ile incelenmiştir. AISI P20 çeliğinin sertlik değerleri mikro-sertlik cihazı ile ölçülmüştür. Tabaka üzerinde oluşan fazlar XRD yöntemi ile belirlenmiştir. Elektrokimyasal korozyon deneyleri 1M NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir.

Borlama işlemi sonucunda çelik yüzeyinde oluşan borür tabakası FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazlarından oluştuğu tesbit edilmiştir. Mikro dalga fırınında elde edilen bor tabakalarının kalınlığı ile borlama sıcaklığı ve borlama süresinin artışı ile arttığı görülmüştür. Mikro dalga fırınında kutu borlanmış numunelerde sertlik değerleri artmıştır. Korozyon deneyleri neticesinde bor kaplanmış çeliklerin korozyon direnci iyileşmiştir. Borlama sıcaklığı ve süresinin değişmesiyle birlikte korozyon davranışları iyileşmiştir.

2018, x + 58 sayfa

Anahtar kelimeler: AISI P20 çeliği, Mikrodalga fırını, Kutu Borlama, Mikrosertlik, Elektrokimyasal Korozyon

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN ELECTROCHEMICAL CORROSION STUDY OF MICROWAVE PACK BORIDED P20 STEEL

Nusrettin BARUT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Yusuf KAYALI

AISI P20 steel is widely used in many areas of industry. Therefore, the steel is exposed to tribological surface failures where it is used. Various surface hardening treatments are used to reduce mass loss.

In this study, box boriding procedure in the microwave oven is conducted on AISI P20 steel that is suitable for boron coating at 800, 850 and at 900 C for 2, 4 and 6 hours. At the end of the experiments, the morphology of the resulting boride layer on the steel surface was examined by optical microscopy. Hardness values were measured with a micro-hardness tester, and the phases which is formed on the substrate is determined by the XRD method. Electrochemical corrosion tests were performed in 1M NaCl solution for 1 hour waiting time.

As a result of boriding, the boride layer has been found to consist of FeB, Fe₂B, CrB and the MnB phases. The thickness of the boride layer obtained in specimen treated in the microwave oven was found to increase with increasing boriding temperature and boriding time. The hardness values in the microwave oven box borided specimens have also increased. At the end of the electrochemical corrosion tests, the corrosion resistance of sample was coated with Boron is improved. Corrosion behavior was found to be changing with boriding temperature and time.

2018, x + 58 pages

Keywords: AISI P20 Steel, Microwave, Box Boronizing, Electrochemical Corrosion

TEŐEKKÖR

Bu tezin hazırlanması esnasında, deneysel çalıŐmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında bana öncülük ve rehberlik eden tez danıŐmanım ve değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Yusuf KAYALI'ya, her konuda öneri ve eleŐtirileriyle yardımlarını esirgemeyen hocalarıma ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı başta annem Güzel BARUT, babam Halis BARUT olmak üzere tüm aileme teşekkür ederim.

Nusrettin BARUT
AFYONKARAHİSAR, 2018

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|-----|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ..... | iv |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | ix |
| RESİMLER DİZİNİ | x |
| 1.GİRİŞ..... | 1 |
| 2. LİTERATÜR BİLGİLERİ | 3 |
| 2.1 AISI P20 Çeliği..... | 3 |
| 2.2 Endüstriyel Tip Mikrodalga Fırını | 5 |
| 2.3 Bor Cevheri ve Borlama Hakkında Bilgiler | 5 |
| 2.3.1 Bor Cevheri Nedir?..... | 5 |
| 2.3.2 Bor Cevheri ve Bileşikleri | 6 |
| 2.3.3 Demir Bor Denge Diyagramı | 7 |
| 2.3.4 Borlama İşleminin Olumlu ve Olumsuz Yönleri..... | 8 |
| 2.3.5 Borlama Yöntemleri | 9 |
| 2.3.5.1 Kutu Borlama..... | 10 |
| 2.3.5.2 Sıvı Borlama | 12 |
| 2.3.5.3 Gaz Borlama | 13 |
| 2.3.5.4 Pasta Borlama | 15 |
| 2.3.6 Endüstriyel Uygulamalarda Borlama İşlemi | 16 |
| 2.4. Korozyon | 17 |
| 2.4.1 Korozyon Çeşitleri..... | 17 |
| 2.4.2 Korozyon Hızı Ölçme Yöntemleri | 17 |
| 2.4.2.1 Kütle Kaybı Yöntemi..... | 18 |
| 2.4.2.2 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi | 20 |
| 2.4.2.3 Liner Polarizasyon Yöntemi | 23 |
| 2.4.2.4 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi Yöntemi..... | 24 |
| 2.4.3 Korozyondan Korunma Yöntemleri | 27 |
| 2.4.3.1 Katodik Koruma | 27 |

| | |
|---|----|
| 2.4.3.2 Anodik Koruma | 29 |
| 3. MATERYAL ve METOT | 30 |
| 3.1 Malzeme ve Borlama İşlemi | 30 |
| 3.2 Metalografik Çalışmalar | 31 |
| 3.3 Deneylerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem | 33 |
| 3.3.1 Mikro Dalga Fırını:..... | 33 |
| 3.3.2 Hassas Kesme Cihazı: | 34 |
| 3.3.3 Mikrosertlik Cihazı:..... | 34 |
| 3.3.4 X-Işınları Difraksiyonu ve Kristal Yapı (XRD) Analiz Cihazı:..... | 35 |
| 3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)..... | 35 |
| 3.5 Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri: | 36 |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR..... | 38 |
| 4.1 Borlanmış AISI P20 Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu | 38 |
| 4.2 AISI P20 Çeliğinin X-Işınları Difraksiyon Analizi | 42 |
| 4.3 AISI P20 Çeliğinin Borür Tabaka Kalınlığı | 43 |
| 4.4 AISI P20 Çeliğinin mikro Sertlik Değerleri | 45 |
| 4.5 Elektrokimyasal Korozyon Testleri | 46 |
| 4.6 Tafel ve Liner Polarizasyon Deney Sonuçları | 47 |
| 5. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER | 50 |
| 5.1 Genel Sonuçlar..... | 50 |
| 5.2 Öneriler | 50 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 51 |
| 6.1 İnternet kaynakları | 56 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 57 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

| | |
|---|---------------------|
| FeB | Demir bor |
| Fe ₂ B | Demir (II) bor |
| BCl ₃ | Bor klorür |
| B ₄ C | Bor karbür |
| CrB | Krom bor |
| SiC | Silisyum karbür |
| NaBF | Sodyum bor florür |
| KBF ₄ | Potasyum bor florür |
| NaF | Sodyum florür |
| Al ₂ O ₃ | Alüminyum oksit |
| Na ₂ B ₄ O ₇ | Susuz boraks |
| Na ₂ CO ₃ | Sodyum karbonat |
| Fe ₂ O ₃ | Demir (II) Oksit |
| NaCl | Sodyum Klorür |
| nm | Nanometre |
| μ | Mikron |
| °C | Derece |
| A | Amper |
| mA | Miliamper |
| μA | Mikroamper |
| V | Volt |
| mV | Milivolt |
| μV | Mikrovolt |

Kısaltmalar

| | |
|-----|---|
| XRD | X-Işınları Kırınımı |
| SEM | Taramalı Elektron Mikroskobu |
| EDX | Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | | |
|-----------|--|----|
| Şekil 2.1 | Demir Bor denge diyagramı..... | 8 |
| Şekil 2.2 | Kutu borlama işleminin şematik görünümü..... | 10 |
| Şekil 2.3 | Gaz ortamda borlamanın şematik gösterimi. | 14 |
| Şekil 2.4 | Korozyon tepkimesinin gerçekleşmesine katılan anodik, katodik ve toplam tepkime hızlarının potansiyele bağlı değişimleri, A ve K sırasıyla anodik ve katodik akım ve potansiyelleri göstermektedir. | 21 |
| Şekil 2.5 | Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri. | 23 |
| Şekil 2.6 | Lineer polarizasyon yöntemi ile Rp bulunması. | 24 |
| Şekil 2.7 | Metal-çözelti arayüzeyindeki potansiyel dağılımı a: Şematik b: kabul edilen şema, c: önerilen yeni şema gösterimi. | 25 |
| Şekil 2.8 | Şematik kompleks diyagramı..... | 27 |
| Şekil 2.9 | Katodik korumanın temel İlkesi..... | 28 |
| Şekil 3.1 | AISI P20 çeliğin satıldığı durumda Optik mikroyapısı. | 30 |
| Şekil 3.2 | Korozyon deneyleri için hazırlanan çelik numune ve çelik potanın şematik gösterimi. | 31 |
| Şekil 3.3 | Kutu borlamanın yapılış yöntemi..... | 31 |
| Şekil 4.1 | a) 800, b) 850 ve c) 900°C 2 saat mikrodalga fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin optik ve SEM görüntüsü. | 39 |
| Şekil 4.2 | a) 800 b) 850 c) 900°C 4 saat mikrodalga fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin optik ve SEM görüntüsü. | 40 |
| Şekil 4.3 | a) 800 b) 850 c) 900°C 6 saat mikrodalga fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin optik ve SEM görüntüsü. | 41 |
| Şekil 4.4 | a) 800°C, b) 850°C, c) 900°C 4 saat kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin XRD analizleri..... | 42 |
| Şekil 4.5 | 900 °C de 4 saat süre kutu borlama yöntemi ile a) Geleneksel Kül fırınında b) Mikrodalga fırınında borlanmış AISI P20 çeliğinin XRD analizleri..... | 43 |
| Şekil 4.6 | 800°C, 850°C ve 900°C’de Mikrodalga Fırınında ve 900°C’de Kül Fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin bor tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreye göre değişim grafiği..... | 44 |
| Şekil 4.7 | Mikrodalga fırınında borlanmış AISIP20 çeliğin Optik mikroyapı görüntüsü | 45 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.8 a) 800 °C 2,4 ve 6 saat b) 800 °C, 850 °C ve 900°C ‘de 4 saat mikrodalga fırınında ve 900°C ‘de 4 saat geleneksel kül fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin mikrosertlik değerleri..... | 46 |
| Şekil 4.9 a) 800°C, 850°C, 900°C 4 saat b) 850°C 2, 4, ve 6 saat kutu borlanmış numunelerin tafel ekstrapolarizasyon eğrileri..... | 48 |
| Şekil 4.10 AISI P20 çeliğinin a) 800°C 2 saat b) 850°C 2 saat c) 900°C 6 saat borlanmış numunenin korozyon, SEM ve EDX görüntüsü. | 49 |



ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|--------------|
| Çizelge 2.1 Plastik kalıbı çelikleri ve uluslararası standartlardaki karşılıkları. | 3 |
| Çizelge 2.2 AISI P20 ve AISI P20+Ni çeliğinin fiziksel özellikleri..... | 4 |
| Çizelge 2.3 Bor Cevheri ve Bileşikleri..... | 6 |
| Çizelge 2.4 Mikro-dalga fırınında borlama işlemi için kullanılan bor madenlerin özellikleri..... | 10 |
| Çizelge 2.5 Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri..... | 13 |
| Çizelge 2.6 Gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri. | 15 |
| Çizelge 2.7 Bor ürünlerinin kullanıldığı sektörleri. | 16 |
| Çizelge 2.8 Bağlı korozyon direnci..... | 19 |
| Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan AISI P20 Çeliğinin spektra analizi. | 30 |
| Çizelge 4.1 AISI P20 Çeliğinin Elektrokimyasal Korozyon Değerleri. | 47 |

RESİMLER DİZİNİ

| | Sayfa |
|--|--------------|
| Resim 3.1 Numune zımparalama ve parlatma cihazı..... | 32 |
| Resim 3.2 Mikroyapı görüntüleri için kullanılan optik mikroskop..... | 32 |
| Resim 3.3 Borlama işleminde kullanılan Mikrodalga fırının fotoğrafı..... | 33 |
| Resim 3.4 Hassas Kesme cihazı..... | 34 |
| Resim 3.5 AISI P20 çeliğinin sertlik değerlerinin alındığı mikrosertlik cihazı..... | 34 |
| Resim 3.6 Yüksek Sıcaklık X-Işınları Kırınım Cihazı. | 35 |
| Resim 3.7 Mikroyapı ve tabaka kalınlığı belirlemek için kullanılan taramalı elektron mikroskobu. | 36 |
| Resim 3.8 Korozyon deneylerinde kullanılan a) Deney Düzeneği b) Deney Hücresi... 36 | |
| Resim 3.9 Korozyon deneyleri için hazırlanan a) Etüv b) Çiftdestile edilmiş Su Ünitesi c) Ultrasonik banyo cihazı. | 37 |

1.GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan metalik malzemelerin birçoğu aşınma ve korozyon hasarları (tribolojik etkiler) sonucunda kullanım ömürleri azalmaktadır. Azalan kullanım ömürlerinin arttırılması için, yüzey bölgelerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Korozyon ve aşınma hasarlarından dolayı dünyada son dönemlerde artan malzeme hasarları önemli miktarda enerji ve malzeme kayıplarına neden olmaktadır. Korozyon hasarlarından dolayı ülkelerin kayıpları oldukça fazladır. Bu kaybın bizim ülkemizdeki miktarı 1991 yılında ki analizler baz alındığında 4.5 milyar dolar gibi büyük bir meblağa tekabül etmektedir (Khoee 1992).

AISI P20 çeliği birçok endüstriyel uygulamalarda oldukça fazla kullanılmaktadır. AISI P20 çeliğinin kullanıldığı yerlerde, aşınma ve korozyon hasalarına uğramaktadır. Bu kayıplar önemli ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Karşılaştığı bu hasarları azaltmak için malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmek gerekmektedir (Döndüren vd. Karacasulu 2015).

Yüzey sertleştirme işlemi özel bir işlemdir. Yüzey kaplama bir çeliğin merkezinin (matrisin) yüzeye oranla yumuşak olması istenilir. Metalin yüzey kısmının belirli bir derinlikte sert olması istenir. Metallerde yüzey sertleştirme; bir malzemenin tribolojik ve mekanik özelliklerini değiştirerek kullanım ömrünü arttırmak mümkün olmaktadır (Sen *et al.* 2001).

Yüzey kalitesini daha iyi hale getirmek için kullanılan metodlardan bir tanesi de borlamadır. Borlama işlemi, demir ve demirdışı malzemelerin yüzeylerinde çok sert ve aşınmaya, korozyona karşı dayanıklı kaplamalar meydana getirmek için kullanılan etkin bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemidir. Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi ise, bor atomlarının çeliğin yüzeyine yayılımı ile malzeme iç kısmına geçerek elektro-negativitesi daha düşük olan element ile bileşik oluşturur. Oluşan intermetalik bileşik çok sert ve kırılgan borür tabakası meydana getirir. Endüstriyel borlama yöntemi; minimum 1 saat, maksimum 10 saatlik bekletme sürelerinde 700-1000°C sıcaklıkları arasında yapılır. 10 saati geçen borlama işlemlerinde oluşan bor tabakası

fazla büyümeyeceğinden fazladan enerji harcanmış olur. Endüstride enerjiyi verimli kullanmak gerektiğinden malzemeler yüksek sıcaklıkta fazla bekletilmez. Mikro dalga fırını içerisinde bolama işlemi geleneksel kül fırınına nazaran daha düşük sıcaklıklarda yapılabilmektedir. Borlama prosesi katı, sıvı, gaz veya plazma ortamlarında yapılabilmektedir. Borlama prosesi demir ve demir dışı metallere çok rahat bir şekilde uygulanabilmektedir (Özbek and Bindal 2002).

Borlama sırasında, bor atomlarının yüzeye difüzyonu sonucu metal parçanın yüzeyinde katmanlı tabaka adı verilen borlu bölge oluşur. Katmanlı tabakanın hemen altında difüzyon bölgesi ve matris iç kısmında da borlama prosesinden etkilenmemiş olan çekirdek bölgeden oluşur. Difüzyonun gerçekleştiği bölgelerde Fe_2B ve FeB fazları oluşur. Oluşan borür tabakasının iğnesel (testere dişi) yapıya benzeyen homojen ve rijit difüzyon tabakası oluşturduğu gibi malzemenin kimyasal kompozisyonuna göre düz bir yapıda da oluşabilir. Oluşan bu yapıyı çeliğin kimyasal kompozisyonu belirler. Oluşan yapı Fe_2B veya $FeB+Fe_2B$ şeklinde oluşabilir (Dursun *et al.* 2011). Düşük sıcaklıklarda Fe_2B fazı meydana gelir. Ortamın bor konsantrasyonu fazla ise ve bununla birlikte sıcaklık artışı olursa FeB fazı da oluşmaya başlar. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden matris iç kısmına doğru Fe_2B ve FeB yapıları oluşur. Borlamanın son aşamasında daha sert ve gevrek olan FeB fazı meydana gelir (Özbay 2009).

Endüstriyel uygulamalarda mikrodalga fırınında ısıtma işlemi; yapılacak olan işlemin proses süresini kısaltması, düşük enerji kullanımından dolayı tercih edilmektedir. Yüksek ısıtma ve düşük işlem zamanı ile malzemelerin hacimsel ısınması sağlanır (Quan *et al.* 2013).

Mikrodalganın frekans aralığı 03-300 Ghz arasında değişmektedir. Evde kullanılan veya sanayi tip mikrodalga fırınlarında ise 2.45 Ghz'de çalıştırılır. Bu değer yaklaşık olarak 12,2 dalga boyuna ve $1,02 \times 10^{-2}$ enerjiye denk gelmektedir (Jones *et al.* 2002, Kayali 2015).

Yapmış olduğumuz bu çalışmada borlamanın sağladığı üstünlükler göz önüne alınarak AISI P20 çeliğinin mikro dalga fırınında kutu borlama yöntemi ile

borlanmıştır. Borlanan çeliğin yüksek yüzey sertliği, düşük sürtünme katsayısı gibi avantajlar sağlamıştır. Geleneksel kül fırınında borlanan AISI P20 çeliğinin tabaka kalınlıkları mikrodalga fırınında borlanan çelik ile karşılaştırıldığında, tabaka kalınlıklarının farklılık gösterdiği görülmüştür. Oluşan borür tabakasının optik mikroyapılarının birbirine benzediği, tabaka kalınlıklarının farklı çıktığı, elde edilen fazların aynı fakat miktarlarının değiştiği ve yüzey sertliklerinin farklı çıktığı analiz edilmiştir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 AISI P20 Çeliği

Plastiklerin enjeksiyon, ekstrüzyon, pres ve şişirme kalıplarında, kalıp çekirdeği, maça ve itici olarak kullanılır. 30-35 HRC arasında önsertleştirilmiş bir çeliktir. Parlatılabilirliği iyi olan ve çok iyi nitrürlenebilen plastik bir kalıp çeliğidir.

Plastik kalıp çelikleri, plastiklerin başta enjeksiyon, ekstrüzyon, şişirme ve çeşitli presleme teknikleriyle şekillendirilmesinde kullanılan takım çelikleridir. Çizelge 2.1'de çok kullanılan bazı plastik kalıp çelikleri ve uluslararası standartlarındaki karşılıkları verilmiştir. Bu çelikler Impax ve Holdax çelikleri olarak da adlandırılmaktadır.

