

Araştırma Makalesi / Research Article

Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Difüzyon Kinetiğinin İncelenmesi

Yusuf KAYALI<sup>1\*</sup>, Yılmaz YALÇIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2449-7125>

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye,  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7773-8896>

Geliş/ Recieved: 03.05.2020;

Kabul / Accepted: 18.05.2020

**ÖZET:** Paslanmaz çeliklerinin korozyon direncinin genel olarak yüksek olmasından dolayı, AISI 316L paslanmaz çeliği çeşitli endüstri sektörlerinde kullanılmaktadır. Bunun yanında, korozyon direncinin yüksek olması ve biouyumluluk gibi özelliklerinden dolayı tıp alanında da implant malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Böyle iyi özellikleri olmasına rağmen zayıf aşınma performansı ve düşük sertlik taşıdığından endüstride bu çeliğin kullanıldığı alanları sınırlandırılmaktadır. Teknolojinin gelişiminin sağlanması ile beraber malzemelerin yüzey özelliklerinin değiştirilmesiyle ilgili son zamanlarda birçok kaplama yöntemleri gündeme gelmiştir. Bu kaplama yöntemlerinden bir tanesi de borlamadır. Termokimyasal bir difüzyon işlemi olan borlama, bor atomlarının yüksek sıcaklıkta çelik yüzey üzerine difüze edilmesi işlemidir. Borlama işlemiyle düşük sürtünme katsayısı, yüksek korozyon, yüzey sertliği ve aşınma direnci gibi özellikler elde edilir. AISI 316 L paslanmaz çeliğifarklı sıcaklık (1073, 1123, 1173 K) ve sürelerde (2, 4, 6 saat) borlanmıştır. Elde edilen kaplama tabakalarının yüzey ve faz özellikleri optik ve XRD analizi yardımıyla yapılmıştır. Borlanmış AISI 316 L paslanmaz çeliğin sertlikleri Knoop uç kullanılarak ölçülmüştür. Difüzyon kinetikleri ise Arrhenius denklemi ile hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** AISI 316 L Paslanmaz Çelik, Borlama, Borür tabakası, Mikrosertlik, Difüzyon Kinetiği.

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [ykayali@aku.edu.tr](mailto:ykayali@aku.edu.tr)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Kayalı, Y., Yalçın, Y. (2020). Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Difüzyon Kinetiklerinin İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 1(1), 12-21.

## Investigation of Diffusion Kinetics of Boronized AISI 316 L Stainless Steel

**ABSTRACT:** Due to the high corrosion resistance of stainless steels in general, AISI 316L stainless steel is used in various industrial sectors. In addition, it is used as an implant material in the medical field due to its high corrosion resistance and features such as biocompatibility. Although it has such good properties, its poor wear performance and low hardness limits the areas where this steel is used in the industry. Along with the advancement of technology, many coating methods have recently been brought up to change the surface properties of the materials. One of these coating methods is boronizing. Boronizing, which is a thermochemical diffusion process, is the process of diffusing boron atoms onto steel surface at high temperatures. Boronizing process provides properties such as low friction coefficient, high corrosion, surface hardness and wear resistance. AISI 316 L stainless steel is boronized at different temperatures (1073, 1123, 1173 K) and times (2, 4, 6 hours). Surface and phase properties of the coating layers obtained were made with the help of optical and XRD analysis. The hardness of the boronized AISI 316 L stainless steel was measured using the Knoop tip. Diffusion kinetics was calculated with the Arrhenius equation.

