

**HAFİF REFRAKTER İZOLASYON TUĞLALARININ GELİŞTİRİLMESİ VE  
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Serkan DAL**

**Bartın Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**Şubat 2014**

**BARTIN**

**KABUL:**

Serkan DAL tarafından hazırlanan “HAFİF REFRAKTER İZOLASYON TUĞLALARININ GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 10/02/2014

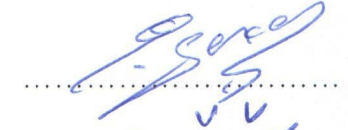
Başkan: Doç.Dr. Mustafa Sabri GÖK (BÜ)



Üye: Yrd.Doç.Dr. Mücahit SÜTÇÜ (İKÇÜ)



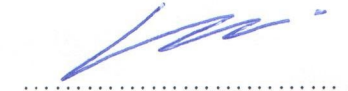
Üye: Doç.Dr. Osman GENÇEL (BÜ)



Üye: Yrd.Doç.Dr. Yılmaz KÜÇÜK (BÜ)

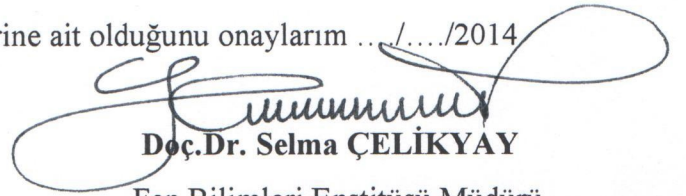


Üye: Yrd.Doç.Dr. A.Cahit KARAOĞLANLI (BÜ)



**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım .../.../2014



**Doç.Dr. Selma ÇELİKAY**  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Serkan DAL

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **HAFİF REFRAKTER İZOLASYON TUĞLALARININ GELİŞTİRİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Serkan DAL**

**Bartın Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanları:**

**Doç.Dr. Mustafa Sabri GÖK**

**Yrd.Doç.Dr. Mücahit SÜTÇÜ**

**Şubat 2014, 98 sayfa**

Günümüzde, ülkemizde ve dünyada, enerjinin geri kazanımı, korunması ve etkin kullanımı büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle elde edilen enerjinin korunumu için genellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan hafif izolasyon refrakterlerinin önemi özellikle artmaktadır. Hafif refrakter izolasyon tuğlaları düşük (<1200 °C) ve yüksek (>1200 °C) servis sıcaklıklarında çalışmalarına göre iki grupta sınıflandırılabilir. Bu çalışmada genellikle 1200°C'den düşük sıcaklıklarda ısı izolasyonu için kullanılacak refrakter kili, diatomit ve vermikülit esaslı hafif refrakter kompozisyonları çalışılmıştır. Kullanılan hammaddelerden vermikülit yerel bir hammadde kaynağı olup bu çalışmada hafif refrakter kompozisyonlarında denenmiştir. Ülkemizde yerel vermikülitin hammadde olarak kullanımı henüz yaygın değildir, ancak ülkemize katkı sağlayacak refrakter endüstrisi için

## **ÖZET (devam ediyor)**

kullanılabilir. Bunun yanısıra hafif ve mikro-gözenekli izolasyon refrakterleri diatomit kullanılarak üretilmiştir.

Bu çalışma, refrakter killeri, diatomit ve genişletilmiş vermikülden toz biçimindeki hammaddeler kullanılarak hazırlanan farklı oranlarda karışımlarını kapsar. Hammaddeler kimyasal (x-ray flüoresans, XRF), ısıl (termal gravimetrik analiz, TGA), morfolojik (taramalı elektron mikroskobu, SEM) ve faz (x-ışını kırınımı, XRD) analizleri ile karakterize edilmiştir. Hazırlanan karışımlar yarı-kuru presleme yöntemiyle şekillendirilerek 900-1100°C aralığında laboratuvar fırınında sinterlenmiştir. Üretilen numunelerin, fiziksel (yoğunluk, gözenek oranı, boyutsal değişimi), mekanik (basma dayanımı), termal (ısı iletkenlik) ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Vermikülit, diatomit, refrakter izolasyon tuğlası, ısı izolasyon.

**Bilim Kodu:** 604.01.03

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT REFRACTORY INSULATING BRICKS AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES**

**Serkan DAL**

**Bartın University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgical and Materials Engineering**

**Thesis Advisors:**

**Assoc. Prof. Mustafa Sabri GÖK**

**Asst. Prof. Mücahit SÜTÇÜ**

**February 2014, 98 pages**

Today, in the world and our country, energy recovery, conservation and its efficient use is of great importance. Therefore, for the conservation of energy, the importance of lightweight insulation refractories used at applications of high temperature has also increased. Lightweight refractory isolation bricks can be classified in two groups according to their applications at low (<1200 °C) and high (>1200 °C) service temperature. In this application, lightweight refractory compositions including refractory clay, diatomite and vermiculite that can be used at temperatures less than 1200 °C for heat isolation were studied. Vermiculite is a local raw material source and experimented in lightweight refractory compositions. In our country, local vermiculite is not yet widely used as a raw material, and but, it could be used for refractory industry that will contribute to our country. In addition, the lightweight and micro-porous insulation refractories were produced using diatomaceous earth.

## **ABSTRACT (continued)**

This study covers the mixtures of different proportions from refractory clays, diatomaceous earth and expanded vermiculite in powder form prepared using raw materials. Raw materials were characterized by the analysis of chemical (x-ray fluorescence, XRF), thermal (thermal gravimetric analysis, TGA), morphological (scanning electron microscopy, SEM) and phase (x-ray diffraction, XRD). The prepared mixtures were shaped by the method of semi-dry pressing, and then the samples were produced by sintering at the temperatures between 900°C and 1100°C in a laboratory furnace. The physical (density, porosity, dimensional change), mechanical (compression strength), thermal (thermal conductivity), and microstructural properties of the samples were investigated.

**Key words:** Vermiculite, diatomaceous earth, refractory insulating brick, heat insulation.

**Science Code:** 604.01.03

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada benden yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen baőta danıőman hocam Doç.Dr.M.Sabri GÖK'e ve eő danıőmanım Yrd.Doç.Dr.Mücahit Sütçü'ye, laboratuvar imkanlarını kullanmamıza müsade eden Doç.Dr.Osman GENCEL'e, kullanılan hammaddelerin temininde yardımcı olan Selahattin KALAYCI (SELKO A.Ő., BARTIN) beye, imkanlarını ve desteklerini esirgemeyen BARTIN ÇİMENTO A.Ő. ve çalıőanlarına, çalıőmalarımnda emeği bulunan baőta kardeőim Serdar DAL'a, kuzenim İzzet AKMEŐE'ye ve Sezgin FİDAN'a ve son olarak maddi ve manevi destekleriyle her zaman arkamda duran annem Fatma DAL ve babam Muharrem DAL'a teőekkürü bir borç bilirim.

Bu tez alıőması BAP-2012-2-64 numaralı Bartın Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeler Birimi (BAP) tarafından desteklenmiőtir. Tez çalıőmasının gerçekleőmesinde maddi destek sağlayan Bartın Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeler Birimi'ne teőekkürlerimi sunarım.

Serkan DAL



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER .....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xii
TABLolar DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ VE AMAÇ .....	1
1.1 GİRİŞ .....	1
1.2 AMAÇ .....	2
BÖLÜM 2 LİTERATÜR .....	3
2.1 SERAMİK MALZEMELER VE SINIFLANDIRILMASI .....	6
2.1.1 Geleneksel Seramikler .....	7
2.1.2 İleri Teknoloji Seramikleri .....	8
2.2 REFRAKTER MALZEMELER VE SINIFLANDIRILMASI .....	8
2.2.1 Fiziksel Yapılarına Göre Refrakterler .....	12
2.2.2 Kimyasal Karakterlerine Göre Refrakterler .....	12
2.3 TERMAL İZOLASYON SERAMİKLERİ .....	18
2.3.1 Yoğun refrakterler .....	18
2.3.2 Hafif Refrakterler .....	19
2.4 HAFİF REFRAKTER HAMMADDELERİ .....	20
2.4.1 Diatomit (Kieselgur) .....	20
2.4.2 Genleştirilmiş Vermikülit .....	24

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.4.3 Perlit .....	28
2.4.4 Kaolin .....	29
2.4.5 Kuvarsit .....	29
2.5 GÖZENEK YAPICI KATKILAR .....	30
2.6 KİLLERDE PİŞİRME SIRASINDA MEYDANA GELEN REAKSİYONLAR .....	30
2.6.1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> Sistemi .....	30
2.7 GÖZENEKLİ YAPILARDA ISI TRANSFERİ .....	33
2.8 ISIL İLETKENLİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ .....	34
2.8.1 Sıcak Tel Yöntemi .....	35
2.8.2 Korumalı Sıcak Parça Yöntemi .....	35
2.8.3 Kalorimetre Yöntemi .....	36
2.9 İZOLASYON TUĞLALARININ TERMAL İLETKENLİĞİNE POROZİTE ETKİSİ .....	36
2.10 TUĞLALARIN MEKANİK DAYANIMI ÜZERİNE POROZİTENİN ETKİSİ .....	37
<b>BÖLÜM 3 MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>39</b>
3.1 KULLANILAN HAMMADDELER .....	39
3.2 YÖNTEM .....	40
3.2.1 Karışımların Hazırlanması .....	40
3.2.2 Numunelerin Şekillendirmesi ve Pişirilmesi .....	43
3.3 HAMMADDELERİN ANALİZİ .....	45
3.3.1 Tozların Tane Boyut Dağılımı ve Fiziksel Özellikleri .....	45
3.3.2 Kimyasal Kompozisyon .....	45
3.3.3 Mineralojik Faz Analizi .....	45
3.3.4 Termo-gravimetrik Analiz .....	46
3.4 ÜRETİLEN NUMUNELERİN ANALİZİ .....	46
3.4.1 Fiziksel Analizler (Bulk yoğunluk, görünür gözenek, kızdırma kaybı) .....	46
3.4.2 Isı İletim Katsayısı Ölçümü .....	47
3.4.3 Mekanik Dayanım Testleri (Basma Mukavemeti) .....	47
3.4.4 Mikroyapısal Analiz (SEM) .....	48

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	49
4.1 HAMMADDELERİN ANALİZİ.....	49
4.1.1 Hammaddelerin Tane Boyut Dağılımı (Elek Analizi) ve Fiziksel Özellikler ....	49
4.1.2 Hammaddelerin Mikroyapısal Morfolojisi (SEM, EDS) .....	51
4.1.3 Hammaddelerin Kimyasal Kompozisyonu (XRF).....	55
4.1.4 Hammaddelerin Mineralojik Faz Analizi (XRD) .....	55
4.1.5 Hammaddelerin Isıl Analizi (TGA) .....	60
4.2 ÜRETİLEN NUMUNELERİN ANALİZİ .....	62
4.2.1 Numunelerin Fiziksel Analizi (Bulk yoğunluk, gözenek vd.) .....	63
4.2.1.1 Refrakter Kili-Bağlayıcı Refrakter Kili (SC) Karışımlarından Üretilen numuneler .....	63
4.2.1.2 Vermikülit-Bağlayıcı Refrakter Kili (VC) Karışımlarından Üretilen Numuneler .....	64
4.2.1.3 Diatomit-Bağlayıcı Refrakter Kili (DC) Karışımlarından Üretilen Numuneler .....	66
4.2.1.4 Refrakter Kili-Vermikülit-Bağlayıcı Refrakter Kili (SCV) Karışımlarından Üretilen Numuneler .....	67
4.2.1.5 Refrakter Kili-Diatomit-Bağlayıcı Refrakter Kili (SCD) Karışımlarından Üretilen Numuneler .....	69
4.2.1.6 Vermikülit-Diatomit-Bağlayıcı Refrakter Kili (VCD) Karışımlarından Üretilen Numuneler .....	70
4.2.2 Numunelerin Isı İletim Katsayılarının Analizi .....	72
4.2.2.1 İkili Karışımlardan ( <i>sc</i> , <i>vc</i> , <i>dc</i> ) Üretilen Numunelerin Isı İletim Katsayıları .....	72
4.2.2.2 Üçlü Karışımlardan ( <i>scv</i> , <i>vcd</i> , <i>scd</i> ) Üretilen Numunelerin Isı İletim Katsayıları .....	74
4.2.3 Numunelerin Basma Dayanımı .....	76
4.2.3.1 İkili Karışımlardan ( <i>sc</i> , <i>vc</i> , <i>dc</i> ) Üretilen Numunelerin Basma Dayanımları	76

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.2.3.2 Üçlü Karışımlardan (scv, vcd, scd) Üretilen Numunelerin Basma Dayanımları .....	78
4.2.4 Numunelerin Mikroyapısal Analizi (SEM, EDS) .....	80
<b>BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>89</b>
5.1 SONUÇLAR.....	89
5.2 ÖNERİLER .....	91
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>92</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>98</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Diatomit mineralinin genel SEM görüntüsü.....	22
2.2 Türkiye'deki diatomit yatakları .....	24
2.3 Genleştirilmiş vermikülit genel görünüm.....	25
2.4 Genleştirilmiş perlit.....	28
2.5 Kaolin .....	29
2.6 Kuvarsit genel görünüm .....	30
2.7 SiO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ikili sistemi diyagramı .....	32
3.1 Kullanılan hammaddeler .....	39
3.2 0-150 µm boyutuna elenmiş refrakter kili.....	41
3.3 İzole refrakter üretimi için deneysel akış şeması.....	43
3.4 Porselen havan(a) ve 25mm çapında metal pelet kalıbı(b) .....	43
3.5 Numuneleri şekillendirmek için kullanılan 15 ton kapasiteli hidrolik pres(a) ve şekillendirilmiş numuneler(b) .....	44
3.6 Kalıptan çıkarılan numuneler. Sinterleme öncesi(a) ve sonrası(b).....	44
3.7 Numuneleri sinterlemek için kullanılan 1200°C'lik yüksek sıcaklık fırını .....	45
3.8 Isıl iletkenlik ölçüm sensörü ve cihazı .....	47
3.9 a) Bartın Çimento(Sanko Holding)'da bulunan mekanik test cihazı, b) basma testi uygulanmış numune.....	48
3.10 AKU-TUAM'da bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) .....	48
4.1 Bağlayıcı refrakter kil hammaddesinin tane boyut dağılımı .....	49
4.2 Refrakter kil hammaddesinin tane boyut dağılımı.....	50
4.3 Öğütülmüş vermikülit hammaddesinin tane boyut analizi.....	50
4.4 Diatomit hammaddesinin tane boyut analizi .....	50
4.5 Refrakter kil hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.6 Bağlayıcı refrakter kil hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.....	52
4.7 Genleştirilmiş vermikülit hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü .....	52
4.8 Genleştirilmiş vermikülitin öğütülmüş halinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.....	53
4.9 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.....	53
4.10 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüksek büyütmede çekilmiş görüntüsü .....	54
4.11 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin EDS (elektron X-ışını dispersif spektroskopi) analizi .....	54
4.12 Genleştirilmiş vermikülitin (EV) ve öğütülmüş halinin (milled EV) XRD analizi (V: vermikülit; H: hidrobiyotit; P: filogopit).....	56
4.13 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin XRD analizi .....	57
4.14. Refrakter kil hammaddesinin XRD analizi .....	58
4.15 Bağlayıcı refrakter kili hammaddesinin XRD analizi .....	59
4.16 Refrakter kili hammaddesinin TGA analizi.....	60
4.17 Bağlayıcı refrakter kili hammaddesinin TGA analizi .....	61
4.18 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin TGA analizi.....	61
4.19 Genleştirilmiş vermikülit hammaddesinin TGA analizi .....	62
4.20 Refrakter kili ve bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin refrakter kil oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi .....	64
4.21 Vermikülit ve bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin vermikülit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk(a) ve gözenek(b) oranlarının değişimi .....	65
4.22 Diatomit ve bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin diatomit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.....	67

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.23 Refrakter kili, vermikulit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin vermikulit ve refrakter kili oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.....	68
4.24 Refrakter kili, diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin diatomit ve refrakter kili oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.....	70
4.25 Vermikulit, diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin diatomit ve vermikulit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi .....	72
4.26 İkili karışımların( <i>sc</i> , <i>vc</i> , <i>dc</i> ) oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları .....	73
4.27 Üçlü karışımlardan ( <i>scv</i> , <i>scd</i> , <i>vcd</i> ) farklı sıcaklıklarda üretilen numunelerin oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları .....	75
4.28 İkili karışımlardan ( <i>dc</i> , <i>vc</i> , <i>sc</i> ) üretilen numunelerin basma dayanımları .....	77
4.29 Üçlü karışımlardan ( <i>scv</i> , <i>scd</i> , <i>vcd</i> ) üretilen numunelerin ölçülen basma dayanımları	79
4.30 Vermikulit ve bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona sahip numunelerin SEM görüntüleri.....	80
4.31 Diatomit ve bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona sahip numunelerin SEM görüntüleri.....	81
4.32 Refrakter kili/vermikulit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen iki farklı kompozisyon ve sıcaklıkta pişirilmiş numunelerin SEM görüntüleri .....	83
4.33 Refrakter kili/diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen iki farklı sıcaklıkta pişirilmiş numunelerin SEM görüntüleri .....	84
4.34 Diatomit/vermikulit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona sahip numunelerin SEM görüntüleri .....	85
4.35 Pişmiş numunelerin EDS analizi alınan bölgeler.....	87

## TABLULAR DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Çeşitli amaçlar için kullanılan seramik malzemeler .....	7
2.2 1999-2005 yılları arasındaki refrakter üretim, tüketim ithalat ve ihracat miktarları ....	9
2.3 Yurtiçi toplam refrakter tüketiminin sektörel dağılımı .....	10
2.4 Demir-çelik sektörü toplam refrakter üretimi.....	11
2.5 Farklı bölgelere ait diatomitlerin kimyasal analizleri .....	24
2.6 Killerin pişirilmesi sırasında meydana gelen reaksiyonlar.....	31
3.1 Genleştirilmiş vermikulitin özellikleri .....	40
3.2 Deneysel numuneler için hazırlanan karışımların kompozisyonu.....	42
4.1 Hammaddelerin fiziksel özellikleri.....	49
4.2 Kullanılan hammaddelerin kimyasal kompozisyonu (XRF analizi, ağı.%).....	55
4.3 Refrakter kili-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.....	63
4.4 Vermikulit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.....	65
4.5 Diatomit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.....	66
4.6 Refrakter kili-Vermikülit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri .....	68
4.7 Refrakter kili-Diatomit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri .....	69
4.8 Vermikulit-Diatomit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.....	71
4.9 Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş ikili karışımlardan( <i>sc</i> , <i>vc</i> , <i>dc</i> ) üretilen numunelerin oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları. ....	73
4.10 Üçlü karışımlardan ( <i>scv</i> , <i>scd</i> , <i>vcd</i> ) farklı sıcaklıklarda üretilen numunelerin oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları.....	74
4.11 İkili karışımlardan ( <i>sc</i> , <i>vc</i> , <i>dc</i> ) üretilen numunelerin basma dayanımları .....	76



## TABLÖLAR DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.12 Üçlü karışımlardan ( <i>scv</i> , <i>vcd</i> , <i>scd</i> ) üretilen numunelerin ölçülen basma dayanımları	78
4.13 Pişmiş numunelerin EDS analizi (ağ.%) .....	86

## **SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

A	: Kesit alanı
cm <sup>3</sup>	: Santimetreküp
C <sub>v</sub>	: Isıl Sığa
g	: Gram
k	: Gözenekli malzemenin ısı iletkenliği
k <sub>r</sub>	: Işıma ile oluşan ısı iletkenlik
k <sub>s</sub>	: Gözeneksiz malzemenin ısı iletkenliği
l	: Telin uzunluğu
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
η	: Ortamın kırılma göstergesi
v	: Bir fononun ortalama hızı
P <sub>c</sub>	: Kesit alanının gözenekliliği
σ	: Stefan-Boltzmann değişmezi
t	: Süre
T	: Sıcaklık
V	: Sıcak tel üzerindeki gerilim düşüşü
λ	: Fononların ortalama dalga boyu
°C	: Derece Celsius (selsiyus)

### **KISALTMALAR**

ASTM	: American Society for Testing and Materials
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AKU-TUAM	: Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

A.Ş.	: Anonim Şirketi
dc	: Diatomit-bağlayıcı refrakter kili karışımları
DPT	: Devlet Planma Teşkilatı
DTM	: Dış Ticaret Müsteşarlığı
EDS	: Elektron X-ışını Dispersif Spektroskopisi
sc	: Refrakter Kili-Bağlayıcı Refrakter Kili Karışımları
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
scd	: Rafrakter Kili-Bağlayıcı Refrakter kili-Diatomit Karışımları
scv	: Rafrakter Kili-Bağlayıcı Refrakter kili-Vermikülit Karışımları
TGA	: Termo-gravimetrik Analiz
vc	: Vermikülit-bağlayıcı refrakter kili karışımları
vcd	: Vermikülit-Bağlayıcı Refrakter Kili-Diatomit Karışımları
XRD	: Mineralojik Faz Analizi(X-ışını kırınımı)
XRF	: X-ışını flüoresans spektrometresi

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ VE AMAÇ

#### 1.1 GİRİŞ

Refrakter malzemeler birçok endüstriyel uygulamalar için önemli ürünlerdir. Bu malzemeler endüstride ısı ve enerji kayıplarını azaltmakla beraber çalışma ortamının iyileştirilmesi için kullanılırlar (Van Garsel vd. 1998). Pivinskii (1998), yapmış oldukları araştırmada refrakter kullanımının %60-70 oranında demir çelik endüstrisinde olduğunu belirtmişler ve bu oranın gelecekte ihtiyaçlarla beraber artacağını öngörmüşlerdir. Yüksek sıcaklık malzemelerinin en önemli uygulama alanı metal işleme fırınlarında yalıtım ve yapısal elemanlardır. Sıkça bu tür malzemelerin içyapısında gözenek ve çatlaklar görülür (Bengisu 2006). Geçmişte yapılan çalışmalara baktığımızda; 1970'lerde 1 ton çelik üretimi için 40 kg. refrakter kullanılırken, 1997'lerde Japonya'da bu rakam 10 kg.'ın altında olmuştur. Bu rakamlar gün geçtikçe daha nitelikli refrakter hammadde ve daha kaliteli ürün elde edildiğini göstermektedir (Jarvis 1997; Kendal 1995; O'Driscoll 1996; Wellborn 1995; İnel'den 1997). Yeni nesil tüketim teknolojileri en özel ürünleri ve en saf hammaddeleri talep etmekle birlikte, bunları dünyanın neresinde olursa olsun temin edip, özel bir titizlikle tüketmektedir (İnel 1997). Bu sebeple üretimi uluslararası öneme sahip olan refrakterler(izolasyon ürünleri) uygulamalara bağlı olarak; yüksek ısı yalıtım özellikleri, düşük maliyet, yüksek dayanıklılık, mükemmel termal şok direnci ve kullanım kolaylığı gibi özelliklere sahip olmalıdır (Van Garsel vd. 1998; İnel 1997).

Ülkemizdeki önemli doğal mineral hammadde kaynaklarından olan ve ülkemizde pek değerlendirilmeyen kaynaklarımızdan önemli iki mineral hammaddesi vermikülit ve diatomit, düşük yoğunluklu ve gözenekli, hafif refrakter tuğla üretiminde kullanılarak fiziksel ve ısıl özellikleri incelenmiş ve bu hammaddelerin refrakter tuğla sanayiinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Genleştirilmiş vermikülit, diatomit (kizelgur) ve refrakter kili içeren hafif refrakter izolasyon tuğlalarının laboratuvarda üretilimi gerçekleştirilmiş ve üretilen malzemelerin fiziksel, termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

## **1.2 AMAÇ**

Bu tez çalışmasının amacı, yüksek sıcaklıklara maruz kalan ortamlarda (endüstriyel ergitme ve ısıl işlem fırınları vb.) ısıl yalıtımını sağlamak amacıyla kullanılan ve 1000°C sıcaklığa kadar hizmet verebilen gözenekli, hafif izolasyon malzemelerinin geliştirilmesini sağlamak ve üretilen hafif izolasyon refrakter malzemelerinin özelliklerini incelemektir.

Bu çalışmada, genleştirilmiş vermikülit, diatomit ve şamot hammaddeleri kullanılarak farklı oranlarda karışımlar hazırlanmış, hazırlanan karışımlar yarı-kuru presleme (semi-dry pressing) yöntemiyle şekillendirilerek 900-1100°C aralığında laboratuvar fırınında sinterlenmiştir. Üretilen numunelerin, fiziksel (yoğunluk, gözenek oranı, boyutsal değişimi), mekanik (basma dayanımı), termal (ısıl iletkenlik) ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR

Refrakter malzeme; özellikleri farklı olan bileşenlerden oluşan ve yüksek sıcaklıklarda katı, sıvı, gazların fiziksel ve kimyasal etkilerine karşın kararlılığını koruyan, değişken sıcaklıklarda aşınma, darbe ve termal şok gibi zorlamalara dayanıklı metalik olmayan malzemelerdir (Birinci 2010). Refrakter malzemelerin özelliklerini ihtiyaç duyulan alana göre seçilen malzemeler belirler. Bu bağlamda ısı yalıtımını sağlamak amacıyla kullanılan ve 1000°C sıcaklığa kadar hizmet verebilen gözenekli, hafif izolasyon malzemelerinin geliştirilmesi için kullanılacak olan genişletilmiş vermikülit, diatomit ve şamot kili içeren hafif refrakterler ile ilgili literatürde yapılmış olan çalışmalar sunulmaktadır.

Suvorov ve Skurikhin (2002) vermikülit bazlı yüksek sıcaklık ısı yalıtım malzemesi geliştirmişlerdir. Bu malzeme kullanılarak ısı işlem fırınlarında düşük malzeme tüketiminin ve verimsiz ısı kayıplarını azaltmanın mümkün olabileceği, ayrıca yakıt tüketiminin sürekli fırınlarda 10-15 kat azalacağı, toplu fırınlarda ise %45 oranında azalabileceği belirtilmiştir.

Suvorov ve Skurikhin (2003), çalışmalarında vermikülit 300°C üzerine ısıtıldığında genişleyen son derece verimli bir ısı yalıtım malzemesi olarak tanımlamışlardır. Genleştirilmiş vermikülitin düşük yoğunluk ve ısı iletkenliği, nispeten yüksek ergime noktası, kimyasal inertlik, dayanıklılık ve çevre güvenliği gibi sağladığı özellikler ile 1150°C'yi geçmeyen ısı güç ünitelerinde ısı yalıtım malzemelerinde bir dolgu malzemesi olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir.

Peletskii ve Shur (2007) genişletilmiş vermikülitin ısı iletkenliği ile ilgili çalışmalarını ortaya koymuşlardır. 27-827 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirdikleri çalışmalarında sıcaklık artışı ile termal iletkenliğin üniform olarak arttığı tespit edilmiştir. Bunun en muhtemel nedeninin ise ısı radyasyonunun olduğunu gözlemişlerdir.

Belyakov ve Ivanov (2008) yaptıkları araştırmalarda 900°C’de 10µm gözenek boyutuna sahip ısı yalıtım malzemesinin en iyi özellikleri sağlayacağını görmüşlerdir. Ayrıca bir sistemde kullanılan ısı yalıtım malzemesinin artan gözenek miktarı ve azalan gözenek boyutu ile sistemin termal iletkenliğinin azalacağı belirtilmiştir. Çalışmalarında 800°C’de ergimiş alüminyumun 72 saat boyunca köpük diatomit tuğla üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun sonucunda alüminyum ile bir reaksiyon gözlenmemiştir. Ayrıca 850°C’de 48 saat bekletildiğinde ağırlık kaybı %0,8 ve hacim azalması %12 olmuştur. Bu da diatomitin yüksek sıcaklıklar altında düşük ısıl iletkenlik, düşük boyut toleransları ve yeterli mukavemet gibi avantajlarını ortaya koymuştur. Ayrıca diatomit malzeme; vermikülit, şamot, perlit ve kalsiyum silikat gibi malzemelerle de kıyaslanmış ve diatomitin daha düşük uygulama sıcaklıklarına sahip olması gibi dezavantajlarına karşın sürekli çalışan fırınlarda ısı tüketimini %10-20 aralığında azaltması gibi sağladığı yararlar ile uygulama maliyetlerinin daha düşük olacağı belirtilmiştir.

Okada vd. (2008) çalışmalarında anti-ısı adası etkisi için allophane ve vermikülit karışımlarından gözenekli seramikler üretmişlerdir. Allophane ve vermikülit farklı oranlarda karıştırılmış, tek eksenli preste 40MPa’da preslenerek peletler oluşturulmuş ve 600-800°C’de ısıtılmıştır. Vermikülitin tabakaları arasındaki su kaybı nedeniyle yüksek vermikülit içeriği peletlerin çatlamasına neden olur. Bu durum vermikülitin öğütülmesiyle kontrol edilebilir. Numunelerin bulk yoğunlukları artan allophane miktarı ile 800°C ‘de 2 saatte 1,72 g/cm<sup>3</sup> den 0,94 g/cm<sup>3</sup>’e azalmıştır. Bu örneklerin gözenek boyut dağılımı 1mm’den küçüktür. Daha küçük gözenekler artan allophane miktarı ile, daha büyük gözenekler ise artan vermikülit miktarı ile artmıştır. Numunelerin su emme miktarları artan allophane miktarı ile artmıştır. Bu su emilimi yeterince hızlı olmasına karşın emilen suyun salınımı oldukça yavaştır. Tüm bu özellikler ısı adası etkisi için bu malzemeleri kullanışlı yapmaktadır.

Djangang vd. (2008), refrakter tuğla üretimi için belirli oranlarda kil ve şamot şekillendirilmiş ve 1200–1350°C’de sinterlenmiştir. SEM’de incelenen numunelerde şamot ve kuvars çevresinde hapsolmuş zayıf şekilde dağılmış büyük gözenekler, çok heterojen bir mikroyapıda saptanmıştır. Genel olarak küresel porozite şamot içeriği ile artmıştır. Mekanik dayanım matrisin davranışı ile kontrol edilmekte olup, bu fazdaki yüksek porozite oranları yüksek mekanik dayanım için elverişsizdir. Ayrıca büyük tane arayüzeylerindeki

termal gerilmeden dolayı oluşan büyük gözenekler ve yerel çatlaklar, mekanik dayanımı azaltan kritik kusurlara neden olmuştur.

Nagibin vd. (2009), yüksek kimyasal ve deformasyon direncine sahip vermikülit bazlı yeni bir kaplama malzemesi üzerine araştırmalarını yapmışlardır. Geleneksel olarak kullanılan malzemelere göre yaklaşık üç kat daha düşük yoğunluk ve altı kat daha düşük ısı iletkenliği ile şamot gibi malzemelerin kullanımının azalacağı öngörüsünde bulunmuşlardır. Ayrıca deformasyon direncinin daha yüksek olması nedeniyle servis ömrünün daha uzun olmasıyla beraber sadece demir dışı metalurji alanında değil birçok mühendislik alanında kullanılabilirliği sonucuna varılmıştır.

Bentli (2010) yaptığı çalışmada tuğla sanayinde ürünlerin özelliklerini geliştirmek amacıyla, tuğla çamuruna %2, %4, %6, %8, %10, %15 ve %20 oranlarında diyatomit ilave ederek hidrolik pres vasıtasıyla 0.2 N/mm<sup>2</sup> basınçta şekillendirmiş ve 900°C'de 30 dakika sinterlediği numunelerle fiziksel ve mekanik testler gerçekleştirmiştir. Bu testler sonucunda diyatomit ilavesinin, tuğla birim hacim ağırlığını ve toplam küçülmeyi azalttığı, su emme miktarını ve basınç dayanımını ise arttırdığı gözlemlenmiştir.

Şahin (2011) yapmış olduğu çalışmada yüksek sıcaklık altında genişletilmiş vermikülit içeren çelik tel takviyeli çimento esaslı kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Bu amaçla, vermikülit/çimento hacimsel oranı 4, 6 ve 8 olan harçlara hacimce %0, %0,5, %1 ve %1,5 oranlarında 6 mm uzunluğunda 0,16 mm çapında çelik tel ilave edilmiş, 40x40x160 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler, 20°C, 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra ortam sıcaklığına kadar soğutulmuş, eğilme ve basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları araştırılmıştır. Sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarında, ultrases geçiş hızlarında azalmalar tespit edilmiştir.

Garderen vd. (2011) yaptıkları çalışmada ekstrüzyon ile üretilmiş, diatomit bazlı ve akış davranışını optimize etmek için %16-28-48 oranlarında kaolin ve bağlayıcı kil ilaveleri ile imal edilen numunelerde; mikroyapı üzerinde kil katkısı ve sinterleme sıcaklığının etkisi ile aşınma dirençlerini araştırmışlardır. 800°C'de bimodal gözenek boyut dağılımı elde edilmiştir. 250 nm'den küçük boyutlara sahip gözeneklerin diatomitin gözenekli yapısından kaynaklandığı ve daha büyük boyutların ise parçalar arası boşluklardan



kaynaklandığı kabul edilmektedir. 1100 °C’de diatomun mezo ve makro gözenekleri kapanma eğilimindedir ve daha yüksek sıcaklıklarda birleşme nedeniyle unimodal makro gözenek boyut dağılımı oluşur. 1100-1300°C sıcaklık aralığında diatomit ve kil arasındaki farklı sinterleme davranışlarından ötürü gözenek boyutunda bir artış meydana gelmiştir. Ayrıca numunelerin aşınma testlerine bakıldığında artan kil oranı ve yüksek sinterleme sıcaklığı ile aşınma direncinde artış gözlenmiştir.

## **2.1 SERAMİK MALZEMELER VE SINIFLANDIRILMASI**

Latince’de anlamı “keramikos/keramos” olan “seramik” sözcüğü kil, toprak ya da pişirilmiş eşya anlamına gelmektedir (Erol 2007). Seramik malzemeler, genel olarak iyonik ve kovalent bağlarla bağlanmış kompleks bileşiklerdir ve metal ve metal dışı elementlerin her ikisini de içerirler. Özellikleri bakımından sert, kırılğan, yüksek ergime derecesi, düşük elektrik ve ısı iletkenliği, iyi kimyasal ve ısıl kararlılık ile yüksek basma dayanımına sahiptirler (Soykan 2004). Doğal malzemelerden oluşan çoğu yüksek sıcaklık malzemesi yüksek oranda yabancı yapılar barındırır (Bengisu 2006). Killer de; çeşitli oranlarda safsızlık içeren hidratize alüminyum silikatlardır. Yaş durumda iken plastiki yapıda olup, kuru olduğunda ise sert bir yapıya sahiptirler. Uygun sıcaklıklar uygulandığında değişik sertliğe sahip olurlar. (Soykan 2004; Erol 2007).

Seramik malzemeler, çanak çömlek, tuğla, kiremit, porselen, fırın refrakterleri, mıknaş, elektrikli ev aletleri ve aşındırıcılara kadar birçok kullanım alanına sahiptirler. Seramik malzemelere duyulan ihtiyaç ateşin bulunması ile ortaya çıkmış, yani M.Ö. 5000’li yıllardan buyana süregelmiş bir geçmişe sahiptir. Yapılan araştırmalara göre M.Ö. 3200-2600 yılları arasında ilk tuğlanın kalıplanması I. Mısır Hanedanlığı zamanında gerçekleştirilmiştir. Daha sonraları Kaldeli’ler tuğlayı pişirmiş ve bunu Darius’un sarayının pişmiş silika tuğla kullanılarak inşa edilmesi takip etmiştir. Ortaçağda ise kimyacılar, killerden imbik, pota ve fırın yaparak faydalanmışlar, 18. yüzyılın ortalarına doğru ise İngiltere’de ilk kez inşaat tuğlası üretim yöntemleriyle şekilli refrakter malzemeler üretilerek refrakter sanayi doğmuştur. 19.yüzyılda buhar gücünün bulunmasıyla üretim yöntemleri gelişerek mekanik olarak yapılmaya başlanmış, 20. yüzyılın başında X-ışınları ve elektron mikroskobu tekniklerindeki gelişmeler sayesinde, ileri teknoloji ürünlerin üretilmesine imkan sağlamış, endüstriyel üretim tamamen mekanik hale gelerek otomasyona geçilmiştir. 20. yüzyılın ortasından sonra ürün özellikleri daha çok

geliştirilmiş ve bilgisayar sistemleri devreye girmiştir. Refrakter sanayinin doğuşundan itibaren en büyük gelişme son 50 yıl içinde en büyük tüketicisi olan demir-çelik sanayinde olmuştur. Ülkemizde de çok eski zamanlardan beri ateşe dayanıklı malzemelerin bilinmesiyle beraber modern anlamda ilk kez 1934 yılında Kırıkkale Çelik Fabrikasında sinter magnezit, üretilmiştir (Soykan 2004; DPT 2006).

