

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK POTALARI CÜRUF BÖLGESİNDE KULLANILAN MgO-C  
REFRAKTER TUĞLALARIN FARKLI KALİTE ÇELİK CÜRUFLARINA  
KARŞI PENETRASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Berkay YILMAZ**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ**  
**Tez Danışmanı : Dr.Öğr. Üyesi Serdar ASLAN**

**Temmuz 2022**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇELİK POTALARI CÜRUF BÖLGESİNDE KULLANILAN MgO-C  
REFRAKTER TUĞLALARIN FARKLI KALİTE ÇELİK CÜRUFLARINA  
KARŞI PENETRASYON DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Berkay YILMAZ

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 06.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi  
Serdar ASLAN

Jüri Başkanı

Doç. Dr.  
Ayşe Şükran  
DEMİRKIRAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi  
Mustafa AKÇİL

Üye

## **BEYAN**

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Berkay YILMAZ

06.07.2022

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen ve aynı titizlikte beni yönlendiren değerli hocam Doç. Dr. Ayşe Şükran DEMİRKIRAN ve danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Serdar ASLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullanılan numunelerin hazırlanması ve faydalı fikirler ile yaptıkları yönlendirmelerden ötürü Kardemir A.Ş. Refrakter Başmühendisi Sn. İsmail ŞİŞLİ, Refrakter Mühendisi Sn. Muhammed YAŞAR'a ve desteklerinden ötürü Kardemir A.Ş. Sürekli Dökümler Müdürü Sn. Ayberk ÖZDUMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca verdiği emek, destek ve önerileri için Sn. Berkay ÖZÜPEK'e ve deneysel çalışmalar esnasında yardımlarını esirgemeyen Sn. Ertuğrul BÜYÜKHERGUL'a şükranlarımı sunarım.

Son olarak, tez çalışmalarım ve hayatım boyunca desteklerini benden eksik etmeyen aileme, sonsuz teşekkürü borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLOLAR LİSTESİ .....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2.	
REFRAKTER MALZEMELERİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ .....	3
2.1. Yoğunluk ve Porozite.....	3
2.2. Mukavemet .....	4
2.2.1. Soğuk basma dayanımı ve kopma modülü.....	4
2.2.2. Sıcak kopma modülü .....	4
2.3. Termal Genleşme .....	4
2.4. Termal Şok .....	5
2.5. Termal İletkenlik.....	5
2.6. Kimyasal Özellikler .....	5
BÖLÜM 3.	
ÇELİK ÜRETİMİNDE POTA METALÜRJİSİ.....	7
3.1. Çelik Üretiminde Pota Metalürjisi Prosesinin İşleyişi .....	7
3.1.1. Deoksidasyon .....	9

3.1.2. Kükürt giderme.....	10
3.1.3. Alaşım elementlerinin kontrollü ilavesi.....	10
3.1.4. Pota fırını .....	11
3.2. Çelik Üretim Potalarında Kullanılan Refrakter Malzemeler .....	13
3.3. Potalarda Refrakter Aşınmaları.....	16
3.3.1. Potaların ısıtılması ve soğutulması sırasındaki çatlamlar .....	18
3.3.2. Cüruf ve çelik bölgesindeki korozyon.....	18
3.3.3. Çelik rafinasyon işlem süresi.....	21
3.4. Cüruf- Refrakter İlişkisi- Etkileşimi.....	22
3.4.1. Cüruf bazıklığı .....	25
3.4.2. Cüruf içerisindeki FeO içeriğinin etkisi .....	27
3.4.3. Refrakter içerisindeki karbon (C) içeriğinin etkisi.....	29
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	30
4.1. Çalışmanın Amacı.....	30
4.2. Çalışma Prosedürü .....	30
4.3. Refrakter Krozelerin Hazırlanması.....	31
4.4. Deneyde Kullanılan Cüruf Numunelerinin Hazırlanması .....	32
4.5. Cüruf – Refrakter Korozyon Testi .....	35
4.6. Görüntü İşleme Kullanılarak Korozyon Alanının Hesaplanması .....	37
4.7. SEM İncelemeleri ve EDS Analizleri .....	37
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	38
5.1. Fırınlanan Krozelerin Makro İncelemesi.....	38
5.2. Görüntü İşleme ile Korozyon Alanının Hesaplanması .....	40
5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu İle Cüruf Refrakter Etkileşim Alanının İncelenmesi ve Gerçekleştirilen EDS Analizi Sonuçları.....	41
BÖLÜM 6.	
SONUÇLAR.....	75

KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ .....	80

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme ve Test Topluluğu)
BSD	: Backscattered electron detector (Geri Saçılan Elektron Dedektörü)
EDS	: Energy – Dispersive X-Ray Spectroscopy (Enerji Dağılım Spekturumu)
SE	: Secondary Elektron (İkincil elektron)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopi)
XRF	: X-Ray Fluorescence (X-Işınları Floresan Spektrometresi)

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Entegre Demir Çelik Tesislerinde Üretim Aşamaları [8].	7
Şekil 3.2. Konvertör Görseli [8].	8
Şekil 3.3. Pota Fırını Görseli [8].	8
Şekil 3.4. Pota Fırını Alaşım - Dinlendirme Aşamaları [8]	11
Şekil 3.5. Çelik Üretim Potası Transferi [8].	12
Şekil 3.6. Pota fırını şematik gösterimi [8].	12
Şekil 3.7. Çelik Potasında Bölgelerin Gösterimi [3].	14
Şekil 3.8. MgO-C Refrakter Tuğla [17].	14
Şekil 3.9. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiC-C Refrakter Tuğla [18].	15
Şekil 3.10. CaO-MgO-C Refrakter Tuğla [19].	15
Şekil 3.11. Dolomit Refrakter Tuğla [19].	16
Şekil 3.12. Yeterli Genleşme Boşluğu Verilmemiş MgO-C Tuğla Örümü [22].	18
Şekil 3.13. Pota İçerisinde Cüruf - Çelik Bölgeleri [8].	20
Şekil 3.14. A) Kullanılmamış Malzeme B) İçerisinde % 6 MgO bulunan cürufta kullanılmış MgO-C refrakter çubuk C) İçerisinde % 12 MgO bulunan cürufta kullanılmış MgO-C refrakter çubuk [25].	21
Şekil 3.15. Cüruf İçerisindeki MgO Oranı ve İşlem Süresine Bağlı Olarak Refrakter Çubuk Çapındaki Değişim [25].	22
Şekil 3.16. (a) B = 3.5 ve (b) 3.0, farklı bazikliğe sahip ergimiş cüruf ile MgO-C refrakter numuneleri arasındaki ara yüzeyin SEM görüntüleri ve EDS sonuçları [29].	27
Şekil 3.17. Farklı FeO içeriklerine sahip cüruf ile MgO-C refrakter umuneler arasındaki korozyon ara yüzünün SEM görüntüleri, (a) %15-FeO, (b) %5-FeO, (c) %1-FeO [29].	28
Şekil 3.18. Cüruf içerisindeki FeO içeriğinin, MgO-C Refrakterinin Korozyon Derinliğine Etkisi [29].	28

Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda takip edilen işlemlerin şematik gösterimi .....	31
Şekil 4.2. A) MgO-C Tuğla B) Tuğladan Çıkartılan Küp Örneği .....	31
Şekil 4.3.Krozenin Delinerek Oluşturulması .....	32
Şekil 4.4.Tamamlanmış Kroze Örnekleri.....	32
Şekil 4.5.A) Kırma B) Öğütme İşlemlerinin Gerçekleştirildiği Laboratuvar Ekipmanları .....	33
Şekil 4.6A) Kırma, B) Öğütme, C) Eleme İşlemi Uygulanan Cüruf Numunesi....	34
Şekil 4.7. 5x5x5 cm ebatlarında cüruf konulan kroze görüntüsü.....	35
Şekil 4.8. Fırına şarj edilen numunelerin görüntüsü .....	36
Şekil 4.9. Isıl İşlem Süreci Grafiği.....	36
Şekil 5.1. Fırınlanmış ve kesimi tamamlanmış kroze örneği.....	38
Şekil 5.2. Fırından çıkarılan numune görseli .....	39
Şekil 5.3.Isıl işlem sonrası kırılma görülen numune.....	39
Şekil 5.4. Isıl işlem sonrası çatlama görülen numune.....	39
Şekil 5.5. 6 Numaralı numuneye ait geri saçılan elektron (BSD) dedektörü ile çekilen SEM görüntüsü.....	40
Şekil 5.6. 7 Numaralı numuneye ait geri saçılan elektron (BSD) dedektörü ile çekilen SEM görüntüsü.....	41
Şekil 5.7.8 Numaralı numuneye ait geri saçılan elektron (BSD) dedektörü ile çekilen SEM görüntüsü.....	41
Şekil 5.8. MgO-C Refrakterden alınan SEM görüntüsü .....	42
Şekil 5.9. MgO-C Refrakter malzemenin alansal EDS Analizi .....	42
Şekil 5.10. 5 numaralı cürufun penetrasyon testi sonrasında alınan SEM görüntüsü	43
Şekil 5.11. 5 numaralı cürufun penetrasyon testi sonrasında alınan EDS analizi..	43
Şekil 5.12. SEM cihazında görüntü alınan bölgelerin tariflenmesi. ....	44
Şekil 5.13. 1 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü – BSD .....	44
Şekil 5.14. 1 Numaralı Numune Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - SE .....	45
Şekil 5.15. 1 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	45
Şekil 5.16. 1 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE	46
Şekil 5.17. 1 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi Çizgisel .....	46

Şekil 5.18. 2 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD .....	47
Şekil 5.19. 2 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - SE .....	48
Şekil 5.20. 2 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	48
Şekil 5.21. 2 Numaralı Numune Pota Taban Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	49
Şekil 5.22. 2 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi Çizgisel .....	50
Şekil 5.23 3 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - SE .....	51
Şekil 5.24. 3 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	51
Şekil 5.25. 3 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE	52
Şekil 5.26. 3 Numaralı Numune Pota Taban Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	52
Şekil 5.27. 3 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi .....	53
Şekil 5.28. 4 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	54
Şekil 5.29. 4 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- SE .....	54
Şekil 5.30. 4 Numaralı Numune Pota Sağ Orta Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD...	55
Şekil 5.31. 4 Numaralı Numune Pota Sağ Orta Bölgesi SEM Görüntüsü- SE .....	55
Şekil 5.32. 4 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS .....	56
Şekil 5.33. 5 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü – BSD .....	57
Şekil 5.34. 5 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- SE .....	57
Şekil 5.35. 5 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü – BSD ...	58
Şekil 5.36. 5 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü – SE .....	58
Şekil 5.37. 5 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi .....	59
Şekil 5.38. 6 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	60
Şekil 5.39. 6 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	60
Şekil 5.40. 6 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	61
Şekil 5.41. 6 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD .....	61

Şekil 5.42. 6 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi .....	62
Şekil 5.43. 7 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	63
Şekil 5.44. 7 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	63
Şekil 5.45. 7 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE.....	64
Şekil 5.46. 7 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE.....	64
Şekil 5.47. 7 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi .....	65
Şekil 5.48 . 8 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	66
Şekil 5.49. 8 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	66
Şekil 5.50 . 8 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	67
Şekil 5.51. 8 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	67
Şekil 5.52. 8 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi .....	68
Şekil 5.53. 9 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	69
Şekil 5.54. 9 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- SE.....	69
Şekil 5.55. 9 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	70
Şekil 5.56. 9 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD.....	70
Şekil 5.57. 9 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi .....	71
Şekil 5.58. 10 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD....	72
Şekil 5.59. 10 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü -SE.....	72
Şekil 5.60. 10 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD..	73
Şekil 5.61. 10 Numaralı Numune Pota Sağ Üst Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD .	73
Şekil 5.62. 10 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi .....	74



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Tipik Çelik Üretim Cürufu Kimyasal Analizi .....	24
Tablo 3.2. Cüruf İçerisindeki CaO ve SiO <sub>2</sub> Kaynakları .....	24
Tablo 3.3. Cüruf İçerisindeki Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ve MgO Kaynakları .....	24
Tablo 3.4. Cüruf İçerisindeki FeO ve MnO Kaynakları .....	24
Tablo 4.1. Cüruf Numunelerinin Kimyasal Analizleri.....	34

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Cüruf-Refrakter Etkileşimi, MgO-C Refrakter, cüruf, penetrasyon.

Bu çalışmada, Kardemiş AŞ. Pota fırınlarında üretilen on farklı çelik kalitesine ait cürufun, çelik potası cüruf bölgesinde kullanılan MgO-C refrakter tuğlalara olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, refrakter tuğlalardan kroze oluşturulmuş ve cüruf numuneleri içerilerine doldurularak “Cüruf – Refrakter Penetrasyon Testi” uygulanmıştır. Penetrasyon testi sonuçları; makro, taramalı elektron mikroskobu ve görüntü işleme yöntemleri ile irdelenmiştir.

Çalışma kapsamında hazırlanan refrakter krozelerin içerisine cüruf doldurulmuş ve fırına şarj edilmiştir. Krozeler, 3 saatte 1600 °C sıcaklığa ulaşılmış ve pota fırınlarında yaklaşık işlem sıcaklığı olan 1600 °C’de 2 saat bekletilerek etkileşim sağlanmıştır.

Cüruf – Refrakter korozyon testinin tamamlanmasının ardından, etkileşim alanında korozyon alanının hesaplanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, cüruf-refrakter etkileşim bölgelerinde penetrasyon görülen bölgelerden alınmış SEM görüntüsü üzerinden “ImageJ” programı yardımı ile analizler gerçekleştirilmiştir.

MgO-C refrakter krozeler ile cüruf numuneleri arasındaki etkileşimin anlaşılması amacıyla ergitme sonrasında taramalı elektron mikroskobu kullanılarak, cüruf – refrakter etkileşim alanlarında noktasal, alansal ve çizgisel mikro-kimyasal analizler yapılmıştır. EDS nokta analizlerinden, refrakterin MgO ve C esaslı olduğu, kullanılan cürufların ise Mg, Si, Al, Ca elementlerini içerdiği belirlenmiştir. Cüruf penetrasyonunun etkin bir şekilde gerçekleştiği 6,7 ve 8 numaralı numuneler haricinde cürufun refrakter malzemeye nüfuz edemediği görülmüştür. Korozyonun gerçekleştiği bölgelerde, cüruftan refraktere Ca difüzyonu, refrakterden cürufa ise Mg ve C difüzyonlarının olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, SEM görüntülerinde etkin bir korozyonun görülmediği numunelerde dahi etkileşimin gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

# **EXAMINATION OF PENETRATION BEHAVIOR OF MgO-C REFRACTORY BRICKS USED IN STEEL LADLES SLAG ZONE AGAINST DIFFERENT QUALITY STEEL SLAGS**

## **SUMMARY**

Keywords: Slag-Refractory Interaction, MgO-C Refractory, slag, penetration.

In this study, It is aimed to investigate the effects of slag belonging to ten different steel grades produced in Kardemış A.Ş. ladle furnaces on MgO-C refractory bricks used in the steel ladle slag region. In this direction, a cross-section was formed from refractory bricks and slag samples were filled in and the “Slag - Refractory Penetration Test” was applied. The penetration test results were examined by macro, scanning electron microscopy and image processing methods.

The slag was filled into the refractory crucibles prepared within the scope of the study and charged into the oven. The crucibles reached a temperature of 1600 °C in 3 hours and the interaction was achieved by holding them for 2 hours at 1600 °C, which is the approximate process temperature in ladle furnaces.

After the completion of the slag – Refractory corrosion test, it is aimed to calculate the corrosion area in the interaction area. In this direction, analyzes were carried out with the help of the “ImageJ” program using the SEM image taken from the areas where penetration was observed in the slag-refractory interaction zones.

In order to Decipher the interaction between MgO-C refractory crozes and slag samples, point, spatial and linear microchemical analyses were performed in the slag–refractory interaction areas using scanning electron microscopy after melting. From the EDS point analysis, it was determined that the refractory is based on MgO and C, and the slags used to contain the elements Mg, Si, Al, and Ca. It has been observed that slag cannot penetrate the refractory material, except for samples 6,7 and 8, where slag penetration occurs effectively. In the regions where corrosion occurs, Ca diffusion from the slag to the refractory, and Mg and C diffusion from the refractory to the slag have been found. Accordingly, it was concluded that the interaction occurred even in samples where no effective corrosion was observed in SEM images.

## **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

Refrakterler, yüksek sıcaklıktaki kimyasal, fiziksel etkilere dirençli poroz ve homojen olmayan malzemelerdir. Refrakterlerin üretiminde çeşitli oksitler ve oksit olmayan bileşikler kullanılmaktadır. İçeriklerinde kullanılan oksitlere; silisyum, alüminyum, magnezyum, kalsiyum ve zirkonyum oksitler örnek verilebilecekken karbür, nitrür, borür, silikat ve grafit gibi oksit olmayan bileşiklerde üretimde kullanılmaktadır [1]. Ayrıca bahsi geçen oksit dışı malzemelere, teknoloji ilerledikçe talebin artacağıda öngörülmektedir [2].

Refrakterlerin birincil işlevleri, metaller, camlar, petrokimyasallar ve seramik malzemelerin üretimlerinde proses ortamındaki ısı ve atmosferi perdeleyerek uygun koşulları oluşturmaktır [3]. Bu noktada refrakter malzemeler, kimyasal kararlılık, basma mukavemeti, erozyon ve korozyona karşı dayanımları gibi özelliklerinin yüksek olması dolayısıyla tercih edilmektedir [4].

Refrakter endüstrisi, malzeme imal eden sektörlerdeki yönelimlere göre sürekli gelişim içerisinde. Bu sektörler içerisinde, üretilen toplam refrakter malzemenin % 60'tan fazlası ile demir – çelik sektörü en büyük tüketim payına sahiptir. Demir- çelik sektöründe, refrakter malzemeler genellikle; fırınların, kireç ocaklarının, cüruf potalarının ve sıvı metal potalarının örülerek izole edilmesinde kullanılmaktadır [3].

Bu sektör içerisinde entegre tesislerde refrakter malzemeler; yüksek fırın, bazik oksijen fırını, sıvı ham demir potaları, pota fırınları, sürekli döküm tandişleri gibi ünitelerde kullanılmaktadır. Çelik üretiminin neredeyse her aşamasında kullanılan refrakterler, çeşitli kimyasal reaksiyonlar ve fiziksel etkilere maruz kalmaktadır. Bu nedenle, üretim şartları ve gereksinimlerine göre refrakter malzemelerden sürekli artan bir beklenti vardır.

Refrakter malzemelerden beklenen genel özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Yüksek sıcaklıklara dayanabilmeleri
2. Kullanıldıkları kapalı alanlarda ısıyı izole edici davranış göstermeleri
3. Yüksek sıcaklıkta, metal, cüruf ve gazların aşındırıcı davranışlarına direnebilmeleri
4. Uygulama alanlarındaki mekanik etkilere dayanabilmeleri
5. Termal şok dirençlerinin yüksek olması
6. Çelik temizliğine olumlu katkı sağlamaları

## **BÖLÜM 2. REFRAKTER MALZEMELERİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİ**

Refrakter malzemelerin tanımı gereği, farklı sıcaklıklarda termal ve mekanik gerilmelere dirençli olduğu bilinmektedir. Metalurjik işlemlerde yüksek sıcaklıklarda kullanılan refrakter malzemeler, maruz kalacakları ortama göre seçilmektedir. Bu malzemelerden, sadece yüksek sıcaklıklara değil, aynı zamanda operasyonel performanslarını etkileyen termokimyasal ve termomekanik streslere de dayanmaları beklenmektedir [5]. Bu noktada malzeme seçimi, genellikle kullanım ortamındaki şartlar simüle edilerek yapılmaktadır. Ortam şartlarına yönelik test yapılamadığında ise fiziksel ve kimyasal özelliklere dayalı malzeme seçimleri yapılmaktadır.

Genel olarak, temel fiziksel özellikler çoğu zaman bir refrakter malzemenin amaçlanan uygulamalar için kullanılabilirliğini gösterir. Bu malzemelerin sahip olması gereken en mühim özellik ise yük altında şekil değişimine karşı gösterdikleri direnç olarak bilinmektedir [6]. Aşağıdaki temel fiziksel özellikler genellikle belirli uygulamalar için refrakterleri tahmin etmek, seçmek ve reçetelemek için kullanılır [7].

### **2.1. Yoğunluk ve Porozite**

Standart yöntemlerle belirlenen yoğunluk ve porozite değerleri, uygulamalar için refrakterlerin özelliklerini belirlemede kullanılır. Yoğunluk ne kadar yüksek ise porozite o kadar düşüktür. Ayrıca, mukavemet, aşınma ve gaz geçirgenliği gibi diğer fiziksel özellikler, genellikle refrakterin yoğunluğu ve porozite miktarıyla bağıntılıdır. Porozitenin artmasıyla birlikte, ısıyı izole edebilme kabiliyeti de artmaktadır. Çelik üretim pota örümleri yapılırken, cüruf temasının olduğu bölgelerde az miktarda porozite barındıran refrakterler kullanılmaktadır. Bu özellikler, ASTM D-20 Standartına göre kontrol edilir [7].

## **2.2. Mukavemet**

Hem soğuk hem de sıcak koşullarda fiziksel mukavemet, refrakter malzemelerde kullanımın ölçüleri olarak gösterilebilir. Soğuk mukavemet, refrakter malzemenin nakliyesi ve uygulama esnasındaki davranışları hakkında fikir verirken, sıcak mukavemet refrakterin yüksek sıcaklık kullanımlarındaki performansı için bilgi verir [7].

### **2.2.1. Soğuk basma dayanımı ve kopma modülü**

Refrakter malzemelerin soğuk basma dayanımı ve kopma dayanımı, termal uygulamalar için bilgi vermemektedir. Bu özellikler, kullanım yerlerindeki soğuk inşa uygulamaları ve örüm faaliyeti için yol göstermektedir. İlgili özellikler, ASTM – C133 Standartına göre kontrol edilmektedir [7].

### **2.2.2. Sıcak kopma modülü**

Sıcak kopma modülü, bir refrakter malzemenin yüksek sıcaklıklarda eğilme mukavemeti hakkında bilgi vermektedir. Refrakterler yüksek sıcaklıklarda kullanıldığından, sıcak kopma modülü, bir refrakterin yüksek sıcaklıklarda uygunluğunun ve performansının en önemli göstergesidir. Bu nedenle son yıllarda, refrakterlerin seçimi ve kullanımı için en önemli test kriteri olarak sıcak kopma modülü belirlenmiştir. Bu özellik, ASTM C- 583 Standartına göre kontrol edilmektedir [7].

## **2.3. Termal Genleşme**

Termal Genleşme, refrakter malzemelerin, farklı yüksek sıcaklık aralıklarına maruz bırakıldığında ve daha sonra oda sıcaklığına soğutulduğunda, doğrusal stabilitesi hakkındaki önemli bir ölçüttür. Refrakter malzemelerin termal genleşme dayanımlarının yüksek olması beklenir. Bu malzemeler, her zaman sistemde elde edilebilen maksimum sıcaklık altında, bağlayıcılar ve bileşen özelliklerinde bozulma

olmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bu özellik, ASTM C-113 Standardına göre kontrol edilmektedir [7].

#### **2.4. Termal Şok**

Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklık operasyonlarında yoğun ısıtma ve soğutmalara maruz kalmaktadır. Bu nedenle termal şok direnci, refrakter özelliğinin önemli bir kriteridir. Kullanım esnasında, refrakter ve bağlayıcılar, ısınırken genişler ve soğutma sırasında büzülür. İçeriğinde, sürekli ve benzer mikro yapıya sahip refrakterler, rijit sistemlere göre daha iyi termal şok direnci gösterir. Refrakter malzemelerin ısı şok direncini belirlemek için iki standart yöntem vardır. Tuğla şekilleri için termal şok direnci, "Şerit Termal Şok Testi" (ASTM C-1100) ile ölçülür ve monolitik refrakterler için standart yöntem ASTM C-1171'dir [7].

#### **2.5. Termal İletkenlik**

Termal iletkenlik, refrakterin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında sıcaktan soğuk yüze ısıyı iletme kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Refrakter malzemelerin termal iletkenliğini belirlemenin üç farklı yöntemi vardır. ASTM C-210, refrakterlerin termal iletkenliğini belirlemek için standart yöntemdir; ASTM C-202, refrakter tuğlanın termal iletkenliğini belirlemek için standart yöntemdir. ASTM C-1113 ise sıcak tel ile refrakterlerin ısı iletkenliğini belirlemek için standart yöntemdir. Isıl iletkenlik testleri, sıcak yüzden soğuk yüze kadar olan termal gradyanların özel kullanımlar için bir refrakter malzemenin kullanımını zorunlu kıldığı izolasyon refrakterleri için özellikle önemlidir [7].

#### **2.6. Kimyasal Özellikler**

Refrakterlerin kimyasal özellikleri, içerdiği yapının kimyasal analizi, bağın yapısının doğası ve ayrıca refrakterin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında aşındırıcılara direnme kabiliyeti ile tanımlanır. Refrakterler, yüksek sıcaklıklarda aşındırıcı sıvılara maruz kaldığında, korozyon / erozyonun boyutu refrakter tanelerine ve refrakterin



kimyasal bağlama sistemine bağlıdır. Demir-çelik sektöründeki uygulamalarda, korozyon / erozyon direnci, erimiş metal ve cürufa maruz kalan refrakterlerin en önemli özelliklerinden biridir. Refrakterlerin erimiş metal / cürufa maruz kalması dinamik bir süreç olduğundan, koşulları simüle eden testlerin de dinamik olması gerekir. Çelik üretim refrakterleri için döner cüruf testi, çelik üretim refrakterlerindeki koşulların yakın simülasyonunu sağlar ve ASTM C874 Standardına uygun olarak yapılır [7].



Dünya çapındaki demir üretiminin %90'ından fazlası yüksek fırınlar kullanılarak üretilmektedir [9]. Yüksek fırınlarda üretilen sıvı ham demirin karbon oranı, konvertör aracılığı ile %4'den %1 oranlarına düşürülerek çelik yapımı tamamlanmış olur [10]. Proses devamında konvertörde hazırlanan sıvı çelik, potalara boşaltılır ve vinç yardımı ile pota fırınlarına taşınır. Çelik, pota fırınlarında çeşitli ikincil metalürji işlemlerinin uygulanmasının ardından sürekli döküm makinalarına getirilerek dökümü gerçekleştirilir. Şekil 3.2.'de konverter, Şekil 3.3.'de pota fırını görseli sunulmuştur.



Şekil 3.2. Konvertör Görseli [8].



Şekil 3.3. Pota Fırını Görseli [8].