**Keywords:** AISI 316 L Stainless Steel, Borided, Boride Layers, Microhardness, Diffusion Kinetics.

### 1. GİRİŞ

AISI 316 L paslanmaz çeliği, yüksek sıcaklık ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı birçok endüstri alanlarında geniş kullanım alanına sahiptir (Heras ve ark., 2008; Kayalı ve ark., 2013). Bunun yanında yüksek korozyon direnci ve biouyumluluk gibi özelliklerinden tıp alanında implant olarak kullanılmaktadır (Gil ve ark., 2006). Böyle üstün özellikleri olmasına rağmen zayıf aşınma performansı ve düşük sertliğe sahiptir (Heras ve ark., 2008). Son zamanlarda AISI 316 L paslanmaz çeliğin bu zayıf yönlerini geliştirmek için çeşitli yüzey kaplama işlemleri uygulanmaktadır. En yaygın olarak kullanılan yüzey kaplama yöntemlerin biriside borlama işlemidir. Termo-kimyasal bir difüzyon işlemi olan borlama işlemi bor atomlarının yüksek sıcaklıkta çeliğe difüzyonudur (Kayalı, 2015). Genellikle, 700 °C-1100 °C aralığında 2-10 saat sürelerle farklı (katı, sıvı, gaz, plazma) ortamlarında gerçekleştirilir (Kayalı, 2015). Borlama işlemi, her türlü çeliklere, nikel, titanyum, kobalt, esaslı alaşımlara ve dökme demirler gibi birçok demir esaslı ve demir dışı metallere uygulanmaktadır (Özbek ve Bindal, 2002). En yaygın olarak kullanılan borlama metodu ise kutu borlamadır. Kutu borlama işlemi basit ve maliyeti uygun olduğu için en çok tercih edilmektedir (Atik ve ark., 2003). Borlama işlemi ile yüzey sertliği yükselmesiyle malzemenin adhesiv ve abrasiv aşınma direnci artar.

Bu çalışma da AISI 316 L paslanmaz çeliği farklı sıcaklık ve sürelerde kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlama işlemi sonucunda zaman ve sıcaklık değişimiyle oluşan borür tabaka kalınlıkları tespit edilmiş, tabakaların faz analizi yapılmış ve elde edilen borür tabakasının aktivasyon enerjisi belirlenmiştir.

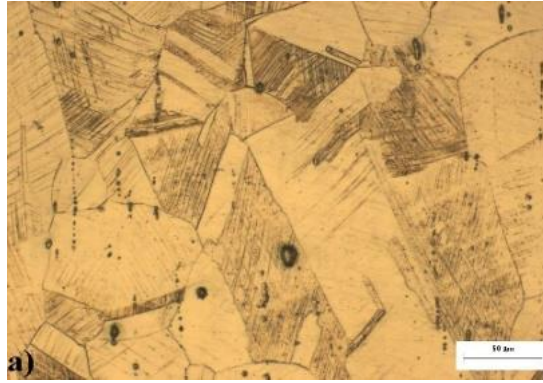
### 2. MATERYAL VE METHOD

#### 2.1. Malzeme ve Borlama

AISI 316 L paslanmaz çeliğin kimyasal analizi Çizelge 1’de ve mikroyapı resmi de Şekil 1’de verilmiştir.

**Çizelge 1.** AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

C	Cr	Ni	Si	Mn	Mo	S	P	Cu	N	Ti
0.02	16.89	10.62	0.39	01,50	2,11	0.03	0.033	0,34	0.054	0.008

**Şekil 1.** AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğin satıldığı durumda optik mikroyapısı

Deneylerde kullandığımız numuneler Ø20x10 mm boyutlarında kesilerek 120-800 gritlik zımparalama kademelerinden geçirilerek hazırlanmıştır. Borlama, paslanmaz çelik pota içerisinde Ekabor-2 tozunda farklı sıcaklık (1073, 1123, 1173 K) ve sürelerde (2, 4, 6 saat) gerçekleştirilerek, oda sıcaklığına kadar soğutuldu. Kesitten kesilen numuneler 120-1200 gritlik zımpara kademelerinde zımparalandı. 1 µm'lik alümina ile parlatıldı ve paslanmaz çelik dağlayıcı ile dağlanmış ve Olympus BX-60 marka optik mikroskopla incelendi. Bor tabakasındaki fazlar CuKα ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) radyasyonu kullanan Shimadzu XRD-6000 marka X-ray difraksiyonu ile tesbit edilmiştir. Optik mikroskoba bağlı bir dijital kalınlık ölçüm cihazı ile borür kalınlığı ölçülmüştür. Borlanmış numuneler Shimadzu HM-2 mikro-sertlik cihazında 50 gr. yük altında Knoop uç kullanılarak sertlik değerleri tespit edildi.

## 2.2. Kinetik

Buradaki kinetik çalışmalar Eşitlik 1'de verdiğimiz Arrhenius denklemi ile yapılmaktadır (Efe ve ark., 2008).

$$D = D_0 \cdot \exp(Q/R \cdot T) \quad (1)$$

$D_0$ : Difüzyon sabiti ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ ),  $Q$ : Aktivasyon enerjisi ( $\text{J/mol}$ ),  $T$ : Sıcaklık ( $^\circ\text{K}$ ) ve  $R$ : Gaz sabiti ( $8,314 \text{ J/mol.K}$ )'dir.

