

T.C.  
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**REFRAKTER MALZEMELERİN ISIL İLETİM KATSAYISI VE DAYANIMININ  
OPTİMİZASYONUNDA REÇETE VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR TÖRE

TEZ DANIŐMANI  
DOÇ. DR. ÜSAME DEMİR

BİLECİK, 2025

10760588

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**REFRAKTER MALZEMELERİN ISIL İLETİM KATSAYISI VE DAYANIMININ  
OPTİMİZASYONUNDA REÇETE VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ONUR TÖRE

TEZ DANIŐMANI

DOÇ. DR. ÜSAME DEMİR

BİLECİK, 2025

10760588

## BEYAN

“Refrakter malzemelerin ısı iletim katsayısı ve dayanımının optimizasyonunda reçete ve üretim parametrelerinin etkisi” adlı yüksek lisans tezi hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile birlikte, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
<b>DESTEK ALINMIŞTIR</b>		<b>DESTEK ALINMAMIŞTIR</b>	<b>X</b>
<b>Destek alındı ise;</b>			
<b>Destekleyen kurum;</b>			
<b>Desteğin Türü</b>		<b>Proje Numarası</b>	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;..... .....			
<b>ETİK KURUL onayı var ise;</b>			
<b>ETİK KURUL karar tarih/sayı:</b>		...../..... .....	

**Onur Töre**

**Tarih**

**.../.../2025**

**İmza**

## ÖN SÖZ

Yaptığım bu tez çalışmasının yazılması aşamasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Doç. Dr. Üsame DEMİR'e değerli katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam döneminde tüm fabrika ve laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayan, çalışmam sırasında yardımcı olan tüm ekip arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hem eğitim hem sosyal hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını bildiğim değerli aileme en içten duygularıyla ayrı ayrı teşekkür ederim.

Son olarak da tanıdığım günden itibaren her zaman yanımda olan, bana daima her konuda destek olan, beni her zaman değerli hissettiren hayat arkadaşım sevgili eşime çok teşekkür ederim.

**Onur Töre**

**2025**

## ÖZET

### REFRAKTER MALZEMELERİN ISIL İLETİM KATSAYISI VE DAYANIMININ OPTİMİZASYONUNDA REÇETE VE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Bu çalışma ile refrakter hammaddelerin farklı basınçlarda ve farklı kalınlıkta üretimi yapılarak analizleri incelenmiştir. Çalışma, SÖRMAŞ A.Ş.'nin üretim sürecinde kullandığı hammaddeler ile manyezit bazlı refrakter tuğlalar üzerine odaklanmıştır. Sektör olarak çimento sektöründe manyezit spinel refrakter tuğlalar tercih edilmiştir. Bu çalışmada için 1400 kg/cm<sup>2</sup>, 1500 kg/cm<sup>2</sup> ve 1600 kg/cm<sup>2</sup> basınçlarda; 60 mm, 70 mm ve 80 mm kalınlıklarda olmak üzere toplam 9 farklı tuğla üretimi yapılmıştır. Üretim öncesi hammaddeden kimyasal analiz yapılmıştır. Üretim sonrası ise boyut kontrolü, yoğunluk, görünür porozite, su emme, soğukta basma mukavemeti ve ısı iletim katsayısı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda en ve boy yönlerinde değişim oranlarına baktığımızda, genel olarak bir negatiflik gözlemlenmektedir. Bu negatiflik ise tuğlanın küçüldüğünü yani çekme olduğunu ifade eder. Yoğunluklardaki değişim ise fırın sonrası rutubetin attığı için en boy oranına bağlı olarak düşüşü göstermektedir. Porozite, su emme ve soğuk basma mukavemeti açısından dengeli bir performans için 1500 kg/cm<sup>2</sup> presleme basıncı ve 80 mm kalınlık optimal değerler olarak belirlenmiştir. Ancak, maksimum mekanik mukavemetin öncelikli olduğu uygulamalar için 1600 kg/cm<sup>2</sup> presleme basıncı ve 80 mm kalınlık önerilmektedir. Isıl iletim katsayı değerlerine baktığımız zaman deneysel sonuçlara göre, basınç arttıkça ısı iletkenlik değerlerinin genel olarak arttığı gözlemlenmiştir. 1600 kg/cm<sup>2</sup> basınca ve 20 mm kalınlığa sahip numune en yüksek iletkenlik değerine (20,25 W/m.K) ulaşmıştır. Bu değer, düşük kalınlıkla birlikte yüksek yoğunluğun etkisinin bir sonucudur. Buna karşılık, 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınca ve 30 mm kalınlığa sahip numune en düşük iletkenlik değerini (16,037 W/m.K) ölçmüştür. Bu, düşük presleme basıncı ve orta kalınlık kombinasyonunun malzeme içinde daha fazla mikro gözenek ve temas eksikliği yarattığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Refrakter, Basınç, Isıl İletim Katsayısı, Manyezit

## ABSTRACT

### THE EFFECT OF RECIPE AND PRODUCTION PARAMETERS ON OPTIMIZATION OF THERMAL CONDUCTIVITY AND STRENGTH OF REFRACTORY MATERIALS

This study analyzed the production of refractory raw materials at different pressures and thicknesses. The study focused on the raw materials used in the production process of SÖRMAŞ A.Ş. and magnesite based refractory bricks. Magnesite spinel refractory bricks are preferred in the cement industry. For this study, a total of nine different bricks were produced at pressures of 1400 kg/cm<sup>2</sup>, 1500 kg/cm<sup>2</sup>, and 1600 kg/cm<sup>2</sup>, with thicknesses of 60 mm, 70 mm, and 80 mm. Chemical analysis was performed on the raw materials before production. After production, dimensional control, density, apparent porosity, water absorption, cold compressive strength, and thermal conductivity coefficient tests were conducted. Looking at the rates of change in width and length as a result of the investigations, a general negativity is observed. This negativity indicates shrinkage, meaning shrinkage, of the brick. The change in density shows a decrease depending on the width to length ratio due to the moisture released after firing. For balanced performance in terms of porosity, water absorption, and cold compression strength, a pressing pressure of 1500 kg/cm<sup>2</sup> and a thickness of 80 mm have been determined as optimal values. However, for applications where maximum mechanical strength is a priority, a pressing pressure of 1600 kg/cm<sup>2</sup> and a thickness of 80 mm are recommended. Looking at the thermal conductivity coefficient values, it has been observed that thermal conductivity values generally increase as pressure increases, according to experimental results. The sample with a pressure of 1600 kg/cm<sup>2</sup> and a thickness of 20 mm achieved the highest conductivity value (20,25 W/m.K). This value is a result of the effect of high density combined with low thickness. In contrast, the sample with a pressure of 1400 kg/cm<sup>2</sup> and a thickness of 30 mm measured the lowest conductivity value (16,037 W/m.K). This indicates that the combination of low pressing pressure and medium thickness creates more micro-pores and contact deficiencies within the material.