Çelik üretiminde çelik-cüruf reaksiyonları büyük önem taşımaktadır. Pratikteki birçok ikincil metalürji süreci bu reaksiyonlara odaklanır. Şu anda, kükürt giderme, deoksidasyon ve inklüzyon giderme çoğunlukla pota fırınlarında rafinaj sırasında gerçekleştirilir. Bu reaksiyonların ilerleme ve dengeye yaklaşma derecesi, potaya ulaşan sıvı çeliğin ilk durumuna, cüruf oluşturulmasına, çeliğin kimyasal bileşimini ayarlamak için yapılan ilavelere, reoksidasyona ve çelik-refrakter reaksiyonları gibi parametrelere bağlıdır [11].

Günümüzde, nihai mamul üreticilerinin beklentileri, sürekli olarak artmaktadır. Nihai mamullerde istenilen vasıfların sağlanabilmesi için uygun kimyasal kompozisyonun sağlanabilmesi ve temiz çelik üretilmesi bu beklentiler arasındadır [12]. Bu doğrultuda, pota metalürjisi işlemleri, çelik üretiminde önemli görevler üstlenmektedir. Bu görevler aşağıdaki gibi özetlenebilir [13].

Çelik üretiminde pota metalürjisinin amaçları:

- Deoksidasyon
- Kükürt Giderme
- Alaşım elementlerinin kontrollü ilavesi
- Inklüzyon modifikasyonu

### **3.1.1. Deoksidasyon**

Pota içindeki çeliğin rafinasyonu sırasındaki ilk adım genellikle çeliğin ferromanganez, ferrosilikon, silikomanganez ve alüminyum ile deoksidasyonudur. Çelik deoksidasyonun üç kategorisi vardır.

- 1) 100 – 200 ppm çözünmüş oksijen için ferromanganez verilerek,
- 2) Yarı öldürülmüş çeliklerin bazıları:
  - a) 50 – 70 ppm çözünmüş oksijen için Si ve Mn verilerek,
  - b) 25 – 40 ppm çözünmüş oksijen için Si / Mn / Al verilerek,
  - c) 15 – 20 ppm çözünmüş oksijen için Si / Mn / Ca verilerek,

2 – 4 ppm çözünmüş oksijen için alüminyum kullanılarak, çeliklerin deoksidasyon işlemi gerçekleştirilir [13].

### **3.1.2. Kükürt giderme**

Son yıllarda, ürün karlılığını artırmak ve ürünlerin pazar rekabet gücünü genişletmek için, düşük kükürlü ve ultra düşük kükürlü çelik üretimi gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu ilke ile yüksek verimli ve düşük maliyetli üretim teknolojisi üzerine odaklanılmıştır [14].

Bu noktada, çelik isterlerinin yanı sıra maliyet esaslarından dolayıda kükürt giderme operasyonu uygulanmaktadır. İlaveten kükürt, mekanik ve kaynaklanabilirlik özelliklerini olumsuz etkilemesi sebebi ile çelik içerisinde olması genellikle istenilmeyen bir elementtir. Boru hattı uygulamalarında kullanılan çeliklerde kaynaklanabilirlik dolayısıyla 20 ppm'den daha az kükürt seviyesi beklenmektedir. Bu düşük kükürt içerikleri, tamamen öldürülmüş bir çelikte kalsiyum alüminat cürufu varlığında potalarda kükürt giderme ile sağlanabilmektedir [13].

### **3.1.3. Alaşım elementlerinin kontrollü ilavesi**

Sıvı çelik içerisine çeşitli alaşım ekleme yöntemleri uygulanmaktadır. Doldurulmuş torbaların atılması, kürekle veya mekanize oluklarla ekleme, tel besleme, toz enjeksiyon ve banyo içerisine paketler halinde fırlatma yöntemleri örnek olarak verilebilir.

Sıvı çeliğe bir ferro alyaj eklendiğinde, yerel soğutma etkisinin bir sonucu olarak alaşım parçacığı çevresinde katılaşmış bir çelik kabuğu oluşur. Zaman geçtikçe, kabuk içindeki ferroalyaj erime noktasına kadar ısınırken kabuk erir. Tam çözünme, banyodaki konvektif ısı transferi işlemlerinin yanı sıra eklenen ferro alyajın boyutu tarafından yönetilmektedir [5].

### 3.1.4. Pota fırını

Çelik Üretim fabrikalarında, sıvı ham çelik, pota vasıtasıyla konvertörden pota fırınlarına taşınır. Bu bağlamda pota fırını, birçok ikincil metalurji işleminde, temel ergitme donanımı olarak kullanılır [15].

Başlıca işlevleri aşağıdaki gibidir ve sıvı çelik alaşımlama, dinlendirme aşamalarına ait görsel Şekil 3.4.'te sunulmuştur.

- 1) Grafit elektrotlarla iletilen elektrik enerjisi ile sıvı çeliğin yeniden ısıtılması (cürufun ısıtılması sonucu ısı transferi ile çeliğin sıcaklığı artırılmaktadır)
- 2) Asal gaz karıştırma yöntemi ile çeliğin sıcaklık ve bileşiminin homojenleştirilmesi
- 3) Refrakterleri ark zararlarından koruyan, ısıyı sıvı çelik üzerinde yoğunlaştıran, inklüzyon ve metal oksitlerini tutan ve kükürt giderme ortamını oluşturan bir cüruf tabakasının oluşturulması

Pota fırını işlevleri arasında sayılabilecek ikincil işlevler;

- 1) Kimyasal kontrol için yapılacak alaşım beslemeleri
- 2) Gaz giderme veya inklüzyon yapısının kontrolü için çekirdekli tel ilavesi
- 3) Etkin bir kükürt giderme şartlarının sağlanması
- 4) Fosfor giderme şartlarının sağlanması



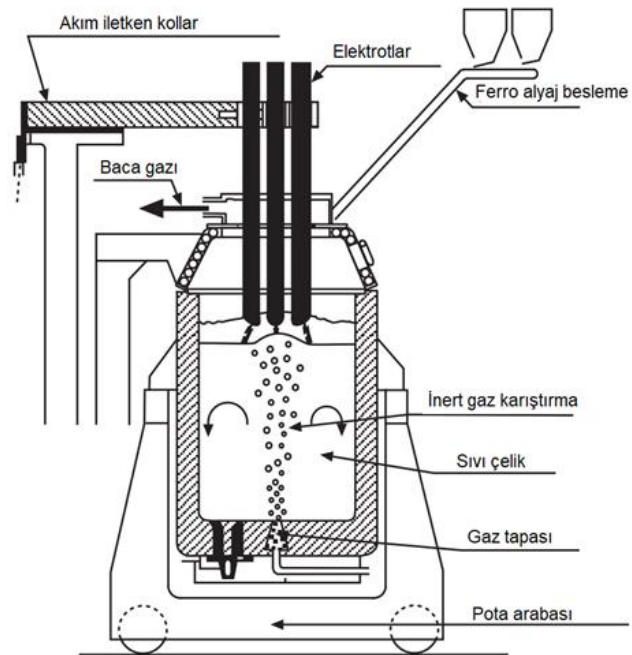
Şekil 3.4. Pota Fırını Alaşımlama - Dinlendirme Aşamaları [8].

Üretimi tamamlanan sıvı çeliğin sürekli döküm makinasına transfer aşaması Şekil 3.5.'te sunulmuştur.



Şekil 3.5. Çelik Üretim Potası Transferi [8].

Çelik üretim tesislerinde kullanılmakta olan pota fırınına ait şematize görsel, Şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6.Pota fırını şematik gösterimi [8].

Artan çelik temizliği gereksinimi ve yüksek kaliteli çeliklere olan talep, vakum prosesini daha önem arz eder hale getirmiştir. Birçok çelik üreticisi müşterilerinin talepleri doğrultusunda çeliği vakum altında işleme tabi tutarlar.

Tüm vakum işlemlerinin altında yatan temel prensip, çözünmüş olan gazların uzaklaştırılmasıdır. Gaz gidermeden başka diğer metalurjik reaksiyonlarda vakum altında yapılabilir. Örneğin hassas dekarbürizasyon, alaşımlama, deoksidasyon ve inklüzyon uzaklaştırılması gibi metalurjik işlemlerde çelik temizliğini arttırmak amacıyla vakum altında yapılmaktadır. Sıvı çeliğin vakum altında yapılan işleminden gelen, yüksek iç temizlik, düşük gaz içerikleri ve yakın alaşım toleransları elde edilebilmesi gibi temel yararları vardır.

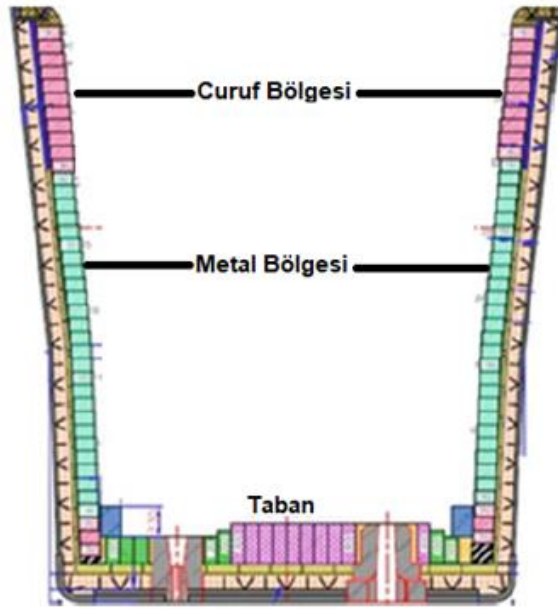
### **3.2. Çelik Üretim Potalarında Kullanılan Refrakter Malzemeler**

Çelik pota astarı için en uygun refrakterin seçimi, bir dizi faktöre, yani çelik üretim süreçlerine, çelik kalitesine, pota kullanılabilirliğine, tesis operasyon lojistiği ve maliyete bağlıdır. Örneğin; çelik sektöründe refrakterin, kömürden kok yapmak için kullanıldığı ilk bölge olarak kabul edilen kok fırını için silika refrakter ön plandadır. Ancak bu refrakterin demir veya çelik ile etkileşimi sınırlıdır [16].

İşleme sırasında, refrakter malzeme ile kaplı ikincil metalürji potası sıvı çelik ve farklı cüruf türleri ile doldurulur. Çeşitli katkı maddeleri ve işlem süresi, işleme potasının çalışma astarı üzerinde daha fazla kimyasal ve termal strese neden olur. Refrakter astarın tasarımı, çalışma astarı, kalıcı astar ve yedek yalıtımdan oluşur.

Tasarım, cüruf bölgesinde astar ve metal bölgede astar olmak üzere iki ayrı bölgeden oluşur. Cüruf hattı, refrakter arayüzlerde korozyon ve erozyon açısından agresif davranışlar oluşturabilen çeşitli cüruf türleri ile temas eden bölgedir. Ayrıca cüruf kimyasına ve kullanılan refrakter kalitesine bağlı olarak oksidasyon potansiyeli vardır. Yan duvarlar çalışma sırasında termo- mekanik harekete maruz kalır ve bu da çalışma kaplamasında yüksek erozyona neden olabilir. Çelik potada farklı bölgelerdeki refrakter kaplama Şekil 3.7.'de gösterilmektedir.



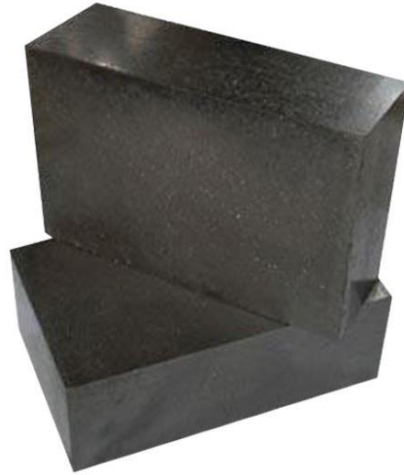


Şekil 3.7. Çelik Potasında Bölgelerin Gösterimi [3].

Alüminyum ile öldürülmüş çeliklerde, pota çalışma astarında MgO-C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C ve CaO-MgO-C tuğlaları gibi karbon içeren veya dolomit tuğlalar kullanılır. Bu tuğlalara ait görseller, Şekil 3.8. Şekil 3.9. Şekil 3.10. ve Şekil 3.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. MgO-C Refrakter Tuğla [17].



Şekil 3.9. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C Refrakter Tuğla [18].

Silisyumla öldürülmüş çelikten üretilen cüruf silislidir, bu bağlamda baziklik oranı ( $V = \text{CaO} / \text{SiO}_2$ ) oranı 2.0-2.5'dir. Bu nedenle dolomit esaslı refrakter, metal bölgedeki astar için en uygun malzemedir. Katran veya reçine bağlı Dolo-C tuğlalar, pota kullanımı ve termal yönetimin iyi olması koşuluyla iyi performans gösterir. Isıl değişim aralığının çok fazla olmadığı uygun koşullarda, dolomit-C refrakterinin pota performansını 100'den fazla döküme kadar çıkarabildiği bilinmektedir. Dolomit, aralıklı olarak çalışan bir tesiste kullanılırsa, bu, soğuduktan sonra astar çatlaklarına neden olarak metal penetrasyonu ve güvenlik astarına aşırı hasar yaratarak pota güvenliğini tehlikeye atabilir [3].



Şekil 3.10. CaO-MgO-C Refrakter Tuğla [19].



Şekil 3.11. Dolomit Refrakter Tuğla [19].

### 3.3. Potalarda Refrakter Aşınmaları

Demir – Çelik üretim tesislerindeki en önemli maliyet giderlerinden birisi proseslerde kullanılan refrakter malzemelerdir. Refrakterler, çelik üretim ekipmanlarında kullanılan temel malzemelerdir. Aşınma mekanizmalarını anlamak, güvenli, düşük maliyetli ve yüksek performanslı çelik işlemlerini sağlamak için önemlidir [20].

Maliyet açısından önem arz eden refrakter malzemeler, aynı zamanda çelik temizliği gibi kritik bir konuda da rol oynamaktadırlar. Günümüzde vasıflı çeliklerin kullanımının artması, dolayısıyla sektörde en temiz çeliğin üretimi ana odaklardan birisi olmuştur.

Refrakterlerin korozyona uğraması sonucu, çelik temizliğinin azalmasına sebep olan safsızlıklar oluşarak sıvı çelik ile etkileşime girebilir [21].

Bu nedenle hem maliyet hem de çelik temizliği açısından refrakter malzeme aşınmalarının minimum seviyelere indirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda, refrakter mühendisliğinin yanında cüruf mühendisliği kavramının da benimsenerek prosesler yönetilmelidir.

Çelik üretim sürecinde, yerleşkenin kapasitesi üzerinde etkili olan en önemli faktörlerden birisi ikincil metalürji potalarının servis ömrüdür. Bu potalar içerisinde, elde edilmek istenen nihai çelik kimyasal kompozisyonu, vakum prosesi, döküm işlemi boyunca muhafaza sıvı çeliğin muhafaza edilmesi gibi işlemler gerçekleşmektedir.

Çelik üretim potalarında her bölgede aşınma meydana gelse de en ciddi boyuttaki aşınma, cüruf seviyesinde meydana gelmektedir. Bu sebeple pota servis ömrünü belirleyen en önemli parametre, cüruf seviyesinde kullanılan tuğlaların dayanım süreleri olmaktadır [22].

Dünyada ikincil metalürji potalarında cüruf seviyesinde farklı uygulamalar bulunuyor olsa da en yaygın kullanımın MgO-C refrakter tuğlalar olduğu endüstriyel gözlemler doğrultusunda bilinmektedir.

Çelik üretim tesislerinde refrakter sarfiyatlarının en büyük paydasına sahip olan çelik üretim potalarında, çeşitli sebepler ile refrakter aşınmaları meydana gelmektedir. Pota refrakter malzemelerindeki aşınma sebepleri incelendiğinde, genel olarak dört başlık üzerine odaklanılmıştır.

Pota refrakter malzemelerinde aşınma nedenleri:

- 1) Potaların ısıtılması ve soğuması sırasındaki çatlama,
- 2) Cüruf ve çelik bölgesindeki korozyon,
- 3) Mekanik etmenlerden dolayı erozyon,
- 4) Çelik rafinasyon işlem süresi

Pota servis ömürlerinde artış sağlanması çelik üreticileri için çok önemlidir. Bu doğrultuda yukarıda belirtilen maddelerde optimizasyon düzenlemeleri yapılması pota ömürlerini olumlu yönde etkileyecektir.

### 3.3.1. Potaların ısıtılması ve soğutulması sırasındaki çatlamlar

MgO – C tuğlalar cüruf atağına karşı dayanıklı olmalarına rağmen termo mekanik etkilere karşı uygun şartlarda kullanılmadıkları takdirde istenilen performans değerine ulaşamamaktadır.

Servis sırasında oluşan gerilmeler sebebi ile tuğla yüzeyinden içeriye doğru uzanan kılcal çatlaklar oluşur. Çalışma sırasında, sıcak tuğla yüzeyine bu çatlaklardan cüruf – çelik infiltrasyonları ve bölgesel kabuk atmalar gerçekleşir. Çelik üretim potalarında, bu tür termo mekanik etkileri gidermek için tuğla örümü sırasında yatay ve dikey genişmelerin iyi hesaplanması gerekmektedir. Zira, MgO –C tuğlaların çekme direnci basma direncinden daha düşüktür. Bu nedenle, örüm sırasında ki boşluk paylarının iyi hesaplanamaması sonucunda genişleme kaynaklı termo mekanik etkilerin görülmesi kolaylaşmaktadır [22]. Şekil 3.12.'de yeterli genişleme boşluğu verilmemiş MgO-C tuğla örümü görülmektedir.



Şekil 3.12.Yeterli Genişleme Boşluğu Verilmemiş MgO-C Tuğla Örümü [22].

### 3.3.2. Cüruf ve çelik bölgesindeki korozyon

Çelik üretim potası refrakter sistemlerinin uygun şekilde tasarlanması ve yönetilmesi için anlaşılması gereken çeşitli aşınma mekanizmaları bulunmaktadır. En önemli

aşınma mekanizması ise korozyondur. Çelik üretim potalarında, cüruf hatları için kullanılan refrakterlerdeki magnezya tanelerinin kimyasal korozyonu, magnezyumu çözen sodyumca zengin kalsiyum-alüminyum silikat cürufu reaksiyonları ile şiddetlenerek refrakterlerin ömürlerini azaltmaktadır [20].

Bu hadise, cüruf içerisindeki demir oksit (FeO), silika (SiO<sub>2</sub>) ve mangan oksit (MnO) gibi bileşiklerin refrakter ile kimyasal reaksiyonudur. MgO yapıya sahip refrakterler, MgO miktarı olarak doyurulmamış cüruflar tarafından kolaylıkla saldırıya uğrayabilirler [23].

Bu nedenle çelik üretim pratiğinde, MgO doymuş cüruf tercih edilir. Cürufun askıda magnezyum oksit içermesiyle elde edilen doyumluk, işlem sırasında enerji kayıplarını azaltabilen ve refrakter hizmet ömrünü iyileştirebilen etkin cüruf köpürmesine katkı sağlamaktadır. Bu doğrultuda, sıcaklık ve cüruf bileşenleri ile ilintili olan MgO doyumluğunun bilinmesi önem taşımaktadır [24].

Refrakter tuğla içerisinde bulunan magnezya, sıcaklığa ve FeO içeriğine bağlı olarak % 6 ile % 14 değerleri arasında değişen doyumluk seviyeleri ile çelik üretim cürufu içerisinde çözünür. Bu kimyasal reaksiyonlar sonucunda refrakter tuğlalarda aşınma meydana gelmiş olur [25].

Refrakter aşınmalarının minimum seviyelere indirilmesi, çelik temizliği ve ekonomik etmenler sebebiyle önem arz etmektedir. Bu nedenle, cüruf içerisinde yer alan demir oksit, flaks malzemelerin kullanımı ile indirgenerek çeliğe geçirilir ve refrakter aşınması en aza indirilir. Refrakter tuğlalarda meydana gelen korozyonu kontrol etmenin bir diğer yolu ise karbon içeren tuğla kullanılmasıdır. Refrakter astardaki karbon, refrakter / cüruf ara yüzeyindeki korozif cürufu okside ederek astar aşınmasını azaltılır. Dökümden çıkan bir çelik üretim potasındaki cüruf-çelik bölgeleri Şekil 3.13.'de sunulmuştur.

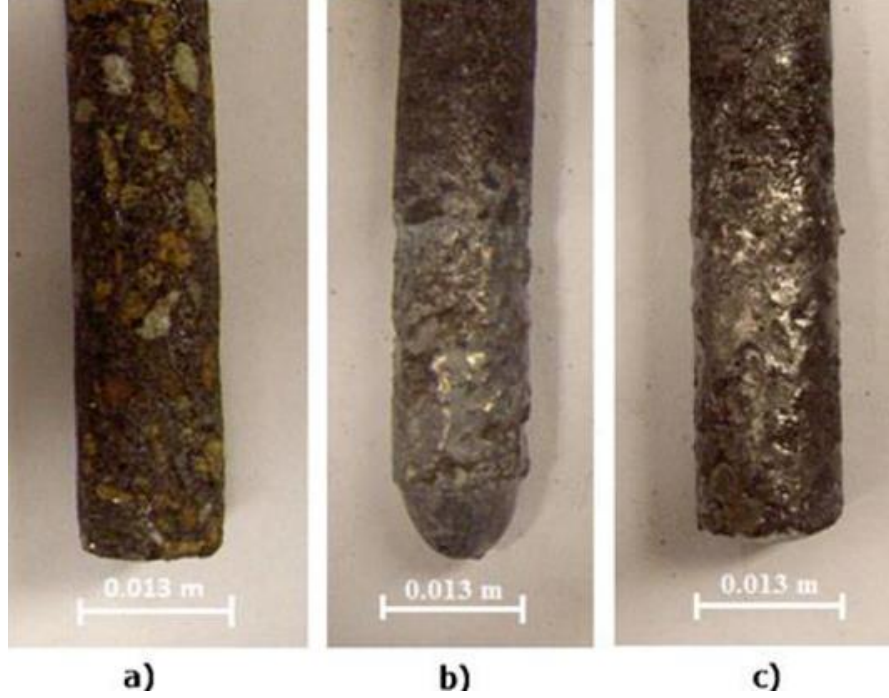


Şekil 3.13. Pota İçerisinde Cüruf - Çelik Bölgeleri [8].

Çelik potalarında cüruf bölgesinde kullanılan MgO – C tuğlaların aşınmaları birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır. Bu refrakter malzemelerin aşınmasını azaltmak için yukarıda sayılan yöntemlere ek olarak cüruf içerisindeki MgO doygunluk oranını sağlayabilmenin önem arz ettiği görülmüştür. Çelik rafinasyonu sırasında cürufun MgO bakımından doyması (örneğin ağırlıkça% 6 ila% 12) cüruf bölgesinde refrakter çözünmesini en aza indirir [25].

Cüruftaki MgO içeriği, mevcut ortalama ağırlıkça % 6-10 değerinin üzerindeyken refrakterde daha düşük bir çözünme oranı olduğu görülür. Bu konuda yapılan araştırmalarda, cüruftaki MgO oranı % 12 olarak çalışıldığında refrakter çözünmesinin çok düşük oranlarda gerçekleştiği görülmüştür. Cüruf içerisindeki MgO oranına bağlı

olarak MgO – C refrakter çubuklarda meydana gelen korozyon Şekil 3.14.'de gösterilmiştir.

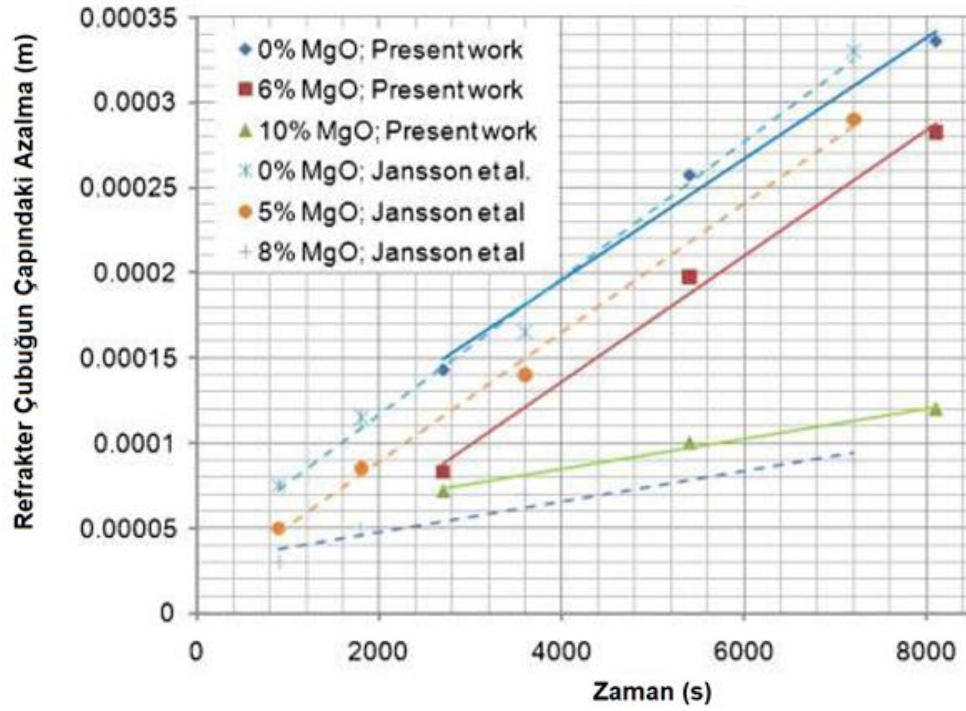


Şekil 3.14. A) Kullanılmamış Malzeme B) İçerisinde % 6 MgO bulunan çürüfta kullanılan MgO-C refrakter çubuk C) İçerisinde % 12 MgO bulunan çürüfta kullanılan MgO-C refrakter çubuk [25].

### 3.3.3. Çelik rafinasyon işlem süresi

Daha temiz çeliğe olan talep zamanla arttıkça, dünya çapındaki çelik fabrikaları, inklüzyon modifikasyonu ve kükürt gidermeyi desteklemek için daha uzun süreli ikincil metalürji işlemlerine yoğunlaşmıştır. Aynı zamanda, potadaki yüksek türbülans ile rafinasyon süresinin artması, çalışma astarı ile sıvı çüruf arasında artan bir temas anlamına da gelmektedir. İşlem sürelerinin artması, Şekil 3.15.'den görüldüğü üzere, endüstriyel prosesler sırasında refrakter malzemenin daha fazla çözünmesine yol açar [25].





Şekil 3.15. Cüruf İçerisindeki MgO Oranı ve İşlem Süresine Bağlı Olarak Refrakter Çubuk Çapındaki Değişim[25].