Çizelge 2.1 Plastik kalıbı çelikleri ve uluslararası standartlardaki karşılıkları.

| SIRA | AISI | DIN |
|------|--------|--------|
| 1 | P20+Ni | 1.2738 |
| 2 | P20+S | 1.2312 |
| 3 | P20 | 1.2311 |
| 4 | 420SS | 1.2083 |
| 5 | 420 | 1.2316 |

Kalıp yapımında çelik malzeme seçimi çok önem arz etmektedir. Kalıp çeliklerinin seçilmesinde, kullanılacak olan plastik hammaddesinin, sadece sertlikleri, korozyon direnci gibi özelliklerin göz önüne alınması doğru değildir. Kalıp çeliklerinin seçilmesinde, kimyasal etkileşmeye dayanıklılık, yüzey sertleştirilmesi ve işlenebilirlik

özelliklerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte, kalıbın tasarım boyutları, yüzey parlatılabilirliği, kaynak edilebilirliği gibi parametreler de ön planda tutulmalıdır. Artan kalıp ölçüleri, daha yüksek tokluk ihtiyacı, doğurmaktadır. Dolayısı ile uygulanacak ısı işlemler, sertleşmede deformasyon problemlerini (çarpılma, çatlama, vb.) meydana getirebilmektedir. Bu nedenlerden ötürü piyasada bulunan ön sertleştirilmiş kalıp çeliklerinin bulunması bir avantajdır. Ön sertleştirilmiş malzemelerden AISI P20+Ni (1.2738) ve AISI P20 (1.2311) 30-35 HRC aralığında fabrikasyon sertliğine sahiptir. Bu çelikler, belirtilen sertliklerde kolayca işlenebilmekte ve nitrüleme yapılarak kalıp yüzeyleri sertleştirilebilmektedir.

AISI P20+Ni çeliği ise yüzeyinden merkezine (çekirdeğine) mükemmel bir sertlik dengesi gösteren, nitrasyona ve krom kaplamaya müsait, parlatılabilirliği iyi olan plastik kalıp çeliğidir. Çizelge 2.2’de AISI P20 ve AISI P20+Ni çeliğinin fiziksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı değişimini göstermektedir.

Çizelge 2.2 AISI P20 ve AISI P20+Ni çeliğinin fiziksel özellikleri.

| Fiziksel Özellikleri | AISI P20 | | | AISI P20+Ni | | |
|--|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | 20 ⁰ C | 400 ⁰ C | 600 ⁰ C | 20 ⁰ C | 400 ⁰ C | 600 ⁰ C |
| Elastik Modülü (kN/mm ²) | 210 | 196 | 177 | 210 | 196 | 177 |
| Termal Genleşme Katsayısı(10 ⁻⁶ /K) | | 12.6 | 14.4 | | 12.7 | 14.3 |
| Isıl İletkenlik (W/mK)) | 34.0 | 33.4 | 33.0 | 32.0 | 31.1 | 30.0 |

Kalıp çeliğinin, çok iyi parlatılabilir olması, kalıplanan plastik ürünün yüzeyinde istenilen parlaklığı sağlar. Şeffaf imalat parçalarından, gözlük camları gibi optik parçalara kadar farklı uygulamalar için farklı parlaklık sağlayabilen pek çok malzeme bulunmaktadır. Kalıp çeliğinin iyi parlatılabilirliği, enjeksiyon işlemi sırasında plastiğin çelik yüzeyindeki gözeneklere dolmasını yani yapışmasını engellemektedir. Yüzeylerin iyi parlatılabilmesi için kalıp çelikleri, içyapı oluşumları denetim altına alınarak ve mikro yapı temizliği yapılarak üretilmektedir (TMMOB 1999). AISI P20 ve AISI P20+Ni kalıp çeliklerinin yüzey parlatılabilme kaliteleri oldukça yüksektir. Dolayısı ile

plastik kalıp yapımında bu çelikler yaygın olarak kullanılmaktadır (MEGEP 2008).

2.2 Endüstriyel Tip Mikrodalga Fırını

Mikrodalga frekans aralığı 03-300 Ghz arası değişebilmektedir. Evde kullanılan veya sanayi tip mikrodalga fırınlarının çalışma frekansı ise 2.45 Ghz'dir. Bu yaklaşık olarak 12.2 dalga boyuna ve 1.02×10^{-2} enerjiye tekabül etmektedir (Jones *et al.* 2002, Kayali 2016). Malzemelerin Mikrodalga Fırınlarında ki ısıtılması, Geleneksel Kül Fırınlarından farklıdır. Mikrodalga Fırınlarında ki ısıtmalar malzemenin içinden (merkezinden) dışına doğru ısı transferi gerçekleşmektedir. Geleneksel Kül Fırınlarında ki ısıtmalar ise; ısı transferinin dışarıdan içeriye (malzeme merkezine) doğru ısı akışı gerçekleşmektedir. Mikrodalga ısıtmanın şu avantajları vardır; yüksek ısıtma hızına çok kısa sürelerde ulaşması, ısı kaynağı ve ısınan malzeme ile arasında doğrudan kontak olmaması avantajları arasındadır. Mikrodalga fırınının bu üstün özellikleri göz önüne alındığında enerjinin ve zamanın efektif kullanılması avantajları arasındadır.

Bu çalışmada, borlama işlemi için endüstriyel tip 2200W gücünde Phoneix marka mikrodalga fırını kullanılmıştır. Mikrodalga fırınının çalışma sıcaklık aralığı 20-1200°C arasında değişmektedir. Mikrodalga fırının çalışma gerilimi 230 Volt ve çalışma frekansı 2.2 Ghz olup sıcaklık hassasiyeti $\pm 1^\circ\text{C}$ dir.

2.3 Bor Cevheri ve Borlama Hakkında Bilgiler

2.3.1 Bor Cevheri Nedir?

Bilim adamlarının birçoğu '21. yüzyılın petrolü' olarak gördüğü bor; birçok sektörde yaygın kullanılmaktadır. Bu sektörler; uzay, nükleer, bilişim ve metalurjiye kadar birçok endüstri dalında yaygın kullanılmaktadır. Bor madeni ülkemizin elinde bulunan önemli bir maden konumunda olmasına rağmen, bor cevherini zenginleştirme işlemini yeterli miktarda yapamamaktayız (Çınkır 2001).

Bor cevherlerinin Türkiye de bulunduğu bölgeler Eskişehir/Kırka, Kütahya/Emet, Balıkesir/Bandırma, Kestelek, Hisarcık, Bigadiç, Susurluk ile sınırlanmaktadır. Bu

bölge aynı zamanda dünya bor cevheri rezervinin de %70'ini barındırır (İnt. Kyn. 1).

Bor periyodik tabloda III A grubunda bulunmaktadır. Bor metal ile ametal arası yarı iletken özelliklere sahiptir. Bor cevherinin atom numarası 5, borun atomik kütlesi 10.81'dir. Borun ergime noktası 2190°C'dir. Borun kaynama noktası ise 4000°C'dir. Elektronegativitesi 2,04 olan bor, doğada tek başına bulunmaz. Bor başka elementlerle bileşik halinde bulunur (İnt. Kyn.2). Elemental borun rengi koyu kahverengindedir. Elemental bor amorf yapıdadır (İpekoğlu ve Polat 1987).

2.3.2 Bor Cevheri ve Bileşikleri

Bor cevherini ülkemiz ticari anlamda yeteri kadar çıkartmasına rağmen bu cevheri zenginleştirme konusunda Avrupa ülkelerinden geri kalmıştır. Dünyada ticari öneme sahip olan bor cevheri ve bileşikleri bulunduğu ülkeler Çizelge 2.3'te; (kolemanit, tinkal, kernit, pandemit, üleksit, szaybelit, borasit, hidroborasit gibi mineraller) verilmiştir.

Çizelge 2.3 Bor Cevheri ve Bileşikleri (Sümer 2004).

| Cevherin adı | Kimyasal Formülü | Bor oksit yüzdesi (B ₂ O ₃ (%)) | H ₂ O (%) | Çıkarıldığı Yerler |
|-------------------------|---|---|----------------------|--------------------------------|
| Datolit | Ca ₂ B ₄ Si ₂ O ₁₂ .2H ₂ O | 26,7 | 10,7 | Kazakistan, Rusya |
| Göl suları | Erimis Tuzlar | | | USA, Bolivya, Sili |
| Kernit (Razorit) | Na ₂ B ₄ O ₇ .4H ₂ O | 50 | 26,4 | Kırka, Arjantin, USA |
| Kolemanit | Ca ₂ B ₆ O ₁₁ .5H ₂ O | 50,8 | 21,9 | Bigadiç, Emet, Küçükler, USA |
| Pandemit(Priseit) | Ca ₄ B ₁₀ O ₁₉ .7H ₂ O | 49,8 | | Sultançayır, Bigadiç |
| Probertit | Na ₂ CaB ₅ O ₉ .5H ₂ O | 49,6 | 25,6 | Kestelek, Emet, USA |
| Sasolit (Doğal B. Asit) | H ₃ BO ₃ | 56,3 | 43,7 | İtalya |
| Szaybelit | MgBO ₂ (OH) | 41,4 | 10,7 | Çin, Kazakistan |
| Tinkal (Boraks) | Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O | 36,5 | 47,2 | Kırka, Bigadiç, Emet, USA |
| Üleksit | Na ₂ CaB ₅ O ₉ .8H ₂ O | 43 | 35,6 | Kırka, Emet, Bigadiç, Arjantin |

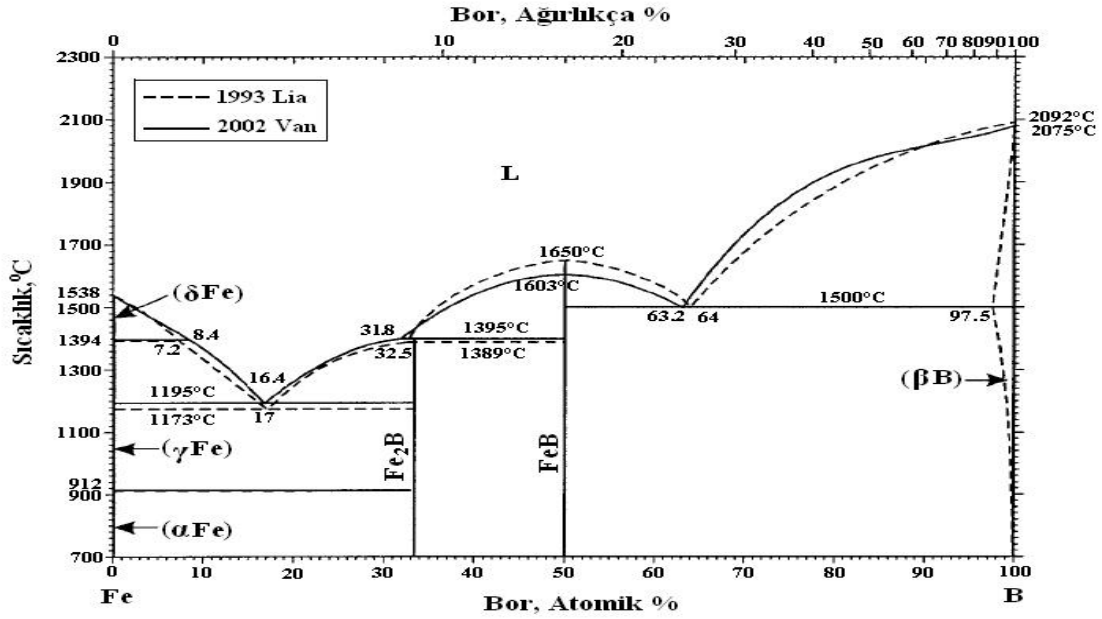
Bor madeni doğada serbest halde bulunmamaktadır. Bor elementi, doğada değişik formlarda bulunur. En sık bulunduğu form B_2O_3 halindedir. Birçok mineralin içinde bulunan bor cevheri, ekonomik anlamda bor cevherleri magnezyum, sodyum ve kalsiyum elementi ile birlikte bunların hidrat bileşikleri şeklinde bulunmaktadır (İnt. Kyn. 2).

2.3.3 Demir Bor Denge Diyagramı

Borlama işlemi ile bor atomları demir içerisinde arayer katı eriyik çözültisi halinde çözünür. Ancak bor atomları demirle FeB ve Fe_2B arayer intermetalik bileşiklerini oluşturur. Çelik alaşımlarında, alaşım elementlerinin arayer katı eriyiği veya yer alan şeklinde davranacakları Hume-Rothery kuralları sayesinde belirlenebilmektedir (Hayashi and Sugeno 1970).

Hume-Rothery kuralları içinde en önemli faktör atomik dolgu faktörüdür. Fe-B ikili denge sisteminde bor atomunun yarıçapı, demir atomunun yarıçapına göre %27 daha küçük olmasından dolayı bor demirle katı eriyik yapabilmektedir. α -Fe'de bulunan bor hem yeralan, hem de arayer pozisyonunda bulunabilir. Demir içerisinde bor ppm mertebesinde çözünebilir. Düşük sıcaklıklarda demirin (Fe) içerisinde bor'un çözünürlüğüne bakıldığında 1/50 oranında ara yer atomu olarak eridiği görülmüştür. Bor atomlarının büyük bir oranı ise demirin içerisinde yeralan atomu olarak eridiği görülmüştür (Şen 1997).

Demir Bor Denge Diyagramı şekil 2,1'de gösterildiği gibi, % 7,2 de bor konsantrasyonunun $1394^{\circ}C$ 'de bir peritektik reaksiyon yer almaktadır. $911^{\circ}C$ 'de gerçekleşen dönüşüm reaksiyonu γ -Fe+ Fe_2B fazından α - Fe_2B 'ye dönüşür. Fe-B ikili denge diyagramına bakacak olursak, %17 Bor'daki bileşiminde $1173^{\circ}C$ 'de ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir. $1389^{\circ}C$ 'de peritektik reaksiyon gerçekleşmektedir. % 32,5 Bor bileşiminde Fe_2B fazının olduğu görülmektedir. Fe_2B fazının erime sıcaklığı $1389-1410^{\circ}C$ arasında olduğu ve FeB fazı $1500-1650^{\circ}C$ 'de olduğu görülmektedir. %63,2 ve $1500^{\circ}C$ 'de bir ötektik reaksiyon gerçekleşmektedir (Yapar 2003).



Şekil 2.1 Demir Bor denge diyagramı (Okamoto 2004, Dalar 2013).

2.3.4 Borlama İşleminin Olumlu ve Olumsuz Yönleri

Borlama işleminin olumlu yönleri aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

- Borlama işlemi nitrüleme işlemiyle karşılaştırıldığında borlanmış yüzeylerin çok daha yüksek sıcaklıklarda sertliğini muhafaza ettiği görülmüştür.
- Borlanmış malzemeler korozyona karşı maksimum yorulma dayanımı sergilemiştir (Jain 2002).
- Borlama ile çok geniş bir aralıktaki çelikler borlanabilmektedirler (Ekmekçiler 2006).
- Borlama, özellikle sertleşebilir birçok çelik grubuna uygulanabilir (Sinha 1991).
- Katı hal kaynağına eğilimi azdır.
- Borlanan malzemelerin yüzeyleri çok hassas bir şekilde parlatılabilir (Petrova 2005).
- Isıl işlem uygulanabilen malzemelerin mekanik özellikleri borlandıktan sonra tamamen değişmektedir.

Borür tabakasının yüksek sertlik değerlerinde olması, malzemenin aşınmaya karşı direncini yükseltir. Bu mekanik özellikler, kalıp tasarlarken veya imalatı esnasında malzemenin kolay işlenmesini sağlamaktadır. Endüstride malzeme maliyetlerinin ucuz

olması istenildiği için malzemeye daha sonradan mekanik özellikleri üzerinde oynayarak yeni özellikler kazandırılır (Şen 1997).

Borlama prosesinin olumsuz yönleri aşağıda sıralanmıştır;

- ✓ Borlama teknikleri esnek değildir.
- ✓ Çok hassas toleranslarla çalışmak gerektiği zaman kaplamanın işlenmesi elmas takımlarla mümkün olmaktadır.
- ✓ Bu yöntemde otomasyonun çok zor olması nedeniyle elle çalışma zorluğu gerektirmesi ve atık ürünlerin çevreye verdiği olumsuz ve zararlı etkilere sahiptir.
- ✓ Borlama işleminin ana dezavantajı ise oluşan bor tabakaları arasında sertlik geçişlerinin çok keskin olmasıdır (Sinha 1991, Tabur 2008).
- ✓ Malzeme yüzeyinin ileri teknolojik yöntemlerle işlenmemesi oluşan bor kaplama tabakasında kırılma ve çatlamalara neden olmaktadır (Şen 1997, Ersöz 2008).

2.3.5 Borlama Yöntemleri

Teknolojik gelişmelerden etkilenen borlama farklı yöntemleri de beraberinde getirmiştir. Bu yöntemleri iki ana grupta toplayabiliriz. Bu yöntemler ise;

- 1- Termokimyasal olan yöntemler (Sinha 1991).
- 2- Termokimyasal olmayan yöntemleridir (Sinha 1991, Fichtl *et al.* 1987).

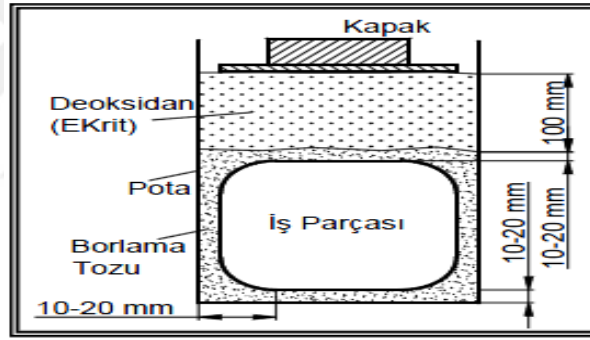
Borlama yöntemlerinde en sık tercih edileni ise termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama prosesi, belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir sürede bor atomlarının metale yayınımına dayanan yüzey sertleştirme yöntemidir (Sinha 1991, Fichtl *et al.* 1987).

Dünya da bor kaplama yöntemleri ülke ülke farklılık göstermektedir. Örneğin Almanya'da katı ortamda borlama yaygın bir şekilde kullanılırken, Rusya'da ise sıvı ortamda borlama işlemi yaygın bir şekilde tercih edilmekte ve kullanılmaktadır (Hegewaldt *et al.* 1984).

Termokimyasal kaplamayı dört ana grupta toplayabiliriz (Şen 1997).

2.3.5.1 Kutu Borlama

Kutu borlama prosesi, kolay donanım gerektirmesi, ekonomik ve güvenli olması tercih edilmesinin başlıca nedenlerinden biridir. Kutu borlamada kullanılan toz karışımının kimyasal bileşiminde oynanabilmesi onun çok fazla tercih edilmesinin başlıca etkenlerinden biridir. Kutu borlama prosesi, borlama işlemine tabi tutulacak numunenin bor verici ortamdaki toz karışımı içerisinde belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir sürede bekletilmesi ile yapılır. Yüzeyi borlanacak malzeme çelik pota (kutu) içerisine hazırlanan toz karışımı konulur. Daha sonra yüzeyi borlanacak metalin etrafına en az 10-20 mm civarında bor tozu eklenir. Metal numunenin üzerine toz karışımı eklenir çelik pota içerisindeki tozların üzerine SiC tozu eklenir ve çelik potanın kapağı kapatılır. Çelik pota fırın içerisine konularak borlama işlemine başlanmış olunur. Şekil 2.2’de borlama prosesinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2 Kutu borlama işleminin şematik görünümü (Meriç vd. 2000).

Borun tane boyutu ne kadar küçük ise malzemeye temas edeceği yüzey alanı o kadar fazla olur. Borun temas yüzeyinin artması difüzyonu kolaylaştıracaktır. Difüzyonun homojen dağılmasına ve dolayısıyla oluşacak borür tabakasının kalınlığını artırdığı gibi malzemenin sertliğini de artıracaktır (Meriç vd. 2000).