Günümüzde artık pek çok alanda modern anlamda çeşitli amaçlar için seramik malzemeler kullanılmaktadır. Tablo 2.1’de seramik malzemelerin kullanıldığı bazı alanlar gösterilmektedir.

Tablo 2.1 Çeşitli amaçlar için kullanılan seramik malzemeler (Soykan 2004).

<b>Elektronik</b>	<b>Yapısal Malzemeler</b>	<b>Kimyasal Parçalar</b>	<b>Refrakter Yapılar</b>	<b>Yapı Malzemeleri</b>	<b>Geleneksel Ürünler</b>
Altlıklar	Kesici	İyon	Fırın Astarları	Karolar	Sofra
Çip	Takımlar	Değiştiriciler	Rekuperatörler	Fayanslar	Eşyaları
Taşıyıcıları	Motor	Emisyon	Potalar	Kil Ürünleri	Sağlık
Kapasitörler	Parçaları	Kontrolü	Filtreler	Çimento	Gereçleri
Elektrotlar	Kaplamalar	Katalist	Isıtıcı	Beton	Sanat
Ateşleyiciler	İmplantlar	Destekleri	Elementler		Seramikleri
	Lambalar	Gaz Filtreleri			

Seramik malzemeleri kendi içinde geleneksel seramikler ve ileri teknoloji seramikleri olarak sınıflandırmak mümkündür.

### **2.1.1 Geleneksel Seramikler**

Geleneksel seramikler; eski çağlardan günümüze hala kullanılan ve seramik endüstrisinin önemli bir kısmını temsil eden seramiklerdir. Geleneksel seramik malzemelerin elde edilmesinde killer önemli yer tutar. Doğada çok sayıda bulunan kil genellikle tabakalı bir yapıya sahip olup ve hidratlaşmış aluminasilikatlardan oluşurlar (Soykan 2004).

Seramik malzemelerin; yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları, yüksek sertlikleri, metal malzemelerden daha hafif olmaları, hammadde kaynağının bol ve daha ucuz olmaları, pahalı ve karmaşık üretim yöntemlerine gerek duyulmaması, oksitlenme dirençlerinin yüksek

olması, basma dayanımlarının yüksek olması gibi özellikleri onları tercih sebebi yapmaktadır. Fakat bunun yanında gevrek bir yapıya sahip olmaları bazı alanlardaki kullanılabilirliğini azaltmaktadır (Soykan 2004; Erol 2007). Başlıca kullanılan geleneksel seramik malzemeleri sıralarsak;

- Killer
- Silika
- Feldispat
- Diğer doğal minarellerdir

### **2.1.2 İleri Teknoloji Seramikleri**

Günümüzde seramikler, geleneksel seramiklerin özelliklerini de taşımakla beraber teknolojinin getirdiği yenilikler ve ihtiyaçlar doğrultusunda ileri teknoloji seramiklerine de içine alarak geliştirilmektedir. İleri teknoloji seramikleri; geleneksel seramik malzemelerle karşılanamayan uygulama gereksinimlerini karşılayan ve genellikle kontrol edilebilir kimyasal bileşim ve yapıya sahiptirler. Bu sayede ısı özellikleri daha iyi, düşük yoğunluklu, yüksek sertlik, yıpranmaya, mekanik ve kimyasal aşınmaya dayanım, optik saydamlık, manyetik geçirgenlik gibi avantaj sağlayan seramik yapılar elde edilebilmektedir (Soykan 2004; Erol 2007). En önemli ileri teknoloji seramiklerini sıralarsak;

- Oksit seramikler( $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$ ,  $ThO_2$ ,  $BeO$ ,  $MgO$ ,ve  $MgAl_2O_4$  v.s.)
- Manyetik seramikler ( $PbFe_{12}O_{19}$ ,  $ZnFe_2O_4$ ,  $Y_6Fe_{10}O_{24}$  v.s.)
- Ferroelektrik seramikler
- Nükleer yakıtlar ( $UO_2$ ,  $UN$ , v.s.)
- Nitrürler
- Karbürler ile borürleri ( $Si_3N_4$ ,  $B_4C$ ,  $TiB_2$ , v.s.) kapsamaktadır (Soykan 2004).

## **2.2 REFRAKTER MALZEMELER VE SINIFLANDIRILMASI**

Refrakter terimi Latince kökenli bir kelime olup “refractorius” den gelmekte ve stubborn yani inatçı manasına diğer bir deyişle yüksek sıcaklıklara dayanıklı manasına gelmektedir. Refrakterlerin genel tanımı ise şu şekilde yapılabilir; yüksek sıcaklıklara dayanabilen,

yüksek sıcaklıklarda ve bulunduğu atmosfer ortamında fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyabilen malzemelerdir (Şahin 2011).

Evlerde kullanılan kömür sobalarından çeşitli ağır sanayi fırınlarına kadar yüksek ısıya maruz kalan tüm fırınlarda refrakter malzeme kullanılmaktadır. Ülkemiz, refrakter ürünlerinin üretiminde teknolojik olarak, en ileri teknolojiye sahip ülkelere göre karşılaştırıldığında büyük farkların olmadığı, hatta bazı noktalarda daha iyi düzeyde olduğu söylenebilir. Ayrıca dünya ülkeleri açısından baktığımızda hammaddenin yerli kaynaklardan temini ülkemizi avantajlı kılar. Bunun yanında ülkemizde istenen kalitede bulunamayan bazı hammaddeler ve özel refrakter malzemeler ithalatla karşılanmaktadır (andaluzit, deniz suyu sinteri, fused, oksikrom, spinel vb.). Bu durum mevcut hammaddelerimizin iyileştirilmesi, ileri zenginleştirme tekniklerinin geliştirilmesi ile maliyetlerin düşürülmesi, atıkların değerlendirilmesi yönünde çalışmalara ağırlık verilerek aşılabılır (DPT 2006).

Ülkemizde üretilen refrakter malzemeler çeşitli ülkelere ihraç edilmektedir. D.T.M (*Dış Ticaret Müsteşarlığı*)’den alınan bilgilere göre ihracat yapılan başlıca ülkeler; Cezayir, Bulgaristan, Ukrayna, Suriye, Azerbaycan, Yunanistan, Almanya, Mısır, Irak, A.B.D. Arnavutluk, Makedonya, İran, İsrail ve Fransa’dır. 1999-2005 yılları arasındaki refrakter üretim, tüketim ithalat ve ihracat miktarları Tablo 2.2’de gösterilmiştir (DPT 2006).

Tablo 2.2 1999-2005 yılları arasındaki refrakter üretim, tüketim ithalat ve ihracat miktarları (DPT 2006’dan değiştirilerek).

Yıllar	2000	2001	2002	2003	2004	2005
	<b>Miktar (ton)</b>					
<b>Üretim</b>	218,572	228,915	234,467	248,633	266,964	282,678
<b>İthalat</b>	40,240	30,975	41,389	44,118	38,623	47,493
<b>İhracat</b>	35,942	41,110	48,043	57,829	64,821	88,950
<b>Yurt İçi Tüketim</b>	222,870	218,780	227,813	234,922	240,766	241,221

Tablo 2.2’den görüldüğü üzere toplam refrakter ihracatımız 2000 yılında 35 942 tondan 2005 yılında 88 950 tona çıkmıştır (DPT 2006). Bunun yanında *Devlet Planlama Teşkilatı (2006)*, 1993 yılında 122 681 ton olan bazik refrakter tüketiminin 2000 yılında 138452 tona, 2005 yılında 149954 tona çıktığını belirtmiş, 12 yıllık tüketim artışının ise %22 olduğunu görmüştür. Fakat 1993 yılında 93 672 ton olan alümina-silikat refrakter tüketiminin 2000 yılında 61 881 tona, 2005’de ise 58 923 tona düştüğünü belirterek 12 yıllık tüketim düşüşünü %60 olarak belirlemiştir.

Yurdumuzda refrakter malzemeler çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Tablo 2.3’te yurtiçi toplam refrakter tüketiminin sektörel dağılımı gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Yurtiçi toplam refrakter tüketiminin sektörel dağılımı (DPT 2006).

	1999		2000		2001		2002	
	Toplam	%	Toplam	%	Toplam	%	Toplam	%
<b>Demir Çelik</b>	160,232	73,65	143,311	71,66	143,272	71,84	146,213	72,50
<b>Çimento</b>	37,428	17,20	37,267	18,64	36,181	18,14	34,960	17,33
<b>Bakır Sanayii</b>	1,058	0,49	963	0,48	983	0,49	1,098	0,54
<b>Metalurji Sanayii</b>	133	0,06	144	0,07	158	0,08	165	0,08
<b>Şişe Cam</b>	4,487	2,06	6,115	3,06	6,514	3,27	6,350	3,15
<b>Kireç Sanayi (Şeker)</b>	1,805	0,83	1,805	0,90	1,756	0,88	1,886	0,94
<b>Kireç Sanayii</b>	3,107	1,43	2,690	1,34	2,579	1,29	2,836	1,41
<b>Döküm Sanayii</b>	9,320	4,28	7,687	3,84	7,982	4,00	8,179	4,06
<b>Genel Toplam</b>	217,570	100,00	199,982	100,00	199,425	100,00	201,687	100,00

Tablo 2.3 (devam ediyor).

	2003		2004		2005	
	Toplam	%	Toplam	%	Toplam	%
<b>Demir Çelik</b>	156,016	73,91	160,999	74,37	153,173	73,42
<b>Çimento</b>	34,109	16,16	33,441	15,45	32,805	15,72
<b>Bakır Sanayii</b>	1,135	0,54	1,240	0,57	1,125	0,58
<b>Metalurji Sanayii</b>	174	0,08	176	0,08	171	0,08
<b>Şişe Cam</b>	6,442	3,05	6,665	3,08	6,757	3,24
<b>Kireç Sanayi (Şeker)</b>	1,860	0,88	2,043	0,94	2,010	0,96
<b>Kireç Sanayii</b>	3,019	1,43	3,079	1,42	3,133	1,50
<b>Döküm Sanayii</b>	8,341	3,95	8,847	4,09	9,376	4,49
<b>Genel Toplam</b>	211,096	100,00	214,490	100,00	208,635	100,00

Refrakter tüketiminin en büyük sektörü çizelgeden de anlaşılacağı gibi %71-75 aralığı ile demir-çelik sektörüdür. Bu açıdan baktığımızda refrakter tüketimi açısından demir-çelik sektöründe kullanılan üretim metodları ve teknolojisindeki gelişmeler çok büyük önem arz etmektedir (DPT 2001). Bu önem Tablo 2.4’de belirtilen demir-çelik sektörü için üretilen refrakter malzeme miktarlarına baktığımızda daha net anlaşılmaktadır.

Tablo 2.4 Demir-çelik sektörü toplam refrakter üretimi (DPT 2006).

	2003	2004	2005
	<b>Miktar (ton)</b>		
<b>Yerli</b>	140,271	143,763	137,875
<b>İthal</b>	15,745	17,236	15,298
<b>Toplam</b>	156,016	160,999	153,173

Ateşe karşı dayanımları ile tanınan refrakterlerin ilk olarak şekillendirilmiş seramik killerinin pişirilmesiyle elde edildiği düşünülmektedir. Sanayi kollarının ihtiyaçlarına cevap verebilmek için gelişen teknolojiyle beraber yüksek kalitede malzemeler kullanılarak çeşitli refrakterler üretilmektedir (Sümer 1998; Yılmaz ve Kara’dan 2010). Refrakter malzemeler literatürde fiziksel yapılarına ve kimyasal karakterlerine göre sınıflandırılmıştır.

### 2.2.1 Fiziksel Yapılarına Göre Refrakterler

Tanımları gereği farklı sıcaklıklar altında mekanik, termal ve ısı dayanımları ile tanınan refrakter malzemeler, fiziksel yapılarına göre sınıflandırıldıklarında şekillenmiş refrakterler, şekillenmemiş refrakterler ve refrakter harçlar olarak üç grupta inceleyebiliriz (Birinci 2010; Katsavou vd. 2012).

Şekillenmiş refrakterler genellikle, refrakter tuğla ve izole tuğla olarak kullanılırken; şekillenmemiş refrakterler, dökülebilir, dövme harçlar, püskürtme refrakterler ve şekillenebilir refrakterler olarak kullanılmaktadır. Refrakter harçlar ise, havada, sıcakta ve suda sertleşen olarak kullanılırlar (Birinci 2010).

### 2.2.2 Kimyasal Karakterlerine Göre Refrakterler

Kimyasal karakterlerine göre refrakterler; asidik, bazik ve nötr refrakterler olmak üzere 3 grup altında toplanabilir (DPT 2001; Bengisu 2006; Birinci 2010). Refrakter malzemenin asidik veya bazik olması kimyasal olarak asitlik ve baziklik özelliğinden ziyade refrakterin kullanıldığı ortam kastedilmektedir. Örneğin; silika asidik ortamda inert bir davranış sergilerken bazik ortamda reaksiyona girebilen bir refrakterdir (DPT 2001). Bu grupları kısaca incelersek;

-Asidik karakterli refrakterler (alümina-silikat grup) genellikle  $RO_2$  grubu içerirler. Bu malzemeler;

- Şamot
- Silika ( $SiO_2$ )
- Silimanit ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ )
- Mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )
- Zirkon ( $ZrO_2 \cdot SiO_2$ )
- Zirkonya ( $ZrO_2$ ) olmak üzere altı gruptan oluşmaktadır (DPT 2001; Ünal 20..; Birinci 2010).

Asidik karakterli refrakterler; refrakter kili veya kaolinin pişirilmesiyle oluşturulan, içeriğinde esas olarak  $Al_2O_3$  ve  $SiO_2$  bulunur. Plastikliği olmayan ve suyla hidrolize olmayan bu yapı ıslanmayan bünyeye sahiptir. Bu grubun ilk üyesi olan şamot refrakter

malzemelerin hammaddesi, genel formülü  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  olan hidro alüminyum silikatlardır ve az miktarda diğer mineralleri de içerirler. Bu yapı içinde genellikle %39,5  $Al_2O_3$ , %46,5  $SiO_2$  ve %14  $H_2O$  bulunur. Bunun yanında grubun en yaygın üyesi kaolinit'tir (DPT 2001).

Plastik killer ile şamot malzemeler bağlanarak şamot refrakter malzemeler elde edilir. Bu tuğlalar yaklaşık %18-44  $Al_2O_3$  içerirler (DPT 2001). Alümina Silikat tuğlalar, refrakter tuğlalar içinde oldukça geniş yere sahiptir. Üretilirken pişirme sırasında kristal suyun ayrılması ile beraber ağırlığında % 10-15'lik azalma olurlar. Bu yüzden üretilen tuğlada çekme ve çatlaklar görülebilir. Şamot tuğlalar, düşük ısıl genleşme, düşük ısıl iletkenlik, yüksek termal şok direnci, yüksek aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklere sahiptirler. Ayrıca bu malzemeler yüksek sıcaklıkta düşük mukavemet özellikleri gösterirler (Birinci 2010). Şamot malzemeler genellikle kok, çimento ve kireç fırınlarında, yüksek ısıtma ünitelerinde, tav ocakları ile döküm yollarında ve potalarda kullanılmaktadır (Erdogan ve Yıldız 1995; Birinci'den 2010).

Bir diğer asidik refrakter sınıfına giren silika ( $SiO_2$ ) refrakterlerin hammaddesi kuvarsit olup, çok saf ve küçük kristal yapıya sahip kuvars minerallerinden oluşmaktadır. Silika refrakter, kuvarsitin sönmüş kireç ile muamelesiyle elde edilmektedir. Bu refrakterin pişirilmesinde, kuvarsın,  $\alpha$  fazından  $\beta$  fazına dönüşümü dikkate alınmaktadır. Genellikle %93-99 oranlarında  $SiO_2$  içeren silika refrakterler, kuvars stabil şekle dönüştürüldükten sonra kullanılırlar. Silika refrakterler farklı yük altında yüksek refrakterlik özelliğine sahip olmalarına rağmen, kristalize silika içerisinde meydana gelen allotropik dönüşümler nedeniyle pişme esnasında sürekli genleşmeye uğrarlar. Yüksek sıcaklıklarda sıcaklık değiştirme direnci ve mekanik mukavemeti yüksek olan silika refrakterleri diğer tuğlalarla karşılaştırsak; düşük özgül ağırlık ve yüksek ısıl iletkenliğe gibi özelliklere sahiptirler. Bununla beraber silika refrakterler; kok fırınlarında, elektrik ark fırınlarında, cam eritme fırınlarında, Siemens Martin fırın kapaklarında ve silika harç olarak silika tuğlaların işlenmesinde de kullanılmaktadırlar (Erdogan vd. 1995, Takamiya 1998; Birinci'den 2010, DPT 2001).

Asidik karakterli mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) refrakterin minerali mullittir ve %71,8  $Al_2O_3$  ve %28,2  $SiO_2$  içerir. Mullit refrakterler; doğal ve sentetik mullit mineralinden imal edilir. Saf mullit mineralinde %71,8 alümina bulunmakta iken bilinen mullit tuğlalarda ise %60-



71 oranında alümina bulunmaktadır. Bunun yanında mullit refrakterler; yüksek yük taşıma özelliği, hacim kararlılığı ve yüksek sıcaklıklarda akışkanlara karşı dirençleri ile tanınırlar (DPT 2001).

Diğer asidik karakterli refrakter de Zirkon ( $ZrO_2.SiO_2$ ) ve Zirkonya ( $ZrO_2$ )'dır. Zirkon; zirkonyum silikattır ve termal şoklara, silisli eriyiklere, bazı alkali tozlara ve dumanlara dayanımı yüksektir. Zirkon, alümina ile beraber kullanıldığı taktirde parçalanmalara ve korozyona karşı daha yüksek dayanıma sahip olur. Fakat demir oksit ve bazik cürüflara duyarlı bir refrakter olarak bilinir. Zirkon tuğlaların kullanım alanlarına, cam fırınları, tundiş astarları ve çelik döküm astarları örnek verilebilir. Zirkonya ise zirkonyum dioksitten meydana gelen, sert, dayanıklı olmasının yanında özellikle eriyik silikatların kimyasal etkilerine dirençli ve ateşe dayanımı oldukça yüksek olan bir refrakterdir. Zirkonya refrakterlerin kullanım alanları genellikle, petrokimya endüstrisi, katalitik fırınlar ve sürekli çelik ergitme proseslerinde nozullardır. (DPT 2006; Birinci 2010).

-Bazik Karakterli Refrakterler: Bu refrakterler RO grubu içerirler ve bazik refrakter üretiminde genellikle aşağıdaki malzemeler kullanılmaktadır.

- Magnezit ( $MgO$  periklas kristali)
- Magnezit-Krom ( $MgO$  ve  $Cr_2O_3$ )
- Dolomit ( $MgO$ .  $CaO$ )
- Forsterit ( $2MgO$ .  $SiO_2$ )
- Kromit ( $Cr_2O_3$ ) (DPT 2001; Birinci 2010; Ünal 20..).

Bazik refrakter üretiminde en sık sinter magnezit ve kromit cevheri kullanılmaktadır. Magnezit refrakterler,  $2800\text{ }^\circ\text{C}$  gibi yüksek ergime noktaları sayesinde yüksek refrakterlik özellikleriyle bilinirler. Demir-çelik üretim endüstrisinin gelişmesinde magnezit refrakterler önemli bir yere sahiptir (Takamiya 1998; Birinci'den 2010). Magnezitin diğer önemli özellikleri ise kabul edilebilir düzeyde ki hidratasyon direncine sahip olması ve yüksek sıcaklıkta bazik ortamlardaki kimyasal kararlılığıdır (Bilgiç 1998; Birinci'den 2010). Bunun yanında magnezitin küçülme ve yüksek genleşme gibi özellikleri ve demir oksit, kalsit, silika gibi empuritelere sahip olması onun dezavantajıdır. Bu yüzden, magnezit refrakterlerin özellikleri, alümina, krom, karbon ve dolomit gibi diğer

malzemelerle kombine edilerek geliştirilebilir (Takamiya 1998; Birinci'den 2010). Magnezit refrakterler magnezit cevherinden veya deniz suyu magnezitinden elde edilen periklasdan üretilir ve doğal ya da deniz suyu magneziti 1600-2000°C arasında pişirilerek sinter magnezit veya refrakter özellikle magnezit elde edilebilmektedir. Magnezitten üretilen refrakter tuğlalar yüksek refrakterlik, yüksek ısıl iletkenlik ve bazik cüruflara karşı yüksek direnç özelliklerine sahip olduklarından çimento döner fırınları, konverterlerde çelik ve kireç fırınlarında, demir dışı metal endüstrisinde ve cam endüstrisinde kullanılmaktadırlar (Erdogan vd. 1995; DPT 2001; Othman vd. 2005; Han 2007; Birinci'den 2010).

Magnezit-Krom (MgO ve Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); Siemens Martin fırınlarının refrakter malzemeleri için 1930'larda krom-magnezit tuğlaları kullanılmıştır. Krom cevherinin sinter magnezitler ile kullanılmasıyla beraber termal şoklara direnci yüksek, cüruflara dayanıklı ve yüksek refrakter özelliğine sahip refrakter tuğlalar üretilmiştir. Bu tuğlaların üretimi saf magnezit tuğla üretimine benzer bir yöntem kullanılarak ve genellikle 150-1800°C sıcaklık aralıklarında sinterlenerek gerçekleştirilmektedir. Refrakter tuğla olarak bu malzemelerin kullanımı için krom cevherindeki safsızlıkların mümkün olduğu kadar az olması gereklidir. Krom ve sinter magnezit farklı oranlarında hazırlanarak değişik özelliklere sahip refrakter tuğlalar elde edilebilir. Örneğin, hazırlanan refrakter tuğla karışımında MgO miktarı yüksek olduğunda, yük altında refrakterlik, bazik cüruflara karşı ısıl genleşme ve ısıl direnç oldukça iyi olacaktır. Bunun yanında kromit ve magnezit tuğlaya nazaran ani sıcaklık değişimlerine dayanımı daha yüksektir. Manyezit-krom ve krom-manyezit refrakterler genellikle yüksek sıcaklıkta mukavemet gerektiren alanlarda, bazik cüruf ve ergimiş metal ataklarına karşı kullanımda tercih edilmektedir (DPT 2001; Ceylantekin 2006; Birinci'den 2010). Ayrıca çelik, çimento ve bakır endüstrilerinde de kullanılmaktadırlar (Haldar 2004; Birinci'den 2010).

1880'lerden bu yana refrakter malzeme olarak kullanım alanı bulan dolomit (MgO. CaO), doğada doğal olarak bulunur ve kalsiyum ile magnezyum yanında karbonatlardan oluşan MgCO<sub>3</sub>.CaCO<sub>3</sub> minerali şeklinde bulunur (Takamiya 1998; Birinci'den 2010; DPT 2001). Bu minerallerden CaO/MgO oranı 1,45-1,7 arasında olan dolomit malzemeler özellikle refrakter sanayinde kullanılmaktadırlar (Boztas 2009; Birinci'den 2010). Dolomit doğada bol miktarda bulunur ve çelik üretim tesislerinde yaygın kullanıma sahiptir.1930'lu yıllarda pişmiş tuğla olarak kullanılmaya başlanan dolomit daha önceleri granüle halde

veya katran bağı blok şeklinde kullanım alanı bulmuştur. Refrakter olarak dolomiti kullanabilmek için 1700-1800°C sıcaklık aralıklarında bünyesinde barındırdığı CO<sub>2</sub>'in uzaklaştırılması için pişirilmelidir. Bu pişirilen malzemeye sinter dolomit denilmekte ve bu kireç ve magnezit karışımından meydana gelir. Dolomitin neme karşı hassas oluşundan dolayı serbest kirecin reaksiyona girerek dolomitin hidratasyona uğramasını önlemek için tuğlalar genellikle katran veya ziftle kaplanarak muhafaza edilir. Pişmiş, pişmiş stabil ve pişmemiş katran ve reçine bağı tuğlalar olmak üzere 3 türü olan dolomit tuğlalardan, pişmemiş katran ve reçine bağı olanlar ülkemizde ikincil metalurji potalarında yaygın olarak kullanılır (DPT 2001; Birinci 2010).

MgO ve SiO<sub>2</sub> bileşenlerinden oluşan forsterit refrakterler magnezyum-silikat ürünleridir. Genellikle çoğu endüstride fırın örgü malzemesi olarak kullanılan forsterit, yüksek sıcaklık dayanımı, hacimsel kararlılığı ve alkali buharlarının eriyik ve ıslak etkilerine karşı dayanımı ile bilinir (DPT 2001; Birinci 2010). Ayrıca bu refrakterler, bakır ve kurşun arıtma fırın raflarında, düşük frekans indüksiyon fırınlarında, çimento ve dolomit sinter döner fırınlarında, düşey ve döner kireç fırınlarının yüksek sıcaklıktaki zonlarında, cam ergitme fırını rejeneratörlerinde kullanılmaktadır. Ancak günümüzde daha kararlı ve uzun ömürlerinden dolayı magnezit krom veya spinel refrakterler forsterit refrakterlerin yerini almıştır (Takamiya 1998; Birinci'den 2010; DPT 2001).

Kromit (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) refrakterler, bazik cüruflara karşı yüksek dirence sahip olmalarının yanında sıcaklık değişikliklerine karşı hassas, termal şoklara karşı zayıf direnç ve yük altında oldukça zayıf refrakterliğe sahiptirler. Bunun yanında ısıl genişmesi ve iletkenliği düşüktür. Bu refrakterler çelik üretim fırınlarında ve tav ocaklarında kullanılmaktadırlar (Erdogan vd. 1995; Birinci'den 2010).

-Nötr Karakterli Refrakterleri incelediğimizde bu refrakterler genel olarak R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya RO.R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> grubu içeren refrakterlerdir. Bu refrakteri bileşimlerine göre şöyle sıralayabiliriz;

- Boksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. H<sub>2</sub>O veya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 3H<sub>2</sub>O)
- Alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Karbon (Karbon bileşenli refrakterler: zift, grafit, katran)
- Silisyum Karbür (SiC)

- Kromit ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

Nötr karakterli refrakterlerden biri olan boksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  veya  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), alüminyum metalinin üretilmesinde kullanılan cevher olmasının yanında genellikle refrakter özelliğine sahip boksitler refrakter endüstrisinde en önemli yeri tutan hammaddelerdendir. Boksitin en önemli üreticisi Avustralya'dır (DPT 2001).

Bir diğer önemli nötr karakterli alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), daha önce de bahsettiğimiz gibi genellikle Bayer Yöntemi ile elde edilmektedir. Alümina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), bozunma dayanımı sayesinde çok yaygın kullanımı olan refrakterlerdir (Bengisu 2006). Ayrıca yüksek refrakterlik göstermeleri, aşınmaya karşı dayanıklı olmaları, yüksek basınca soğuk ve sıcak ortamlarda direnç göstermeleri diğer tercih sebepleridir (Birinci 2010).

Karbon bileşenli refrakterler (zift, grafit, katran)'in genellikle refrakter malzeme olarak çok değişik formları vardır. Örneğin; pul grafit şeklindeki karbon, bazı alümina ateş tuğlalarına, plastik refrakter karışımlarına ve bazik refrakter malzemelere ilave edilerek kullanılır. Karbon indirgeyen atmosferde, yumuşamadan  $3315^\circ\text{C}$  üzerindeki sıcaklıklarda yapısını korur. Bunların yanı sıra karbon endüstri fırınlarında oksidasyon ortamı oluşturan, oksijen, su buharı ve karbondioksite duyarlıdır (DPT 2001).

Silisyum karbür ( $\text{SiC}$ ) refrakterler oksit refrakterlerde olmayan birçok özelliğe sahip olmasının yanında aynı zamanda oksit olmayan refrakterlerin yapıtaşdır. Genellikle oksit refrakterlere nazaran daha pahalı olsalarda yüksek termal iletkenliğe, yüksek parçalanma dayanımına, yüksek aşınma dayanımına, oksitleyici olmayan cüruflara karşı yüksek korozyon dayanımı ve yüksek sertlik gibi özelliklere sahip olmaları sayesinde bu refrakterler buhar kazanları, demir dışı metalleri ergitmede kullanılan fırınlar, ısı değişim tüpleri, atık yakma fırınları ve birçok endüstriyel uygulamalarda tercih sebebi olmaktadır (Takamiya 1998; Birinci'den 2010).

Kromit ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) refrakter endüstrisinde metalurjik döküm kumu olarak yaygın olarak kullanılan bazik ve nötr refrakter malzemelerin yapıtaşdır. Ekonomik yönden değerli olan ve dünyada üretilen tek krom cevheri kromittir ve üretilen kromitin %55'i metalurji, %35'i refrakter ve %10'u da kimya sanayinde kullanılmaktadır. Refrakter olarak üretilen kromit; çelik üretim fırınlarında asidik ve bazik tuğlaların arasında, yondeş reaksiyonu önlemek

amacıyla ve tav ocaklarında kullanılırlar. Genel olarak üretilen kromit; termal şoka karşı zayıf direnç gösterme, yüksek sıcaklıklarda sıkışma direnci ve yük altında zayıf refrakterlik göstermesinin yanında, ısıl genişmesi ve iletkenliği düşük ve bazik cüruflara karşı direnci oldukça yüksektir. (Erdogan vd. 1995; Birinci'den 2010; DPT 2001).

## 2.3 TERMAL İZOLASYON SERAMİKLERİ

### 2.3.1 Yoğun refrakterler

Endüstride refrakter malzemeler uygulama alanlarına göre şekilli ve ya şekilsiz olarak(örgü harçları) kullanılmaktadır. İster şekilli olsun, ister şekilsiz olsun, her iki durumda da refrakterin özelliklerini yakından ilgilendiren ve yoğun ve ya gözenekli olarak kullanımı önem arz etmektedir. Bozundurucu ve aşındırıcı ortamlarda genellikle düşük gözenekli yani yüksek yoğunluklu refrakterlik aranır. Bu gözeneklilik değerleri genellikle %20-25 düzeyinde olup farklı tekniklerle %10-15 arasında gözenekliliğe sahip yoğun refrakterler üretilmektedir (DPT 1995; Bengisu 2006). Mevcut piyasada değişik yöntemler ile farklı hammaddeler kullanılarak yoğun ya da hafif refrakter malzemeler elde edilmektedir. Bunun yanında genellikle çoğu yüksek sıcaklık malzemeleri gözeneklidir. Fakat yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmak üzere SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BN, AlN ve katkısız oksitler gibi düşük gözenekli refrakterlerden yararlanır (Penty ve Bjirklie 1982). Burada kullanılacak olan hammaddenin özellikleri yanında ekonomik boyutu da ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda ülkemizde endüstride en çok kullanılan yoğun refrakter türlerini şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Şamot ve Yüksek Alüminalı Refrakterler
  - Ağır Hizmet Refrakterleri
  - Genel Hizmet Refrakterleri
  - Hafif Hizmet Refrakterleri
- Diğer Refrakterler (Silika, Porsil) (DPT 1995).

Ağır hizmet refrakterleri; genellikle demir-çelik sanayinde yüksek yoğunluk ve hacme sahip, yüksek mekanik özellikleri sağlayan ve zor şartlarda kullanılacak refrakterlerdir. Bunların yanında kullanım alanı bakımından daha hafif şartlarda elverişli olan refrakterler genel hizmet refrakterleri olarak bilinirken, şartların daha kolay olduğu ve nispeten daha

düşük özelliklere sahip refrakterler ise hafif hizmet refrakterleri olarak adlandırılmaktadır. Kullanım alanları bakımından örnek verecek olursak; ağır hizmet refrakterleri, daha çok demir-çelik, çimento, petrokimya sanayinde kullanılırken, cam sanayinde ve kok fırınlarında silika, asidik ortamlarda asit tuğlaları ve diğer çalışma ortamlarında ise genel hizmet ve hafif hizmet refrakterleri kullanılır (DPT 1995).

Daha önceki bölümlerde de bahsettiğimiz gibi şamot refrakter malzemelerin hammaddesi, genel formülü  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  olan hidro alüminyum silikatlarıdır. Yoğun refrakterlerde % 46 alüminaya sahip olan yapılar şamot, % 46 ve daha yüksek alüminaya sahip olan yapılar ise yüksek alüminalı refrakterler olarak bilinmektedir (DPT 1995).

Yoğun refrakterler yapılarında gözenek ve çatlaklar barındırmasından ötürü içlerinde hatalar barındırır. Bu malzemeler genellikle metal işleme fırınlarında kullanılır ve bu yüzden daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi metal curuflarla etkileşim türlerine göre de sınıflandırmak mümkündür. Bunları özetleyecek olursak asidik refrakterler  $SiO_2$  esaslı olup en yaygın olanları silika, ateşkili türleri, silimanit ve andalusit malzemeleridir. Bazik refrakterler ise  $MgO$  esaslı olup en yaygın olarak manyezit, dolomit, krom-manyezit ve manyezit-krom kullanılmaktadır. Karbon, kromit ve forsterit gibi refrakterler ise hem asidik hem de bazik cüruflara karşı oldukça dirençli refrakterlerdir (Kingery vd.1976; Gilchrist 1977; Bengisu 2006'dan).

### **2.3.2 Hafif Refrakterler**

Bir önceki bölümde sözedildiği gibi yoğun refrakterler ergimiş metal, cüruf ve akışkan taneler gibi aşındırıcı ortamlarda astar malzemesi olarak kullanılırken daha dış katmanlarda ısı yalıtımı sağlamak üzere genellikle yüksek yük altında ve aşındırıcı oramlara maruz kalmayacak bölgelerde daha ucuz ve daha hafif olan yüksek gözenekli hafif refrakterler tercih edilmektedir. Bu refrakterler düşük ısı iletkenlik, yüksek ısı depolama kapasitesi gibi özelliklere sahiptir (Richerson 1982).

Hafif refrakterler diatomit, genişletilmiş vermikülit, perlit, refrakter ateş kili, kaolin, yüksek alümine mineralleri, bubble alümina ve kuvarsit gibi malzemeler kullanılarak elde edilir. Bu malzemelerin ergimiş metal veya cürufun erozyonuna ve aşındırma ortamına dayanımı yok denecek kadar azdır. Bu yüzden genellikle yalıtım amaçlı kullanılırlar. Bu

sayede kullanıldıkları ortamda ısı kaybı düşük ve ısı depolama kapasitesi yüksek olduğundan yakıt sarfiyatı azalır. Bunun yanında bu malzemelerin yüksek yalıtım etkisi ve hafifliğinden ötürü daha ince fırın duvar kalınlıkları elde edilir. Bu sayede fırın hacmi ve ağırlığı düşürülerek maddi olarak kazanç sağlanır (DPT 1995; Anon. 2012).