### 3.4. Cüruf- Refrakter İlişkisi- Etkileşimi

Demir – Çelik üretiminde, yüksek refrakter ömürlerine cüruf mühendisliği uygulamalarının kabulleri ile ulaşabilmektedir. Cüruf köpürtme, elektrik ark ocakları ve pota fırınlarında sadece refrakter, elektrod tüketimlerini azaltmamıştır. Bu olumlu etkilerin yanı sıra, termal verimliliğin yükseltilmesinde ve toplam ergitme süresinin düşürülmesinde önemli bir etkide bulunmuştur.

İkincil metalurjinin gelişmesiyle birlikte çelik potalarının rolü değişmiş ve çelik yapım sürecinde metalurjik bir reaktör haline gelmiştir. Bir çelik potasında refrakterler, çelik ve cüruf arasındaki birçok reaksiyon çelik kalitesinin düşmesine sebep olabilir. Bu sebeplere; refrakterin çözünmesi veya çözünmeden çökmesi, bir oksit ve metalik element arasındaki indirgenme reaksiyonları, çelikte bulunan çözünmemiş bir element ve refrakterin kombinasyonu ile oluşabilecek inklüzonlar olarak sıralanabilir [20].

Son yıllarda çelik ihtiyacı noktasında global istemler sürekli iyileşme üzerine artmaktadır. Bu doğrultuda çelik üreticileri, donanımsal iyileştirmelerin yanı sıra,

birincil ve ikincil metalürji basamaklarında iyileşmelere yönelmişlerdir. Üretilen Çelik içerisindeki temizlik ölçüsünde ağırlığı çok yüksek olan ikincil metalürji ve iyi cüruf yapımı bu noktada önemini bir kez daha ortaya koymuştur.

Cüruftan beklenen temel işlevler;

- 1) Elektrik ark ocağı ve pota fırınında oluşan arkı perdeleyerek refrakteri ark radyasyonundan muhafaza etmek.
- 2) Temiz çelik üretiminde önemli bir yeri olan inklüzyonları ve deoksidasyon ürünlerini toplayarak vasıflı çelik üretimini sağlamak.
- 3) Metalin yeniden oksidasyonunu önlemek
- 4) Sıvı çeliği hidrojen ve azot emiliminden korumak
- 5) Sıvı çeliği izolasyon sağlayarak ısı kaybının yaşanmasında korumak,
- 6) Refrakter ile uyum içinde çalışarak, temiz çelik ve düşük maliyet ilkelerine hizmet etmek gibi işlevler sayılabilmektedir.

Cürufun temel işlevleri ve iyi cüruf oluşturmanın yukarıda belirtilen olumlu etkileri olduğu gibi kötü bir cüruf pratiğinin üretim prosesine olumsuz yansımaları bulunmaktadır. Bu olumsuz etkilerin neticeleri aşağıda belirtilmektedir.

Cüruf mühendisliği göz ardı edilerek oluşturulmuş cürufun etkileri:

- Çelik kalitesine kötü yönde etki ederek, mikro boyutta kirli bir çelik elde edilmesi,
- Kullanılan refrakterler ile uyumlu çalışamaz ve çözelti doygunluğunu sağlayacak bileşime kadar refrakter çözünmelerine sebep olur,
- Pota cürufları redükleyici cüruflar sınıfındadır. Bu sebeple içeriğinde çelik içerisinde bulunması gereken indirgenebilir bileşikler barındırmamalıdır. Bu bağlamda, uygun şartlarda oluşturulamamış pota cürufu içeriğinde FeO ve MnO gibi oksitler barındırabilir. Bu oksitler çelik içerisinden Al, Si, Mn kayıplarına yol açmaktadır.

Çelik üretim cürufu anlatılmak istendiğinde genellikle kimyasal analizinde içerdiği bileşiklerin ağırlıkça yüzdeleri verilmektedir. Tipik bir çelik üretim cürufu olarak Tablo 3.1.'deki kimyasal analiz örnek olarak verilebilmektedir [1].

Tablo 3.1. Tipik Çelik Üretim Cürufu Kimyasal Analizi

Bileşik	% (Ağırlıkça)
CaO	54
SiO <sub>2</sub>	20
MgO	8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12
CaF <sub>2</sub>	6

Yukarıda belirtilen cüruf bileşenlerinin kaynaklarının bilinmesi, cürufun oluşturulması açısından önem arz etmektedir. Cüruf içeriğinde olabilecek bileşenler ve kaynakları Tablo 3.2., Tablo 3.3. ve Tablo 3.4. te sunulmuştur.

Tablo 3.2. Cüruf İçerisindeki CaO ve SiO<sub>2</sub> Kaynakları

CaO	SiO <sub>2</sub>
Kireç	Hurda içeriğindeki Si Deoksiasyonu
Dolomit (%58 CaO & %39 MgO)	Sıvı çelik deoksiasyonu
Ca-Alüminat ( % 45 CaO & %53 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Hurda içeriğindeki empüritelere
Refrakterler	Yüksek Alümina barındıran refrakterler

Tablo 3.3. Cüruf İçerisindeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve MgO Kaynakları

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO
Hurda, çelik deoksiasyonu	Magnezya ( > 92 % MgO )
Ca-Alüminat ( % 45 CaO & %53 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Dolomit (%58 CaO & %39 MgO)
Boksit ve refrakterler	Refrakter

Tablo 3.4. Cüruf İçerisindeki FeO ve MnO Kaynakları

FeO	MnO
Hurda	Hurda ( 2Mn + O <sub>2</sub> = 2MnO )
Demir cevheri	Çelik deoksiasyonu ( O + Mn = MnO )

### 3.4.1. Cüruf bazikliği

Refrakterlerin hasar direnci; matrislerinde meydana gelen hadiselerin kimyasal yapısı, yüzey morfolojisi, porozite, termo mekanik mekanizmalar, kimyasal korozyon, mekanik erozyon gibi birçok etmene bağlıdır [26].

Kimyasal korozyonun, cüruf- refrakter etkileşimi ve sıvı metal- refrakter etkileşimi olmak üzere iki temel sebebi vardır. Bu iki temel sebepten, kullanılan refrakter tuğlalar üzerinde en etkili olanı cüruf refrakter etkileşimleridir [27].

Refrakterlerin cüruf tarafından kimyasal olarak korozyona uğratılmasında asidiklik ve baziklik kavramları önemlidir. Birincil ve ikincil metalürji cüruflarında, asidiklik – baziklik kavramları cüruf içerisindeki bileşenlere bağlı olarak değişmektedir [28].

Cürufun içerdiği bileşenleri asidik, bazik ve amfoterik olarak sınıflandırmak mümkündür. Amfoterik olarak bahsi geçen bileşenler, hem asidik hemde bazik olarak davranış sergileyebilmektedir. Bu sebeple, cürufun bazikliği fiziksel olarak ölçemeyip belirli formülasyonlara bağlı kalınarak hesaplanabilmektedir.

Çelik yapında oluşturulan cürufların baziklik oranı hesabında yaygın kullanılan formül, bazik bileşenlerin asidik bileşenlere bölünmesi ile sonucun elde edildiği ve “V Oranı” olarak adlandırılan  $\text{CaO/SiO}_2$  hesaplaması olarak söylenebilir. Belirli bir sonuca ulaştıran bu formül, CaO ve  $\text{SiO}_2$  bileşenlerinin dışında içerik barındıran cüruflarda hata payı barındırmaktadır.

Bu sebeple cüruf bazikliği hesaplamalarında, farklı çelik yapım ortamlarına ve barındırdığı bileşiklere göre farklı baziklik formülleri kullanılmaktadır. Oksitleyici ve redükleyici ortamlar için yaygın olarak kullanılan iki farklı baziklik endeksi aşağıdaki denklemlerde belirtilmiştir.

Oksitleyici cüruf yapımı için (Elektrik ark ocağı ve Bazik oksijen Fırını):

$$\text{Baziklik Endeksi (B3)} = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3}$$

Redükleyici cüruf yapımı için (Pota Ocağı ve AOD konverter cürufları):

$$\text{Baziklik Endeksi (B5)} = \frac{\% \text{Toplam Bazik Bileşenler}}{\% \text{Toplam Asidik Bileşenler}} = \frac{\% \text{CaO} + \% \text{MgO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{CaF}_2}$$

Feo ve MnO bileşikleri, genellikle asidik davranış gösteren metal oksitlerdir. Bu metal oksitlerin % 5'ten düşük olduğu durumlarda asidik bileşenlere eklenmesi baziklik oranının, yanlıtıclıktan uzak bir şekilde hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Buna göre, B<sub>5</sub> endeksinin revize hali denklem aşağıdaki denklemde gösterilmiştir.

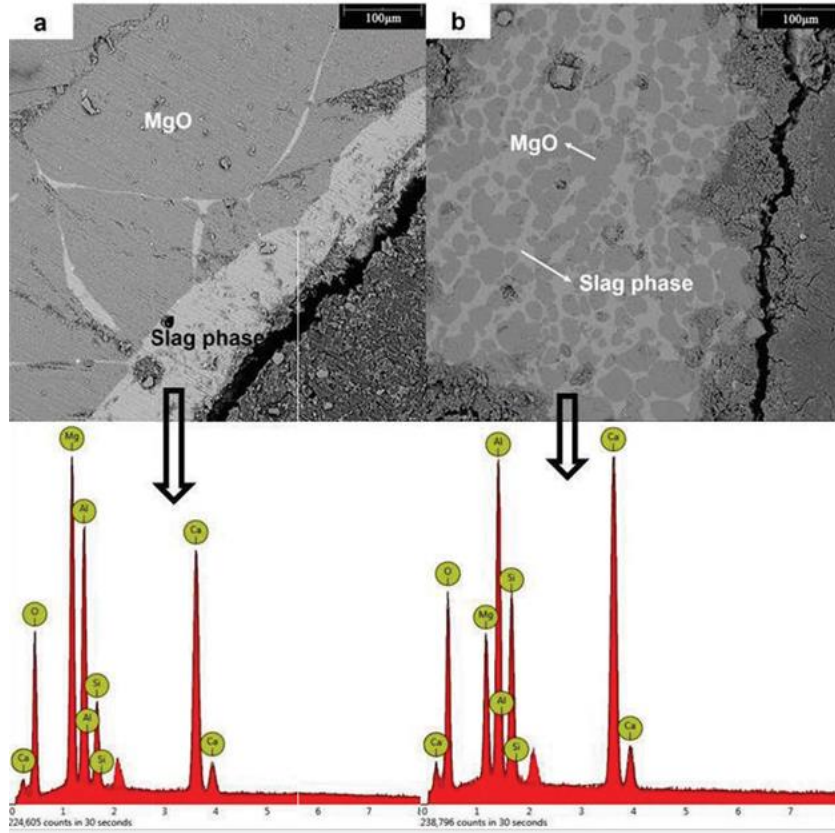
$$\text{Baziklik Endeksi (B5)} = \frac{\% \text{Toplam Bazik Bileşenler}}{\% \text{Toplam Asidik Bileşenler}} = \frac{\% \text{CaO} + \% \text{MgO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{CaF}_2 + \% \text{FeO} + \% \text{MnO}}$$

Farklı çelik kalitelerinin üretiminde, farklı bazikliğe sahip cüruflar kullanılmaktadır. Bu cüruflar ayrıca, çelik üretiminde ikincil metalürji işlemleri sırasında inklüzyonları yakalamakla görevlidir. Bu noktada, cüruf yapısına geçen oksitler dolayısıyla cüruf bazikliği değişmektedir. Zhao ve arkadaşları [29].

Farklı bazikliğe sahip ergimiş cürufları (B = 3,5 – 3,0 – 2,5) ile MgO–C refrakter numuneler arasındaki ara yüzeyin SEM ve EDS sonuçlarını incelemiş ve baziklik oranının penetrasyon eğilimine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, baziklik azaldığında (B = 2,5) numunelerin korozyon eğiliminde önemli bir değişiklik gözlenememiş, B = 3,0 olduğunda korozyon eğiliminin daha ciddi olduğu, cüruf bazikliği 3,5 olduğunda refrakter ve cüruf arasındaki arayüzey açıkça görülmüştür. Periklaz, ikincil metalürji işleminde MgO fazına karşı güçlü bir çözme kapasitesine sahiptir [29].

Baziklik 3,5'ten 3,0'a düştüğünde, 1550 °C'lik likidus çizgisi, artan MgO içeriği yönünde genişler. Bu, MgO-C refrakterinin korozyon eğiliminin düşük baz değerine sahip cüruflarda yüksek olduğunu açıklamaktadır [29].

Şekil 3.16.'da görüldüğü gibi farklı baziklik oranlarındaki cürufun, tane sınırları boyunca MgO partiküllerine nüfuz ettiğini ve onları aşındırarak, refrakterden cürufa geçen MgO parçacıklarına neden olduğunu göstermektedir.

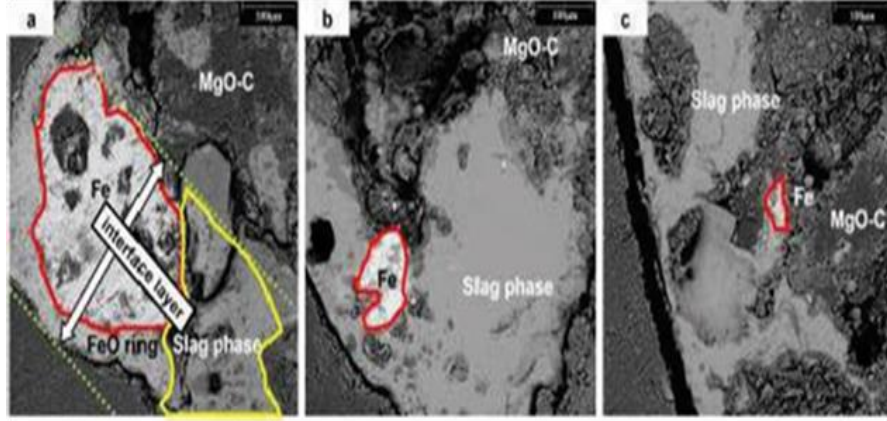


Şekil 3.16. (a) B = 3.5 ve (b) 3.0, farklı bazikliğe sahip ergimiş cüruf ile MgO-C refrakter numuneleri arasındaki ara yüzeyin SEM görüntüleri ve EDS sonuçları [29].

### 3.4.2. Cüruf içerisindeki FeO içeriğinin etkisi

Cüruf içerisinde, FeO'in flaks oksit olarak değerlendirildiği bilinmektedir. Çelik üretim cüruflarındaki farklı FeO içeriğinin, MgO-C refrakter tuğlalardaki korozyon etkisi birçok çalışmaya konu olmuştur. Zhao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [29].

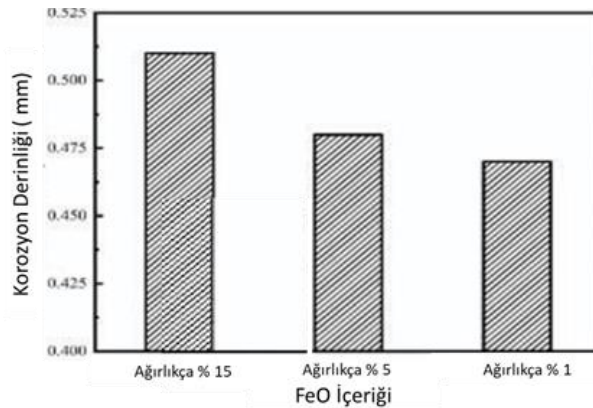
Ağırlıkça; %15-%5 ve %1 FeO içeren cürüfların MgO-C refrakter malzeme üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlgili çalışmadaki, MgO-C refrakter ile cüruf numuneleri arasındaki korozyon arayüzünün SEM görüntüleri Şekil 3.17.'de verilmiştir.



Şekil 3.17.Farklı FeO içeriklerine sahip cüruf ile MgO-C refrakter umuneler arasındaki korozyon ara yüzünün SEM görüntüleri, (a) %15-FeO, (b) %5-FeO, (c)%1-FeO [29].

Şekil 3.17.'de görüleceği üzere cüruf-refrakter etkileşim bölgesinde FeO fazının ortaya çıktığı görülmektedir. Cüruf içerisindeki FeO miktarı arttıkça (ağırlıkça %15) oluşan fazın 300  $\mu$ m'den büyük olduğu, azaldıkça ise (ağırlıkça % 5) 100  $\mu$ m boyutundan küçük olduğu görülmüştür.

Zhao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [29], cüruf içerisindeki FeO miktarı arttıkça MgO-C tuğla ara yüzünde korozyon derinliğinin arttığı görülmüştür. Şekil 3.18.'de korozyon miktarı ve cüruf içerisindeki korozyon ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Cüruf içerisindeki FeO içeriğinin, MgO-C Refrakterinin Korozyon Derinliğine Etkisi [29].

### 3.4.3. Refrakter içerisindeki karbon (C) içeriğinin etkisi

MgO-C refrakterlerin ana erozyon prosesleri, karbon oksidasyonu ve cüruf penetrasyonudur [30].

Bu sebeple karbonun MgO-C refrakter malzemeler içerisindeki davranışını ve görevini bilmek önem arz etmektedir.

MgO refrakterler, oksit cürufları ile temas ettiğinde ıslanabilir, çözülebilir ve korozyona uğrayabilir. Öte yandan, MgO-C refrakterlerin davranışı, karbon nedeniyle farklıdır.

Karbon, ıslanmama özelliğinden dolayı cürufların refrakterlere nüfuz etmemesinde önemli rol oynar. Çelik yapım sürecinde, erozyon, penetrasyon ve çözünme gibi cüruf nedeniyle, MgO-C refrakterinin çeşitli korozyon mekanizmaları mevcuttur. Sıvı cürufun refrakter üzerine ıslanabilirliği, cüruf penetrasyonunu önemli ölçüde etkiler [31].

Cürufun refrakter içine nüfuz etmesinde, absorpsiyon kuvveti, yüzey gerilimi ve cürufun refrakter üzerindeki temas açısı faktörleri rol oynamaktadır. MgO-C ve CaO-SiO<sub>2</sub> cürufları arasındaki ıslanma hadiseleri, literatürde çeşitli yayınlarda araştırılmıştır. Yüksek SiO<sub>2</sub> içeren ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> barındıran cüruflarda, Mg<sup>2+</sup> iyonlarının difüzyonu artmakta ve bununla birlikte reaktif ıslanmada artmaktadır.

MgO-C refrakterindeki karbon, cürufu itmek suretiyle ve Mg<sup>2+</sup> iyonlarının difüzyonunu yavaşlatarak cürufların nüfuziyetini azaltmaktadır [31].



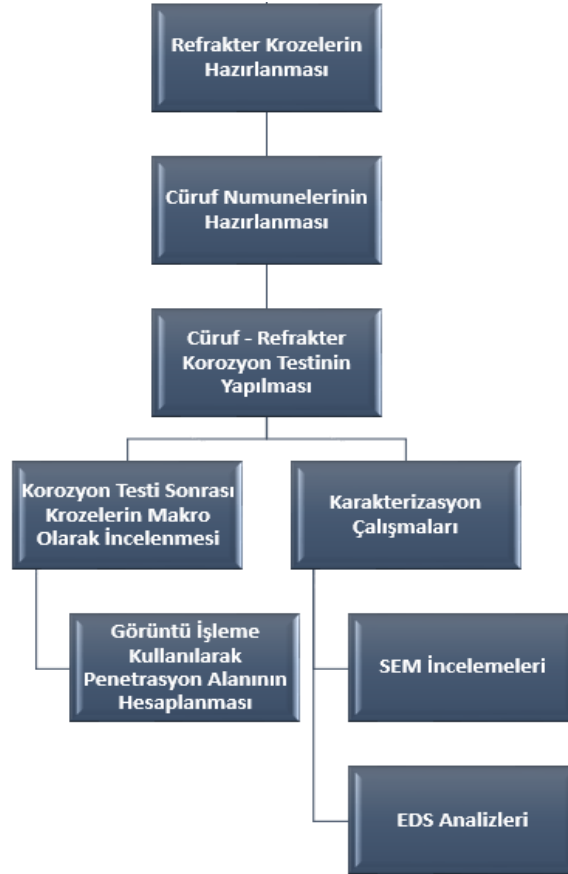
## **BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1. Çalışmanın Amacı**

Bu çalışmada, Kardemiş AŞ. Pota fırınlarında üretilen on farklı çelik kalitesine ait cürufun, çelik potası cüruf bölgesinde kullanılan MgO-C refrakter tuğlalara olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, refrakter tuğlalardan kroze oluşturulmuş ve cüruf numuneleri içerilerine doldurularak “Cüruf – Refrakter Penetrasyon Testi” uygulanmıştır. Penetrasyon testi sonuçları; makro, taramalı elektron mikroskobu ve görüntü işleme yöntemleri ile irdelenmiştir.

### **4.2. Çalışma Prosedürü**

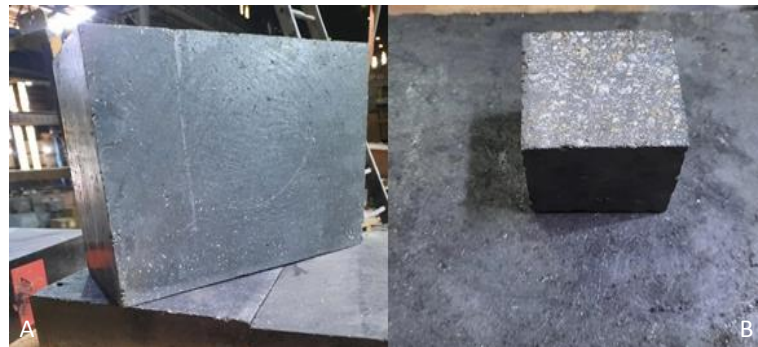
Çalışma kapsamında, potalarda cüruf bölgesinde kullanılan MgO-C refrakter tuğlalar kroze olarak hazırlanmış ve Kardemir A.Ş. pota fırınlarından alınan cüruf numuneleri kullanılmıştır. İlgili çalışmada takip edilen işlemlerin sıralama ve akışı, Şekil 4.1.’de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Deneysel çalışmalarda takip edilen işlemlerin şematik gösterimi

### 4.3. Refrakter Krozelerin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan MgO-C refrakter tuğlalar, elmas kesici kullanılarak 50x50x50 mm. ebatlarında küp biçiminde kesilmiştir. Refrakter tuğla ve tuğladan çıkartılan kroze taslağının görüntüsü Şekil 4.2.'de verilmiştir.



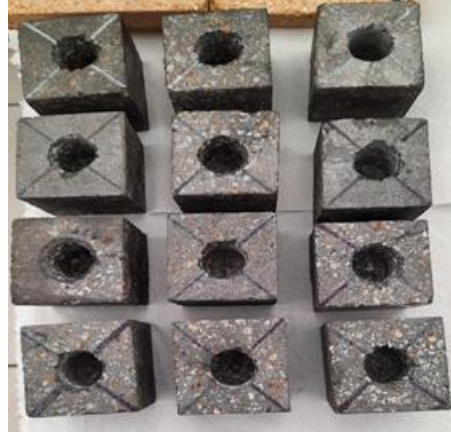
Şekil 4.2. A) MgO-C Tuğla B) Tuğladan Çıkartılan Küp Örneği

Hazırlanan refrakter küpün yüzeyinde, matkapla delmek suretiyle 20 mm çap ve 30 mm derinlik ebatlarında çukur oluşturulmuştur. Bu çukurun delinmesiyle, pota yapısı meydana getirilmiş ve Crf – Refrakter Korozyon Testi'ne uygun kroze yapımı tamamlanmıştır.

Kroze delinmesi aşaması ve tamamlanmış kroze rneklarine ait görseller şekil 4.3. ve şekil 4.4.'te gösterilmiştir.



şekil 4.3. Krozenin Delinerek Oluşturulması



şekil 4.4. Tamamlanmış Kroze rneklere

#### 4.4. Deneyde Kullanılan Crf Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan crflara ait numuneler, paslanmaz elik boru kullanılarak Kardemir Ař. Pota fırınlarından alınmıştır. Paslanmaz elik boru, ikincil metalürji

işlemleri tamamlanan potalardaki cüruf tabakası içerisine daldırılmış ve cürufun yapışması sağlanmıştır. Boru üzerine yapışan cüruf tabakası, soğutularak mekanik yollar ile ayrılmıştır.

Makro boyuttaki cüruf numuneleri, kırma – öğütme – eleme işlemlerine tabi tutulmuştur. Kırma – öğütme işlemlerinin gerçekleştirildiği laboratuvar ekipmanları Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5. A) Kırma B) Öğütme İşlemlerinin Gerçekleştirildiği Laboratuvar Ekipmanları

Kırma – öğütme işlemleri tamamlanan cüruf numuneleri, DIN 51069'da [32] belirtilen pota yöntemine göre korozyon testi için 100 µm elekten eilenmiş ve etüvde 100 °C'de kurularak hazırlanmıştır. Kırma-öğütme-eleme işlemi uygulanan cüruf numuneleri Şekil 4.6.'da sunulmuştur.



Şekil 4.6. A) Kırma, B) Öğütme, C) Eleme İşlemi Uygulanan Cüruf Numunesi

Eleme işlemi tamamlanan cüruf numunelerinin, Spektro Xlab 2000 XRF spektrometresi ile kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Cüruflara ait kimyasal analiz sonuçları ve kodlama sistemi Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Cüruf Numunelerinin Kimyasal Analizleri

(Ağr. %)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Na <sub>2</sub> O	0,023	0,022	0,11	0,053	0,012	0,006	0,013	0,012	0,013	0,009
MgO	6,36	7,42	10,28	11,26	8,63	9,85	9,73	11,63	5,07	6,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,32	3,19	8,51	10,76	8,64	16,34	15,89	21,87	4,72	16,12
SiO <sub>2</sub>	31,14	29,13	23,95	12,65	18,06	0,012	0,012	0,011	21,24	15,65
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,058	0,04	0,04	0,141	0,086	0,068	0,071	0,067	0,08	0,068
S	0,415	0,753	2,078	0,3492	1,006	1,155	1,111	0,775	0,9451	1,175
K <sub>2</sub> O	0,001	0,001	0,001	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,004
CaO	54,84	58,09	54,01	61,88	62,01	70,31	71,53	62,29	66,39	54,31
TiO <sub>2</sub>	0,401	0,189	0,295	0,371	0,292	0,285	0,296	1,22	0,299	0,285
MnO	0,641	0,114	0,161	0,667	0,331	0,159	0,171	0,98	0,317	0,159
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,78	1,04	0,52	1,839	0,902	1,8	1,16	1,11	0,89	1,8
FeO	2,01	1,56	1,08	0,65	2,43	2,58	2,32	1,03	0,77	2,12
Baziklik	1,73	2,03	1,98	3,12	2,65	4,90	5,11	3,38	2,75	1,93

#### 4.5. Cüruf – Refrakter Korozyon Testi

Tartımları gerçekleştirilen cüruf numuneleri ve krozeler ilk olarak 100 °C sıcaklıkta 1 saat bekletilmiş ve kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra toz halindeki cüruflar krozelere doldurulmuştur. Şekil 4.7.'de cüruf konulmuş bir kroze örnek olarak gösterilmektedir.



