



---

**Makale / Research Paper**

---

## **Borlanmış Sementasyon Çeliğinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi**

**Atila Gürhan ÇELİK<sup>a</sup>, İbrahim GÜNEŞ<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>Giresun University, Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, 28200, Giresun/Turkey

<sup>b</sup>Afyon Kocatepe University, Technology Faculty, 03200, Afyonkarahisar/Turkey

<sup>a</sup>[3gunes3@gmail.com](mailto:3gunes3@gmail.com)

**Received/Geliş:** 17.01.2019

**Accepted/Kabul:** 18.03.2019

**Öz:** Bu çalışmada farklı B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC/B<sub>4</sub>C pasta karışımlarında plazma pasta borlanmış sementasyon çeliğinin yüksek yük altındaki aşınma davranışları incelenmiştir. Plazma borlama işlemi vakum altında 10 mbar işlem basıncında, H<sub>2</sub> ve Ar gazları kullanılarak 700, 750 ve 800 °C'de 5 saat süresince gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneylerinde Plint Firması'nın "TE 53SLIM çok-amaçlı sürtünme ve aşınma test cihazı" pin-on-ring sisteminde gerçekleştirilmiştir. Deneyler 70 N yük altında, sabit kayma hızında (yaklaşık 0,3 m/s), 500 metre mesafe boyunca ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Aşınma sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülüğü, sürtünme katsayısı, aşınma iz derinliği, aşınma ağırlık kayıpları, aşınma hızları araştırılmıştır. Aşınma sonucunda farklı B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC/B<sub>4</sub>C pasta karışımlarında plazma pasta borlanmış sementasyon çeliğinin aşınmaya karşı direncinin her bir pasta karışımında farklılık gösterdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Borlama; çelik; yüzey pürüzlülüğü; sürtünme katsayısı; Aşınma.

## **Investigation of the Tribological Properties of Boronized Cementation Steel**

**Abstract:** In this study, plasma paste was boronized in different B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC/B<sub>4</sub>C paste mixtures the tribological behaviors of Cementation steel under high load were investigated. Plasma paste boriding was carried out under vacuum at 10 mbar process pressure, using H<sub>2</sub> and Ar gases for 5 hours at 700, 750 and 800C. The wear tests were carried out on Plint's "TE 53SLIM multi-purpose friction and wear tester" pin-on-ring system. The tests were carried out under a load of 70 N, at a constant sliding speed (approximately 0.3 m / s), at a distance of 500 m and at room temperature. Surface roughness, friction coefficient, wear trace depth, wear weight losses, wear rates were investigated after the abrasion tests. It has been found that the abrasion resistance of the Cementation steel sheet, which is plasma paste borided in different B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC/B<sub>4</sub>C paste blends, differs in each paste mix.

**Keywords:** Boriding; steel; surface roughness, friction coefficient; wear.

### **1. Giriş**

Türkiye dünyada en fazla bor rezervine sahip ülkeler arasında başta gelmektedir. Günümüzde üstün özelliklere sahip olan bor ve bileşikleri birçok araştırmacı tarafından üzerinde çalışmalar yapılan bir alandır. Özellikle son yıllarda metalik malzemelerin termo-kimyasal yöntemlerle kaplanması ilgi odağı olmuştur. Hem ticari hem de bilimsel araştırmalar için birçok borlama tekniği günümüzde kullanılmaktadır. Genel olarak borlama işlemi diğer difüzyon esaslı yüzey işlemlerine kıyasla üstün özelliklere sahiptir. Borlama termo-kimyasal bir difüzyon işlemi olup borun yüksek sıcaklıkta metalik malzeme içerisine yayınıdır. Borlama işlemi genellikle, 700-1300 °C sıcaklık aralığında 1-16 saat gibi farklı sürelerle çeşitli borlama teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Borlama

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Gürhan Çelik A., Gunes I., "Borlanmış Sementasyon Çeliğinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(2); 333-344.

*How to cite this article*

Gürhan Çelik A., Gunes I., "Investigation of the Tribological Properties of Boronized Cementation Steel" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2019, 6(2); 333-344.

bütün çeliklere uygulanabildiği gibi demir dışı metal ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir [1-3]. Borlama işlemi katı, sıvı, gaz, pasta, plazma, plazma pasta, elektrokimyasal ve iyon implantasyonu gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Katı borlama genellikle ticari Ekabor® tozları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında farklı oranlarda bor içeriğine sahip  $B_4C$ ,  $KBF_4$  ve  $SiC$  içeren karışımlar ile de yapılabilmektedir. Bu yöntemde bor tozları ve numuneler belli aralıklarla birlikte bir kutuya doldurulur ve kapağı hava sızdırmayacak (Şamot çamuru kullanılarak) bir şekilde kapatılır. Kutu gerekli sıcaklığa kadar ısıtılır. Bu sıcaklıkta gerektiği kadar tutulur ve fırından çıkartılarak kutu/pota soğutulur. Katı borlamada numune yüzeyinin temizlenmesi gerekir. Ancak yapışma tam olmadığından numune yüzeyi kolaylıkla temizlenir. Sıvı borlamada boraks, borik asit ve ferro silis karışımından oluşan erimiş tuz banyosuna numune daldırılır ve bu sıvı karışım ergimesi sonucunda sıvı ortamında borlama gerçekleşir. Plazma ve gaz ortamında gerçekleşen borlama işleminde  $BCl_3$  ve  $BF_3$  gibi bor kaynakları ile  $H_2$  ile Ar gazları kullanılmaktadır [4-7]. Plazma ve gaz borlamada, malzeme yüzeyi temiz olmasına rağmen kullanılan gazların zehirli, pahalı ve patlayıcı olması bu işlemin dezavantajlarından. Termokimyasal bir yüzey işlemi olan borlama, yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen ve çeliklerin yüzey özelliklerini değiştiren etkili yöntemlerden biridir. Dünyada en çok bor rezervine sahip olan ülkemizin, bor bileşiklerinin üstün özelliklerinden faydalanması zorunludur. Borlama işlemi değişik yöntemlerle gerçekleştirilebilmektedir. Katı borlama çok yaygın bir borlama yöntemi olmasına rağmen, kullanılan tozun nispeten pahalı olması bir dezavantaj olarak gözükmemektedir. Sıvı borlamada erimiş tuz tabakası numune yüzeyine yapışmakta ve kalıntının temizlenmesi problem oluşturmaktadır. Gaz ve plazma yöntemlerinde ise patlayıcı, zehirli ve korozif gazların kullanılıyor olması bu yöntemi yaygınlaştırmamaktadır. Bunun yanında, plazma ve pasta borlamanın kombinasyonu olan plazma pasta borlamada ise kullanılan tozun kolay bulunur ve ucuz olması ve plazmanın aktifliğinden faydalanılacak olması bu yöntemi cazip kılmaktadır.