Çizelge 2.4 Mikro-dalga fırınında borlama işlemi için kullanılan bor madenlerin özellikleri (Graf and Matushcka 1977).

| Malzeme | Formül | Molekül Ağırlığı (gr.) | Teorik Miktarı (%) | Ergime Sıcaklığı (°C) |
|------------|------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| Amorf Bor | B | 10,82 | 97-97 | 2050 |
| Ferro-Bor | - | - | 17-19 | - |
| Bor Karbür | B ₄ C | 55,29 | 77,28 | 2450 |

Katı borlamada kullanılan bor cevher kaynağı olarak kullanılan tozların karışımlarına ait bileşikler ve % ağırlıkları aşağıda gösterilmiştir (Uzun 2002).

1. % 60 B₄C + % 5 B₂O₃ + % 5 NaF + % 30 Demir oksit
2. % 20 B₄C + % 5 KBF₄ + % 75 Grafit
3. % 80 B₄C + % 20 Na₂CO₃
4. % (80-40) B₄C + % (20-60) Fe₂O₃
5. % 84 B₄C + % 16 Na₂B₄O₇
6. % 100 B₄C
7. % 50 Amorf bor + % 1 NH₄F.HF + % 49Al₂O₃
8. % (7,5-40) B₄C + % (2,5-10) KBF₄ + % (50-90) SiC
9. % 95 Amorf bor+% (3-5) KBF₄

Endüstriyel alanda kullanılmakta olan katı ortam borlama maddeleri toz ve granül halinde bulunmaktadır (Taşçı 1993, Ünüvar 2013).

Bunları aşağıda sıralamak gerekirse:

Ekabor I: Toz halinde bulunur.

Ekabor II: Granül halinde bulunur.

Ekabor III: Granül halinde bulunur.

Ekabor HM: Özel olarak hazırlanmış olan Ekobar HM sert malzemeler için kullanılır.

Ekabor Ni: Nikel ve nikel alaşımların borlanması için kullanılmaktadır.

Ekabor pasta: Macun şeklinde olan Ekobar pasta metalik malzemelerin borlanması için istenilen bölgeye sürülerek uygulanır.

Katı borlama prosesinde kullanılan bor mineralleri; bor karbür, ferrobör ve elemental bördür. Bunların içerisinde en çok kullanılanı ise bor karbüdür (Şahin 1999).

Campos vd. (2013), AISI 1045 çeliğini 950°C sıcaklığında 8 saat, 10 saat ve 12 saat katı borlama yöntemi ile borlama işlemi gerçekleştirmişler. Yayınım işlemi için, SiC tozu ve bentonit seyreltici bir atmosferde 8 saat 1000°C sıcaklıkta bekletilerek AISI 1045

çeliğini borlamışlar. Tabaka kalınlığını 50 µm olarak ölçmüşler. Elde ettikleri kaplamaların, radyal-medyan modu ile borit kaplamasının çatladığını belirtmişlerdir. Borit kaplamaların kırılma dayanımı difüzyonun tavlama etkisi, kutu borlama işlemi ile yapılan kaplamalarla karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %50'lik bir artışın olduğunu tespit etmişler (Campos-silva *et al.* 2013).

Özer ve Ay (2012) çalışmalarında, AISI1020, AISI1060 ve AISI4140 çeliklerini 840°C, 880°C, 920°C ve 960°C'de 2 saat, 4 saat, 6 saat ve 8 saat bekletme sürelerinde katı borlama işlemini yapmışlardır. Borlanmış oldukları çelikleri bor tabakaları kalınlığı açısından kıyaslamışlar. Deneyler de kullanılan çelikler içerisinde AISI 1020 çeliğinin diğer çeliklere nazaran, daha fazla bor tabakasının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bunu AISI1060 ve AISI4140 çeliğinin takip ettiğini belirtmişlerdir. AISI1020 çeliğinin diğer çeliklere nazaran daha fazla tabaka kalınlığının oluşmasının nedenleri alaşimsız yapıda olması ve daha düşük Karbon (C) miktarından kaynaklandığını saptamışlardır. Deneylerde kullanılan tüm numuneler için Bor tabaka kalınlığı, süre artışı ile arttığını tespit etmişlerdir. En az bor tabakası 840°C ve 2 saat borlamada, en fazla bor tabakası ise 960°C'de 8 saat borlama sonucunda meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Sertlik değişimi tüm çeliklerde 8 saatlik numunelerin, 2 saatlik borlanmış numunelere oranla daha yüksek sertlik değerine ulaştığını ifade etmişlerdir. Tabaka kalınlıklarını karşılaştırdıklarında ise AISI 1020 çeliğinin, AISI 1060 ve AISI 4140 çeliğine göre tabaka kalınlığının miktarı fazla olduğunu ve tabaka kalınlık miktarının matris merkezine doğru sertlik değerinde düşüşün olduğunu tespit etmişlerdir. Borlanan çeliklerde sertlik değerleri, tabakanın dış yüzeyden matris merkezine doğru gidildikçe azaldığını tespit etmişlerdir (Özer and Ay 2012).

2.3.5.2 Sıvı Borlama

Sıvı ortamlarda gerçekleştirilen borlama iki şekilde yapılmaktadır. Borlama işlemi elektrolit çözeltisinde elektrik akımı uygulanarak gerçekleşiyorsa 'elektrolitik borlama' elektrik akımı uygulanmıyorsa 'normal sıvı ortamda borlama' olarak adlandırılır. Sıvı ortamda borlama prosesi, tuz çözeltisi (eriğiği) içerisinde elektrolitik veya elektrolitiksiz (daldırma) ve farklı derişik çözeltelerde yapılmaktadırlar (Çalık 2005).

Bu yöntemlerin olumsuz yöneleri de mevcuttur.

- ❖ Borlanan çelik üzerinde tuz kalıntılarının kalması ve ortamda reaksiyona girmeyen borun varlığı zaman ve enerji kaybına neden olur.
- ❖ Sıvı borlama işleminin başarıyla yapılabilmesi için çözeltinin viskozitesinin artırılmaması gerekir ve çözeltiye tuz ilavesi yapılır. Bu da işlemin maliyetini artırır.

İşlem için malzemeyi korozif ortamlardan koruyacak fırınlara ihtiyaç duyulur (Bektaş 2006). Sıvı borlama için kullanılan bor sağlayıcı maddeler çizelge 2.5'te belirtilmiştir.

Çizelge 2.5 Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri (Karslı 2005).

| Malzeme | Formül | Molekül Ağırlığı (gr.) | Teorik Bor Miktarı (%) | 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 | $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ | 201,46 | 21,50 | 741 |
| Metaborikasit | HBO_2 | 43,83 | 24,69 | - |
| Sodyum borflorür | NaBF_4 | 109,81 | 9,85 | - |
| Borikasit(susuz) | B_2O_3 | 69,64 | 31,07 | 450 |
| Borkarbür | B_4C | 55,29 | 78,28 | 2450 |

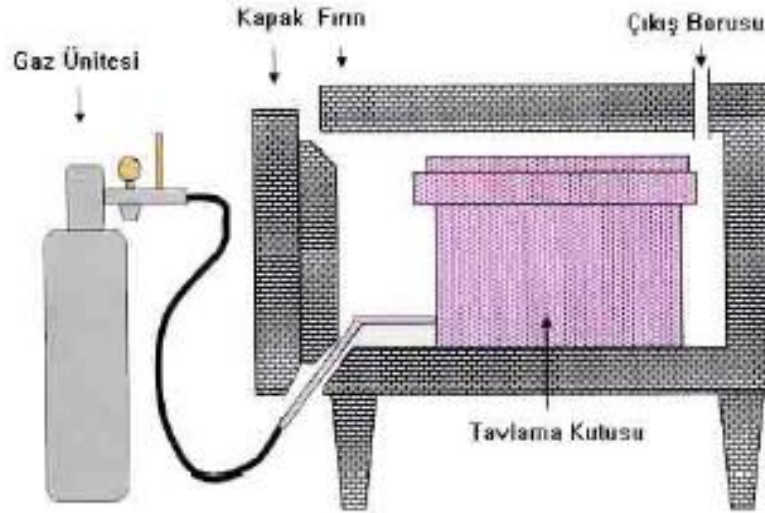
Oliveira ve arkadaşları 2010 yılında yapmış oldukları çalışmada, AISID2 çeliğini 800°C ve 1000°C'lik sıcaklıklarda 4 saat bekletme süresiyle Ferro-titanyum ile Alüminyum boraks içeren elektrolitik çözeltilerde sıvı ortamda borlama işlemine tabi tutmuşlar. Elektrolitik banyo içerisindeki bileşime bağlı olarak, Fe_2B veya FeB 'un daha baskın olduğunu tespit etmişler. Bor tabakalarının testere dış morfolojisine sahip olduğunu ve tabaka kalınlıklarının miktarı ise 60 ile 120 µm değerleri arasında değiştiğini ve sertlik değerlerinin 1596-1744 HV aralığında olduğunu tespit etmişlerdir.

2.3.5.3 Gaz Borlama

Borlama işleminin gaz fazında gerçekleştiği bir borlama prosesidir. Gaz borlama prosesinde bor taşıyabilen gazlar, bor halojenler veya bor hidrürlerdir (Toprak 2002).

Gaz borlamaya etki eden faktörler, ortamının bileşim basıncı ve gazın depodan akış hızı en önemli parametrelerdir. Gaz borlama işlemi 700 – 950°C sıcaklık aralığında ve 67 Kpa (0,67 bar) ve 1/15 BCl₃+H₂ gaz karışımında gerçekleştirilmektedir. Gaz borlamada gaz sirkülasyonu sonucu daha üniform bir bor dağılımı ve yayınının sağlanabilmesi, borlama işleminden sonra temizleme gerektirmemesi en önemli avantajlarıdır (Badini vd. 1987).

Bor konsantrasyonunun ayarlanabilmesinden dolayı tek fazlı homojen borür tabakası elde etmek mümkün olmaktadır. İşlem özellikle karışık şekilli parçaların borlanması ve homojen tabaka elde etmek istenildiğinde tercih edilen bir yöntemdir. Gaz borlama prosesi şekil 2,3’de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Gaz ortamında borlamanın şematik gösterimi (Yünker 2000).

Bunun yanında bazı dezavantajları ise şunlardır;

- Di-boran (B₂H₆), H₂ ile beraber uygulanırsa çok olumlu sonuçlar verir, fakat zehirli ve patlayıcıdır.
- Trimetil bor (CH₃)₃B ise; borlama prosesi ile birlikte C yayınına sebep olur ve oluşan tabaka kalitesini bozmaktadır.
- Ortamın zehirliliği, patlama tehlikesi ve tesisatın pahalı oluşu prosesin kötü yönleridir.

Çizelge 2.6’te çeşitli gaz borlamada kullanılan bor bileşikleri verilmiştir.

Çizelge 2.6 Gaz halindeki bor bileşikleri ve bazı özellikleri (Sinha 1991, Şen 1997).

| Gazlar | Kimyasal Formül | Molekül Ağırlığı (gr.) | Teorik Bor Miktarı (%) | Donma Noktası (°C) |
|----------------|------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Bor Tri Borid | BBr_3 | 250,57 | 4,32 | -46,0 |
| Bor Tri Florid | BF_3 | 67,82 | 15,95 | -128,8 |
| Bor Tri Klorid | BCl_3 | 117,9 | 9,23 | -107,3 |
| Bor Tri Etil | $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ | 98,01 | 11,04 | -94,0 |
| Bor Tri Metil | $(\text{CH}_3)_3\text{B}$ | 55,92 | 19,35 | -161,5 |
| Di-Boran | B_2O_3 | 26,69 | 39,08 | -165,5 |

2.3.5.4 Pasta Borlama

Kutu borlama işleminde zaman faktörü önemli olduğu durumlarda yani kısa sürelerde borlama işlemi gerçekleştirmek istenildiğinde ve borlama işleminde maddi yönden fazla bir yükümlülüğün olmadığı durumlarda tercih edilen borlama yöntemlerinden birisi de pasta borlamadır. Bu borlama yönteminde, %45 borkarbür ve %55 kriyolit kullanılır. Geleneksel borlama toz karışımı ise Borkarbür+Silisyumkarbür+Potasyum tetrafluoroborate ($\text{B}_4\text{C}+\text{SiC}+\text{KBF}_4$) iyi bir bağlayıcı ile kullanılmaktadır (Sinha 1991, Başman 2010).

Pasta borlama işlemi için kullanılacak toz karışımları macun haline getirilir. Borlanacak malzemenin üzerine 2 ile 5 mm kalınlığında sürülür (Jareel 1999). Malzemenin yüzeyine sürülen macun sıcak hava yardımıyla veya kurutma fırınında (etüvde) 150°C 'de kurutulması gerekmektedir. Malzemenin üzerindeki macun tabakası azaldığında macun takviyesi yapılabilir. Kurutma işlemi bittikten sonra macun ile kaplanmış numuneler önceden ısıtılmış fırına konulur. Fırın ağzı kapatılarak borlanacak sıcaklığa çıkıncaya kadar bekletilir. Önceden belirlenen borlama sıcaklığı ve borlama süresinde bekletildikten sonra numuneler, dışarı alınarak soğumaya bırakılır. Numuneler soğuduktan sonra numune yüzeyinde yapışmış olan macun (pasta) temizlenir ve böylece borlama işlemi gerçekleştirilmiş olunur (Uzun 2002).

2.3.6 Endüstriyel Uygulamalarda Borlama İşlemi

Endüstriyel alanlarda kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerini bor kaplayarak üstün özellikler kazandırmak mümkündür (Şen 1997). Bor ile kaplanmış malzemelerin endüstriyel kullanım alanları çizelge 2.7’de görülmektedir.

Çizelge 2.7 Bor ürünlerinin kullanıldığı sektörleri (İnt. Kyn.3).

| Bor Ürünleri | Kullanıldığı Alanlar |
|---|--|
| Amorf Bor ve Kristalin Bor | Askeri Piroteknik, Nükleer Silahlar ve Nükleer Güç, Reaktörlerinde Muhafaza |
| Bor Flamentleri | Havacılık için Kompozitler, Spor malzemeleri için, Kompozitler |
| Bor Halidleri | İlaç Sanayii, Katalistler, Elektronik Parçalar, Bor Flamentleri ve Fiber Optikler |
| Özel Sodyum Boratlar | Fotoğrafçılık Kimyasalları, Yapıştırıcılar, Tekstil, “Finishing” Bileşikleri, Deterjan ve Temizlik Malzemeleri, Yangın Geciktiricileri, Gübre ve Zırai Araçlar |
| Fluoborik Asit | Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler |
| Trimetil Borat | Kaplama Solüsyonları, Fluoborat Tuzlar, Sodyum Bor Hidrürler |
| Sodyum Bor Hidrürler | Özel Kimyasalları Saflaştırma, Kağıt Hamurunu Beyazlaştırma, Metal Yüzeylerin Temizlenmesi |
| Bor Esterleri | Polimerizasyon Reaksiyonları için Katalist, Polimer Stabilizatörleri, Yangın Geciktiricileri |
| Kalsiyum Bor Cevheri (Kolemanit) | Tekstil Cam Elyafı, Bor Alaşımları, Curuf Yapıcı, nükleer atık muhafazası |
| Sodyum Bor Cevheri (Üleksit ve Probertit) | Yalıtım Cam Elyafı, Borosilikat Cam |
| Borik Asit | Antiseptikler, Bor Alaşımları, Nükleer, Yangın Geciktirici, Naylon, Fotoğrafçılık, Tekstil, Gübre, Katalist, Cam, Cam Elyafı, Emaye, Sır |
| Susuz Boraks | Gübre, Cam, Cam Elyafı, Metalurjik Curuf Yapıcı, Emaye, Sır, Yangın Geciktirici |
| Sodyum Perborat | Deterjan ve Beyazlatıcı, Tekstil |
| Sodyum Metaborat | Yapıştırıcı, Deterjan, Zırai İlaçlama, Fotoğrafçılık, Tekstil |
| Sodyum Pentaborat | Yangın Geciktirici, Gübre |

2.4 Korozyon

Korozyon, metal veya ametal malzemelerin buldukları ortam ile etkileşerek doğadaki ilk hallerine dönme eğilimi göstermesi olayıdır. Korozyon sonucunda yitirilen parçalar, kullanılamaz hale gelir. Korozyon için önlem alınmaz ise harcanan emeklerin, enerjilerin ve yatırımların da boşa gitmesi demek olur. Bu nedenle korozyon kaybı çok önemli kayıptır ve telafisi olmaz. Kısaca korozyon metalin kanseridir.

Ancak, denetim dışı gelişen bir korozyon olayını denetim altına alabilmenin yolu, olayın nasıl ve neden olduğu konusunda bilgi sahibi olmayı gerektirir. Korozyonu sınıflandırmanın nedeni de budur. Sınıflandırmada ya görünüm esas alınır ve bu tür görüntülerin hangi koşullarda olabileceği araştırılır. Ya da hangi koşullarda olduğu öncelikle ele alınıp, koşullara bağlı olarak gelişim biçimi irdelenir. Sonuçta yapılan sınıflandırma, olayı denetim altına alabilme yollarının bulunmaya çalışılmasıdır (Erbil 1996).

2.4.1 Korozyon Çeşitleri

Birçok çelik grubu, buldukları ortamlarda mekanik veya fiziksel özelliklerine göre farklı biçimde korozyon hasarlarına uğramaktadırlar. Korozyon hasar tiplerini şu şekilde sıralayabiliriz.

- Üniiform korozyon
- Galvanik korozyon
- Çatlak korozyonu
- Çukur korozyonu
- Yorulmalı korozyon
- Taneler arası korozyon
- Seçimli korozyon
- Filiform korozyon
- Erozyonlu korozyon
- Aşınmalı korozyon
- Stres korozyonu
- Hidrojen kırılmalılığı
- Mikrobiyolojik korozyon
- Yüksek sıcaklık korozyonu

2.4.2 Korozyon Hızı Ölçme Yöntemleri

Korozyon hızının doğrudan ölçülmesi olanaksızdır ve korozyon hızını belirlemek üzere, çalışan bir sistem üzerinde çoğunlukla doğrudan deneysel çalışmalar da yapılamaz.

Korozyon hızı değişik ve dolaylı yollardan belirlemeye çalışılır. Korozyon problemi metale ve etkinleştii ğevre şartlarına göre şekillenir. Korozyonun hangi şekilde olduğu ve ne kadar sürede korozyon olayının gerçekleştiği birçok faktöre bağlıdır. Korozyonun hızı metalin ne kadar sürede ve ne kadar çözüdüğü olayıdır. Korozyon metal yüzeyinde düzgün dağılımlı ise ‘kütle kaybı’ yöntemiyle korozyon hızını belirlemek mümkün olacaktır. Bulunan kütle kaybı yardımı ile yüzeyin ‘incelme hızı’ da elde edilebilir. Bu yöntem çok hassas ve uzun süre aldığı için günümüz koşullarında pek tercih edilmiyor. Uzun sürecek ölçümler yerine kısa sürede yapılacak hızlı ölçümlerle korozyon hızının belirlenmesi, çağımızın gereği olarak tercih edilen bir yoldur.

Korozyon elektrokimyasal bir olay olduğundan korozyon hızının kısa zamanda belirlenebilmesi elektrokimyasal yöntemle mümkün olacaktır. Korozyon hızını ölçmede en fazla kullanılan yöntemler; Tafel ekstrapolasyon, kütle kaybı, lineer polarizasyon ve elektrokimyasal empedans yöntemleridir (Özcan 2000, Gerengi 2008, Soncu 2008, Çiftçi 2009).