İlk önce Eşitlik 2 yardımı ile çizdiğimiz ( $x^2-t$ ) diyagramının eğiminden difüzyon katsayıları tespit edilmiştir (Kayalı, 2015).

$$x^2 = D \cdot t \quad (2)$$

$x$ : Elde edilen bor tabasının kalınlığı (cm),

$D$ : Difüzyon katsayısı ( $\text{cm}^2/\text{sn}$ )

t : Borlama süresi (sn)

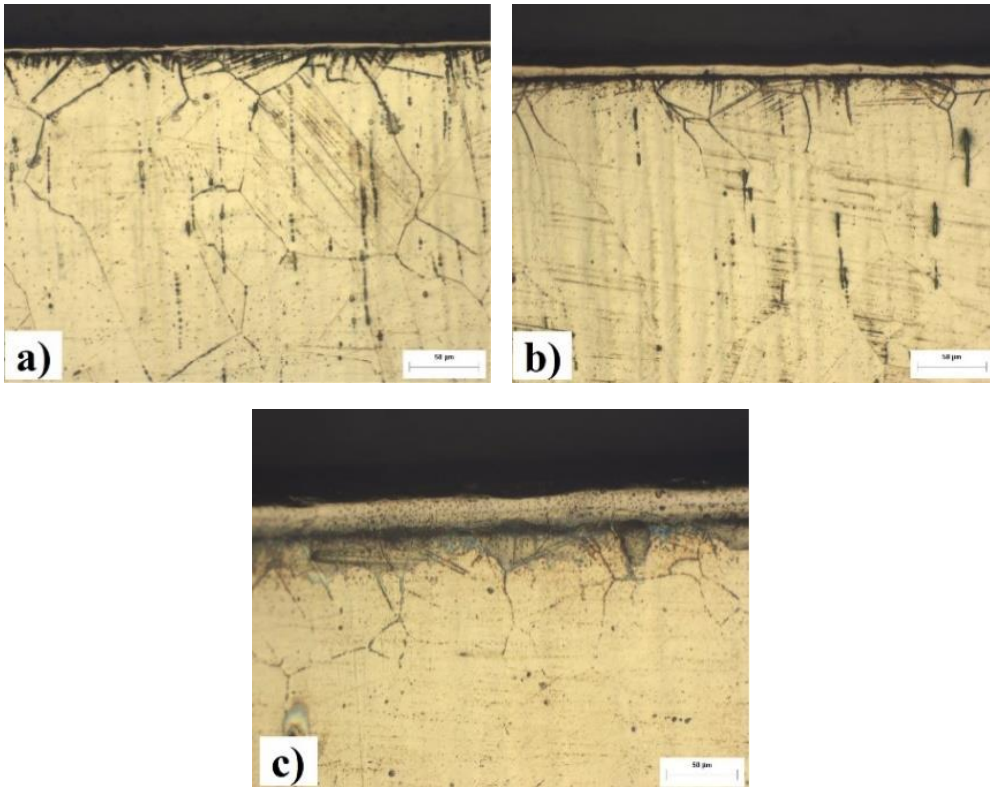
Eşitlik 2'den, Eşitlik 3 elde edilir.  $\ln D$  ile  $1/T$  ile çizilen diyagramın eğimi bize aktivasyon enerjisini (Q) vermektedir (Efe ve ark., 2008; İpek ve ark., 2012; Yu ve ark., 2006).

$$\ln D = \ln D_0 - Q/R.T \quad (3)$$

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1 Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu

1073, 1123 ve 1173 K sıcaklıkta 4 saat borlanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin mikro yapı resimleri Şekil 3'de görülmektedir.