**Keywords:** Refractory, Pressure, Coefficient of Thermal Conductivity, Magnesite

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET .....	ii
ABSTRACT .....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. REFRAKTER MALZEMELER .....	3
2.1. Refrakter Malzemelerin Genel Özellikleri.....	4
2.1.1. Kimyasal Yapı.....	4
2.1.2 Genişleme ve Çekme.....	4
2.1.3 Yoğunluk ve porozite .....	4
2.1.4. Fırın Sıcaklığında Basınca Direnç .....	5
2.1.5. Isıl Özellikler .....	5
2.1.6. Isıl Çatlama ve Parçalanma .....	5
2.1.7. Mekanik Dayanıklılık.....	5
2.2. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması .....	6
2.2.1. Kullanım Sıcaklığına Göre.....	6
2.2.2. Üretim Yöntemlerine Göre .....	7
2.2.3. Kimyasal Özelliklere Göre.....	7
2.3. Refrakter Malzemelerin Kullanım Alanları .....	8
3. ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE REFRAKTER MALZEME .....	10
3.1. Çimento üretimi.....	10
3.2. Çimento döner fırınlarının refrakter örgüsü .....	11
3.3. Çimento döner fırını refrakter örgüdeki sorunlar .....	13
3.4. Manyezit İçerikli Refrakter Tuğlalar.....	16
3.4.1 Manyezit.....	16
3.4.2 Manyezit'in Tarihi.....	16
3.4.3 Magnezya Elde Edilme Yöntemleri .....	17
4. ISIL İLETKENLİK .....	18

<b>4.1. Isıl İletkenlikle İlgili Genel Tanımlar</b> .....	<b>18</b>
4.1.1 Isı .....	18
4.1.2 Sıcaklık .....	18
4.1.3 Isı Akısı.....	19
4.1.4 Isı Sığası.....	19
4.1.5 Özgül Isı.....	19
4.1.6 Isı İletkenliği.....	20
4.1.7 Termoelektrik Özellikler.....	21
<b>4.2. Isıl İletkenlik Ölçüm Metotları</b> .....	<b>22</b>
4.2.1 Doğrusal Isı Akış Yöntemleri.....	23
4.2.1.1 Mutlak Yöntemler .....	24
4.2.1.2 Karşılaştırmalı Yöntemler.....	25
4.2.2 Doğrudan Elektriksel Isıtma Yöntemi.....	26
4.2.2.1 Silindirik Çubuk Yöntemleri.....	26
4.2.2.2 Dikdörtgen Çubuk Yöntemi.....	27
4.2.3 Radyal Isı Akış Yöntemi .....	28
4.2.3.1 Mutlak Radyal Isı Akış Yöntemi.....	28
4.2.3.2 Karşılaştırmalı Yöntemler.....	29
4.2.4 Forbes'in Çubuk Yöntemi .....	30
4.2.5 Termoelektriksel Yöntem .....	30
4.2.6 Isısal Karşılaştırma Yöntemi .....	31
<b>5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>32</b>
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b> .....	<b>38</b>
6.1. Kullanılan Refrakter Tuğlanın Malzemesi .....	38
6.2. Kullanılan Refrakter Tuğla Malzemesinin Üretimi.....	38
6.2.1. Hammadde .....	39
6.2.2. Kırma-Öğütme.....	39
6.2.3. Eleme-Silo.....	40
6.2.4. Mikser.....	40
6.2.5. Şekillendirme.....	40
6.2.6. Pişirim .....	41
6.2.7. Analizler .....	42
6.2.7.1. Kimyasal analiz.....	42

6.2.7.2. Yoğunluk, Görünür Porozite, Su Emme .....	43
6.2.7.3. Soğukta Basma Mukavemeti (C.C.S) .....	44
6.2.7.4. Pişirim Sonucunda Boyut Kontrolü .....	45
6.2.7.5. Isıl iletkenlik Katsayısı.....	45
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	47
7.1. Kimyasal Analiz Sonuçları.....	47
7.2. Fiziksel Kontrol Sonuçları.....	47
7.3. Isıl İletim Katsayısı Analiz Sonuçları.....	63
8.SONUÇLAR.....	65
KAYNAKÇA .....	68

## TABLolar LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 4.1.</b> Bazı Malzemelerin Özgöl Isı Değerleri.....	<b>19</b>
<b>Tablo 4.2.</b> Kararlı Hal Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	<b>23</b>
<b>Tablo 7.1.</b> Deneylerde Kullanılan Hammaddenin Kimyasal Analiz Sonuçları.....	<b>47</b>
<b>Tablo 7.2.</b> Kompozisyonların Preslenme Sonrası Yoğunluk Değerlerine Etkileri.....	<b>48</b>
<b>Tablo 7.3.</b> Kompozisyonların Pişirme Sonrası Yoğunluk Değerlerine ve Ölçü Değişimlerine Etkisi.....	<b>48</b>
<b>Tablo 7.4.</b> Üretimi Yapılan Tuğlaların Şekillendirme ve Pişirim Sonrasındaki Boyut Değişimleri.....	<b>49</b>
<b>Tablo 7.5.</b> Üretimi Yapılan Tuğlaların Pişirim Sonrasındaki Hacim Ağırlık, Görünür, Porozite, Su Emme, Mukavemet Analiz Değerler.....	<b>49</b>
<b>Tablo 7.6.</b> Farklı basınç ve Farklı kalınlıkta üretimi yapılan refrakterin Isıl iletkenlik ve yayılma analiz değerleri.....	<b>61</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması .....	6
Şekil 3.1. Çimento Üretimi Akış Şeması.....	11
Şekil 3.2. Çimento Döner Fırınlarının Refrakter Örgüsü.....	12
Şekil 3.3. Çimento Döner Fırının Şematik Gösterimi.....	12
Şekil 3.4. Çimento Döner Fırının Maruz Kaldığı Etkiler .....	15
Şekil 6.1. Yapılan Çalışmanın Üretim Basamakları Şeması .....	38
Şekil 6.2. Deniz Suyu Sinter Manyeziti.....	39
Şekil 6.3. Sinter Spinel .....	39
Şekil 6.4. Kırıcılar .....	39
Şekil 6.5. Değirmen .....	39
Şekil 6.6. Mikser .....	40
Şekil 6.7. Hidrolik Pres.....	41
Şekil 6.8. Üretilen Tuğlaların Şekillendirme Sonrası Fırın Arabasındaki Görünümü... ..	41
Şekil 6.9. Tünel Fırın.....	42
Şekil 6.10. Üretilen Tuğlaların Pişirim Sonrası Görünümü .....	42
Şekil 6.11. XRF Cihazı .....	43
Şekil 6.12. Porozite Ölçüm Test Cihazı.....	44
Şekil 6.13. Porozite Tartım Sehpası.....	44
Şekil 6.14. Soğukta Basma Mukavemet Cihazı .....	45
Şekil 6.15. HotDisk TPS2500S Termal İletkenlik Ölçüm Cihazı.....	46
Şekil 7.1.Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri için yoğunluk değişimi .....	50
Şekil 7.2. Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri için porozite değişimi .....	51
Şekil 7.3. Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri için su emme yüzdesinin değişimi.....	52