2.4.2.1 Kütle Kaybı Yöntemi

Korozyonun metal yüzeyinde homojen dağılımlı olduğu koşullarda kaybolan kütle tüm yüzeydeki kayıp olacağı açıktır. Bu durumda malzemenin yüzey alanı ve yoğunluğu yardımıyla yüzeyin tamamındaki incelme de belirlenebilir. Ancak yüzeyin belirli yerlerinde gelişen ve homojen dağılım göstermeyen korozyon olayında, kütle kaybı fazla anlamlı değildir. Yerel olarak oluşan korozyon, metali o noktalardan delinmeye kadar götürebilirken, yüzeyin diğer kesimlerinde hiç korozyonun olmaması da olasıdır. Bu nedenle kütle kaybı ile korozyon hızı belirlenmek istendiğinde, öncelikle korozyonun yerel mi yoksa genel dağılımlı mı olduğu hakkında bilgi sahibi olmak gerekir.

Kütle kaybının hız olarak ifade edilebilmesi için geçen zamanının da belirtilmesi gerekir. Kısaca, korozyon hızı, birim zaman ve birim yüzeyde kaybolan kütle miktarıdır. Yüzey alanının büyüklüğü ve zaman keyfi seçilebilir, ancak SI (Uluslararası Birim Sistemi) birimlerinin kullanılması en doğal olanıdır. SI birim sisteminde alan m^2 ,

zaman ise s (saniye) olduğundan, belirtilecek hızlar rakamsal olarak çok küçük olacaktır. Bu nedenle, hızın çoğu zaman küçük ve yuvarlak rakamlarla ifade edilmesi tercih edilir. Yaygın olarak kullanılan hız birimleri; bir günde (day), bir dm^2 de, mg olarak kütle kaybıdır. Kısaca seçilen birimlerin ilk harfleri kullanılır ve mdd olarak ifade edilir. Kütle kaybı homojen dağılımlı ise ve metalin incelme miktarı belirlenmişse, incelme hızı mm/yıl ya da mil/yıl (mpy) olarak verilir (1 mil = 10^{-3} inç, 1 inç = 25,4 mm). Yukarıda açıklanan yolla korozyon hızının belirlenmesi, laboratuvar koşullarında benzer ortamlar oluşturularak veya kullanıldığı ortamlarda gerçekleştirilir. Korozyon hızı, şu formülle hesaplanır;

$$mpy = \frac{534W}{D \cdot A \cdot T} \quad (2.1)$$

Burada; W = Ağırlık kaybını (mg) cinsinden, D = Malzemenin yoğunluğunu (g/cm^3) cinsinden, A = Malzemenin yüzey alanını ($inç^2$) cinsinden, T = Geçen süreyi ise (saat) cinsinden ifade etmektedir (Pınarbaşı 1999, Gerengi 2008). Korozyon hızı Yılda mil olarak verildiğinde aşağıdaki bağıntılarla metrik sisteme çevrilebilir (Gerengi 2008).

$$1mpy = 0,0254 \frac{mm}{yıl} = 25,4 \frac{\mu m}{yıl} = 2,90 \frac{nm}{saat} \quad (2.2)$$

Sanayide kullanılanmakta olan korozyona karşı dirençli metallerin korozyon hızları yılda 1-200 mpy arasında değişmektedir. Metallerin korozyona karşı dirençleri Çizelge 2.8'de verilmektedir.

Çizelge 2.8 Bağlı korozyon dirençi (Üneri 1998, Gerengi 2008).

| Bağlı Korozyon Direnci | Yaklaşık Metrik Eşdeğerler | | | |
|------------------------|----------------------------|-----------|--------------|---------|
| | mpy | mm/yıl | μm /yıl | nm/saat |
| Çok çok iyi | < 1 | < 0,02 | < 25 | < 2 |
| Çok iyi | 1-5 | 0,002-0,1 | 25-100 | 2-10 |
| İyi | 5-20 | 0,1-0,5 | 100-500 | 10-50 |
| Orta | 20-50 | 0,5-1 | 500-1000 | 50-150 |
| Zayıf | 50-200 | 1-5 | 1000-5000 | 150-500 |
| Kabul edilemez | 200 + | 5 + | 5000 + | 500 + |

Kütle kaybı yöntemi kolay deney düzeneği ile yapılabilir olması pratikte bazı kolaylıklara sahip olmasını sağlar. Buna karşın olumsuz yönleri de vardır. Deney sürelerinin çok uzun olması ve korozyon hızının yüksek olduğu durumlarda güvenilir sonuçlara ulaşmak oldukça zordur (Topal 2007).

Korozyonun yüzeyde homojen olmadığı ve bölgesel olduğu durumlarda, kütle kaybı yetersiz kalmaktadır. Korozyonun bölgesel olduğu durumlarda metalin delinmesine sebep olmaktadır. Korozyon hızını eşitlik 2,3 gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir (Özcan 2000, Çiftçi 2009).

$$\text{Korozyon Hızı} = \frac{8760 \times 10 \times \Delta P}{A \times d \times t} \quad (2.3)$$

8760= Bir yıldaki saat (bir gün=24 saat, bir yıl=365 gün, 365x24=8760) olarak karşılığı. ΔP = Kütle kaybı (gr) cinsinden. T= Metalin korozi ortamda bulunduğu zaman (saat), A= Metalin korozi ortam etkisinde bulunan toplam yüzey alanı (cm²), d = Metalin yoğunluğu (gr.cm⁻³) değerlerini ifade etmektedir (Özcan 2000, Çiftçi 2009).

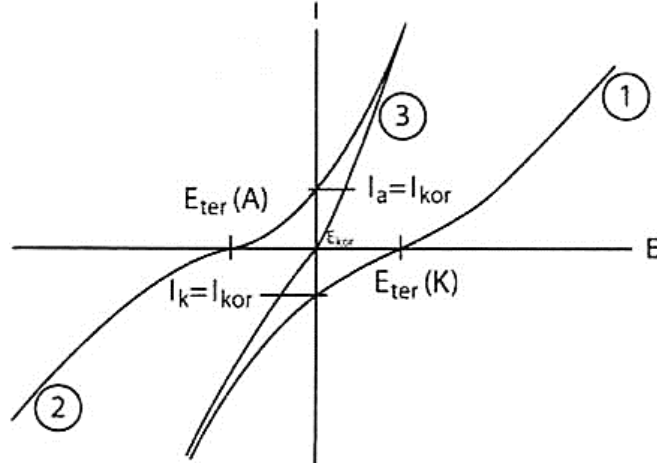
Kütle kaybı yönteminde korozyon akımı Faraday yasası ile aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$I_{\text{corr}} = \frac{\Delta m \cdot F \cdot n}{\Delta t \cdot M} \quad (2.4)$$

Burada Δm = Kütle kaybını, F= Faraday sabitini, n= söz konusu metalin çözeltiye geçme değerini, M= metalin mol kütlelerini, Δt = ise zaman aralığını göstermektedir (Soncu 2008, Çiftçi 2009).

2.4.2.2 Tafel Ekstrapolasyon Yöntemi

Korozyon, metal/çözelti ara yüzeyinde oluşan korozyon olayı en basit düzeyde bir yük transferi ile gerçekleşir. Korozyona uğrayan bir metal için, metal çözünmesi ve katodik tepkimeyi üstlenen indirgenme tepkimesi için, denge potansiyelleri ve korozyon potansiyeli dolayındaki akım-potansiyel ilişkileri Şekil 2.4 ve 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Korozyon tepkimesinin gerçekleşmesine katılan anodik, katodik ve toplam tepkime hızlarının potansiyele bağlı değişimleri, A ve K sırasıyla anodik ve katodik akım ve potansiyelleri göstermektedir.

Şekil 2.4'te $E_{ter,(K)}$ ve $E_{ter,(A)}$ olarak işaretlenen potansiyeller sırasıyla katodik ve anodik tepkimelere ait denge potansiyelleridir. Her iki denge potansiyelinden de anodik yönde (A) potansiyel değişimi dengenin anodik yönde değişmesine neden olur ve artan potansiyele bağlı olarak yükseltgenme hızı artar. Potansiyelin katodik yönde (K) değişimi ise katodik hızın yani indirgenme hızının artmasına neden olur. Dengeye iken ölçülemeyen akım polarize koşullarda ölçülebilecek hale gelir. Anodik (2) ve katodik (1) yöndeki akım artışlarının potansiyele bağlılığı üstel olduğu için, anodik ve katodik tepkimelere ait iki farklı üstel akım-potansiyel değişimini gösteren fonksiyonların toplamı (3) da üstel bir fonksiyondur. Böylece tepkimenin her birisi için anodik ve katodik yöndeki polarizasyonları birlikte temsil eden bir akım potansiyel eğrisi elde edilebilir.

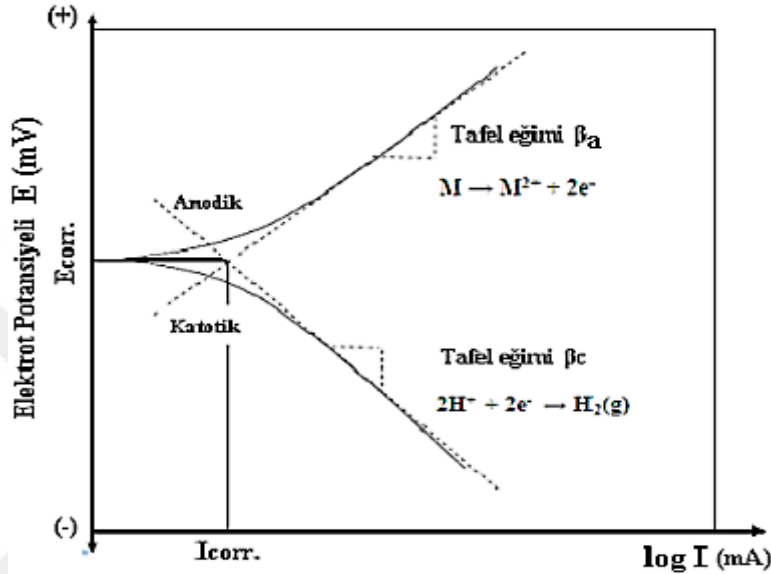
Anodik ve katodik yarı tepkimelerin oluşturduğu yeni denge potansiyeli, yani korozyon potansiyeli Şekil 2.4'te E_{kor} olarak işaretlenmiştir. Korozyon potansiyelinden sapan potansiyel de aşırı gerilim olarak adlandırılır. Ancak bu kez aşırı gerilimin değeri, $\eta = E - E_{kor}$ olarak ifade edilmelidir. Şekil 2.4'e göre, korozyon potansiyeli $E_{ter,(K)}$ potansiyelinden daha katodik bölgede olduğundan, indirgenme tepkimesini temsil eden akım potansiyel eğrisi katodik yönde polarize olmuş durumdadır. Korozyon potansiyeli anodik tepkimenin denge potansiyelinden, $E_{ter,(A)}$, daha pozitif olduğuna göre, anodik tepkime anodik potansiyellere polarize olmuştur. Bu durumda demirin anodik olarak

çözünmesi ve hidrojen iyonunun indirgenmesi kendiliğinden sürecektir. Korozyon potansiyelinde net bir akım geçişi olmadığı halde korozyon olmakta ve korozyon hızı, korozyon potansiyelindeki anodik ve katodik akım değerleri ile ilişkilendirilerek (korozyon akımı), şematik eğri üzerinde gösterilmiştir.

Şekil 2.4'de verilen şematik eğrilerden görülebileceği gibi, gerek anodik ve katodik yan tepkimeler için denge potansiyelleri dolayında ve gerekse korozyon tepkimesi için korozyon potansiyeli dolayında, anodik ve katodik akım potansiyel eğrilerini ayrı ayrı ele almak olanaksızdır. Dengede her iki yöndeki akım değerleri eşitken, dengeden az miktar sapmalar halinde anodik ya da katodik yönde bir akımın geçtiği görülmekte, ancak bir yönde net akım geçişi olmasına karşın diğer yöndeki akım değeri sıfır olmamaktadır. Anodik ya da katodik yönde polarizlenen yüzeyde polarizasyon yönündeki akım gittikçe artarken ters yöndeki akım giderek azalmaktadır. Dengeden yeterince uzaklaşıldığı zaman ters yöndeki akım değeri ihmal edilebilecek bir düzeye düşer. Ancak bu potansiyelden sonra polarizasyon yönündeki akımın sadece o yöne ait tepkimeyi temsil ettiğinden söz edilebilir. İki üstel fonksiyonun toplamından oluşan akım potansiyel eğrisinde, anodik ya da katodik tepkimelerin herhangi birinin tamamen sıfırlanması olanaksızdır. Yapılacak ihmal bir kabulden öteye geçmez ve Tafel tarafından, dengeden 50-60 mV uzaklaşıldığı zaman diğer yöne ait akımın ihmal edilebileceği ileri sürülmüştür. Tafel yaklaşımına göre dengeden 50-60 mV sapan bir sistemde geçen akımın artık polarize edilen yöndeki tepkimeye ait olduğu kabul edilmektedir.

Ölçülen korozyon potansiyelinden itibaren anodik ya da katodik yönde değişik potansiyeller uygulayıp ölçülecek akımlar yardımıyla yan logaritmik akım-potansiyel eğrileri oluşturulabilir. Korozyon potansiyeli dolayında ölçülen akım potansiyel değerleri Tafel denklemi uyarınca grafiğe geçirildiğinde, düşük aşırı gerilimlerde grafiğin doğrusal olmadığı görülür. Doğrusallık Tafel yaklaşımının belirlediği aşırı gerilimlerden (50-60 mV) sonra başlar. Elde edilen grafiğin Tafel grafiği olarak değerlendirilebilmesi doğrusal değişimin görüldüğü potansiyellerden sonra olanaklıdır. Doğrusal bölgeye ulaşıldıktan sonra, çizilen doğrunun geriye doğru, aşırı gerilimin sıfır olduğu potansiyele, yani korozyon potansiyeline kadar ekstrapolasyonu yapılarak

korozyon akımını belirlemek olanaklıdır. Bu diyagramın ayrıntısı gösterilmeden, sadece doğrusal kısımlar çizilerek gösterilen şematik Tafel eğrileri “Evans Diyagramları” olarak da adlandırılır. Böyle bir diyagram Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Şekil 2.5’te, deneysel olarak ölçülebilecek akım potansiyel değerlerinin değişimi ve bu değerlerden Tafel doğrusunun çizimi sürekli çizgilerle gösterilmiştir. Kesikli çizgilerle gösterilen diyagram ise Tafel doğrularının genel gidişini gösteren Evans diyagramlarıdır.



Şekil 2.5 Anodik ve katodik polarizasyon eğrileri (Yakar 2006).

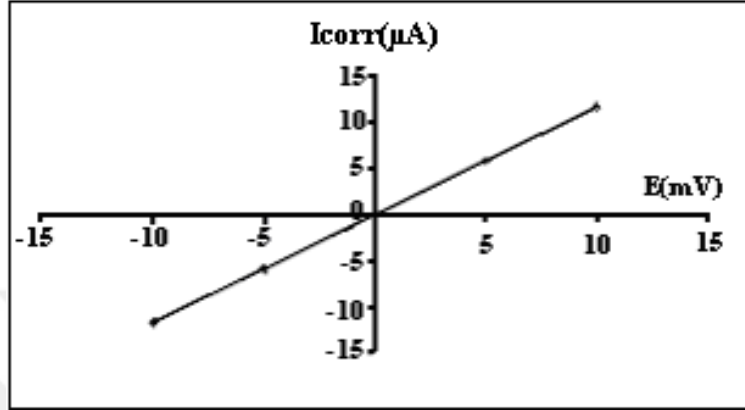
2.4.2.3 Liner Polarizasyon Yöntemi

Korozyon potansiyelinden dolayı akım-potansiyel eğrisinin doğrusal kısmının eğimi $\Delta I / \Delta E$ 'yi tersi ise R_p polarizasyon direnci bulunur. Şekil 2.6'da Stern-Geary eşitliğinde yerine konulduğunda korozyon direnci belirlenebilir.

$$I_{corr.} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \times \left[\frac{\Delta I}{\Delta E} \right] = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2,303(\beta_a + \beta_c)} \times \left[\frac{1}{R_p} \right] = \frac{B}{R_p} \quad (2.5)$$

Burada $I_{corr.}$ korozyon akımını ifade ediyor. β_a ve β_c ise anodik ve katodik Tafel doğrularının eğimlerini ifade etmektedir. Eşitlik 2.5'deki bağıntı en fazla 10 mV'a kadar uygulanabilmektedir. Ancak 7 mV'dan sonra doğrusallıktan sapmalar gözükülebilir. Lineer polarizasyon yönteminde potansiyelin değişme hızı (0,1-10 mV) arasındadır.

Eğer anodik ve katodik tepkimelerin Tafel sabitleri β_a ve β_c elde edilir ise korozyon hızı denklemden doğrudan hesaplanabilir. β_a ve β_c değerleri bilinmiyor ise literatüre göre $\beta_a = \beta_c = 0,12$ V değerleri alınarak B katsayısı 0,026 V kabul edilir (Özcan 2000, Yakar 2006, Topal 2007, Gerengi 2008, Revie and Uhlig 2008).



Şekil 2.6 Lineer polarizasyon yöntemi ile R_p bulunması (Büyüksağış 2003).

Lineer polarizasyon yöntemi, kütle kaybı yöntemi gibi zaman alan yöntemlere göre daha çabuk sonuç verir. Bu özellik sayesinde fazla miktarda ve hızlı ölçümler yapılabilir. Düşük korozyon hızına sahip olan malzemelerin korozyon hızını daha doğru ölçmede kullanılabilir. Kütle kaybı yöntemiyle ölçülemeyecek kadar küçük parçaların korozyon değerleri, lineer polarizasyon yöntemiyle başarılı bir şekilde hesaplanmaktadır (Gerengi 2008).

2.4.2.4 Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi Yöntemi

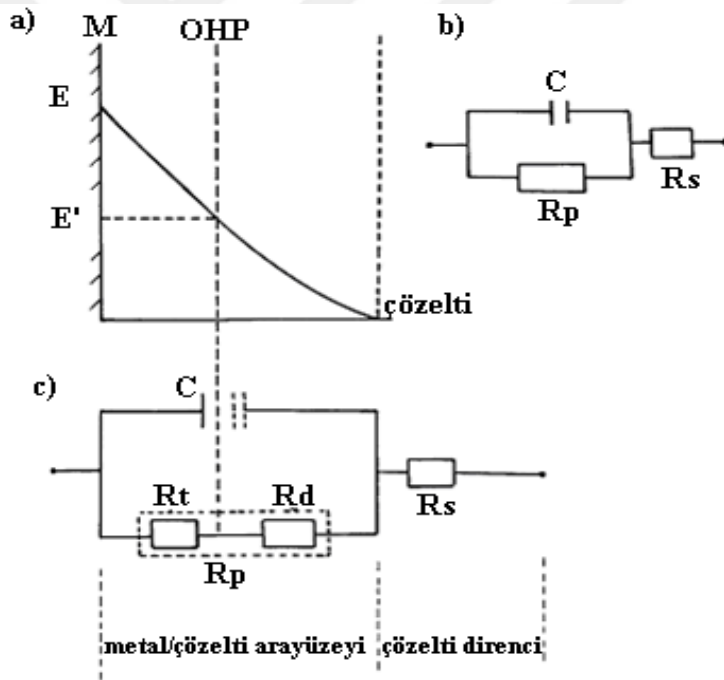
Elektrokimyasal yöntemlerden polarizasyon direnci yönteminde, korozyon mekanizmasının değişmediği belirlenirse ölçülen polarizasyon direnci değerlerinin karşılaştırılması da inhibitör etkinliğinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilir. Bilindiği gibi, bu yöntemin uygulanmasında belirlenmesi gereken bir B sabiti vardır ve bu sabit Tafel doğrularının eğimlerine bağlı olarak hesaplanır. Tafel eğimleri ve buna bağlı olarak B sabiti korozyon mekanizmasına göre farklılık gösterir. Mekanizma değişmiyorsa polarizasyon direnci değerlerinin oranından inhibitörün etkinliği belirlemek olanaklıdır. Alternatif akım empedansı yöntemi ile ölçülen direnç değeri de aynı şekilde değerlendirilebilir. Zaten, polarizasyon direnci yöntemi ve empedans

yöntemiyle belirlenen direnç değerleri kuramsal olarak aynıdır.

