



## Düşük oranlarda bor içeren az karbonlu çeliklerin asidik ve tuzlu ortamlarda korozyon özelliklerinin incelenmesi

Kubilay Karacif<sup>1</sup>, Cemal Çarboğa<sup>2\*</sup>, Duygu Candemir<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Çorum, Türkiye, ORCID ID [orcid.org/0000-0001-7180-7897](https://orcid.org/0000-0001-7180-7897)

<sup>2</sup>Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye ORCID ID [orcid.org/0000-0001-6781-4955](https://orcid.org/0000-0001-6781-4955)

<sup>3</sup>Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Çorum, Türkiye, ORCID ID [orcid.org/0000-0002-6186-0122](https://orcid.org/0000-0002-6186-0122)

### MAKALE BİLGİSİ

#### Makale geçmişi:

İlk gönderi 23 Mayıs 2018  
Revize gönderi 11 Ocak 2019  
Kabul 26 Ocak 2019  
Online 16 Mart 2019

#### Araştırma Makalesi

DOI: [10.30728/boron.421683](https://doi.org/10.30728/boron.421683)

#### Anahtar kelimeler:

Bor ilavesi,  
SAE 1020,  
Korozyon

### ÖZET

Bu çalışmada çok düşük oranlarda bor içeren az karbonlu çeliklerin asidik ve tuzlu ortamlardaki korozyon davranışları incelenmiştir. Bor, çeliklerin özellikle mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılan bir alaşım elementidir. Az karbonlu çeliklerde düşük oranlardaki bor ilavesinin korozyon davranışına etkilerini belirlemek için bor içermeyen ve 15 ppm, 20 ppm ve 100 ppm bor içeren SAE 1020 çelikleri kullanılmıştır. Korozyon testleri 0,1 M sülfürik asit (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) çözeltisi ve 0,1 M sodyumklorür (NaCl) çözeltisinde yapılmıştır. Potansiyodinamik yöntemin kullanıldığı elektrokimyasal korozyon testleri sonucunda bu çeliklere alaşım elementi olarak bor ilavesi ile korozyon hızının bir miktar arttığı, bu çeliklerin tuzlu ortamda asidik ortama göre daha iyi korozyon dayanımı sergilediği belirlenmiştir.

## Investigation of corrosion properties of low carbon steels containing low boron in acidic and saltwater medium

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 23 May 2018  
Revised form 11 January 2019  
Accepted 26 January 2019  
Available online 16 March 2019

#### Research Article

DOI: [10.30728/boron.421683](https://doi.org/10.30728/boron.421683)

#### Keywords:

Boron addition,  
SAE 1020,  
Korrosion

### ABSTRACT

In this study, corrosion behavior of low carbon steels containing low boron in acidic and saltwater medium was investigated. Boron is an alloying element particularly used to improve the mechanical properties of steels. In order to determine the effects of boron addition on corrosion behavior, boron free, 15, 20 and 100 ppm boron containing SAE 1020 steels were examined. Corrosion tests were performed in a solution of 0.1 M sulfuric acid solution (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) and 0.1 M sodium chloride (NaCl) solution. Result of electrochemical corrosion test by potentiodynamic method showed that the corrosion rate increased with boron addition and these steels have better corrosion resistance in saltwater medium than in acidic medium.

### 1. Giriş (Introduction)

Düşük ve orta karbonlu çeliklere alaşım elementi olarak bor ilavesi, bu çeliklerin sertleşebilirlik özelliklerini önemli oranda artırmaktadır. Aynı zamanda bu çeliklerde bor ilavesi ile yüksek çekme dayanımları ve yüksek aşınma dayanımları elde edilmektedir [1,2]. Beyaz dökme demir malzemelerde de bor ilavesinin alaşımın aşınma dayanımını geliştirdiği bildirilmektedir. Aşınma dayanımındaki bu gelişme, borun etkisiyle mikroyapının modifikasyonu ve borkarbür türü sert bileşiklerin

oluşumuna atfedilmektedir. Özelliklerin değişiminde, oluşan borkarbür bileşiklerinin morfolojisi de etkili olmaktadır [3-5].

Çeliğe ilave edilen çok düşük oranlardaki bor, hem sade karbonlu çeliklerin hem de alaşımlı çeliklerin sertleşebilirliğini, sertlik ve dayanımını arttırmaktadır. Diğer karbür yapıcı elementlerle kıyaslandığında, çeliğe aynı derecede sertlik kazandırmak için çok az bor ilavesi yeterli olmaktadır. Sertleştirmeyi arttırmak için çelik bileşimine en fazla 30 ppm bor ilavesi