<b>Şekil 7.4.</b> Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri mukavemet değerinin değişimi.....	<b>53</b>
<b>Şekil 7.5.</b> 1500 kg/cm <sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için yoğunluğun değişimi .....	<b>55</b>
<b>Şekil 7.6.</b> 1500 kg/cm <sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için porozite değişimi.....	<b>56</b>
<b>Şekil 7.7.</b> 1500 kg/cm <sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için su emme yüzdesi değişimi.....	<b>57</b>
<b>Şekil 7.8.</b> 1500 kg/cm <sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için mukavemet değerinin değişimi.....	<b>59</b>
<b>Şekil 7.9.</b> Farklı basınç ve refrakter kalınlıkları için mukavemetin değişimi.....	<b>60</b>
<b>Şekil 7.10.</b> Farklı kalınlıktaki manyezit tuğlaların değişen sıkıştırma basınçları altında ısı iletkenlik değerleri.....	<b>61</b>

## KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

**ISO** : International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)

**DIN** : Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)

**ASTM** : American Society for Testing and Materials (Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)

**°C** : Derece santigrat

**K** : Kelvin

**SiO<sub>2</sub>** : Silisyum dioksit

**CaO** : Kalsiyum Oksit

**MgO** : Magnezyum oksit

**MgCl<sub>2</sub>** : Magnezyum klorür

**MgSO<sub>4</sub>** : Magnezyum sülfat

**Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Alüminyum oksit

**TiO<sub>2</sub>** : Titanyum dioksit

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Demir (III) oksit

**Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** : Krom (III) oksit

**MnO** : Mangan oksit

**ZnO** : Çinko oksit

**SiC** : Silisyum Karbür

**H<sub>2</sub>O** : Su

**Mg(OH)<sub>2</sub>** : Magnezyum Hidroksit

**CaCl<sub>2</sub>** : Kalsiyum klorür

**ZrO<sub>2</sub>** : Zirkonyum Oksit

**CaZrO<sub>3</sub>** : Kalsiyum zirkonyum oksit

**MPa** : Megapaskal

**m** : Metre

**s** : Saniye

**dk** : Dakika

**psi** : Per Square Inch

**µm** : Mikrometre

**mm** : Milimetre

**cm** : Santimetre

**kg** : Kilogram

**g** : Gram

**d** : Yoğunluk

**kg/cm<sup>2</sup>** : Basınç

**j** : Joule

**W** : Watt

**kWh** : Kilowatt saat

**N** : Newton birimi

**DSM** : Deniz Suyu Manyeziti

**SS** : Sinter Spinel

**XRF** : X-Ray Fluorescence (X-Işınları Floresans Spektrometresi)

**TPS** : Transient Plane Source (Geçici Düzlem Kaynağı)

**TCR** : Temperature Coefficient of Resistance (Sıcaklık Direnç Katsayısı )

**W/m. K** : Isıl İletim Katsayısı

**m<sup>2</sup>/sn** : Termal Yayılma

## 1. GİRİŞ

Refrakter, alışılmışın dışında yüksek bir erime noktasına sahip olan ve çok yüksek sıcaklıklarda yapısal özelliklerini koruyan herhangi bir malzeme olarak tanımlanabilir (URL-1, 2025). Refrakter kelime manası olarak “inatçı” anlamına gelir. Teknolojik olarak daha anlaşılır şekilde tanım olarak ele alırsak “sıcaklığın yüksek olduğu alanlarda dayanabilen ve bu alanlardaki sıcaklıklarda maddenin üç farklı hallerinde tüm etkilere karşı koyabilen direnç gösteren malzeme” olarak yapılabilir (Şimşek ve ark., 2013) (Neşet, 2008).

Refrakter malzemelerin kullanılma sırasına bakıldığında genellikle farklı kuvvetlerin, özellikle basınç ve gerilme gibi etkileri altında bulunurlar. Eğer yumuşama olursa boyutta değişiklik meydana gelebilir ve bu istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, normalde yüksek basınç altında zarar gören bir malzeme, fırın sıcaklığında bu basınçta maruz kalacağı hasarı çok daha düşük bir sıcaklıkta yaşayabilir. Ayrıca, mekanik dayanıklılık üzerinde sıcaklığın etkili olduğu süre de oldukça önemlidir. Malzemenin yapısı ve gözenek miktarı refrakter malzemelerin soğukta basma dayanımına oldukça fazla etki edebilir. Refrakter özelliklere sahip tuğlalar, oda sıcaklığında genellikle çok az deformasyon gösterir. Ancak yüksek sıcaklıklarda, yapı içinde yer alan farklı fazlar arasındaki gerilmeler, tane boyutlarının çeşitliliği ve gözenek dağılımının etkisiyle çatlaklar oluşabilir (DPT, 2001).

Özellikle çimento ve demir-çelik fabrikalarında, cam ve seramik sanayisinde güçlü sıcaklık gerektiren ürünlerde refrakter malzemeler bu süreçlerin olmazsa olmazıdır. Bu sektörlerden çimento sektörünü ele alırsak eğer çimento üretimi için en büyük maliyet olarak enerji ve hammaddedir. Enerji olarak bakıldığında maliyetin büyük kısmı yakıttır. Yakıtlar fosil kaynaklı olup alkali maddeler içermemektedir. Çimento üretim tesislerinde geleneksel yakıtla çalışan döner fırınların kalsinasyon, emniyet ve yanma bölgelerinde manyezit içeren refrakter tuğlalar tercih edilmektedir (Çiçekdağı, 2022).