Doğal bir korozyon olayında metal-çözelti ara yüzeyinde oluşan elektro-kimyasal çift tabakanın Şekil 2.7a C kapasiteli bir kondansatöre eşdeğer olduğunu varsayarak Şekil 2.7b'deki elektronik eşdeğer devre verilmektedir. Şekil 2.7b'deki devreye göre toplam empedans (Z) aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Özcan 2000, Yakar 2006, Çiftçi 2009).

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + j.W.C.R_p} \quad (2.6)$$

(2.6) bağıntısında R_s çözelti direncini, W alternatif akım frekansını ($W=2\pi f$) göstermektedir ve $j=(-1)^{1/2}$ dir. (2.6) bağıntısının düzenlenmesi ile birlikte,



Şekil 2.7 Metal-çözelti arayüzeyindeki potansiyel dağılımı a: Şematik b: kabul edilen şema, c: önerilen yeni şema gösterimi (Çiftçi 2009).

M= Metal, E= Metalin elektrolit çözeltisi içindeki potansiyeli, E= Zeta potansiyeli, OHP= Dış Hemholtz tabakası, C= Çift tabakanın kapasite eşdeğeri, Rt= Yük transfer direnci, Rp= Polarizasyon direnci, Rs= Çözelti direnci, Rd= Difüzyon direnci.

$$Z = R_s + \frac{R_p}{1 + (W.C.R_p)^2} - j \frac{W.C.R_p^2}{1 + (W.C.R_p)^2} \quad (2.7)$$

2.7 bağıntısı elde edilir. Son bağıntının sağ tarafındaki ilk iki terim gerçek empedans (Z'), son terim ise kompleks empedans (Z'') olarak tanımlanmaktadır. 2.7 bağıntısının sağ tarafındaki terimlerini,

$$Z' = R_s + \frac{R_p}{1 + (W.C.R_p)^2} \quad (2.8)$$

$$Z'' = - \frac{W.C.R_p^2}{1 + (W.C.R_p)^2} \quad (2.9)$$

olarak yazıp 2.8 ve 2.9 bağıntıları arasında W yok edilirse aşağıdaki yarım daire denklemini elde edilir.

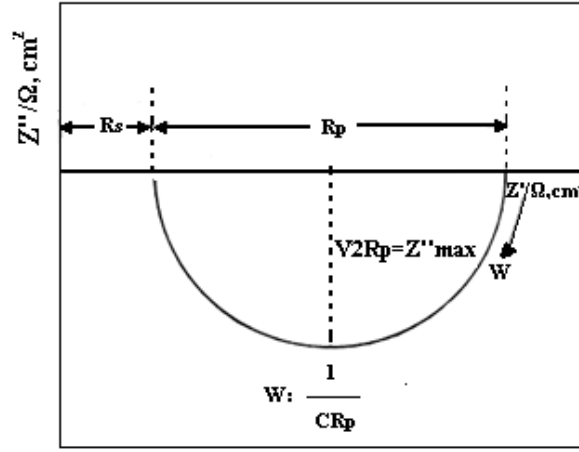
$$\left[Z' - \left(R_s + \frac{R_p}{2} \right) \right]^2 + (Z'')^2 = \left(\frac{R_p}{2} \right)^2 \quad (2.10)$$

2.10 bağıntısının ifade ettiği geometrik şekil, Şekil 2.8'te gösterilmiştir. Şekil 2.8'ten kolayca görülebileceği gibi (2.10) eşitliği yardımıyla,

$$R_s + R_p = \lim_{W \rightarrow 0} (Z') \quad (2.11)$$

$$R_s = \lim_{W \rightarrow \infty} (Z') \quad (2.12)$$

2,11 ve 2,12 bağıntıları yazılarak karmaşık diyagramdan çözümlenilen direnci olan (R_s) ile polarizasyon direncini (R_p) belirlemek mümkün olmaktadır. Ancak, teorik olarak elde edilen 2.10 bağıntısına göre yarım daire olması gereken deney sonuçları gerçekte sağlanamamaktadır (Özcan 2000, Yakar 2006, Çiftçi 2009).



Şekil 2.8 Şematik kompleks diyagramı (Çiftçi 2009).

Elektro-kimyasal empedans prosesi, boya ve kaplamalar gibi yüksek bir dirence sahip malzemelerin dirençlerinin bulunmasında etkili bir yöntemdir. Zamana bağlı olarak data elde edilebilmektedir. Deney sırasında, diğer DC metotlarına göre malzemeye daha az hasar vermektedir. Sistemin elektro-kimyasal yapısı ile reaksiyon mekanizması hakkında bize bilgi edinilmektedir (Gerengi 2008).

2.4.3 Korozyondan Korunma Yöntemleri

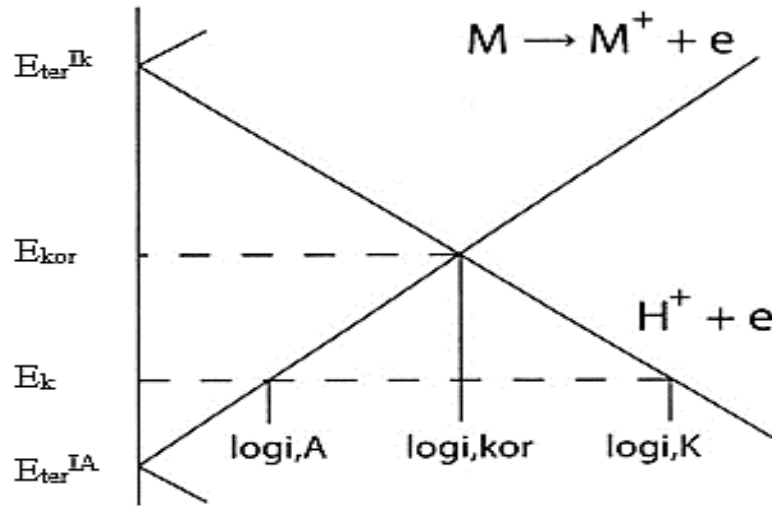
Korozyonun önlenmesi için uygulanabilecek birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerin bazıları korozyonun türüne özgüdür. Burada üzerinde durulacak yöntemler daha çok genel uygulamaları kapsamaktadır. Gerçek anlamda korozyonun durdurulması istenirse maliyeti yüksek olur ve hiçbir kuruluş bu kadar yükün altına girmek istemez. Korozyonun bir doğal olay olduğu unutulmamalıdır. Alınacak önlemler korozyonu belirli ölçülerde yavaşlatmaya yönelik olacağından ekonomik ölçülerde korozyona göz yumulması da kaçınılmaz olacaktır.

2.4.3.1 Katodik Koruma

Korozyona karşı koruma yöntemlerinin en güçlüsü katodik korumadır. Katodik koruma normal olarak, elektriksel temas halinde korozyona uğrayacak olan metalin galvanik seride kendisinden daha yukarıda yer alan metal ile birleştirilmesi sonucunda katodik

koruma sağlanır. Bunun için metale dışarıdan bir potansiyel uygulanabilir, ya da korunacak metale göre daha aktif bir metalle bağlantı yapılabilir.

Katodik korumanın genel ilkesi Şekil 2.9'da şematik olarak gösterilmektedir. Ölçülen korozyon potansiyelinden daha negatif bir potansiyel (E_k) uygulandığı zaman metalin çözünme hızı (anodik tepkime hızı, i_A) küçülmektedir. katodik tepkime hızı (i_k) ise büyümektedir. Katodik potansiyel metalin tersinir potansiyeline kaydırılması halinde metalin çözünme hızının sıfır olacağı kolayca görülebilir.



Şekil 2.9 Katodik korumanın temel ilkesi.

Uygulanan katodik potansiyel altında geçen katodik akımın değeri, katodik ve anodik tepkime hızları arasındaki farka eşittir, ($i_K - i_A$)- Katodik potansiyelin metalin tersinir potansiyeline ulaşması halinde geçen katodik akımın doğrudan katodik tepkime hızına eşit olduğu kolayca görülebilir. Yukarıda değinildiği gibi, akım potansiyel eğrilerinin eğimi değiştiği zaman geçen akımın büyüklüğü değişecektir. Elektrokimyasal tepkimelerin olabilirliği potansiyele bağlıdır. Akım değerinin büyüklüğü ise olabilen bir tepkimenin hangi hızda olduğunu gösterir. Katodik koruma uygulamalarının yapıldığı ortamlar daha çok nötr ortamlar olduğundan, katodik tepkime başlıca oksijen indirgenmesidir (Erbil 2012).

2.4.3.2 Anodik Koruma

Anodik koruma yöntemi, metalleri korozyon hasarından korumak için uygulanan farklı bir elektrokimyasal yöntemdir. Anodik koruma bir pasifleşme işlemi olarak kabul edildiğinden dolayı yalnız pasifleşebilen metallere uygulanır. Pasifleşebilen metal ya da alaşımlar anodik potansiyellerde yüzeylerinde oluşan pasif oksit tabakasının çözünürlüğü oranında korozyona uğrarlar. Korozyon hızı pasiflik akımı kadardır. Kontrolsüz şekilde yapılan bir anodik koruma uygulaması çok büyük zararlara yol açabilir (Pınarbaşı 1999, Topal 2007, Keleş 2009, Revie and Uhlig 2008, Erbil 2012,)



3. MATERYAL ve METOT

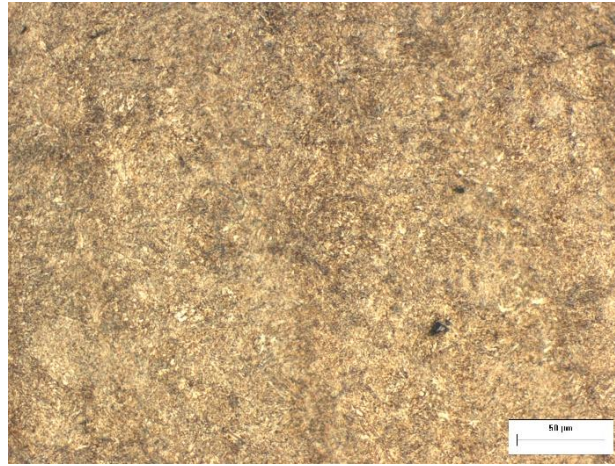
Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan çelik malzeme, deney cihazları ve kullanılan metotlar hakkında bilgiler verilmiştir.

3.1 Malzeme ve Borlama İşlemi

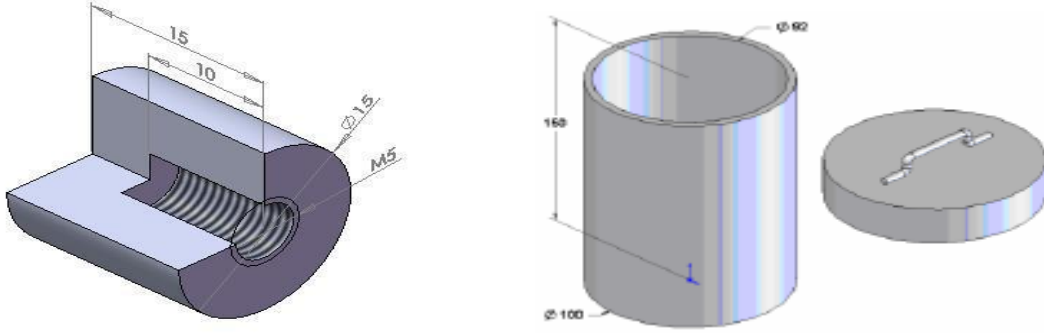
Deneysel çalışmalar için Ø15 ve Ø20 mm ebatlarındaki AISI P20 çeliği temin edilmiştir. AISI P20 çeliğinin kimyasal (spektra analizi) bileşimi çizelge 3.1’de verilmiştir. AISI P20 çeliğinin mikro yapıları şekil 3.1 verilmiştir. Deneyler için hazırlanan numunelerin ölçüleri Ø 0,75 ve Ø 1,5 mm ölçülerinde kesildi. Deneylerde kullanılan AISI P20 çeliği ve çelik pota şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Kesilen numuneleri borlamak için çelik pota kullanıldı. Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Borlam işleminin şematik gösterimi Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Deneylerde kullanılan AISI P20 Çeliğinin spektra analizi.

| Çelik Türü | Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça) | | | | | | | | |
|------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | C | Cr | Ni | Si | Mn | Mo | P | Cu | W |
| AISI P20 | 0.471 | 1.873 | 0.980 | 0.252 | 1,448 | 0,192 | 0.015 | 0,068 | 0.019 |

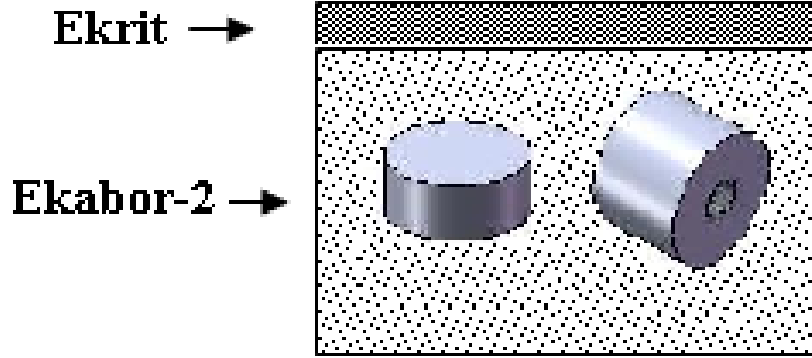


Şekil 3.1 AISI P20 çeliğin satıldığı durumda Optik mikroyapısı.



Şekil 3.2 Korozyon deneyleri için hazırlanan çelik numune ve çelik potanın şematik gösterimi.

Borlama işleminde şekil 3.3’de şematik olarak gösterilen kutu borlama yöntemi kullanılmıştır. Deney numuneleri paslanmaz çelik kutu içerisinde Ticari Ekabor®-II tozuna gömüldükten sonra, üste 5 mm kadar Ekrit tozu serpilerek kapakla kapatılmıştır. Numunelerin içinde bulunduğu paslanmaz çelik pota fırın içine konulduktan sonra fırın 800, 850 ve 900°C’de 2, 4 ve 6 saat bekletme süresinde borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işlemi bittikten sonra fırın içerisinden çıkartılan çelik kutu içerisindeki numuneler oda sıcaklığına kadar havada yavaş soğutulmuştur.



Şekil 3.3 Kutu borlamanın yapılış yöntemi.

3.2 Metalografik Çalışmalar

Borlanan numuneler hassas kesme cihazı ile kesilmiştir. Kesilen numuneler sıcak bakalite alma cihazı ile kalıp haline getirildi. Sıcak reçine için epoksi reçine kullanıldı. Kesilen numunelerin kesitleri metalografik olarak hazırlanmıştır. Numunelerin

yüzeyleri sırasıyla 120, 240, 320, 600, 1000 ve 1200 gritlik zımparalardan geçirilerek (Resim 1) zımparalandıktan sonra 3 µm'lık elmas pasta ile parlatılmıştır. % 3'lük nital ile dağlanan numuneler optik mikroskop (Resim 2, Olympus BX-60) ve XRD analizi (Bruker Marka D 8 Advance model) X-ışınları difraktometresi yardımıyla karakterize edilmiştir. X-ışınları analizinde CuK_{α} ($\lambda= 1.5406^{\circ}A$) radyasyonu kullanılmıştır. Oluşan borür tabakalarının kalınlığı optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımı ile ölçülmüştür. Borlanmış numunelerin sertlik değerleri mikrosertlik cihazı (Shimadzu HM-2) 50 gr. yük altında ve 15 sn bekletme süresi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan sertlik ölçümleri, en az 20 farklı ölçümde en yüksek ve en düşük iki değer çıkartılıp geri kalan değerlerin ortalama değerleri ve standart sapmaları alınarak sertlik değerleri tespit edilmiştir.



Resim 3.1 Numune zımparalama ve parlatma cihazı.



Resim 3.2 Mikroyapı görüntüleri için kullanılan optik mikroskop.

3.3 Deneyleerde Kullanılan Cihazlar ve Yöntem

Deneyleer esnasında kullanılan cihazlar ve özellikleri şu şekilde sıralanmıştır:

3.3.1 Mikro Dalga Fırını

Mikrodalga fırının frekans aralığı 03-300 Ghz arası olup, meskenlerde kullanılan veya sanayi tip mikrodalga fırınlarında ise 2.45 Ghz'de çalıştırılır. Bu yaklaşık olarak 12.2 dalga boyu 1.02×10^{-2} enerjiye tekabül eder (Jones *et al.* 2002, Kayali 2016). Malzemelerin Mikrodalga ısıtılması konvansiyel ısıtmalardan farklıdır bu konveksiyonel ısıtmalar malzemenin içinden dışına doğru ısı akışı olur. Mikrodalga ısıtmanın şu avantajları vardır; yüksek ısıtma hızı, ısı kaynağı ve ısınan malzeme ile arasında doğrudan kontak olmaması.

Bu çalışmada, borlama işlemi için 2200 watt gücünde, çalışma sıcaklığı aralığı 20-1200°C olan Phoneix marka endüstriyel tip mikrodalga kül fırını kullanılmıştır. Mikrodalga fırının çalışma gerilimi 230 Volt ve çalışma frekansı 2.2 Ghz'dir. Mikrodalga fırınının çalışma hassasiyeti $\pm 1^\circ\text{C}$ (Resim 3) dir.



Resim 3.3 Borlama işleminde kullanılan Mikrodalga fırının fotoğrafı.

3.3.2 Hassas Kesme Cihazı

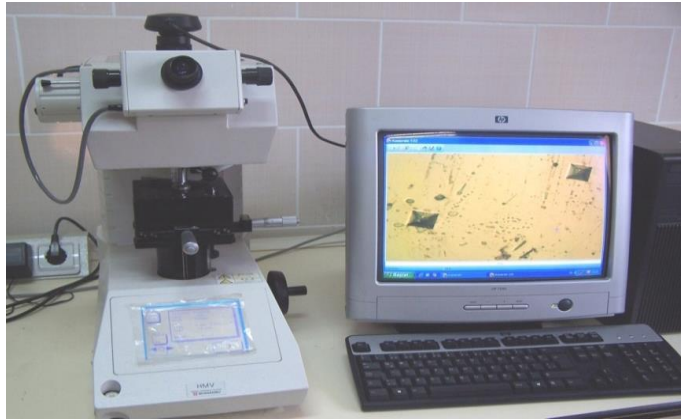
Borlanan AISI P20 çeliğinin bor tabakasının kırılmaması için numunelerin hassas kesilmesi gerekmektedir. Deney numunelerinin borür tabakalarının kırılmadan kesilebilmesi için küçük otomatik STRUERS Minitom marka hassas kesme cihazı kullanıldı. Borlanan numuneler hassas kesme cihazı ile yaklaşık olarak 12-16 saatlik düşük devir düşük hızda elmas kaplı disk ile hassas kesme işlemleri yapıldı.



Resim 3.4 Hassas Kesme cihazı.

3.3.3 Mikrosertlik Cihazı

Borlanan AISI P20 çeliğinin yüzeyinde oluşan borürlerin sertlik ölçümlerini SHIMADZU HMV-2 model sertlik cihazı ile yüzeyden 50 gr. yük altında 15 sn bekleme ile Knoop uç kullanılarak yapılmıştır. Borlanmış AISI P20 çeliğinin yüzeyinden 20 ölçüm alınarak en yüksek ve en düşük değerler atılıp geri kalan değerlerin ortalamaları alınarak sertlik değerleri hesaplanmıştır.