Teknolojide birçok çelik grubu çok değişik amaçlar için kullanılmaktadır. Yataklarda kullanılan çeliklerin çok iyi sertleşme özelliği, yüksek mukavemet ve tokluk göstermeleri istenmektedir. Yatak çeliklerinde temas yüzeyde olduğundan dolayı yorulma ve aşınma hasarları meydana gelmektedir. Bu çalışmada yataklarda kullanılan sementasyon çeliği  $B_2O_3/SiC/B_4C$  pasta karışımları ile plazma pasta borlanmış ve yüksek yük altındaki aşınma davranışları incelenmiştir.

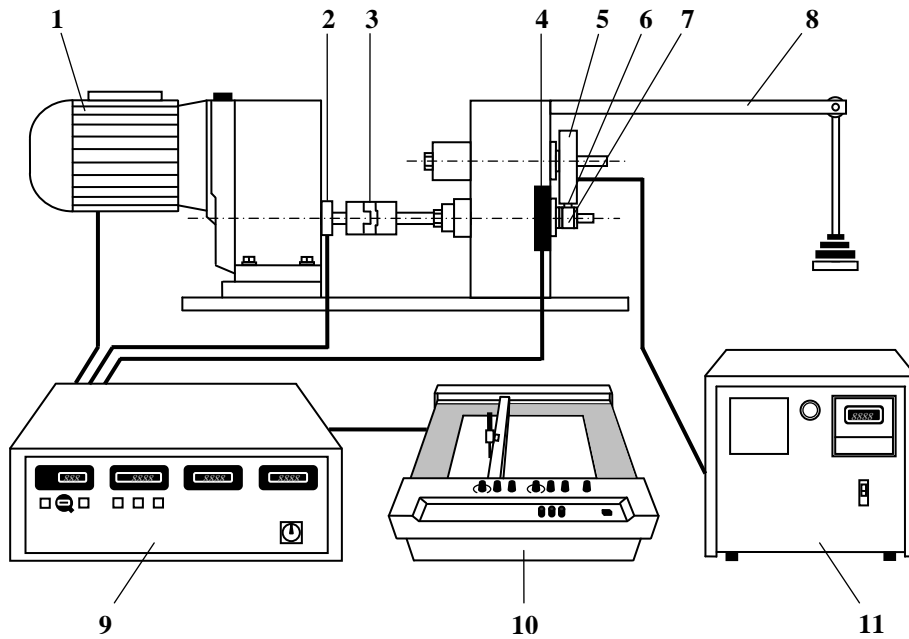
## 2. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, ağırlıkça % 0.19 C, % 0.4 Cr, % 0.7 Mn, % 0.4 Ni içeriğine sahip sementasyon çeliği kullanılmıştır. PPB işlemi  $B_2O_3/SiC/B_4C$  pasta karışımları kullanılarak,  $2.10^{-2}$  mbar vakum basıncında, %70  $H_2$  - %30 Ar gaz karışımlarında oluşturulan plazmada 700, 750 ve 800°C'de 5 saat süresince 10 mbar işlem basıncında gerçekleştirilmiştir. Numuneler plazma pasta borlama işleminden önce plazma cihazının (Şekil 1) içine yerleştirilerek 30 dakika süresince  $H_2$  gazı ile temizlenmiştir.



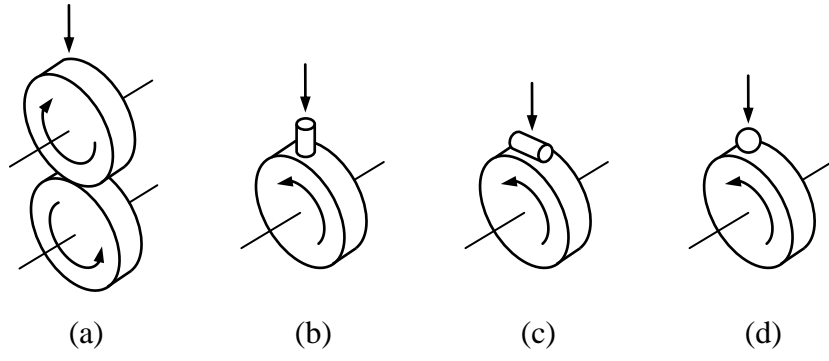
Şekil 1. Plazma pasta borlama cihazı

Aşınma deneylerinde Plint Firması'nın "TE 53SLIM çok-amaçlı sürtünme ve aşınma test cihazı" pin-on-ring sistemine adapte edilerek kullanılmıştır. Deneyler 70 N yük altında, sabit kayma hızında (yaklaşık 0,3 m/s), 500 metre mesafe boyunca ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Sistem şematik olarak şekil 2'de verilmiştir.

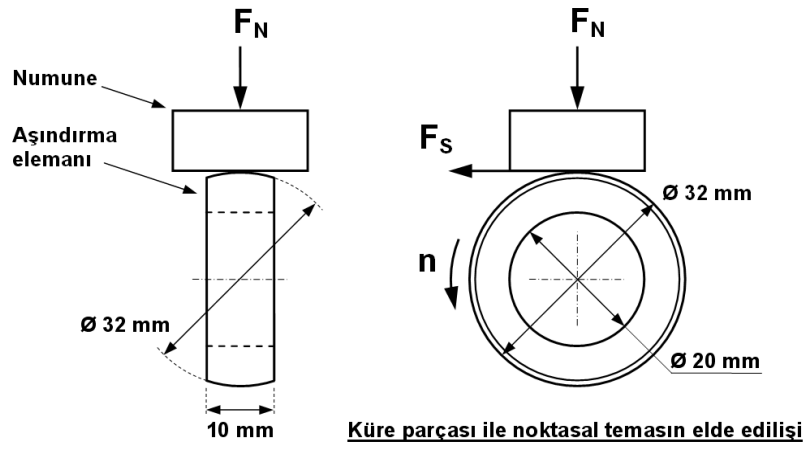


Şekil 2. Pin-on-ring sistemi ve temel yapı elemanlarının şematik gösterimi: 1. Motor, 2. Takometre, 3. Kavrama, 4. Kuvvet ölçer, 5. Numune tutucu, 6. Numune, 7. Aşındırma elemanı, 8. Ağırlık askısı, 9. Kontrol ünitesi, 10. Grafik çizici, 11. Yüksek sıcaklık cihazı.