Refrakter malzemelerin performansı, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki kimyasal bileşim ve üretim parametrelerinin etkisiyle belirlenir. Bu özelliklerin optimize edilmesi, malzemenin hem dayanımını hem de uzun ömürlülüğünü sağlamak için kritik önem taşır. Örneğin, MgO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ve mikrosilika gibi katkı maddelerinin dahil edilmesi, mekanik mukavemet, termal stabilite ve cüruf direnci gibi kritik performans parametrelerini iyileştirir (Wang, Zhao, & Chen, 2024). MgO'nun artırılması, (Mg, Al, Cr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) spinel oluşumunu destekler ve yoğunluk ile mekanik dayanımı iyileştirirken aynı zamanda cüruf penetrasyon

direncini de arttırır. Benzer şekilde, mikrosilika katkısı, malzemenin ince taneli bir yapı kazanmasına katkı sağlayarak dayanıklılığı artırır (Bazhin & Glazev, 2022). Kimyasal kompozisyonun yanı sıra, refrakter malzemelerin yoğunluk, porozite ve mekanik dayanım gibi özellikleri, üretim süreci sırasında uygulanan presleme basıncına bağlıdır. Hidrolik presleme, partiküllerin daha sıkı paketlenmesine ve porozitenin azalmasına olanak sağlar. Ancak, aşırı presleme basıncı, malzemede mikro çatlakların oluşmasına yol açarak mekanik mukavemeti olumsuz etkileyebilir (Wu ve ark., 2022).

Çimento ve demir-çelik endüstrileri gibi alanlarda kullanılan refrakter malzemelerin dayanıklılığı, genellikle yoğunluk ile porozite arasında kurulan dengeye dayalıdır (Timofeeva ve ark., 2021).

Bu çalışmanın odak noktası, manyezit esaslı refrakter tuğlaların mikro yapı ve mekanik özelliklerini anlamak ve üretim parametrelerinin bu özellikler üzerindeki etkisini belirlemektir. Refrakter malzemelerin dayanımının artması, sıcaklık değişikliğine karşı dayanıklılık, mekanik özelliklerin korunması ve termal iletkenliğin optimize edilmesi gibi çok yönlü şartlara bağlıdır. Mekanik dayanımı iyileştirmek için porozite ve yoğunluğun optimize edilmesi çok önemlidir. Örneğin, presleme basıncı 1400-1600 kg/cm<sup>2</sup> arasında değiştirildiğinde yoğunluğun artması ve porozitenin azalması gözlemlenmiştir (Wu ve ark., 2022).

Sonuç olarak, refrakter malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve presleme basıncı gibi parametrelerin optimize edilmesi, malzemenin yüksek sıcaklık ve mekanik şartlara dayanımını artırmak için kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, manyezit esaslı refrakter tuğlaların üretim ve performans parametrelerini analiz ederek endüstriyel uygulamalar için önemli bir yol haritası sunmayı amaçlamaktadır.

## 2. REFRAKTER MALZEMELER

Refrakter malzemeyi genel olarak tanımlamak gerekirse; kullanıldığı alanda tüm gerilmelere, yüksek sıcaklık ve basınçtaki buharların etkilerine, sıvı metallerin reaksiyonuna karşı dayanıklılık gösteren, ergime sıcaklığı yüksek olan malzeme grubuna denir. Refrakter malzemeler, yüksek sıcaklığın olduğu astarların metal olduğu halde direnemeyeceği sıcaklıklarda üretimin gerçekleşmesini sağlar. Yani refrakter malzeme sıcaklığın yüksek olduğu fırınlarda iç astar görevi yapar (Apaydın & Kaya, 2017).

ISO(Uluslararası Standart) tarafından ise refrakter malzeme şöyle tanımlanmaktadır: "İçerisinde hepsinin metal veya alaşım olmayan, fakat metalik bir bileşene sahip ve refrakterliği en az 1500 °C' ye kadar dayanabilen malzemelerdir." (Sezer, 1994).

DIN 51060(Alman Standartı) standardına bakıldığında, refrakter içerikli malzemeleri üçe ayırmıştır;

- Minimum sıcaklık olarak 500°C
- Ateş bölgesine dayanıklılık olarak 1500°C
- Yüksek sıcaklık olarak 1800°C (Yarbil, 2012).

Refrakter malzemeler, belirli bir kategoriye dahil edilmek istendiğinde, çimento, metalik olmayan seramik ve cam gibi inorganik malzeme sınıfına girer. Refrakter malzemeler, başta demir-çelik, demir dışı metal sanayii, çimento, seramik ve kimya sanayii gibi temel endüstri kolları için hayati bir yan girdi olarak üretilmektedir. Üretilecek ürün değişen ihtiyaçlar doğrultusunda geliştirilerek her geçen gün farklı özelliklere sahip ve farklı türde yeni refrakterle geliştirilmektedir.

Refrakter malzemelerden beklenen temel özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Yüklendiği ağırlığı yüksek ısılarda deforme olmadan taşınmalı.
- Yüksek sıcaklıklarda ergimeden ve deforme olmadan dayanıklı olması.
- Isıl şoklara karşı dayanıklı olmalı, çatlayıp dökülmemeli.
- Bulunduğu ortamın kimyasal etkilerine karşı dayanıklı olmalı ve direnç göstermeli
- Erozyona ve aşınmaya karşı dirençli olmalı.

- İletkenlik veya yalıtkanlık, gaz geçirgenliği ve geçirmezliği gibi özel istekleri karşılamalı.
- Isı değişimlerinde boyutsal olarak değişme hiç olmamalı veya çok az olmalı (Nakagava, 1998).