Resim 3.5 AISI P20 çeliğinin sertlik değerlerinin alındığı mikrosertlik cihazı.

3.3.4 X-Işınları Difraksiyonu ve Kristal Yapı (XRD) Analiz Cihazı

X-ışını difraksiyon analizi, borlama işlemi ile AISI P20 çelik numunelerin yüzeyinde oluşan borür tabakasının karakterizasyonu yapılmıştır. Borlanan numunelerin X-ışınları difraksiyon analizleri 20-90 derece arasında, $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılan Bruker Marka D 8 Advance marka X-ışınları Difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.6 Yüksek Sıcaklık X-Işınları Kırınım Cihazı.

3.4 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Borlanmış numunelerin korozyona uğrayan bölgelerinin mikroyapı analizleri LEO 1430 VP markalı taramalı elektron mikroskobunda gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.7 Mikroyapı ve tabaka kalınlığı belirlemek için kullanılan taramalı elektron mikroskobu.

3.5 Elektrokimyasal Korozyon Deneyleri

Elektrokimyasal korozyon deneyleri Gamry reference 600 potansiyostat/galvanostat ZRA ve echem analyst soft programı ile karakterize edilmiştir. Elektrokimyasal akım potansiyel eğrilerinin elde edilmesinde kullanılan cihazlar ve deney düzeneği Resim 8 ve Resim 9’da gösterilmiştir. Korozyon deneylerine başlamadan önce borlanan AISI P20 çelik numuneler 35°C’de 15 dk Aseton, 15 dk Etanol ve 15 dk çift distile edilmiş su ile ultrasonik olarak temizlendikten sonra 50°C’de Etüv de 1 saat bekletilerek kurutulmuştur.



Resim 3.8 Korozyon deneylerinde kullanılan a) Deney Düzeneği b) Deney Hücresi.



Resim 3.9 Korozyon deneyleri için hazırlanan a) Etüv b) Çiftdistile edilmiş Su Ünitesi
c) Ultrasonik banyo cihazı.

Temizlenen numuneler % 1 M NaCl çözeltisinde 1 saat bekletilerek kararlı hale gelmesi için bekletilip ve % 1 M NaCl çözeltisi için 58,44 gr NaCl 1 litre çift distile edilmiş su ile manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra % 1 M NaCl çözeltisi elde edilmiştir. Elde edilen akım yoğunluğu-potansiyel eğrilerinden korozyon akımı (I_{corr}), korozyon hızı, Polarizasyon direnci (R_p) ve korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerleri tesbit edilmiştir. Daha sonra korozyon akımının yüzey alanına bölünmesiyle korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) bulunmuştur. Herbir işlem için 3 deney yapılarak aritmetik ortalama alınmıştır.

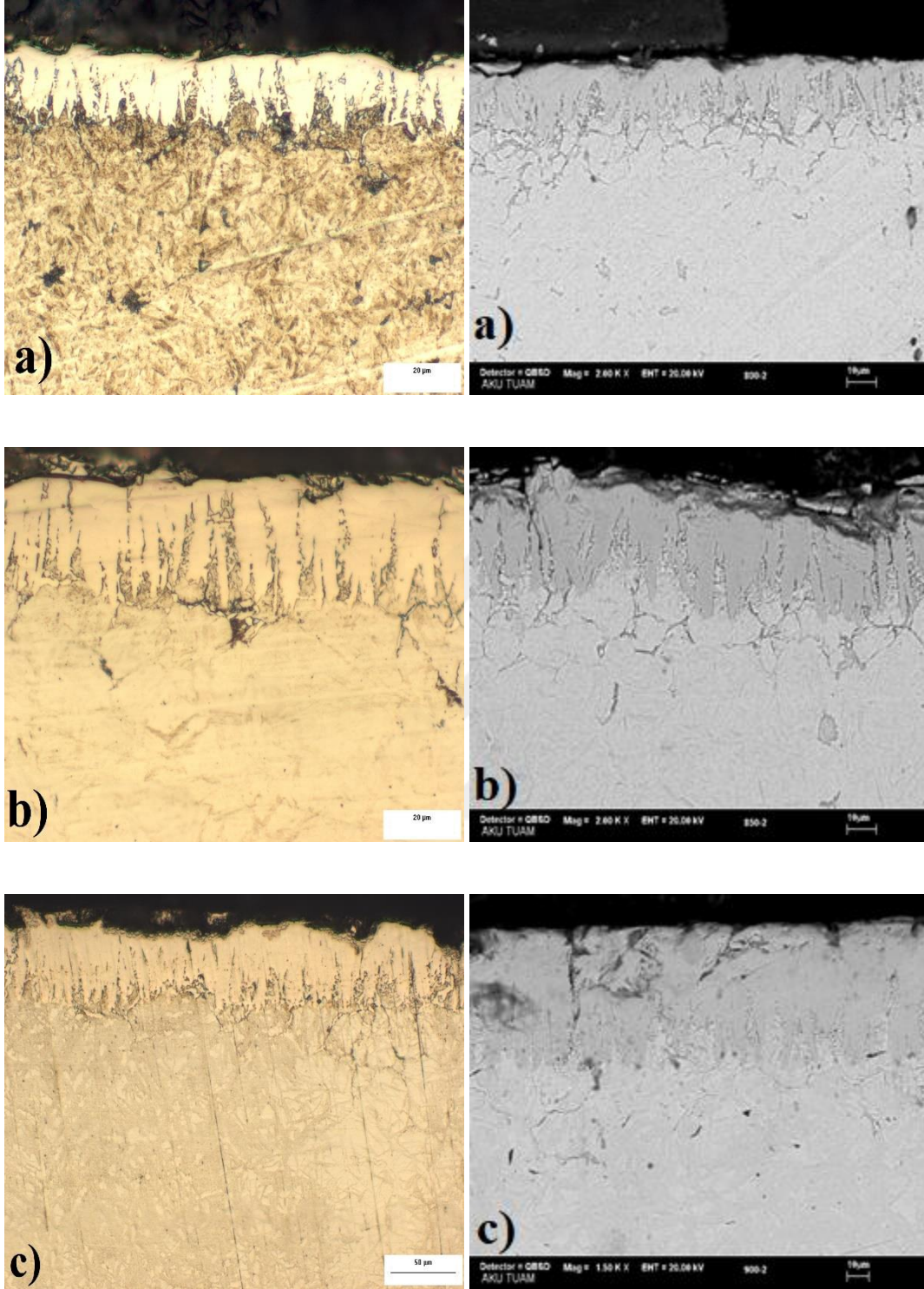
4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Borlanmış AISI P20 Çeliğinin Yüzey Karakterizasyonu

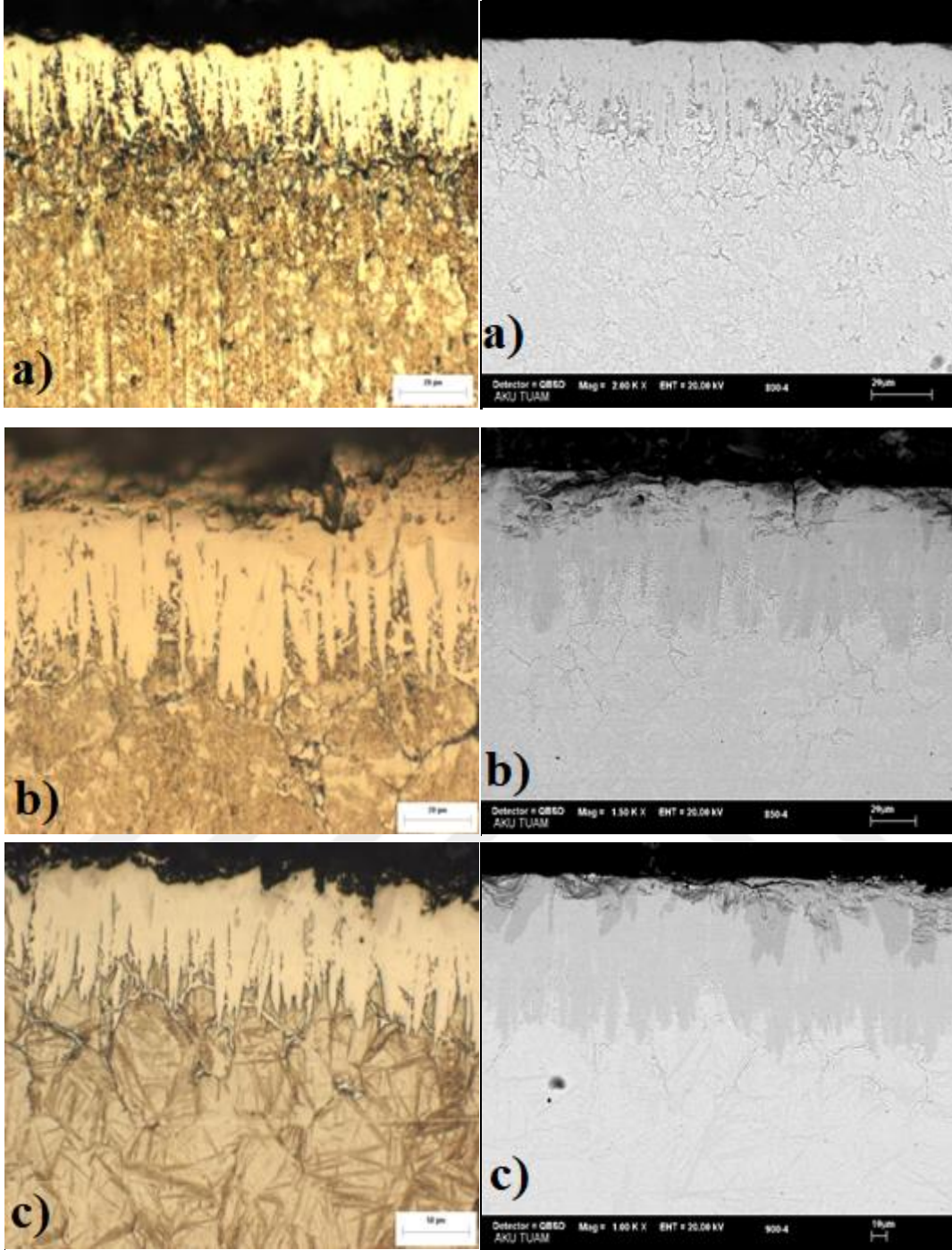
Kutu borlanan AISI P20 çeliğinin optik ve SEM mikroskop incelemeleri sonucunda; AISI P20 kalıplama çeliğinin kimyasal bileşimine göre oluşan borür tabakasının iğnesel (testere dişi) yapıda olduğu Şekil 4,1 Şekil 4,2 ve Şekil 4,3'te görülmektedir. AISI P20 çeliğinde borlama sıcaklığı ve süresine göre matris arayüzey morfolojisinin iğnesel bir yapı sergilediği ve tabaka kalınlığının sıcaklığa bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir (Uslu *et al.* 2007, Taktak, 2007).

Oluşan borür tabakası, kaplama matris arayüzeyi ve matrisin belirgin bir şekilde birbirinden ayrıldığı, borür tabakasının tüm numunelerde homojen ve artan bir kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3). Borlama sıcaklığının sabit tutulduğu ve borlama sürelerinin değiştirildiğinde bor tabakasının da değiştiği gözlemlenmiştir.

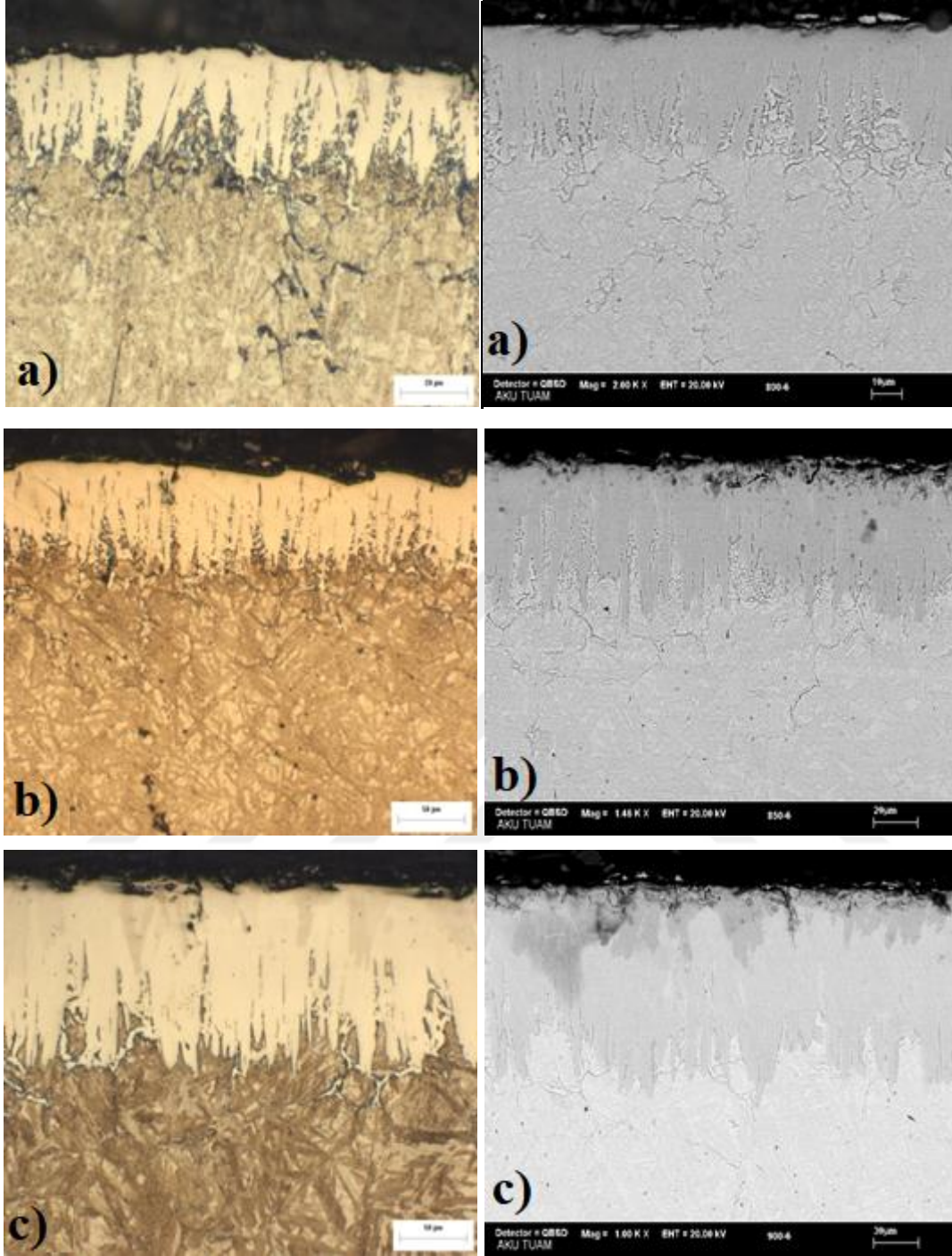
Bu durum yayınının kontrollü ve tüm kaplama ve yüzey işlemlerinde beklenebilecek bir olaydır. Ticari Ekabor-II bor tozuyla yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonuna göre FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, MnB fazları elde edilmiştir. Bu durum literatürlede uyum içerisindedir (Efe *et al.* 2008).



Şekil 4.1 a) 800, b) 850 ve c) 900°C 2 saat mikrodalga fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin optik ve SEM görüntüsü.



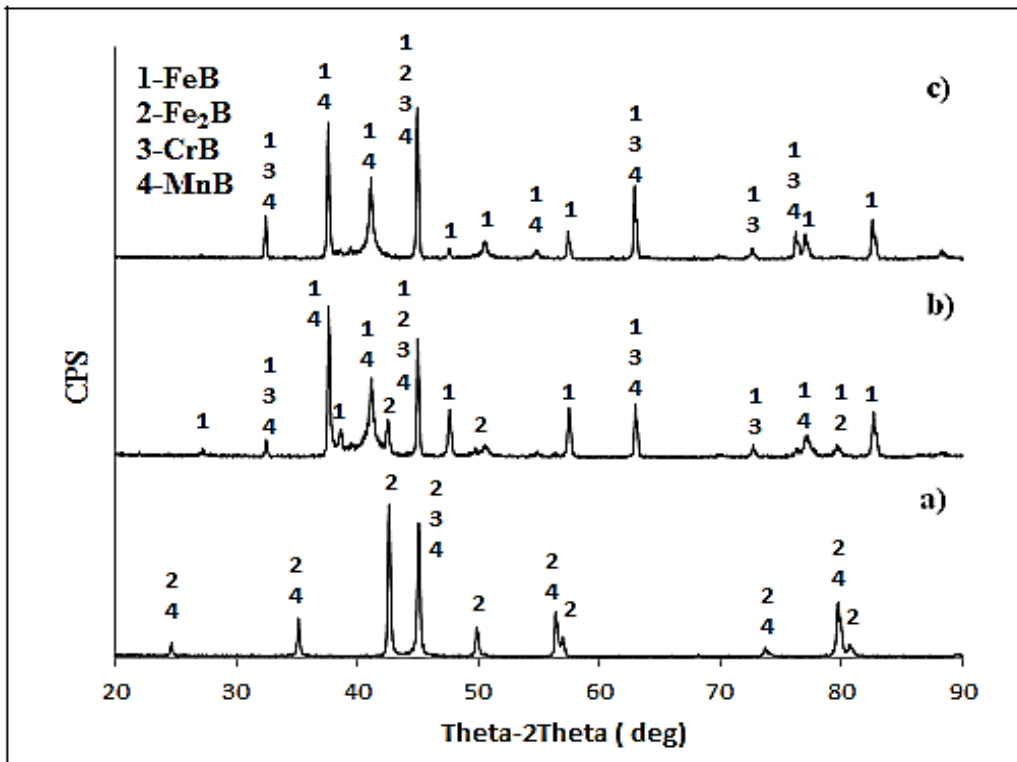
Şekil 4.2 a) 800 b) 850 c) 900°C 4 saat mikrodalga fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin optik ve SEM görüntüsü.



Şekil 4.3 a) 800 b) 850 c) 900°C 6 saat mikrodalga fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin optik ve SEM görüntüsü.