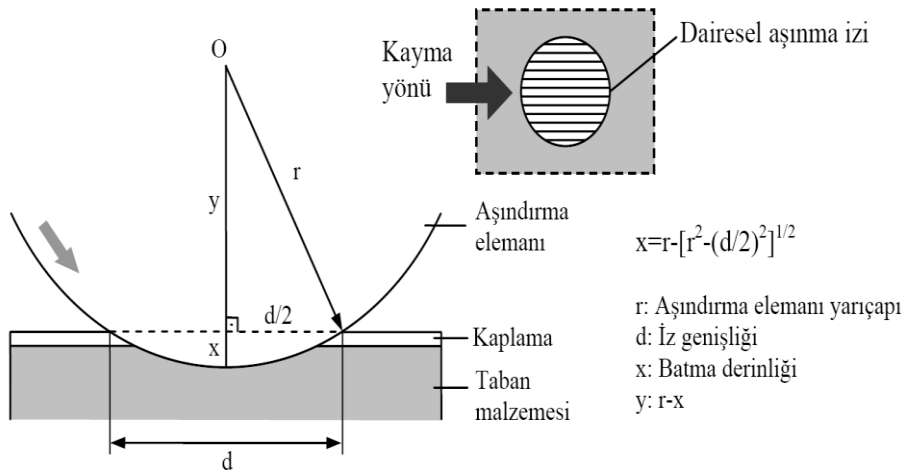
Aşınma deneylerinde cihaz, pin-on-ring sistemine adapte edilerek kullanılmıştır. Aşındırma elemanı olarak 100Cr6 malzemeden yapılmış, 32 mm çap ve 5 mm yüksekliğe sahip bombeli ringler kullanılmıştır. Bu sistem için, temas geometrisi şekil 3'te, kuvvetler şekil 4'te, aşınmış numunenin görüntüsü ve aşınma iz derinliği şekil 5'te, kullanılan numune tutucu ise şekil 6'da gösterilmektedir [8].



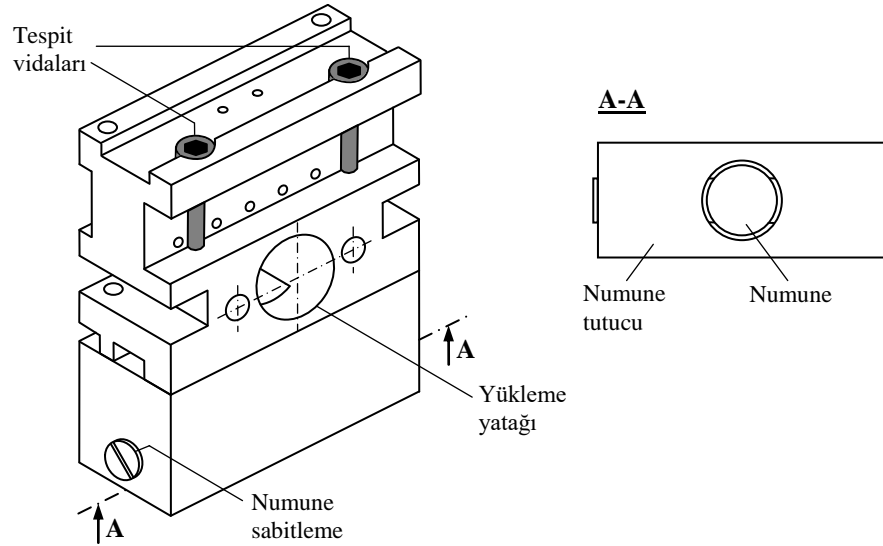
Şekil 3. TE 53SLIM çok-amaçlı sürtünme ve aşınma test cihazı ile uygulanabilen temas geometrileri: a) Ring-on-ring, b) Pin-on-ring, c) Block-on-ring, d) Ball-on-ring



Şekil 4. Denede kullanılan pin-on-ring sistemi için temas geometrisi ve kuvvetler ( $F_N$  normal kuvvet,  $F_S$  sürtünme kuvveti,  $n$  devir sayısı).



Şekil 5. Aşınmış numunenin görüntüsü ve aşınma iz derinliği



Şekil 6. Denede kullanılan numune tutucu.

### 3. Bulgular ve Tartışma

ASTM G-77 standardındaki pin-on-ring aşınma cihazında  $B_2O_3$  pasta karışımlarında plazma pasta borlanmış sementasyon çelik numunelerinin aşınma deneyleri yapılmıştır. Her deney için ayrı bir aşındırma elemanı kullanılarak, yüzeyin bozulmasından kaynaklanabilecek hatalar ortadan kaldırılmıştır. Pin-on-ring sisteminde kuru sürtünme şartında oda sıcaklığında, 70 N yük altında, 0,3 m/sn kayma hızında, 500 metre mesafe boyunca aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sistematigi çizelge 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Aşınma deney sistematigi

Aşınmaya Tabi Tutulan Borlanmış Numuneler			Deney Parametreleri		
Pasta Karışımlar (%)	PPB Sıcaklık (°C)	PPB Süre (saat)	Kayma Hızı (m/sn)	Uygulanan Yük (N)	Deney Süresi (dak)
100 $B_2O_3$					
70 $B_2O_3$ + 30 SiC	700				
70 $B_2O_3$ + 30 $B_4C$	750	5	0,3	70	28
30 $B_2O_3$ + 70 SiC	800				
30 $B_2O_3$ + 70 $B_4C$					
İşlemsiz Numune	-----	-----	0,3	70	28

Aşınma deneyi öncesinde her bir numune ve aşındırma elemanı alkolle temizlenmiş, deney öncesi ve sonrası numune ve aşındırma elemanlarının ağırlık kayıpları 1/10.000 hassasiyetindeki terazi ile ölçülerek aşınma hacimleri tespit edilmiştir. Grafik çizici tarafından kayma mesafesine bağlı olarak kaydedilen sürtünme kuvvetinden sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda plazma pasta borlama sıcaklığına bağlı olarak ağırlık kayıpları, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü, aşınma hızı grafikleri çizilmiştir.