## **2.1. Refrakter Malzemelerin Genel Özellikleri**

### **2.1.1. Kimyasal Yapı**

Refrakter malzemeler kimyasal yapısına göre asidik, bazik ve nötr olmak üzere üçe ayrılır. Asidik refrakterlere bakıldığında bünyesinde  $\text{SiO}_2$  içerir. Yüksek sıcaklıklarda asidik refrakterler bazik refrakterlerle reaksiyona girer. Bazik refrakterlere bakıldığında bünyesinde kalsiyum oksit ve magnezyum oksit veya her ikisini içerirler. Yüksek sıcaklıklarda bazik refrakterler asidik refrakterlerle reaksiyona girer. Ama kendi içlerindeki duruma bakıldığında bazik cüruflar bazik içerikli refrakterlerle, asidik cüruflarda asidik içerikli refrakterlerle reaksiyon oluşturmazlar. Nötr refrakterler ise ne asidiktir ne baziktir ve yüksek sıcaklıklarda her ikisine karşı dayanıklıdır. Malzemenin gözenekliliği de kimyasal özelliklerin yanında etkili bir rol oynar. Gözeneği çok olan refrakter içerikli malzemeler daha çabuk etkileşim göstererek hızlı ısınırlar. Maruz kaldığı sıcaklık sonucunda mineral yapısında değişimler oluşabilir. Bu değişimler kullanılan refrakter malzemenin yoğunluk değerini de değiştirir (Nakagava, 1998).

### **2.1.2 Genişleme ve Çekme**

Refrakter tuğlaların üretimi için genel olarak hidrolik presler tercih edilir. Sinterleme sonrası tuğla ölçülerinde değişim meydana gelebilir. Alümina ve manyezit içerikli tuğlalarda sinterleme sonrası ölçülerde azalma(çekme) olurken, silika içerikli tuğlalarda artma(genişleme) meydana gelir. Sinterleme sonrası ölçülerde hacim değişimi meydana gelmektedir. Bu da çatlamalara neden olmaktadır. Eğer çekmeden dolayı çatlak meydana geliyorsa ya yeterli derecede pişmemesinden ya da refrakter özelliğini taşımadığından olabilir. Eğer genişlemeden dolayı çatlak meydana geliyorsa malzemenin yapıldığı hammaddenin istenilen parça büyüklüğünün yetersiz olmasından olabilir (DPT, 2001).

### **2.1.3 Yoğunluk ve porozite**

Sıcaklığın artmasıyla ile katı hacimde genişleme meydana gelir. Bunun sonucunda porozite miktarı azalır. Azalan porozite miktarı ile refrakter malzeme yumuşayarak malzemenin

karakterini tayin eder. Porozite ile hacim ağırlık ters orantılıdır. Yani porozite oranı azaldıkça hacim ağırlık artar. Refrakter malzeme de yoğunluk değeri erime anında etkili bir faktördür. Erime anında hacim değişir bunun sonucunda fiziksel değerlerde değişimler meydana gelir.

#### **2.1.4. Fırın Sıcaklığında Basınca Direnç**

Refrakter malzemeler kullanım sırasında gerilim ve basınç gibi kuvvetlerin etkisinde kalırlar. Bu etkiler sonucunda ise malzemelerde yumuşama ve boyut değişimleri oluşur. Refrakter malzemelerde değişimler olması, istenmeyen olumsuz olayların gerçekleşmesine sebepler oluşturur. Bu tür sebeplerden dolayı, refrakter malzeme sıcaklığın etkisi ile, beklenenden daha düşük bir sıcaklıkta parçalanma gerçekleşebilir. Burada sıcaklığa maruz kaldığı sürede önemli rol oynar.

#### **2.1.5. Isıl Özellikler**

Refrakter malzemeler, özgül ısı, ısıl genişleme ve ısıl iletkenlik gibi termal özelliklere sahiptir. Refrakter malzemelerin kullanım yerine göre ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerleri değişkenlik gösterir. Isıl özelliklerin kullanılan yere göre bazen yüksek bazen de düşük olması istenebilir. Örneğin ısıl genişleme maruz kaldığı ısıya bağlıdır. Isıl genişlemeyi göz önüne alırsak fırın oluştururken refrakter tuğla seçiminde titiz davranmak gerekir.

#### **2.1.6. Isıl Çatlama ve Parçalanma**

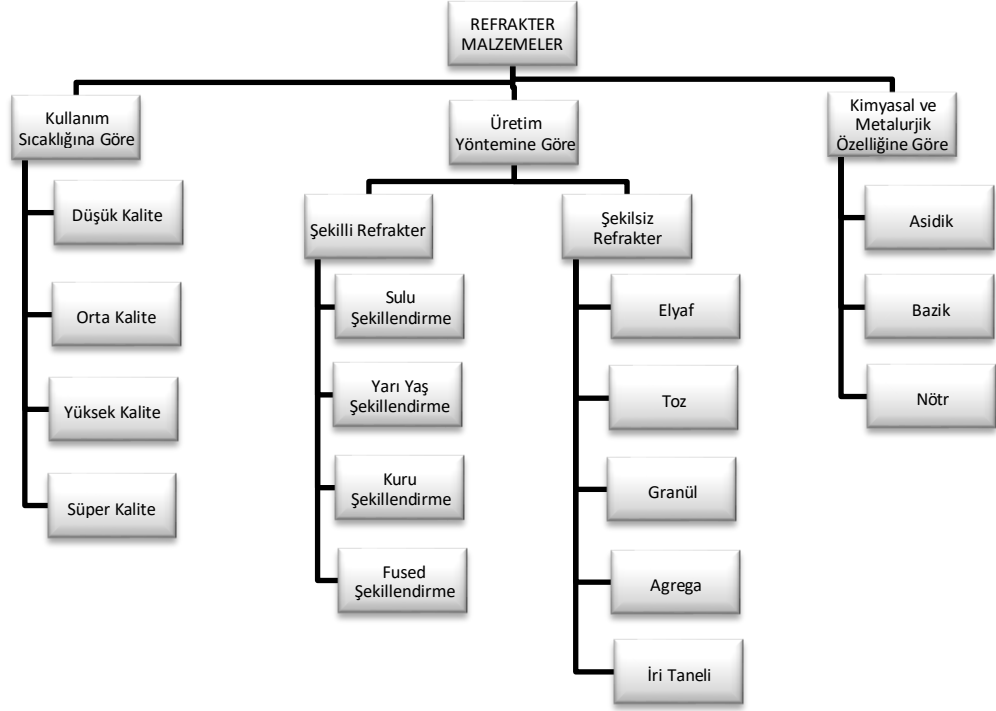
Refrakter malzemelerin sıcaklık değişimlerine karşı gösterdiği dayanıklılık, ısıl şok olarak adlandırılır. Kullanım sırasında meydana gelen büyük sıcaklık değişimleri, malzemenin yüzeyinde ve merkezinde genişleme kaynaklı gerilmelere yol açar. Isıtılan malzeme soğumaya başladığında merkezinde basma gerilmesi, yüzeyinde de çekme gerilmeleri meydana gelir. Meydana gelen gerilmeler malzemenin dayanımını aşarsa malzemedeki parçalanmalara sebep olur.