\*Sorumlu yazar: [ccarboğa@nevsehir.edu.tr](mailto:ccarboğa@nevsehir.edu.tr)

yeterli olmaktadır. Bor ilavesi, çelik yapısındaki karbon, mangan, krom, molibden gibi diğer sertleştirici alaşım elementlerin sertleştirme derecesini de arttırmaktadır. Çeliğin içine çok az miktarda bor ilavesi sertlik artışı nedeniyle, çelikte kullanılan diğer pahalı alaşım elementleri maliyetinde tasarruf sağlamaktadır. Alaşımli çeliklere % 0,0010 - 0,0030 arasında bor ilave edilmesi, bu çeliklerin yapısında gerek duyulan Ni, Cr ve Mo miktarlarını azaltmaktadır [6]. Çeliklere yapılan bor ilavesi başka mekanik özellikleri de geliştirmektedir. Beynitik çeliklerde bor ilavesinin kırılma tokluğu ve yorulma dayanımı üzerine yapılan bir çalışmada, bor ilavesi ile yüksek kırılma tokluğu ve uzun yorulma ömrü elde edildiği belirtilmiştir. Özelliklerdeki bu gelişim, martenzit çıta yapıları arası bileşenlerinin miktarının azalmasına, bor içermeyen beynitik çeliklerde görülen küçük boyuna çatlakların, bor içeren beynitik çeliklerde kaybolma eğiliminde olmasına atfedilmiştir [2].

Mekanik özellikleri geliştirmek için çeliklere katılan borun, çeliğin korozyon davranışına etkisi ile ilgili çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. %0,1 karbon içeren 9Cr-1Mo ferritik çeliklerde çeliğe yapılan bor ve azot ilavesinin korozyon davranışına etkisi ile ilgili bir çalışmada, 60-90-100 ppm bor ve 47-100-110 ppm azot ilave edilerek korozyon davranışı incelenmiştir. Bu çalışmada bor ilavesinin tek başına etkileri incelenmemiş olup azot ile birlikte etkileri incelenmiştir. Düşük bor yüksek azot içeren çelik, en düşük yüksek akım geçişi göstermiştir ve pasifleşme eğilimi gelişmiştir. 1050-1150 °C'da yapılan normalizasyon tavlama, bornitrür oluşumuna sebep olmuş, matriste çözünmüş bor ve azot azalmış ve çeliğin çukur korozyonu aktivitesi artmıştır [7]. Az karbonlu yüksek kromlu çelik ile yapılan diğer bir çalışmada, alaşıma bor ilavesi ile çukur korozyon direncinin geliştiği bildirilmiştir. Fakat bu çalışma diğer alaşım elementlerinin oranlarında da değişim olduğundan korozyon direncindeki değişimin bor ilavesine atfedilmesi doğru değildir [8]. %0,2 karbon içeren Fe-B alaşımının sıvı çinko içerisinde korozyon davranışının incelendiği diğer bir çalışmada %1,5-3,5 ve 6 olmak üzere üç farklı bor konsantrasyonunun etkisine bakılmış, %3,5 bor içeren alaşım en iyi korozyon dayanımı göstermiştir. Bunun nedeni Fe<sub>2</sub>B'nin korozyon dayanımının α-B fazına göre çok daha iyi olmasına, yoğun ince ağ şeklindeki veya paralel Fe<sub>2</sub>B fazının demir-çinko arayüzey reaksiyonunu engellemesine atfedilmiştir [9]. Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen ve farklı oranlarda bor ilave edilen 316L paslanmaz çeliklerin asidik ve tuzlu ortamda korozyon davranışlarının incelendiği çalışmalarda, borun paslanmaz çelik tozlarının birbirine iyi bağlanmasını sağlayıp sinterlemeyi güçlendirdiği için korozyon hızının azaldığı bildirilmiştir [10,11].

Yüksek kromlu dökme demirlerde çok düşük oranlardaki bor ilavesinin erozyonlu korozyon dayanımına etkilerinin araştırıldığı çalışmada, bor ilavesi ile %3,5 NaCl çözeltisinde alaşımın açık devre potansiyeli olumsuz yönde etkilenmiş ve negatif yönde değişmiştir. Bu değişim bor ilavesinin alaşımın korozyona eğilimini artırdığını göstermektedir. Bu alaşımda yeterli seviyede serbest krom olduğunda yüzeyde koruyucu pasif film oluşarak pasifleşme sağlanabilmektedir. Bor ilave edilen alaşımda ise karbür oluşumu artmakta, böylece matristeki serbest krom azalmaktadır. Krom azalması nedeniyle de pasifleşme kabiliyeti azalmaktadır. Bor ilavesi ile alaşımın erozyonlu korozyon dayanımı ise artmaktadır. Bunu sağlayan ise bor ilavesinin artması ile hacim oranları artan sert karbürlerin varlığıdır [3].

Az karbonlu çeliklerde bor ilavesinin mekanik özelliklere etkileri üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, korozyon davranışına etkileri hakkında çok az sayıda çalışma vardır. Az sayıdaki bu çalışmalarda da sadece borun etkisi incelenmemiş, borun başka alaşım elementleri ile birlikte etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada ise diğer alaşım elementlerinin oranları aynı tutularak, çok düşük oranlarda bor ilavesinin asidik ve tuzlu ortamlarda az karbonlu çeliklerin korozyon davranışına etkileri incelenmiştir.