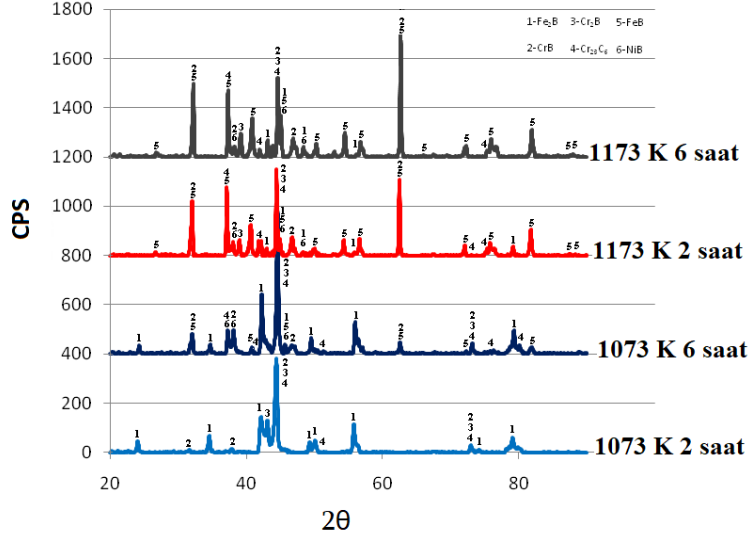


Şekil 3. a) 1073, b) 1123 ve c) 1173 K sıcaklıklarda 4 saat borlanmış AISI 316 L paslanmaz çeliğin optik mikroskop görüntüsü

Şekil 3 de elde edilen borur tabakasında kaplama ve matris arayüzeyinin düz ve pürüzsüz olarak görülmektedir. AISI 316 L paslanmaz çelikte elde edilen borur tabakası, diğer borlanmış çeliklere göre, oluşan borur tabakası düz, ince olmasının sebebi paslanmaz çeliğin yüksek miktarda Cr, Ni olmasıyla difüzyon işlemi zorlaşmaktadır (Kayalı ve ark., 2013; Özbek ve ark., 2002). Çeliklerdeki Cr ve Ni miktarı arttığı için elde edilen borur tabakası ince olmakta ve matris ile borur tabakası arasındaki ara yüzey düzleşir (Meriç ve ark., 2000; Özbek ve ark., 2002, Taktak, 2006; Taktak, 2007). Bu sebepten dolayı elde edilen tabaka borlama süresine, sıcaklığına ve kimyasal bileşimle ilişkilidir (Sinha, 1991; Uzun, 2002; Özbek ve ark., 2004; Efe ve ark., 2008).

#### 3.2 Borur Tabakasının XRD analizi

Şekil 4’de AISI 316 L paslanmaz çeliğin 1073 K ve 1173 K sıcaklıklarda 2 ve 6 saat sürelerde borlanmasıyla elde edilen borür tabakalarındaki fazların tayini için X-ışınları difraksiyon analiz sonuçları verilmiştir. Tabakanın FeB, Fe<sub>2</sub>B, CrB, Cr<sub>2</sub>B, NiB ve Ni<sub>2</sub>B fazlarından oluştuğu XRD analizlerinde görülmektedir.

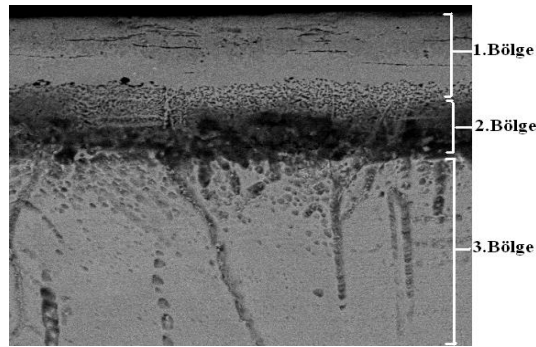


Şekil 4. Borlanmış AISI 316 L paslanmaz çelik numunelerin XRD analizleri

1073 K de 2 saat borlama ile borür tabakasına Fe<sub>2</sub>B fazı hakim iken, 1173 K 6 saat artmasıyla birlikte tabakaya FeB fazı hakim olmaktadır. Borlama süresinin ve sıcaklığının artması ile birlikte FeB ve CrB fazlarının arttığı, Fe<sub>2</sub>B, Cr<sub>2</sub>B fazlarının azaldığı görülmektedir. Difüzyon işleminde yüksek sıcaklıklar da uzun bekleme sürelerinde bor ortamında bekletilmesi sonucunda FeB ve CrB fazları artmaktadır (Kayalı ve ark., 2013).