$B_2O_3$  bor pasta karışımlarında plazma pasta borlanan, ve herhangi bir işlem görmemiş sementasyon çeliğinin 70 N yük altında, 0,3 m/sn kayma hızında, 500 metre mesafe boyunca aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma hızı, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülükleri, hem numune hem de aşındırıcının ağırlık kayıpları çizelge 2’de verilmiştir. Aşınma işlemi sonucunda borlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak plazma pasta borlanan numunelerdeki ağırlık kaybı miktarlarında düşüş gözlenirken, buna karşılık aşındırıcı malzemede ağırlık kaybı miktarlarında artışın olduğu tespit edilmiştir. Borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinde artışlar

görülmüştür. Sürtünme katsayı değerlerinin her numunede farklı davranış sergilemiştir. Bu durum yüzey pürüzlülüğü, sürtünme sırasındaki ortaya çıkan ısı ve aşınma sırasında aşınma bölgesinden kopan parçacıkların etkisinden farklı sürtünme katsayıları elde edildiği düşünülmüştür.

Plazma pasta borlama işlemi sonucunda borlama sıcaklığı arttıkça, aşındırıcı malzemedeki ağırlık kaybının arttığı tespit edilmiştir. Borlama işlem sıcaklığı arttıkça oluşan borür tabaka kalınlıkları ve sertlikleri (FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazlarından dolayı) artmaktadır [9]. Borür tabaka sertliklerin artması aşındırıcı malzemenin daha fazla aşınmasına neden olmuştur. Çünkü oluşan bu borür fazlarının aşınma direnci oldukça yüksektir [10,11].

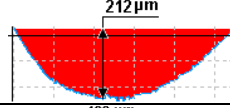
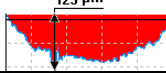
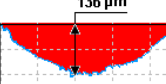
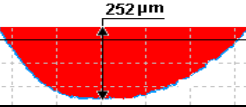
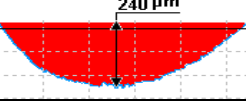
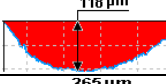
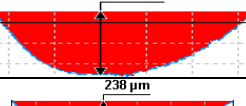
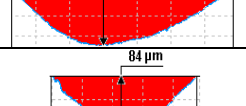
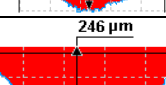
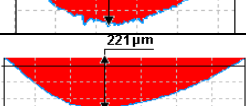
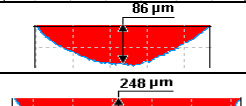
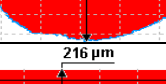
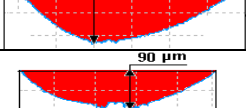
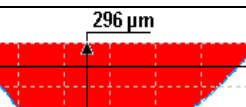
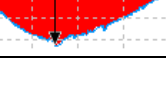
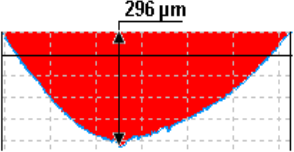
**Tablo 2.** Aşınmış numunelerin yüzey pürüzlülüğü, ağırlık kayıpları, sürtünme katsayısı değerleri

Pasta Karışım (%)	İşlem Sıcak. (°C)	İşlem Süre (saat)	Tabaka Kalınlık (µm)	Yüzey Pürüz. Ra	Ağırlık Kay. (gr)		Sürt. Kat. Numune
					Num.	Aşı. El.	
100 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	700	5	27	0,28	0,0038	0,0107	0,61
	750	5	30.3	0,36	0,0030	0,0154	0,55
	800	5	45	0,64	0,0016	0,0323	0,56
70 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 SiC	700	5	16	0,28	0,0070	0,0087	0,52
	750	5	19.3	0,45	0,0038	0,0114	0,42
	800	5	32	0,56	0,0025	0,0223	0,47
70 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +30 B <sub>4</sub> C	700	5	15,9	0,33	0,0049	0,0096	0,63
	750	5	20.1	0,44	0,0032	0,0133	0,51
	800	5	28.4	0,58	0,0020	0,0277	0,46
30 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +70 SiC	700	5	18,2	0,23	0,0096	0,0067	0,51
	750	5	24.5	0,24	0,0043	0,0092	0,57
	800	5	45.3	0,41	0,0027	0,0198	0,5
30 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +70 B <sub>4</sub> C	700	5	18	0,22	0,0057	0,0095	0,58
	750	5	24,9	0,29	0,0033	0,0127	0,55
	800	5	39	0,49	0,0017	0,0295	0,63
İşlemsiz Numune	-----	-----	-----	0,18	0,0208	0,0058	0,42

Tablo 3'te plazma pasta karışım oranlarının ve türlerinin aşınma derinliği, aşınma hızı, borlama sıcaklığı ve tabaka kalınlığı değerleri verilmiştir. Aşınma sonucunda tüm numunelerde borlama tabakasının altına matrise inildiği gözlenmiştir. Uygulanan 70 N yük miktarının veya mesafenin (500 metre) fazla olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 7-9'da B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pasta karışımında plazma pasta borlanan herhangi bir işlem görmemiş sementasyon çeliğinin aşınma izi SEM görüntüsü ve SEM görüntüsündeki A ve B noktalarından alınan noktasal EDX analizleri görülmektedir. Aşınma deneyleri sonucunda tüm numunelerde borür tabakası kalınlığının altına inildiği ve borür tabakalarının ana malzeme üzerinden tamamen kalktığı, aşınma iz derinliklerinden ve noktasal EDX analizlerinden tespit edilmiştir. Aşınma bölgesinden alınan noktasal EDX analizindeki A ve B noktalarının EDX analizleri sonucunda A noktasının demir(Fe)'ce, B bölgesinin ise Oksijen (O) bakımından daha baskın olduğu gözlenmiştir. Aşınma SEM görüntülerinde oksit tabakalarının kayma yönünde parçalandıkları görülmektedir.