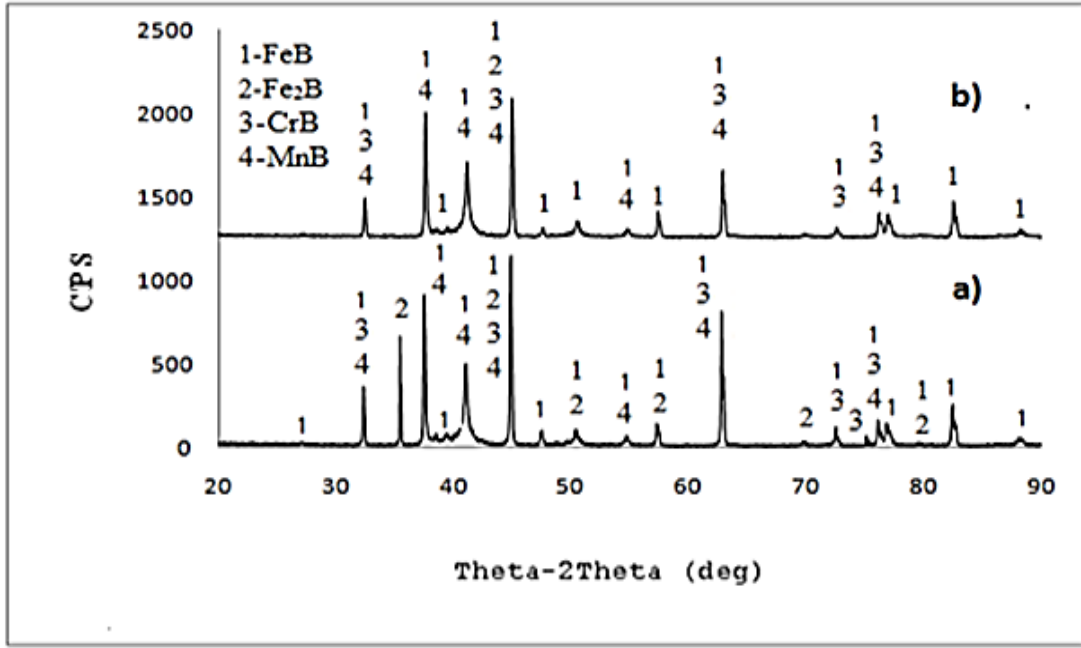
4.2 AISI P20 Çeliğinin X-Işınları Difraksiyon Analizi

Mikrodalga fırınında kutu borlama yöntemiyle yüzeyde oluşan borür kaplama tabakaları X-ışını difraksiyon analizi ile karakterize edilmiştir. AISI P20 çeliğinin X-ışınları analizlerinde çeliğin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak oluşan borür tabakasında FeB, Fe₂B, CrB ve MnB fazlarının oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5). Borlama sıcaklığının artması düşük sıcaklıklarda oluşan Fe₂B fazlarının azalmasına ve FeB fazlarının miktarının artmasını sağlamıştır (Efe *et al.* 2008, Kayalı *et al.* 2013). Sıcaklık artışı yayınımları kolaylaştırdığı için FeB fazının oluşumu hızlanmıştır.



Şekil 4.4 a) 800°C, b) 850°C, c) 900°C 4 saat kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin XRD analizleri.

Mikro dalga fırınında 900°C'de 4 saat süre ile kutu borlanmış numunelerde oluşan borür tabakasında Fe₂B fazlarının oluşmadığı görülmektedir. Bunun sebebi mikrodalğanın yüksek ısıtma hızı, ısı kaynağı ve ısınan malzeme ile arasında doğrudan kontak olmaması yüksek borlama sıcaklığında baskın olan Fe₂B fazının FeB fazına dönüşünü hızlandırmasıdır. Buna karşın Geleneksel kül fırınında borlanan AISI P20 çeliğinde ise Fe₂B fazının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 4.5 900 °C de 4 saat süre kutu borlama yöntemi ile a) Geleneksel Kül fırınında b) Mikrodalga fırınında borlanmış AISI P20 çeliğinin XRD analizleri.

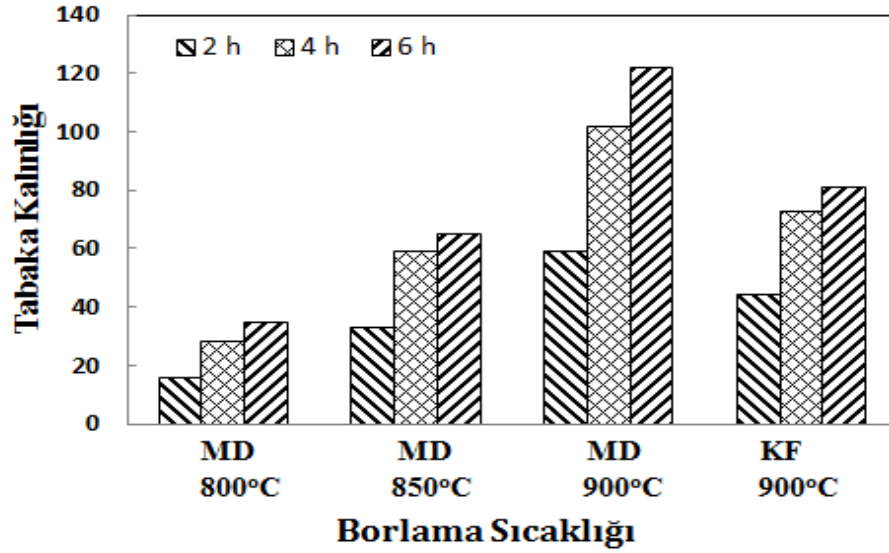
Kayalı vd. (2012), AISI 440C ve AISI 52100 çeliklerine 2,4 ve 8 saat sürelerde 850, 900 ve 950°C sıcaklıklarda Kutu borlama yöntemi ile borlama işlemi uygulamışlardır. AISI 52100 ve AISI 440C paslanmaz çelik üzerinde oluşan borid katmanlarını sırasıyla Fe₂B, FeB ve FeB, Fe₂B, CrB, MnB olarak tespit etmişlerdir (Kayalı *et al.* 2012).

4.3 AISI P20 Çeliğinin Borür Tabaka Kalınlığı

Metalografik olarak hazırlanan ve kesiti incelenen numunelerin borür tabaka kalınlıkları, numunelerin tüm kenarlarının dışından iç-merkeze (matris merkezine) doğru ölçülen değerlerin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır. Mikrodalga fırınında kutu borlama işlemleri sonucunda borür tabaka kalınlıklarının, borlama süresi ve borlama sıcaklığının değişmesiyle değiştiği görülmüştür (Uslu *et al.* 2007, Sen *et al.* 2005, Taktak 2006, Kayalı *et al.* 2013).

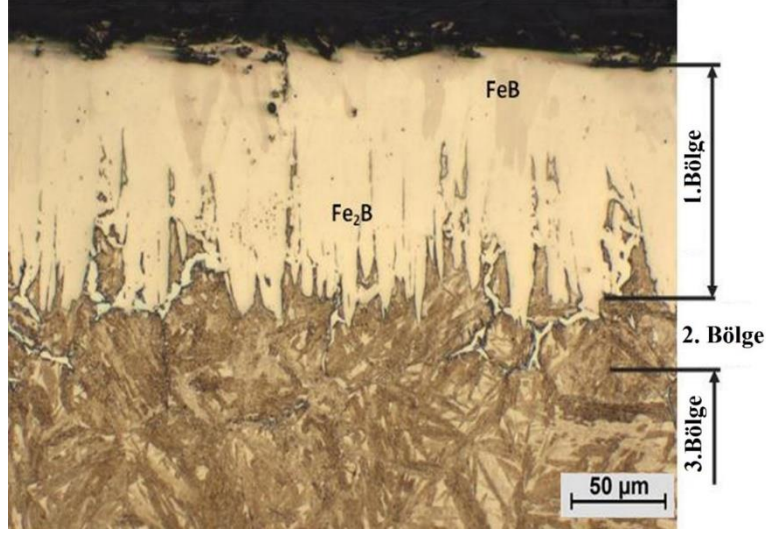
Mikrodalga fırını ile elde edilen borür tabaka kalınlıklarının, geleneksel kül fırınına nazaran daha düşük sıcaklıklarda elde edildiği tespit edilmiştir. Mikro dalga fırınında borlanmış AISI P20 çeliğinde 900°C'de 6 saat borlama sonucunda tabaka kalınlığı

121,22 μm iken, geleneksel kül fırınında 900°C’de 6 saat borlama sonucunda 80 μm olarak tespit edilmiştir. Borlama süresine ve sıcaklığına bağlı olarak, borür tabaka kalınlıklarındaki değişim Şekil 4.6’da gösterilmektedir. Mikro dalga fırınında yapılan borlama sonucunda bize Geleneksel Kül fırınında daha düşük sıcaklıklarda yapılan borlama işlemlerine yakın değerler verdiğini göstermektedir.



Şekil 4.6 800°C, 850°C ve 900°C’de Mikrodalga Fırınında ve 900°C’de Kül Fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin bor tabaka kalınlığının sıcaklık ve süreye göre değişim grafiği.

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi AISI P20 çeliğinde oluşan kaplama tabakası 3 bölgeden oluşmaktadır. 1.Bölge; Borür tabakası (FeB, Fe₂B, CrB, MnB), 2.Bölge; Borür tabakasının altında kalan bölgedir. Borun katı çözelti yaptığı ve bor tabakasının sertliğinden daha az sertliğe sahip olduğu bölgedir. 3.Bölge; Çeliğin matris kısmıdır. Borlama işleminden etkilenmeyen bölgedir (Özbek vd. 2002, Özbek vd. 2004, Taktak 2006, Taktak 2007, Özdemir vd. 2009).

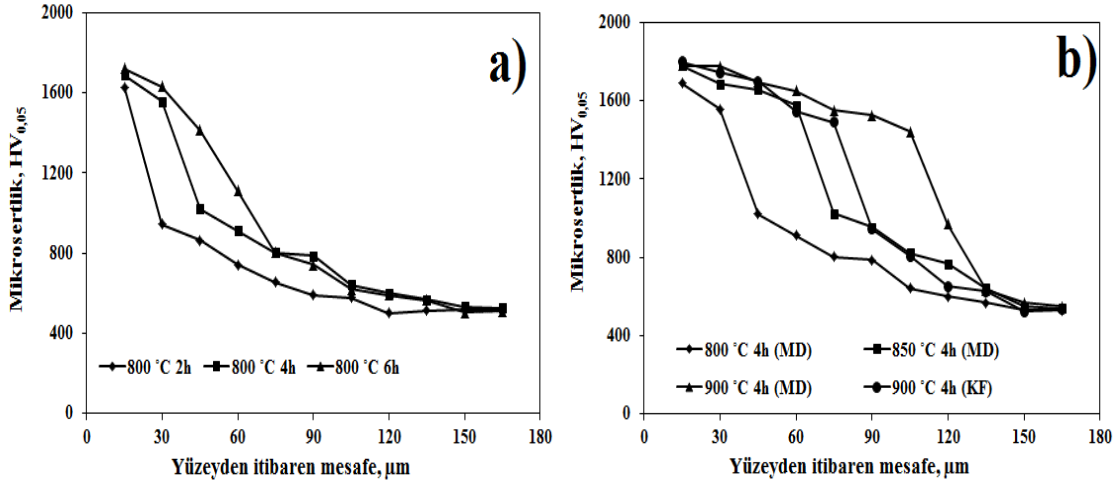


Şekil 4.7 Mikrodalga fırınında borlanmış AISI P20 çeliğin Optik mikroyapı görüntüsü.

Farklı kimyasal kompozisyona sahip olan çeliklerde, yapılan çalışmalar sonucunda farklı borür fazlarının (CrB , Cr_2B , MnB , NiB , TiB , vs.) ve tabaka kalınlıklarının olduğu tespit edilmiştir.

4.4 AISI P20 Çeliğinin mikro Sertlik Değerleri

Borlama işlemi ile AISI P20 çeliğinin yüzey sertliği yaklaşık olarak 3-4 kat artmıştır. Sertlik değerlerindeki artış borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişmektedir (Uslu *et al.* 2007, Taktak, 2007, Taktak, 2006). Şekil 4.8’de görüldüğü gibi farklı sıcaklıklarda çeliğin yüzeyinden içeriye (matris merkezine) doğru sertlik dağılımı görülmektedir. Oluşan borür tabakasının yüzeyden itibaren sertlik dağılımlarında, borür tabakası boyunca yüksek sertlik değeri elde edilmektedir. AISI P20 çeliğinin yüzeyinin borlandıktan sonra çok sert olan FeB fazının miktarından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Matrise gelindiğinde ani sertlik düşüşü görülmektedir. Borlanmamış AISI P20 çeliğinin sertliği yaklaşık 450-500 $\text{HV}_{0,05}$ iken borlandıktan sonra AISI P20 çeliğinin yüzey sertlik değerleri sıcaklık ve süreye bağlı olarak 1021-1780 $\text{HV}_{0,05}$ arasında değişmektedir.



Şekil 4.8 a) 800 °C 2,4 ve 6 saat b) 800 °C, 850 °C ve 900°C ‘de 4 saat mikrodalga fırınında ve 900°C ‘de 4 saat geleneksel kül fırınında kutu borlanmış AISI P20 çeliğinin mikrosertlik değerleri.

Kayalı vd. (2012), AISI 440C ve AISI 52100 çeliklerini 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 2, 4 ve 8 saat sürelerle katı borlama işlemi uygulamışlardır. Borlanan çeliklerin mikrosertlik sonuçları AISI 440C çeliğinin sertliği 1530-2170 HV, AISI 52100 çeliğinin sertliği ise 1620-1989 HV arasında değiştiğini belirtmişlerdir (Kayalı *et al.* 2012).

4.5 Elektrokimyasal Korozyon Testleri

Borlanmış ve borlanmamış AISI P20 çeliğın 1M NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme süresi sonucunda Tafel ve lineer polarizasyon yöntemi ile elde edilen korozyon karakteristikleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1’e bakıldığında borlanmış numunelerin 1M NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme sonrası polarizasyon (korozyon) akım yoğunluk (i_{corr}) değerleri azalmıştır. Polarizasyon akım yoğunluğu değerleri kaplanmamış durumda 52,100 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ iken, borlanmış numunelerde ise borlama süresi ve borlama sıcaklığına bağlı olarak polarizasyon akım yoğunluğu değeri 2,300-28,300 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ aralığında değişmektedir.

Çizelge 4.1 AISI P20 Çeliğinin Elektrokimyasal Korozyon Değerleri.

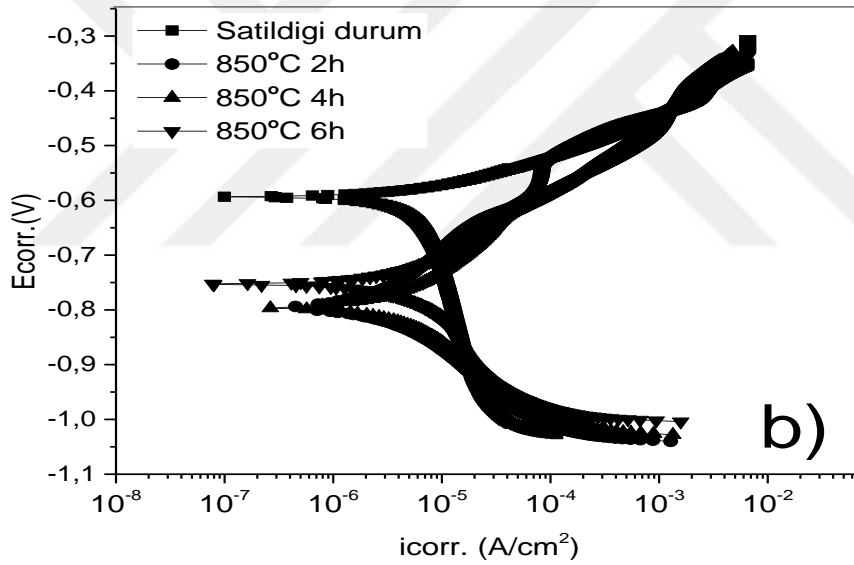
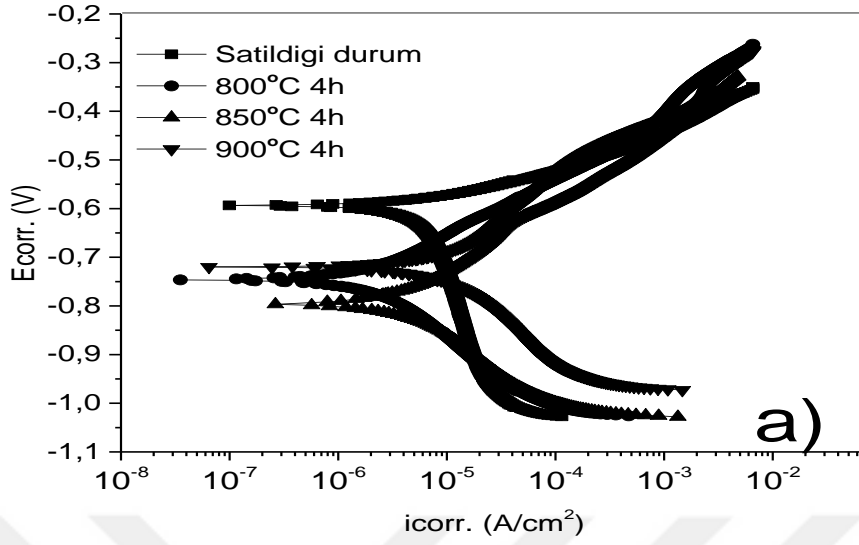
| Çözelti | Deney Şartları | i_{corr} . ($\mu A/cm^2$) | Korozyon Hızı (mpy) | Rp Değeri (k Ω) |
|----------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------|
| 1M NaCl Çözeltisi | Satıldığı Durum | 52,200 | 13,30 | 2,060 |
| | 800°C-2 saat | 2,300 | 0,585 | 13,400 |
| | 800°C-4 saat | 2,800 | 0,711 | 10,150 |
| | 800°C-6 saat | 3,260 | 0,830 | 7,645 |
| | 850°C-2 saat | 3,170 | 0,806 | 7,744 |
| | 850°C-4 saat | 6,280 | 1,600 | 6,279 |
| | 850°C-6 saat | 11,100 | 2,825 | 6,014 |
| | 900°C-2 saat | 16,900 | 4,299 | 4,103 |
| | 900°C-4 saat | 24,500 | 6,243 | 3,188 |
| | 900°C-6 saat | 28,300 | 7,202 | 2,812 |

Borlanmış AISI P20 çeliğinin korozyon direnci oluşan borür tabakasıyla artmıştır (Sinha 1991, Kariofillis *et al.* 2006). Mikrodalga fırınında borlanmış numunelerin tabaka kalınlığı arttıkça i_{corr} . Değeri artar iken Rp Değeri azalmaktadır. Ayrıca Rp (polarizasyon direnci) ve korozyon hızı değerlerinin (mpy), i_{corr} değerleri ile uyumlu olduğu gözlenmektedir.

4.6 Tafel ve Liner Polarizasyon Deney Sonuçları

Borlanmış ve borlanmamış AISI P20 çeliğinin 1M NaCl çözeltisinde 1 saat bekletme süresi sonucunda Tafel polarizasyon yöntemi ile elde edilen Tafel eğrileri Şekil 4.9’da verilmektedir. Şekil 4.9 ve Çizelge 4.1’e bakıldığında, en düşük polarizasyon akım yoğunluğunun 1 saat bekletme sonucunda 800 °C’de 2 saat borlanmış numunede olduğu görülmektedir. 1M NaCl çözeltisinde kısa bekletme sürelerinde elde edilen borür tabakasının korozyona karşı direncinin yüksek olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin de kısa sürelerde borür kabakasının kalınlığının az olması ve dolayısıyla kaplamalarda olan gözeneklerin demirin oksitlenme ürünleri ile dolması sonucunda korozif ortam ile metal teması kesildiği için korozyonun azaldığı ifade edilmiştir (Campos *et al.* 2006).