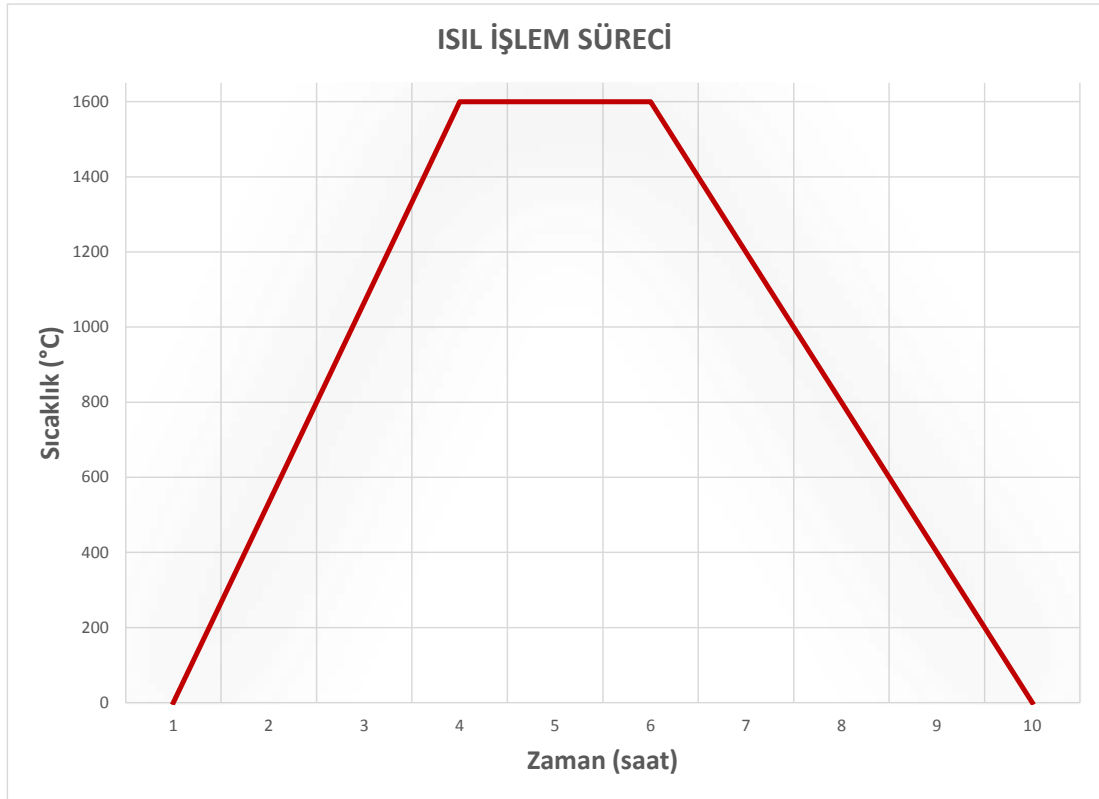
Şekil 4.7. 5x5x5 cm ebatlarında cüruf konulan kroze görüntüsü

İçerisine cüruf konulan krozeler, ısıtma işlemi sırasında fırına herhangi bir kontaminasyon olmaması için üzerlerine kapak konularak “Protherm MOS 160/6” model fırına şarj edilmiştir. Fırına şarj edilen krozelerin görseli Şekil 4.8.’de sunulmuştur.



Şekil 4.8. Fırına şarj edilen numunelerin görüntüsü

Cüruf ile yüklenen krozeler fırına şarj edilmiş ve 3 saatte 1600 °C sıcaklığa ulaşılmıştır. Şekil 4.9.'da belirtilen sıcaklık eğrisine göre işlem gören krozeler, pota fırınlarında yaklaşık işlem sıcaklığı olan 1600 °C'de 2 saat bekletilerek etkileşim sağlanmıştır.



Şekil 4.9. Isıl İşlem Süreci Grafığı

#### **4.6. Görüntü İşleme Kullanılarak Korozyon Alanının Hesaplanması**

Cüruf – Refrakter korozyon testinin tamamlanmasının ardından, etkileşim alanında korozyon alanının hesaplanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, cüruf-refrakter etkileşim bölgelerinde penetrasyon görülen bölgelerden alınmış SEM görüntüsü üzerinden “ImageJ” programı yardımı ile analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, penetrasyon görülen bölgelerde piksel cinsinden alan hesaplanması aracılığıyla tamamlanmıştır.

#### **4.7. SEM İncelemeleri ve EDS Analizleri**

MgO-C refrakter krozeler ile cüruf numuneleri arasındaki etkileşimin anlaşılması amacıyla ergitme sonrasında elmas uçlu kesici yardımıyla kesilen numuneler, altın kaplanarak taramalı elektron mikroskobunda incelenmesi üzere numune hazırlama süreçleri tamamlanmıştır.

SEM incelemeleri, Zeiss EVO LS15 taramalı elektron mikroskobu kullanılarak, hem ikincil elektron (SE) hemde geri-saçılan elektron (BSD) dedektörleri ile gerçekleştirilmiştir. Mikroskoba bağlı Bruker EDS (enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi) sistemi ile cüruf, refrakter ve etkileşim alanlarında noktasal, alansal ve çizgisel mikro-kimyasal analizler yapılmıştır.



## BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 5.1. Fırınlanan Krozelerin Makro İncelemesi

Cüruf-refrakter penetrasyon testi tamamlanan numuneler, elmas uçlu kesici kullanılarak ortadan ikiye kesilmiştir. Makro incelemelerin ardından kesilen parçalardan bir tanesi, altın kaplanarak SEM cihazında incelenmesi üzere hazırlanmıştır. Boş olarak fırınlanan ve sonrasında kesimi yapılan kroze örneği Şekil 5.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Fırınlanmış ve kesimi tamamlanmış kroze örneği

İçerisine cüruf konularak ergitme işlemi tamamlanmış kroze örneği, Şekil 5.2.'de sunulmuştur.



Şekil 5.2. Fırından çıkarılan numune görseli

Cüruf penetrasyon testi esnasında, bazı numunelerde ısıl gerilmeler ve genleşmeler meydana gelmiştir. Bu sebeple numunelerde çatlama ve kırılmalar görülmüş ve Şekil 5.3. ve Şekil 5.4.'te



Şekil 5.3. Isıl işlem sonrası kırılma görülen numune

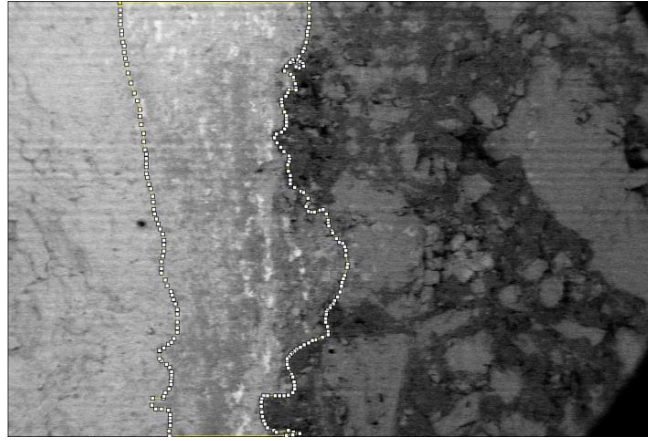


Şekil 5.4. Isıl işlem sonrası çatlama görülen numune

## 5.2. Görüntü İşleme ile Korozyon Alanının Hesaplanması

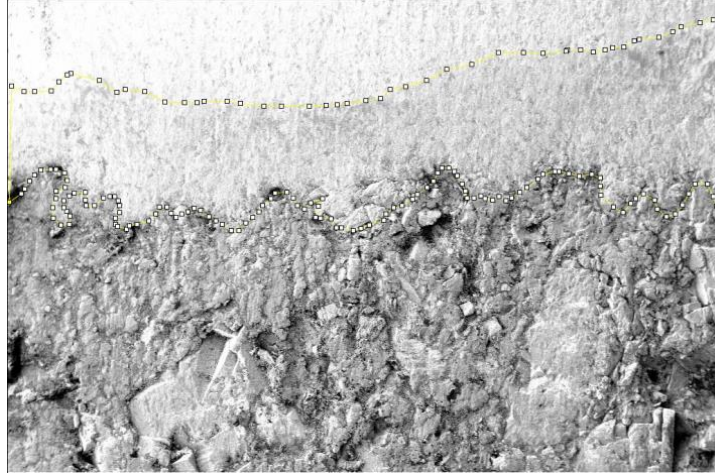
Deneysel çalışmalar kapsamında ısıl işleme tabi tutulan numunelerden, üç tanesinde etkileşim bölgesinde kontrast farklılığı tespit edilmiştir. Bu sebeple, üç numunede penetrasyon alanı hesabı yapılabilmektedir.

6 numaralı cüruf numunesinin ergitildiği MgO-C refrakter krozede, cüruf penetrasyonuna pota bölgesinin sağ duvarında rastlanmıştır. BSD dedektörü ile çekilen görüntüde piksel cinsinden elde edilen alan hesaplamaları sonucunda, Şekil 5.5.'de görüldüğü üzere %23,45'lik bir penetrasyon oranı tespit edilmiştir.



Şekil 5.5. 6 Numaralı numuneye ait geri saçılan elektron (BSD) dedektörü ile çekilen SEM görüntüsü

7 numaralı cüruf numunesinin ergitildiği MgO-C refrakter krozede, cüruf penetrasyonuna pota bölgesinin tabanında rastlanmıştır. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, piksel cinsinden elde edilen alan hesaplamaları sonucunda, Şekil 5.6.'da görüldüğü üzere %26,38'lik bir penetrasyon oranı tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. 7 Numaralı numuneye ait geri saçılan elektron (BSD) dedektörü ile çekilen SEM görüntüsü

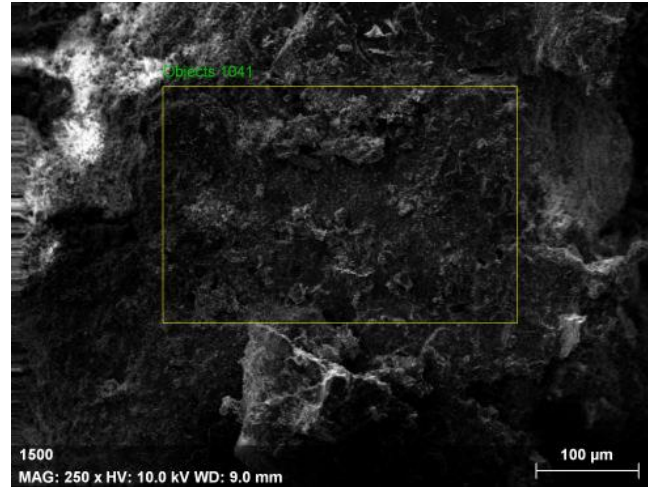
8 numaralı cüruf numunesinin ergitildiği MgO-C refrakter krozede, cüruf penetrasyonuna pota bölgesinin tabanında rastlanmıştır. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, piksel cinsinden elde edilen alan hesaplamaları sonucunda, Şekil 5.7.'de görüldüğü üzere %44,91'lik bir penetrasyon oranı tespit edilmiştir.



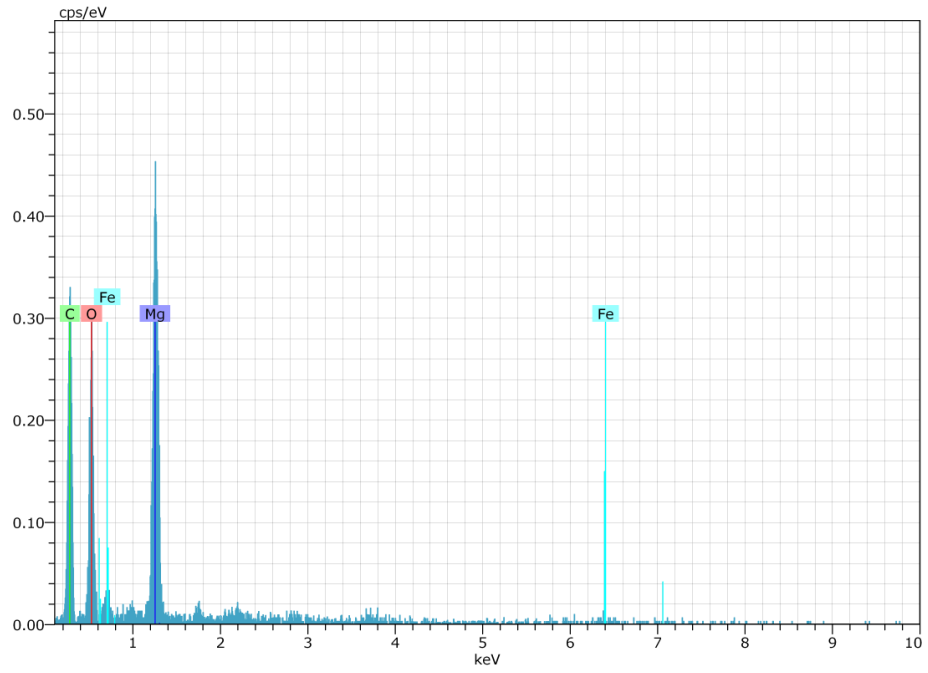
Şekil 5.7.8 Numaralı numuneye ait geri saçılan elektron (BSD) dedektörü ile çekilen SEM görüntüsü

### 5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu İle Cüruf Refrakter Etkileşim Alanının İncelenmesi ve Gerçekleştirilen EDS Analizi Sonuçları

Çalışma devamında, bütün cüruflardan ve refrakterlerden EDS görüntüleri alınmıştır. Isıl işlem sonrası refrakter malzemenin SEM görüntüsü ve EDS analizi Şekil 5.8. ve Şekil 5.9.'da verilmiştir.



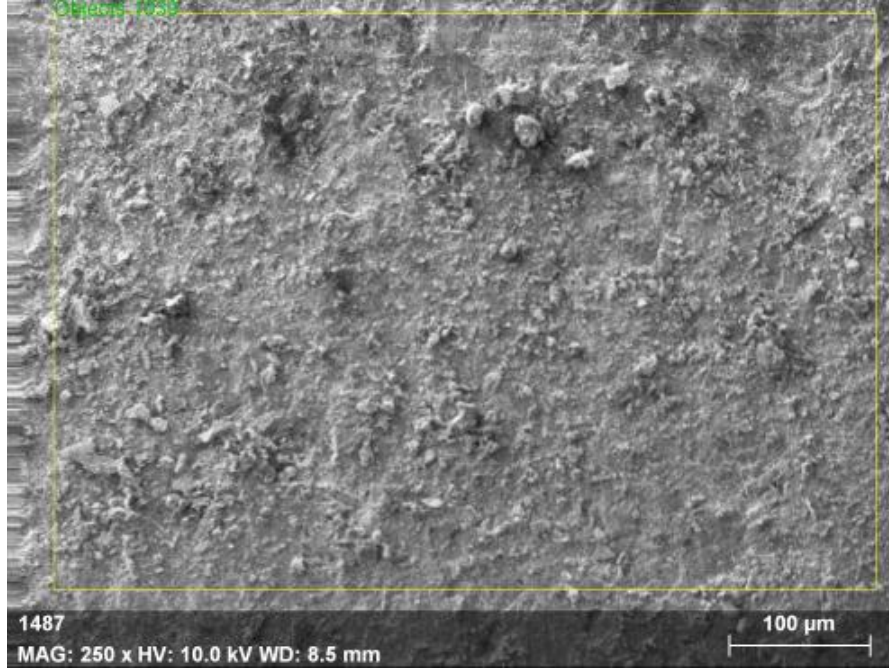
Şekil 5.8. MgO-C Refrakterden alınan SEM görüntüsü



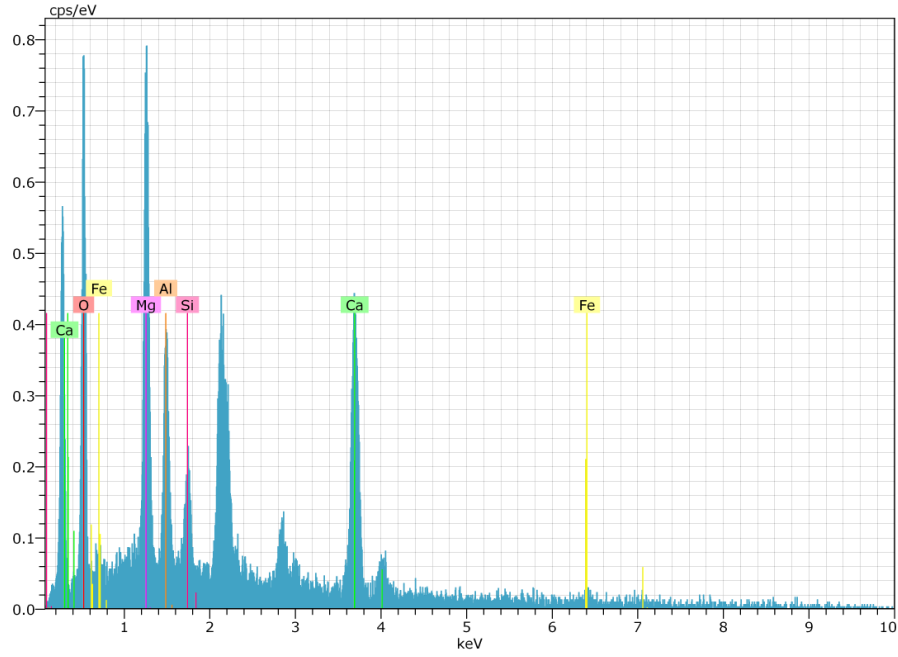
Şekil 5.9. MgO-C Refrakter malzemenin alansal EDS Analizi

Isıl işlem sonrası cüruf numunelerinden alınan SEM görüntüleri ve EDS analizlerinden birisi örnek teşkil etmesi açısından Şekil 5.10., Şekil 5.11.'de verilmiştir.



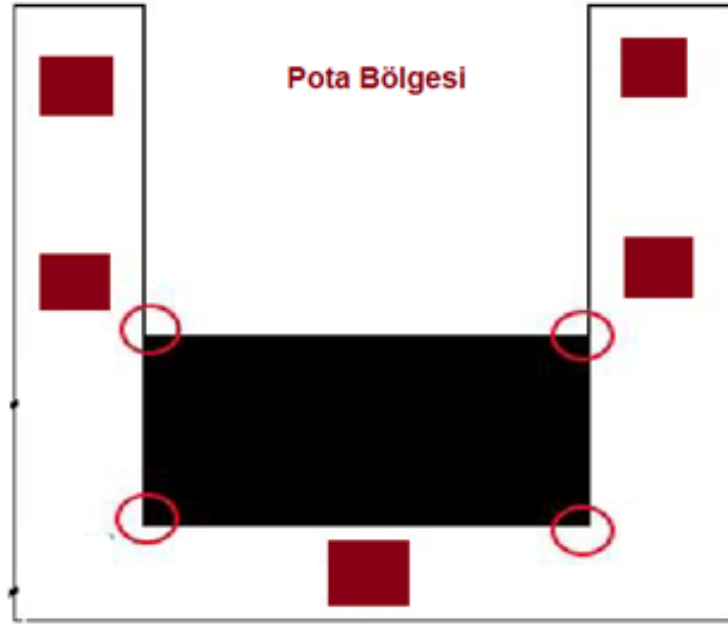


Şekil 5.10. 5 numaralı cürufun penetrasyon testi sonrasında alınan SEM görüntüsü



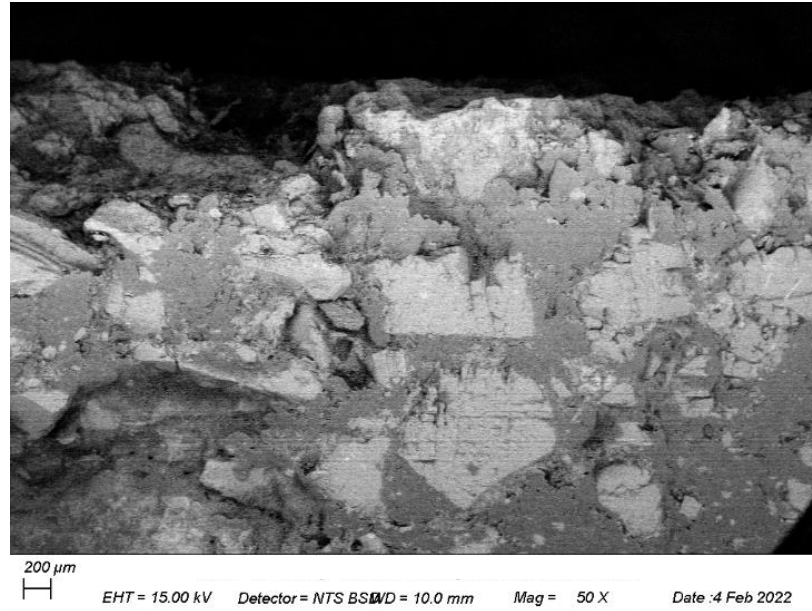
Şekil 5.11. 5 numaralı cürufun penetrasyon testi sonrasında alınan EDS analizi

Cüruf – refrakter penetrasyon testi tamamlanan bütün numunelerin; pota tabanı, kenarlar alt-orta- üst kısımlarında SEM görüntüleri alınmıştır. Etkileşimin yoğun görüldüğü bölgelerde, noktasal ve çizgisel EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Krozelerden görüntü alınan bölgelerin tanımı Şekil 5.12.'de gösterilmiştir.

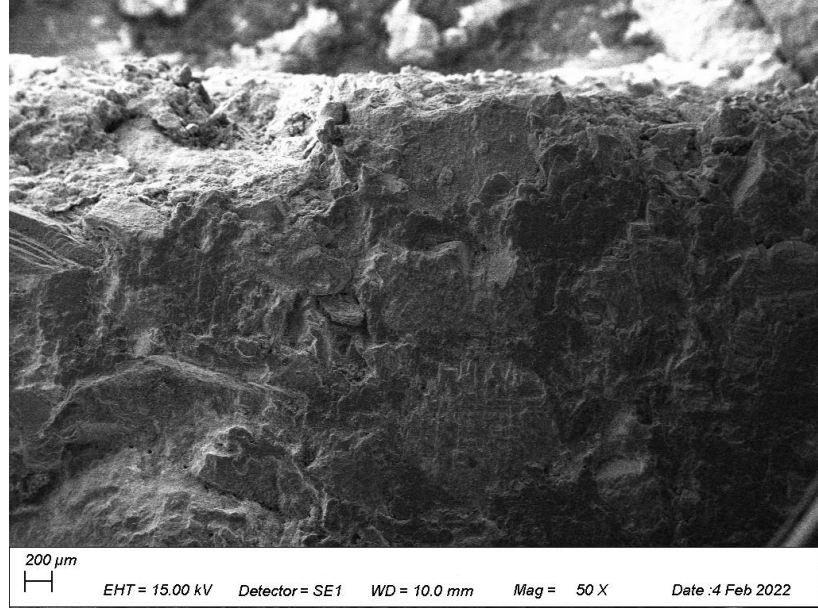


Şekil 5.12. SEM cihazında görüntü alınan bölgelerin tariflenmesi.

1 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.13., Şekil 5.14., Şekil 5.15. ve Şekil 5.16.'da gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, penetrasyon belirten bir kontrast farklılığına rastlanmamıştır.



Şekil 5.13. 1 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü – BSD

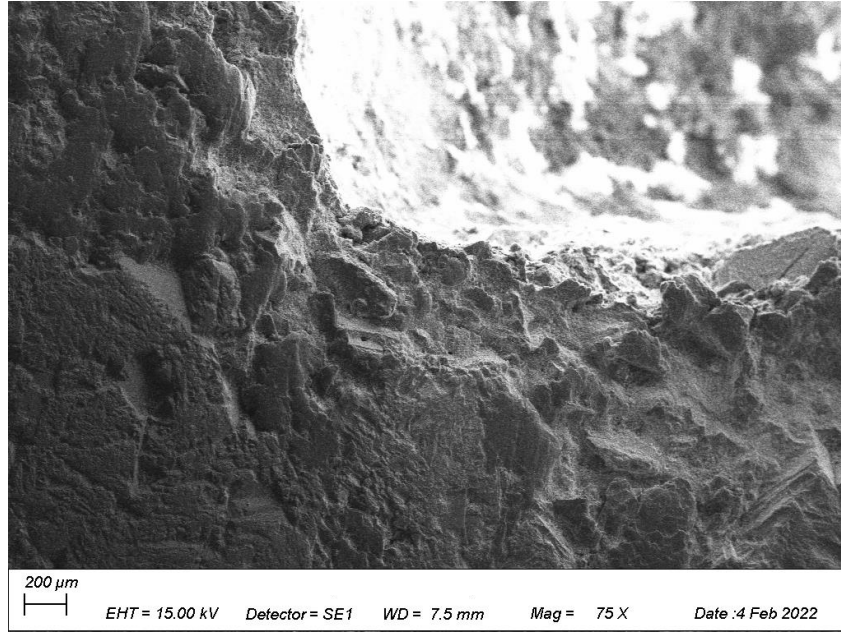


Şekil 5.14. 1 Numaralı Numune Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - SE



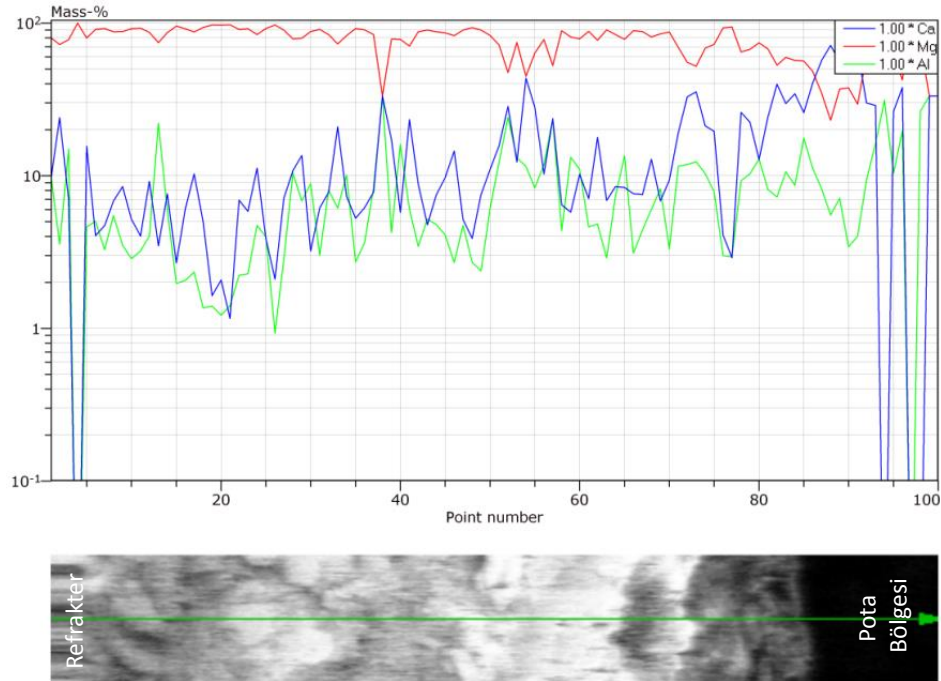
Şekil 5.15. 1 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD





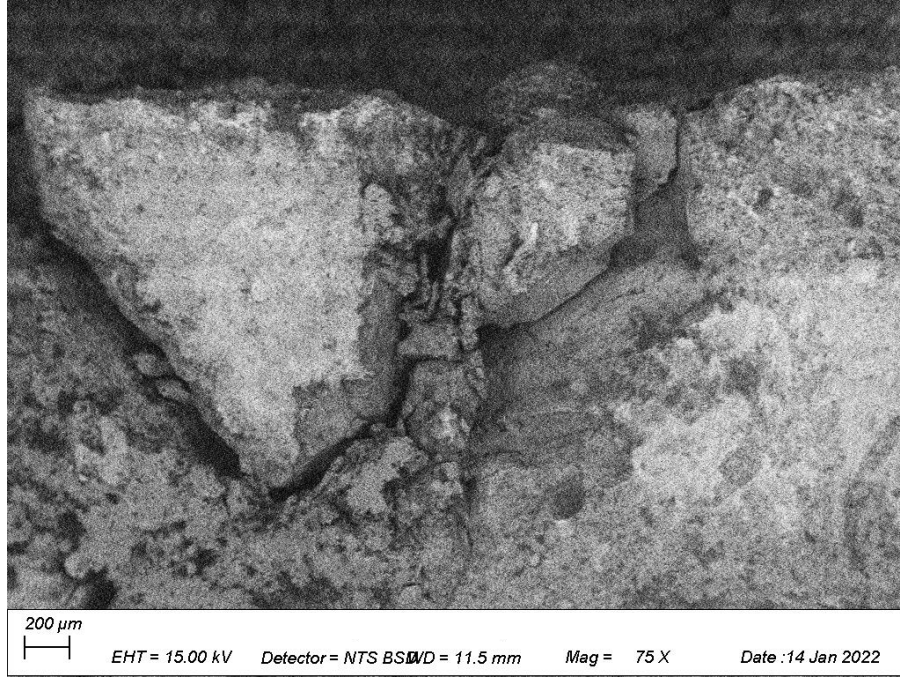
Şekil 5.16. 1 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE

1 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.17.'de sunulmuş ve refrakterden pota bölgesine gidildikçe kalsiyum (Ca) oranında artış olduğu görülmüştür. Cüruf içerisinde yer alan kalsiyumun belirli bir derinliğe kadar refrakter içerisine difüze olduğu tespit edilmiştir.