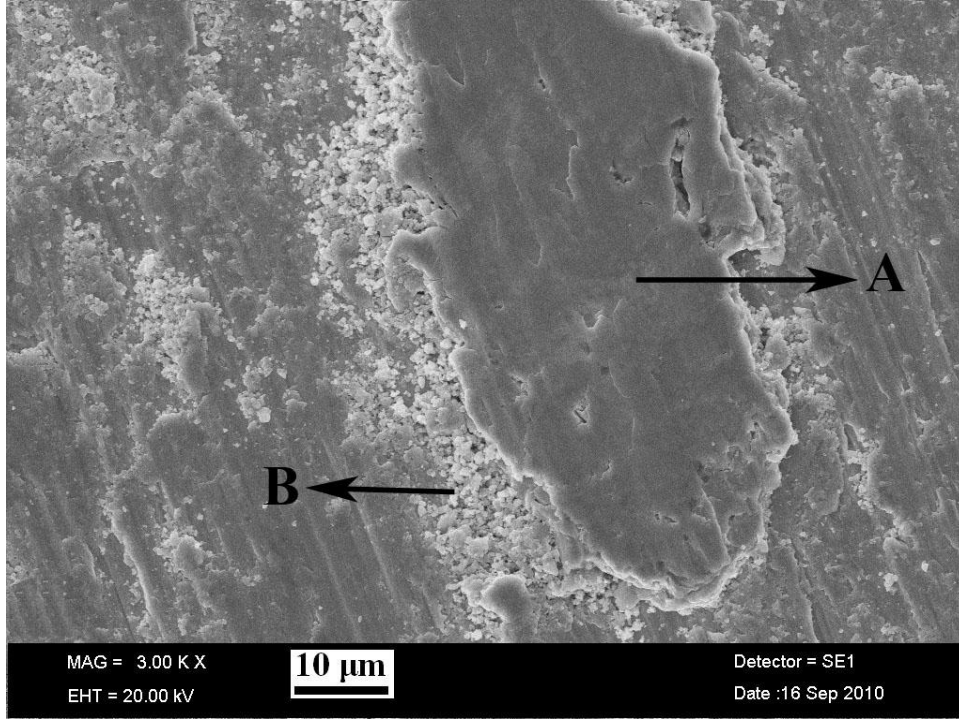
**Tablo 3.** Aşınma derinlikleri ve aşınma hızları

Pasta Karışım (%)	İşlem Sıcak. (°C)	İşlem Süre (saat)	Tabaka Kalınlık (µm)	Aşınma Derinliği	Aşınma Hızı $\times 10^{-8}$ (mm <sup>3</sup> /Nm)
100 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	700	5	27		13,8
	750	5	30.3		11,6
	800	5	45		11,2
70 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 30 SiC	700	5	16		21,7
	750	5	19.3		14,4
	800	5	32		10,3
70 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +30 B <sub>4</sub> C	700	5	15,9		16,1
	750	5	20.1		13,8
	800	5	28.4		11,1
30 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +70 SiC	700	5	18,2		24,4
	750	5	24.5		15
	800	5	45.3		11,9
30 B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +70 B <sub>4</sub> C	700	5	18		17,4
	750	5	24,9		14,5
	800	5	39		10,3
İşlemsiz Numune	-----	-----	-----		47,7

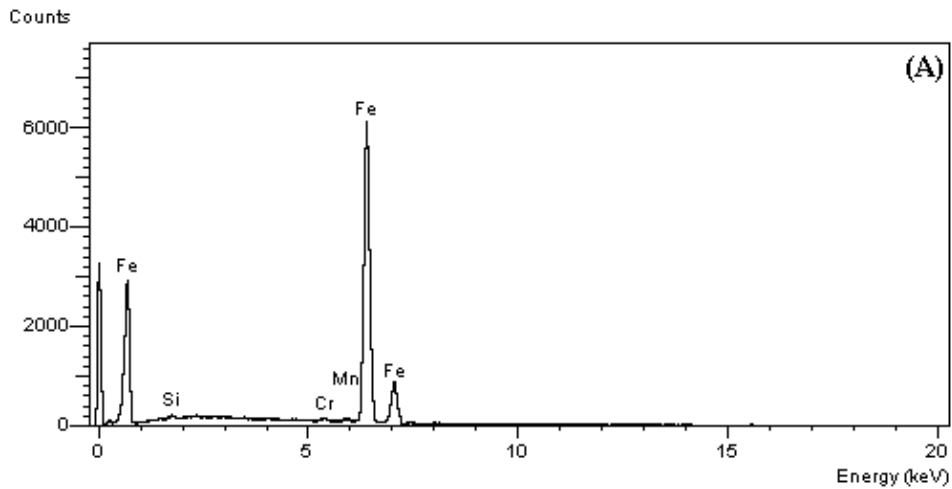
Aşınma bölgesinde Fe esaslı oksit tabakaları oluşmuştur. Oluşan oksit tabakalarının kayma yönünde parçalandıkları ve iz boyunca taşındığı tespit edilmiştir. Aşındırma elemanı ağırlık kayıplarının ve numuneler üzerindeki iz genişliklerinin homojen dairesel bir biçimde ve aşınma miktarlarına uygun

olarak değiştikleri tespit edilmiştir. Kaplanmamış numunedeki aşınma izi derinliği ve genişliği, kaplanmış diğer numunelere göre oldukça büyüktür.

Bu durum çizelge 3'te açıkça görülebilmektedir. Ayrıca aşınma iz derinliğinin artmasıyla ana malzeme-aşındırma elemanı temas alanı artarak sürtünme ve aşınmayı artırmaktadır. 70N yükte yapılan aşınma deneyleri sonucunda şiddetli metalik aşınmalar meydana gelerek yüzeyde abrazif oyuklar oluşmuş ve plastik deformasyonlar meydana gelmiştir. Aşınma izleri yüzeylerin kuvvetli derecede oksitlendiğini göstermektedir. Ayrıca karşı malzemeden kaynaklanan adhezif aşınma bölgeleri ve parçalanmış oksit debrisinin oluşturduğu abrazif çizikler aşınma bölgesinde görülmektedir.

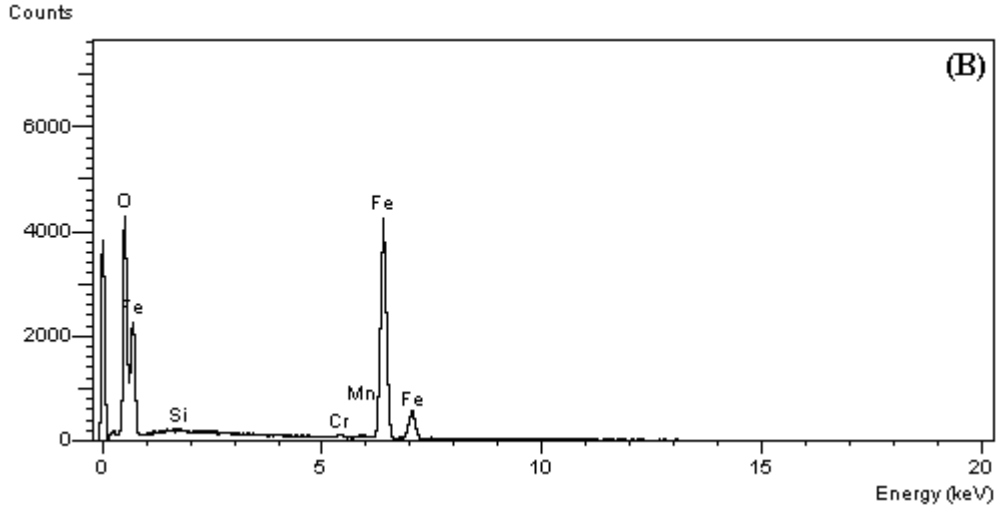


Şekil 7. %100 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bor pastasıyla 800°C'de 5 saat süresince plazma pasta borlanmış sementasyon çeliğinin SEM aşınma izi iç görüntüsü