### 3.3 Borür Tabakasının Kalınlığı ve Sertliği

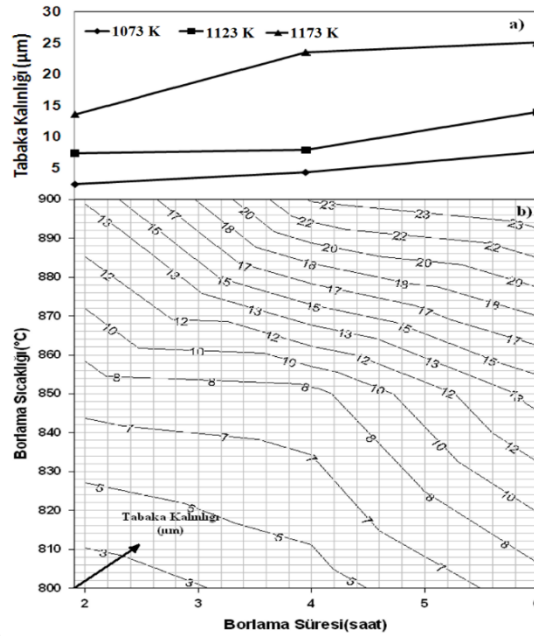
AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikte elde edilen borür tabakası 3 bölgeden oluşmaktadır (Şekil 5). 1.Bölge; Borür tabakası (FeB, Fe<sub>2</sub>B, CrB, Cr<sub>2</sub>B, NiB ve Ni<sub>2</sub>B), 2.Bölge; Borun katı çözelti yaptığı daha az sertliğe sahip bölgedir. 3.Bölge; Çeliğin matris kısmıdır (Özbek ve ark., 2002; Özbek ve ark., 2004; Taktak, 2006; Taktak, 2007; Özdemir ve ark., 2009).



Şekil 5. Borlanmış AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğin SEM görüntüsü

Borlama sıcaklığı ve süresi ile altlık malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak elde edilen borür tabakasının kalınlığı 2,3 µm ile 25 µm arasındadır (Şekil 6a). Borlama sıcaklığı ve süresinin

artmasıyla borür tabakasının kalınlığı artar (Özbek ve ark., 2004; Taktak, 2007; Efe ve ark., 2008). Aynı şekilde borlama süresi ve sıcaklıkla birlikte borür tabaka kalınlıklarındaki değişim ile kontur diyagramı Şekil 8b'de gösterilmiştir. Kontur diyagramı biri sıcaklık ve süre gibi işlem parametrelerine göre büyüme hızını ve kaplama tabakasının kalınlığını tayin etmek için, diğeri ise önceden belirlenmiş büyüme hızı ve kaplama tabaka kalınlıklarını elde etmede işlem zamanı ve sıcaklığını tespit etmek için kullanılır (Uslu ve ark., 2007; Özdemir ve ark., 2009)



Şekil 6. Borlanmış AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğinin borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak tabaka kalınlığındaki değişimi a) tabaka kalınlıkları, b) kontur diyagramı

Elde edilen borür tabaka kalınlığı, diğer çeliklere göre düşük (2,3-25 µm) olduğu için mikrosertlik değerleri Knoop uç kullanılarak yapılmıştır. Borlanmış çeliğin borür tabakasının ve borlanmamış çeliğin yüzey sertlik değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Borür tabakasının sertliği 1836 HK<sub>0,05</sub> ile 2227 HK<sub>0,05</sub> arasında bulunmuştur. Oysaki ana malzemenin sertliği 334 HK<sub>0,05</sub> ‘dir. Malzemelerin yüzey sertliğinin borlama işlemiyle arttığı yapılan birçok literatür çalışmasında tespit edilmiştir. Borür tabaka sertliğinin altlık malzemenin sertliğinden çok yüksek olduğu saptanmıştır. Bunun sebebi olarak kaplama tabakasında FeB, CrB gibi çok sert fazların oluşması gösterilebilir. Ayrıca borür tabakasının sertliği krom miktarının artması ile artmaktadır (Bandini ve ark., 1987; Özbek ve ark., 2002; Genel, 2006; Özdemir ve ark., 2009).