## **2.4 HAFİF REFRAKTER HAMMADDELERİ**

Hafif refrakterler ısı etkisi altında bulunan çoğu yerde ısı ızalasyonunu sağlamak için yüksek gözeneklilikleri (%40-70) sayesinde genellikle destek tuğlaları şeklinde kullanılmaktadır. 800°C-1100°C aralığında dayanıma sahip olan malzemeler genellikle ızalasyon tuğlası olarak adlandırılmaktadır. Bu gözenekli ve hafif malzemelerin üretiminde en çok kullanılan ham maddeler diatomit, genleştirilmiş vermikülit, perlit, refrakter ateş kili, kaolin, yüksek alümina mineralleri, bubble alümina ve kuvarsittir (Jonker 2006; Anon. 2012; Şahin 20..). Bu malzemelerden bazıları kısaca altbaşlıklar halinde özetlenmiş olup, genleştirilmiş vermikülit ve diatomit hammaddeleri ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

### **2.4.1 Diatomit (Kieselgur)**

Almanca ve Fransızca literatürde "Kieselgur" olarak bilinen Diatomit, minerali meydana getiren diatom adında bir su yosunu olan tek hücreli mikroskopik alglerin fosilleşmiş silisli kavkılarının çökmesiyle meydana gelmiştir. Bir su canlısı olan diatomlar su yosunları sınıfından bir hücreli veya koloniyel bitkilerdir ve sudaki erimiş silis oranı, geniş ve sığ havzalar, diatomların büyüme ve çoğalma hızını belirleyen unsurlardır. Genellikle denizlerde koloniler halinde, göl, nehir yataklarında ve ıslak kayalarda tek bireyler halinde bulunurlar. Nem ve ışıkla beslenen diatomların yaşadıkları ortam türlerini ve çoğalma hızlarını önemli ölçüde etkiler. Örneğin; haftada en çok bir diatom oluşturabilen diatomlar olduğu gibi, ayda bir milyar diatom oluşturabilen türler de mevcuttur. Ayrıca diatomların denizlerdeki besin zincirinin ilk halkasını da oluşturduğu düşünülmektedir ve bugün de diatomlar deniz ve göllerde yaşamlarını devam ettirirler. Diatomların hücre çeperleri (kavkısı) amorf silis ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) yapısında olup, bu yapıda diatomların yaşamı için ihtiyaç olan azda olsa çeşitli oranlarda Al, Fe, Ca, Mg, Na, K elementlerinin silikatları da bulunmaktadır. Büyüklükleri 2-500 mikron aralığında değişen diatomların yaklaşık 15000 türü tespit edilmiş ve her bir türün farklı geometrik şekil, gözenek yapısı ve büyüklüğünün olduğu görülmüştür. Zamanla canlılığını yitiren diatomların silisli kabukları dibe çökerek birikir ve bir sedimasyon kayası olan diatomit yataklarını oluşturur (Uygun 1976; Özbey

ve Atamer 1987; Değirmenci ve Yılmaz 2009; Karahisar Gökkonca 2010; Garderen vd. 2011; Robert ve Crangle 2011). Diatom çökeltiler dört şekilde bulunabilir. Bunlar;

- Okyanusal diatom çamurları
- Bataklik tortulları
- Pleistosen interglasyel göl oluşukları
- Volkanizma ile ilişkili gösel ve denizel çökeltiler (Uygun 1976).

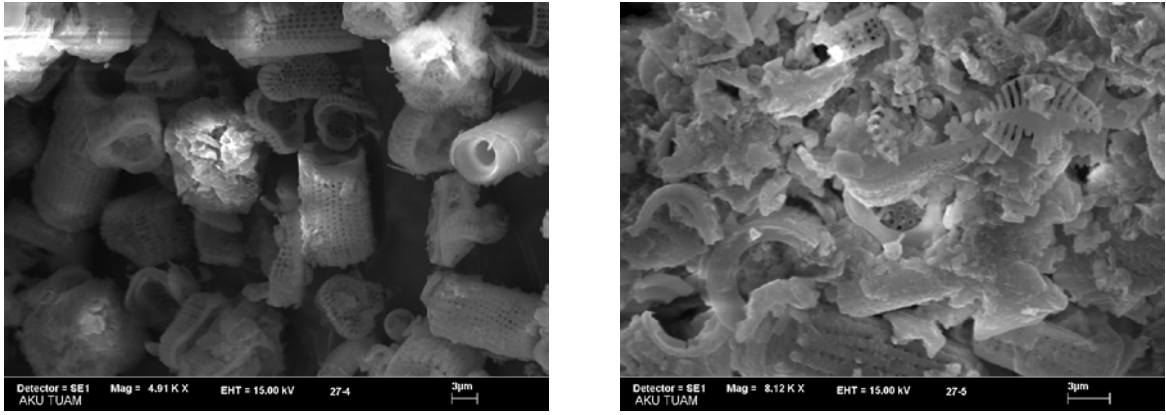
Günümüzde işletilen diatomit rezervleri son iki türdeki olanlardır ve bundan 5-60 milyon yıl önce Miosen sonu ve Pliosen başlarında oluştuğu düşünölmekte olup rezervlerde o dönemdeki volkanik faaliyetlerin sulardaki silis oranını yükseltmiş olacağından diatomların uygun bir çoğalma ortamı bulduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca yapısında bu şartlara bağılı olarak kil, volkanik kül, kum ve organik kalıntılar barındırdığı görölmektedir (Özbey ve Atamer 1987; Garderen vd. 2011).

Diatomit organik kökenli bir mineral olup deniz, göl ve durgun nehir yataklarında oluşan rezervler zamanla yer kabuğı hareketleriyle yükselerek beyaz görünömlü tepecikleri oluşturular. Bu oluşan diatomit rezervleri genellikle volkanik sahalara yakın yerlerde tespit edilmiş ve yer hareketleri ile kırılma ve kirlenmelere uğramıştır. Asırlar geçtikçe bu rezervler kil, kalker, kuvars ve volkanik küller ile karışık katmanlar oluşturmuştur. Bü yüzden bir diatomit rezervi işletilirken öncelikle işe diğeri kirletici katmanlardan ayrılıp ayrılmadığıının tespiti ile başlamak kullanım alanlarını belirlemek açısından mantıklı olacaktır. Örneğinin; Kil, kalker, kuvars gibi katmanlar ile karışık bulunan diatomit rezervleri genellikle refrakter, hafif yapı ve izolasyon malzemesi olarak kullanılabilirken, oldukça saf olarak elde edilebilen diatomit katkı maddesi olarak kullanılabilir. Saf bir diatomit malzemesi elde edilebilmesi için rezevde bulunan kayacın yumuşak, hafif, oldukça beyaz ve ele alındığında kolaylıkla dağılılabilen bir yapıda olmalıdır (Özbey ve Atamer 1987).

Genellikle açık olarak işletilen diatomit ilk rezervden alındığında % 30-60 oranlarında neme sahiptir ve genellikle çıkarıldıktan sonra nakli esnasında ufalanır ve belirli büyüklüklerde topaklar oluşur. Kirli beyaz ve açık kahverengine sahip olan diatomit, taşıdığı nemin doğal yollarla atılması için açık bir sahada güneşli ortamlarda olabildiğince



ince katman olarak serilir ve nemi uzaklaştırılmaya çalışılır. Daha sonra kırıcılardan geçirilen diatomit ön kurutmadan geçirilir ve üç kademeli kolonlardan geçen diatomit sıcak havayla karşılaşarak nemi azalır. Yoğunluğu diatomitten yüksek olan kum ve kil gibi kirleticilerin yapıdan uzaklaştırılması için seperatörden geçirilir ve sonrasında daha temiz olan diatomit bir döner fırında 600-1000°C sıcaklıkları arasında kalsinasyon işlemi yapılır. Bu işlem sırasında eğer yapıda Fe miktarı yüksek ise, % 1-5 NaCl veya Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> katılarak demir, klorür olarak uzaklaştırılır ve agregalar çözümlenerek kalsinasyon işlemi tamamlanmış olur. Böylece beyaz renkte elde edilen diatomit fırından çıktıktan sonra soğutularak bir toprak kırıcıdan geçer ve tane boyutlarına göre sınıflandırılır (Uygun 1976; Özbey ve Atamer 1987). Diatomit mineralinin genel SEM görüntüsü Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Diatomit mineralinin genel SEM görüntüsü.

Diatomitin en önemli özelliği olarak %80-85 aralığındaki gözenekliliği, yani hafifliği söylenebilir. Dolayısıyla su tutma kapasitesi oldukça yüksektir. Ham halde ağırlığının 3-4 katı su tutma özelliğine sahipken, işlenen diatomit ağırlığının 5-10 katı su tutabilir. Yine bu poroz yapısının bir özelliği olarak oldukça düşük ısı iletimi ile ön plana çıkan diatomitten üretilen tuğlalar oda sıcaklığından 1000 °C ye kadar yaklaşık 0,07 ile 0,1 W/m.K aralığında ısı iletme özelliğine sahiptirler. Erime noktası 1000-1590°C aralığında olan diatomit refrakter hammadde olarak da kullanım alanı bulur. Basınç direnci genellikle 3-18 kg/cm<sup>2</sup> arasındadır ve spesifik yüzey alanı yüksektir. Çoğunlukla beyazdan kahverengine varan renklere sahiptir ve birçok kimyasal maddelere karşı da inerttir (Uygun 1976; Özbey ve Atamer 1987; Robert ve Crangle 2011, Şahin 20..).

Diatomitin dünyada kullanımı çok eski tarihlere dayanır. Ülkemizde M.S. 530 yıllarında İstanbul’da Ayasofya’nın inşasında hafifliğinden ve özelliklerinden ötürü kubbe kısmının

diatomit tuğlalardan yapıldığı dikkatlerden kaçmamaktadır. Yakın tarihimizde ise diatomitin kullanımı 1867'de Nobel tarafından taşınabilir bir patlayıcı eldesinde kullanmasıdır. Diatomit üretimi 1930 yıllarından sonra gelişmiş ve filtre yardımcısı, katkı maddesi, izolasyon ve refrakter malzemesi olarak kullanılmıştır. Dünyada üretim 1973 yılında 1 milyon 600 bin tona ulaşmış ve yaklaşık 550 bin ton ile A.B.D. başı çekmiştir. Bu ülkeyi diatomit üretiminde aynı tarihlerde Sovyetler Birliği, Danimarka, Fransa, İtalya ve Almanya izlemiştir (Uygun 1976; Özbey ve Atamer 1987).

Son derece çeşitli kullanım alanına sahip olan diatomit ürünleri; Yapı malzemelerinden kimyaya, sağlık ürünlerinden gıda ürünlerine kadar birçok kullanım alanı bulmaktadır. Bunları genel olarak sıralayacak olursak;

- Filtrasyon işlemlerinde filtre yardımcı maddesi olarak kullanım; şeker fabrikasyonunda, meyva suyu, meşrubat ve her türlü içecek üretiminde, hayvani, nebati, makina ve yağlama yağlarının süzülmesinde, atık suların, havuz sularının filtrasyonunda, kuru temizleme çözeltilerinin geri kazanılmasında, ilaç sanayindeki süzme işlemlerinde, asit ve kimyasal madde üretiminde,
- Dolgu maddesi olarak kullanım; boya, diş macunu, lastik, plastik, ilaç, kozmetik, kağıt, kibrit, cila, sır, temizlik maddesi imalatında,
- Hızlandırıcı olarak kimyasal reaksiyonlarda,
- Silis kaynağı olarak kimyasal maddelerin hazırlanmasında,
- İzolasyon malzemesi olarak,
- Hafif yapı malzemesi ve refrakter malzeme üretiminde kullanılmaktadır (Özbey ve Atamer 1987; Karahisar Gökkonca 2010).

Ülkemizde de diatomit geniş kullanım alanı bulur ve diatomitçe son derece zengin bir ülke olduğumuz söylenebilir. Türkiye'deki diatomit yatakları ve bazı bölgelerdeki kimyasal analizler sırasıyla Şekil 2.2'de ve Tablo 2.5'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Türkiye'deki diatomit yatakları (URL-7, 2012).

Tablo 2.5 Farklı bölgelere ait diatomitlerin kimyasal analizleri (Karahisar ve Gökkonca 2010).

% Bileşen	Afyon Diatomit	Karacasu / Aydın Diatomit	Alanyurt / Kütahya Diatomit	Elassona / Yunanistan
SiO <sub>2</sub>	88,94	90,11	54,65	59,52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,90	1,31	12,1	17,83
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,46	0,79	3,5	8,08
CaO	2,10	1,25	1,15	1,82
MgO	0,44	0,63	3,8	1,79
SO <sub>3</sub>	0,00	0,67	0,03	0,00
Kızdırma Kaybı	4,52	4,13	22,43	7,27
Na <sub>2</sub> O	0,23	0,27	0,65	1,28
K <sub>2</sub> O	0,26	0,16	1,7	2,58
Cl	0,0056	0,0107	0,00	0,000

#### 2.4.2 Genleştirilmiş Vermikülit

Vermikülit; genellikle biyotit ve flogopit gibi mika minerallerinin hidrotermal alterasyonu ile oluşmuş silikat mialine verilen isimdir. Ayrıca endüstride genişleme özelliğine sahip tüm mika grubu minareleri temsil eden vermikülit bazı kaynaklar magnezyum, alüminyum ve demir silikat olarak tarif etmişlerdir. Trioktahedral yapıya sahip olan mineral, hızlı ısıtma ile yapraklara ayrılır ve küçük kurtçuklar halinde yapılar oluşur. Bu yapılar nedeniyle vermikülit Latince *vermicular* adını almıştır. Son 50 yıldır yaygın olarak

kullanılan vermikülit hafifliği sayesinde düşük katkı malzemesi olarak tercih edilmektedir (Toksoy 1997; Mouzdahir 2009; Şahin 2011; Melo vd. 2012).

Genellikle partikül boyutları 1mm ile 1cm aralığında değişen vermikülitin yeşil, sarımsı ve siyah renklerinin bulunmasına karşın çoğu parlak kahverengi bir yapıya sahiptir. 230 °C'nin üzerine hızla ısıtılan vermikülit tabakalar arasındaki suyunu kaybeder ve bunun bir sonucu olarak taneler adeta akordion gibi açılarak çok gözenekli granüller oluşmaktadır (Şekil 2.3). Ham haldeki vermikülit endüstride sınırlı kullanıma sahipken, işlenmiş olan vermikülit özellikle ısı ve yalıtım amaçlı olarak yaygın kullanım alanına sahiptir. Vermikülitin özelliklerini incelersek; ham vermikülitin değişik kaynaklarda ham yoğunluğunun 2,4-2,8 g/cm<sup>3</sup> aralığında olduğu belirtilir, diğer yandan genişletilmiş vermikülitte baktığımızda bu aralık 0,8-0,08 g/cm<sup>3</sup> olarak bildirilmiştir. Yani vermikülitin genişmesi sonucu yoğunluğu yaklaşık 10 kat azalma göstermiştir. Yapılan araştırmalarda farklı ısı işlemleriyle vermikülitin yoğunluğunun 30 kat azaltılabileceği belirtilmektedir (Mouzdahir 2009; Şahin 2011).



Şekil 2.3. Genleştirilmiş vermikülit genel görünüm.

Vermikülitin kristal yapısı ile ilgili ilk çalışma 1934 yılında Gruner tarafından yapılmıştır. Gruner yaptığı çalışmada mika tabakaları arasında su moleküllerinin varlığını tespit etmiştir. Bunun ardından Hendrick ve Jefferson 1938 yılında bir çalışma yapmış ve yapılan çalışmada tabakalar arasındaki iyonlar sebebiyle vermikülitin nötr olduğunu belirlemişlerdir. Vermikülitler bulunduğu ortanlardaki fillosilikat minerallerinin bozunması ile oluştuğundan dönüşmüş olan mineral ana mineral ile benzer yapıdadır. Bu sebeple

vermikülitlerin kesin olarak tanımının yapılması zordur. Fakat içeriği açısından bakıldığında birçok araştırmacı vermikülit içerdği tabakalar arasında Mg, Fe ve Al hidroksit kompleksi içeren ve genleşebilen bir mineral olarak tanımlamaktadırlar (Toksoy 1997). Doğada oluşumlarına göre 4 değişik tür vermikülit bulunmaktadır. Bunlar;

- Kil Vermikülitleri
- Otijenik Vermikülit
- Metamorfik Vermikülit
- Makroskopik Vermikülit (Toksoy 1997; Şahin 2011).

Kil vermikülit; genellikle toprakta rastlandığı için ayrıca toprak vermikülit olarak da adlandırılır. Toksoy (1997)'ye göre kil vermikülitleri, asidik ve yükseltgen koşullarda alkali ve kalsiyumca zengin minerallerin tabaka arası K'nın kristal yapısından çıkararak yerine Mg ve Ca'nın geçmesi, Fe<sup>2+</sup>'nin Fe<sup>3+</sup>'e yükseltgenmesi ile meydana gelmektedir.

Otijenik vermikülit oluşumuna, volkanik aktivenin ve madeni mineral içeren su akıntılarının yoğun olduğu bölgelerde rastlanmaktadır. Bunun yanında, hidrotermal etkilerle oluşan talk ve serpenti mineraller bulunmaktadır. Ayrıca bu vermikülitin, Fe, Mg ve Si katyonları ile doymuş sıvılardaki katyonların çökmesiyle meydana geldiği sanılmaktadır. Tetrahedral tabakasında Fe içeren hidrotermal vermikülitin bir özelliği, diğer türdeki vermikülitlere nazaran içerdği suyun daha az olması ve Al'nin Si yerine geçişinin daha fazla olmasıdır (Toksoy 1997).

Metamorfik vermikülit; demir bakımından zengin kloritin dönüşmesi ile meydana gelen ve hidratlı alüminyum ve kalsiyum çift silikatı içeren metasedimanlarda bulunan vermikülitler metamorfik olarak adlandırılmışlardır. Düşük sıcaklıklarda ortama alkali girişi ve Fe, Mg ve Al'nin ortamdan çıkışı ile kloritten dönüşüm gerçekleşmektedir (Black 1975; Toksoy 1997'den). Genel olarak yapısı, kimyasal olarak kloritine benzemektedir. Fakat bunun yanında metamorfik vermikülit yapısında kloritte bulunmayan K<sub>2</sub>O ve CaO gibi oksitler içerir ve kloritten daha fazla silis barındırır. Ayrıca biyotit ile karşılaştırıldığında Al içeriğinin daha fazla olduğu bilinmektedir (Toksoy 1997).

Son olarak makroskopik vermikülitini incelersek, mikanın hidrasyonu sonucu meydana gelen trioktahedral yapıya sahip mika benzeri bir mineral olarak tanımlamak mümkündür. Yeşilimsi-sarı, yeşilimsi-siyah, kahverengi, altın sarısı, bal sarısı ve bronz renklerde bulunabilen makroskopik vermikülit büyük levhamsı kristaller halinde parlak ve elastik olmayan bir yapıya sahiptir. Ayrıca mikaya göre daha yumuşak ve 1320- 1350°C arasında erime sıcaklığına sahiptir (Toksoy 1997).

Genleştirilmiş vermikülitin üretimini incelersek; genellikle açık ocak işletmeciliği ile üretilen vermikülit, öncelikle cevher zenginleştirme işlemlerinden geçer. Daha sonra elde edilen cevher kırıcı ve öğütücülerden geçirilerek harmanlanır. Son olarak tane boyutuna göre çeşitli eleklerden geçirilerek sınıflandırılan vermikülit, 900-1000°C'de hızlı bir ısı etkisiyle 4-8 saniye bekletilerek genişleme işlemi tamamlanmış olur. Vermikülitin kimyasal yapısı birbirine benzer ürünler düzenli ve düzensiz yapısal özelliklere sahip olabilir. Dünyada başlıca vermikülit rezervleri, Amerika Birleşik Devletleri (ABD), Rusya, Avustralya, Arjantin, Brezilya, Çin, Mısır, Hindistan, Meksika, Kanada, Bulgaristan, Şile, Finlandiya, Fransa, Japonya, Kore, Cezayir, İspanya, Sri Lanka, Tanzanya, Kazakistan ve Türkiye'de bulunmaktadır. ABD dünya rezervinin %50'sine sahiptir. Türkiye'de ise önemli vermikülit yatakları Sivas-Yıldızeli ve Malatya bölgelerindedir. Vermikülit 1950'den önce yalnızca inşaat sektöründe ve ısı yalıtım özelliğiyle dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Daha sonraları fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çalışılması ile vermikülitin diğer alanlarda da kullanılabileceği ortaya çıkmıştır. ABD en fazla vermikülit tüketimine sahiptir ve genişletilmiş vermikülitini genellikle inşaat ve tarım sektöründe, akustik ve ısı yalıtımının önemli olduğu yerlerde ihtiyaç duyulan hafif malzemelerin üretilmesinde portland çimento ile birlikte kullanarak olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Endüstride genellikle ham vermikülitin kullanımı oldukça azdır ve genişletilmiş vermikülit özellikleri bakımından daha çok tercih edilmektedir. Günümüzde bu hali ile sektörde geniş kullanım alanı bulunan vermikülit başlıca; binalarda ısı ve ses yalıtımında, dökümhane ve çelik fabrikalarında, petrol rafinerileri, çimento fabrikaları ve güç santrallerinde tavan, duvar ve taban yalıtımında, soğuk hava depolarının izolasyonunda, yüzme havuzlarında ve tarım alanında kullanılmaktadır. Ayrıca 1100°C'ye kadar dayanıklı yüksek sıcaklık fırınlarında izolasyon tuğlası olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş vermikülit, alçı ve çimento gibi malzemelerle karıştırılarak yangına dayanıklı sıva malzemesi olarak kullanılabildiği gibi yalıtımı yüksek beton malzeme üretiminde de kullanılabilmektedir. Dolgu malzemesi olarak da kullanılan vermikülit farklı bileşimler elde edilerek yüksek sıcaklıktaki

malzemelerin taşınmasında, ergimiş metallerin üzerinin örtülmesinde ve kimyasal malzemelerin taşınmasında kullanılan boruların yalıtımında faydalanılır. Buzdolabı, otomobil ve uçaklarda da izolasyon yönüyle kullanılan vermikülit, yangın söndürücüler, filtreler, soğutucu depolar, dielektrik komilatörler, plastik ürünler, dış cephe boya ları, ateşe dayanıklı film malzemelerinin üretiminde de kullanıldığı bilinmektedir. Zira i uygulamalarda da kullanımı olan vermikülit, bahçelerde, golf sahalarında, parklarda ve toprağı düzenleyici gübre olarak kullanılabilmektedir (Toksoy 1997; Şahin 2011).

### 2.4.3 Perlit

Adını Latince “perle”den almış olan perlite inci taşı da denilir. Koyu, açık gri ve beyaza yakın renklere sahip (Şekil 2.4) ve magmanın ani soğuması ile meydana gelen volkanik bir kayaç olan perlit,1950 yılından sonra ticari öneme sahip olmuştur. 800-1000°C’ye kadar hızla ısıtılan perlit içerisinde bulunan %3-4 oranındaki suyun buharlaşması ile patlar ve hacminin yaklaşık 20 kat artması ile oldukça düşük yoğunluklu bir refrakter hammadde si elde edilmiş olur. Türkiye’de perlit 1970’ten sonra kullanılmaya başlanmış olup başlıca perlit cevheri yatakları İzmir, Balıkesir, Manisa, Eskişehir, Çankırı, Nevşehir, Ankara, Erzincan, Erzurum, Bitlis, Kars ve Van illerinde bulunmaktadır. Perlit potansiyeli bakımından Türkiye, dünya ülkeleri arasında üçüncü sırayı alır (URL-2, 2010; URL-1, 2012).



Şekil 2.4 Genleştirilmiş perlit (URL-6, 2013).

#### 2.4.4 Kaolin

Çin kili ya da beyaz kil olarak da bilinen kaolin  $1,8-2,6 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahip olup granit kayalardan elde edilen beyaz ve yumuşak bir kil türüdür (Şekil.2.5). Saf kaolinin rengi beyaz olsa da tabiatta daima başka bileşiklerle karışık bulunur. Bunun için rengi kurşunimtrak, sarımtırak, yeşilimtrak olabilir. Suyla karıştırıldığında istenilen şekle sokulabilir. İlk olarak çanak çömlek yapımında kullanılmaya başlanan kaolin, feldispat minerali içeren sert granit kayaların yeraltındaki lavların sıcaklığı ve atmosferin etkisiyle zamanla ufalanıp yumuşaması ile meydana gelmektedir. Böylece feldispatın dönüşmesiyle oluşan kaolinit, ; ısıya dayanıklı parça yapımında, seramikte, çimentoda, boya, plastik eşya, yapay kauçuk, ilaç, mürekkep gübre olarak, kozmetikte, elektrik yalıtkanlarda ve özellikle alüminyum sülfatın elde edilmesinde kullanılmaktadır (URL-3, 2012; URL-4, 2013).



Şekil 2.5 Kaolin (URL-4, 2013).

#### 2.4.5 Kuvarsit

Kuvars kumu tanelerinin, silisten meydana gelmiş bir çimento ile birbirlerine sağlam şekilde bağlanmasıyla oluşan bir kayaç olan kuvarsit (Şekil 2.6), sedimanter ve metamorfik olmak üzere iki çeşittir. Kimyasal bileşimi kuvars, kumtaşı ve kuvars kumu gibi  $\text{SiO}_2$  olmasının yanında yapısında feldispat, mika, kil, manyetir, hematit, kireçtaşı gibi bileşimler barındırabilir. Bunun yanında bileşim olarak %95'den fazla  $\text{SiO}_2$  barındıran kuvarsit “ortokuvarsit” olarak adlandırılıp, endüstride en çok bu yapılar kullanılmaktadır. Kuvarsitin öğütülmesinin zor ve pahalı oluşu, onu kuvars ve kumtaşından sonra tercih edilebilir kılmaktadır. Bunun yanında  $\text{SiO}_2$  içeriği yüksek ve %0,4'ten az demir içeren



kuvarsitler cam ve seramik sanayinde kullanılıp, ayrıca refrakter, metalurji ve inşaat sanayinde de kullanılmaktadır (URL-5, 2010).



Şekil 2.6 Kuvarsit genel görünüm (URL-5, 2010).

## 2.5 GÖZENEK YAPICI KATKILAR

Refrakter ve izolasyon tuğlası üretiminde özellikleri etkileyen en önemli unsur olarak gözeneklilik gösterilebilir. Endüstride yoğunluğu düşürmek, dolayısıyla poroziteyi arttırmak (>%45) son derece önem arz etmektedir. Bu bakımdan birkaç farklı üretim yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birkaçı; üretilen malzeme içerisine yanıcı veya uçucu organik maddelerin karışıma ilavesi (talaş tozu, kok, granüle plastik), diatomit ve perlit gibi gözenekli hammaddelerin kullanılması, gaz üreten metal tozları ile köpük oluşturularak gözenek oluşturulması ve stabilize edilmiş köpükler kullanılarak gözenekli yapı oluşturulmasıdır (Jonker 2006; Şahin 20..). Son zamanlarda yapılan çalışmalarda gözenekli yapı elde etmek için kağıt işleme atıkları da gözenek yapıcı katkı malzemesi olarak kullanılması denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Sütçü vd. 2012).

## 2.6 KİLLERDE PİŞİRME SIRASINDA MEYDANA GELEN REAKSİYONLAR

### 2.6.1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Sistemi

İzolasyon tuğlaları genellikle oksitlerin bir çeşitinden imal edilir. Bunlardan en yaygını şamot kili (%42 SiO<sub>2</sub> ve %53 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) veya silikadır. Bu tuğlaların tercih sebebi genellikle yüksek gözenekliliğin bir sonucu olarak hafifliği ve düşük termal iletkenliğidir. Düşük gözeneklilik daha önceki bölümlerde de söz edildiği gibi yapıya üretim prosesi esnasında

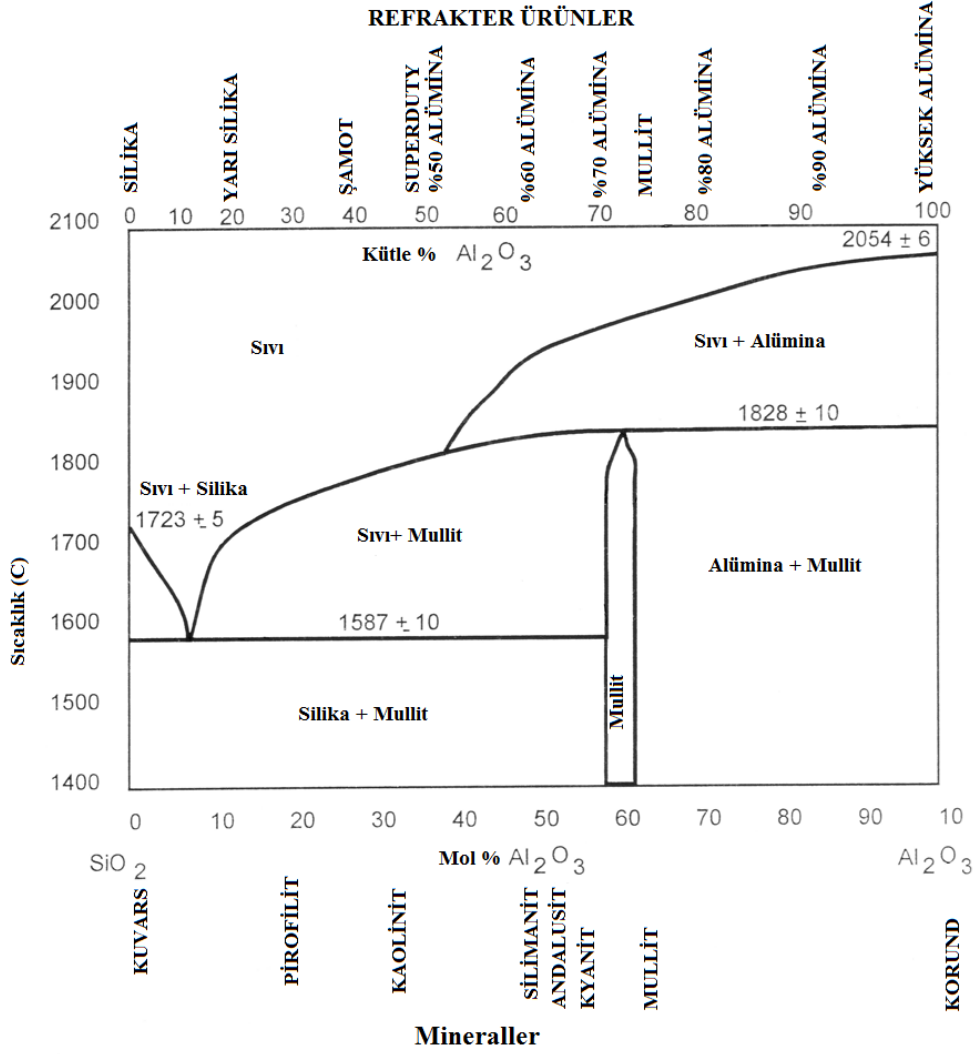
organik katkılar atılarak yanma sırasında bu katkıların yapıdan uzaklaştırılması sonucu elde edilebilir (Jonker 2006).

Killerin pişirilmesi sırasında yapılarında birçok fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Ayrıca bu meydana gelen reaksiyonlar elde edilecek ürünün mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde önemli yer tutar (Meyers ve Speyer 2003). Tablo 2.6'da bir kil bünyesinde farklı sıcaklıklarda meydana gelen dönüşümler gösterilmektedir.

Tablo 2.6 Killerin pişirilmesi sırasında meydana gelen reaksiyonlar (Kornmann 2007'den değiştirilerek).

Sıcaklık	Kaolinit	İllit	Montmorilonit	Klorit
130°C	Mevcut suyun kaybı			
150–250°C			Hidrasyon suyun kaybı	
400–550°C	Birleşik suyun kaybı			
470°C	Metakaolinit arasındaki birleşik suyun kaybı			
700–850°C			Olası spinel oluşumu	Brusit tabaka ve mikalı sisteminin birleşmiş suyunun kaybı
900–1000°C		Olası spinel oluşumu		
970–1300°C	Mullit oluşumu			
1050–1200°C		Sinterleme, mullitin kristalizasyonu, füzyon		Camsı faz oluşumu
1350–1700°C	Sinterleme, füzyon			

Kil teknolojisi için en önemli denge diyagram olarak  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  ikili sistemi gösterilebilir. Bu sistem kil ve kil-silika karışımlarının erime davranışını kapsar ve pişme sırasında meydana gelen reaksiyonları belirtir (Şekil 2.7). Ötektik nokta karışımlarının refrakterliğini arttırmak için karışımda alümina içeriği %5,5'den yukarıda olmak üzere yükseltilebilir (Jonker 2006; Al-Amaireh 2009).



Şekil 2.7 SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ikili sistemi diyagramı (Jonker 2006'dan değiştirilerek).

Refrakter malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde kimyasal bileşimleri önemli yer tutar. Bu bakımdan en yüksek sıcaklık yalıtım malzemesi genellikle silika (SiO<sub>2</sub>) ve alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) içerir. Alümina içeriğinin artmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanımda artmaktadır. Kompozisyon ve özelliklerine göre hafif izolasyon silika tuğlaları yoğunluk ve gözeneklilik dışında geleneksel silika tuğlaya benzer özellikler taşır. Şekil 2.7'den de görüldüğü gibi silika içeriği yüksek tuğlalar servis ömrü açısından yaklaşık 1650 °C' ye kadar hizmet verebilirken, daha yüksek sıcaklık uygulamaları için %90 alümina içerikli hafif izolasyon tuğlaları kullanılabilir. Bu tuğlalar yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci ve düşük ısı iletkenliğine sahiptirler (Jonker 2006; Al-Amaireh 2009 ).

## 2.7 GÖZENEKLİ YAPILARDA ISI TRANSFERİ

Refrakter malzemelerinde bazı parametreler özel önem taşımaktadır. Bunlar genellikle malzemenin ısı iletkenliğini de etkileyen mikroçatlaklar veya çatlak başlangıç noktaları, malzemenin maruz kaldığı termal yoğunluk sayısı, malzemenin tane yönelimi ve genel yapısıdır. Örnek verecek olursak; tüm malzemeler içinde en iyi ısı iletkenliğe sahip olan elmasın yapısında tek çeşit ve düzenli atomlar bulunmaktadır. Fakat aynı soydan gelen grafitte katmanlı bir yapı bulunduğundan ısı iletkenlik daha düşüktür. Bu yüzden grafitte daha yüksek ısı iletkenlik elde edilmesi için yönlendirilmiş ve yoğunlaştırılmış olması gerekir. Buradan da anlaşılacağı üzere aynı bileşimdeki kristal malzemelerin ısı iletkenliği camsı yapıya göre daha yüksektir. Bunun sebebi bir malzemedeki ısı iletimin fononların hareketiyle sağlanmasıdır. Kristal yapıda fononlar, camsı ve dağınık fazlara göre daha rahat hareket ederler ve ısı iletkenlik daha yüksek olur. Bir malzemenin yapısında bulunan gözenekler de fononların hareketine engel oluşturacak en önemli olgulardan biridir (Carniglia ve Barna 1992; Kimani ve Aduda 2004; Schacht 2004; Bengisu 2006; Jonker 2006). Genel olarak gözenekli bir yapıda ısı iletkenliği hesaplayabilmek için aşağıdaki bağıntıyı (Eşitlik 2.1) kullanmak uygun olacaktır;

$$k=k_s(1-P_c) \quad (2.1)$$

Burada  $k$ , gözenekli malzemenin ısı iletkenliğini,  $k_s$ , gözeneksiz malzemenin ısı iletkenliğini ve  $P_c$  ise kesit alanının gözenekliliğini ifade eder (Bengisu 2006).

Bir malzeme içerisinde sıcaklık artışı ile titreşim hareketleri de artar ve bu titreşim hareketleri ile bir enerji ortaya çıkar. Bu ortaya çıkan enerji fononlar vasıtasıyla katı malzeme kararlı hale gelene dek ısı akışı şeklinde aktarılır. Fononlarla iletilen bu ısı iletkenlik Eşitlik 2.2 ile hesaplanmalıdır (Bengisu 2006).

$$k_c=C_v v \lambda / 3 \quad (2.2)$$

Bu denklemde;  $k_c$ ; fononlarla oluşan ısı iletkenliği,  $C_v$ ; ısı sığayı,  $v$ ; bir fononun ortalama hızını ve  $\lambda$ ; fononların ortalama dalga boyunu ifade eder. Eğer yapıda sıcaklık artışı daha da fazla olursa ışınım ile ısı iletkenlik devreye girer ve buradan kaynaklanan ek ısı iletkenlik Eşitlik 2.3 ile hesaplanır (Bengisu 2006).

$$k_r = 16\sigma\eta^2 T^3 \lambda_m / 3 \quad (2.3)$$

Bu denklemde  $k_r$ ; ışıma ile oluşan ısı iletkenliği,  $\sigma$ , Stefan-Boltzmann değişmezini,  $\eta$ ; ortamın kırılma göstergesini ve  $\lambda_m$ ; fotonların ortalama serbest yolunu ifade etmektedir.  $k_r$ 'nin etkisi yoğun refrakterlerde genelde 1200 °C zerindeki sıcaklıklarda önem kazanırken yüksek gözeneklilik içeren refrakterlerde 500 °C gibi düşük sıcaklıklarda etkisini gösterebilir. Böyle bir sistemde genellikle etkin ısı iletkenlik  $k_c$  ve  $k_r$  etkilerinin Eşitlik 2.4'teki gibi birbirine eklenmesi ile elde edilebilir (Bengisu 2006).

$$k = k_c + k_r \quad (2.4)$$

## 2.8 ISIL İLETKENLİK ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

İzolasyon tuğla üretiminde önemli bir yer tutan ısı iletkenlik; bir malzeme içerisindeki ısının taşınım hızı olarak tanımlanmaktadır. Genellikle belirli bir süre içerisinde bir malzeme içinde belirli bir kesitteki ısı iletkenlik *Fourier* denklemi ile hesaplanır (Eşitlik 2.5) (Bengisu 2006).

$$dQ/dt = kAdT/dx \quad (2.5)$$

Bu denklemde t; süreyi, A; bir t süresince ve ısı taşınımına dik yöndeki kesit alanını,  $dT/dx$ ; kesit alanı içerisindeki sıcaklık değişim oranını, k; ortamın ısı iletkenliğini ifade eder. Daha öncede söz edildiği gibi refrakter malzemelerde ısı geçişi genellikle kafesin titreşimleri(fononlar) sonucu gerçekleşir ve 800°C gibi yüksek sıcaklıkların üzerine çıkıldığında ısı ışıınım ile ısı iletimi devreye girer (Carniglia ve Barna 1992; Bengisu 2006).