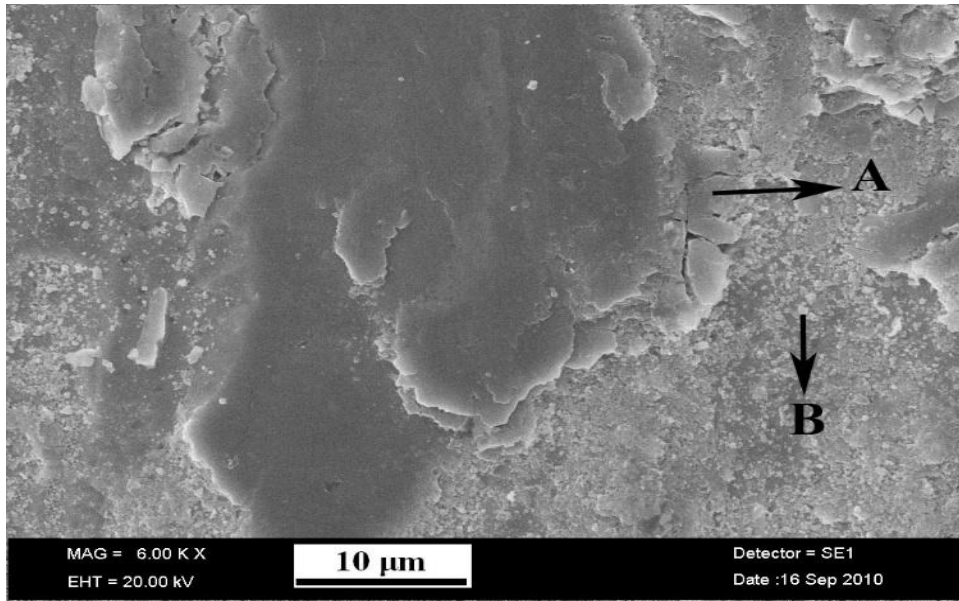


Şekil 8. Şekil 7'deki A noktasından alınan EDX Analizi

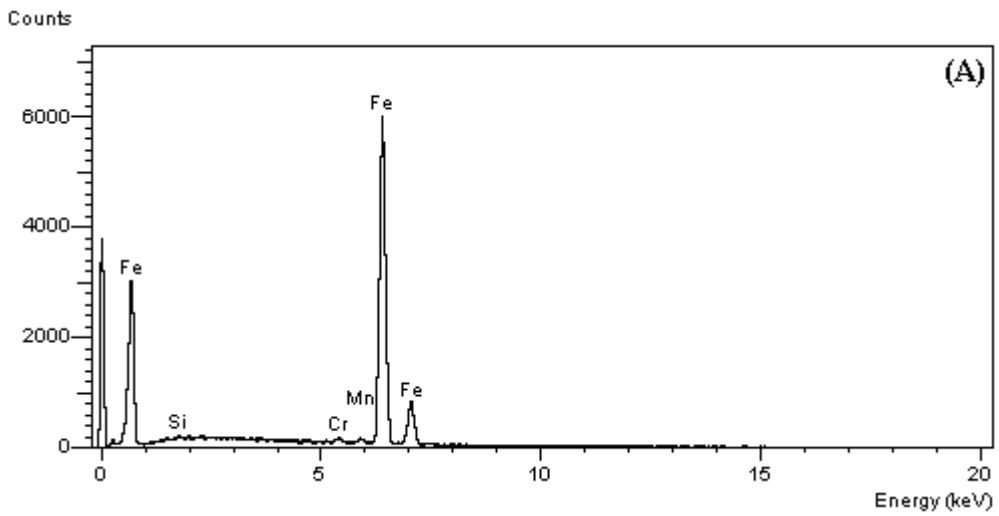




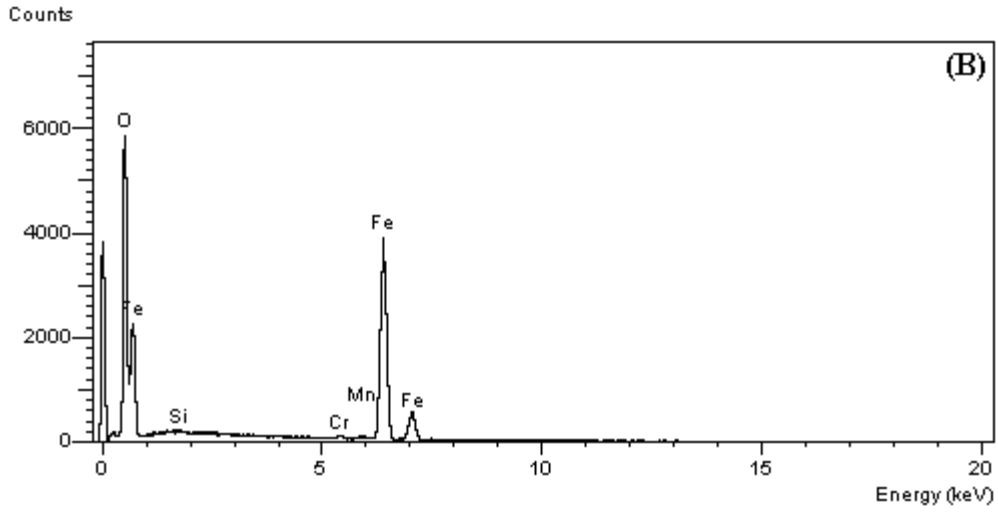
Şekil 9. Şekil 7'deki B noktasından alınan EDX analizi