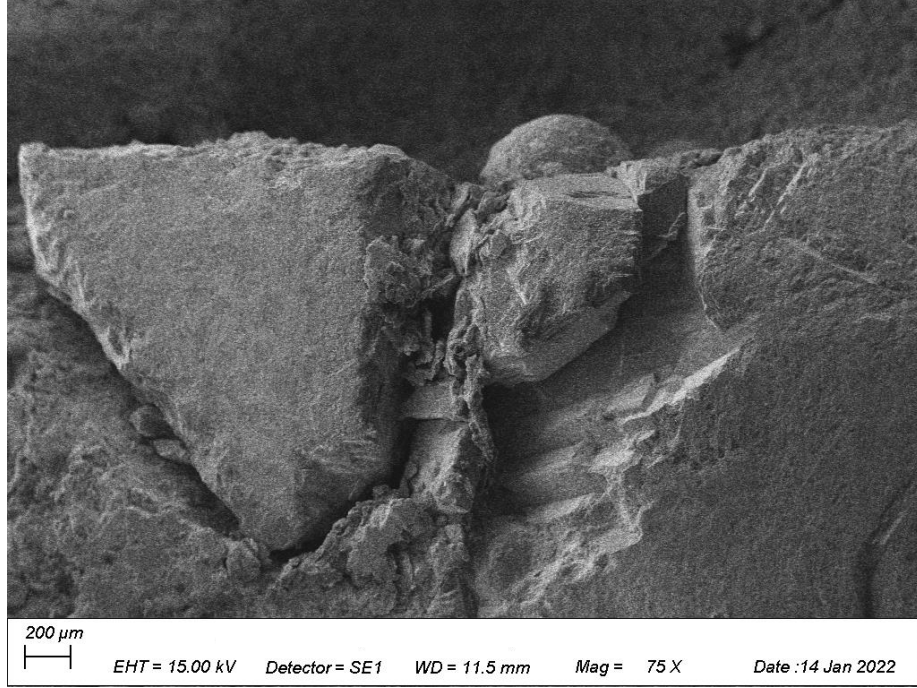


Şekil 5.17. 1 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi Çizgisel

2 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.18., Şekil 5.19., Şekil 5.20., Şekil 5.21.'de gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, penetrasyon belirten bir kontrast farklılığına rastlanmamıştır.



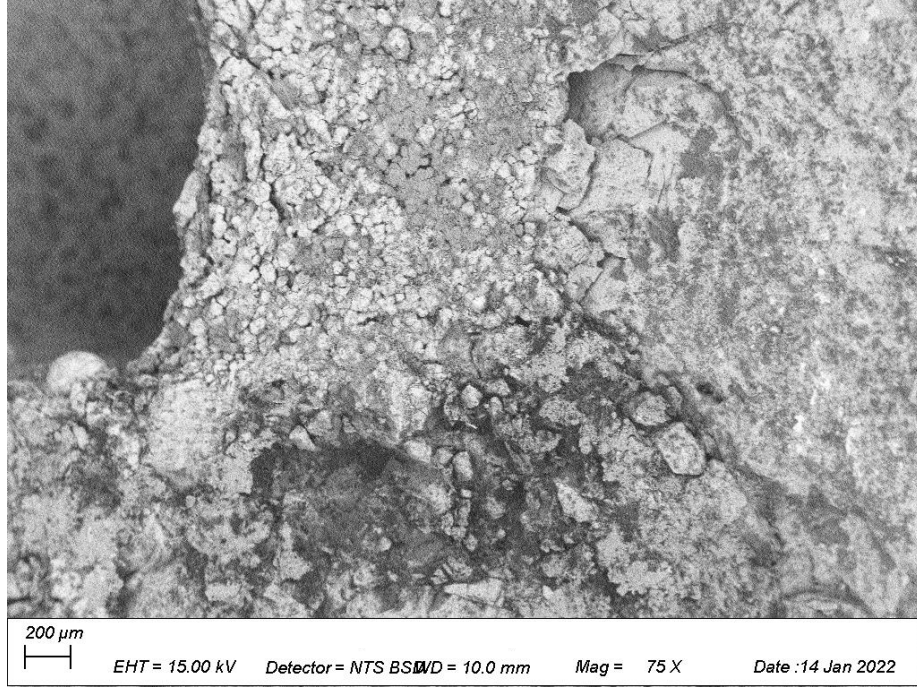
Şekil 5.18. 2 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD



Şekil 5.19. 2 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - SE

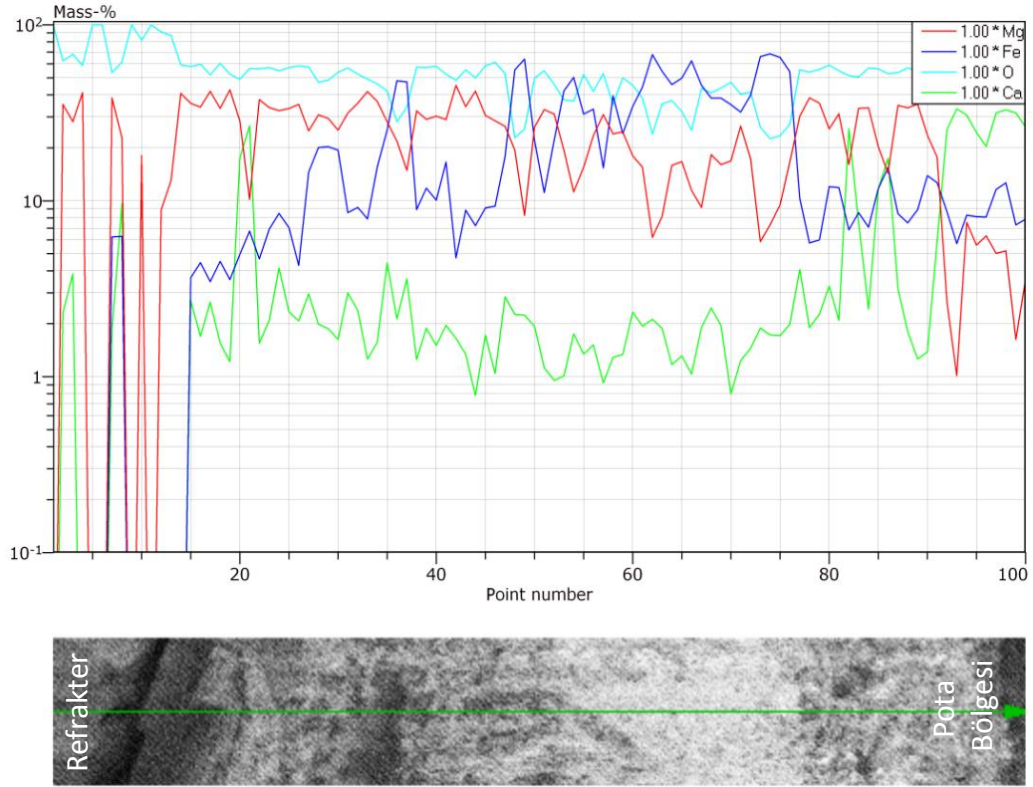


Şekil 5.20. 2 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.21. 2 Numaralı Numune Pota Taban Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

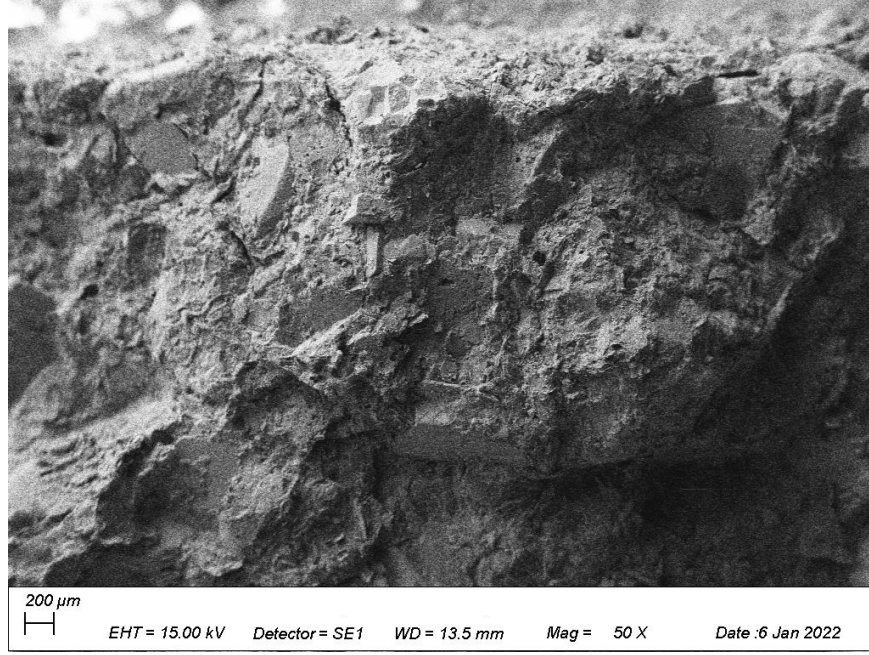
2 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.22.'de sunulmuş ve refrakterden pota bölgesine gidildikçe kalsiyum (Ca) oranında artış, magnezyum (Mg) oranında düşüş olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, cüruf içerisinde yer alan kalsiyumun belirli bir derinliğe kadar refrakter içerisine difüze olduğu belirlenmiştir.



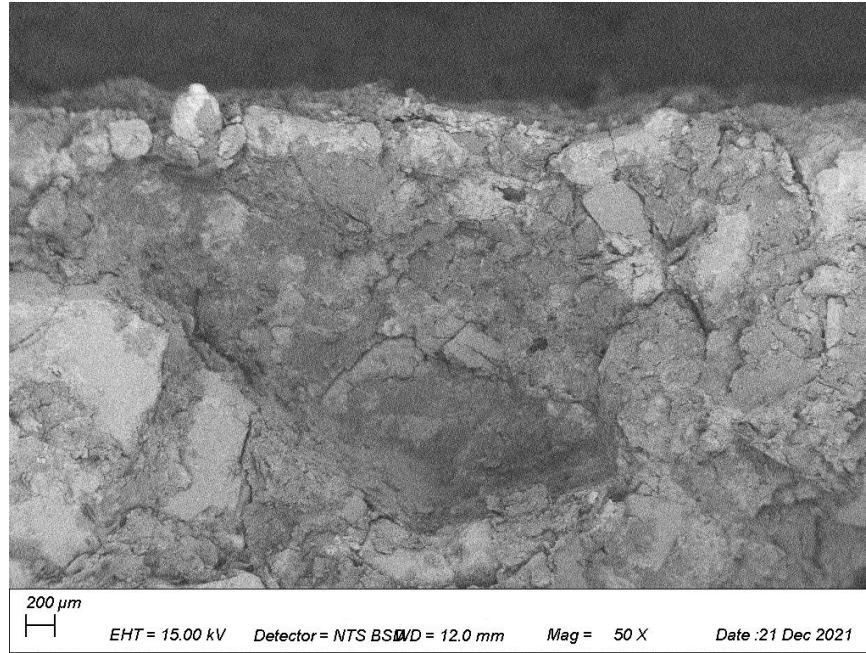
Şekil 5.22. 2 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi Çizgisel

3 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.23., Şekil 5.24., Şekil 5.25. ve şekil 5.26.'da gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, penetrasyon belirten bir kontrast farklılığına rastlanmamıştır.

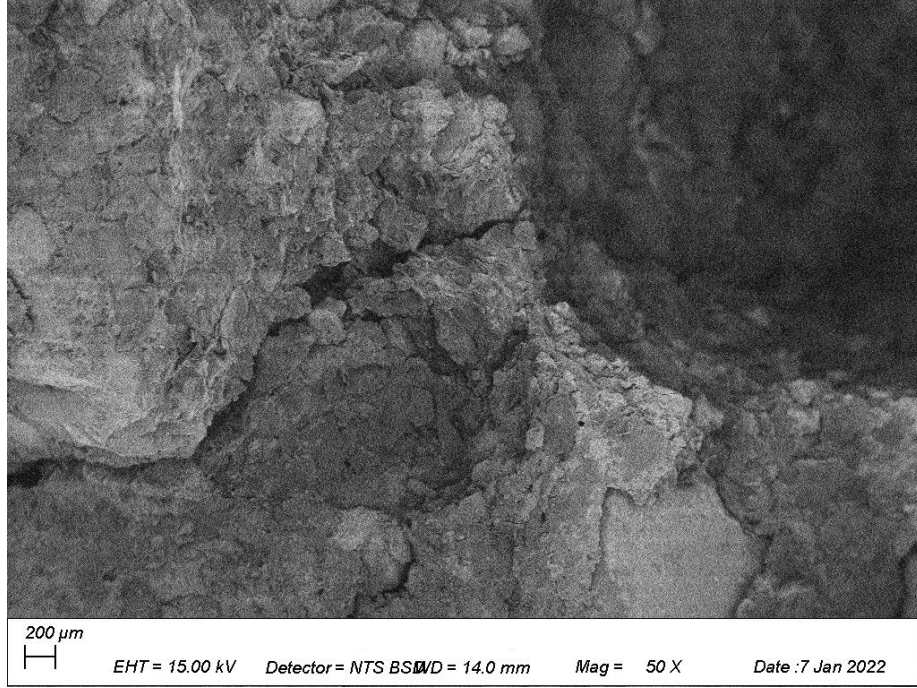




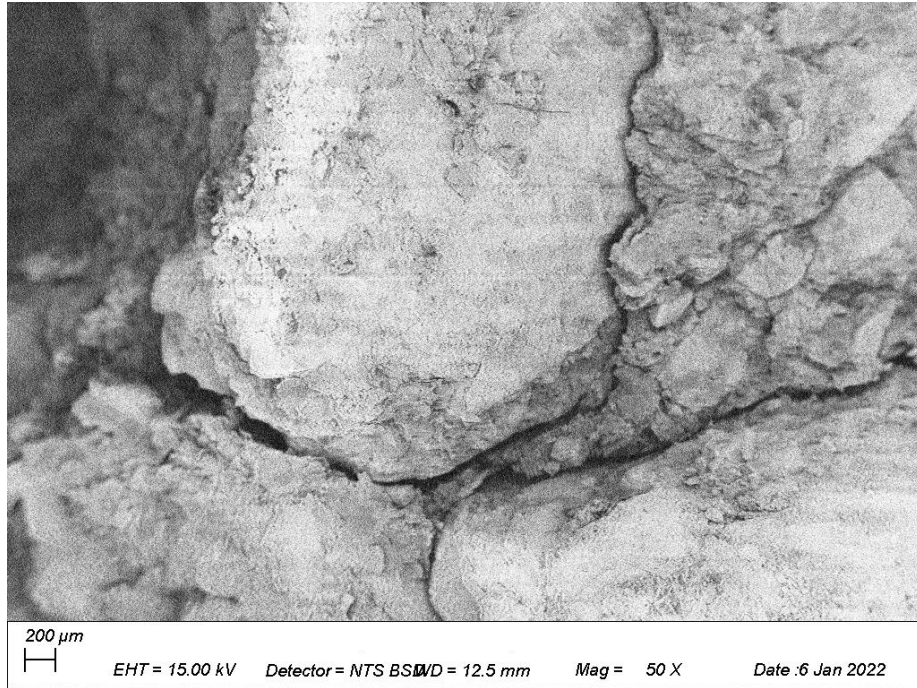
Şekil 5.23 3 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - SE



Şekil 5.24. 3 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

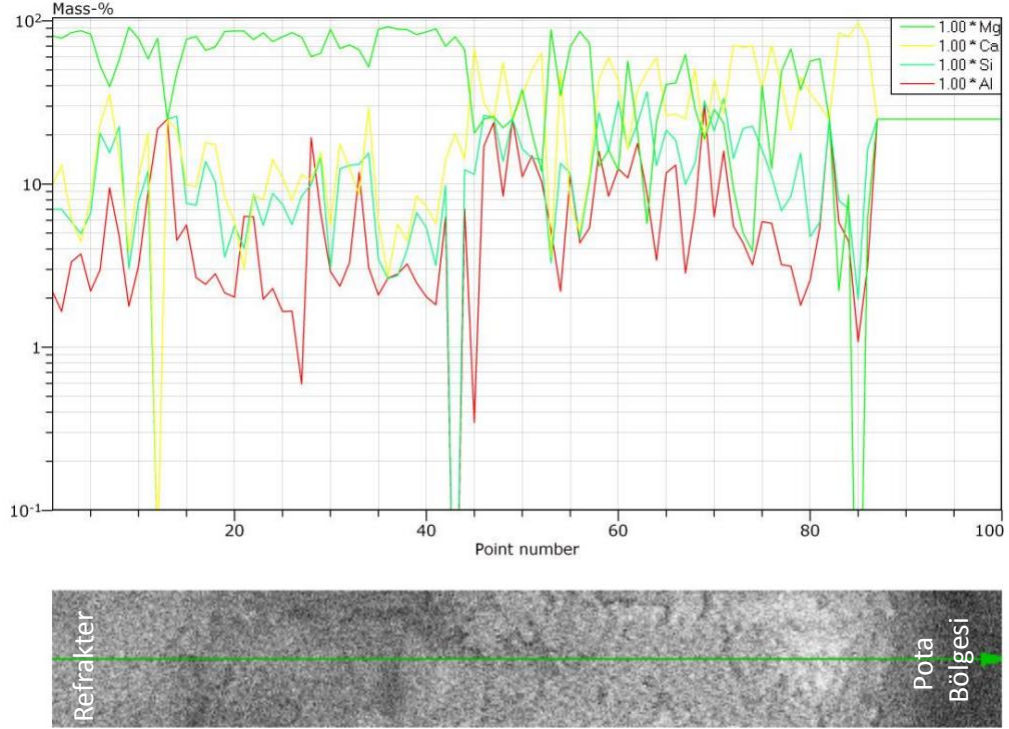


Şekil 5.25. 3 Numaralı Numune Pota Taban Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE



Şekil 5.26. 3 Numaralı Numune Pota Taban Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

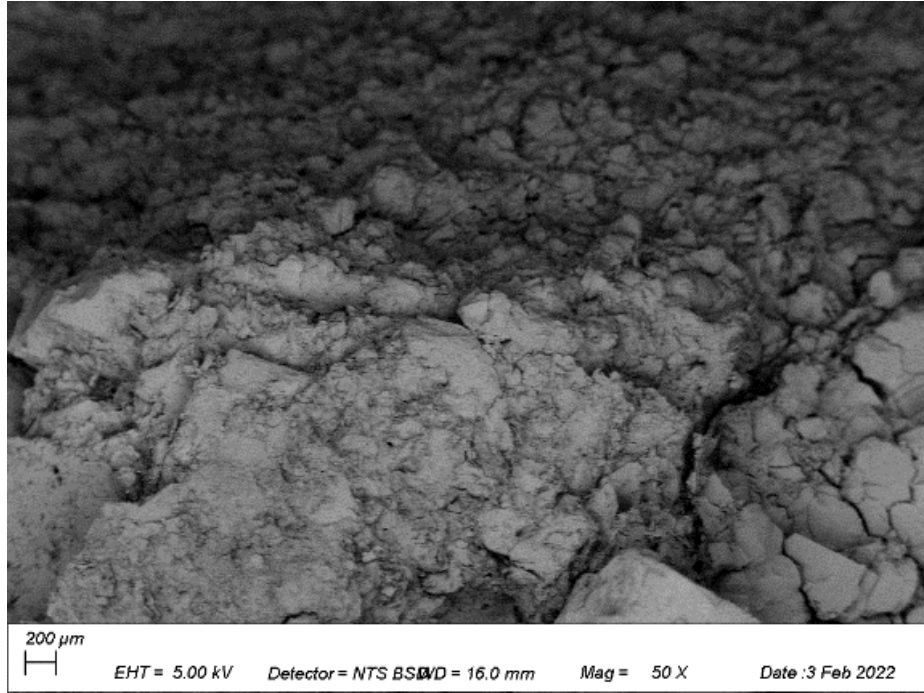
3 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.27.'de sunulmuş ve refrakterden pota bölgesine gidildikçe kalsiyum (Ca) oranında artış, magnezyum (Mg) oranında düşüş olduğu görülmüştür.



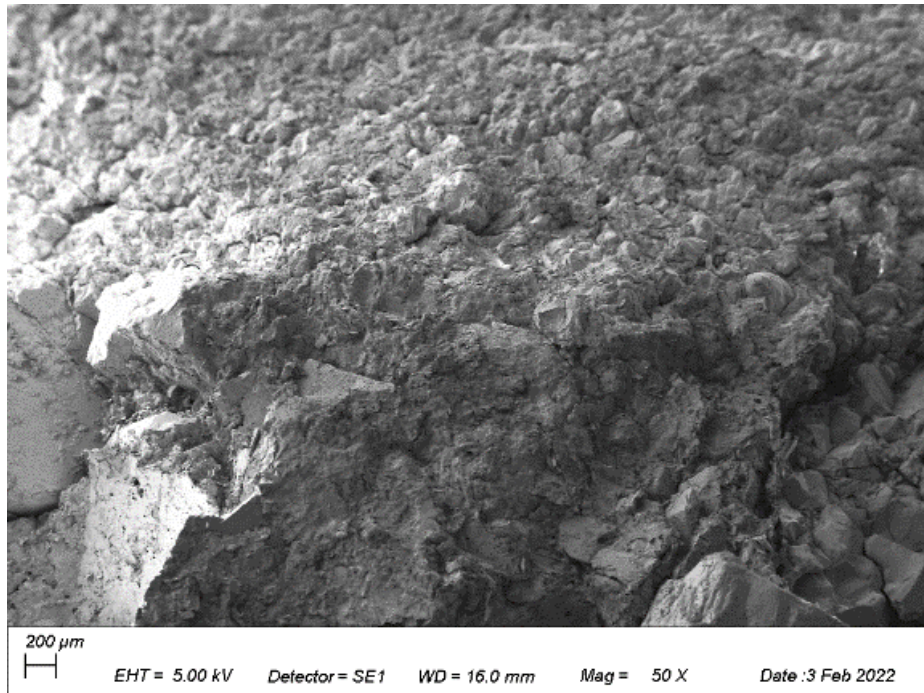
Şekil 5.27. 3 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi

4 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.28., Şekil 5.29., Şekil 5.30., Şekil 5.31.'de gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, penetrasyon belirten bir kontrast farklılığına rastlanmamıştır.