Refrakter malzemelerde ısı iletkenlik birkaç deneysel yolla tespit edilebilmektedir. En çok tercih edilen yöntemler genellikle sıcak tel yöntemi, korumalı sıcak parça yöntemi ve kalorimetre yöntemi olmak üzere üç başlık altında incelenebilir. Bu yöntemler kısaca alt başlıklar halinde incelenmiştir (Schacht 2004; Bengisu 2006).

### 2.8.1 Sıcak Tel Yöntemi

Sıcak tel yönteminde genellikle iki dikdörtgen prizması biçimindeki bloklardan yararlanılır. Daha sonra ısı iletkenliği ölçülecek olan malzemeye ince bir tel yerleştirilir ve değişik yöntemler ile istenilen veriler elde edilir. Sıcak tel yöntemi uygulanırken genellikle Eşitlik 2.6'dan yararlanır.

$$k = Q \ln(t_2/t_1) / [4\pi(T_2 - T_1)] \quad (2.6)$$

Bu denklemde  $k$ ; ısı iletkenliği,  $Q$ ; birim tel uzunluğuna düşen güç girdisini (W/m),  $t_2$  ve  $t_1$  ise  $T_2$  ve  $T_1$  (Kelvin olarak) sıcaklıklarına karşı gelen süreleri ifade eder (Kimani ve Aduda 2004; Bengisu 2006).

Sıcak tel yönteminin bir uygulamasında sıcak tel olarak bir ısı çifti (termokupul) kullanılmıştır. Bu ısı çifti sayesinde aynı zamanda sıcaklık değeride ölçülmüş olur. Mantık olarak elektriksel direnç kullanılarak, tele bir güç kaynağı bağlanarak doğru akım verilir. Daha sonra sistemdeki akım, tele seri bağlı bir karşılaştırma direnci ( $R_s$ ) üzerinden gerilim düşüşü ( $V_s$ )'nün ölçülmesi ile hesaplanır ve bulunan bu verilerden denklem 2.7 kullanılarak ısı iletkenlik ısı iletkenlik değerleri elde edilebilir (Kimani ve Aduda 2004; Schacht 2004; Bengisu 2006).

$$k = VV_s \ln(t_2/t_1) / [4\pi l R_s (T_2 - T_1)] \quad (2.7)$$

Bu denklemde  $k$ ; ısı iletkenliği,  $V$ ; sıcak tel üzerindeki gerilim düşüşünü,  $t_2$  ve  $t_1$  ise  $T_2$  ve  $T_1$  (Kelvin olarak) sıcaklıklarına karşı gelen süreleri ve  $l$ ; telin uzunluğunu gösterir (Bengisu 2006).

### 2.8.2 Korumalı Sıcak Parça Yöntemi

Genellikle incelenen yöntemler arasında en kesin ve doğru sonucu veren yöntem korumalı sıcak parça yöntemidir. Bu yöntemde ısı iletkenliğinin ölçülebilmesi için kararlı bir durum elde edilmelidir. Korumalı sıcak parça yöntemi mantık olarak ısı iletkenliği bilinen iki silindir arasına boyu yaklaşık çapına eşit bir silindir numune yerleştirilerek karşılaştırma esasına dayanır. Bu iki silindir, arasında bulunan numune ile alttan ve üstten sürekli olarak

ısıtılarak bir sıcaklık farklılığı oluşturulur. Daha sonra zaman ilerledikçe kararlı bir ısı akışı elde edilir ve ısı iletkenliği belirlenecek olan malzemenin değerinin elde edilebilmesi için alt ve üst silindirler için Eşitlik 2.8 kullanılarak bir hesaplama yapılır. Bu iki silindirden hesaplanan ortalama değerler alınarak yine Eşitlik 2.8 kullanılır ve bu defa istenilen malzemenin ısı iletkenliği hesaplanır (Bengisu 2006).

$$dQ/dt=kAdT/dx \quad (2.8)$$

Denklemden  $t$ ; süreyi,  $A$ ; bir  $t$  süresince ve ısı taşınımına dik yöndeki kesit alanını,  $dT/dx$ ; kesit alanı içerisindeki sıcaklık değişim oranını,  $k$ ; ortamın ısı iletkenliğini ifade eder. Bu yöntemin dezavantajı gerekli olan numunelerin büyük olması ve yöntemin uygulama süresinin uzun olmasıdır (Bengisu 2006).

### 2.8.3 Kalorimetre Yöntemi

Kalorimetre yöntemi de korumalı sıcak parça yöntemi gibi büyük numunelerle ve uzun süre gerektiren bir yöntemdir. Bu yöntemde de kararlı durum elde ederek ölçüm elde etmek gerekmektedir. Yöntem işleyiş itibarıyla tuğla biçiminde bir numune etrafı iki adet koruyucu tuğla ile çevrelendikten sonra verilen ısı bu sistemin üzerinden geçerek su ile soğutulmakta olan bakır bir kalorimetreye ulaşır. Daha sonra elde edilmek istenen ısı iletkenlik değeri oluşan sıcaklık farkından ve numune üzerindeki ısı akış hızından hesaplanarak bulunur (Bengisu 2006).

## 2.9 İZOLASYON TUĞLALARININ TERMAL İLETKENLİĞİNE POROZİTE ETKİSİ

Refrakter malzemeler kullanıldıkları alana göre aşınma dirençleri yüksek, hafif ve bir okadar da belirli yükler altında dayanımı yüksek olmalıdır. Bunların yanında refrakterliğin asıl amacı olan ısı yalıtımı sağlama noktasında en iyi özelliklere sahip olmalıdır. Burada ısı yalıtım sağlamak malzemenin termal iletkenliği ile yakından ilgilidir. Termal iletkenliği etkileyen en önemli faktörün malzemenin mevcut gözenek yapısı ve miktarı olduğu bilinmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda kullanılan malzemenin kristal yapıda ve nispeten yoğun olduğunda sıcaklık arttıkça termal iletkenliğin arttığı gözlenmiştir. Bununla beraber yüksek sıcaklıklarda bir yapıda boşlukta ısının radyasyon ile iletimi devreye

girmekte ve daha farklı sonuçlar elde edilmektedir. Ayrıca gözenek boyutunun da etkili olduğu bilinmekte olup, toplam gözenekliliğin aynı olduğu bir yapıda yapılan karşılaştırmada özellikle gözenek boyutundaki azalma ile yüksek sıcaklıklarda daha düşük termal iletkenlik değerleri bazı araştırmacılar tarafından elde edilmiştir (Carniglia ve Barna 1992; Van Garsel vd. 1998; Kimani ve Aduda 2004; Schacht 2004).

Refrakter malzemelerin termal iletkenlik özelliklerini onların sahip oldukları ısı iletim karakteristikleri belirler. Yüksek sıcaklıklarda ana ısı iletim mekanizması radyasyondur ve gözenekler radyasyon için bir vakum davranışı sergilerler. Radyasyonla termal iletkenlik gözenek boyutu ile orantılıdır ve gözenek boyutunun azalışı daha düşük radyant termal iletkenlik demektir. Enerji kayıplarının azaltılmasında kullanılan yüksek sıcaklık malzemelerin üretimleri sırasında yapılarına organik bileşenler karıştırılarak bu bileşiklerin pişirme esnasında yapıdan uzaklaştırılması sonucu gözeneklilik elde edilmesi yaygın bir uygulamadır. Fakat üretilen izolasyon malzemelerinin maliyet ve özellikleri bakımından doğal gözenekliliğe sahip olmaları bazı avantajlar sağlayacaktır. Örneğin; vermikülit ve diatomit gibi doğal gözenekliliğe sahip hammaddeler kullanılarak düşük yoğunluk ve termal iletkenliğe sahip hafif izolasyon tuğlaları olumlu sonuçlar vermiş ve endüstride kullanımda ümit vaat etmiştir (Carniglia ve Barna 1992; Suvorov ve Skurikhin 2002; Schacht 2004; Jonker 2006).

Sonuç olarak termal iletkenlik yalıtım malzemelerinde bulunan gözenek miktarı ve büyüklüğü ile yakından ilgilidir. Bunun yanında gözenek içinde bulunan gazın cinsi ve gaz basıncı da önemlidir. Düşük bir termal iletkenlik elde edilebilmesi için üretilen malzemedeki gözeneklerin olabildiğince küçük olmasına dikkat edilmeli, yani mikrogözenekli bir yapı oluşturulmaya çalışılmalıdır. Dolayısıyla gevşek kristal paket yapısına sahip bir mikroyapı oluşturulmalıdır. Ayrıca yapıda çatlaklardan ve büyük gözeneklerden kaçınılması gerekmektedir (Carniglia ve Barna 1992; Schacht 2004; Jonker 2006).

## **2.10 TUĞLALARIN MEKANİK DAYANIMI ÜZERİNE POROZİTENİN ETKİSİ**

Endüstride kullanılacak olan izolasyon amaçlı tuğlaların enerji sarfiyatlarını azalttığı kadar ekonomik olmaları ve kullanılabilir olmaları açısından mekanik özellikleri de önemli yer tutmaktadır. Mekanik özellikleri belirleyen en önemli unsur kullanılan ana malzemenin



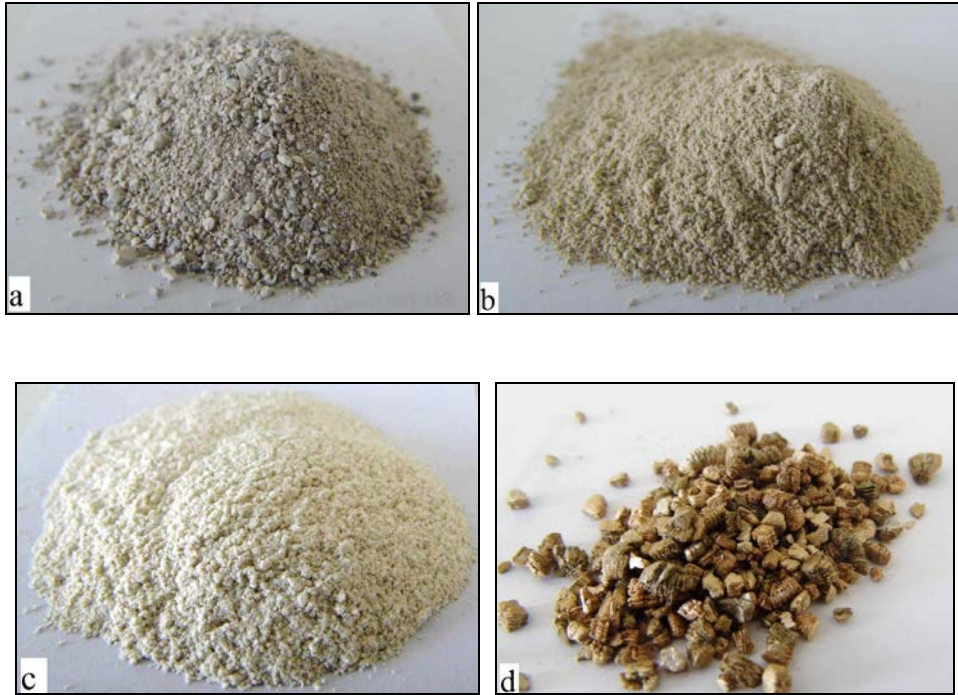
özellikleri yanında elde edilen tuğlanın üretim yöntemi ve yapıya ilave edilmiş olan diğer katkılardır. Bunun yanında izolasyonu sağlamak ve ısıl iletkenlik faktörünü en aza indirmek için elde edilen gözenekli yapı da malzemenin mekanik özelliklerini belirlemede çok önemlidir. Bilinen bir gerçektir ki yüksek gözeneklilik ile yüksek mukavemet özellikleri ters orantılıdır. Dolayısıyla yapıda daha büyük ve daha çok sayıda gözenek elde edilmesi kontrolsüz olarak yapılırsa malzemenin dayanımı ve mekanik özellikleri o ölçüde kötü etkilenecektir. Genel bir refrakter malzemede yapıdaki camsı faz miktarının artmasıyla dayanım artar. Fakat aşınma direnci gereken yerlerde yüksek sıcaklıklara çıkıldığında camsı fazın artması istenmez. Günümüz sanayinde yüksek mekanik özellikler ve aşınma direnci istenen yerlerde, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ince taneli ve yapısında çok az gözenek barından refrakter malzemler kullanılmaktadır. Çünkü gözenek miktarı ve gözeneğin boyutunun azalması özellikle mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemektedir. Bunun yanında daha düşük sıcaklıklarda ve mekanik özelliklerin çok önemli olmadığı bölgelerde hafif ve yüksek gözenekliliğe sahip izolasyon tuğlalarının kullanımı avantaj sağlamaktadır (Jonker vd. 1998; Jonker 2006'dan; Al-Amaireh 2009).

## BÖLÜM 3

### MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 KULLANILAN HAMMADDELER

Hammadde olarak, genişletilmiş vermikülit (Yıldızeli, Sivas, Türkiye), diatomit/Kizelguhr (Çankırı, Türkiye), refrakter kili (yüksek alüminalı ~%40'lık refrakter kili) ve bağlayıcı refrakter kil hammaddeleri kullanılmış ve hammaddeler izole refrakter üreticisi Selko Ateş Tuğla A.Ş. (Bartın, Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Şekil.3.1'de kullanılan hammaddeler gösterilmiştir. Tablo 3.1'de genişletilmiş vermikülitin özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.1 Kullanılan hammaddeler; a) Refrakter kili, b) Bağlayıcı refrakter kil, c) Diatomit (Kizelgur), d) Genleştirilmiş vermikülit.

Tablo 3.1 Genleştirilmiş vermikulitin özellikleri.

<b>Renk</b>	Gümüş
<b>Şekil</b>	Akordeon şeklinde granül
<b>Su Tutma Kapasitesi</b>	240 wt%
<b>Kasyon değişim kapasitesi</b>	90 meg/100 g
<b>pH (Suda)</b>	6.1
<b>Isı iletkenlik değeri</b>	0.063 W/mK
<b>Yanabilirlik</b>	Yanmaz
<b>Sinterleme Sıcaklığı</b>	1170°C
<b>Özısı</b>	0.22 kcal/kgK
<b>Bulk Yoğunluk</b>	140 kg/m <sup>3</sup>

## 3.2 YÖNTEM

### 3.2.1 Karışımların Hazırlanması

Bu çalışmada, 1100°C'den düşük sıcaklık ortamlarında hizmet verebilen, hafif ve mikro-gözenekli refrakter izolasyon malzemelerinin farklı hammaddelerden üretilmesi, geliştirilmesi ve özelliklerinin incelenmesi çalışılmıştır. Hammadde olarak, genleştirilmiş vermikulit (Yıldızeli, Sivas, Türkiye), diatomit/Kizelguhr (Çankırı, Türkiye), refrakter kili (yüksek alüminalı ~%40'luk refrakter kili) ve bağlayıcı refrakter kil hammaddeleri kullanılmış ve hammaddeler izole refrakter üreticisi Selko Ateş Tuğla A.Ş. (Bartın, Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Genleştirilmiş vermikulit ve refrakter kili hammaddeleri ön işlemlerden (öğütme ve eleme) geçirilerek (Şekil 3.2) farklı kompozisyonlarda karışımlar hazırlanmıştır. Deneysel numuneler için hazırlanan karışımların kompozisyonu Tablo 3.2'de verilmektedir. Buna göre, hazırlanan karışımlar 6 farklı refrakter grubu şeklinde sınıflandırılmıştır. Bu karışım grupları şöyledir;

- (1) Refrakter kili-bağlayıcı refrakter kili (SC),
- (2) Vermikulit-bağlayıcı refrakter kili (VC),

- (3) Diatomit-bağlayıcı refrakter kili (DC),
- (4) Refrakter kili-vermikulit-bağlayıcı refrakter kili (SCV),
- (5) Refrakter kili-diatomit-bağlayıcı refrakter kili (SCD),
- (6) Vermikulit-diatomit-bağlayıcı refrakter kili (VCD),



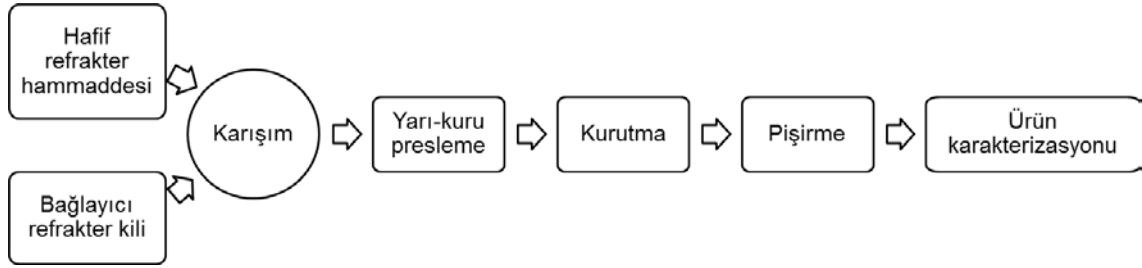
Şekil 3.2 0-150  $\mu\text{m}$  boyutuna elenmiş refrakter kili.

Hazırlanan ikili karışımlarda farklı oranlardaki bağlayıcı refrakter kilinin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve karışımlar için en uygun bağlayıcı kil oranı belirlenmiştir. Üçlü karışımlarda ise, belirlenen bağlayıcı refrakter kil oranı sabit tutulup karışımları oluşturan diğer iki hammaddenin oranları değiştirilerek üretilen malzeme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hazırlanan her bir grup, 3 farklı sıcaklıkta (900°C, 1000°C, 1100°C) üretilerek pişme sıcaklığının malzeme özellikleri üzerindeki etkisi ayrıca incelenmiştir.

Tablo 3.2 Deneysel numuneler için hazırlanan karışımların kompozisyonu.

Kod (900-1000-1100)	Refrakter kili, %	Vermikulit, %	Diatomit, %	Bağlayıcı kil, %
SC-1-6-11	90	-	-	10
SC-2-7-12	85	-	-	15
SC-3-8-13	80	-	-	20
SC-4-9-14	75	-	-	25
SC-5-10-15	70	-	-	30
VC-1-6-11	-	90	-	10
VC-2-7-12	-	80	-	20
VC-3-8-13	-	70	-	30
VC-4-9-14	-	60	-	40
VC-5-10-15	-	50	-	50
DC-1-6-11	-	-	90	10
DC-2-7-12	-	-	80	20
DC-3-8-13	-	-	70	30
DC-4-9-14	-	-	60	40
DC-5-10-15	-	-	50	50
SCV-1-6-11	70	0	-	30
SCV-2-7-12	65	5	-	30
SCV-3-8-13	60	10	-	30
SCV-4-9-14	55	15	-	30
SCV-5-10-15	50	20	-	30
SCD-1-6-11	70	-	0	30
SCD-2-7-12	65	-	5	30
SCD-3-8-13	60	-	10	30
SCD-4-9-14	55	-	15	30
SCD-5-10-15	50	-	20	30
VCD-1-9-17	-	0	70	30
VCD-2-10-18	-	10	60	30
VCD-3-11-19	-	20	50	30
VCD-4-12-20	-	30	40	30
VCD-5-13-21	-	40	30	30
VCD-6-14-22	-	50	20	30
VCD-7-15-23	-	60	10	30
VCD-8-16-24	-	70	0	30

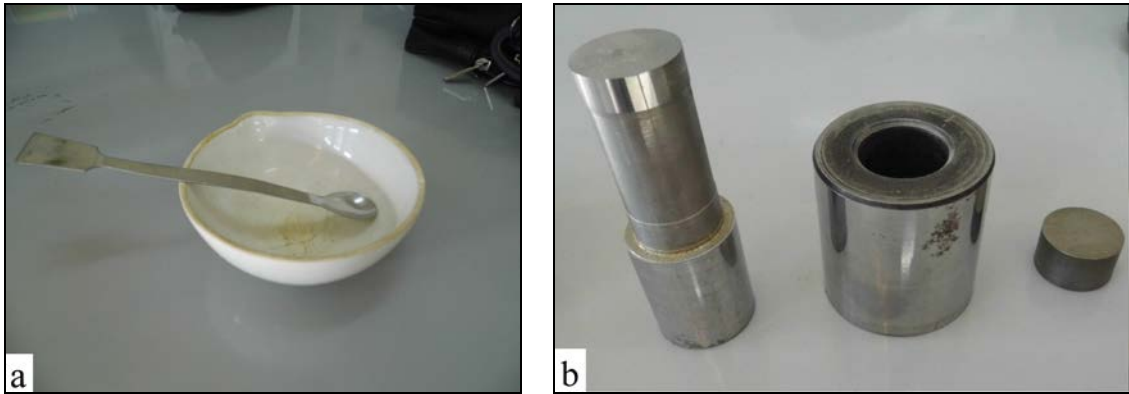
Hafif ve gözenekli ısı yalıtım refrakter numunelerin üretimi için deneysel akış şeması Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3 İzole refrakter üretimi için deneysel akış şeması.

### 3.2.2 Numunelerin Şekillendirmesi ve Pişirilmesi

Karışımlar önce kuru karıştırma yöntemiyle homojen olarak karıştırılmış, bağlayıcı kil oranındaki artışa bağlı olarak % 6 ila 10 arasında karışımlara sprey su püskürtülerek nemlendirilmesi sağlanmıştır. Nemli toz karışımları tekrar porselen havanda (Şekil 3.4) karıştırılarak, hazırlanan karışımlar hidrolik preste (Yıldız Hidrolik, 15ton) (Şekil 3.5) metal pelet kalıbı (25 mm çapında) kullanılarak presleme yöntemiyle 50 MPa basınç altında şekillendirilmiştir.



Şekil 3.4 Porselen havan (a) ve 25mm çapında metal pelet kalıbı (b).





Şekil 3.5. Numuneleri şekillendirmek için kullanılan 15 ton kapasiteli hidrolik pres (a) ve şekillendirilmiş numuneler (b).

Kalıptan çıkarılan numuneler (Şekil 3.6) önce etüvde iki kademeli ( $40^{\circ}\text{C}/12$  saat ve  $100^{\circ}\text{C}/2$  saat) kurutma işlemine tabi tutularak numune içindeki nem uzaklaştırılmıştır.



Şekil 3.6 Kalıptan çıkarılan numuneler. Sinterleme öncesi (a) ve sonrası (b).

Kuru numuneler 900, 1000 ve 1100°C sıcaklık aralıklarında kademeli ısıtma rejimiyle (600°C'ye kadar 1°C/dk hızla yavaş bir şekilde, sonra istenen sıcaklığa kadar 5°C/dk hızla) 2 saat süreyle laboratuvar tipi yüksek sıcaklık fırınında (Şekil 3.7) (Protherm PLF1200/15, Alser Teknik, Ankara) sinterlenmiştir.



Şekil 3.7 Numuneleri sinterlemek için kullanılan 1200°C'lik yüksek sıcaklık fırını.

### **3.3 HAMMADDELERİN ANALİZİ**

#### **3.3.1 Tozların Tane Boyut Dağılımı ve Fiziksel Özellikleri**

Tozların tane boyut dağılımı ve fiziksel özellikleri incelenerek bulgular ve değerlendirmeler bölümünde verilmiştir.

#### **3.3.2 Kimyasal Kompozisyon**

Hammaddelerin kimyasal kompozisyonları X-ışını flüoresans spektrometresi (XRF) kullanılarak ölçülmüştür.

#### **3.3.3 Mineralojik Faz Analizi**

Hammaddelerin mineral faz içerikleri X-ışını kırınımı cihazı (XRD, Philips X'Pert Pro) kullanılarak analiz edilmiştir. Toz haldeki hammaddelerin X-ışını desen analizleri XRD cihazında Cu-K<sub>α</sub> radyasyon ( $\lambda=1.54 \text{ \AA}$ ) ile 40 kV akımda 5-70° 2 $\theta$  aralığında gerçekleştirilmiştir.



### 3.3.4 Thermo-gravimetrik Analiz

Hammaddelerin ısısal davranışları termo-gravimetrik analiz cihazı (TGA, Perkin Elmer TG) ile azot atmosferi ortamında (20 ml/dak akışla) 20°C/dakika hızla 1100°C sıcaklığa kadar gerçekleştirilmiştir.

### 3.4 ÜRETİLEN NUMUNELERİN ANALİZİ

Üretilen numunelerin, fiziksel (yoğunluk, gözenek oranı, boyutsal değişimi), termal (ısı iletkenlik), mekanik (basma dayanımı) ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir.

#### 3.4.1 Fiziksel Analizler (Bulk yoğunluk, görünür gözenek, kızdırma kaybı)

Üretilen numunelerin yoğunluk ve gözenek miktarı Arşimet yöntemi (ASTM C20-00 (2010) Standard) kullanılarak suda kaynatma yöntemiyle ölçülmüştür. Bu metot sinterlenmiş ürünlerin bulk yoğunluk, görünür gözenek, su emme, görünür spesifik yoğunluk gibi fiziksel özelliklerini incelemeyi kapsar. Öncelikle pişmiş numunelerin kuru ağırlıkları tartılır. Sonra her bir örnek suda 2 saat süreyle kaynatılır. Kaynatıldıktan sonra her örnek oda sıcaklığına soğuması ve suyun numune içine tam nüfuz etmesi için suda 12 saat süreyle bekletilir. Sonra Arşimet terazisinde su içerisindeki asılı ağırlıkları ve suya doymuş ağırlıkları tartılır. Bu üç farklı ağırlık türünden aşağıda verilen Eşitlikler (3.1, 3.2, 3.3) ile numunelerin yoğunluk ve gözenek oranları tespit edilir.

$$B(g/cm^3)=D/(W-S) \quad (3.1)$$

$$T(g/cm^3)=D/(D-S) \quad (3.2)$$

$$P(\%)=[(W-D)/(W-S)] \times 100 \quad (3.3)$$

Burada;

*D*: kuru ağırlık (dry weight) (g),

*S*: sudaki asılı ağırlık (suspended weight) (g),

*W*: suya doymuş ağırlık (saturated weight)(g),

*P*: Görünür gözenek(%),

*B*: Bulk yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>),

$T$ : Görünür spesifik gravite( $\text{g}/\text{cm}^3$ )'dir.

Kuruma ve pişme sonrası numunelerin hassas terazi ile ağırlık ve dijital kumpas ile boyutsal ölçümleri yapılarak kızdırma kaybı (loss on ignition: LOI, %) (Eşitlik 3.4) ve boyutsal değişimleri ölçülmüştür.

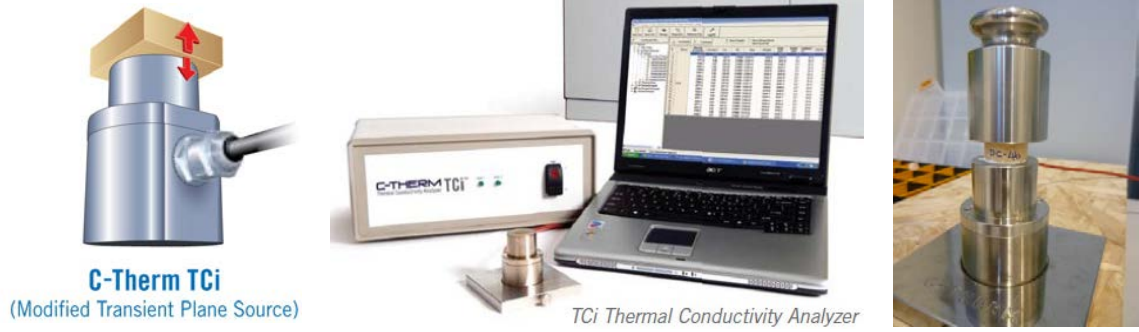
$$LOI_{1000} = [(DW_{100} - DW_{1000}) / DW_{100}] \times 100 \quad (3.4)$$

$DW_{100}$  :  $100^\circ\text{C}$ 'de 2h kurutulmuş örneğin ağırlığı (g)

$DW_{1000}$  :  $1000^\circ\text{C}$ 'de 2h kızdırılmış örneğin ağırlığı (g)

### 3.4.2 Isı İletim Katsayısı Ölçümü

Numunelerin ısı iletkenlik değerlerini ölçmek için Şekil 3.8'de gösterilen C-Therm marka TCi model ısı iletkenlik ölçüm cihazı (CTi C-Therm, Kanada) kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklarda üretilen numunelerin ısı iletkenlik değerleri oda sıcaklığında ölçülmüştür. Bu cihaz Oviedo Üniversitesi (Gijon, İspanya) GICONSIME grubu araştırma laboratuvarlarında bulunmakta olup termal ölçümler için bu gruptan destek alınmıştır.



Şekil 3.8 Isıl iletkenlik ölçüm sensörü ve cihazı.

### 3.4.3 Mekanik Dayanım Testleri (Basma Mukavemeti)

Ürünlerin basma mukavemetleri için Bartın Çimento(Sanko Holding)'da bulunan mekanik test cihazında (Atom teknik) basma testi uygulanmıştır (Şekil.3.9).



Şekil 3.9 a) Bartın Çimento (Sanko Holding)'da bulunan mekanik test cihazı, b) basma testi uygulanmış numune.

#### 3.4.4 Mikroyapısal Analiz (SEM)

Pişmiş numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile mikroyapı incelemeleri yapılmış ve EDS analizleriyle de pişen numune bünyesinin elementel/oksit analizi yapılmıştır. Ürünlerin SEM analizleri için Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (AKU-TUAM) bulunan taramalı elektron mikroskobu (LEO 1430 VP) kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 AKU-TUAM'da bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM).

## BÖLÜM 4

### BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

#### 4.1 HAMMADDELERİN ANALİZİ

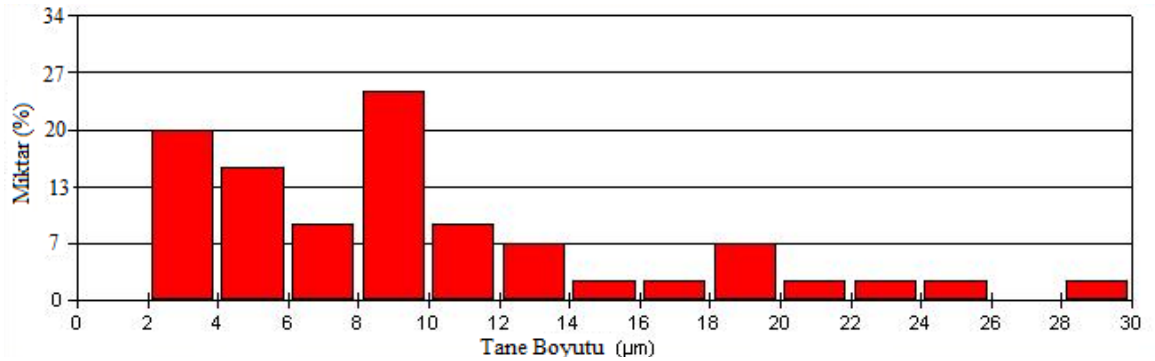
Hammaddelerin tane boyut dağılımı, partikül morfolojisi, mineral faz içerikleri, kimyasal kompozisyonları, ısıl davranışları özellikleri için karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1.1 Hammaddelerin Tane Boyut Dağılımı (Elek Analizi) ve Fiziksel Özellikler

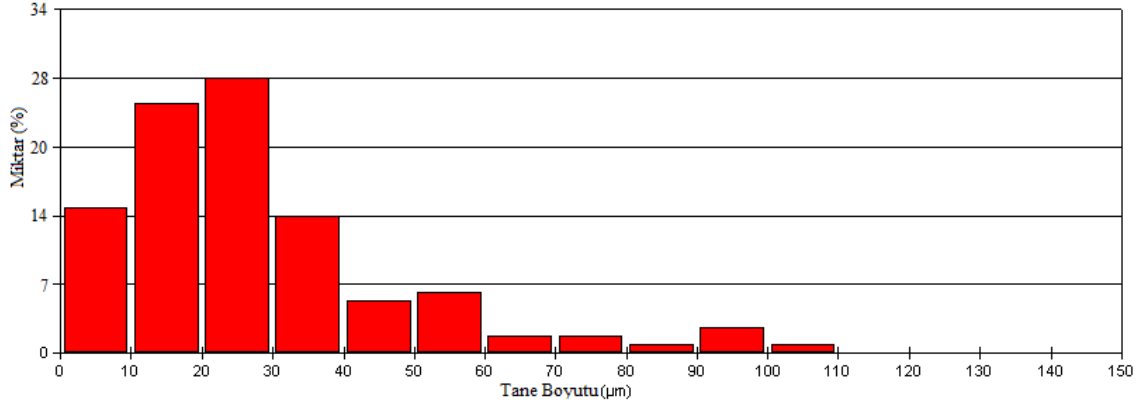
Çalışmada kullanılan hammaddelerin fiziksel özellikleri Tablo 4.1’ de gösterilmiş olup tane boyut dağılımları Şekil 4.1-4’te gösterilmektedir.

Tablo 4.1 Hammaddelerin fiziksel özellikleri.

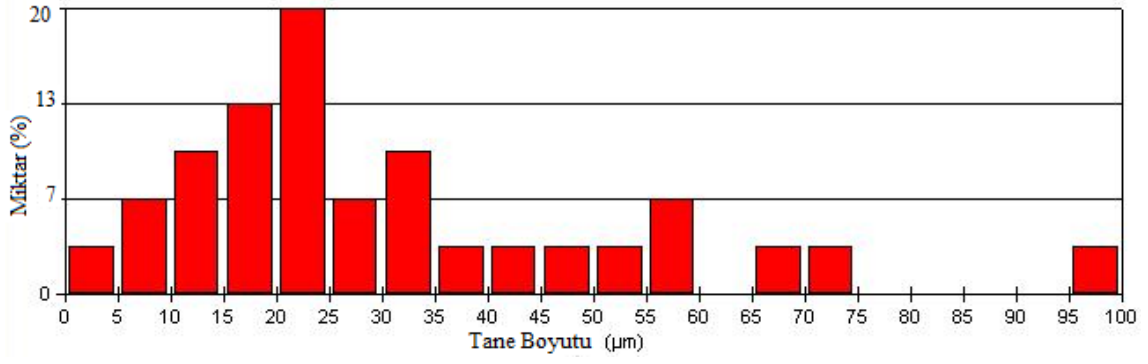
	Bağlayıcı Refrakter Kili	Refrakter Kili	Vermikülit	Diatomit
<b>Renk</b>	Koyu gri	Gri	Gümüş kahverengi	Beyaz
<b>Porozite</b>	% 5-8	-	-	% 74-80
<b>Tane Boyutu</b>	<150 mikron	<150 mikron	<150 mikron	-



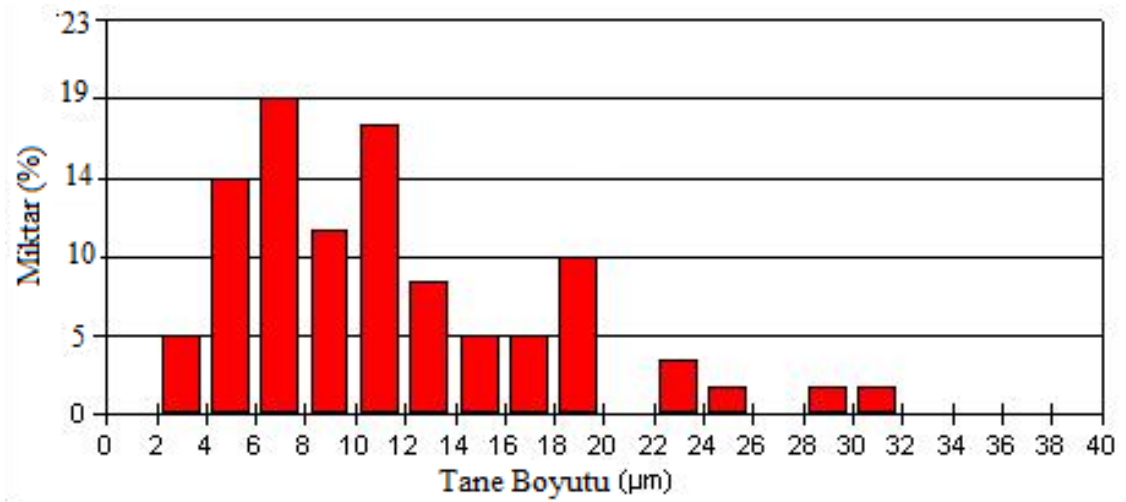
Şekil 4.1 Bağlayıcı refrakter kil hammaddesinin tane boyut dağılımı.