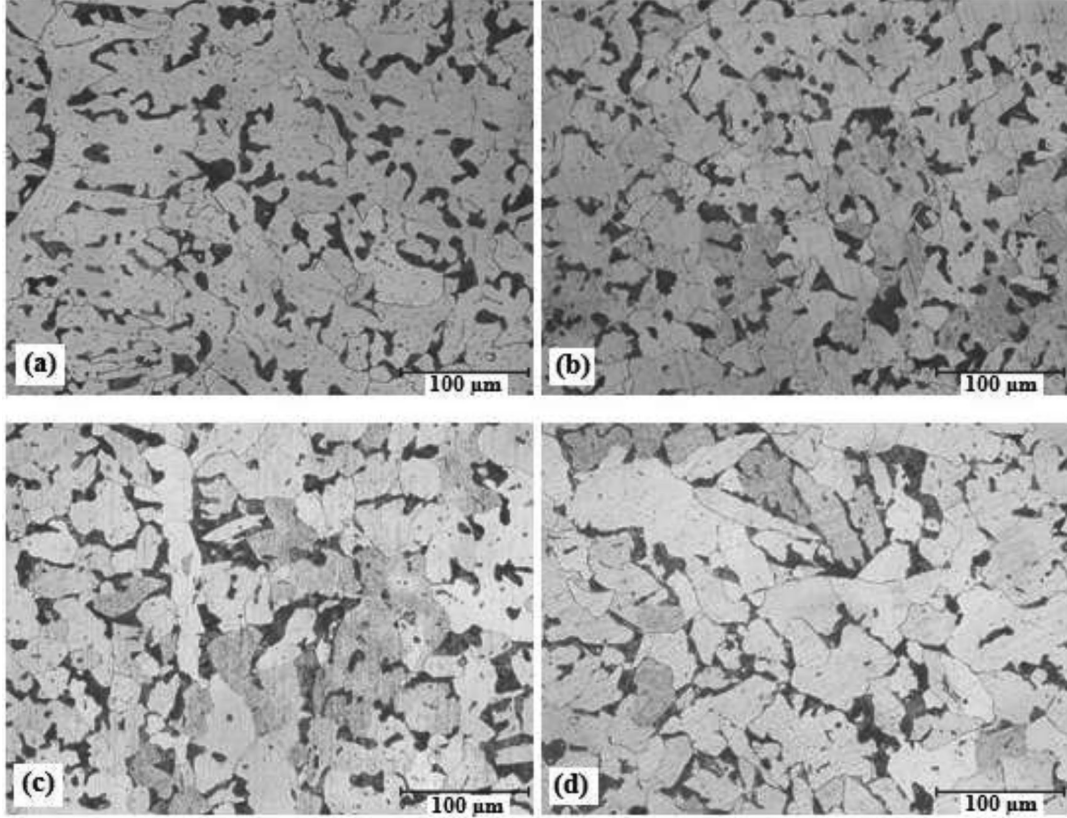
## 2. Malzemeler ve yöntemler (Materials and methods)

Bu çalışmada vakumlu döküm yöntemi ile üretilmiş, bor içermeyen ve farklı oranlarda bor içeren az karbonlu çelik numuneler kullanılmıştır. Numunelerin döküm işlemi vakumlu indüksiyon ocağında yaklaşık 1560 °C sıcaklıkta yapılmıştır. Numuneler elde edilirken, temin edilmiş olan SAE 1020 çeliği vakumlu indüksiyon ocağında ergitilmiş ve bu aşamada sıvı durumda iken farklı oranlarda bor ilaveleri yapılmıştır. Döküm sonrasında homojen ve istenilen mikroyapısal ve mekanik özellikler için numunelere iki paso sıcak haddeme işlemi uygulanmıştır. Çeliklerde iyi mekanik özellikler ve sertleşebilirlik özelliği için optimum bor oranı 15-20 ppm seviyeleridir. Bu nedenle yapılan çalışmada, bor içermeyen, optimum oranlarda bor içeren ve yüksek oranda bor içeren çelik bileşimleri tercih edilmiştir. Kullanılan dört farklı çeliğin kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de verilmektedir.

Çalışmada kullanılan bor içermeyen ve bor içeren çeliklerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 1'de verilmektedir. Mikroyapılarda beyaz renkli faz ferrit fazı, siyah renkli faz ise perlit fazıdır. Bu çelik ötektoid altı bir çelik olduğu için yapı ferrit ve perlit fazlarından oluşmaktadır. Faz oranı olarak yaklaşık %80 ferrit, %20

**Çizelge 1.** Çelik numunelerin kimyasal bileşimleri (Chemical compositions of steel samples).

| Numune | C (%Ağırlık) | Mn (%Ağırlık) | Si (%Ağırlık) | B (ppm) |
|--------|--------------|---------------|---------------|---------|
| A      | 0,18         | 0,8           | 0,2           | 0       |
| B      | 0,18         | 0,8           | 0,2           | 15      |
| C      | 0,18         | 0,8           | 0,2           | 20      |
| D      | 0,18         | 0,8           | 0,2           | 100     |



**Şekil 1.** Çeliklerin mikroyapıları (a) Borsuz (b) 15 ppm bor (c) 20 ppm bor (d) 100 ppm bor (Microstructures of steels (a) Without boron (b) 15 ppm boron (c) 20 ppm boron (d) 100 ppm boron).

perlit fazı mevcuttur. Ferrit fazı tane boyutu yaklaşık 40 µm seviyelerindedir. Perlit fazı ise karmaşık şekilli bir morfolojiye sahip olup ortalama bir tane boyutu ile ifade etmek zordur. Fakat ferrit tanelerine göre oldukça küçük boyutludur. Perlit fazı, genellikle ince, uzun ve karmaşık şekilli olarak ferrit fazı tane sınırlarında bulunmaktadır. Yapıda bulunan bor oranı çok düşük seviyelerde olduğu için mikroyapılarda bor ilavesine bağlı herhangi bir farklılık belirlenememiştir.