#### **2.1.7. Mekanik Dayanıklılık**

Refrakter malzemelerde, mekanik dayanıklılık malzemenin gözenek oranıyla bağlantılıdır. Oda sıcaklığında aşırı sıcaklıklara dayanabilen malzemelerden, şekil değişimi beklenmez. Ancak yüksek sıcaklığa maruz bırakılan refrakter malzemelerde tane boyutu ve gözenek dağılımı ile yapıda bulunan fazlar arasında gerilmelerden oluşturularak çatlaklar meydana gelebilir. Malzemenin kullanıldığı yerde 1000<sup>0</sup>C kadar ki sıcaklıklarda, aşınma direnci ve mekanik dayanımı muhafaza eder. Malzemenin kullanıldığı yerde 1000<sup>0</sup>C üzerindeki sıcaklıklarda, cam fazının artmasıyla aşınma direncinde düşüş meydana gelir (Yarbil, 2012).

## 2.2. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması

Refrakter malzemeler, temelde birden fazla kritere göre sınıflandırılabilir. Ancak ana başlıklar altında refrakter malzemeler Şekil 2.1’de görüldüğü gibi kalitelere göre, üretim yöntemlerine göre, kimyasal ve metalurjik özelliğine göre 3 gruba ayrılır.



Şekil 2.1. Refrakter Malzemelerin Sınıflandırılması

Kaynak: (Malzeme Bilimi Net, 2025)

### 2.2.1. Kullanım Sıcaklığına Göre

Kullanım sıcaklığına göre refrakter malzemeler 4 ayrı gruba ayrılmıştır.

Düşük kaliteli refrakterler → 1580°C ve altında

Normal hizmet refrakterler → 1580 – 1780°C dereceleri arasında

Ağır hizmet refrakterler → 1780 – 2000°C dereceleri arasında

Süper kalite refrakterler → 2000°C ve üstünde

## 2.2.2. Üretim Yöntemlerine Göre

Üretim yöntemlerine göre 3 ayrı gruba ayrılmıştır. Şekli refrakter, şekilsiz refrakterler ve refrakter harçlar şeklindedir. Şekli refrakterler kullanıldığı yere göre özel geometrik bir şekle sahiptir ve presler yardımıyla şekillendirme işlemi yapılmaktadır. Şekilsiz refrakterler, özel geometrik bir şekilde değildir ancak içerlerine bağlayıcı olarak su ve diğer kimyasallar ( $MgCl_2$ ,  $MgSO_4$ , Al-Fosfat, cam suyu vb.) eklenmesiyle döküm, dövme, püskürtme gibi metotlar ile kullanılacak yerde uygulama yapılır ve ardından sinterlenerek kullanıma geçilir. Yakın zamanı göz önüne alırsak şekilli refrakterlerin yerine daha çok şekilsiz refrakterler tercih edilmektedir. Refrakter harçların amacı ise refrakter malzemelerin birbirini tutmasını sağlamaktır.

## 2.2.3. Kimyasal Özelliklere Göre

Kimyasal özelliklerine göre refrakter malzemeler 3 ayrı gruba ayrılmıştır.

### Asidik Refrakterler

Bu tür malzeme grubu çimento fabrikalarının ön ısıtıcı, kalsinatör, klinker soğutucu kısımlarında, demir çelik fabrikalarının elektrik ark ocağı kapağının, torpido potasının, sıvı metal transfer potasının, çelik potasının, vakum kazanının emniyet astarı kısmında, yüksek fırın sobasında, sıcak maden mikserinin tavan kısmında, kireç fırınında, cam sanayinde kullanılır.

- ◆ Şamot ( $SiO_2 \cdot Al_2O_3$ )
- ◆ Sillimanit ( $Al_2O_3 \cdot SiO_2$ )
- ◆ Silika ( $SiO_2$ )
- ◆ Zirkon ( $ZrO_2 \cdot SiO_2$ )
- ◆ Zirkonya ( $ZrO_2$ )
- ◆ Mullit ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )

### Bazik Refrakterler

Bu tür malzeme grubu çimento döner fırınlarında, kireç fırınlarında kullanılır.

- ◆ Manyezit-Spinel ( $MgO \cdot Al_2O_3$ )
- ◆ Manyezit-Krom ( $MgO \cdot Cr_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot FeO$ )

- ◆ Magnezit ( $MgO$  periklas kristali)
- ◆ Forsterit ( $2MgO.SiO_2$ )
- ◆ Dolomit ( $MgO. CaO$ )
- ◆ Kromit ( $Cr_2O_3$ )

### **Nötr Refrakterler**

Bu tür malzeme grubu demir çelik fabrikalarının konverterlerinde, elektrik ark ocaklarında, torpido potalarında, çelik potalarında kullanılır.

- ◆ Boksit ( $Al_2O_3.3H_2O$ )
- ◆ Silisyum Karbür ( $SiC$ )
- ◆ Alümina ( $Al_2O_3$ )
- ◆ Karbon (zift, grafit, katran)
- ◆ Kromit ( $Cr_2O_3$ )
- ◆ Spinel ( $Al_2O_3.MgO$ )
- ◆ Pikrokromit ( $MgO.Cr_2O_3$ ) (Yılmaz, Toplan, & Demirkıran, 2016).

### **2.3. Refrakter Malzemelerin Kullanım Alanları**

Refrakter malzemelere genel olarak baktığımızda hayatımızda birçok alanda kullanılmaktadır. Yani kullanım alanı oldukça geniştir. Bazı kullanım alanları;

**Metaller:** Bu sektörde refrakter malzemeler yoğun şekilde kullanılır. Bu malzemelere genel olarak baktığımızda yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları yönüyle dökümhanelerde, metal eritme ocaklarında, yüksek fırınlarda ve çelik üretim tesislerinde kullanılır.

**Seramik ve Cam Üretimi:** Bu sektörde de refrakter malzemeler yaygın olarak kullanılır. Bu malzemeler cam ocaklarında, seramik fırınlarında ve termal işlem fırınlarında pişirilme ve eritilmesine uygun ortam sağlar.

**Enerji Üretimi:** Refrakter içerikli malzemeler termal enerji tesislerinde, güç santrallerinde ve nükleer enerji tesisleri kullanılır.