Şekil 4.2 Refrakter kil hammaddesinin tane boyut dağılımı.



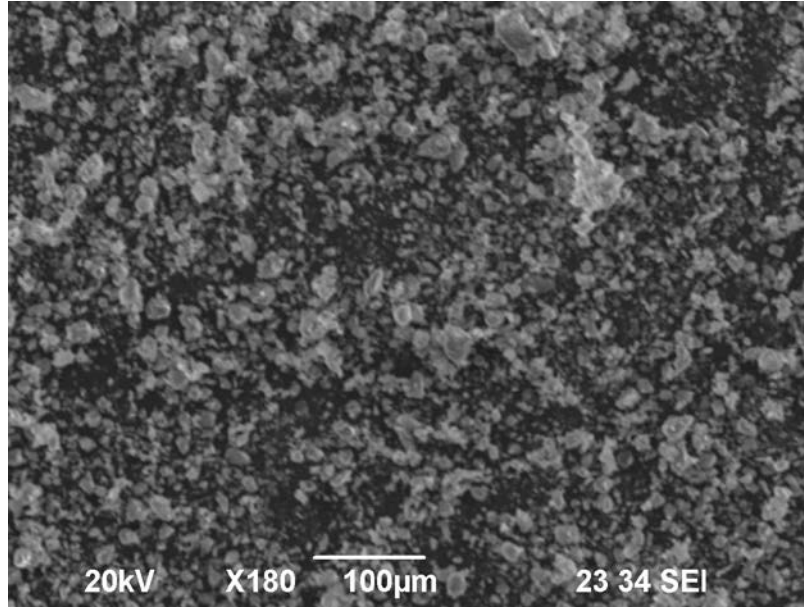
Şekil 4.3 Öğütülmüş vermikülit hammaddesinin tane boyut analizi.



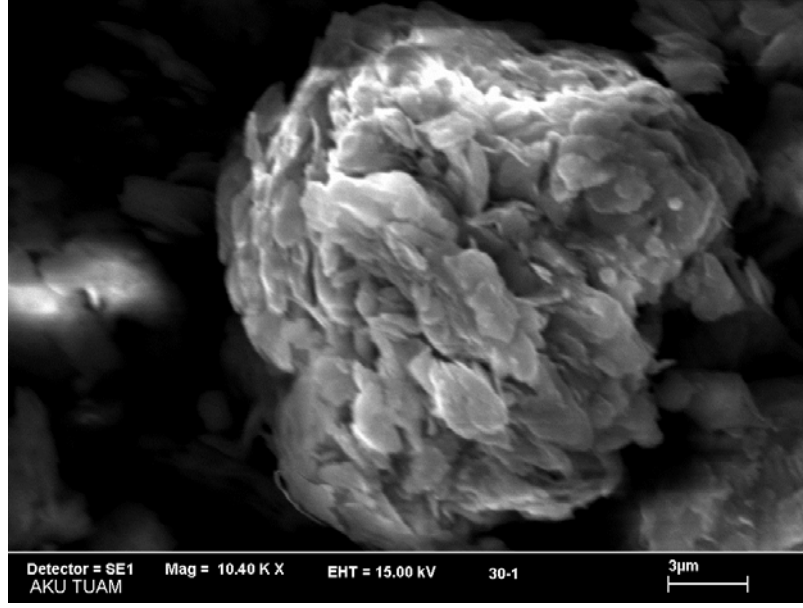
Şekil 4.4 Diatomit hammaddesinin tane boyut analizi.

#### 4.1.2 Hammaddelerin Mikroyapısal Morfolojisi (SEM, EDS)

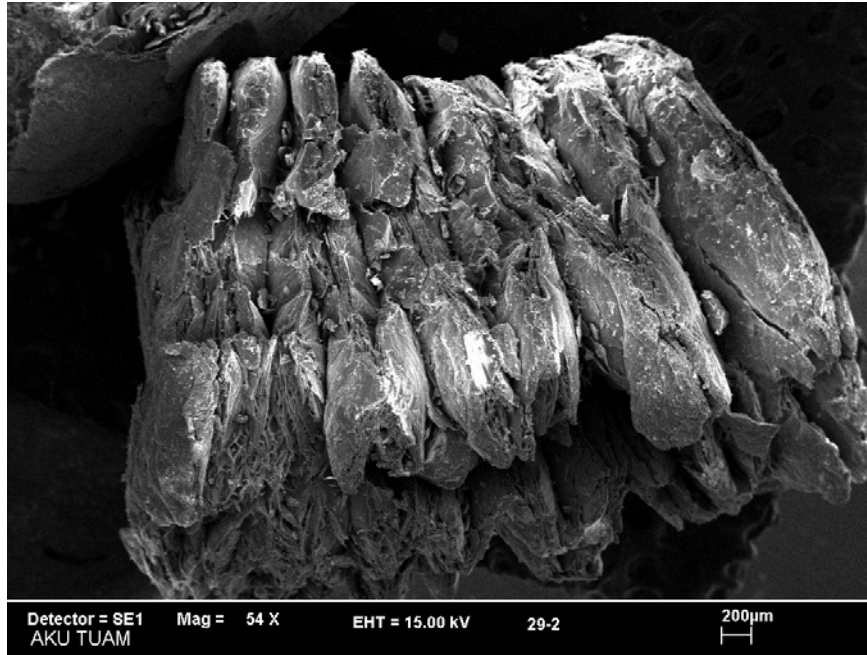
Şekil 4.5’de refrakter kil hammaddesinin, Şekil 4.6’da bağlayıcı refrakter kil hammaddesinin, Şekil 4.7’de genişletilmiş vermikülit hammaddesinin, Şekil 4.8’de genişletilmiş vermikülitin öğütülmüş halinin, Şekil 4.9 ve 4.10’da diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüleri ve Şekil 4.11’de ise Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin EDS (elektron X-ışını dispersif spektroskopisi) analizi gösterilmektedir.



Şekil 4.5 Refrakter kil hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.

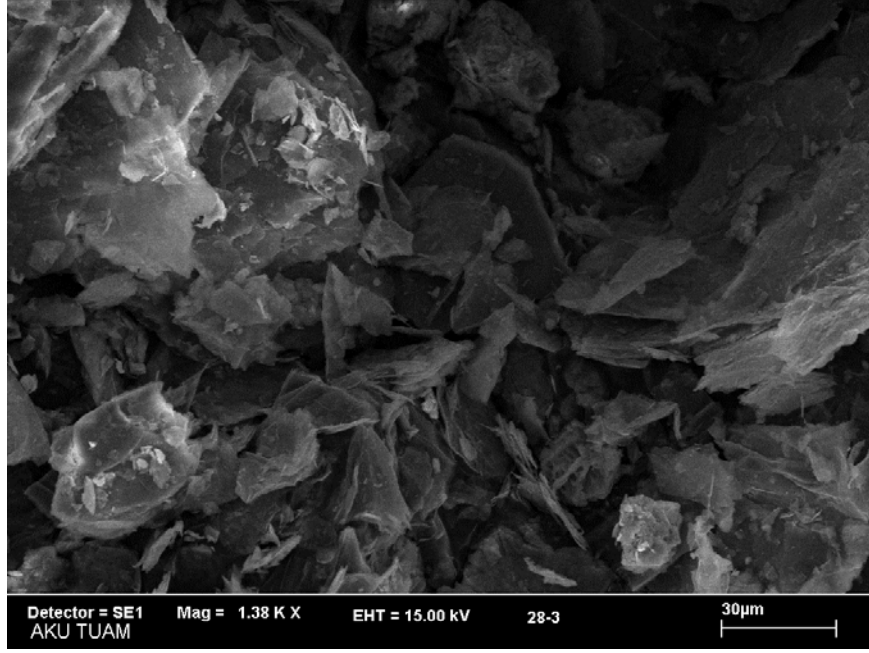


Şekil 4.6 Bağlayıcı refrakter kil hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.

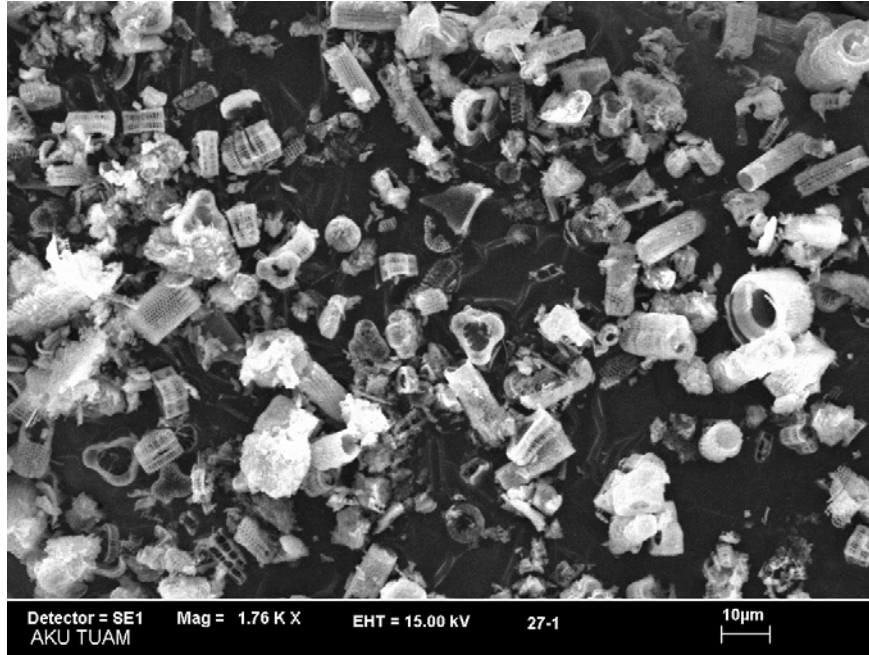


Şekil 4.7 Genleştirilmiş vermikülit hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.





Şekil 4.8 Genleştirilmiş vermikülitin öğütülmüş halinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.



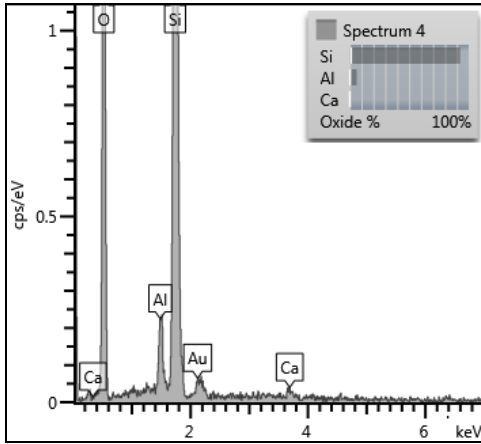
Şekil 4.9 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile çekilmiş genel görüntüsü.





Şekil 4.10 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüksek büyütmede çekilmiş görüntüsü.

Şekillerden görüldüğü gibi refrakter ve bağlayıcı refrakter kil hammaddeleri son derece homojen ve yoğun bir yapıya sahipken, vermikülit ve diatomit hammaddeleri nispeten katmanlı ve gözenekli yapılara sahiptir.



Element	Wt%	Atomik %	Oksit	Oksit %
<b>O</b>	52.58	66.12		
<b>Al</b>	3.22	2.40	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	6.09
<b>Si</b>	43.34	31.05	<b>SiO<sub>2</sub></b>	92.72
<b>Ca</b>	0.85	0.43	<b>CaO</b>	1.19
<b>Toplam</b>	100.00	100.00		100.00

Şekil 4.11 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin EDS (elektron X-ışını dispersif spektroskopi) analizi.

#### 4.1.3 Hammaddelerin Kimyasal Kompozisyonu (XRF)

Çalışmada kullanılan bağlayıcı refrakter kili, refrakter kili, diatomit ve genişletilmiş vermikülit hammaddelerinin kimyasal kompozisyonları (XRF analizi) Tablo 4.2’de verilmiştir.

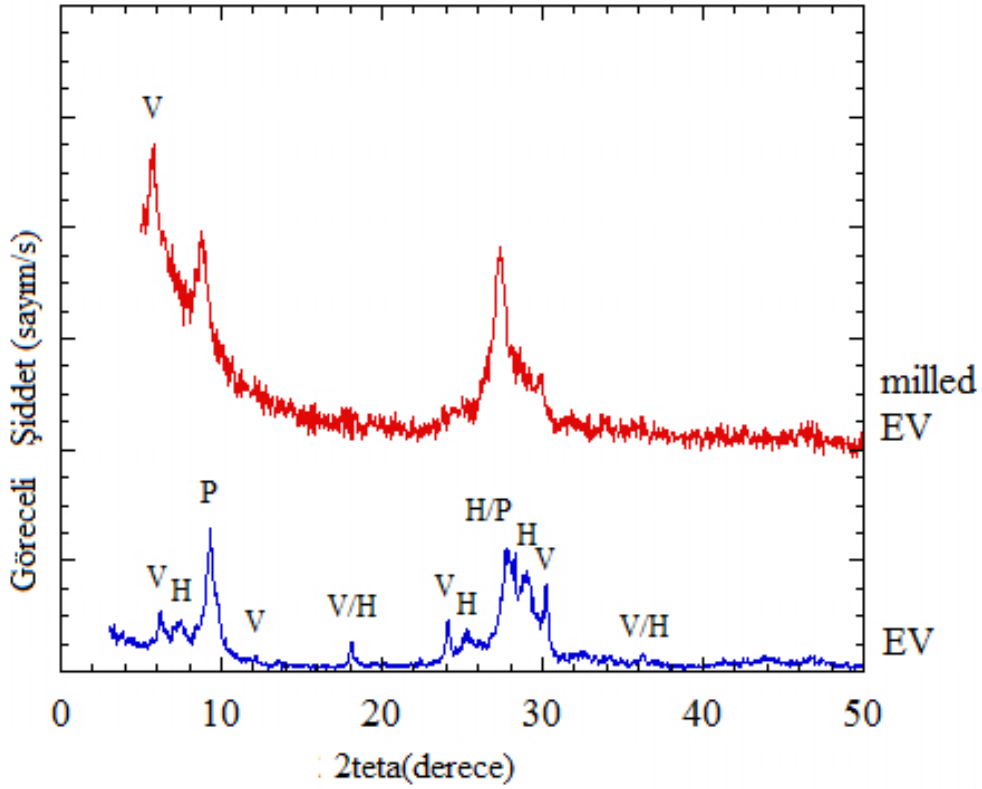
Tablo 4.2 Kullanılan hammaddelerin kimyasal kompozisyonu (XRF analizi, ağırlık %).

Oksitler	Bağlayıcı refrakter kili	Refrakter kili (%40’lık kil)	Diatomit	Genleştirilmiş vermikülit
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,8	32,4	8,37	17,7
SiO <sub>2</sub>	57,5	48,9	75,1	36,9
FeO and Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,75	1,89	1,93	11,2
MgO	0,98	0,51	0,55	16,4
CaO	0,35	0,43	2,35	3,54
K <sub>2</sub> O	2,6	0,45	0,58	2,64
Na <sub>2</sub> O	0,16	0,1	0,03	0,15
TiO <sub>2</sub>	0,9	0,9	0,32	2,18
Kızdırma kaybı (LOI)	10,0	14,4	10,5	9,2

Çalışmada kullanılan hammaddelerin kimyasal kompozisyonlarına baktığımızda en yüksek SiO<sub>2</sub> oranının diatomit hammaddesinde olduğu ve sırasıyla bağlayıcı refrakter kili, refrakter kili ve vermikülit hammaddesinde olduğu görülmektedir.

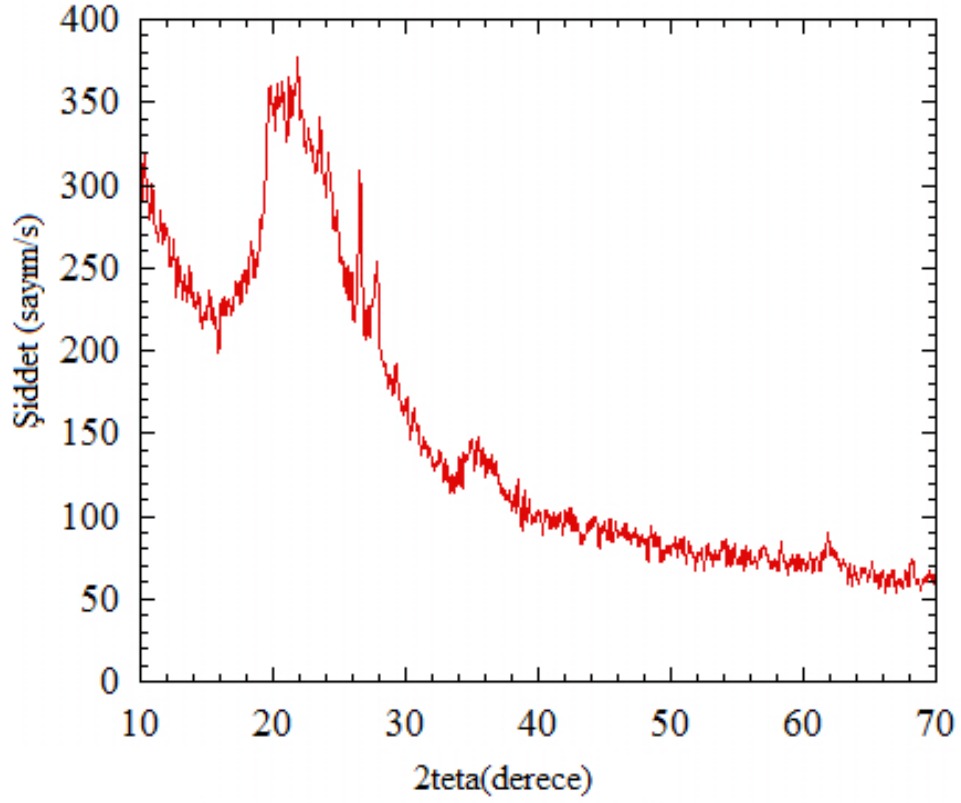
#### 4.1.4 Hammaddelerin Mineralojik Faz Analizi (XRD)

Şekil 4.12 ‘de Genleştirilmiş vermikülitin (EV) ve öğütülmüş vermikülit hammaddesinin (milled EV) XRD analiz sonuçları gösterilmektedir. Şekil 4.13’de Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin, Şekil 4.14’de refrakter kili hammaddesinin ve Şekil 4.15’de bağlayıcı refrakter kili hammaddesinin XRD analizi verilmiştir.



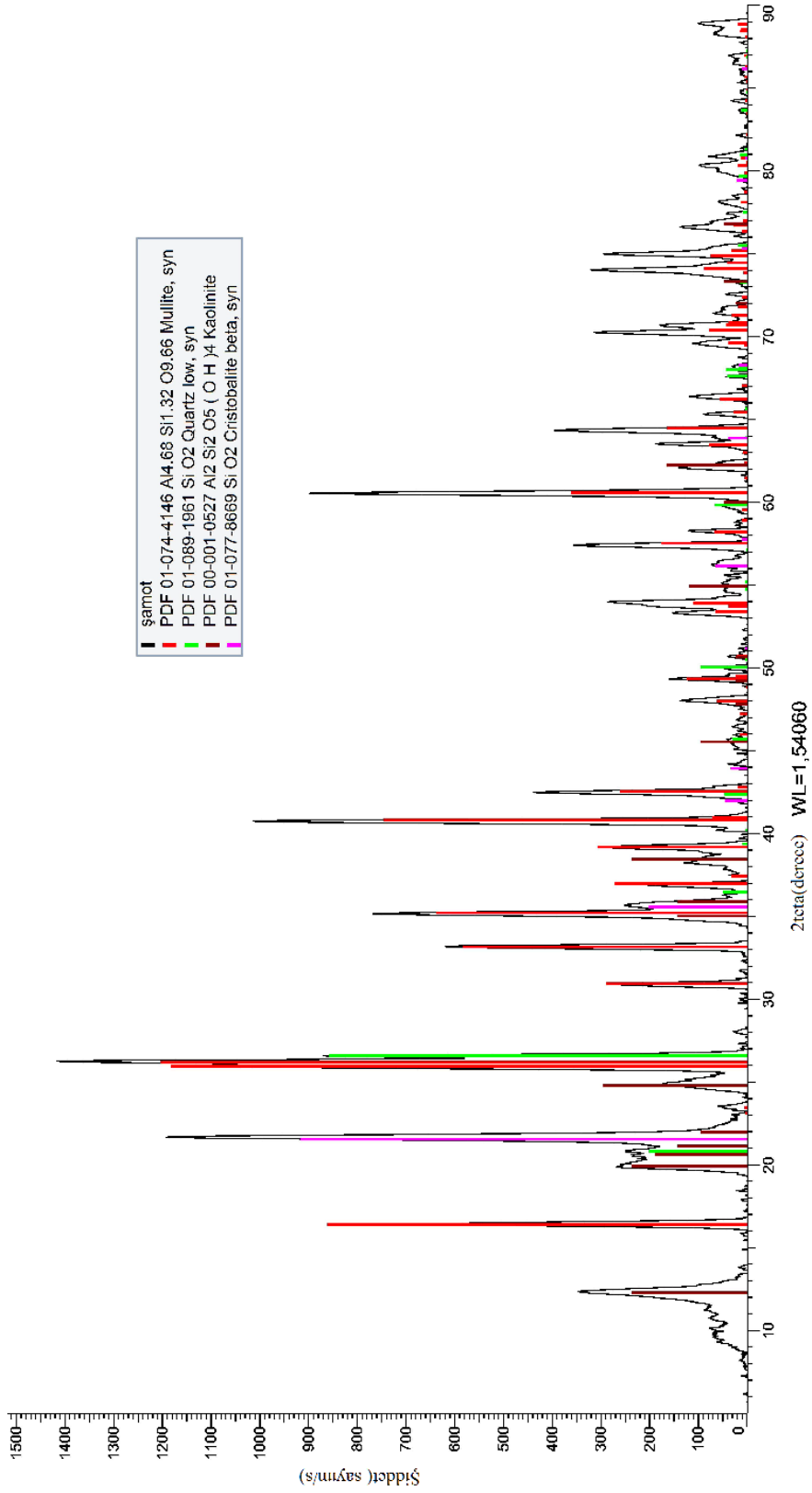
Şekil 4.12 Genleştirilmiş vermikülitin (EV) ve öğütülmüş halinin (milled EV) XRD analizi (V: vermikülit; H: hidrobiyotit; P: filopit).

Vermikülit hammaddesinin XRD analizine baktığımızda (Şekil 4.12) yapıda hidrobiyotit, filopit ve vermikülit fazlarının bulunduğunu görürüz. Öğütmenin vermikülit üzerinde amorflaştırıcı bir etki yaptığı da görülmektedir. Benzer şekilde Şekil 4.13'te diatomit hammaddesinin 15-30 derece aralığındaki geniş hörgüç biçimli yapı amorf bir yapının olduğunu, 26-28 aralığındaki pikler silika ve kristalin bazı yapıların varlığını göstermektedir. Ayrıca yapı içeriğinin  $\alpha$ -kristobalit, kuvars, demir oksit, karbonat mineraller ve organik mineralleri içerdiği bilinmektedir.

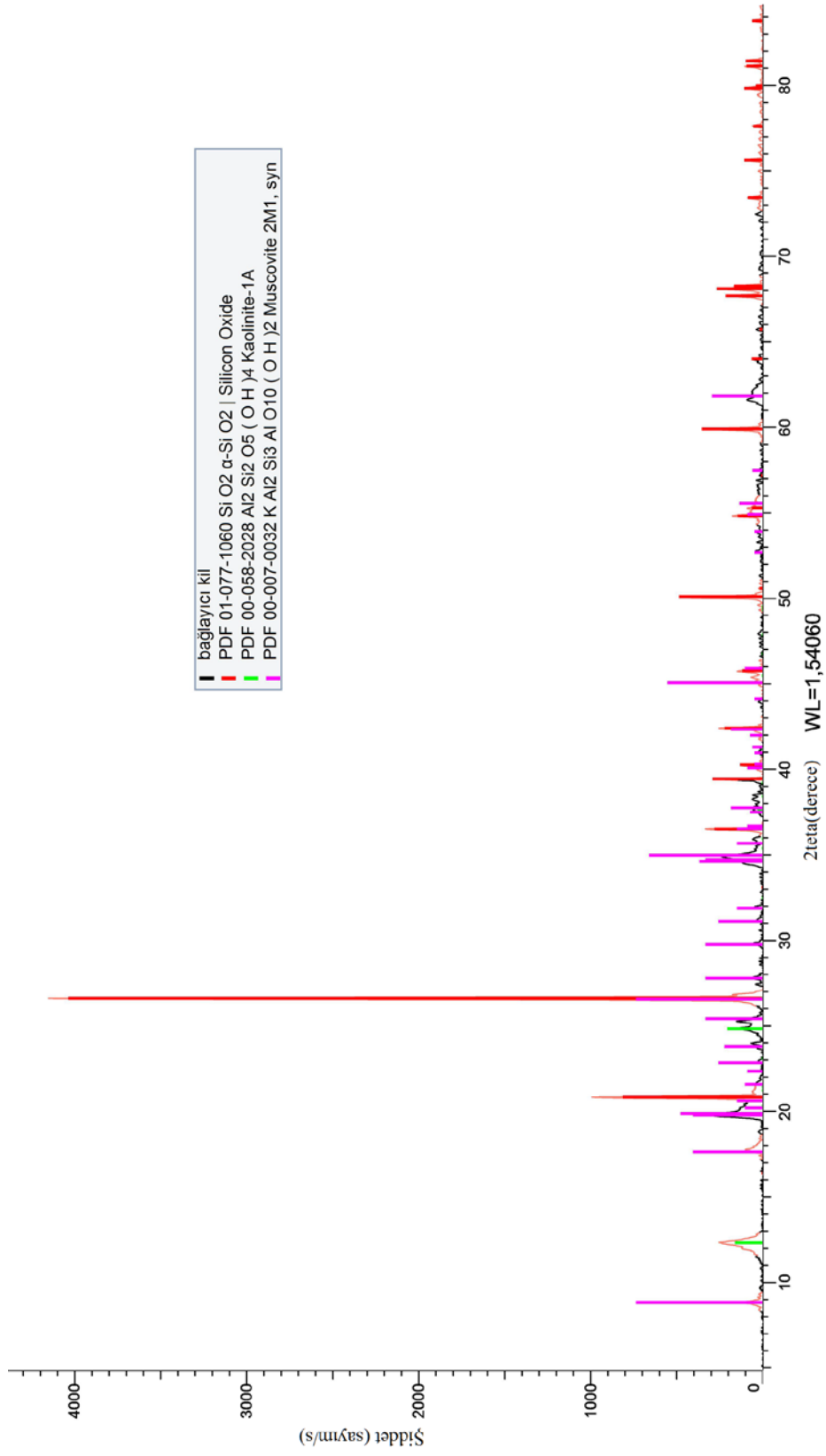


Şekil 4.13 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin XRD analizi.

Refrakter kil hammaddesinin XRD analiz sonuçlarını incelediğimizde (Şekil 4.14) yapısında yüksek sıcaklıklarda oluşan mullit, kuvars, kaolinit ve kristalobalit yapılarını görmekteyiz. Bu hammaddenin yüksek sıcaklığa maruz kaldığını gösterir. Şekil 4.15'te Bağlayıcı refrakter kil hammaddesinin XRD analiz sonucunda yapıda silisyum oksit ve kaolinit fazlarının olduğu görülmektedir.



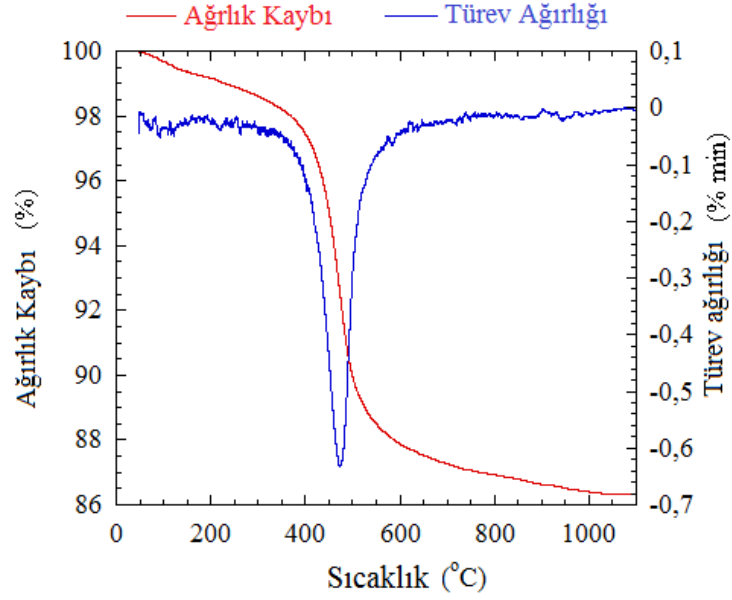
Şekil 4.14. Refrakter kil hammaddesinin XRD analizi.



Şekil 4.15. Bağlayıcı refrakter kili hammaddesinin XRD analizi.

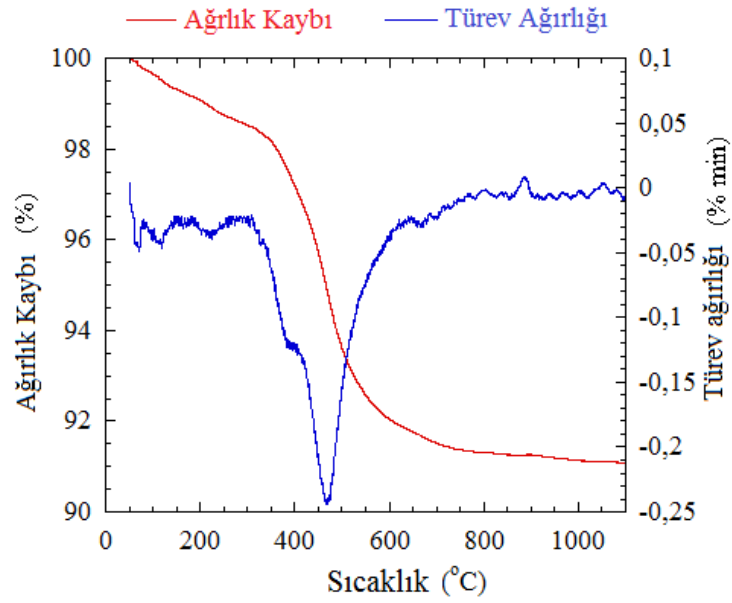
#### 4.1.5 Hammaddelerin Isıl Analizi (TGA)

Refrakter kili, bağlayıcı refrakter kili, Diatomit (Kizelguhr) ve Genleştirilmiş vermikülit hammaddelerinin TGA analizleri sırasıyla Şekil 4.16-19'da gösterilmektedir.



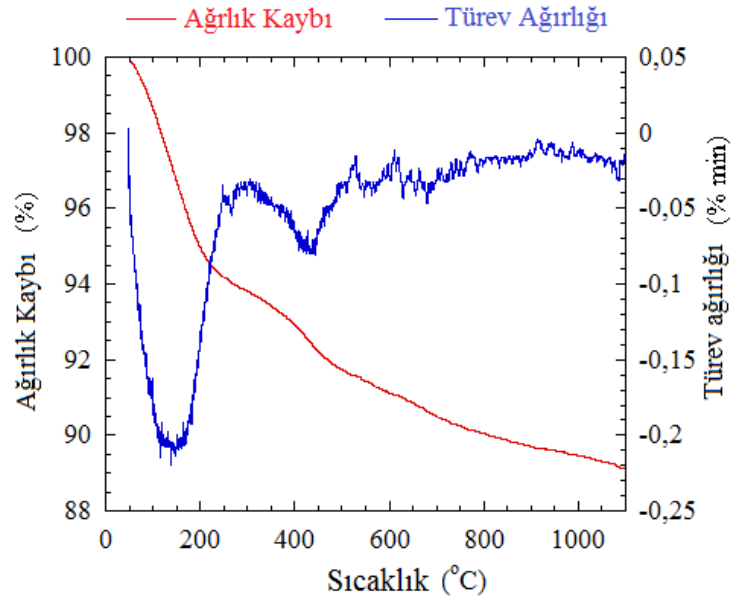
Şekil 4.16 Refrakter kili hammaddesinin TGA analizi.

Refrakter hammaddesinin TGA analizini incelediğimizde toplam ağırlık kaybının yaklaşık %14 olduğunu görmekteyiz. İlk olarak 50-450 °C aralığında %2 oranında ağırlık kaybı yaşanırken en yüksek ağırlık kaybının 450-550 °C aralığında yaklaşık %10 oranında olduğunu görmekteyiz. Bu ağırlık kaybı sebebi bünyesinde bulunan su veya uçucu yapılardan kaynaklanabilir. Daha sonra 550-1000 °C ve daha üzerindeki sıcaklıklarda ağırlık kaybı yaklaşık olarak %2'dir.



Şekil 4.17 Bağlayıcı refrakter kili hammaddesinin TGA analizi.

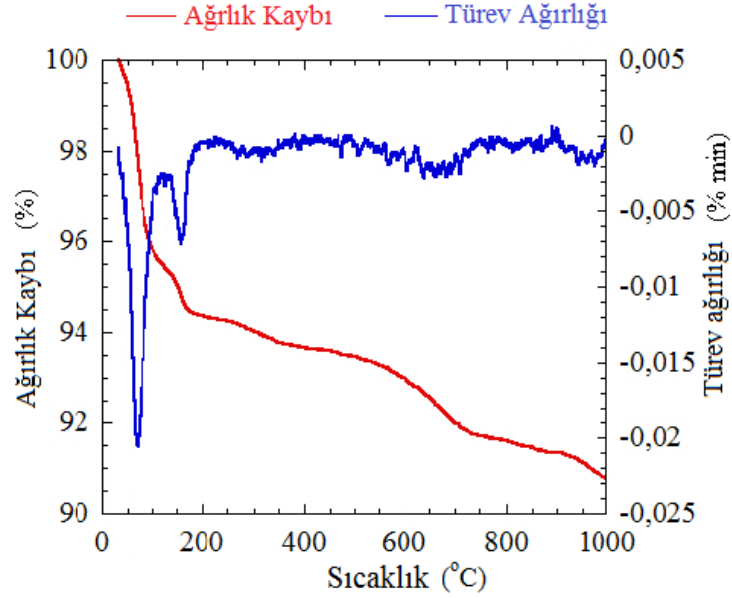
Bağlayıcı refrakter kili yapılan TGA analizinde toplamda yaklaşık olarak %9 oranında ağırlık kaybına uğramıştır. İlk olarak 50-400 °C aralığında yaklaşık %2 oranında ağırlık kaybına uğrayan bağlayıcı refrakter kili 400-550 °C sıcaklık aralığında yaklaşık %5 oranında ağırlığını kaybetmiştir. Daha sonra 550-1000 °C sıcaklık aralığında yaklaşık ağırlık kaybı %2'dir.



Şekil 4.18 Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin TGA analizi.



Diatomit (Kizelguhr) hammaddesinin TGA analizine göre toplam ağırlık kaybı %11 civarındadır. İlk olarak 50-200 °C aralığında yaklaşık %5 ağırlık kaybı meydana gelirken daha sonra lineer bir şekilde devam eden ağırlık kaybı 200-1000°C sıcaklık aralığında yaklaşık %6 olmuştur.



Şekil 4.19 Genleştirilmiş vermikülit hammaddesinin TGA analizi.

Genleştirilmiş vermikülit hammaddesinin TGA analizinde toplam ağırlık kaybı yaklaşık %11 olmuştur. İlk olarak 50-100 °C sıcaklık aralığında yaklaşık %4 ağırlık kaybı yaşanmıştır. Daha sonra 100-200 °C sıcaklık aralığında yaklaşık %1,5 oranında ağırlık kaybı yaşanmış ve sonrasında lineer olarak ağırlık azalışı devam ederek 200-1000 °C sıcaklık aralığında yaklaşık %5,5 oranında ağırlık kaybı meydana gelmiştir.