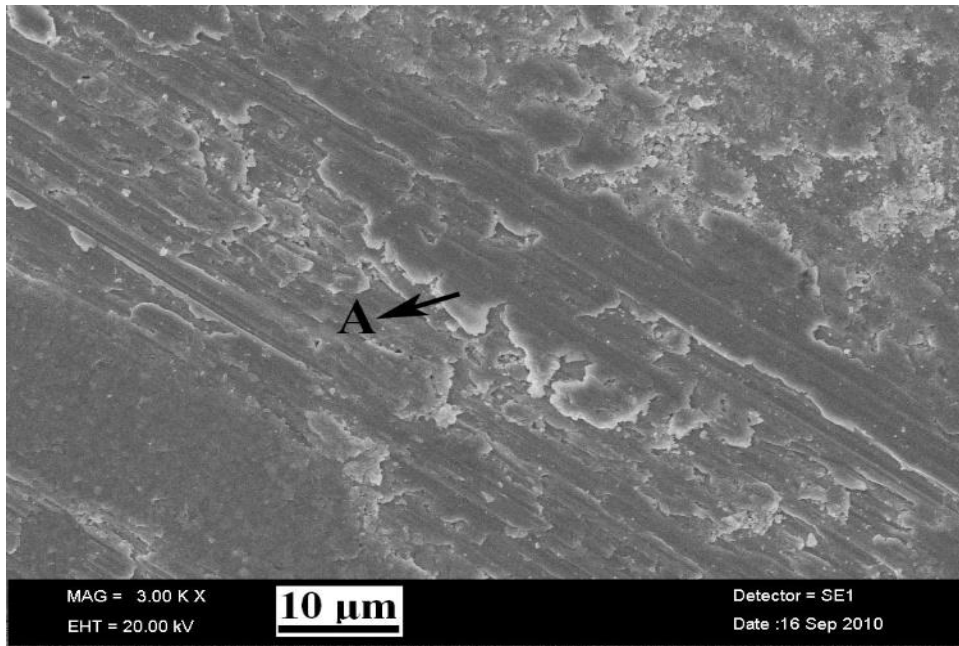
Şekil 10. %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%30 B<sub>4</sub>C bor pastasıyla 800°C'de 5 saat süresince plazma pasta borlanmış sementasyon çeliğinin SEM aşınma izi iç görüntüsü



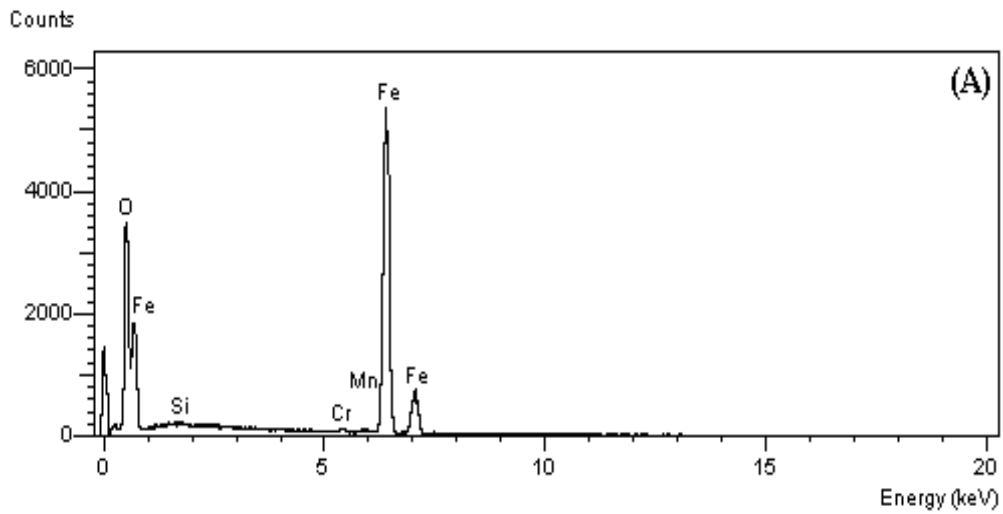
Şekil 11. Şekil 10'daki A noktasından alınan EDX analizi



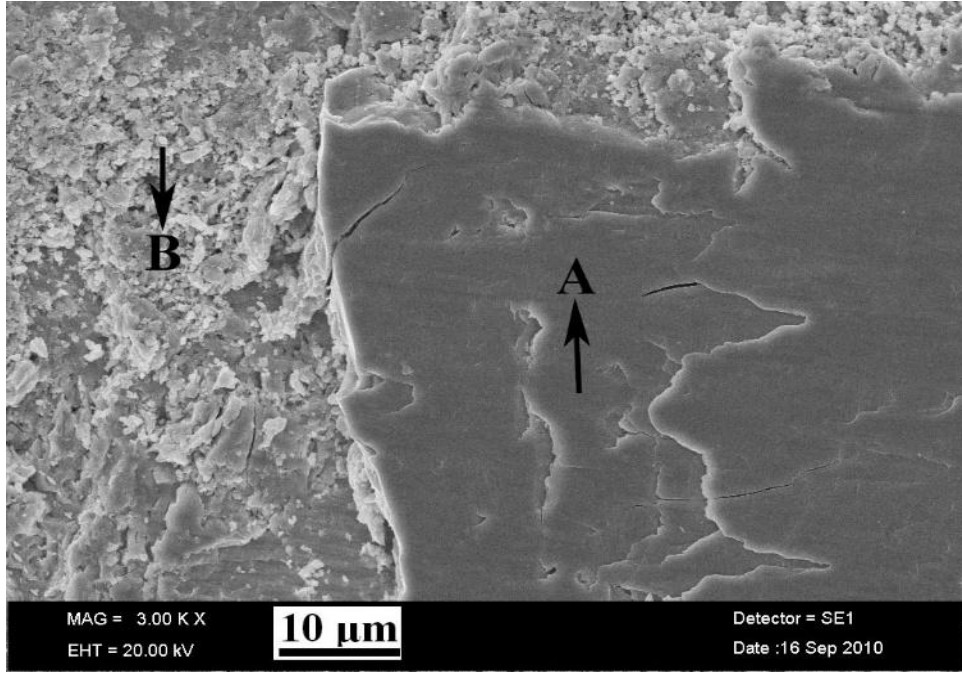
Şekil 12. Şekil 10'daki B noktasından alınan EDX analizi