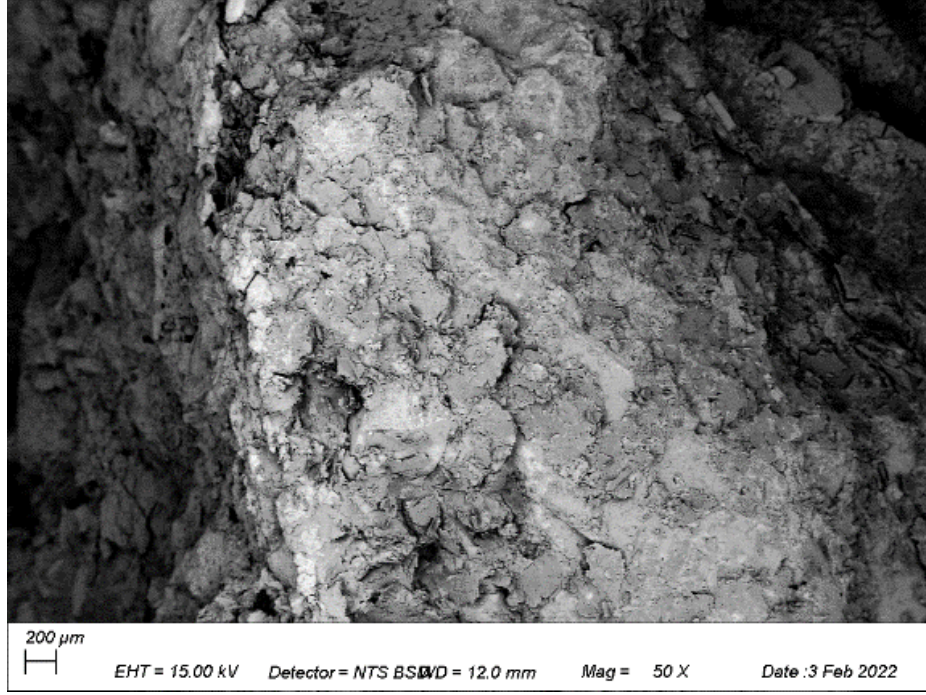




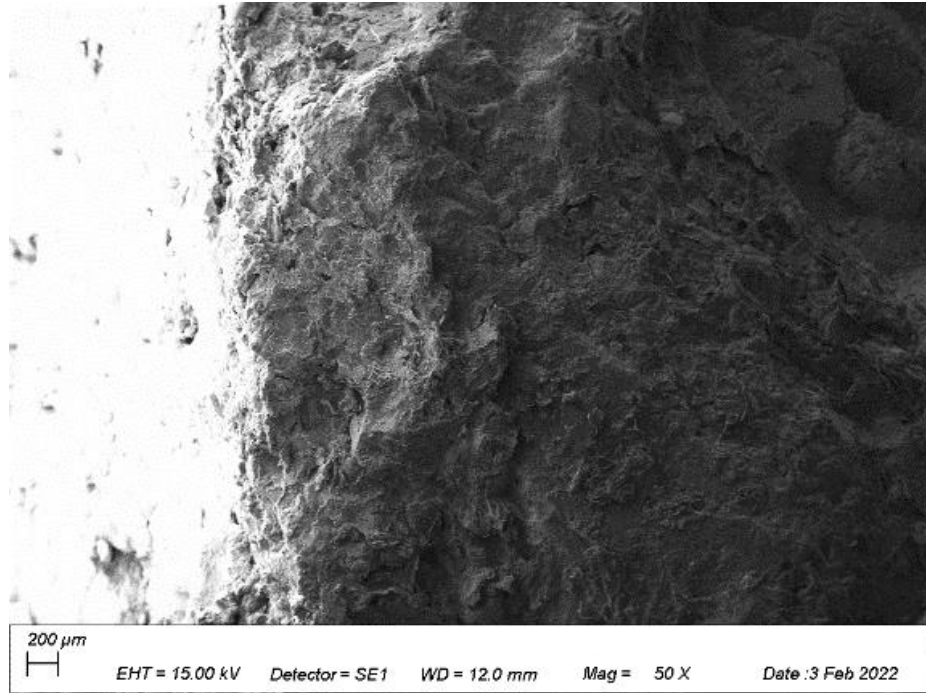
Şekil 5.28. 4 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.29. 4 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- SE



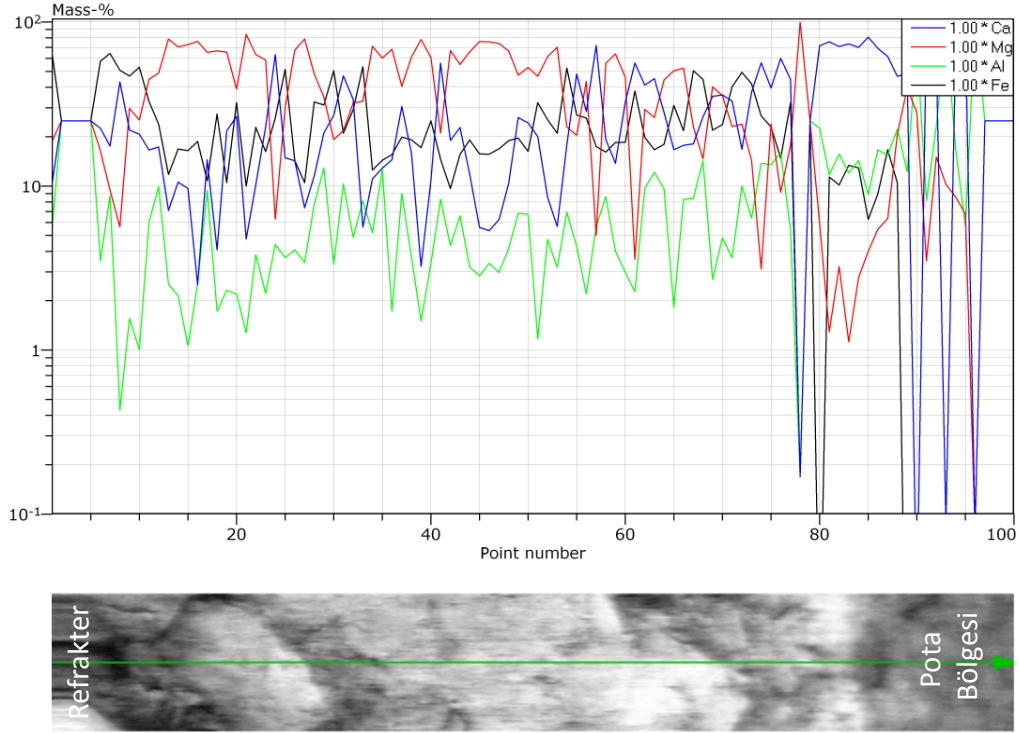
Şekil 5.30. 4 Numaralı Numune Pota Sağ Orta Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.31. 4 Numaralı Numune Pota Sağ Orta Bölgesi SEM Görüntüsü- SE

4 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.32.'de sunulmuş ve refrakterden pota bölgesine gidildikçe kalsiyum (Ca) oranında artış, magnezyum (Mg) oranında düşüş olduğu görülmüştür.

Cüruf – refrakter etkileşim alanına doğru gidilçikce Mg oranında meydana gelen bu azalmanın refrakterden cürufa Mg geçişi ile gerçekleştiği düşünülmektedir. Bu doğrultuda mikro görüntülemeye kontrast farklılığına rastlanmasada etkileşim bölgesinde kimyasal korozyon olduğu görülmüştür.



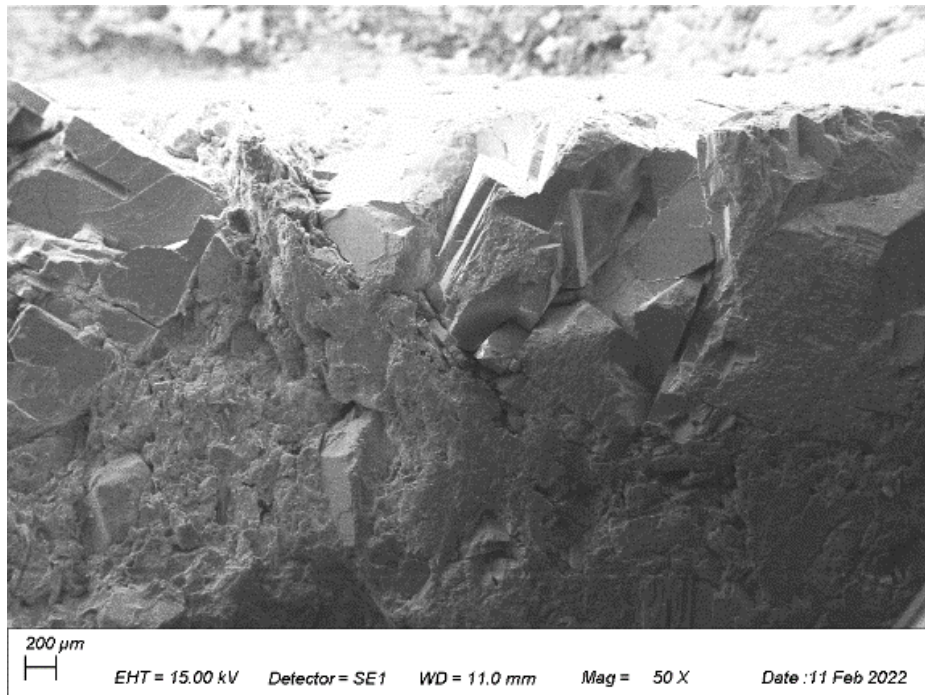
Şekil 5.32. 4 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS

5 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.33., Şekil 5.34., Şekil 5.35., Şekil 5.36.'da gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, penetrasyon belirten bir kontrast farklılığına rastlanmamıştır.

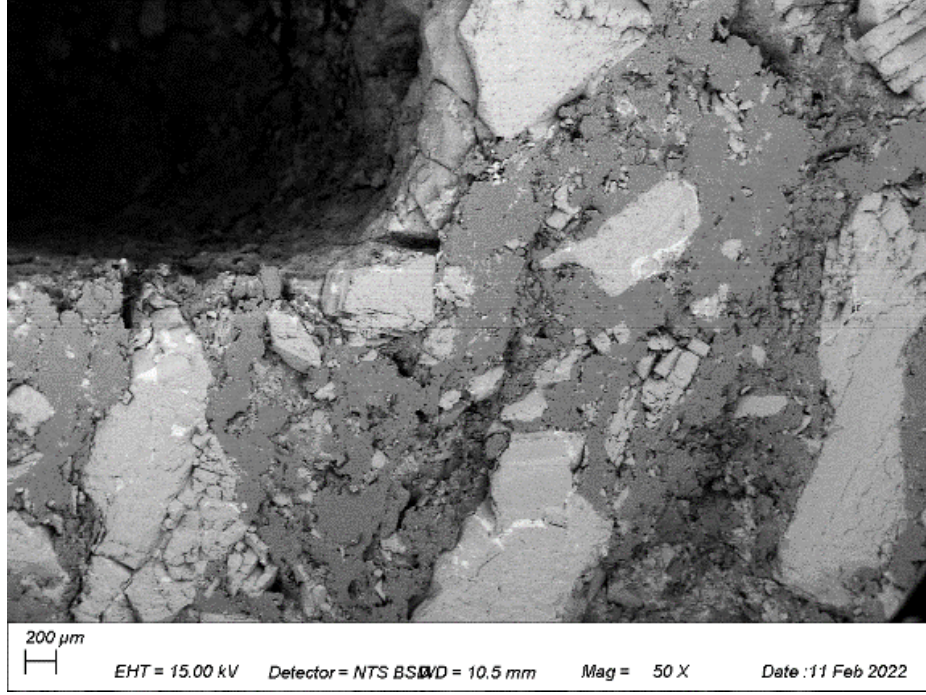




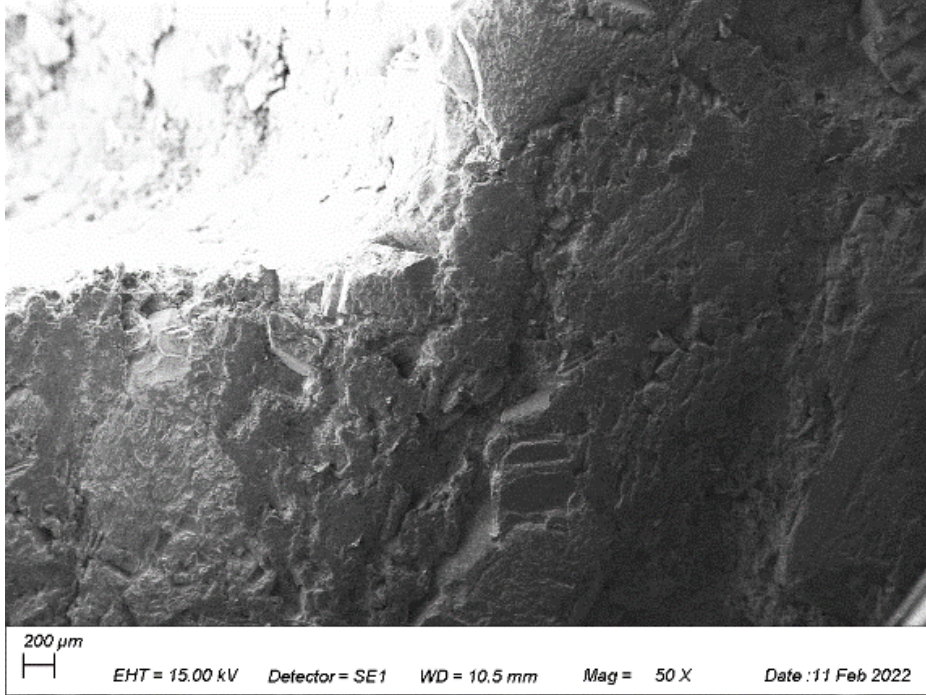
Şekil 5.33. 5 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü – BSD



Şekil 5.34. 5 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- SE



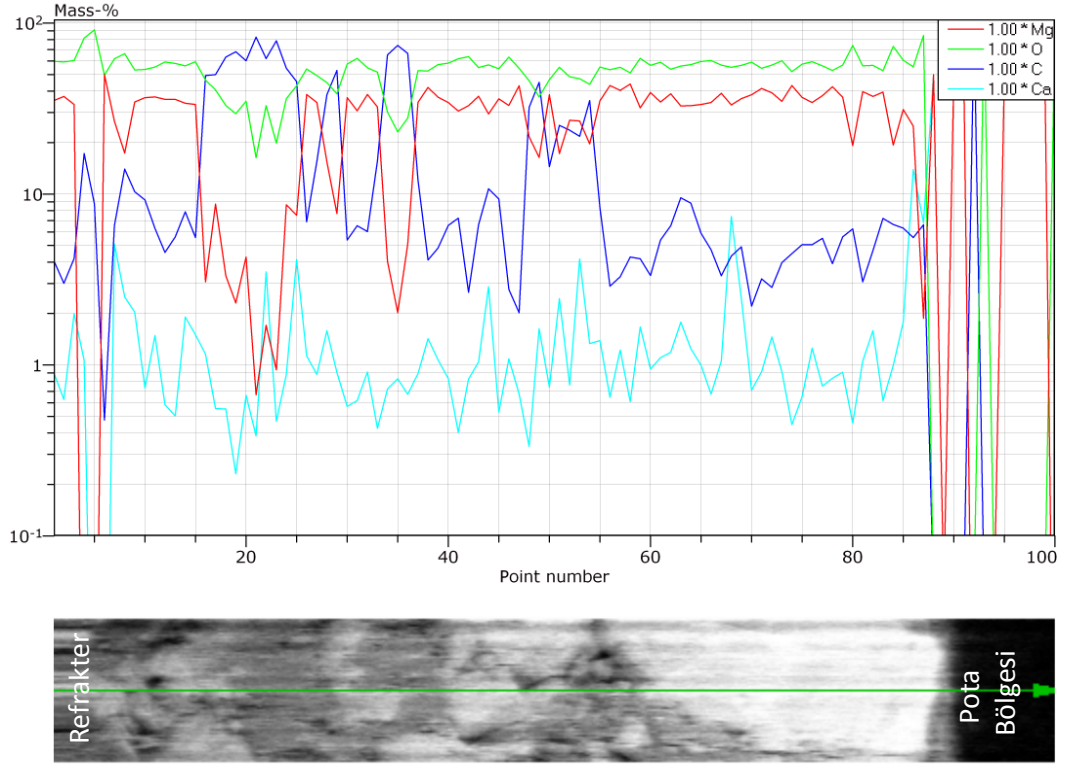
Şekil 5.35. 5 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü – BSD



Şekil 5.36. 5 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü – SE

5 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.37.'de sunulmuştur. Refrakterden, etkileşim bölgesine gidildikçe, karbon (C) oranında düşüş olduğu görülmüştür. Etkileşim bölgesindeki C oranının

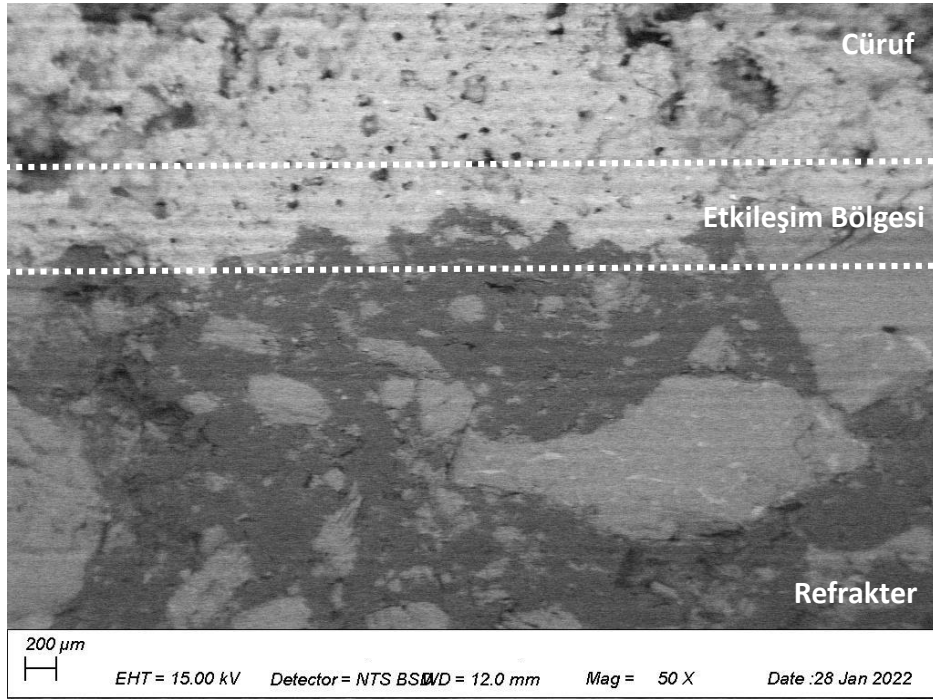
düşüşüyle birlikte, bu alanda reaktif ıslanmada artış ve penetrasyon meydana gelmesi beklenmiştir. Ancak, numuneye ait SEM görüntülerinden de görüleceği üzere numunede mikro boyutta bir penetrasyona rastlanmamıştır.



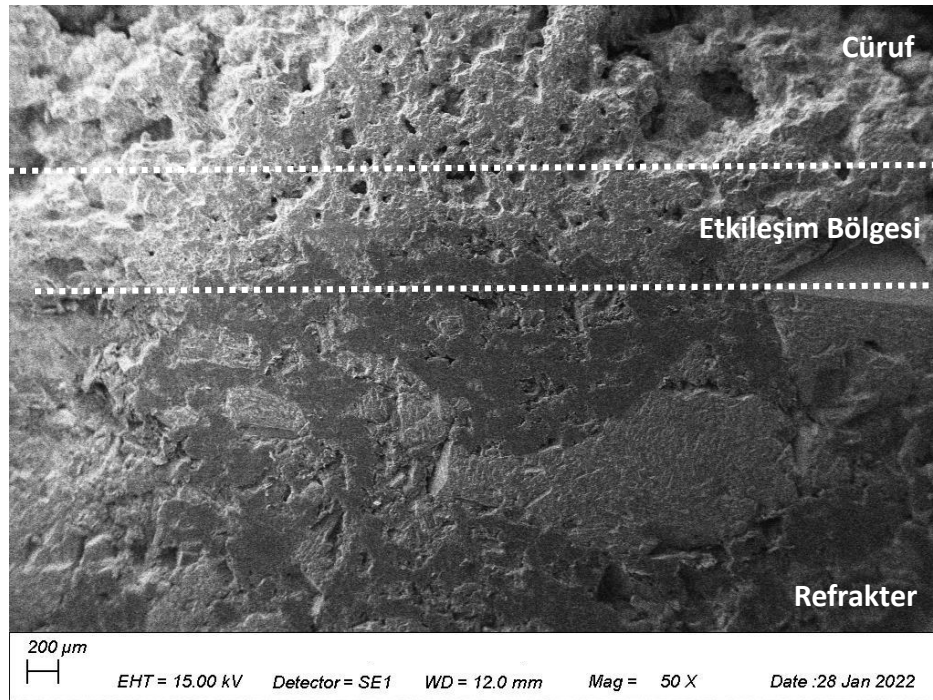
Şekil 5.37. 5 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi

6 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.38., Şekil 5.39., Şekil 5.40., Şekil 5.41.'de gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, potanın sağ duvarında kontrast farklılığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, cüruf – refrakter etkileşiminin gerçekleştiği değerlendirilmiştir.

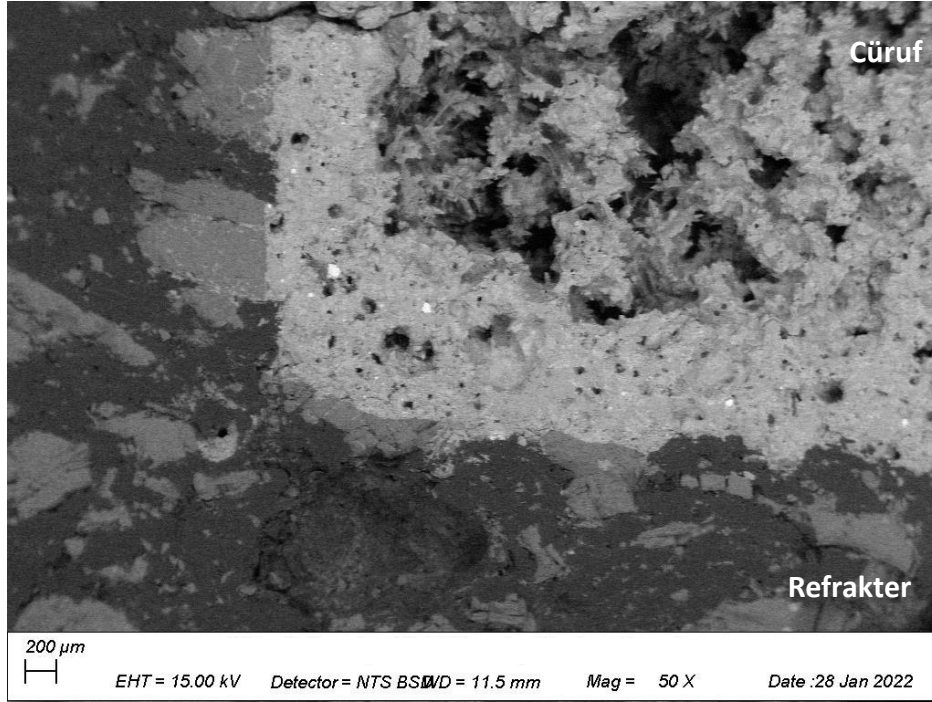




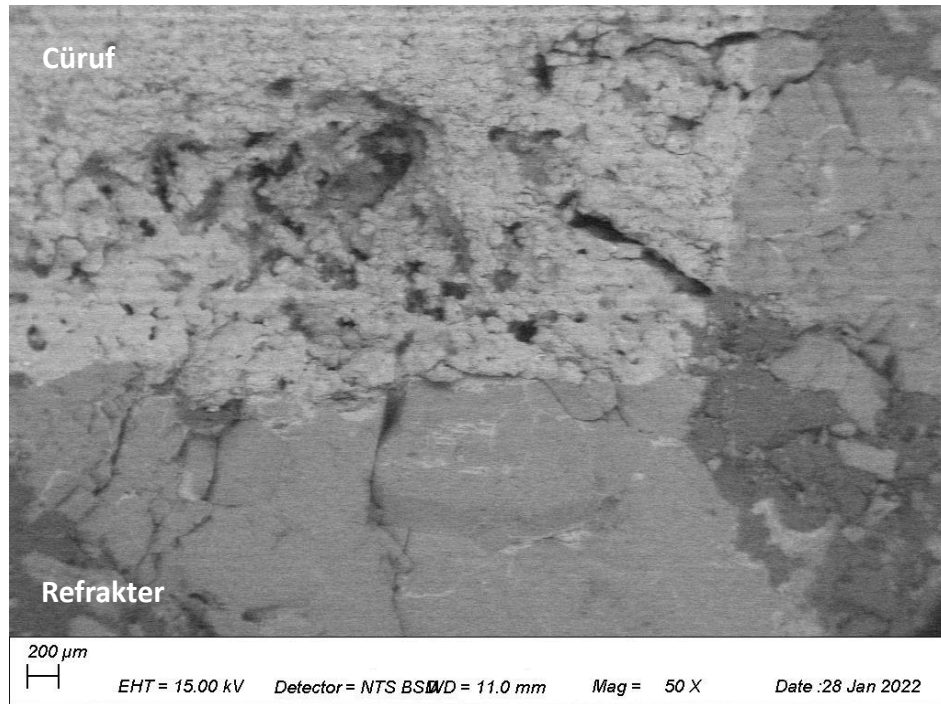
Şekil 5.38. 6 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.39. 6 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



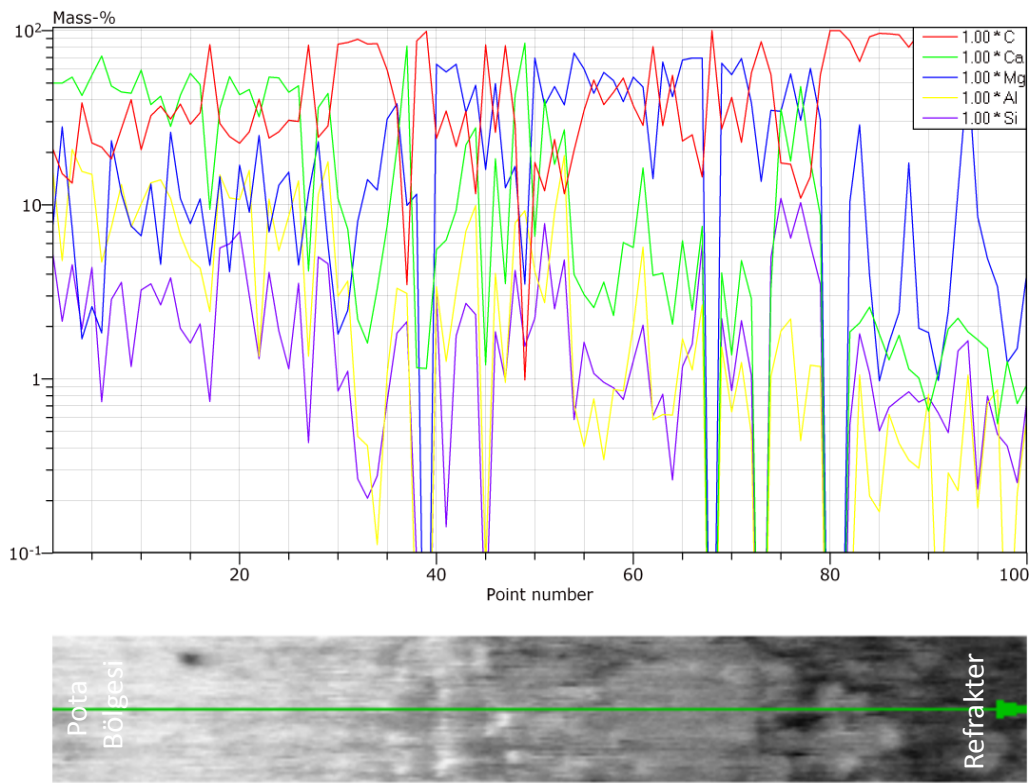
Şekil 5.40. 6 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.41. 6 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

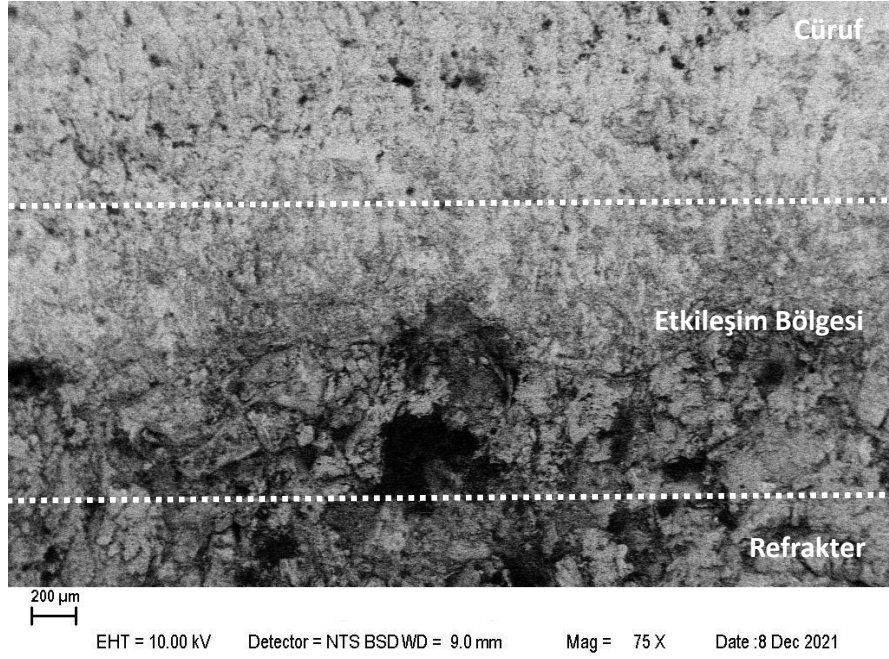


6 Numaralı numunenin pota bölgesinden refrakter bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.42.'de sunulmuştur. Pota bölgesinden refrakter bölgesine gidildikçe; kalsiyum (Ca) oranında düşüş, magnezyum (Mg) oranında artış, karbon (C) oranında artış ve Alüminyum (Al) oranında düşüş olduğu görülmüştür. Etkileşim bölgesinde difüzyon nedeniyle C miktarındaki azalış ile birlikte sıvı cürufun refrakter içerisine penetre olduğu tespit edilmiştir. Kroze duvarında meydana gelen etkileşim bölgesinden alınan SEM görüntüleri, çizgisel EDS analizinden elde edilen bu sonuçları destekler niteliktedir.