#### 4.2 ÜRETİLEN NUMUNELERİN ANALİZİ

Üç farklı sıcaklıkta (900, 1000 ve 1100°C) sinterlenerek üretilen altı farklı gruptaki numunelerin bulk yoğunluk, gözenek oranı, özgül ağırlık, kızdırma kaybı gibi fiziksel özellikleri ile ısı iletim katsayısı, basma dayanımı, mikroyapısal özellikleri karakterize edilmiştir. Üretilen her bir hafif refrakter grubuna ait analiz sonuçları ayrı başlıklar altında aşağıda verilmiştir.

#### 4.2.1 Numunelerin Fiziksel Analizi (Bulk yoğunluk, gözenek vd.)

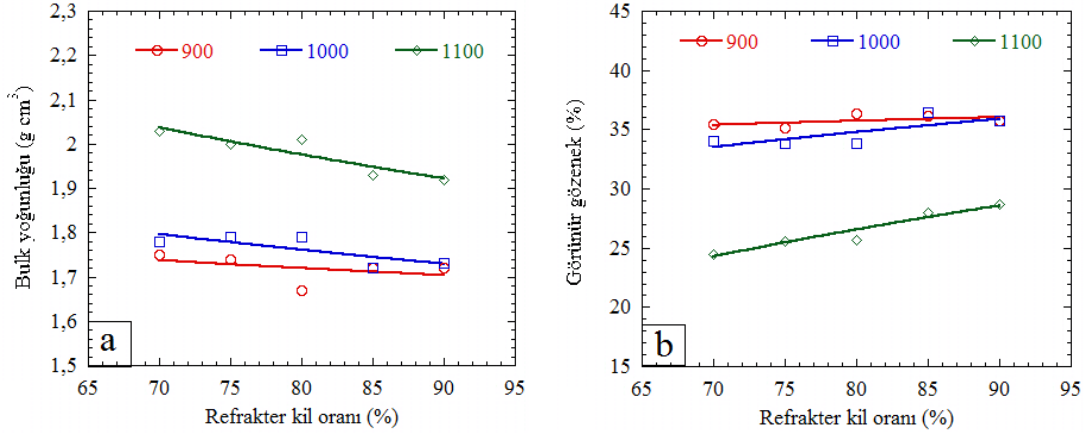
Üretilen numunelerin fiziksel analiz sonuçları alt başlıklar halinde incelenmiştir.

##### 4.2.1.1 Refrakter Kili-Bağlayıcı Refrakter Kili (SC) Karışımlarından Üretilen numuneler

Tablo 4.3’de refrakter kili ve bağlayıcı refrakter kilinin farklı oranlarda elde edilmiş numunelerin (SC) fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.20’de refrakter kil oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk ve gözenek oranlarının değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.3 Refrakter kili-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.

Sıcaklık, °C	Karışım			Arşimet yöntemiyle belirlenen fiziksel özellikler			Kızd. Kaybı, %
	Kod	Refrakter kili, %	Bağlayıcı kil, %	Bulk Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Görünür Porozite, %	Görünür Özgül Ağırlık g/cm <sup>3</sup>	
900	sc-1	90	10	1,72	35,7	2,67	11,9
	sc-2	85	15	1,72	36,1	2,69	11,7
	sc-3	80	20	1,67	36,3	2,62	11,8
	sc-4	75	25	1,74	35,1	2,67	11,7
	sc-5	70	30	1,75	35,4	2,72	11,2
1000	sc-6	90	10	1,73	35,7	2,69	12,1
	sc-7	85	15	1,72	36,4	2,71	12,2
	sc-8	80	20	1,79	33,8	2,71	13,1
	sc-9	75	25	1,79	33,8	2,7	11,8
	sc-10	70	30	1,78	34	2,69	11,5
1100	sc-11	90	10	1,92	28,7	2,69	3,9
	sc-12	85	15	1,93	28	2,69	4,2
	sc-13	80	20	2,01	25,7	2,7	5,3
	sc-14	75	25	2	25,6	2,69	5,7
	sc-15	70	30	2,03	24,5	2,69	5,9



Şekil 4.20 Refrakter kili ve bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin refrakter kil oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.

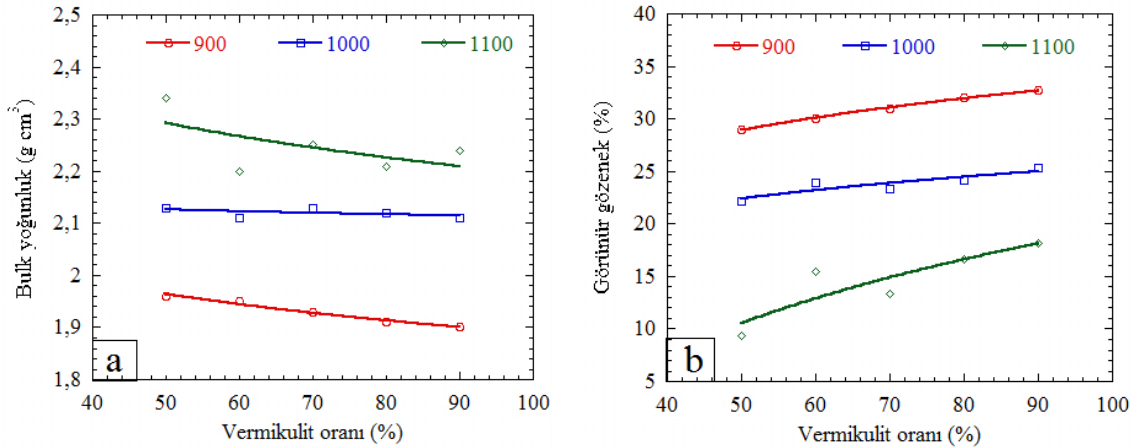
Tablo 4.3 ve Şekil 4.20'den görüldüğü gibi üretilen numunelerde bağlayıcı kil oranının %10'dan %30'lara çıkması 900 °C sıcaklıkta pişirilen numunelerin bulk yoğunluklarını  $1,72\text{g/cm}^3$ 'den  $1,75\text{g/cm}^3$ 'e yükseltirken, 1000 °C sıcaklıkta  $1,73\text{g/cm}^3$ 'den  $1,78\text{g/cm}^3$ 'e ve 1100 °C sıcaklıkta  $1,92\text{g/cm}^3$ 'den  $2,03\text{g/cm}^3$ 'e yükselttiği görülmektedir. Ayrıca ölçülen görünür gözenek oranlarına bakıldığında yoğunluk oranlarının arttıkça görünür gözenek oranlarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca 1100 °C sıcaklıklarda pişirilen numunelerin diğer sıcaklıklarda pişirilen numunelere göre daha yoğun yani daha az poroziteye sahip oldukları görülmektedir. Buradan pişirme sıcaklığındaki ve bağlayıcı kil oranındaki artışın yapıdaki görünür gözenek oranını azaltacağı yorumu rahatlıkla yapılabilir.

#### 4.2.1.2 Vermikülit-Bağlayıcı Refrakter Kili (VC) Karışımlarından Üretilen Numuneler

Tablo 4.4'te vermikülit ve bağlayıcı refrakter kilinin farklı oranlarda elde edilmiş numunelerin (VC) fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.21'de vermikülit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk ve gözenek oranlarının değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.4 Vermikülit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.

Sıcaklık, °C	Karışım			Arşimet yöntemiyle belirlenen fiziksel özellikler			Kızd. Kaybı, %
	Kod	Vermikülit, %	Bağlayıcı kil, %	Bulk Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Görünür Porozite, %	Görünür Özgül Ağırlık g/cm <sup>3</sup>	
900	vc-1	90	10	1,9	32,7	2,82	7,8
	vc-2	80	20	-	-	-	-
	vc-3	70	30	-	-	-	-
	vc-4	60	40	-	-	-	-
	vc-5	50	50	1,96	29	2,76	12,4
1000	vc-6	90	10	2,11	25,3	2,83	7,2
	vc-7	80	20	2,12	24,2	2,8	7,4
	vc-8	70	30	2,13	23,3	2,78	7,5
	vc-9	60	40	2,11	23,9	2,78	7,7
	vc-10	50	50	2,13	22,2	2,74	8
1100	vc-11	90	10	2,24	18,2	2,74	6,4
	vc-12	80	20	2,21	16,6	2,65	6,5
	vc-13	70	30	2,25	13,4	2,6	6,8
	vc-14	60	40	2,2	15,5	2,61	7,2
	vc-15	50	50	2,34	9,4	2,58	7,4



Şekil 4.21 Vermikülit ve bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin vermikülit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk(a) ve gözenek(b) oranlarının değişimi.

Tablo 4.4 ve Şekil 4.21'den görüldüğü gibi üretilen numunelerde bağlayıcı kil oranının %10'dan %50'lere çıkması 900 °C sıcaklıkta pişirilen numunelerin bulk yoğunluklarını 1,9g/cm<sup>3</sup> den 1,96 g/cm<sup>3</sup>'e yükseltirken, 1000°C sıcaklıkta 2,11 g/cm<sup>3</sup> den 2,13 g/cm<sup>3</sup>'e ve

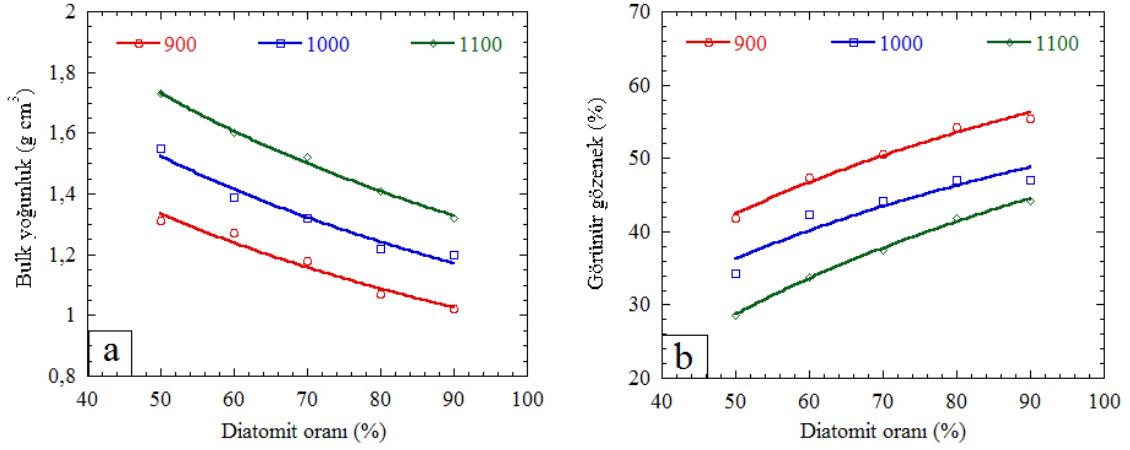
1100°C sıcaklıkta 2,24 g/cm<sup>3</sup>'den 2,34 g/cm<sup>3</sup>'e yükselttiği görülmektedir. Ayrıca tüm sıcaklıklarda ölçülen görünür gözenek oranlarına bakıldığında yoğunluk oranlarının azaldıkça görünür gözenek oranlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca 1100°C sıcaklıklarda pişirilen numunelerin diğer sıcaklıklarda pişirilen numunelere göre en yoğun yani en az poroziteye sahip oldukları görülmektedir.

#### 4.2.1.3 Diatomit-Bağlayıcı Refrakter Kili (DC) Karışımlarından Üretilen Numuneler

Tablo 4.5'te diatomit ve bağlayıcı refrakter kilinin farklı oranlarda elde edilmiş numunelerin (VC) fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.22'de diatomit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk ve gözenek oranlarının değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.5 Diatomit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.

Sıcaklık, °C	Karışım			Arşimet yöntemiyle belirlenen fiziksel özellikler			Kızd. Kaybı, %
	Kod	Diatomit, %	Bağlayıcı kil, %	Bulk Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Görünür Porozite, %	Görünür Özgül Ağırlık g/cm <sup>3</sup>	
<b>900</b>	dc-1	90	10	1,02	55,4	2,28	9,4
	dc-2	80	20	1,07	54,3	2,34	9,7
	dc-3	70	30	1,18	50,5	2,38	9,2
	dc-4	60	40	1,27	47,3	2,41	8,9
	dc-5	50	50	1,31	41,8	2,28	8,7
<b>1000</b>	dc-6	90	10	1,2	47	2,27	10,8
	dc-7	80	20	1,22	47,1	2,31	10,5
	dc-8	70	30	1,32	44,2	2,36	10,3
	dc-9	60	40	1,39	42,4	2,42	10
	dc-10	50	50	1,55	34,2	2,36	10
<b>1100</b>	dc-11	90	10	1,32	44,2	2,36	8,9
	dc-12	80	20	1,41	41,9	2,43	8,8
	dc-13	70	30	1,52	37,5	2,43	8,8
	dc-14	60	40	1,6	33,8	2,42	8,9
	dc-15	50	50	1,73	28,6	2,43	8,9



Şekil 4.22 Diatomit ve bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin diatomit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.

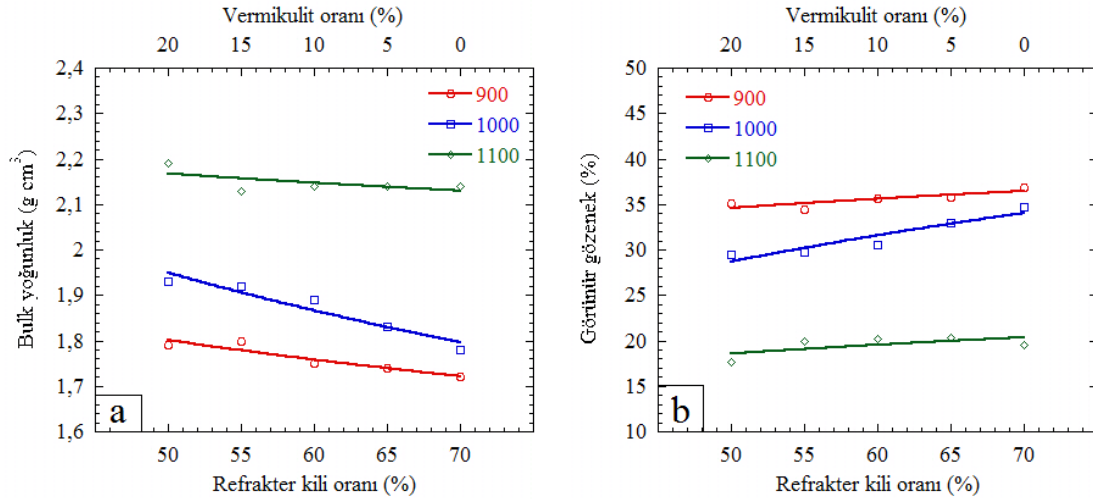
Tablo 4.5 ve Şekil 4.22’den görüldüğü gibi üretilen numunelerde bağlayıcı kil oranının %10’dan %50’lere çıkması 900°C sıcaklıkta pişirilen numunelerin bulk yoğunluklarını 1,02g/cm<sup>3</sup>’den 1,31 g/cm<sup>3</sup>’e yükseltirken, 1000°C sıcaklıkta 1,2 g/cm<sup>3</sup>’den 1,55 g/cm<sup>3</sup>’e ve 1100°C sıcaklıkta 1,32 g/cm<sup>3</sup>’den 1,73 g/cm<sup>3</sup>’e yükselttiği görülmektedir. Ayrıca tüm sıcaklıklarda ölçülen görünür gözenek oranlarına bakıldığında yoğunluk oranlarının azaldıkça görünür gözenek oranlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca 1100°C sıcaklıklarda pişirilen numunelerin diğer sıcaklıklarda pişirilen numunelere göre en yoğun yani en az poroziteye sahip oldukları görülmektedir.

#### 4.2.1.4 Refrakter Kili-Vermikülit-Bağlayıcı Refrakter Kili (SCV) Karışımlarından Üretilen Numuneler

Tablo 4.6’da refrakter kili-vermikülit-bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.23’de vermikülit ve refrakter kili oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk ve gözenek oranlarının değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.6 Refrakter kili-Vermikülit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.

Sıcaklık, °C	Karışım				Arşimet yöntemiyle belirlenen fiziksel özellikler			Kızd. Kaybı, %
	Kod	Refrakter kili, %	Vermikülit, %	Bağlayıcı kil, %	Bulk Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Görünür Porozite, %	Görünür Özgül Ağırlık g/cm <sup>3</sup>	
900	scv-1	70	0	30	1,72	36,8	2,72	12
	scv-2	65	5	30	1,74	35,8	2,7	11,7
	scv-3	60	10	30	1,75	35,7	2,73	11,4
	scv-4	55	15	30	1,8	34,4	2,75	11,1
	scv-5	50	20	30	1,79	35,1	2,75	10,9
1000	scv-6	70	0	30	1,78	34,7	2,73	12,1
	scv-7	65	5	30	1,83	32,9	2,74	11,7
	scv-8	60	10	30	1,89	30,6	2,73	11,5
	scv-9	55	15	30	1,92	29,7	2,74	11,2
	scv-10	50	20	30	1,93	29,5	2,74	11,4
1100	scv-11	70	0	30	2,14	19,5	2,65	11,7
	scv-12	65	5	30	2,14	20,3	2,68	11,3
	scv-13	60	10	30	2,14	20,2	2,68	11
	scv-14	55	15	30	2,13	19,9	2,66	10,7
	scv-15	50	20	30	2,19	17,6	2,66	10,3



Şekil 4.23 Refrakter kili, vermikülit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin vermikülit ve refrakter kili oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.

Tablo 4.6 ve Şekil 4.23'ten görüldüğü gibi üretilen numunelerde vermikülit oranının %0'dan %20'lere çıkması 900°C sıcaklıkta pişirilen numunelerin bulk yoğunluklarını

1,72 g/cm<sup>3</sup>'den 1,79 g/cm<sup>3</sup>'e yükseltirken, 1000°C sıcaklıkta 1,78 g/cm<sup>3</sup>'den 1,93 g/cm<sup>3</sup>'e ve 1100°C sıcaklıkta 2,14 g/cm<sup>3</sup>'den 2,18 g/cm<sup>3</sup>'e yükselttiği görülmektedir. Ayrıca tüm sıcaklıklarda ölçülen görünür gözenek oranlarına bakıldığında yoğunluk oranlarını azaldıkça görünür gözenek oranlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca 1100°C sıcaklıklarda pişirilen numunelerin diğer sıcaklıklarda pişirilen numunelere göre en yoğun yani en az poroziteye sahip oldukları görülmektedir.

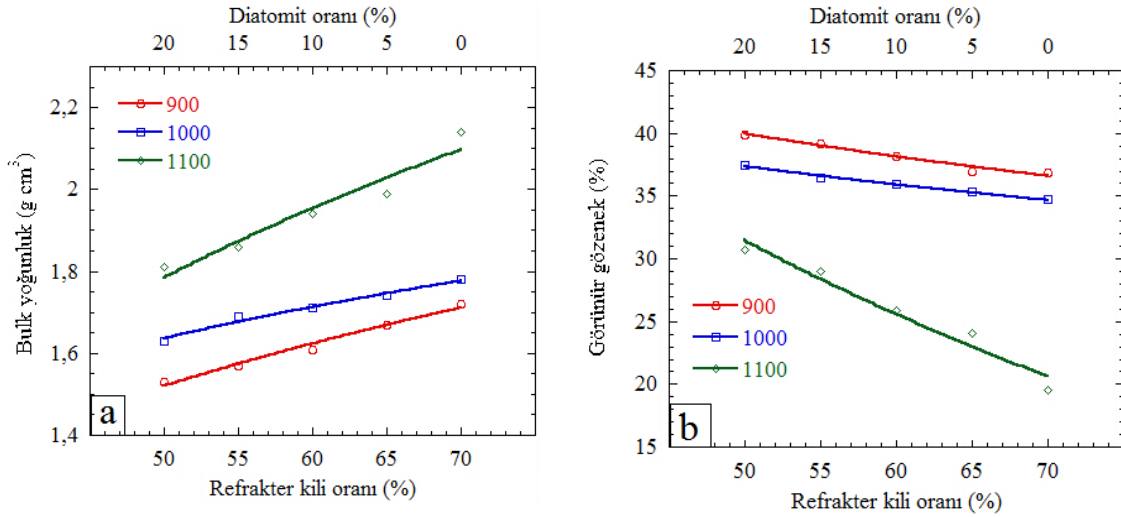
#### 4.2.1.5 Refrakter Kili-Diatomit-Bağlayıcı Refrakter Kili (SCD) Karışımlarından Üretilen Numuneler

Tablo 4.7'de refrakter kili-diatomit-bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.24'de diatomit ve refrakter kili oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk ve gözenek oranlarının değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.7 Refrakter kili-Diatomit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.

Sıcaklık, °C	Karışım				Arşimet yöntemiyle belirlenen fiziksel özellikler			Kızd. Kaybı, %
	Kod	Refrakter kili, %	Diatomit, %	Bağlayıcı kil, %	Bulk Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Görünür Porozite, %	Görünür Özgül Ağırlık, g/cm <sup>3</sup>	
900	scd-1	70	0	30	1,72	36,8	2,72	12
	scd-2	65	5	30	1,67	37	2,66	11,4
	scd-3	60	10	30	1,61	38,2	2,6	13,7
	scd-4	55	15	30	1,57	39,2	2,58	12,5
	scd-5	50	20	30	1,53	39,9	2,55	12,9
1000	scd-6	70	0	30	1,78	34,7	2,73	12,1
	scd-7	65	5	30	1,74	35,3	2,69	12,1
	scd-8	60	10	30	1,71	35,9	2,67	11,9
	scd-9	55	15	30	1,69	36,4	2,66	11,7
	scd-10	50	20	30	1,63	37,5	2,61	11,7
1100	scd-11	70	0	30	2,14	19,5	2,65	11,7
	scd-12	65	5	30	1,99	24,1	2,63	5,8
	scd-13	60	10	30	1,94	25,9	2,62	6,3
	scd-14	55	15	30	1,86	29	2,62	7
	scd-15	50	20	30	1,81	30,7	2,62	7,3





Şekil 4.24 Refrakter kili, diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin diatomit ve refrakter kili oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.

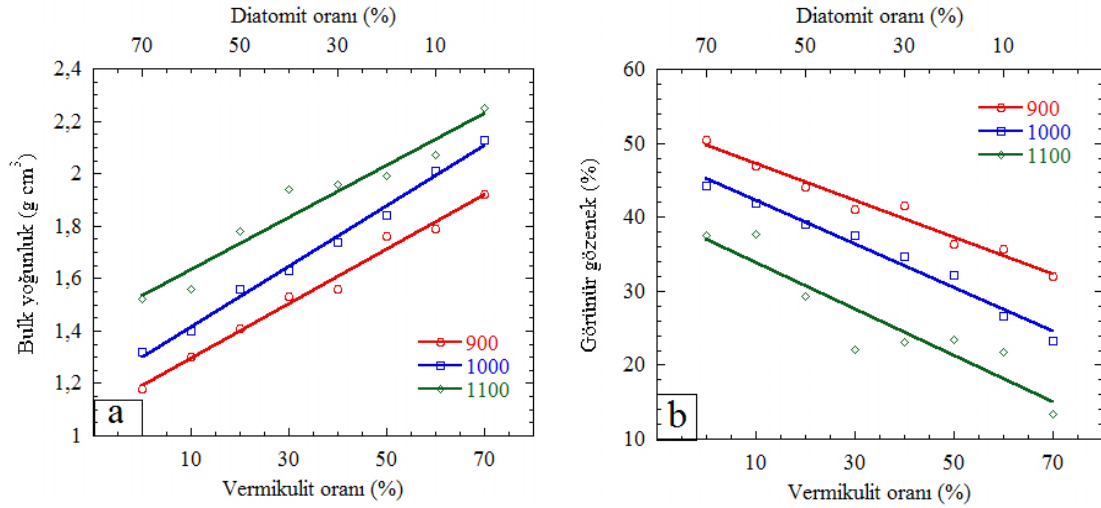
Tablo 4.7 ve şekil 4.24'ten görüldüğü gibi üretilen numunelerde diatomit oranının %0'dan %20'lere çıkması 900°C sıcaklıkta pişirilen numunelerin bulk yoğunluklarını 1,72 g/cm<sup>3</sup>'den 1,53 g/cm<sup>3</sup>'e düşürürken, 1000°C sıcaklıkta 1,78 g/cm<sup>3</sup>'den 1,63 g/cm<sup>3</sup>'e ve 1100°C sıcaklıkta 2,14 g/cm<sup>3</sup>'den 1,81 g/cm<sup>3</sup>'e düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca tüm sıcaklıklarda ölçülen görünür gözenek oranlarına bakıldığında yoğunluk oranlarının azaldıkça görünür gözenek oranlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca 1100°C sıcaklıklarda pişirilen numunelerin diğer sıcaklıklarda pişirilen numunelere göre en yoğun yani en az poroziteye sahip oldukları görülmektedir.

#### 4.2.1.6 Vermikulit-Diatomit-Bağlayıcı Refrakter Kili (VCD) Karışımlarından Üretilen Numuneler

Tablo 4.8'de vermiculit-diatomit-bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 4.25'te diatomit ve vermiculit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk ve gözenek oranlarının değişimi gösterilmektedir.

Tablo 4.8 Vermikulit-Diatomit-Bağlayıcı refrakter kili karışımlarından üretilen numunelerin fiziksel özellikleri.

Sıcaklık, °C	Karışım				Arşimet yöntemiyle belirlenen fiziksel özellikler			Kızd. Kaybı, %
	Kod	Vermikulit, %	Diatomit, %	Bağlayıcı kil, %	Bulk Yoğunluk, g/cm <sup>3</sup>	Görünür Porozite, %	Görünür Özgül Ağırlık g/cm <sup>3</sup>	
900	vcd-1	0	70	30	1,18	50,5	2,38	9,2
	vcd-2	10	60	30	1,3	47	2,46	8,6
	vcd-3	20	50	30	1,41	44	2,51	8,1
	vcd-4	30	40	30	1,53	41	2,59	7,3
	vcd-5	40	30	30	1,56	41,5	2,67	7,6
	vcd-6	50	20	30	1,76	36,3	2,76	7,4
	vcd-7	60	10	30	1,79	35,7	2,78	7,1
	vcd-8	70	0	30	-	-	-	-
1000	vcd-9	0	70	30	1,32	44,2	2,36	10,3
	vcd-10	10	60	30	1,4	41,9	2,42	10
	vcd-11	20	50	30	1,56	39,1	2,55	9,5
	vcd-12	30	40	30	1,63	37,5	2,61	9,1
	vcd-13	40	30	30	1,74	34,7	2,66	8,6
	vcd-14	50	20	30	1,84	32,2	2,71	8,4
	vcd-15	60	10	30	2,01	26,6	2,74	8
	vcd-16	70	0	30	2,13	23,3	2,78	7,5
1100	vcd-17	0	70	30	1,52	37,5	2,43	8,8
	vcd-18	10	60	30	1,56	37,7	2,51	8,7
	vcd-19	20	50	30	1,78	29,3	2,52	8,2
	vcd-20	30	40	30	1,94	22,1	2,49	8
	vcd-21	40	30	30	1,96	23,1	2,55	7,8
	vcd-22	50	20	30	1,99	23,4	2,6	7,5
	vcd-23	60	10	30	2,07	21,8	2,65	7,2
	vcd-24	70	0	30	2,25	13,4	2,6	6,8



Şekil 4.25 Vermikülit, diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerin diatomit ve vermiculit oranına ve sıcaklığa bağlı olarak bulk yoğunluk (a) ve gözenek (b) oranlarının değişimi.

Tablo 4.8 ve Şekil 4.25'ten görüldüğü gibi üretilen numunelerde vermiculit oranının %0'dan %70'lere çıkması 900°C sıcaklıkta pişirilen numunelerin bulk yoğunluklarını 1,18 g/cm<sup>3</sup>'den 1,79 g/cm<sup>3</sup>'e artırırken, 1000°C sıcaklıkta 1,32 g/cm<sup>3</sup>'den 2,13 g/cm<sup>3</sup>'e ve 1100°C sıcaklıkta 1,52 g/cm<sup>3</sup>'den 2,25 g/cm<sup>3</sup>'e yükselttiği görülmektedir. Ayrıca tüm sıcaklıklarda ölçülen görünür gözenek oranlarına bakıldığında yoğunluk oranlarının arttıkça görünür gözenek oranlarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca 1100°C sıcaklıklarda pişirilen numunelerin diğer sıcaklıklarda pişirilen numunelere göre en yoğun yani en az poroziteye sahip oldukları görülmektedir.

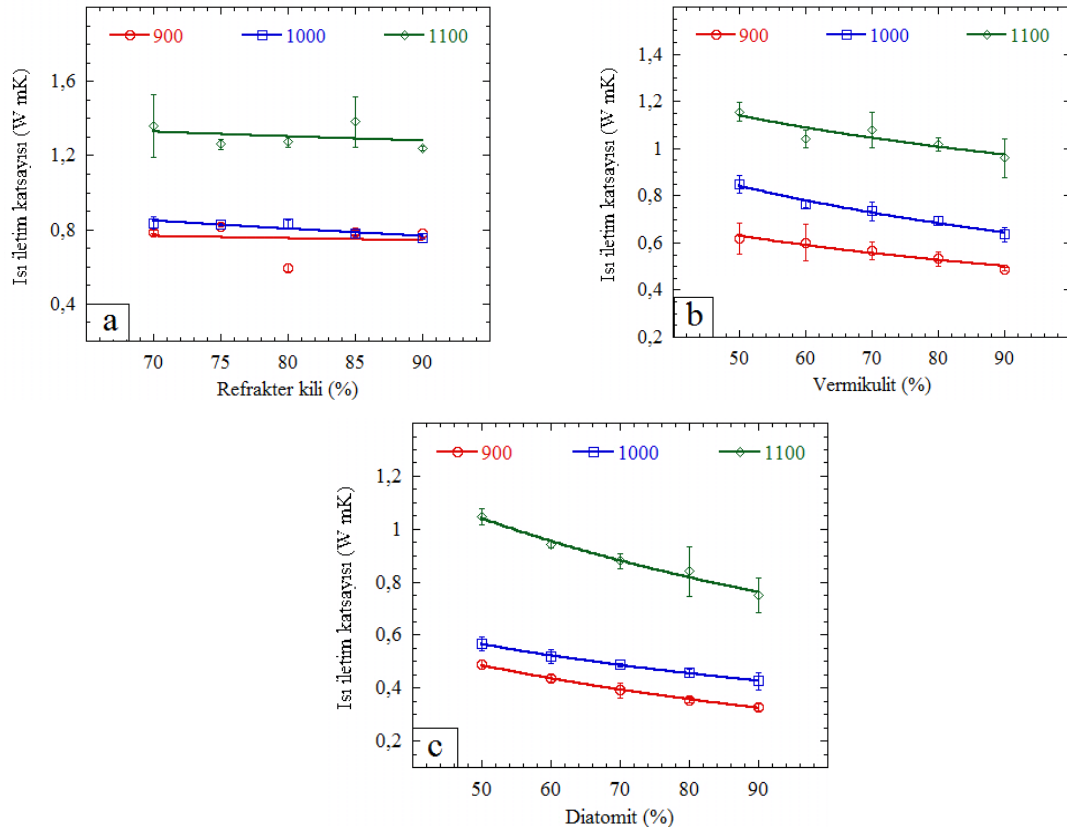
## 4.2.2 Numunelerin Isı İletim Katsayılarının Analizi

### 4.2.2.1 İkili Karışımlardan (sc, vc, dc) Üretilen Numunelerin Isı İletim Katsayıları

Üretilen numunelerin ısı iletim katsayıları modifiye edilmiş transient düzlem kaynağı yöntemiyle çalışan *C-Therm TCi Thermal Conductivity Analyzer* cihazı ile oda sıcaklığında ölçülmüştür. İkili karışımlardan (sc, vc, dc) üretilen numunelerin ölçülen ısı iletim katsayıları Tablo 4.9'da gösterilmiş ve ayrıca grafiğe dökülerek Şekil 4.26'da karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.9 Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş ikili karışımlardan (*sc*, *vc*, *dc*) üretilen numunelerin oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları.

Grup	Karışımlar				Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)		
	Refrakter kili, %	Vermikülit, %	Diatomit, %	Bağlayıcı kil, %	900°C	1000°C	1100°C
SC-1-6-11	90	-	-	10	0,781	0,756	1,239
SC-2-7-12	85	-	-	15	0,786	0,780	1,382
SC-3-8-13	80	-	-	20	0,594	0,832	1,274
SC-4-9-14	75	-	-	25	0,818	0,827	1,262
SC-5-10-15	70	-	-	30	0,789	0,837	1,359
VC-1-6-11	-	90	-	10	0,489	0,636	0,960
VC-2-7-12	-	80	-	20	0,532	0,693	1,017
VC-3-8-13	-	70	-	30	0,566	0,734	1,079
VC-4-9-14	-	60	-	40	0,602	0,764	1,041
VC-5-10-15	-	50	-	50	0,617	0,848	1,155
DC-1-6-11	-	-	90	10	0,328	0,426	0,749
DC-2-7-12	-	-	80	20	0,355	0,457	0,840
DC-3-8-13	-	-	70	30	0,392	0,487	0,879
DC-4-9-14	-	-	60	40	0,435	0,517	0,941
DC-5-10-15	-	-	50	50	0,488	0,568	1,048



Şekil 4.26 İkili karışımların (*sc* (a), *vc* (b), *dc* (c)) oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları.

İkili karışımların ısı iletkenlikleri Şekil 4.22'den karşılaştırıldığında Tablo 4.9'dan görüldüğü gibi vc ve dc ikili karışımlarında aynı oranlarda bağlayıcı refrakter kili kullanıldığında benzer sıcaklıklarda karşılaştırılan karışımlardan en düşük ısı iletkenliğin diatomitli karışımlarda elde edildiği görülmektedir. Daha sonra sırayı vermikülitli karışımlar alırken ve nispeten daha düşük bağlayıcı refrakter kili oranlarına sahip olan rrefrakter kili içeren karışımlar (sc) en yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmuşlardır. Genel olarak her bir sıcaklık ve ikili karışımlarda, bağlayıcı refrakter kilinin artışı ile ısı iletim katsayısında artış meydana gelmiştir. Bunun sebebinin üretilen numunelerin fiziksel özelliklerinden görüldüğü üzere bağlayıcı refrakter kil oranının artışı ile yapıdaki gözenekliliğin azalması gösterilebilir. Fiziksel analiz sonuçlarına göre bu ikili karışımlardan en yüksek gözeneklilik oranına dc, yani diatomit-bağlayıcı refrakter kili karışımlarının sahip olması ısı iletim katsayısının neden bu karışımda daha düşük olduğunu açıklar niteliktedir.