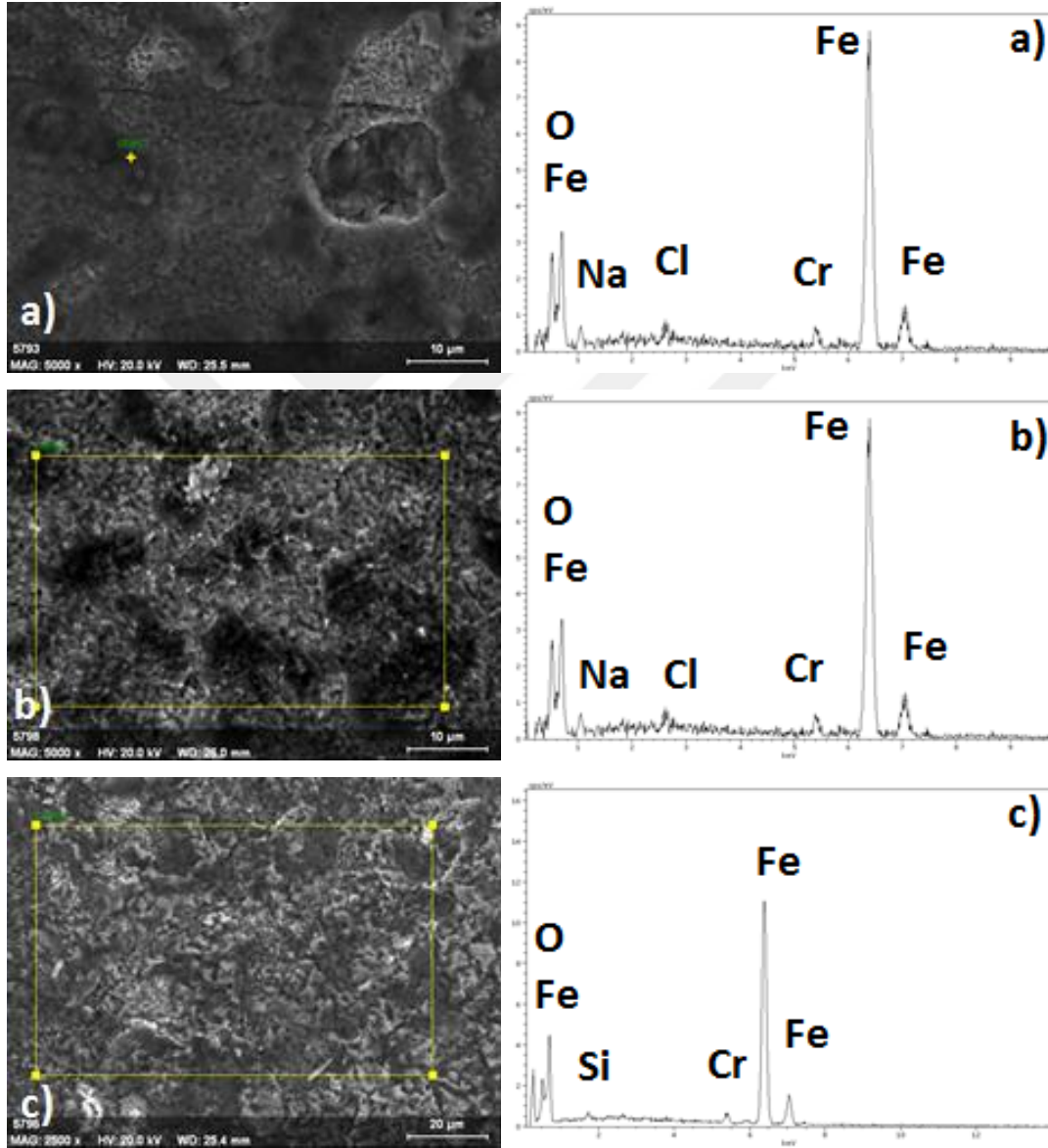
Ayrıca tabaka kalınlığının artmasıyla tabaka boyunca oluşan poroziteler ve tabakada oluşan fazların termal gerilme farklılıklarından oluşan mikro-çatlaklardan saldırgan Cl⁻ iyonları çelik yüzeyine daha kolay ulaşması gösterilebilir (Campos *et al.* 2006).



Şekil 4.9 a) 800°C, 850°C, 900°C 4 saat b) 850°C 2, 4, ve 6 saat kutu borlanmış numunelerin tafel ekstrapolarizasyon eğrileri.

Bor kaplanmış çeliklerin korozyon dirençleri genellikle kaplamaların karakteristik özelliklerinden olan mikro-çatlakların ve porozitelerin miktarına bağlıdır. Bu poroziteler kaplamaların sıklığını negatif yönde etkiler ve kaplamaların önemli derecede korozyon direncini azaltır. Bu oluşan boşlukların miktarı kaplamadaki mikroyapı ile ilişkilidir (Liu *et al.* 2006, Campos *et al.* 2006).

Elektrokimyasal korozyon deneylerinden sonra yapılam SEM-Edx analizlerinde numunelerde Na^+ , Cl^- , O^{2-} gibi çözültiden gelen iyonların olduğu görülmektedir. (Şekil 4.10) SEM-Edx görüntülerinde borlama sıcaklığının artmasıyla oksit miktarı artmaktadır. Oksit miktarının artmasıyla borlanmış AISI P20 çeliğinin korozyon hızı artmaktadır. Bu ise icorr. ve Rp direnciyle de uyumludur.



Şekil 4.10 AISI P20 çeliğinin a) 800°C 2 saat b) 850°C 2 saat c) 900°C 6 saat borlanmış numunenin korozyon, SEM ve EDX görüntüsü.

Borlama işlemi ile AISI P20 çeliğinin korozyon direnci iyileşmiştir. Artan borlama kalınlığına bağlı olarak korozyon direnci azalmıştır.

5. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

AISI P20, çeliği 800°C, 850°C ve 900°C sıcaklıklarında 2,4 ve 6 saat süre aralıklarında Mikro dalga fırınında yapılan kutu borlama işlemi neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Borlama işlemi sonrasındaki optik mikroskop incelemelerinde borür tabakasının AISI P20 çeliği içinde homojen bir kalınlığa sahip olduğu görülmüştür.
- Tabaka kalınlığının zaman ile doğru orantılı olarak değiştiği tespit edilmiştir.
- XRD analizleri sonucunda FeB, Fe₂B fazlarının yanı sıra çeliğin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak MnB ve CrB fazları tespit edilmiştir.
- AISI P20 çeliğinin borlama işleminden sonra, çeliğinin yüzey sertliği yaklaşık olarak 3-4 kat artmıştır.
- Geleneksel kül fırınında elde edilen borür tabakaları, mikro dalga fırınında daha düşük borlama sıcaklıklarında elde edilmiştir.
- Aynı sıcaklıkta yapılan borlama işleminde yaklaşık olarak % 30-40 oranında daha fazla borür tabakası elde edilmiştir.
- Borlama işlemi ile AISI P20 çeliğinin korozyon direnci iyileşmiştir.
- Artan borlama kalınlığına bağlı olarak korozyon direnci azalmıştır.
- Mikrodalga fırınında borlama işlemiyle, Geleneksel Kül fırınına nazaran hem zaman hem de enerji kazancı sağlayacağı gözlemlenmiştir.

5.2 Öneriler

- ✓ Mikrodalga fırınında kutu borlama işleminde daha düşük sıcaklıklarda borlama işlemi yapılabilir.
- ✓ Mikrodalga fırınının hacmini büyütüp daha büyük ebatlardaki parçalar borlanabilir.
- ✓ Kuyu tipi mikrodalga fırını geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Badini, C., Cianoglio, C., Paradelli, G. (1987). “The Effect of Carbon and Chromium on the Hardness of Borided Layers”, *Surface and Coatings Technology*, **30**:157-170.
- Başman, G. (2010). AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi ile Borlanması, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bektaş, M. (2006). Bor ve Borlama Teknikleri. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Seminer Çalışması, 50s, Isparta.
- Campos, I., Palomar, M., Amador, A., Ganem, R. and Martinez, J. (2006). Evaluation of The Corrosion Resistance of Iron Boride Coatings Obtained by Paste Boriding Process. *Surface and Coatings Technology*, **201**: 2438-2442.
- Campos, I., Flores, M., Rodríguez, G., Hernández, E., Martínez, J. and Tadeo, R. (2013). Improved Fracture Toughness of Boride Coating Developed With A Diffusion Annealing Process. *Surface & Coatings Technology* **237**: 429–439.
- Çinkı, M.M. (2001). Ulusal Maden Varlığımız ve Bor Gerçeği. Ankara Ticaret Odası Yayınları, 196s. Ankara.
- Çalık, A. (2005). Termokimyasal Borlama Yöntemleri ve Önemi. 4th International Advanced Technologies Symposium, 839-844, Konya.
- Çiftçi, N. (2009). “Sol-Gel Yöntemi ile 316 L SS ve Ti İmplant Malzemelerin Üzerine Hidroksiapatit (Hap) Kaplamaların Üretilmesi ve Korozyon Davranışlarının Elektrokimyasal Yöntemle İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Dalar, A. (2013). Borlanmış Dişli Çeliklerinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Döndüren, H.V., Karacasulu, S.S. (2015). Plastik Enjeksiyon Kalıplarında PVC (Polivinil Klorür) ve PC (Polikarbonat) İçin En Uygun Kalıp Çeliği Seçimi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 19(2), 46-53.

- Dursun, B., İpek, R., Karaoğlu, S. (2011). Çok Kısa Süreli Borlama İşlemi İle Zincir İmalatında Kullanılan Kılavuzların Aşınma Direncinin Arttırılması, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Kütahya.
- Ekmekçiler, E. (2006). “Borlanmış Demir Aluminat Malzemenin Kinetik ve Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gebze.
- Ersöz, A. (2008). Elektrokimyasal Borlama ile Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Erbil, M. (2012). Korozyon ilkeler- Önlemler, Korozyon Derneği, Ankara.
- Efe, G.Ç., İpek, M., Özbek, İ. and Bindal, C. (2008). Kinetics of borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 steel. *Materials Characterization*, **59**: 23-31.
- Fichtl, W., Trausner, N., Matuschka, A.G. (1987). “Borieren mit Ekabor”,ESK GmbH.
- Graf, A., Matuschka, W. (1977). “Borieren”, Carl Hanser Verlag, München, Wien, pp.1-87.
- Hayashi, Y. and Sugeno, T. (1970). Nature Of Boron In A Iron, *Acta Metallurgica*, **18**: 693-697.
- Hegewaldt, F., Singheiser L., Türk, M. (1984). Gasborieren. *HTM*, **39**, 1, 7, 15.
- Jareel, D.J. and Bejbl, F. (1999). “Understanding Wear and Friction in Medical-Grade Stainless Steels”, *Medical Device & Diagnostic Industry Magazine*, **2**-3.
- Jones, D.A., Lelyveld, T.P., Mavrofidis, S.D., Kingman, S.W., Miles, N.J., (2002). Microwave Heating Applications in Environmental Engineering E A Review, *Resour. Conserv. Recycl.* **34**, 75-90.
- İpekoğlu, Ü. ve Polat, M. (1987). Bor Endüstrisine Genel Bakış. *Madencilik*, **26**:Sayı/No:1
- Karlı, A.M. (2005). “AISI 440c ve 52100 Yatak Çelikleri Üzerinde Oluşturulan Karbür ve Borürlerin Yüksek Sıcaklıklarda Aşınma Davranışlarının İncelenmesi“, Yüksek Lisans Tezi, A.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Kariofillis, G.K., Kiourtsidis, G.E., Tsipas, D.N. (2006). “Corrosion Behavior of Borided AISI H13 Hot Work Steel” *Surface & Coatings Technology* **201**, pp. 19–24.
- Kayalı, Y., Güneş, İ. and Ulu, S. (2012). Diffusion Kinetics of Borided AISI 52100 And AISI 440c Steels. *Vacuum* **86**: 1428-1434.

- Kayalı, Y., Gökçe, B., Mertgenç, E., Çolak, F. and Kara, R. (2013). Analysis with Taguchi Method of Wear Behaviors of Borided AISI 52100 Steels, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol: **19 (3)**, 365-370.
- Kayali, Y. (2015). Investigation of Diffusion Kinetics of Borided AISI P20 Steel in Microwave Furnace, *Vacuum* **121**, 129-134.
- Keleş, H. (2009). “Yumuşak Çeliğin Asidik Ortamdaki Korozyonuna Bazı Organik Maddelerin İnhibitör Etkilerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Liu, C., Lin, G., Yang, D., Qi, M. (2006). “In Vitro Corrosion Behavior of Multilayered Ti/Tin Coating on Biomedical AISI 316 L Stainless Steel” *Surface & Coatings Technology*. **200**, pp.4011-4016.
- Matuschka, A.G. (1987). Boronising, Carl Hanser Verlag, München, 1980.
- MEGEP. (2008). “Plastik Teknolojisi Makine Enjeksiyon Kalıpcılığı-2.”, 24-30.
- Meriç, C., Şahin, S. and Yılmaz, S.S. (2000). “Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-yielding Substances”, *Materials Research Bulletin*, vol. **35C**. pp.2165-2172.
- Sinha, A.K. (1991). “Boriding (Boronising)”, ASM Handbook, Vol. 4, J. Heat Treating, pp. 437–447.
- Sümer, G. (2004). Bor Bileşikleri. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, 23-25 Eylül, Eskisehir.
- Şahin, S. (1999). “Katı Borlama Yöntemi ile Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 45 – 48.
- Şen, S., Özbek, I., Sen, U., Bindal, C. (2001). Mechanical Behavior of Borides Formed on Borided Cold Work Tool Steel, , *Surface and Coat. Technol.* Vol. **135**, 173-177.
- Şen, S., Sen, U., Bindal, C. (2005). The Growth Kinetics of Borides Formed on Boronized AISI 4140 Steel, *Vacuum* **77**, 195–202.
- Şen, U. (1997). “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri”, Doktora tezi İ.T.Ü. Fen Bil. Ens. İstanbul.
- Okamoto, H. (2004). “Supplemental Literature Review: Section IIIB-Fe (Boron-Iron)”, *ASM International*, Vol. **25**. pp.297-298.

- Oliveira, C.K.N., Casteletti, L.C., Lombardin, A., Totten, G.E. and Heck, S.C. (2010). Production and Characterization of Boride Layers on AISI D2 Tool Steel. *Vacuum*, **84**: 792-796.
- Oliveira, N.K.C., Casteletti, C.L., Lombardi, N.A., Totten, E.G. and Heck, C.S. (2010). Production and Characterization of Boride Layers AISI D2 Tool Steel. *Vacuum* **84**: 792–796.
- Özbay, S. (2009). Atık Borlama Tozlarının Sinterlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Özbek, İ. and Bindal, C. (2002). “Mechanical Properties of Boronized AISI W4 Steel”, *Surface and Coatings Technology*, **154**,14-20.
- Özbek, İ., Sen, Ş., Ipek, M., Bindal, C., Zeytin, S. and Ucisik, A.H. (2004). “A Mechanical Aspect of Borides Formed on The AISI 440C Stainless-Steel” *Vacuum*, **73**, pp.643–648
- Özdemir, O., Omar, M.A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C., Ucisik, A.H. (2009). An Investigation on Boriding Kinetics of AISI 316 Stainless Steel. *Vacuum*, **83**: 175–179.
- Özer, M. ve Ay, İ. (2012). Üç Farklı Çeliğe Katı Borlama İşlemi Yapılmasının İç Yapı Ve Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi. 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi, Balıkesir.
- Petrova, R. and Suwattananont, N. (2005). Surface Modification Of Ferrous Alloys With Boron, 575 - 582.
- Pınarbaşı, A. (1999). “Saf Aluminyumun 0.1 M Hidroklorik Asit Çözeltisindeki Korozyonuna Bazı Heterosiklik Bileşenlerin İnhibitör Etkisi”, Doktora Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Revie, R.W. and Uhlig, H.H. (2008). Corrosion and Corrosion Control, 4th ed., Hoboken New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc.
- Tabur, M. (2008). Bor Karbür Kaplanmış AISI 8620 Ve HARDOX 400 Çeliklerinin Abrasif Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 220s, Ankara.
- Taktak, Ş. (2006). Tribological Behaviour of Borided Bearing Steels at Elevated Temperatures. *Surf. Coat. Technol.* **201**, 2230.

- Taktak, Ş. (2007). “Some Mechanical Properties of Borided AISI H13 and 304 steels” *Materials and Design* **28**, pp.1836–1843.
- Taşcı, A. (1993). Borlanmış Çeliklerin Aşınma Ve Korozyon Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, 45s, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- TMMOB, (1999). Makine Mühendisleri Odası Ankara “Plastik Malzemeler ve Teknolojileri Konferansı” 16-20.
- Topal, E. (2007). “Bazı Aminoasitlerin Sulu Çözeltilerde Paslanmaz Çeliğin Korozyonu Üzerine İnhibitör Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Toprak, H. (2002). Borlanmış ve PVD Yöntemiyle TiN Kaplanmış KGDD Kam Milleri ile Kaplamasız ve Sertleştirilmiş Çelik Dövme Kam Millerinin Çalışma Performanslarının İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 118s, Ankara.
- Uslu, I., Cömert, H., İpek, M., Özdemir, O., Bindal, C. (2007). Evaluation of Borides Formed on AISI P20 Steel” *Materials and Design*, **28**, 55–61.
- Uslu, I., Cömert, H., İpek, M., Celebi, F.G., Özdemir, O., Bindal, C. (2007). A Comparison of Borides Formed on AISI 1040 and AISI P20 Steels, *Materials & Design*, **28-6** 1819–1826.
- Uzun, H.A. (2002). “Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma Ve Korozyona Karşı Dayanımları” Yüksek Lisans Tezi, S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 14-28.
- Ünüvar, F. (2013). Saf Kobaltın Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Jain, V. and Sundararajan. G. (2002). *Surf. Coat. Technol.* **149** 21.
- Yapar, U. (2003). Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, Y. Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yünker, U. (2000). “ Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi” Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Quan, W., Xianglin, Z., Bin, W., Wei, H. (2013). Effects Of Microwave Sintering on The Properties of Porous Hydroxyapatite Scaffolds, *Ceram. Int.* **39**, 2389-2395

6.1 İnternet kaynakları

- 1- <http://www.gultekinkavusan.com/borpage/turkyat.html>, 01.08.2016
- 2- http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/6358599b7afb250_ek.pdf, 23.09.2016
- 3- <http://www.maden.org.tr/meslegimiz/oik619.pdf>, 25.10.2017



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Nusrettin BARUT
Doğum Yeri ve Tarihi: Van – 01/08/1985
Yabancı Dili: İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta): (0537) 254 43 23 nusrettinbarut@hotmail.com
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):
Lise: Kazım Karabekir Anadolu Lisesi (VAN)
[2000-2004].
Önlisans: VAN Yüzüncü Yıl Üniversitesi Erciş Meslek
Yüksek Okulu Makine Programı [2008-2009].
Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim
Fakültesi Metal Öğretmenliği [2009-2013].
Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalurji ve Malzeme
Mühendisliği [2016-2018].
Yüksek Lisans: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği [2013-2018].
Çalıştığı Kurum/Kurumlar
ve Yıl: Özel Sektör [Tekstil] – [2004–2005],
Özel Sektör [İnşaat] – [2005–2008],
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama
ve Araştırma Merkezinde kısmi zamanlı çalıştım
[2013-2015].
TÜBİTAK 1001 Projesi 214M111 no’lu projede
proje asistanı olarak görev aldım [2015-2016].
Yayınlar:

Pack Boronizing of the Steel AISI P20 in the Microvawe Furnace. Karabük University
Iron and Steel Institute, The Second International Iron and Steel Symposium (IISS’15
April 1-3, 2015)

Investigation of Contact Angle in Various Places of Boronized AISI 316L Stainless Steel. 'The Second International Iron and Steel Symposium (IISS'15 April 1-3, 2015)

Production of an Iron Boride Reinforced Nanocomposite by Devirification of a Fe-Co-Ni Based Metallic Glass. 'IMMC'18. International Metallurgy & Materials Congress (29Sept.-01Oct 2016,Istanbul).

Mikro Dalga Fırınında Borlanmış AISI P20 Çeliğinin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi, The 14th International Corrosion Symposium (KORSEM 2016) at Bayburt University.

Mikro Dalga Fırınında Borlanmış AISI P20 Çeliğinin Karakterizasyonu ve Aşınma Davranışı, '16th International Materials Symposium-IMSP 2016 (October 12-14, 2016 Denizli)

ESD Yöntemiyle Nikel Kaplanan Küresel Grafitli Dökme Demir Yüzeylerinin İncelenmesi. (International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences ICETAS 2016)

Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 Çeliklerinin Difüzyon ve Adhezyon Davranışlarının İncelenmesi, (Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 2014)