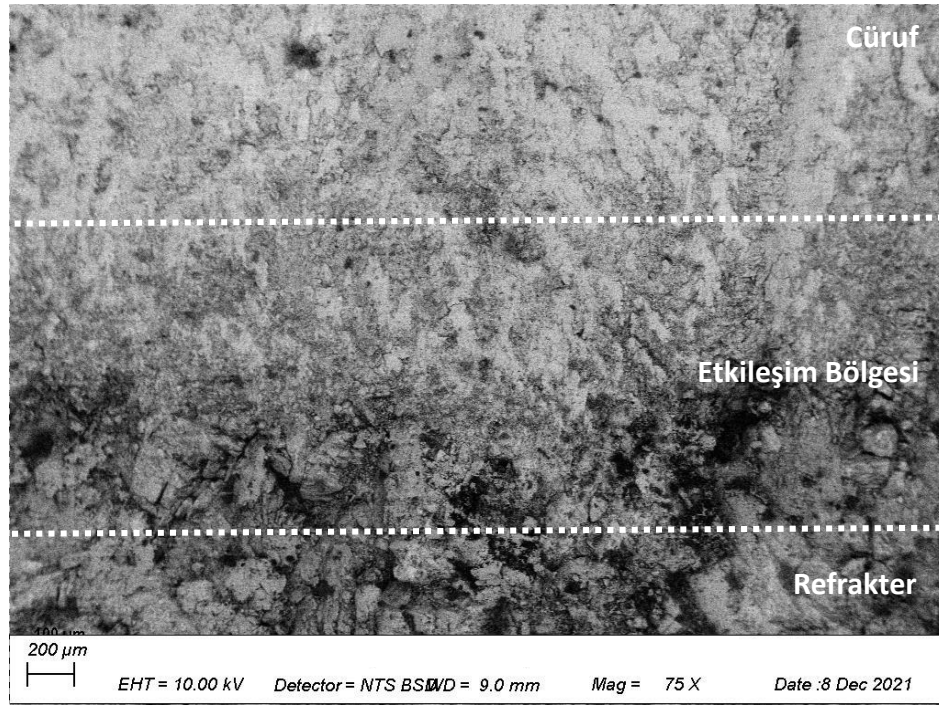


Şekil 5.42. 6 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi

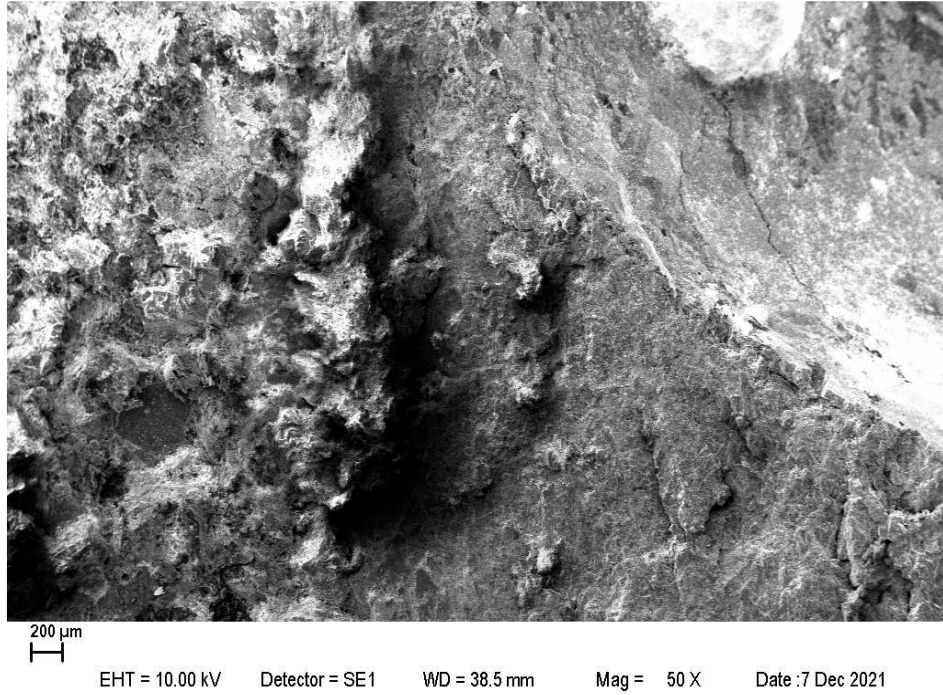
7 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.43., Şekil 5.44., Şekil 5.45., Şekil 5.45.'te gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, potanın taban bölgesinde kontrast farklılığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, cüruf – refrakter etkileşiminin gerçekleştiği değerlendirilmiştir.



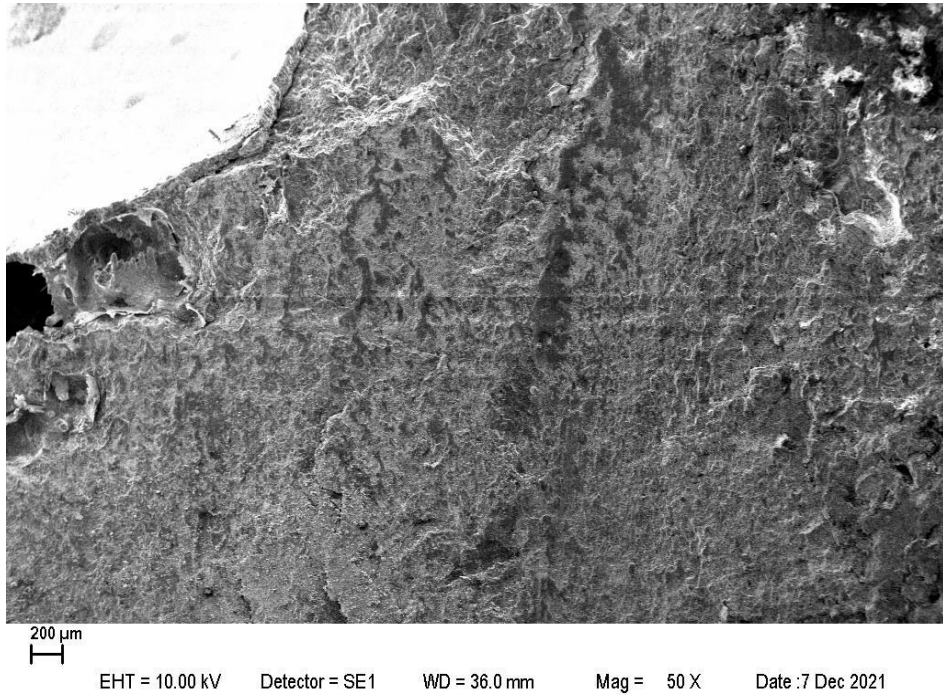
Şekil 5.43. 7 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.44. 7 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



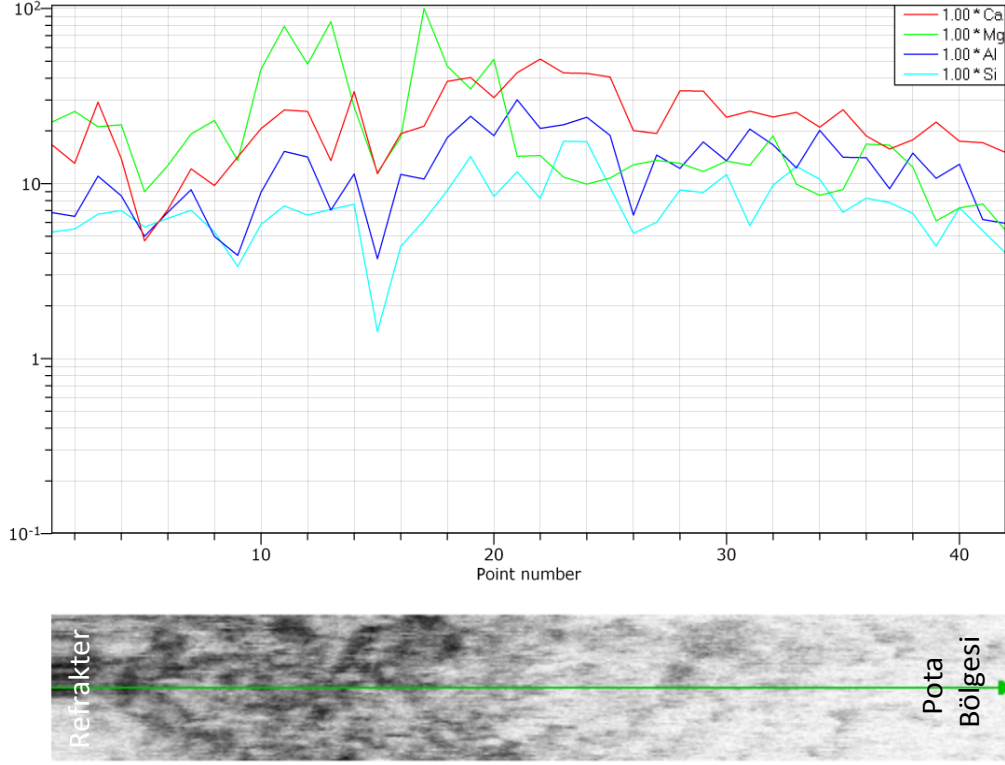
Şekil 5.45. 7 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE



Şekil 5.46. 7 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- SE

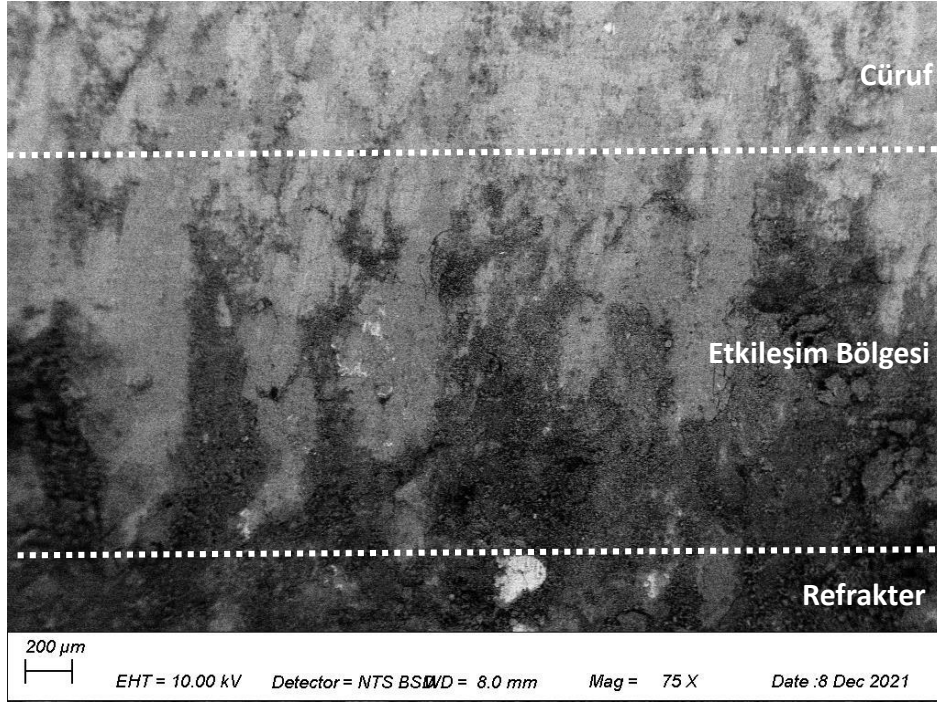
7 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.47.'de sunulmuştur. Refrakterden, pota bölgesine gidildikçe

kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), alüminyum (Al) ve silisyum (Si) oranlarında değişim olduğu görülmüştür.

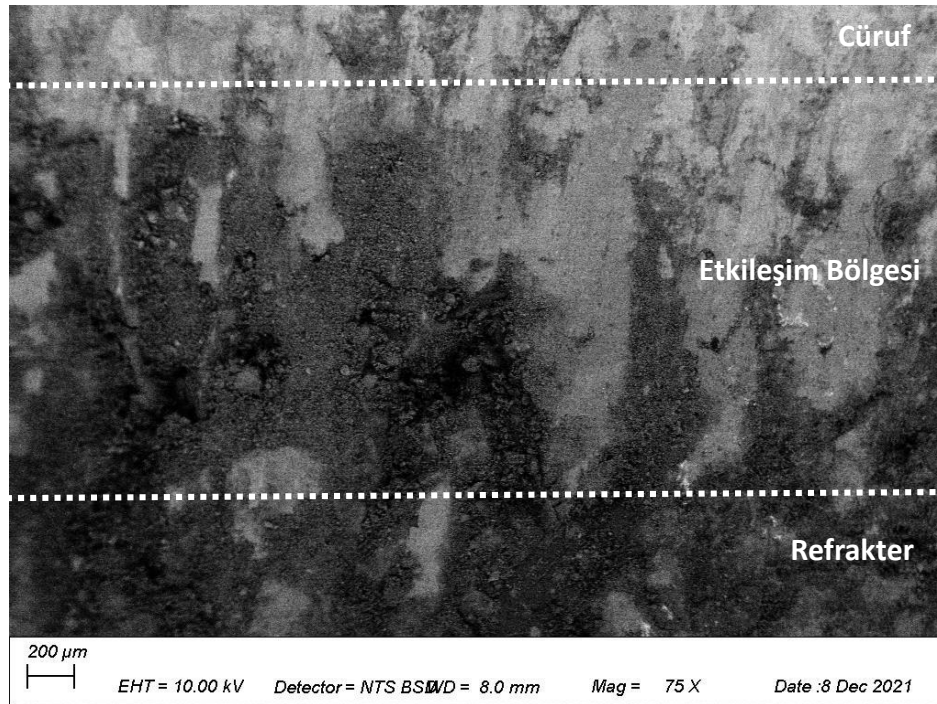


Şekil 5.47. 7 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi

8 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.48., Şekil 5.49., Şekil 5.50., Şekil 5.51.'de gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, potanın taban bölgesinde kontrast farklılığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, cüruf – refrakter etkileşiminin gerçekleştiği değerlendirilmiştir.

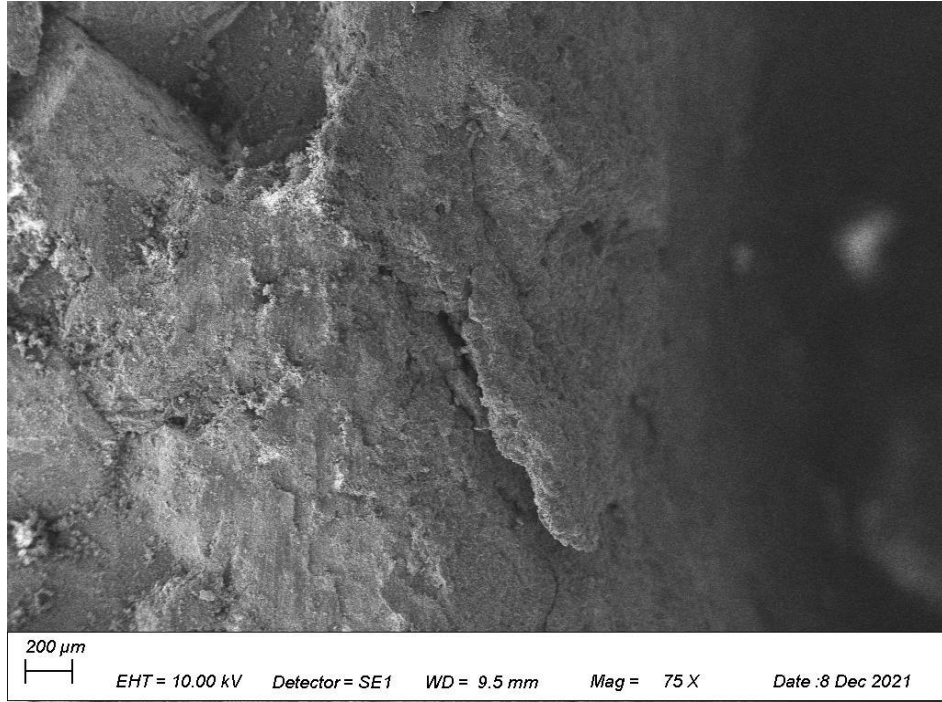


Şekil 5.48 . 8 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

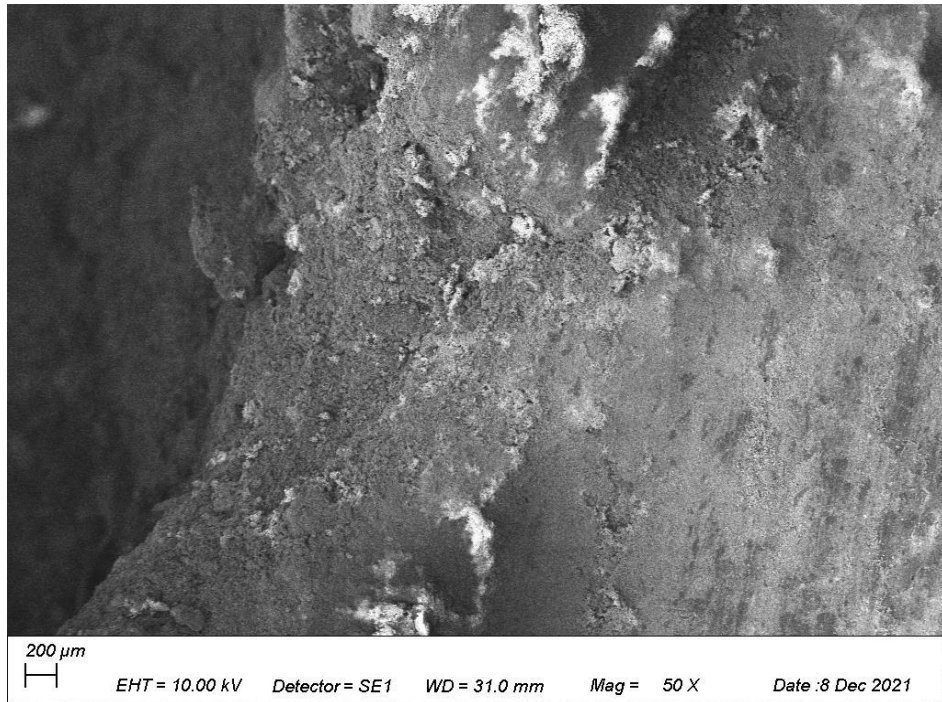


Şekil 5.49. 8 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD





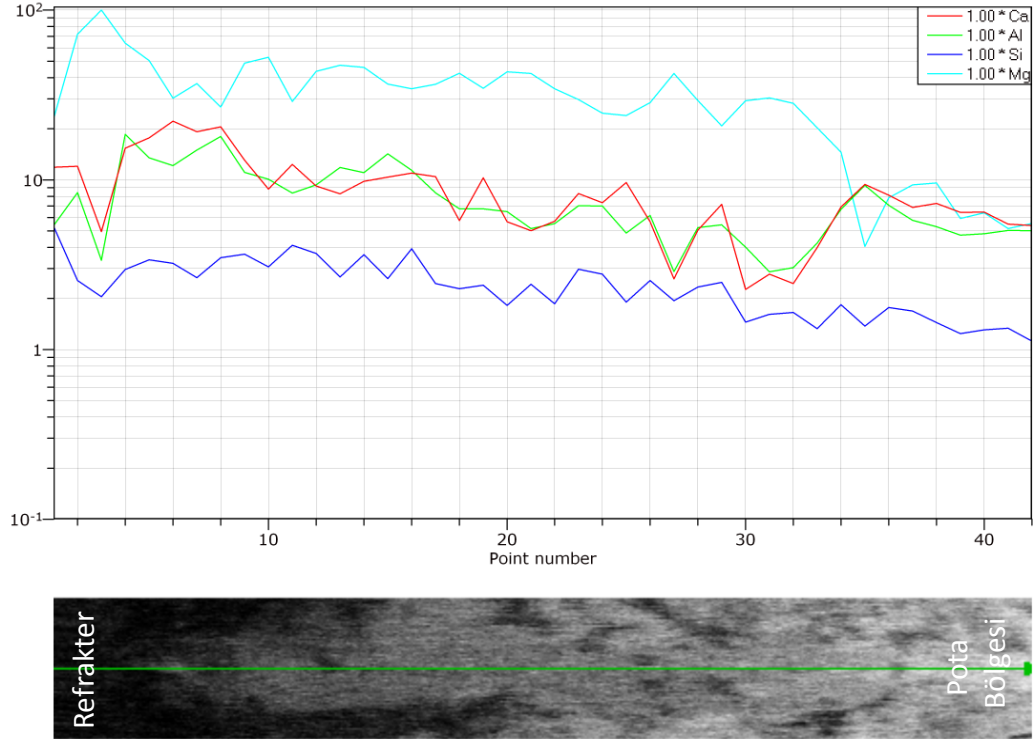
Şekil 5.50 . 8 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.51. 8 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

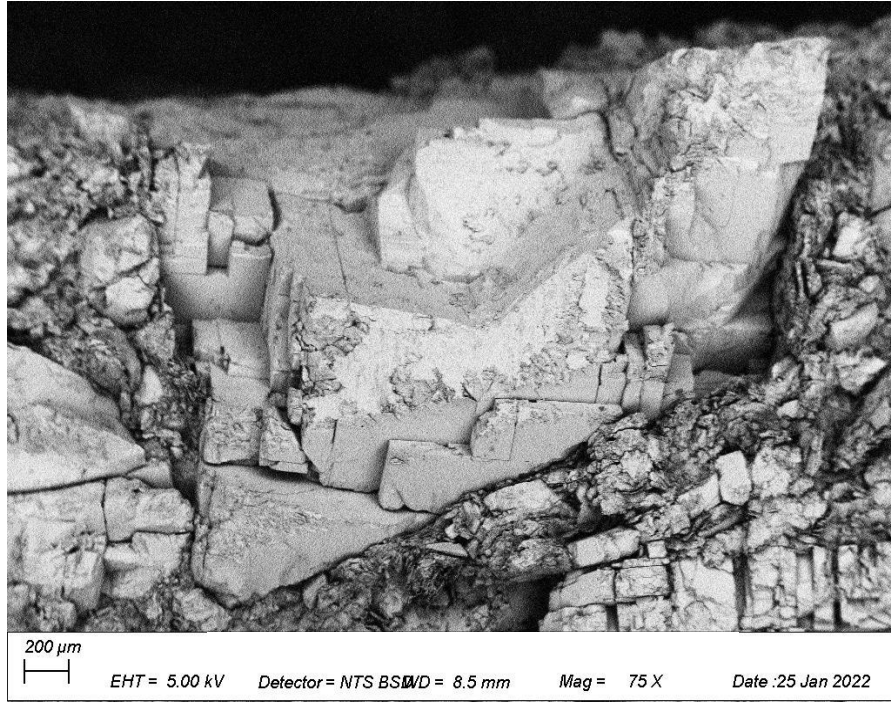
8 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.52.'de sunulmuştur. Refrakterden, pota bölgesine gidildikçe

kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), alüminyum (Al) ve silisyum (Si) oranlarında azalma olduğu görülmüştür. Mg oranındaki ciddi düşüş, refrakterden cürufa difüzyon olduğunu ve penetrasyon gerçekleştiğine işaret etmektedir. Mg iyonlarının difüzyonunun artışı ile birlikte reaktif ıslanmada artmış ve SEM görüntülerinden de görüleceği üzere mikro boyutta penetrasyon gerçekleşmiştir.



Şekil 5.52. 8 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi

9 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.53., Şekil 5.54., Şekil 5.55., Şekil 5.56.'da gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, penetrasyon belirten bir kontrast farklılığına rastlanmamıştır.