Elektrokimyasal korozyon testleri 100 mL hacimde üç boyunlu cam hücrede yapılmıştır. Boyunlardan birisine korozyon hücresinin anodu olarak çelik numune yerleştirilmektedir. Çelik çubuk numuneler doğrudan kullanılmamış, 1 cm<sup>2</sup> açık yüzey alanına sahip, diğer yüzeyleri epoksi reçine ile kaplı olan çalışma elektrotu haline getirilerek kullanılmıştır. Epoksiye gömülü açık yüzey çözelti içerisinde daldırılırken, açıkta kalan diğer uç ise iletken bağlantı ile potansiyostat cihazına bağlanmıştır. Dolayısıyla korozyon hızı ölçümlerinin hassas belirlenebilmesi için numunelerin 1 cm<sup>2</sup> alanındaki açık yüzeyleri ile çalışılmıştır. Literatürde de bu tip çalışma elektrotları kullanılmaktadır.

Korozyon hücresinin ikinci boynuna korozyon hücresinin katodu olarak 1 cm<sup>2</sup> yüzey alanında soy bir metal olan platin levhadan oluşan karşı elektrot ve üçüncü boynuna da referans elektrot olarak standart kalomel elektrot yerleştirilmiştir. Referans elektrot olan doymuş kalomel elektrot (SCE), civa ve civa klorür çökeltisi ile doymuş potasyumklorür çözeltisinden oluşmaktadır.

Çelik çalışma elektrodunun ölçüm yapılan açık yüzeyi her test öncesinde 1200 numaralı zımpara ile temizlenmiştir. Korozyon testleri asidik (0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ve tuzlu (0,1 M NaCl) ortamlarda yapılmıştır. Elektrokimyasal korozyon testlerinde Ivium Technologies de Regent 1785611 HW model potansiyostat cihazı kullanılmıştır.

Korozyon testlerinde öncelikle çelik numunelerin genel korozyon davranışlarını görmek için -1200 mV ile 500 mV arasında oldukça geniş bir aralıkta ve oldukça anodik yönde 50 mV/s hızda ilk potansiyel taramaları yapılmıştır. Bu taramanın amacı korozyon hızını belirlemek değil, genel korozyon davranışını görmek, Tafel polarizasyonu için uygun potansiyel aralığını belirlemektir. Belirlenen potansiyel aralığına göre ikinci aşamada, korozyon akımı, korozyon potansiyeli ve korozyon hızını belirleyeceğimiz Tafel polarizasyon eğrilerini elde edebilmek için -1500 mV ile -200 mV arasında 2 mV/s gibi daha küçük bir hızda ikinci potansiyel taramaları yapılmıştır. Birinci potansiyel taramasının yüzeydeki etkilerini gidermek için ikinci tarama öncesi çelik numune yüzeyleri tekrar zımpara ile temizlenerek orijinal haline getirilmiştir.

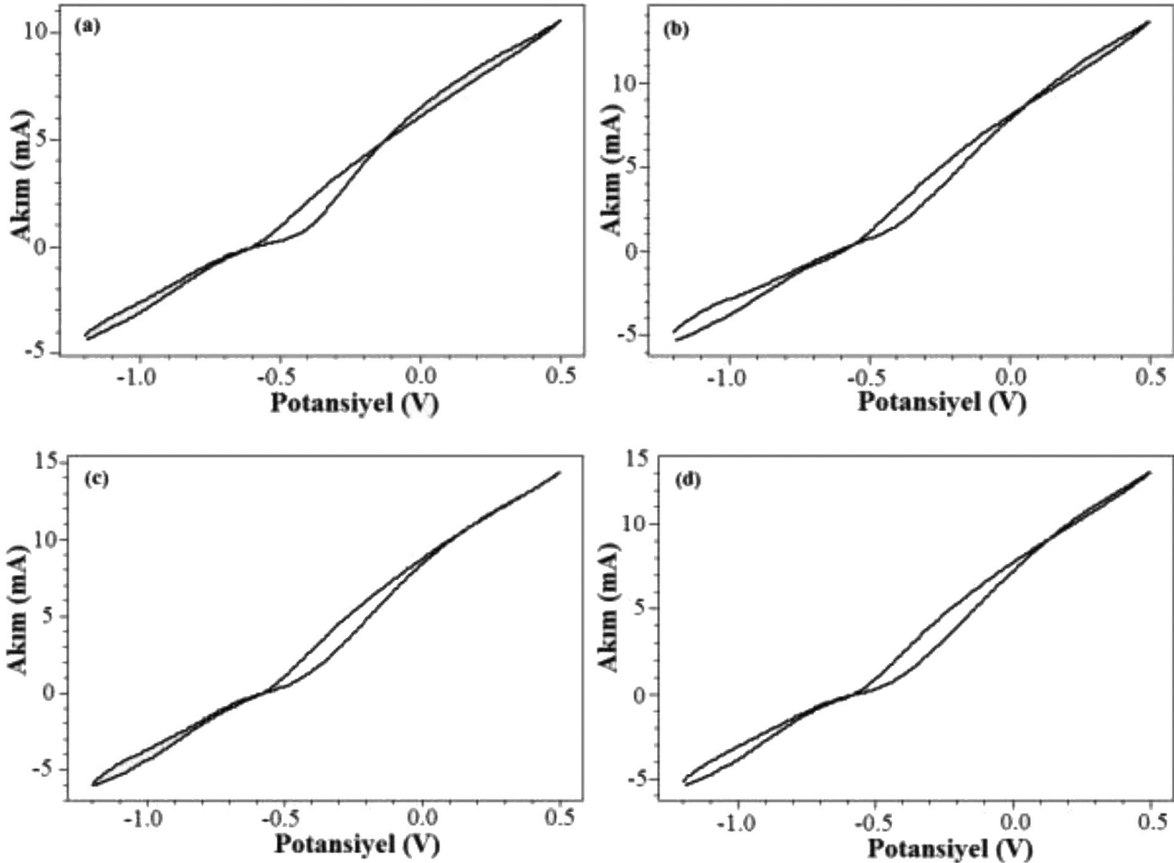
### 3. Sonuçlar ve tartışma (Results and discussion)