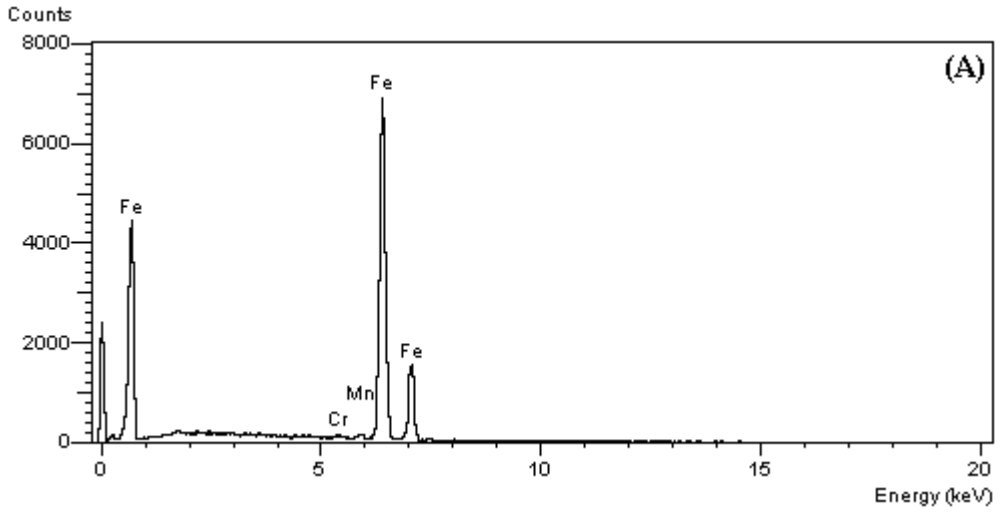
Şekil 13. %70 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%30 SiC bor pastasıyla 800°C'de 5 saat süresince plazma pasta borlanmış sementasyon çeliğinin SEM aşınma izi iç görüntüsü



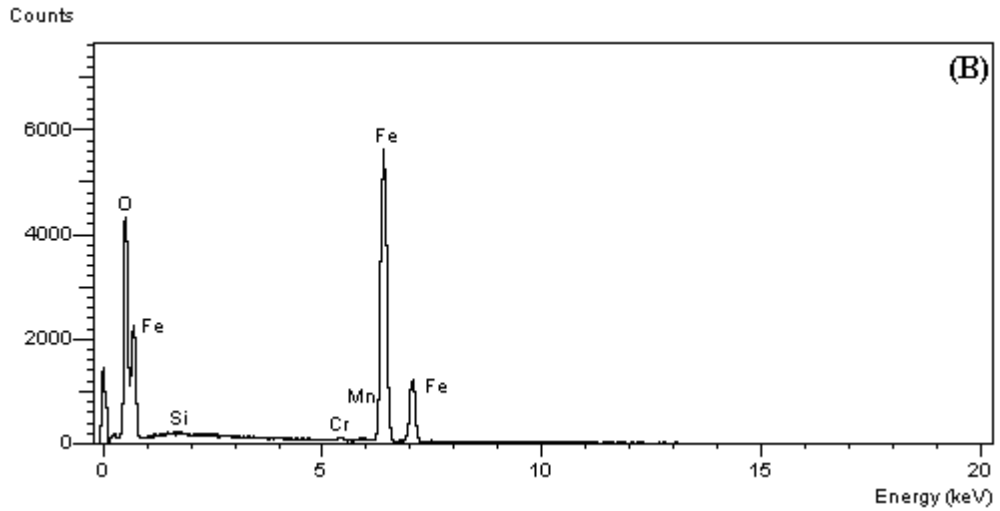
Şekil 14. Şekil 13'teki A noktasından alınan EDX analizi



Şekil 15. %30 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+%70 SiC bor pastasıyla 800 °C’de 5 saat süresince plazma pasta borlanmış sementasyon çeliğinin SEM aşınma izi iç görüntüsü



Şekil 16. Şekil 14’teki A noktasından alınan EDX analizi



Şekil 17. Şekil 14’teki B noktasından alınan EDX analizi

#### 4. Sonuçlar

Aşınma deneyleri sonucunda tüm numunelerde borür tabakası kalınlığının altına inildiği ve borür tabakalarının ana malzeme üzerinden tamamen kalktığı, aşınma iz derinliklerinden ve noktasal EDX analizlerinden tespit edilmiştir. Aşınma bölgesinden alınan noktasal EDX analizindeki A ve B noktalarının EDX analizleri sonucunda, A noktasının Fe'ce, B bölgesinin ise O bakımından daha baskın olduğu gözlenmiştir. Aşınma SEM görüntülerinde oksit tabakalarının kayma yönünde parçalandıkları görülmüştür. Aşınma deneyi sonucunda Fe esaslı oksit tabakaları oluşmuştur. Oluşan oksit tabakalarının kayma yönünde parçalandıkları ve iz boyunca taşındığı tespit edilmiştir. En az aşınma  $70 \text{ B}_2\text{O}_3 + 30 \text{ B}_4\text{C}$  ve  $30 \text{ B}_2\text{O}_3 + 70 \text{ B}_4\text{C}$  karışımlarında plazma pasta borlanmış numunede görülürken, en fazla aşınma kaybı ise herhangi bir işlem görmeyen numunede tespit edilmiştir.

#### Kaynaklar

- [1] Bozkurt, N., Bor yayınımları ile çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1984.
- [2] Özbek, İ., Bindal, C., Mechanical properties of boronized AISI W4 steel, Surface and Coatings Technology, 2002, 154, 14-20.
- [3] Özdemir, Ö., Usta M., Bindal C., Üçışık A.H., Hard Iron Boride ( $\text{Fe}_2\text{B}$ ) on 99.97 wt% Pure Iron, Vacuum, 2006, 80, 1391-95.
- [4] Yoon, J. H., Jee, Y. K., Lee, S. Y., Plasma Paste Boronizing Treatment of the Stainless Steel AISI 304, Surface and Coatings Technology, 1999, 112, 71-75.
- [5] Nam, K.S., Lee K.H., Lee D.Y., Song Y.S., Metal surface modification by plasma boronizing in a two-temperature-stage Process, Surface and Coatings Technology, 2005, 197, 51-55.
- [6] Gunes, I., Yıldız, I., Investigation of adhesion and tribological behavior of borided AISI 310 stainless steel, Revista Materia, 2016, 21, 61-71.
- [7] Gunes, I., Yıldız I., Rate of growth of boride layers on steels, Oxidation Communications, 2015, 38(4A), 2189-2198.
- [8] Savaş, S., PVD Metodu ile TiN Kaplanmış S 6-5-2 Yüksek Hız Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2004.
- [9] Meriç, C., Şahin, S., Backir, B., Köksal, N.S., "Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behaviour in cast irons, Mater. Des. 2006, 27, 751-757.
- [10] Tabur, M., İzçiler, M., Gül, F., Karacan, İ., Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel, Wear, 2009, 266, 1106-1112
- [11] Keddam, M., Chentouf, S.M., A Diffusion model for describing the bilayer growth ( $\text{FeB}/\text{Fe}_2\text{B}$ ) during the iron powder-pack boriding, Applied Surface Science, 2005, 252, 393-399.