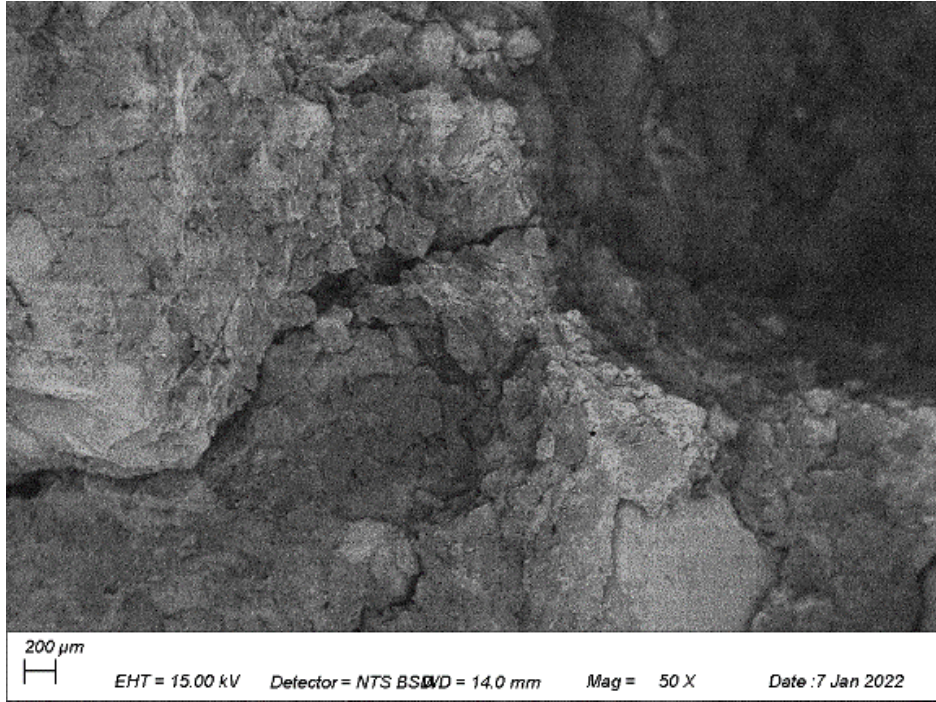


Şekil 5.53. 9 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

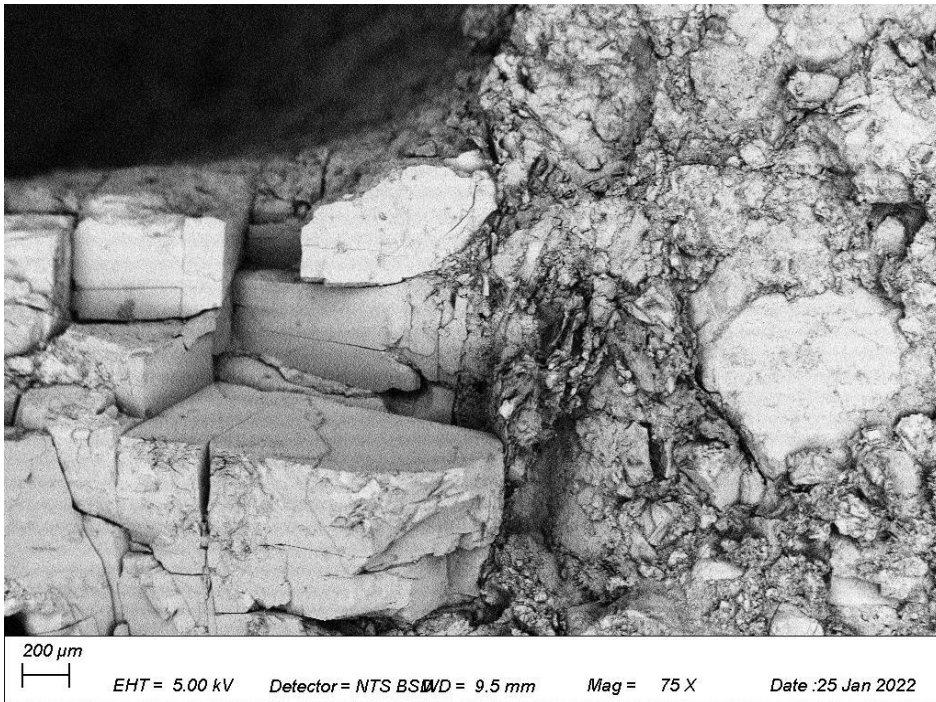


Şekil 5.54. 9 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü- SE





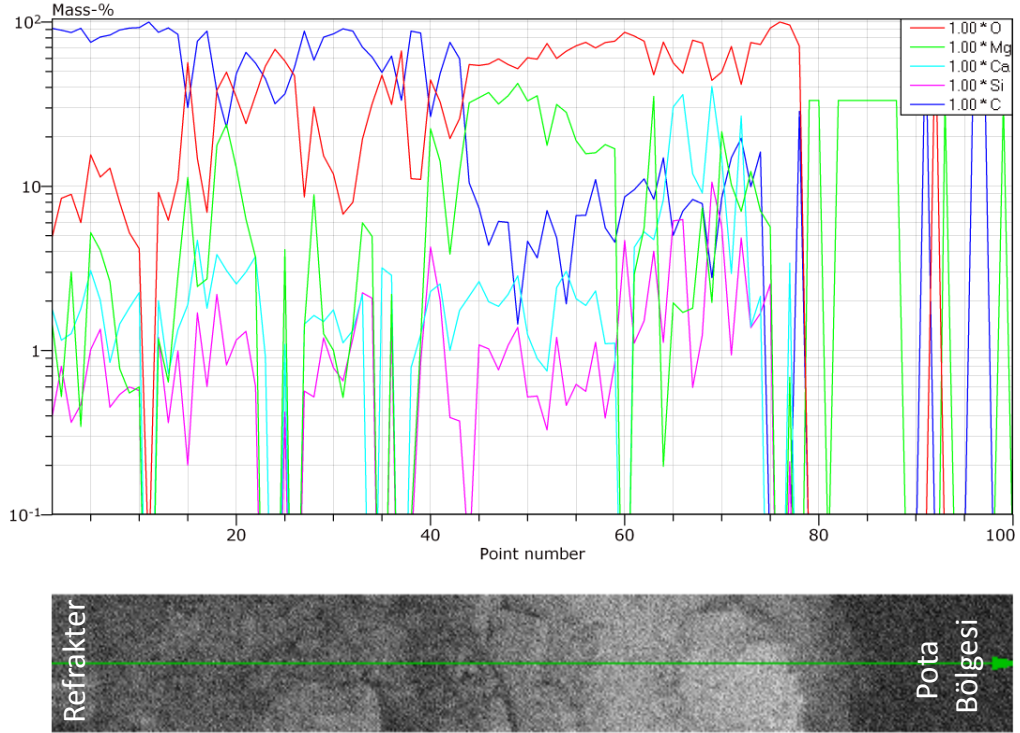
Şekil 5.55. 9 Numaralı Numune Pota Sol Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD



Şekil 5.56. 9 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü- BSD

9 Numaralı numunenin, refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen çizgisel EDS analizi Şekil 5.57.'da sunulmuştur. Refrakterden, pota bölgesine gidildikçe

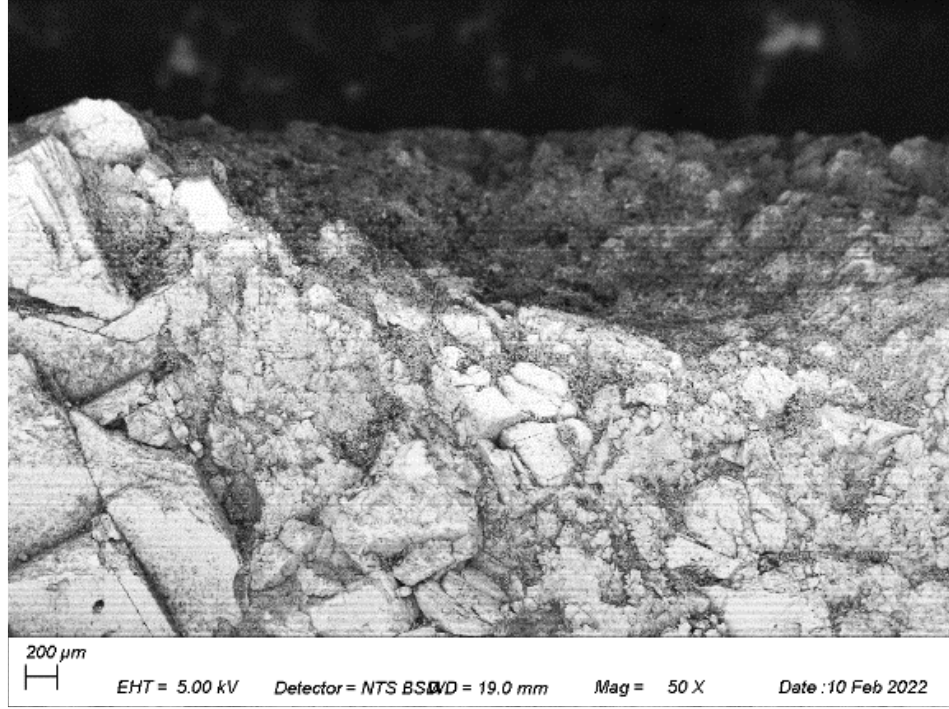
kalsiyum (Ca) miktarında artış, karbon (C) oranında düşüş meydana geldiği görülmüştür. Bu bilgiler ışığında refrakterden cürufa C difüzyonu, cüruftan refraktere ise Ca difüzyonu gerçekleştiği düşünülmektedir.



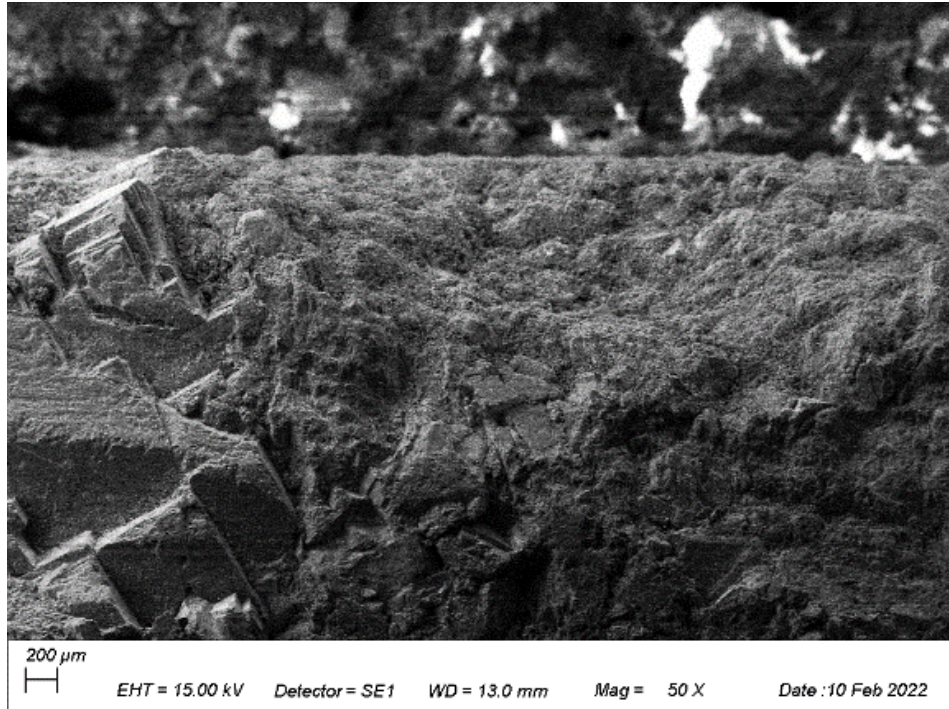
Şekil 5.57. 9 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi

10 Numaralı numunenin cüruf-penetrasyon testi sonrası, SE ve BSD dedektörleri ile çekilen SEM görüntüleri Şekil 5.58., Şekil 5.59., Şekil 5.60., Şekil 5.61.'de gösterilmiştir. BSD dedektörü ile çekilen görüntülerde, penetrasyon belirten bir kontrast farklılığına rastlanmamıştır.





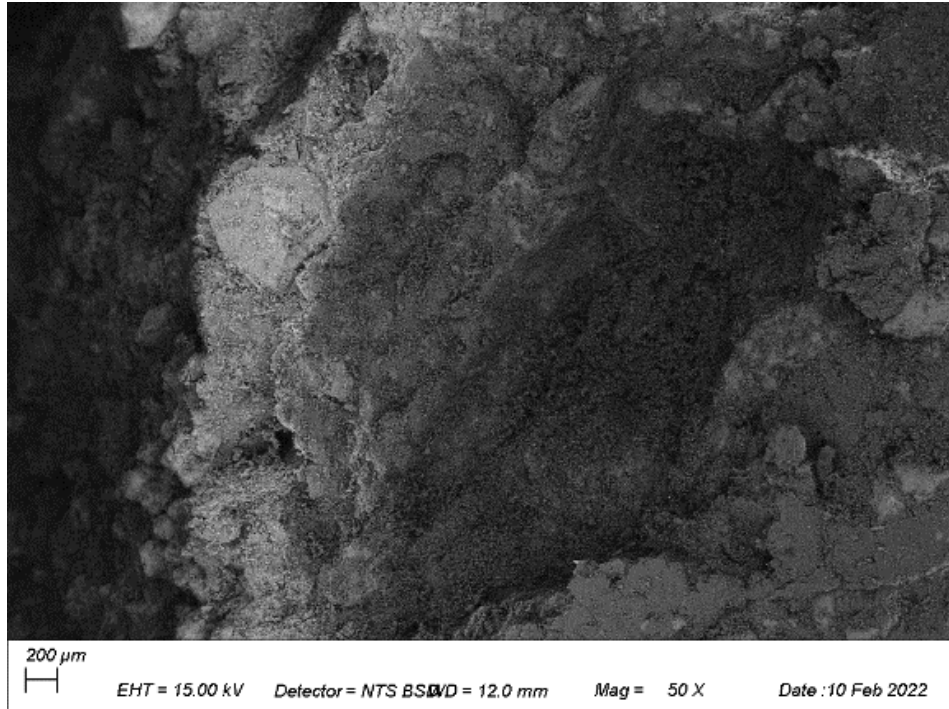
Şekil 5.58. 10 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD



Şekil 5.59. 10 Numaralı Numune Pota Taban Bölgesi SEM Görüntüsü -SE

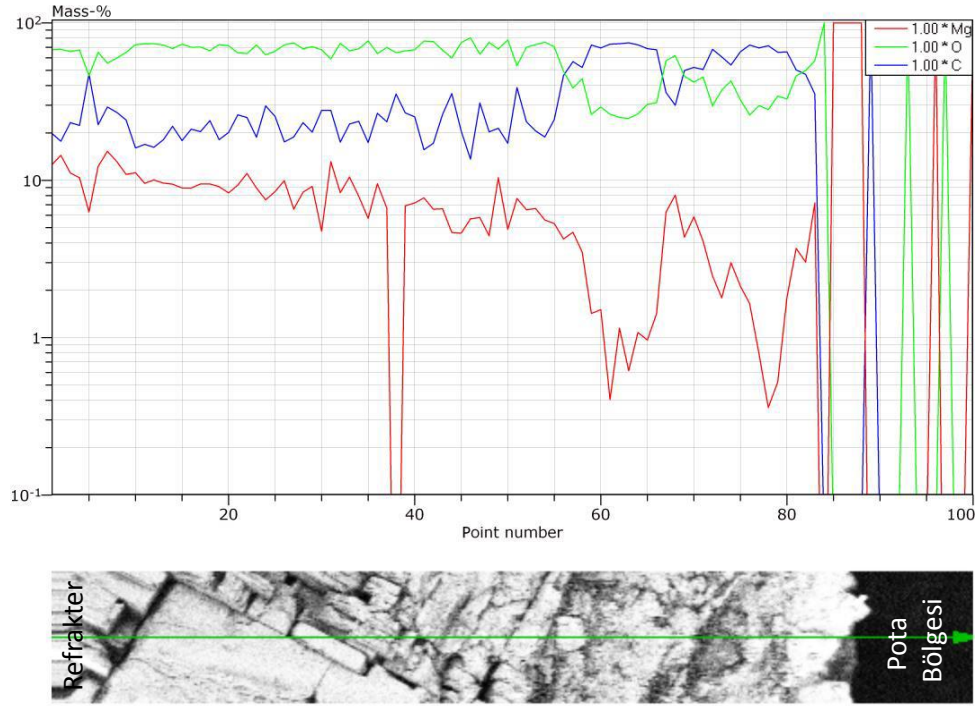


Şekil 5.60. 10 Numaralı Numune Pota Sağ Alt Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD



Şekil 5.61. 10 Numaralı Numune Pota Sağ Üst Bölgesi SEM Görüntüsü - BSD

10 Numaralı numunenin refrakterden cüruf bölgesine doğru gerçekleştirilen Çizgisel EDS analizi Şekil 5.62.'de sunulmuştur. Refrakterden, pota bölgesine gidildikçe, karbon miktarında düşüş olduğu görülmüştür.



Şekil 5.62. 10 Numaralı Numune, Refrakterden Pota Bölgesine Doğru Gerçekleştirilen Çizgisel EDS Analizi



## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Günümüzde çelik malzemelerin kullanımı, gelişen teknoloji ile bağdaşık olarak ilerlemekte ve kompleks nihai ürünler ortaya çıkartılmaktadır. Bu sebeple sektörde yarımamül imalatı yapan firmalardan, vasıflı çelik üretimi beklentisinde gün geçtikçe artmaktadır. Bu noktada, çelik üretim proseslerinde kullanılan sarf malzemelerinde temiz çeliğin elde edilmesinde önemli bir yer tuttuğuda gündeme gelmektedir. Bu doğrultuda, çelik üretim potalarında kullanılan refrakter malzemelerin, çelik üretim proseslerine dayanımları, çelik temizliğinin artırılması ve refrakter sarfiyatlarının düşürülmesi açısından önemle araştırılmaktadır. Bu çalışmada, çelik üretim potalarının cüruf bölgesinde kullanılan MgO-C refrakter tuğlaların farklı çelik üretim cüruflarına karşı dayanımları, gerçekleştirilen deneysel araştırmalardan çıkarılan bulgular doğrultusunda incelenmiştir.

Çalışmada kullanılan çelik üretim cüruflarına yapılan XRF analizi sonuçlarına göre, cürufların ağırlıklı olarak;  $Al_2O_3$ , CaO,  $SiO_2$ , MgO,  $Fe_2O_3$  ve FeO oksitlerini barındırdığı tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında hazırlanan numuneler, DIN 51069'a uygun pratikte 1600 °C'de 2 saat işleme tabi tutulmuş ve cüruf penetrasyon testi uygulanmıştır.

Bölüm 5.1'de ısıtım sonrası makro olarak gözle yapılan incelemelerde, siyah renkli krozelerin dış yüzeylerinde renk değişimi görülmüştür. İlaveten, fırınlanan krozelerin dış yüzeylerinde etkili renk değişimi görülürken, iç kısımlarında değişim görülmemiştir. Bu hadisenin, MgO-C refrakter krozelerin yapısındaki C elementinin ergitme işlemi sırasında atmosfere açık yüzeylerden difüze olarak yapıdan uzaklaşması kaynaklı gerçekleştiği düşünülmektedir.

Bölüm 4.7’de anlatılan cüruf penetrasyon alanının belirlenmesine yönelik yapılan deneysel çalışmanın sonucu, Bölüm 5.2’de SEM görüntüleri üzerinden görüntü işleme yöntemi kullanılarak irdelenmiştir. Bu incelemeler doğrultusunda 6,7 ve 8 numaralı numunelerde meydana gelen cüruf penetrasyonunun yayınma alanı hesaplanmıştır. Bu çerçevede, en yüksek cüruf yayınma alanının sırasıyla 8, 7 ve 6 numaralı numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, flaksoksit olarak bilenen Alümina ( $Al_2O_3$ ) miktarının diğerlerine göre daha yüksek olduğu bu numunelerde, cüruf – refrakter etkileşim bölgesinde penetrasyon etkinliğinin arttığı düşünülmektedir.

SEM ve EDS analizleri ile cüruf – refrakter etkileşim bölgesi, cüruf ve refrakter kompozisyonu incelenmiştir. EDS nokta analizlerinden, refrakterin MgO ve C esaslı olduğu, kullanılan cürufların ise Mg, Si, Al, Ca elementlerini içerdiği belirlenmiştir. Cüruf penetrasyonunun etkin bir şekilde gerçekleştiği 6,7 ve 8 numaralı numuneler haricinde cürufun refrakter malzemeye nüfuz edemediği görülmüştür. Korozyonun gerçekleştiği bölgelerde, cüruftan refraktere Ca difüzyonu, refrakterden cürufa ise Mg ve C difüzyonlarının olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, SEM görüntülerinde etkin bir korozyonun görülmediği numunelerde dahi etkileşimin gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- [1] Şişli, İ., Sürekli döküm tandişlerindeki cüruf ile refrakter etkileşimleri, karabük üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [2] İnel, İ., Teknoloji ve Refrakter Hammaddeler, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, 1997.
- [3] Lee, W. E., Moore, E. R., evolution of in situ refractories in the 20th century, Journal of the American Ceramic Society, 81, 1385-410, 1998.
- [4] Reed, J., Principles of Ceramic Processing, Wiley, Newyork, 1995.
- [5] Poirier, J., Blond, E. de Bilbao, E., Michel, R., Coulon, A., Gillibert, J., Boussuge, M., Zhang, Y., Ryckelynk, D., Dussere, G., Cutard, T., Leplay, P., New advances in the laboratory characterization of refractories: testing and modelling, Metallurgical Research & Technology, 6, 114, 610, 2017.
- [6] Kılıç, Ö., Yarbil, S., refrakter tuğlaların teknolojik özelliklerinin incelenmesi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Adana, 2, 31, 117, 2016.
- [7] Schacht, A. C., Refractories Handbook, Marcel Dekker, Amerika,2004.
- [8] Kardemir AŞ. Dokümanları
- [9] Okosun, T., Silaen, A. K., Zhou, C. Q., review on computational modeling and visualization of the ironmaking blast furnace at purdue university northwest, Steel Research International, Almanya,1900046, 2019.
- [10] Wang, Z., Liu, Q., Liu, H., Wei, S., Temperature Materials and Processes, 39, 653–662, 2020.
- [11] Silva, V. L. F. da., Leitão, L. da S., Santos, E. de A., Silva, A. C. S., Costa e Silva, A. L. V., evaluating slag–metal deoxidation equilibrium in secondary steelmaking, Journal of Materials Research and Technology, Brezilya, 420, 27255, 125, 2019.
- [12] Sahai, Y., tundish technology for casting clean steel: a review, Metallurgical and Materials Transactions B, 47, 2095–2106, 2016.



- [13] Fruehan, R. J., *The Making, Shaping and Treating of Steel* Steelmaking and Refining, 11. Basım, The AISE Steel Foundation, Amerika, 1998.
- [14] Ma, W., Li, H., Cui, Y., Chen, B., Liu, G., Ji, J., optimization of desulphurization process using lance injection in molten iron, *ISIJ International*, Çin, 57, 214–219, 2017.
- [15] Mahamure, N., *Review Of Ladle Furnace*, 7 th ICEECSME, Hindistan, 2013.
- [16] Biswas, S., Sarkar, D., *refractories for iron and steel plant. İçinde: Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking*. 1. Basım, Springer International Publishing, İsviçre, 2020.
- [17] <https://turkish.kilnrefractorybricks.com/sale-11333936-mgo-c-magnesite-carbon-brick-high-temperature-refractory-fire-bricks-anti-oxidant.html>, Erişim Tarihi: 15.04.2022.
- [18] <http://tr.jucosfirebrick.com/shape-refractory/special-refractory-brick/al2o3-sic-c-brick.html>, Erişim Tarihi: 10.04.2022.
- [19] <http://www.atestugla.com.tr/refrakter-tugla-ve-blokler.html>, Erişim Tarihi: 20.03.2022.
- [20] Lenz. G., A statistical and post-mortem study of wear and performance of mgo-c resin bonded refractories used on the slag line ladle of a basic oxygen steelmaking plant, *Engineering Failure Analysis*, 78, 161-168, 2017.
- [21] Zou, Y., Huang, A., Wang, R., Lvping, F., Gu, H., Li, G., Slag corrosion-resistance mechanism of lightweight magnesia-based refractories under a static magnetic field, *Corrosion Science*, 167, 108517, 2020.
- [22] Genc, B., *Çelik Döküm Potalarında Çalışma Astarı Olarak Uygulanan Reçine Bağlı MgO-C Tuğlaların Aşınma Sebepleri*, İskenderun.
- [23] Sarkar, R., Sohn, H. Y., Interactions of alumina-based and magnesia-based refractories with iron melts and slags: a review, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 49, 1860–1882, 2018.
- [24] Song, S., Zhao, J., Pistorius, P. C., MgO refractory attack by transient non-saturated eaf slag, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2020.
- [25] Kasimagwa, I., Brabie, V., Jönsson, P. G., Slag corrosion of MgO–C refractories during secondary steel refining, ironmaking and steelmaking, 121-1, 2017.
- [26] Bengisu, M., *Seramik Bilimi ve Mühendisliği*, Nobel Yayın No:895 Teknik Yayınlar Dizisi, 69, 240-424, 2006.

- [27] Pretorius E., Fundamentals of eaf and ladle slags and ladle refining principles, Metallurgy Services, 2015.
- [28] Bilgiç, M., Cengiz, U., Sakarya, O., Ekin, B., İndüksiyon ocağı çelik cüruflarına farklı oranda MgO-C ilavesi ile nötr astarın aşınma davranışının incelenmesi, TMMOB Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası Eğitim Merkezi Bildiriler Kitabı, 2018.
- [29] Zevenhoven, R., Saxén, H., Jiang, M., Liu, C., Zheng, X., Zhao, Q., Corrosion behavior of MgO–C ladle refractory by molten slag, Steel Research International, 92, 2021.
- [30] Shen, X., Zhu, L., Lv, Z., Shi, T., Yin, Z., Min, X., Wu, X., Liu, Y., Fang, M., Huang, Z., The behavior of slag resistance of MgO-C refractory prepared by sucrose as binder, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.
- [31] Heo, S., Lee, K., Chung, Y., Reactive wetting phenomena of mgo–c refractories in contact with CaO–SiO<sub>2</sub> slag, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Çin, 22, 2012.
- [32] DIN 51069, Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe; Vergleichende Prüfung des Verhaltens feuerfester Steine gegen den Angriff fester und flüssiger Stoffe bei hoher Temperatur, Blatt 2 (Vornorm): Tiegelverfahren (TV), Normen des Deutschen Normenausschusses für keramische Roh- und Werkstoffe, Deutsches Institut für Normung, 1973.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı Soyadı** : Berkay YILMAZ

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Sakarya Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam ediyor
Kurs	Orta Doğu Teknik Üniversitesi / Kaynak Teknolojileri Merkezi / Kaynak Mühendisliği	2018
Lisans	Sakarya Üniversitesi / Mühendislik Fakültesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2018
Lise	Zonguldak Atatürk Anadolu Lisesi	2009

### İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2019-2022	Kardemir Karabük Demir Çelik San. ve Tic. A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi
2022-Halen	Kardemir Karabük Demir Çelik San. ve Tic. A.Ş.	1 ve 4 No.lu SDM İşletme Mühendisi

### YABANCI DİL

İngilizce