Bor içermeyen ve 15 ppm, 20 ppm ve 100 ppm oranlarında bor içeren çeliklere asidik (0,1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ortamda -1200 mV ile 500 mV arasında potansiyel uygulandığında akımdaki meydana gelen değişim Şekil 2'de verilen polarizasyon eğrilerinde görülmektedir. Aynı ortamda elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 3'te,

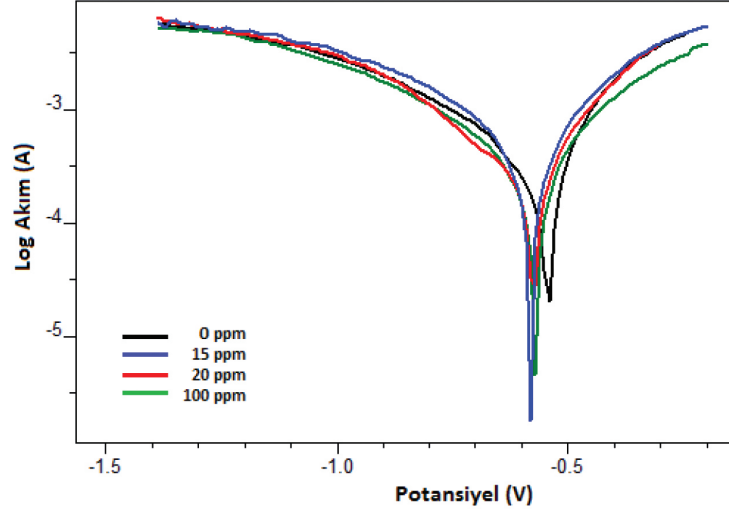
bu eğrilerden elde edilen korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ), korozyon akımı ( $i_{kor}$ ) ve korozyon hızı değerleri Çizelge 2'de verilmektedir.

Şekil 2'de görülen asidik ortamda elde edilen polarizasyon eğrileri geniş bir potansiyel aralığını kapsamakta olup, numunenin korozyona uğradığı potansiyel bölgelerini göstermektedir. Dört farklı çelik numunenin polarizasyon eğrileri birbirine çok benzemektedir. Numunelerde akım değerinin sıfır olduğu potansiyel yaklaşık -500 mV olup bu değerden sonra akım artışı başlamaktadır. Metalik malzemelerde çok düşük potansiyel değerlerinde katodik davranış görülmekte ve korozyon olmamaktadır. Metal bu potansiyel aralığında tutulduğu zaman korozyon önlenmektedir. Potansiyel değeri pozitif yönde değiştiğinde akım artmaya başlamakta, potansiyel değeri arttıkça akımın artması korozyonun devam ettiğini göstermektedir. Verilen polarizasyon eğrilerinde -1200 mV'dan 500 mV potansiyel değerine gidiş ve tekrar -1200 mV değerine dönüş uygulanmıştır. Gidiş ve dönüş eğrilerinin birbirine yakın olması, gidiş ve dönüşte korozyonun aynı seviyelerde olduğunu, korozyonun artmadığını göstermektedir. Gidiş eğrisi ile dönüş eğrisi birbirinden uzak olsa idi, yani potansiyel halkaları geniş olsa idi, gidişe göre dönüşte korozyonun daha fazla olduğu, çelik yüzeyinin daha da aktif hale geldiği anlaşılırdı. Pozitif yönde uygulanan en yüksek potansiyel değerinde (500 mV), numunelerde oluşan akım değeri yaklaşık 13 mA seviyelerinde ölçülmüştür.