Çizelge 2. Borlanmış AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğin tabaka kalınlık ve mikrosertlik değerleri

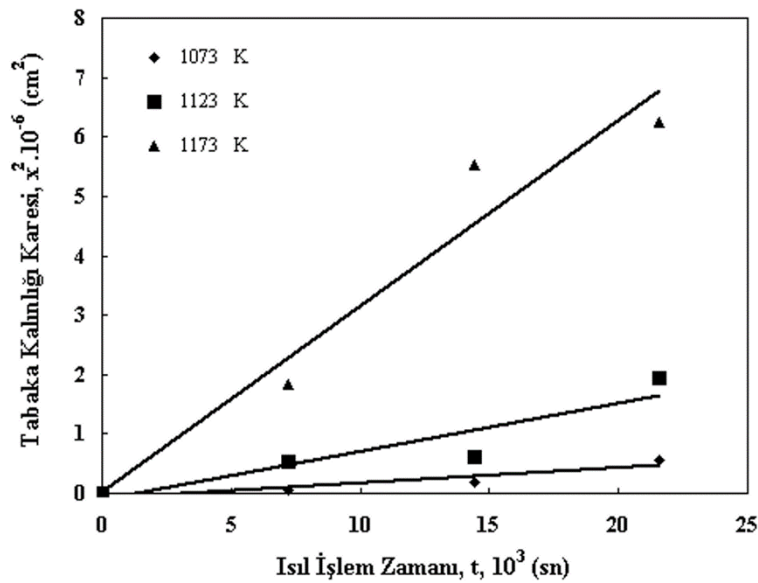
Kaplamasız Sertlik Değeri (HK <sub>0,05</sub> )	Sıcaklık (K)	Süre (Saat)	Tabaka Kalınlığı (µm)	Mikrosertlik Değeri (HK <sub>0,05</sub> )
334	1073	2	2,3	1836
		4	4,2	1980
		6	7,5	2022
	1123	2	7,3	2017
		4	7,8	2054
		6	13,9	2070
		2	13,5	2082

1173	4	23,5	2119
	6	25	2227

### 3.4 Borür Tabakasının Difüzyon Kinetiği

Elde edilen borür tabakasının kalınlığı, borlama sıcaklığına, borlama süresine ve içerdiği alaşım elementlerine de bağlıdır (Uslu ve ark., 2007; Efe ve ark., 2008). Farklı sıcaklık (1073, 1123 ve 1173 K) ve sürelerde (2, 4, 6 saat) borlanmış AISI 316 L paslanmaz çeliğinin borlama süresi ile borür tabaka kalınlığının karesi ( $x^2-t$ ) değişimini veren diyagram Şekil 7 de ve difüzyon katsayılarının değerleri Çizelge 3’de verilmiştir. Şekil 7’de borür tabaka kalınlığı ve borlama süresi arasında parabolik ilişki vardır.

Sıcaklığın artmasıyla difüzyon katsayısının artması beklenen bir sonuçtur (Şen ve ark., 2005; Taktak, 2006; Uslu ve ark., 2007; Efe ve ark., 2008). Borlama sıcaklığın yükselmesiyle, difüzyon işlemi hızlandığı için daha kalın borür tabakası tesbit edilmiştir.

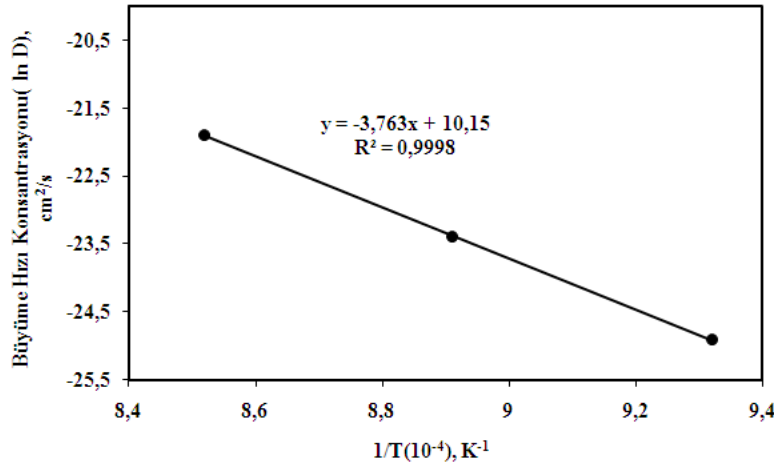


Şekil 7. AISI 316 L paslanmaz çeliğinin ( $x^2-t$ ) diyagramı

Çizelge 3. AISI 316 L paslanmaz çeliğinin farklı sıcaklıklardaki difüzyon katsayı değerleri