#### 4.2.2.2 Üçlü Karışımlardan (scv, vcd, scd) Üretilen Numunelerin Isı İletim Katsayıları

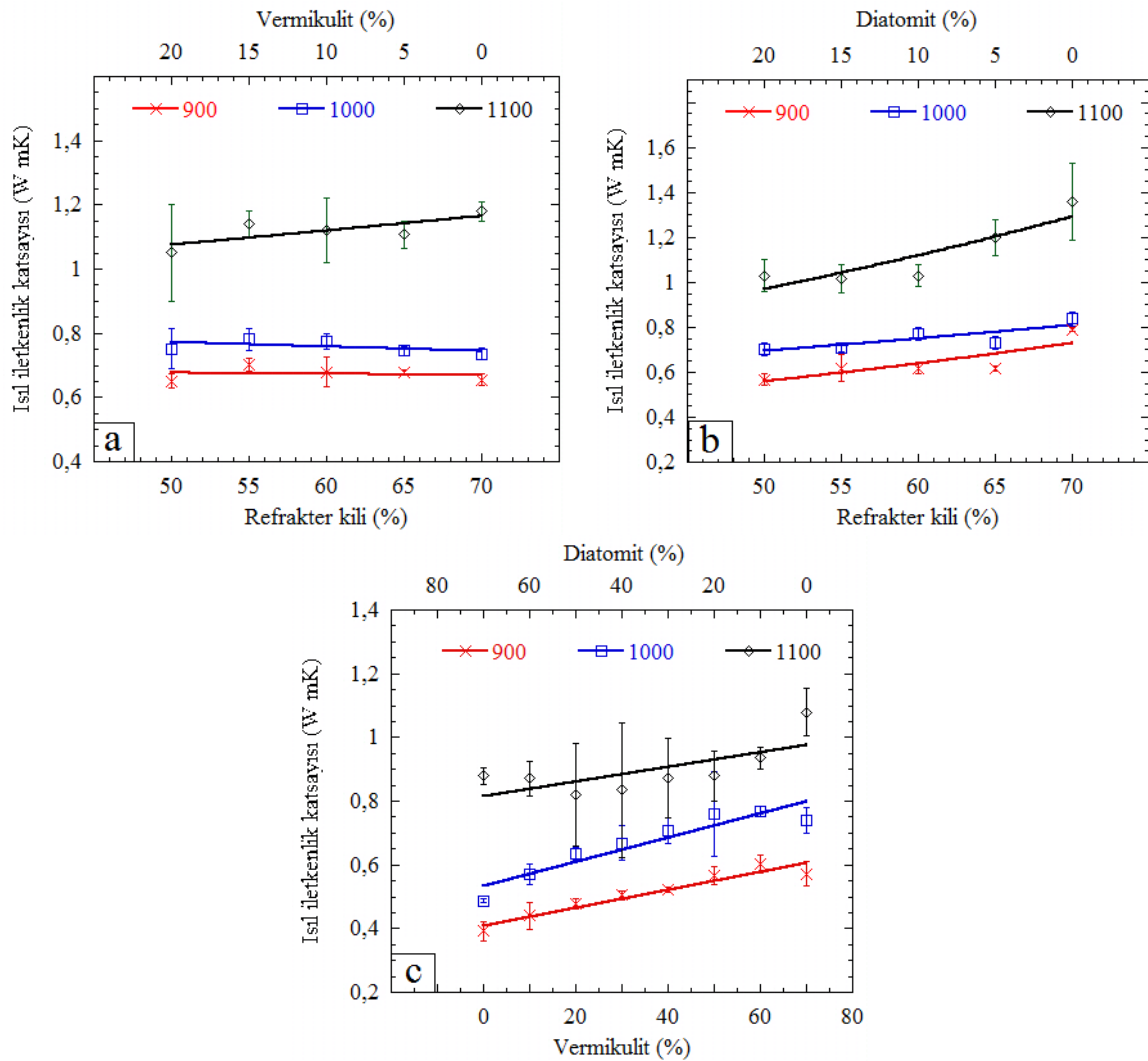
Üçlü karışımlardan (scv, vcd, scd) üretilen numunelerin ölçülen ısı iletim katsayıları Tablo 4.10'da gösterilmiş ve ayrıca grafiğe dökülerek Şekil 4.27'de karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.10 Üçlü karışımlardan (scv, scd,vcd) farklı sıcaklıklarda üretilen numunelerin oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları.

Grup	Karışımlar				Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)		
	Refrakter kili, %	Bağlayıcı kil, %	Vermikülit, %	Diatomit, %	900°C	1000°C	1100°C
SCV	70	30	0	-	0,655	0,736	1,179
	65	30	5	-	0,677	0,745	1,107
	60	30	10	-	0,679	0,775	1,121
	55	30	15	-	0,702	0,782	1,142
	50	30	20	-	0,652	0,752	1,050
SCD	70	30	-	0	0,788	0,836	1,358
	65	30	-	5	0,617	0,732	1,198
	60	30	-	10	0,619	0,771	1,028
	55	30	-	15	0,617	0,710	1,016
	50	30	-	20	0,566	0,701	1,030

Tablo 4.10 (devam ediyor)

VCD	-	30	0	70	0,392	0,487	0,879
	-	30	10	60	0,439	0,571	0,872
	-	30	20	50	0,478	0,635	0,820
	-	30	30	40	0,505	0,667	0,834
	-	30	40	30	0,521	0,708	0,872
	-	30	50	20	0,567	0,760	0,878
	-	30	60	10	0,604	0,768	0,936
	-	30	70	0	0,571	0,741	1,079



Şekil 4.27 Üçlü karışımlardan (*scv* (a), *scd* (b), *vcd* (c)) farklı sıcaklıklarda üretilen numunelerin oda sıcaklığında ölçülen ısı iletim katsayıları.

Üçlü karışımların ısı iletimlik değerlerini karşılaştırsak (Şekil 4.27) genel olarak artan görünür porozite oranları ile ters orantılı olarak ısı iletim katsayı değerleri her bir

sıcaklıkta azaldığı görülmektedir. Bunun yanında litaretür ile benzer olarak yine pişme sıcaklıkları yükseldiğinde gözenek oranlarındaki düşüş, yani yoğunluklardaki artış nedeniyle ısı iletim katsayıları artma eğilimine girmiştir. Bunun yanında scv ve scd üçlü karışımlarına baktığımızda her iki karışımda da vermikülit ve diatomit oranlarındaki artış ile gözeneklilik oranı arttığından ısı iletim değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Diatomit-vermikülit-%30 bağlayıcı refrakter kilinden (vcd) oluşan karışımlarda ise en düşük ısı iletim katsayı değerlerinin elde edildiğini görürüz. Ayrıca vcd karışımlarında diatomit miktarındaki artışın vermikülit artışına göre görünür porozite değerlerini daha çok arttırdığı ve buna bağlı olarak ısı iletim değerlerini vermikülite nazaran daha çok azalttığı dikkatlerden kaçmamaktadır.

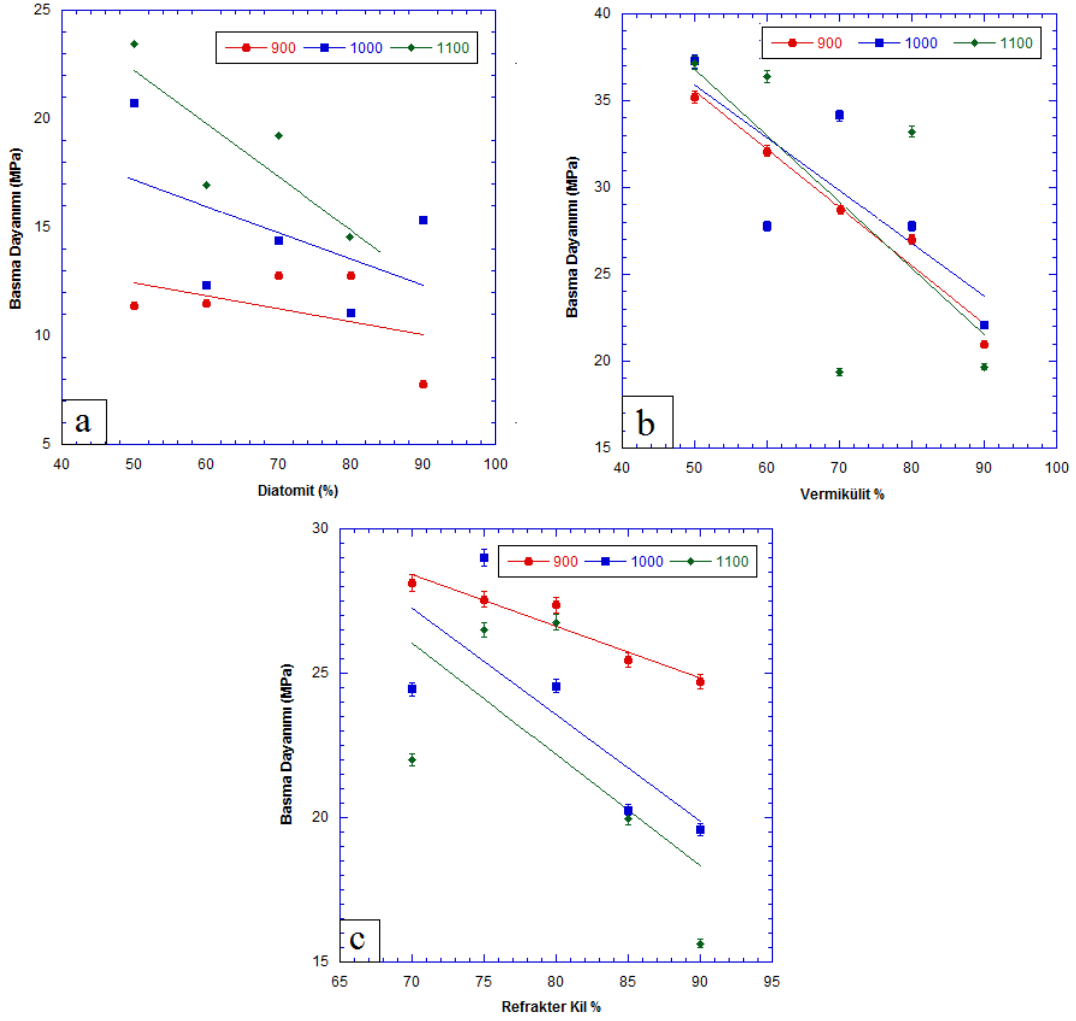
#### 4.2.3 Numunelerin Basma Dayanımı

##### 4.2.3.1 İkili Karışımlardan (*sc*, *vc*, *dc*) Üretilen Numunelerin Basma Dayanımları

İkili karışımlardan (*sc*, *vc*, *dc*) üretilen numunelerin ölçülen basma dayanımları Tablo 4.11’de gösterilmiş ve ayrıca grafiğe dökülerek Şekil 4.28’de karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.11 İkili karışımlardan (*sc*, *vc*, *dc*) üretilen numunelerin basma dayanımları.

Grup	Karışımlar				Basma Dayanımı (MPa)		
	Refrakter kil, %	Vermikülit, %	Diatomit, %	Bağlayıcı kil, %	900°C	1000°C	1100°C
SC-1-6-11	90	-	-	10	24,7	19,5	15,6
SC-2-7-12	85	-	-	15	25,4	20,2	19,9
SC-3-8-13	80	-	-	20	27,3	24,5	26,7
SC-4-9-14	75	-	-	25	27,5	29,0	26,5
SC-5-10-15	70	-	-	30	28,1	24,4	22
VC-1-6-11	-	90	-	10	70,6	22,1	19,6
VC-2-7-12	-	80	-	20	31,4	27,8	33,2
VC-3-8-13	-	70	-	30	28,8	34,1	19,3
VC-4-9-14	-	60	-	40	32,1	27,2	36,3
VC-5-10-15	-	50	-	50	35,2	37,2	37,2
DC-1-6-11	-	-	90	10	19,7	40,6	35
DC-2-7-12	-	-	80	20	32,4	29,3	41,3
DC-3-8-13	-	-	70	30	32,4	38,1	55,1
DC-4-9-14	-	-	60	40	29,2	32,4	48,9
DC-5-10-15	-	-	50	50	28,9	54,5	67,7



Şekil 4.28 İkili karışımlardan (*dc* (a), *vc* (b), *sc* (c)) üretilen numunelerin basma dayanımları.

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi ikili karışımların tüm sıcaklık ve aralıklarında bağlayıcı refrakter kil oranındaki azalmanın üretilen numunelerin basma dayanımını düşürdüğü görülmektedir. Şamot ve bağlayıcı kil karışımlarında (*sc*) aynı bileşimlere sahip yapıların basma dayanımları karşılaştırıldığında en yüksek değerlerin 900 °C’de elde edildiği ve sıcaklıktaki artışın basma dayanım değerlerini azalttığı görülmektedir. Bunun yanında bağlayıcı refrakter kili-vermikülit (*vc*) ve bağlayıcı refrakter kili-diatomit (*dc*) karışımlarında sıcaklık artışı ile beraber yoğunluk oranlarıyla doğru orantılı olarak basma dayanımlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca bağlayıcı refrakter kili-vermikülit (*vc*) karışımlarında %70 vermikülit oranlarından sonra farklı sıcaklıklarda basma dayanım değerleri değişim göstermektedir. Bunun sebebinin vermikülit miktarındaki artışın basma deneyi sırasında hatalara sebep olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber vermikülit,



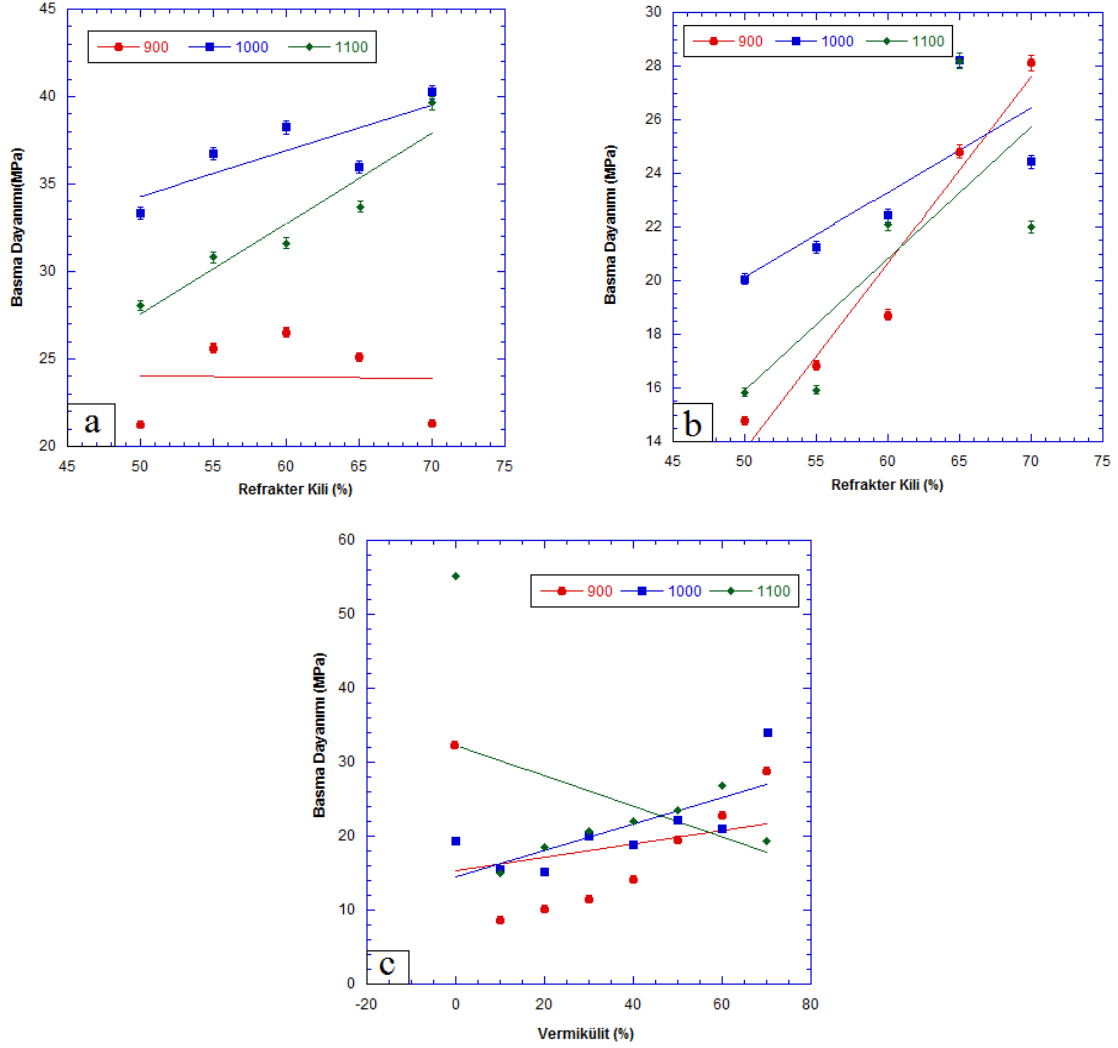
diatomit ve refrakter kili karşılaştırıldığında vermikülitli karışımlarda en yüksek basma dayanım değerleri elde edilirken daha sonra sırayı refrakter kili ve diatomit almaktadır.

#### 4.2.3.2 Üçlü Karışımlardan (scv, vcd, scd) Üretilen Numunelerin Basma Dayanımları

Üçlü karışımlardan (scv, vcd, scd) üretilen numunelerin ölçülen basma dayanımları Tablo 4.12’de gösterilmiş ve ayrıca grafiğe dökülerek Şekil 4.29’da karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.12 Üçlü karışımlardan (scv, vcd, scd) üretilen numunelerin ölçülen basma dayanımları.

Grup	Karışımlar				Basma Dayanımı (MPa)		
	Refrakter kili, %	Vermikülit, %	Diatomit, %	Bağlayıcı kil, %	900°C	1000°C	1100°C
SCV-1-6-11	70	0	-	30	21,3	40,3	39,6
SCV-2-7-12	65	5	-	30	25,1	35,9	33,6
SCV-3-8-13	60	10	-	30	26,5	38,2	31,6
SCV-4-9-14	55	15	-	30	25,6	36,7	30,8
SCV-5-10-15	50	20	-	30	21,2	33,3	28,0
SCD-1-6-11	70	-	0	30	28,1	24,4	-
SCD-2-7-12	65	-	5	30	24,8	28,2	28,1
SCD-3-8-13	60	-	10	30	18,7	22,4	22,0
SCD-4-9-14	55	-	15	30	16,8	21,2	15,9
SCD-5-10-15	50	-	20	30	14,7	20,0	15,8
VCD-1-9-17	-	0	70	30	32,4	19,3	55,1
VCD-2-10-18	-	10	60	30	8,7	15,5	15,0
VCD-3-11-19	-	20	50	30	10,1	15,1	18,5
VCD-4-12-20	-	30	40	30	11,4	19,9	20,6
VCD-5-13-21	-	40	30	30	14,2	18,7	21,9
VCD-6-14-22	-	50	20	30	19,5	22,1	23,4
VCD-7-15-23	-	60	10	30	22,8	21,0	26,8
VCD-8-16-24	-	70	0	30	28,8	34,1	19,3



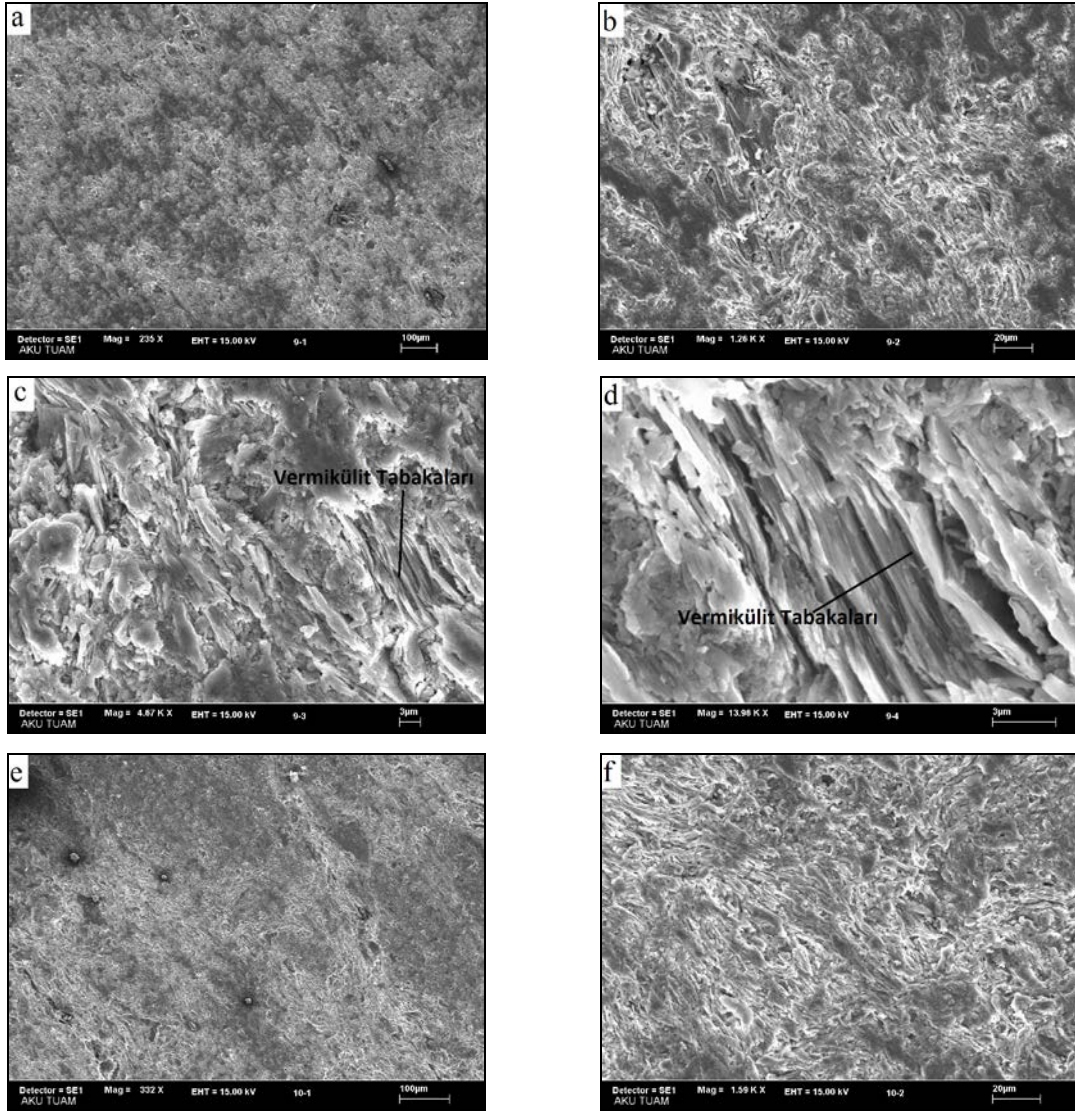
Şekil 4.29 Üçlü karışımlardan (*scv* (a), *scd* (b), *vcd* (c)) üretilen numunelerin ölçülen basma dayanımları.

Şekil 4.29’da görüldüğü gibi %30 oranında bağlayıcı refrakter kiline sahip tüm yapılardan refrakter kili-bağlayıcı refrakter kili-vermikülit karışımları (*scv*) ve refrakter kili-bağlayıcı refrakter kili-diatomit (*scd*) karşılaştırıldığında 900°C, 1000°C ve 1100°C’de üretilen numunelerin basma dayanımının artan vermikülit ve diatomit oranları ile azaldığı görülmektedir. Ayrıca bu yapılarda en yüksek basma dayanım değerlerinin 1000°C’de elde edildiği ve daha sonra sırasıyla 1100°C ve 900°C’ de elde edildiği görülmektedir. Bunun sebebinin oluşan kristal yapıdaki dönüşümlerin olduğu düşünülmektedir. Ancak refrakter kili bulunmayan vermikülit-bağlayıcı refrakter kili-diatomit (*vcd*) karışımlarına baktığımızda artan sıcaklıklar ve yoğunluk ile doğru orantılı olarak basma dayanımlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca tüm karışımlar karşılaştırıldığında vermikülit içeriğine sahip

karışımların diatomitlere göre daha yüksek basma dayanım değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

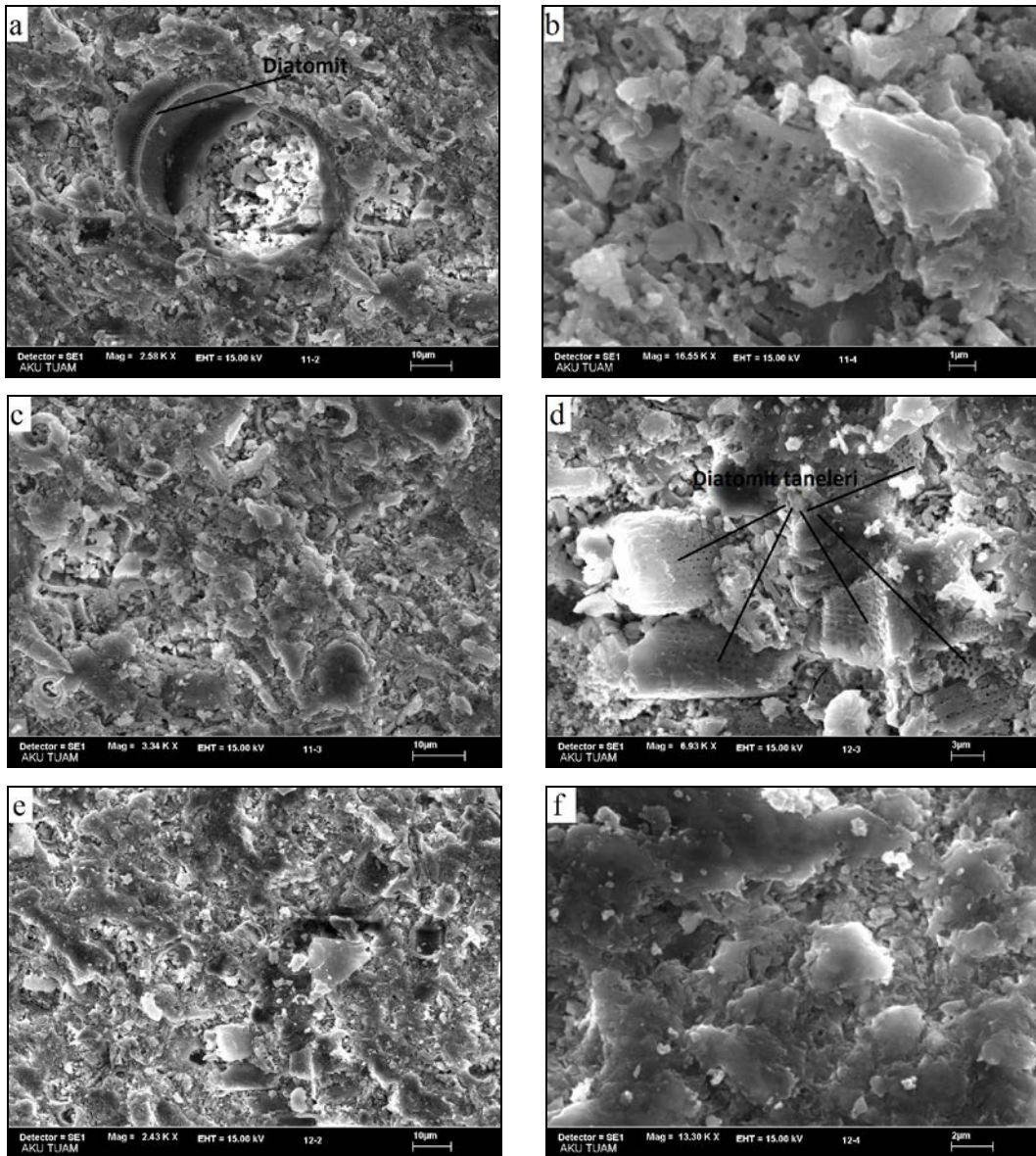
#### 4.2.4 Numunelerin Mikroyapısal Analizi (SEM, EDS)

Şekil 4.30'da vermikülit ve bağlayıcı kil karışımlarından 900°C'de üretilen iki farklı kompozisyona sahip numunelerin SEM görüntüleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi vermikülit miktarı yüksek olan yapılar da (%90) daha boşluklu ve katmanlı bir yapı elde edilirken daha düşük vermikülit oranına sahip yapının (%10) daha sıkı ve nispeten daha az gözenek oranına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.30 Vermikülit ve bağlayıcı kil karışımlarından 900°C'de üretilen iki farklı kompozisyona sahip (vc-1: %90 vermikülit + %10 bağlayıcı kil (a, b, c, d) ve vc-5: %50 vermikülit + %50 bağlayıcı kil (e, f)) numunelerin SEM görüntüleri.

Bunların yanında Şekil 4.31’de diatomit ve bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona sahip numunelerin SEM görüntüleri, Şekil 4.32’de refrakter kili/vermikulit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen iki farklı kompozisyon ve sıcaklıkta pişirilmiş numunelerin SEM görüntüleri, Şekil 4.33’de refrakter kili/diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen iki farklı kompozisyon ve sıcaklıkta pişirilmiş numunelerin SEM görüntüleri ve son olarak Şekil 4.34’de diatomit/vermikulit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona sahip numunelerin SEM görüntüleri karşılaştırılmak üzere gösterilmiştir.

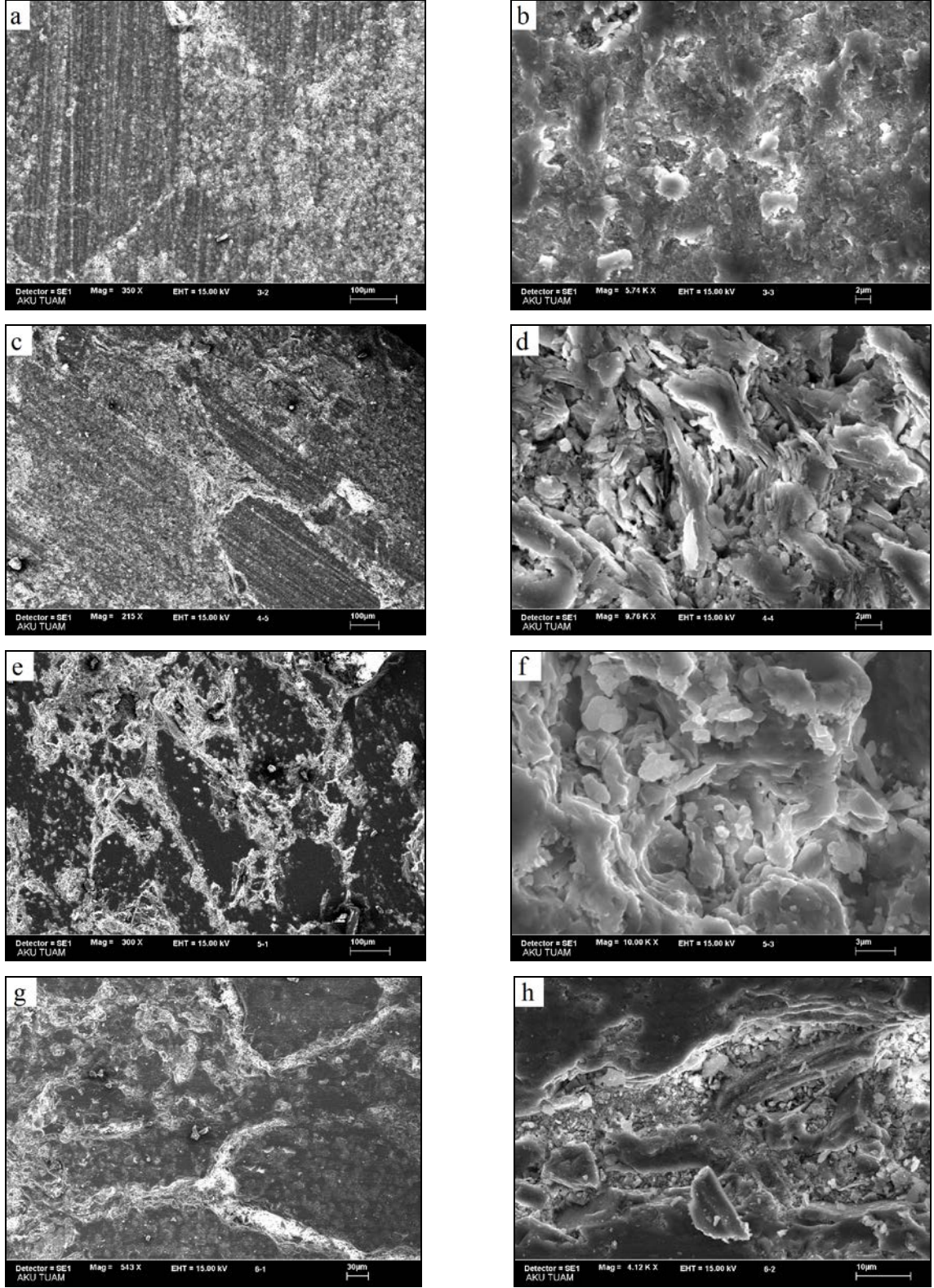


Şekil 4.31 Diatomit ve bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona sahip (dc-1: %90 diatomit + %10 bağlayıcı kil (a, b, c) ve dc-5: %50 diatomit + %50 bağlayıcı kil (d, e, f) numunelerin SEM görüntüleri.

Diatomit ve bağlayıcı kil karışımlarından (dc) 900°C’de üretilen numunelerin Şekil 4.31’de gösterilen SEM görüntüleri incelendiğinde diatomit oranı %90 olan dc-1 numunesindeki yapının diatomit oranı %50 olan dc-5 numunesindeki yapıya göre daha gevşek ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Zaten yapılan fiziksel analizlerde de diatomit hamaddesinin yoğunluğu düşürdüğü ve gözenekliliği arttırdığı görülmüştür.

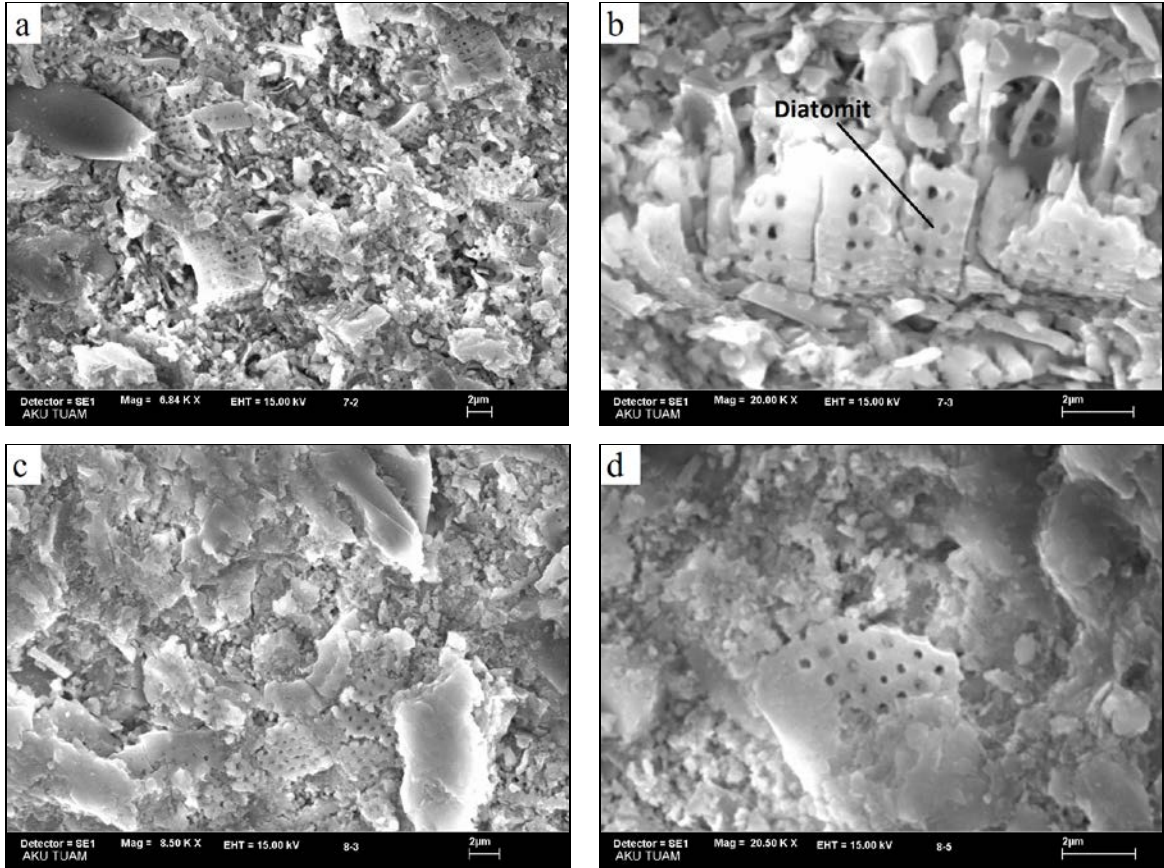
Refrakter kili/vermikülit ve %30 bağlayıcı kil (scv) karışımlarından üretilen iki farklı bileşime sahip yapılar Şekil 4.32’de görüldüğü gibi karşılaştırıldığında aynı sıcaklıklarda üretilmiş %20 vermikülit içeriğine sahip yapıların vermikülit içermeyen yapılara göre nispeten daha az gözenekliliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu ayırım 1100 °C’de üretilen numunelerde daha iyi bir şekilde yapılabilir. Ayrıca 1100°C’de üretilen numunelerin 1000°C’de üretilen numunelere nazaran daha yoğun bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Ayrıca buradan öğütülmüş vermikülit hammaddesi kullanıldığında refrakter kiline göre daha yoğun bir yapı elde edilebileceği sonucu çıkarılabilir.