**Petrokimya ve Kimyasal Endüstri:** Kimyasal reaktörler, rafineriler, termal oksidasyon üniteleri gibi uygulamalarda refrakter malzemeler kullanılır (Nova Makina, 2025).

Refrakter malzemelere baktığımızda kullanım alanları bunlarla sınırlı değildir.

◆ Tavlama ve sertleştirme işlemi için kullanılan fırınlarda

◆ Elektrik ark ocakları

◆ Yapı malzemelerinin üretim süreçlerindeki fırınlarda (kireç yakma, çimento döner fırınlar vb.)

◆ Enerji sanayisinde kullanılan tesisler

◆ Meskenlerde ve küçük ölçekli sanayi işletmelerinde ısı elde etmek amacıyla kullanılan soba ve fırınlar aracılığıyla

◆ Çöp yakma tesisleri ve benzerleri (Malzeme Bilimi Net, 2025).

### 3. ÇİMENTO ENDÜSTRİSİNDE REFRAKTER MALZEME

Çimento, genel bir çerçevede ele alındığında, binaların ve mühendislik yapılarına ait inşaat süreçlerinde taş, tuğla gibi çeşitli malzemeler arasında bağlayıcılık işlevi gören ve bu malzemeleri sıkı bir bütünlük içinde bir araya getirerek yapışmayı sağlayan temel bir yapıştırıcı malzeme olarak ifade edilebilir (Çimsa, 2025). Çimento fabrikalarında kullanılan döner fırınlarda çimento klinker üretimi, dünya genelinde en önemli endüstriyel üretim süreçlerinden biridir (Shubin, 2001).

Çimento sanayisine genel bir bakış yapıldığında, temel süreç, farinin döner fırında 1450-1500°C sıcaklıkta pişirilerek klinkere dönüştürülmesi olarak özetlenebilir. Döner fırın, galeler üzerinde yer alan ve ring dişlisi aracılığıyla tahrik motor ünitesi ile döndürülen bir reaktördür. %2-6 arasında eğime sahip olan bu reaktör, üretim kapasitesine uygun olarak farklı çap ve uzunluklarda tasarlanan boru şeklinde bir yapıya sahiptir (İça, 1991). Eğim sayesinde de içindeki ürün aşağıya doğru bir akış gerçekleştirir. Hız olarak ise yaklaşık 0,15-0,30 m/s aralığındadır. Çimento döner fırınlarının iç kısımları yüksek sıcaklığa dayanıklı refrakterle kaplıdır (Savaş, 2004). Döner fırınlarda uzunluğuna ve çapına bağlı olarak yaklaşık 40.000-85.000 adet tuğla 300-700 ton refrakter kullanılır (İça, 1991).

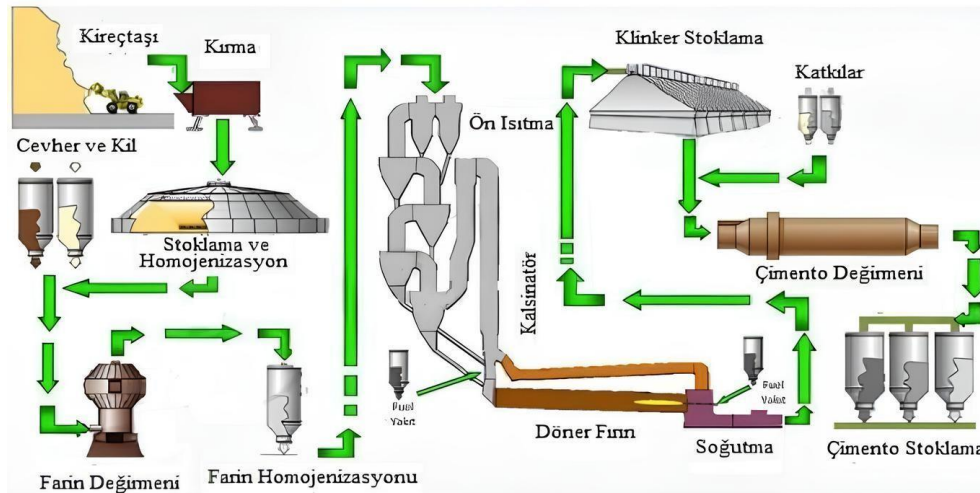
Çimento sektöründe fırının işletim maliyetleri incelendiğinde, refrakterin maliyet içerisindeki oranı oldukça düşük kalmaktadır. Ancak, bu düşük paya rağmen refrakterde meydana gelen hasarlar ciddi boyutlarda kayıplara yol açabilmektedir. Örneğin yıllık belirli bir tonda klinker üretimi yapılan bir fırında, refrakter hasarından dolayı üretilen tonajın yaklaşık sekizde biri oranında duruş meydana gelerek üretimde kayıplara neden olur. Bu kaybın dışındaki tüm duruşların toplamı bu oranın yanında çok değersiz kalır (Kaya, 2014).

#### 3.1. Çimento Üretimi

Çimento üretimini ayrıntılı bir şekilde ele alacak olursak, temel hammadde olarak kil, kalker ve marn ocak sahasından alınarak çeneli kırıcılarla işlemeye başlanır. Bu hammaddeler, boyutları 25x25 milimetreye indirilecek şekilde parçalanarak stoklanır. Daha sonra bu stoklanmış hammaddeler değirmenlerde öğütülür (Türk Çimento, 2025). Çimentonun ana hammaddesi olan klinkeri üretmek için, istenilen özelliklere sahip kil, kalker, demir cevheri vb. malzemeler toz halinde kullanılırlar. Bu malzemeleri toz hale getirmek için öğütme işlemi yapılır. Öğütülerek elde edilen toz malzemeye de “farin” ismi verilir. Klinkerin kalitesinin iyi olması için farinin yapısına ve homojen olmasına dikkat etmek gerekir (Batıçim, 2025).

Farinin ana bileşenleri silis ve kireçtir. Silis kilden gelmektedir. Kireç ise kalsiyum karbonatça zengin olan marn veya kalker gibi kayalardan sisteme girer. Silis ve kireçten sonra demir oksit ve alümina gelir. İçerikte düşük oranda da olsa magnezyum ve alkali oksitlerde bulunur.