Borlama Sıcaklığı (K)	Difüzyon Katsayısı (cm²/sn)
1073	$1,521 \cdot 10^{-11}$
1123	$6,857 \cdot 10^{-11}$
1173	$30,886 \cdot 10^{-11}$

Aktivasyon enerjisi (Q) Eşitlik 3.3 kullanılarak  $\ln D$  ile  $1/T$  arasında elde edilen diyagramın eğiminden hesaplanmıştır. Şekil 8’de Farklı sıcaklık (1073, 1123 ve 1173 K) ve sürelerde (2, 4, 6 saat) borlanmış AISI 316 L paslanmaz çeliğinin  $\ln D-1/T$  diyagramı ve Çizelge 4’de elde edilen aktivasyon enerji değeri ile elde edilen formül verilmiştir.



Şekil 8. AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğin lnD-1/T grafiği

Çizelge 4. Aktivasyon enerjisi ve elde edilen formüller

Çelik	Elde Edilen Formüller		Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)
		$D = 25591,102. \exp. \left( -\frac{312930,972}{R \cdot T} \right) \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right]$	
AISI 316 L	$x = \sqrt{25591,102. e^{\left( \frac{37637,5}{T} \right)} \cdot t} \cdot 1000 [\mu\text{m}]$		312,930

Borlama sıcaklığına bağlı olarak AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğinin borür tabaka kalınlığından yola çıkılarak yapılan kinetik incelemesinde, difüzyon katsayılarının sıcaklıkla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. 1073 K'de  $1,521 \cdot 10^{-11}$ , 1123 K'de  $6,857 \cdot 10^{-11}$  ve 1173 K'de  $30,886 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{sn}$  ve aktivasyon enerjisi 312,930 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Elde ettiğimiz formüllerden AISI 316 L paslanmaz çelik için istediğimiz sıcaklıkta elde edeceğimiz bor kalınlığını ve difüzyon katsayısını hesaplayabiliriz (Çizelge 4).

Çizelge 5'de literatürde farklı borlama ortamlarında yapılmış olan çeliklerin aktivasyon enerji değerleri verilmektedir. AISI 316 L paslanmaz çeliğin kinetik sonuçları daha önce yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırıldığında aktivasyon enerjisinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğinin çok yüksek miktarda Cr ve Ni elementine sahip olmasıdır. Aktivasyon enerjisinin artması ve tabaka kalınlığının azalması çelikteki alaşım elementinin miktarının artması ile ilgilidir (Şen ve ark., 2005; Taktak, 2006; Uslu ve ark., 2007; Efe ve ark., 2008).

Çizelge 5. Literatürde farklı borlama ortamlarında farklı çeliklerde elde edilmiş aktivasyon enerjilerinin karşılaştırılması

Çelik	Sıcaklık Değişimi (K)	Borlama Ortamı	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)	Kaynaklar
AISI 5140, 4340, D2	1123-1223	Sıvı Borlama	223, 234, 170	Şen ve ark., 2005
AISI H13, 304	1073-1223	Sıvı Borlama	244,37-253,35	Taktak, 2006
AISI 1040, P20	1073-1223	Kutu Borlama	168, 200	Uslu ve ark., 2007
31CrMoV9, 34CrAlNi7	1123-1223	Kutu Borlama	230-270	Efe ve ark., 2008
AISI 316 L	1073-1173	Kutu borlama	312,930	Bu çalışmada



#### 4. SONUÇ

AISI 316 L paslanmaz çeliğin kaplama ve matris arayüzey düze ve pürüzsüz bir tabakası elde edilmiştir. X-ışınları difraksiyon analizi ile elde edilen borür tabakasında FeB, Fe<sub>2</sub>B, CrB, Cr<sub>2</sub>B, NiB ve Ni<sub>2</sub>B fazları elde edilmiştir. Düşük borlam sürelerinde ve sıcaklıklarında Fe<sub>2</sub>B fazı baskın iken, sıcaklık ve süresinin artmasıyla FeB ve CrB fazları baskın olmasının yanında NiB ve Ni<sub>2</sub>B fazlarının da olduğu görülmüştür.