Şekil 4.32 Refrakter kili/vermikulit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen iki farklı kompozisyon (scv-1: %70 refrakter kil+%0 vermikulit (900°C) (a, b), scv-5: %50refrakter kil+%20 vermikulit (900°C) (c, d), scv-11: %70 refrakter kil+%0vermikulit (1100°C) (e, f), scv-15: %50refrakter kil+%20 vermikulit (1100°C) (g, h)) ve sıcaklıkta pişirilmiş numunelerin SEM görüntüleri.

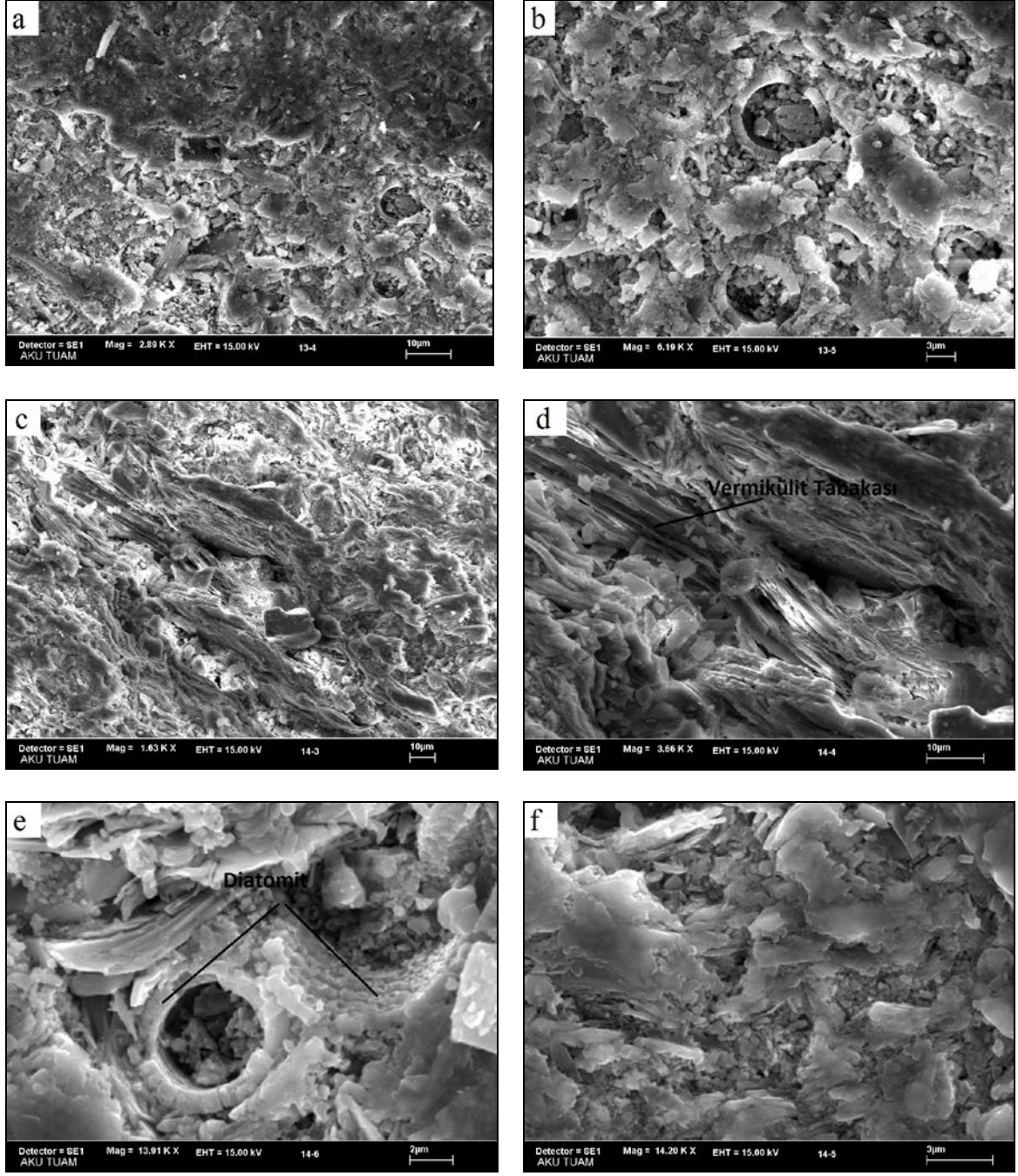
Refrakter kili/diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından (scd) üretilen iki farklı sıcaklıkta pişirilmiş numuneler Şekil 4.33’de görüldüğü gibi karşılaştırıldığında sıcaklık artışı ile daha yoğun bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca diatomit oranlarındaki artışın malzemedeki yoğunluğu düşürdüğü ve gözenek oranını arttırdığı yapılan deneylerde görülmüştür.



Şekil 4.33 Refrakter kili/diatomit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen iki farklı sıcaklıkta pişirilmiş numunelerin (scd-5: %50 refrakter kil + %20 diatomit (900°C) (a, b), scd-15: %50 refrakter kil + %20 diatomit (1100°C) (c, d)) SEM görüntüleri.

Diatomit/vermikülit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona sahip numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.34’de görüldüğü gibi karşılaştırıldığında %60 diatomit oranına sahip yapının daha poroz olduğu görülürken, %60 vermikülit oranına sahip yapının lamelli ve nispeten daha yoğun bir yapı sergilediği görülmektedir. Bunun diatomit hammaddesinin öğütülmüş vermiküit hammaddesine oranla daha gözenekli bir yapıya sahip olmasından kaynaklandığı söylenebilir.





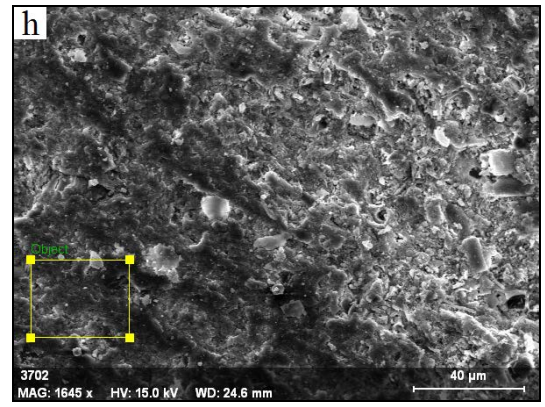
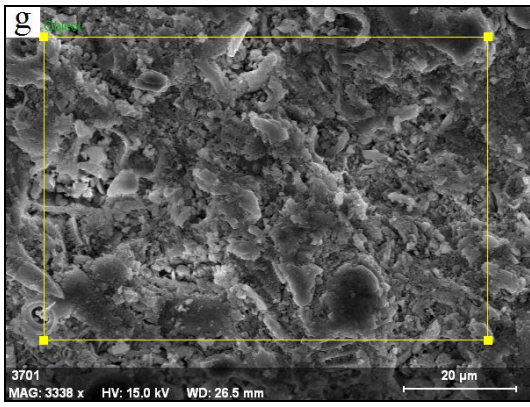
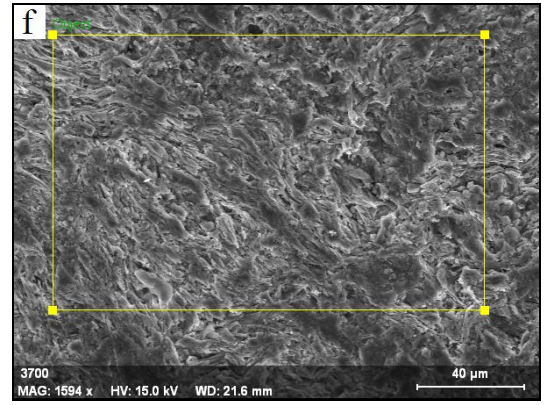
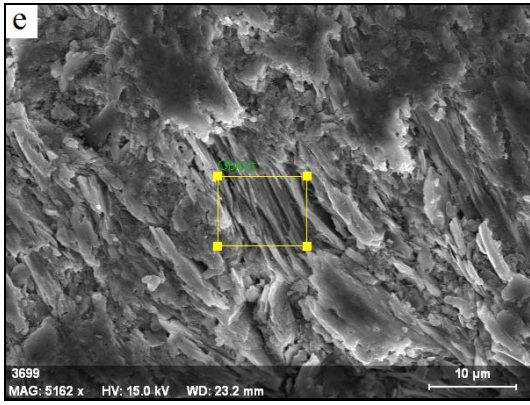
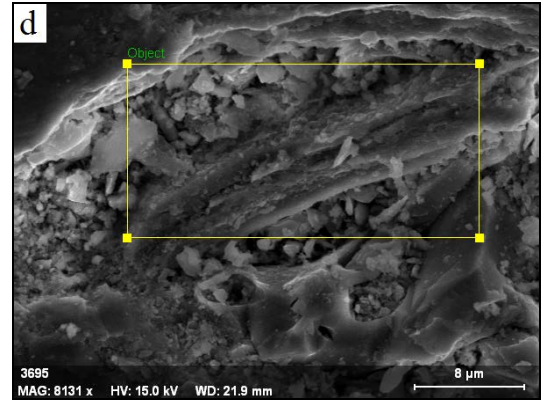
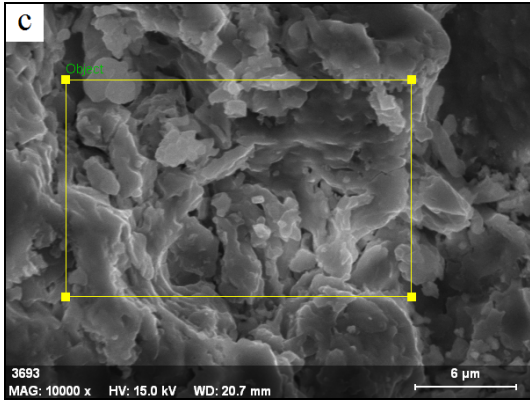
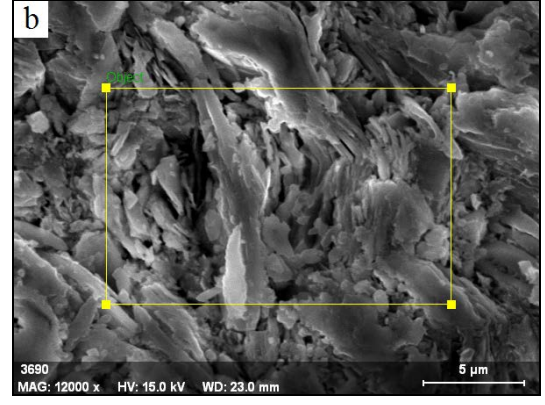
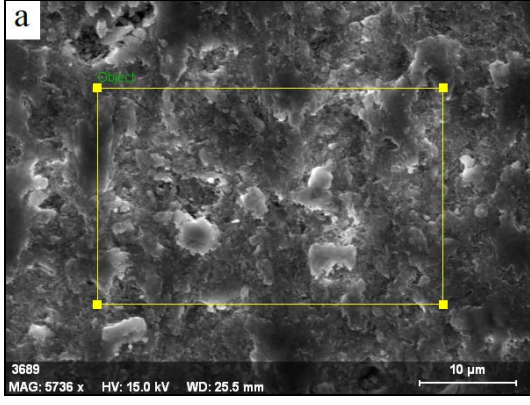
Şekil 4.34 Diatomit/vermikülit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından 900°C’de üretilen iki farklı kompozisyona (vcd-2: %10 vermikülit + %60 diatomit (a, b), vcd-7: %60 vermikülit + %10 diatomit (c, d, e, f) ) sahip numunelerin SEM görüntüleri.

Tablo 4.13’de pişmiş numunelerin EDS analizi verilmiş olup, Şekil 4.35’de EDS analizi yapılmış bölgeler verilmiştir. Analiz sonuçlarından görüldüğü gibi kullanılan hammadelerle orantılı olacak şekilde kimyasal bileşimler elde edilmiştir. Diatomit içerisindeki yüksek SiO<sub>2</sub> oranları ilave edildiği bünyelerde kendini açıkça göstermektedir.

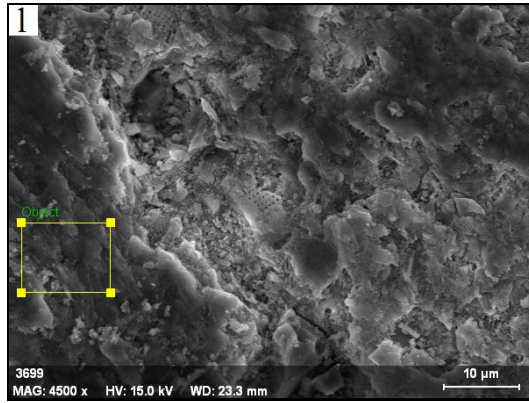
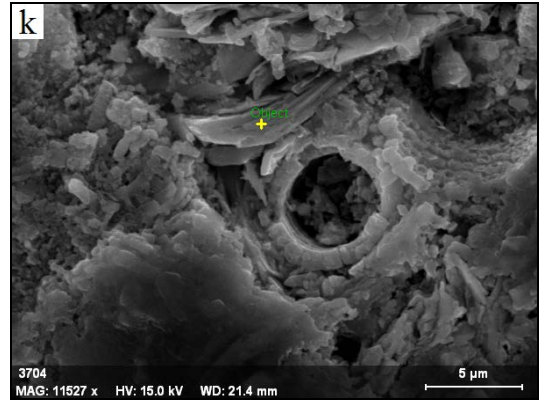
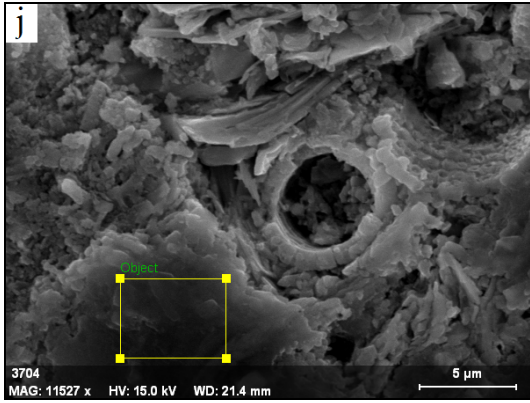
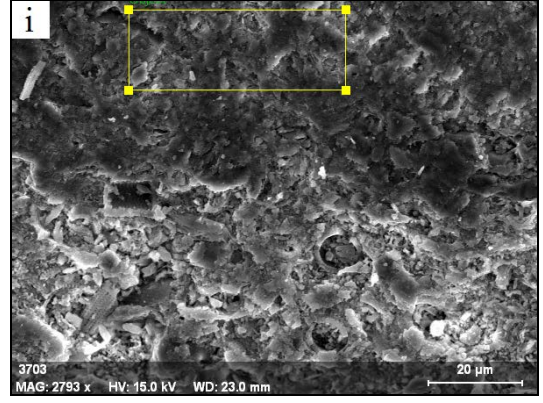
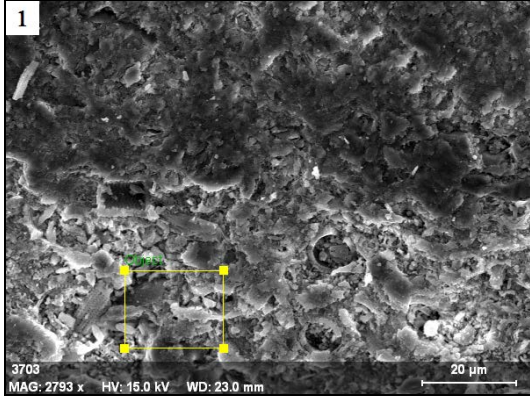


Tablo 4.13 Pişmiş numunelerin EDS analizi (ağ.%)

Numuneler	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
sc-5	54,6	38,6	0,84	-	2,26	1,3	2,38	-
sc-15	57,9	42,1	-	-	-	-	-	-
vc-1	41,96	17,51	9,58	2,44	19,94	2,58	5,99	-
vc-5	47,57	22,55	6,11	2,81	13,71	3,2	4,05	-
dc-1	89,5	8,62	0,45	0,79	-	-	0,64	-
dc-5	66,3	30,43	0,61	-	-	-	2,65	-
scv-1	51,27	43,32	0,61	-	1,99	1,85	0,6	0,35
scv-5	51,57	26,14	4,87	2,66	9,07	3,52	2,17	-
scv-11	65,19	29,32	1,07	-	1,79	-	2,64	-
scv-15	51,38	20,84	8,9	1,65	14,21	1,83	1,18	-
scd-15	69,7	26,49	0,69	0,41	-	2,71	-	-
vcd-2a	91,24	7,05	0,64	-	1,07	-	-	-
vcd-2b	58,8	34,81	1,19	-	2,08	3,12	-	-
vcd-7a	70,0	14,74	3,95	1,57	6,48	1,33	1,57	-
vcd-7b	48,6	15,45	6,03	2,46	22,55	2,9	2,01	-



Şekil 4.35 Pişmiş numunelerin EDS analizi alınan bölgeler (scv-1 (a), scv-5 (b), scv-11 (c), scv-15 (d), vc-1 (e), vc-5 (f), dc-1 (g), dc-5 (h), vcd-2a (i), vcd-2b (i), vcd-7a (j), vcd-7b (k), scd-15 (l)).



Şekil 4.35 (devam ediyor).

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 5.1 SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada genleştirilmiş vermikülit, diatomit ve şamot hammaddeleri kullanılarak farklı oranlarda karışımlar hazırlanmış, hazırlanan karışımlar yarı-kuru presleme (semi-dry pressing) yöntemiyle şekillendirilerek 900-1100°C aralığında laboratuvar fırınında sinterlenmiştir. Üretilen numunelerin, fiziksel (yoğunluk, gözenek oranı, boyutsal değişimi), mekanik (basma dayanımı), termal (ısıl iletkenlik) ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir;

Üretilen ikili karışımlarda (sc, dc, vc) refrakter kili, vermikülit ve diatomit içeriklerinin artması yani bağlayıcı refrakter kil oranının azalması ile yoğunlukların azaldığı, bununla beraber gözeneklilik oranlarının arttığı görülmüştür. Ayrıca en yoğun yapının vermikülit içerikli (vc) numunelerinde elde edildiği ve sonra refrakter kili ve diatomit içerikli yapılarda elde edildiği anlaşılmıştır. Bunun yanında en yüksek görünür porozite oranının %55,7 ile diatomit oranı %90 olan numunelerde elde edileceği anlaşılmıştır.

İkili karışımların ısıl iletim katsayılarını incelediğimizde diatomit oranı %90 olan numunelerde yani en çok görünür poroziteye sahip numunelerin en düşük ısıl iletim katsayı değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak tüm yapılarda ısıl iletkenlik artan görünür porozite değerleri ile azalmıştır. Bu sonuç ısıl iletkenliğin gözeneklilik oranlarıyla beklenen ilişkisini ortaya koymuştur.

Yine üretilen ikili karışımlarda (sc, dc, vc) basma dayanım değerleri genellikle görünür porozite ile ters orantılı olarak azalma eğilimine düşmüştür. Diatomitli (dc) ve vermikülitli (vc) karışımlarda sıcaklık artışı ile doğru orantılı olarak artan basma dayanımları, refrakter kili(sc) içeren numunelerde tam tersi olarak azalmıştır. Bu durum üretilen numunelerin



kristal yapısında meydana gelen reaksiyonlar ile açıklanabilir. Ayrıca en yüksek basma dayanım değerleri vermikülit içeren (vc) numunelerinde elde edilmiştir.

Üçlü karışımlardan (scv, vcd, scd) üretilen numunelerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde; refrakter kili, vermikülit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numunelerde (scv) vermikülit oranının %0'dan %20'lere çıkması her bir sıcaklıkta bulk yoğunlukları arttırmıştır. Fakat refrakter kili, diatomit ve %30 bağlayıcı kil (scd) ve vermikülit, diatomit ve %30 bağlayıcı kil (vcd) karışımlarından üretilen numunelerde artan diatomit oranları ile numunelerin yoğunlukları azalmış ve görünür poroziteleri artmıştır. Her bir sıcaklık için en yüksek yoğunluk değerleri scv numunelerinde elde edilirken daha sonra sırayı vcd ve scd numuneleri takip etmiştir. Ayrıca her bir numune için yoğunluk değerleri sıcaklık arttıkça artmış ve gözeneklilik değerleri ise azalmıştır.

Üçlü karışımların ısı iletim katsayılarını incelediğimizde genel olarak artan görünür porozite oranları ile ters orantılı olarak ısı iletim katsayı değerlerinin her bir sıcaklıkta azaldığı görülmektedir. Bunun yanında pişme sıcaklıkları yükseldiğinde gözenek oranlarındaki düşüş, yani yoğunluklardaki artış nedeniyle ısı iletim katsayıları artma eğilimine girmiştir. Bunun yanında scv ve scd üçlü karışımlarına baktığımızda her iki karışımda da vermikülit ve diatomit oranlarındaki artış ile gözeneklilik oranı arttığından ısı iletim değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Diatomit-vermikülit-%30 bağlayıcı refrakter kilinden (vcd) oluşan karışımlarda ise en düşük ısı iletim katsayı değerlerinin elde edildiğini görürüz. Ayrıca vcd karışımlarında diatomit miktarındaki artışın vermikülit artışına göre görünür porozite değerlerini daha çok arttırdığı ve buna bağlı olarak ısı iletim değerlerini vermikülite nazaran daha çok azalttığı dikkatlerden kaçmamaktadır.

Basma dayanımları da incelenen üçlü karışımlarda, refrakter kili, vermikülit ve %30 bağlayıcı kil karışımlarından üretilen numuneler (scv) ve refrakter kili, diatomit ve %30 bağlayıcı kil (scd) karışımlarından üretilen numuneler karşılaştırıldığında 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C'de üretilen numunelerin basma dayanımının artan vermikülit ve diatomit oranları ile azaldığı görülmektedir. Yine bu iki yapıda en yüksek basma dayanım değerlerinin 1000 °C'de elde edildiği ve daha sonra sırasıyla 1100 °C ve 900 °C' de elde edildiği görülmektedir. Bunun kristal yapıdaki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak refrakter kili bulunmayan vermikülit, diatomit ve %30 bağlayıcı kil (vcd) karışımlarından üretilen numunelere baktığımızda artan sıcaklıklar ve yoğunluk

ile doğru orantılı olarak basma dayanımlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca tüm karışımlar genel olarak karşılaştırıldığında vermikülit içeriğine sahip karışımların diatomitlere göre daha yüksek basma dayanım değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Genel olarak elde edilen sonuçlar sektörde mevcut kullanılan ve farklı içeriğe sahip 1100°C sıcaklıklara dayanımı olan izolasyon tuğlaları ile karşılaştırıldığında, yaygın olarak üretim gerçekleştiren firmaların termal iletkenlik değerleri 0,2-1,46 W/mK aralığında iken (URL-9, 2005; URL-8, 2009), çalışmada üretilen numunelerden elde edilen termal iletkenlik değerleri 0,3-1,3 W/mK aralığında olmuştur. Çalışmada en düşük termal iletkenlik değerleri diatomit oranlarının artması ile elde edilmiştir. Dolayısıyla bu değerler sektörde kullanım açısından elverişli bir aralık elde edildiğini göstermektedir.

## 5.2 ÖNERİLER

Bu çalışmada hazırlanan karışımlar yarı-kuru presleme (semi-dry pressing) yöntemiyle şekillendirilerek üretilmişlerdir. Bu yöntem kullanılırken yüksek oranda diatomit ve vermikülit kil içeren ikili karışımların şekillendirilmesi esnasında yapıya ilave edilen su miktarına bağlı olarak çatlama ve plastikleşme gibi sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sebeple kullanılan vermikülit ve diatomit oranlarına bağlı olarak yapıya su ilave edilmeli ya da bağayıcı kil oranları arttırılmalıdır. Ayrıca bu sorunun önüne geçmek için aynı içeriğe sahip karışımlardan daha fazla su içeriği ile harçlar hazırlanarak kalıplara dökmek suretiyle deneyler tekrarlanabilir. Böylece daha hassas sonuçlar elde edilebilir.

Hazırlanan üçlü karışımlarda bağlayıcı kil oranları düşürülerek ve farklı bağlayıcı kil oranlarında deneyi tekrarlamak daha gözenekli ve düşük ısı iletkenliğe sahip ürünler elde edebilmek için yararlı olacaktır.

Bu çalışmada hazırlanan numunelerin küçük ebatlarda olması bazı deney yöntemlerinde zorluklara neden olmuş ve sektörde yaygın olarak kullanıma sahip olan izolasyon tuğlaları ile kıyaslanmasında yanıtıcı deney sonuçlarının (basma dayanımı vb.) elde edilmesine neden olmuştur. Bu nedenle aynı reçetelere sahip karışımlar hazırlanarak daha büyük ebatlara sahip numuneler üretmek sanayide kullanıma uygun ve sağlıklı sonuçlar elde etmek açısından denemelidir.

## KAYNAKLAR

- Al-Amairh M. N.** (2009). Production of fire-clay refractory bricks from local materials. *European Journal of Scientific Research*, 26 (3): 386-392.
- Anon.** (2012). *Refrakterler*, Kaynağı belirtilmemiş ödev araştırması.
- ASTM C 20-00** (2010). Standard test methods for apparent porosity, water absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by boiling water.
- Bengisu M.** (2006). *Seramik Bilimi ve Mühendisliği*, Nobel Yayınevi.
- Belyakov A. V. ve Ivanov S. E.** (2008). Advantage of heat insulation made of materials with natural porosity. *Refractories and Industrial Ceramics*, 49 (4): 300-303.
- Bentli İ.** (2010). Diatomit katkılı hafif yapı tuğlası üretimi. *Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 1(4): 251 – 257.
- Bilgiç M.** (1998). *Magnezya'nın ve Çelik Yapım Refrakterlerinin Geleceğine Kısa Bir Bakış*. Kütahya Manyezit İşletmeleri A.Ş.
- Birinci N.** (2010). Metal/Seramik Katkılı Afyon Bölgesi Kalsitik-Brusitlerinin Bazik Refrakter Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, 87 s., Afyon.
- Black P. M.** (1975). Mineralogy of new caledonian metamorphic rocks, IV Sheet silicates from onegoa district. *Contribution to Min. Petr*, 49, 269-284.
- Boztas S. C.** (2009). Burdur ili Yeşilova ilçesi kağılcık mevkii kireç taşlarının mermer olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 90s., Adana.
- Carniglia S. C. ve Barna G. L.** (1992). *Handbook of Industrial Refractories Technology*. Noyes Publications, p.627.
- Ceylantekin R. ve Aksel C.** (2006). Zirkon ilavesiyle model MgO-Spinel kompozit refrakterlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve mikroyapısal karakterizasyonu. *4. Uluslararası Katılımlı Seramik Kongresi*, Sakarya.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Değirmenci N. ve Yılmaz A.** (2009). Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 23(1): 284–288.
- Djangang C. N., Elimbi A., Melo U. C., Lecomte G. L., Nkoumbou C., Soro J., Bonnet J. P., Blanchart P., Njopwouo D.** (2008). Sintering of clay-chamotte ceramic composites for refractory bricks. *Ceramics International*, 34(5): 1207–1213.
- DPT** (1995) *Refrakter Killer ve Şiferton Magnezit Disten, Andaluzit, Sillimanit Dolomit Olivin*. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu, Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu, Seramik-Refrakter-Cam Hammaddeleri Çalışma Grubu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- DPT** (2001). *Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayii*. Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Raporu, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- DPT** (2006). *Refrakter Sanayii Ön Raporu*. Taş ve Toprağa Dayalı Sanayiler Özel İhtisas Komisyonu, Dokuzuncu Kalkınma Planı(2007–2013), Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- Erdogan N. ve Yıldız R.** (1995). *Magnezit ve Bazik Refrakter Malzeme Teknolojisi*. Lale Ofset, Kütahya.
- Erol M.** (2007). *Yeni Malzemeler*, Ankara Üniversitesi Kimya Mühendisliği Ders Notları, Ankara.
- Garderen N. V., Clemens F. J., Mezzomo M., Bergman C. P., Graule T.** (2011). Investigation of clay content and sintering temperature on attrition resistance of highly porous diatomite based material. *Applied Clay Science*, 52(1-2): 115–121.
- Grüner J. W.** (1934). Structures of Vermiculites and their collapse by dehydration. *American Mineralogist*, 19, 557-575.
- Haldar M. K., Tripathi H. S., Ghosh S. K.** (2004). Effect of compositional variation on the synthesis of Magnesite-Chrome composite refractory. *Ceramics International*, 30(6): 911-915.
- Han B., Li Y., Guo C., Li N., Chen F.** (2007). Sintering of MgO-based refractories with added WO<sub>3</sub>. *Ceramics International*, 33(8): 1563-1567.
- Hendrick S. B. ve Jefferson M. E.** (1938). Structure of Kaolin and Talc-Pyrophyllite Hydrates and their bearing on water sorption of clays. *American Mineralogist*, 23, 863-875.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- İnel İ.** (1997). *Teknoloji ve Refrakter Hammaddeler*. MTA Genel Müdürlüğü, ANKARA, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, Ekim 1997 İzmir Türkiye, s.16-17.
- Jarvis D.** (1997). Refractory Trends in the UK. *Industrial Minerals*, London.
- Jonker A., Maree D. B. G., Van Der Merwe M. J.** (1998). *Guidelines for Ceramic Techniques*. Pretoria, Technikon Pretoria.
- Jonker A.** (2006). Insulating refractory materials from inorganic waste resources. Faculty of Science Tshwane University of Technology, 120 p.
- Kendal T.** (1995). Steel industry monolithic. *Industrial Minerals*, November 1995, London.
- Karahisar Gökkonca E.** (2010). Diatomit Katkılı Harçların Bazı Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Değişiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekanik Anabilim Dalı, 53 s., Denizli.
- Katsavou I. D., Krokida M. K., Ziomas I. C.** (2012). Determination of mechanical properties and thermal treatment behavior of Alumina-based refractories. *Ceramics International* 38(7): 5747-5756.
- Kimani J. N. ve Aduda B. O.** (2004). Temperature dependence of the thermal conductivity of a Grog modified Kenyan kaolinite refractory. *African Journal of Science and Technology (AJST), Science and Engineering Series*, 5 (1): 6-14.
- Kornmann M. ve CTTB** (2007). Clay Bricks and Roof Tiles, Manufacturing and Properties. Technical Centre for Roof Tiles and Bricks (CTTB).
- Melo M. O. B. C., Silva L. B., Coutinho A. S., Sousa V., Perazzo N.** (2012). Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil. *Energy and Buildings*, 47, 35-43.
- Meyers K. S. ve Speyer R. F.** (2003). Thermal analysis of clays, Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry. Vol. 2: Applications to Inorganic and Miscellaneous Materials ed. M. E. Brown, and Gallagher, P.K., 261-306, Elsevier.
- Mouzdahir Y. E., Elmchaouri A., Mahboub R., Gil A., Korili S. A.** (2009). Synthesis of nano-layered vermiculite of low density by thermal treatment. *Powder Technology*, 189(1): 2-5.
- Nagibin G. E., Levchenko A. A., Kolosova M. M., Sbitnev A. G., Rezinkina O. A., Vshivkov A. Y.** (2009). Analysis of the properties of heat insulation materials based on Tatar Deposit Vermiculite. *Refractories and Industrial Ceramics*, 50 (2): 77-81.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- O'Driscoll M.** (1996). Fused Magnesia. *Industrial Minerals*, London.
- Okada K., Matsui S., İsobe T., Kameshima Y., Nakajima A.** (2008). Water-Retention properties of porous ceramics prepared from mixtures of allophane and Vermiculite for materials to counteract heat island effects. *Ceramics International*, 34(2):345–350.
- Othman A. G. M. ve Khalil N. M.** (2005). Sintering of Magnesia refractories through the formation of Periclase-Forsterite-Spinel phases. *Ceramics International*, 31(8): 1117- 1121.
- Özbey G. ve Atamer N.** (1987). Kizelgur (Diatomit) Hakkında Bazı Bilgiler. *Türkiye 10. Madencilik Bilimsel ve Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı*, TMMOB Maden Mühendisler Odası, Ankara, s. 493-502.
- Peletskii V. E. ve Shur B. A.** (2007), Experimental study of the thermal conductivity of heat insulation materials based on Expanded Vermiculite. *Refractories and Industrial Ceramics*, 48 (5): 356-358.
- Penty R. A. ve Bjirklie J. W.** (1982). Silicon carbide for high temperature heat exchangers. *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 3[1-2]: 120-127.
- Pivinskii Y. E.** (1998). New refractory concretes and binding systems: basic trends of development, production, and use of refractories in the XXIst century. Part I. trends of development, binding systems, research, *Refractories and industrial Ceramics*, 39, 1-2.
- Richerson D. W.** (1982). *Modern Ceramic Engineering*. Marcel Dekker New York.
- Robert D. ve Crangle J.** (2011). Diatomite. *2010 Minerals Yearbook*, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 5 s.
- Schacht C. A.** (2004). *Refractories Handbook*. Marcel Dekker, NY, p. 499.
- Suvorov S. A. ve Skurikhin V. V.** (2002). High-temperature heat-insulating materials based on Vermiculite. *Refractories and Industrial Ceramics*, 43 (11-12): 383-389.
- Suvorov S. A. ve Skurikhin V. V.** (2003). Vermiculite - a promising material for high-temperature heat insulators. *Refractories and Industrial Ceramics*, 44(3): 186-193.
- Soykan H. Ş.** (2004). *Seramik Malzemeler*. Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ders Notları, Kocaeli.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Sümer S.** (1998). Seramik Endüstrisi III. Anadolu Üniversitesi Yayınları.
- Sütçü M., Akkurt S., Bayram A., Uluca U.** (2012). Production of anorthite refractory insulating firebrick from mixtures of clay and recycled paper waste with sawdust addition. *Ceramics International*, 38(2): 1033-1041.
- Şahin A.** (20..). *Refrakter Malzemeler*. Refrakterler ve Endüstri Fırınları Ders Notu, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas.
- Şahin M.** (2011). Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Çelik Tel Takviyeli-Çimento Esaslı Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Dirençleri. Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, 88 s., Yozgat.
- Takamiya Y.** (1998). *Refractories Handbook (English Edition)*, pp 399, Japan.
- Toksoy F.** (1997). Vermikülit: Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'deki Durumu. 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 16-17 Ekim, İzmir, s. 123-139.
- URL-1** (2012). <http://perlit.nedir.com/>
- URL-2** (2010). <http://www.persaperlit.com/index.php/perlit>
- URL-3** (2012). <http://www.nkfu.com/kaolin-nedir-ne-ise-yarar/>
- URL-4** (2013). <http://tr.wikipedia.org/wiki/Kaolin>
- URL-5** (2010). <http://www.smileturkiye.com/blog/?p=3105>
- URL-6** (2013). <http://perlit.gen.tr/images/lotus.jpg>
- URL-7** (2012). [http://www.mta.gov.tr/v2.0/default.php?id=maden\\_yataklari](http://www.mta.gov.tr/v2.0/default.php?id=maden_yataklari)
- URL-8** (2009). [http://www.artherm.com/izole\\_seramik\\_tugla.html](http://www.artherm.com/izole_seramik_tugla.html)
- URL-9** (2005). <http://www.selko.com.tr/tr/spe/spe3.htm>
- Uygun A.** (1976). Diatomit jeolojisi ve yararlanma olanakları. *Madencilik*, MTA Enstitüsü Ankara 15, 31-38.
- Ünal O.** (20..). *Refrakter Malzemeler*. Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Malzemesi Ders Notları, Afyon.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

**Van Garsel D., Gnauck V., Kriechbaum Stineben I.** (1998). New Insulating Raw Material for High Temperature Applications. *Alcoa Industrial Chemicals Europe*, Deutschland T.G. Swansinger, Alcoa Technical Centre, USA.

**Wellborn W** (1995). Fused Alumina. *Industrial Minerals*, London.

**Yılmaz H. ve Kara F.** (2010). Refrakter malzeme üretimi. *Ulusal Meslek Yüksekokulları Öğrenci Sempozyumu*, 21-22 Ekim, Düzce.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Serkan DAL 1989'da Zonguldak'ta doğdu; İlk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı; Zonguldak Fener Lisesi'nden mezun olduktan sonra 2006 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne girdi; 2011'de mezun olduktan sonra aynı yıl Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı; 2013 yılında Nevşehir Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı; halen bu görevini sürdürmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Nevşehir Üniversitesi  
2000 Evler Mah. Zübeyde  
Hanım Caddesi  
50300 NEVŞEHİR

Tel: (384) 228 10 00

Faks: (384) 228 11 23

E-posta: serkandal@nevsehir.edu.tr