Şekil 3'te verilen asidik ortamdaki Tafel polarizasyon eğrileri incelendiğinde bor içermeyen ve farklı oranlarda bor içeren çelik numunelerin eğrilerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir. Bu eğrilerden belirlenen ve Çizelge 2'de verilen, korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ) değerleri birbirine yakın olup, bor içeren numunelerde yaklaşık 20-30 mV civarında negatif yönde değişim olmuştur. Korozyon akımı ( $i_{kor}$ ) ve korozyon akımına göre belirlenen korozyon hızı değerleri de bor ilavesi ile küçük oranlarda artış göstermiştir. Korozyon akımının artışı, malzemenin korozyon hızının artması, korozyon dayanımının azalması anlamındadır. Buna göre çeliklere yapılan düşük oranda bor ilavesi asidik ortamda çeliklerin korozyon dayanımında düşük oranlarda zayıflamaya neden olmuştur. Lu, H.ve arkadaşları [3], düşük oranlarda bor içeren yüksek kromlu dökme demir malzemelerde korozyon davranışlarını inceledikleri çalışmada bor ilavesi ile korozyon dayanımının azaldığını, sertlik artışı nedeni ile sürtünmeye direnç arttığından dolayı da erozyonlu korozyon dayanımının geliştiğini bildirmişlerdir. Korozyon dayanımının azalması, bor ilavesi ile karbür oluşumunun artmasına, serbest kromun azalmasına ve demir esaslı metallerde kromun metal yüzeyinde oluşturduğu pasifleşmenin azalmasına atfedilmiştir. Yaptığımız çalışmada kullanılan numuneler krom içermeyen çelikler olduğu için borun etkisini pasifleşmenin azalmasına atfetmek doğru değildir. Upadhyay, N. ve arkadaşları [7] daha düşük oranlarda krom içeren ferritik çeliklerde bor ve azotun birlikte etkilerini incelediği çalışmada,



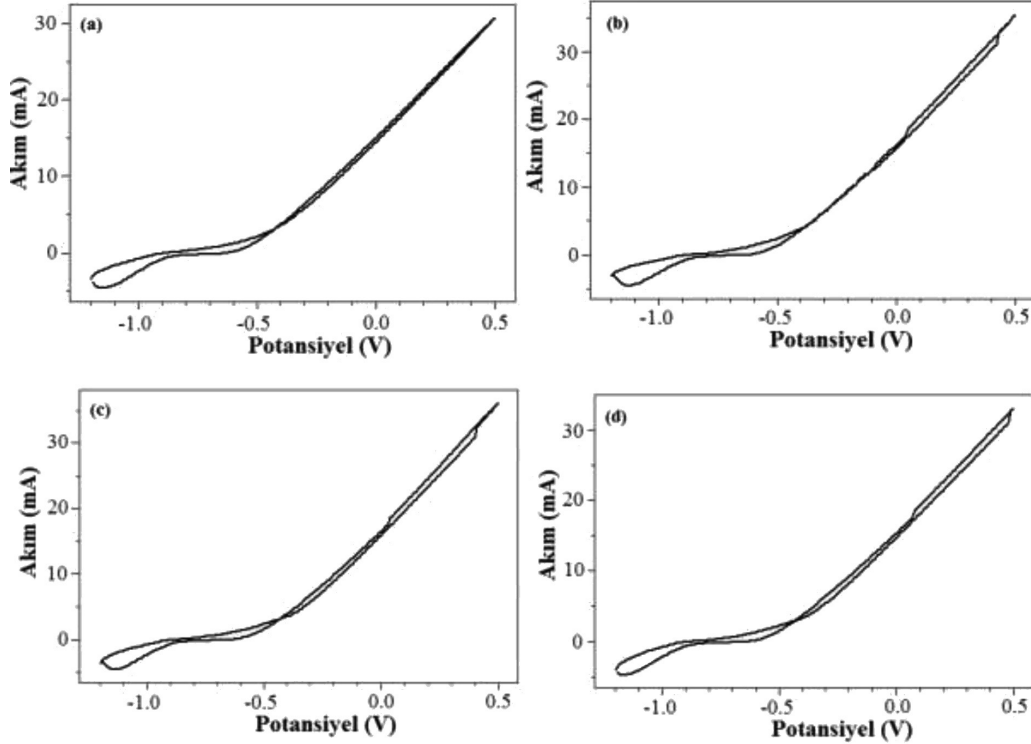
**Şekil 2.** Asidik ortamda çeliklerin polarizasyon eğrileri (a) Borsuz (b) 15 ppm bor (c) 20 ppm bor (d) 100 ppm bor (Polarization curves of steels in acidic medium (a)without boron (b) 15 ppm boron (c) 20 ppm boron (d) 100 ppm boron).



Şekil 3. Asidik ortamında çeliklerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of steels in acidic medium).

Çizelge 2. Asidik ortamda Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal veriler (Electrochemical data derived from Tafel polarization curves in acidic medium).

| Bor miktarı (ppm) | Korozyon potansiyeli (mV) | Korozyon akımı (A)   | Korozyon hızı (mm/y) |
|-------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| 0                 | -551                      | $1,31 \cdot 10^{-4}$ | 3,08                 |
| 15                | -578                      | $3,02 \cdot 10^{-4}$ | 6,09                 |
| 20                | -581                      | $1,99 \cdot 10^{-4}$ | 4,69                 |
| 100               | -570                      | $1,81 \cdot 10^{-4}$ | 4,26                 |



Şekil 4. Tuzlu ortamda çeliklerin polarizasyon eğrileri (a) Borsuz (b)15 ppm bor (c) 20 ppm bor (d)100 ppm bor (Polarization curves of steels in saltwater medium (a)without boron (b) 15 ppm boron (c) 20 ppm boron (d) 100 ppm boron).