Borlama sıcaklığı ve süresi ile altlık malzemenin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak elde edilen borür tabakasının kalınlığı 2,3 µm ile 25 µm arasındadır. Borlanmış AISI 316 L paslanmaz çeliğinin zayıf olan yüzey sertliği yaklaşık 7 kat artmıştır. AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğin matris sertliği 334 HK<sub>0,05</sub> iken, borlama işlemi sonucunda yüzey sertliği borlama işleminin sıcaklık ve süresine bağlı olarak 1836 HK<sub>0,05</sub> ile 2227 HK<sub>0,05</sub> arasında değişmiştir.

Borlama sıcaklığına bağlı olarak AISI 316 L östenitik paslanmaz çeliğinin borür tabaka kalınlığından yola çıkılarak yapılan kinetik incelemede, difüzyon katsayılarının sıcaklıkla doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. AISI 316 L paslanmaz çelikte yüksek miktarda bulunan alaşım elementlerinden dolayı aktivasyon enerjisi 312,930 kJ/mol olarak belirlenmiştir. Alaşım elementinin artmasıyla tabaka kalınlığı azalmak ve aktivasyon enerjisini artmaktadır.

#### 5. TEŞEKKUR

Bu çalışma, Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "09.TEF.01" kodlu proje ile desteklenmiştir.

#### 6. KAYNAKLAR

- Atık E., Yunker U., Meriç C., The Effects of Conventional Heat Treatment and Boronizing on Abrasive Wear and Corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 Steels, *Tribology International*, 36(3), 155-161, 2003.
- Badini C., Cianoglio C., Paradelli G., The Effect of Carbon and Chromium on the Hardness of Borided Layers, *Surface and Coatings Technology*, 30, 157-170, 1987.
- Efe G.Ç., İpek M., Özbek İ., Bindal C., Kinetics of borided 31CrMoV9 and 34CrAlNi7 steels *Materials Characterization*, 59, 23-31, 2008.
- Genel K., Boriding kinetics of H13 steel, *Vacuum*, 80, 451-457, 2006.
- Gil L., Brühl S., Jiménez L., Leon O., Guevara R., Staia M.H., Corrosion performance of the plasma nitrated 316 L stainless steel, *Surface & Coatings Technology*, 201, 4424-4429, 2006.
- Heras E.D.L., Egidi D.A., Corengia P., Santamaria D.G., Luis A.G., Brizvela M., Lopez G.A., Martinez M.F., Dublex Surface Treatment of an AISI 316 L Stainless Steel; Microstructure and Tribological Behaviour, *Surface&Coating Technology*, 202, 2945-2954, 2008.
- Ipek M., Efe G.C., Ozbek I., Zeytin S., Bindal C., Investigation of Boronizing Kinetics of AISI 51100 Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(5), 733-738, 2012.
- Kayalı Y., Büyüksağış A., Yalçın Y., Corrosion and Wear Behaviors of Boronized AISI 316L Stainless Steel, *Journal of Metals And Materials International*, 19(5), 1053-1061, 2013.
- Kayalı Y., Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 Steel in Micro-wave furnace. *Vacuum*, 121(3), 129-134, 2015.

- Meriç C., Şahin S., Yılmaz S.S., Investigation of The Effect on Boride Layer of Powder Particle Size Used in Boronizing with Solid Boron-yielding Substances, *Materials Research Bulletin*, 35C, 2165-2172, 2000.
- Özbek I., Bindal C., Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. *Surface and Coatings Technology*, 154(2), 14-20, 2002.
- Özbek I., Sen S., Ipek M., Bindal C., Zeytin S., Ucisik A.H., A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel, *Vacuum*, 73(2), 643-648, 2004.
- Özdemir O., Omar M.A., Usta M., Zeytin S., Bindal C., Ucisik A.H., An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel, *Vacuum*, 83(2), 175-179, 2009.
- Şen Ş., Şen U., Bindal C., An Approach to Kinetic Study of Borided Steels, *Surface & Coatings Technology*, 191, 274-285, 2005.
- Sinha A. K., Boriding (Boronising), *ASM Handbook*, Vol. 4, J. Heat Treating, 437-447, 1991.
- Taktak Ş., A study on the diffusion kinetics of borides on boronized Cr-based, *J Mater Sci.*, 41, 7590-7596, 2006.
- Taktak Ş., Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, *Materials and Design*, 28, 1836-1843, 2007.
- Uslu I., Comert H., Ipek M., Ozdemir O., Bindal C., Evaluation of borides formed on AISI P20 steel, *Materials and Design* 28, 55- 61, 2007.
- Uzun H.A., Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları”, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.