yapıda bor ve azotun yüksek oranlarda bulunması durumunda akım yoğunluğu ve korozyonun fazla olduğunu, korozyondaki bu artışta, bor ve azotun matriste çözünmesinin azalması, bunun yerine bornitrür oluşmasının etkili olduğunu bildirmişlerdir. Çelik yapısına katılan alaşım elementleri pasif bir film oluşumunu

sağlamıyorsa çeliğin korozyon dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu alaşım elementlerinin elektrot potansiyelleri demire göre daha aktif yönde ise anodik davranış, daha soy yönde ise katodik davranış göstermektedirler. Anodik davranış gösterdiklerinde seçimli olarak çözünerek korozyonu hızlandırmakta,

katodik davranış gösterdiklerinde de demir matrisin korozyonunu hızlandırmaktadırlar. Yaptığımız çalışmada da alaşım elementi olarak kullanılan bor, demire göre daha soy olup, yapıda bulunan düşük oranlardaki borun katodik davranış göstererek demir matrisin korozyonunu hızlandırdığı düşünülmektedir.

Bor içermeyen ve 15 ppm, 20 ppm ve 100 ppm oranlarında bor içeren çeliklere tuzlu (0,1 M NaCl) ortamda -1200 mV ile 500 mV arasında potansiyel uygulandığında akımdaki meydana gelen değişim Şekil 4'te görülmektedir. Aynı ortamdaki Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 5'de, bu eğrilerden elde edilen korozyon potansiyeli ( $E_{kor}$ ), korozyon akımı ( $i_{kor}$ ) ve korozyon hızı değerleri Çizelge 3'de verilmektedir.

Şekil 4'de görülen tuzlu ortam polarizasyon eğrileri asidik ortam polarizasyon eğrileri gibidir. Tuzlu ortamda da anodik yöne gidiş ve tekrar katodik yöne dönüşte eğriler üst üstedir, yani gidiş ve dönüş yönünde akım değerleri neredeyse aynıdır. Bu da anodik yönde zorlama ile yüzeyde küçük oranlarda değişim olduğunu, korozyon nedeniyle aşırı yıpranma olmadığını göstermektedir. Tuzlu ortamda da akımın arttığı yani çeliğin aktifleştiği potansiyel değeri dört farklı oranda bor içeren numunede de yaklaşık -500 mV seviyeleridir, bu potansiyelden öncesinde katodik davranış görülmektedir.

Şekil 5'te verilen tuzlu ortamdaki Tafel polarizasyon eğrileri incelendiğinde, bor içeren numunelerde korozyon

potansiyellerinde pozitif yönde bir miktar değişim görülmektedir. Tuzlu ortam Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen Çizelge 3'te verilen korozyon akımı ( $i_{kor}$ ) ve korozyon hızı değerleri incelendiğinde bor içermeyen çelik ile 15 ppm bor içeren çelikte yaklaşık aynı değerler belirlenmiştir. Daha yüksek oranda bor ilavesi ile özellikle de en yüksek oranda 100 ppm bor ilavesi durumunda korozyon akımının arttığı yani korozyon hızının arttığı, korozyon dayanımının azaldığı görülmüştür. Tuzlu su ortamında da asidik ortamda olduğu gibi çelik bileşiminde bulunan bor katodik davranırken, demir matris anodik davranmakta, bu etkiyle de demir matrisin çözünmesi hızlanmaktadır. Saf metallerde bu tür alaşım elementleri olmadığı için korozyon dayanımı genellikle iyi iken metal alaşımlarında alaşım elementleri nedeniyle mikrogalvanik çiftler oluşarak mikrogalvanik özellikle korozyon oluşmakta ve aktif olan matris metali veya aktif olan alaşım elementi çözünmekte, korozyon hızlanmaktadır. Bor içeren çeliklerde de bor elementi daha soy özellikle olduğu için demir anodik davranarak çözünmektedir.

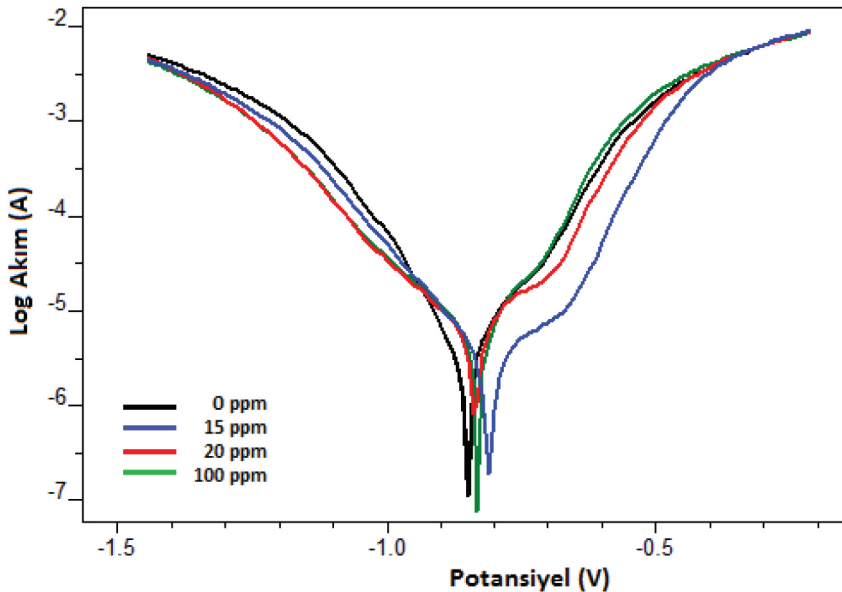
#### 4. Sonuçların değerlendirilmesi (Conclusion)

Bor içermeyen ve 15 ppm, 20 ppm, 100 ppm bor içeren az karbonlu çeliklerin asidik ve tuzlu ortamda elektrokimyasal olarak korozyon davranışlarının incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1) Hem asidik ortamda hem de tuzlu ortamda çelik numuneler -500 mV potansiyel değerlerine kadar

**Çizelge 3.** Tuzlu ortamda Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal veriler (Electrochemical data derived from Tafel polarization curves in saltwater medium).

| Bor miktarı (ppm) | Korozyon potansiyeli (mV) | Korozyon akımı (A)   | Korozyon hızı (mm/y) |
|-------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|
| 0                 | -861                      | $3,16 \cdot 10^{-6}$ | 0,07                 |
| 15                | -811                      | $2,62 \cdot 10^{-6}$ | 0,06                 |
| 20                | -850                      | $5,44 \cdot 10^{-6}$ | 0,13                 |
| 100               | -835                      | $5,15 \cdot 10^{-6}$ | 0,35                 |



**Şekil 5.** Tuzlu ortamda çeliklerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of steels in saltwater medium).

katodik davranış göstermektedir. Bu değerden sonra anodik davranışa geçilmektedir.

- 2) Polarizasyon eğrilerinde potansiyel halkaları geniş olmayıp oldukça dardır. Buna göre gidiş ve dönüş akımları birbirine yakın değerlerdir. Bu durum numunelere pozitif yönde aşırı anodik potansiyel uygulamasının yüzeyde aşırı bir bozunma oluşturmadığını göstermektedir.
- 3) Az karbonlu çeliklere çok düşük oranlarda bor ilavesi hem asidik ortamda hem de tuzlu ortamda çeliğin korozyon hızını artırmakta, korozyon dayanımını azaltmaktadır. Çeliğe bor ilavesi sonucunda ana yapı olan demir ile alaşım elementi olan bor arasında mikrogalvanik çift oluşumu sonucunda daha soy bir element olan borun katodik davranması ve demirin anodik çözünmesi nedeniyle korozyon hızının arttığı düşünülmektedir.

### Kaynaklar (References)

- [1] Leżkowska B., Dziurka R., Bala P., The analysis of phase transformation of undercooled austenite and selected mechanical properties of low-alloy steel with boron addition, *Arc. Civ. Mech. Eng.* 15, 308-316, 2015.
- [2] Galeano K. F. R., Baracaldo R. R., Rodriguez A. M., Marrero J. M. C., Florez J. J. O., Influence of boron content on the fracture toughness and fatigue crack propagation kinetics of bainitic steels, *Theor. Appl. Fract. Mech.* 86, 351-360, 2016.
- [3] Lu H., Li T., Cui J., Li Q., Li D. Y., Improvement in erosion-corrosion resistance of high-chromium cast irons by trace boron, *Wear*, 376-377, 578-586, 2017.
- [4] Peruzzo M., Beux T. D., Ordoñez M. F. C., Souza R. M., Farias M. C. M., High-temperature oxidation of sintered austenitic stainless steel containing boron or yttria, *Corros. Sci.* 129, 26-37, 2017.
- [5] Zhao Y., Huang X., Yu B., Chen L., Liu X., Influence of boron addition on microstructure and properties of a low-carbon cold rolled enamel steel, *Procedia Eng.* 207, 1833-1838, 2017.
- [6] Çarboğa C., Düşük karbonlu çeliklere bor ilavesinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [7] Upadhyay N., Pujar M. G., Sakthivel T., Mallika C., Laha K., Mudali U. K., Effect of addition of boron and nitrogen on the corrosion resistance of modified 9Cr-1Mo ferritic steel, *Procedia Eng.* 86, 606-614, 2014.
- [8] Pujar M. G., Das C. R., Thirunavukkarasu S., Mudali U. K., Bhaduri A., Brijitta J., Tata B. V. R., Effect of boron addition on pitting corrosion resistance of modified 9Cr-1Mo steel: Application of electrochemical noise, *Mater. Chem. Phys.* 130, 536-547, 2011.
- [9] Ma S., Xing J., Fu H., Yi D., Zhi X., Li Y., Effects of boron concentration on the corrosion resistance of Fe-B alloys immersed in 460 °C molten zinc bath, *Surf. Coat. Technol.* 204, 2208-2214, 2010.
- [10] Samal P. K., Terrell F. B., Effect of addition of boron on corrosion resistance of stainless steel, *PM Science/Technology Briefs*, 3 (3), 18-22, 2010.
- [11] Menapace C., Molinari A., Kazior J., Pieczonka T., Surface self-densification in boron alloyed austenitic stainless steel and its effect on corrosion and impact resistance, *Powder Metall.*, 50 (4), 326-335, 2007.