Farin değirmenlerde öğütülür ve silolarda depolanır. Farin silodan tartım yapılarak alınarak siklondan meydana gelen ön ısıtma kulesine gönderilir. Ön ısıtma kulesinde ile 30°C'den 1000°C'ye ısıtılan farin yüksek bir oranla kalsine haline gelmiş olur. Farin, fırında pişme sürecine girdiğinde içindeki oksitler başlangıçta serbest hale gelir ve sıcaklık yükseldikçe yeni kristal yapıların oluşumuna zemin hazırlar. Ön ısıtıcıdan çıkan farin, döner fırında 1450-1500°C sıcaklıkta pişirilerek granüler yapıda klinker adı verilen ara ürüne dönüşür. Fırından yaklaşık 1300°C sıcaklıkla çıkan klinker, soğutma işlemiyle 100°C'ye kadar düşürülür. Daha sonra çimento değirmeninde öğütme işlemi gerçekleştirilir. Çimentonun su ile karıştırıldığında hızlı bir şekilde katılaşıp çalışılabilirliğini yitirmemesi adına alçı taşı eklenmesi gereklidir. Değirmende öğütme esnasında sıcaklık artışı önlenmek için değirmen içine basınçlı su verilir. Öğütme sonucunda elde edilen ürün çimento olur. Silolarda depolanır (Türk Çimento, 2025).

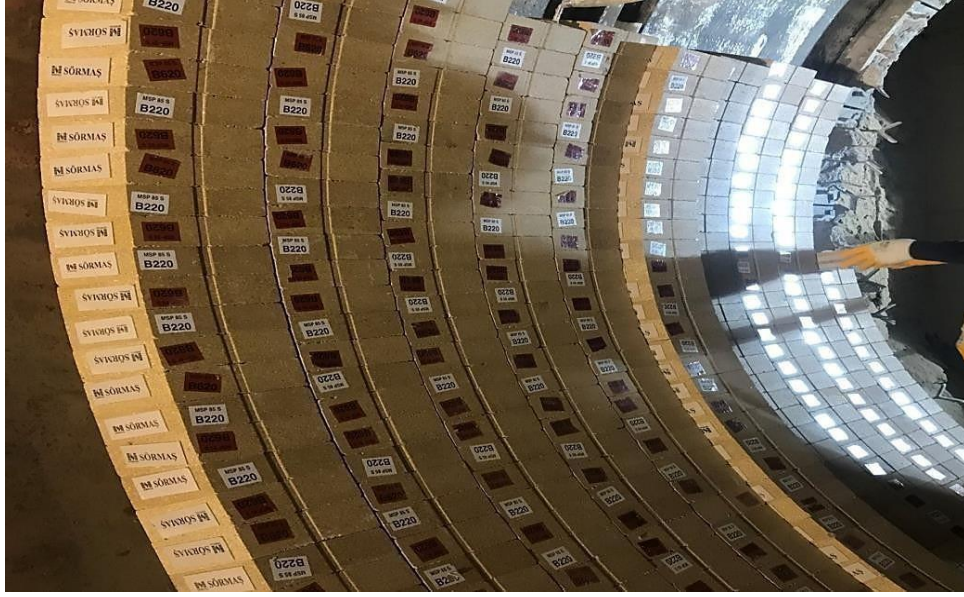


Şekil 3.1. Çimento Üretimi Akış Şeması

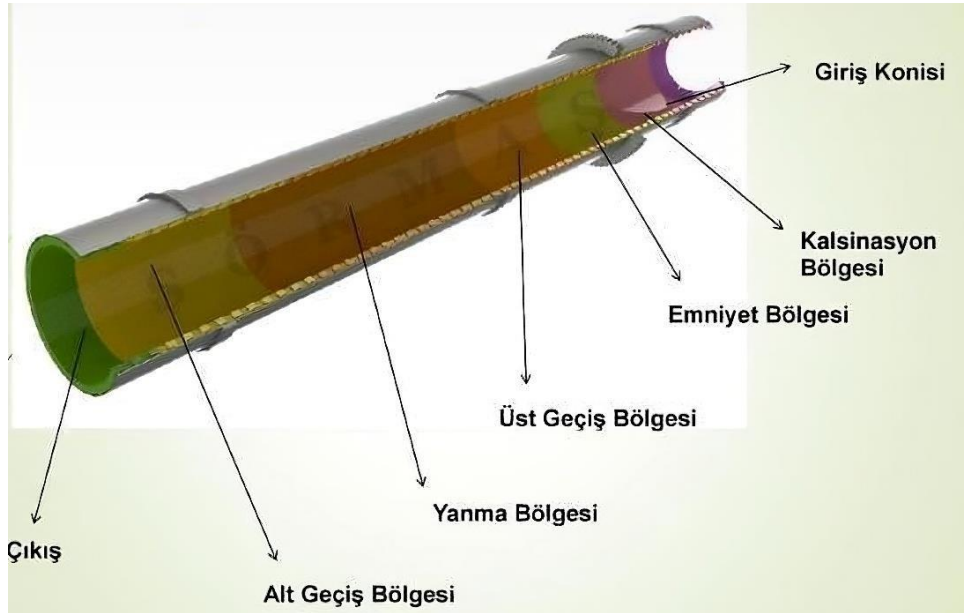
Kaynak: (Kurukavak, 2015)

### 3.2. Çimento Döner Fırınlarının Refrakter Örgüsü

Çimento da döner fırınların çelik manto kısmını pişme sırasında yüksek sıcaklıktan korumak için refrakter tuğla örgüsü oluşturulur. Refrakter tuğla örgüsü ile amaç izolasyon sağlayarak fırın içi ısı rejimini sağlamak ve yüksek ısı kaybını engellemektir. Aynı zamanda fırın içerisindeki sıcak gazla beraber refrakter tuğla örgüsü ısınır. Isınan refrakter tuğla örgüsü, ısı enerjisinin bir kısmını farına aktararak onun pişmesini destekler (İça, 1991).



**Şekil 3.2.** Çimento Döner Fırınlarının Refrakter Örgüsü



**Şekil 3.3.** Çimento Döner Fırının Şematik Gösterimi

**Kaynak:** (Çiçekdağı, 2022)

Şekil 3.3'te gösterildiği üzere, çimento döner fırınları beş bölümden oluşmaktadır. İlk olarak giriş bölgesinde sıcaklığına bakarsak sıcaklık 800-1000°C arasındadır. Giriş bölgesinde genel olarak alümina refrakter tuğla kullanılır.

Kalsinasyon ve emniyet bölgesine ulaşıldığında, düşük ısı iletim arzu edilir. Bu bölgede genellikle yüksek alümina içeren tuğlalar ve spinel tuğlalar tercih edilir. Bu iki bölgeye baktığımızda burada uçucu bileşenlerin ve alkali tuzların tesiri fazladır. Aynı zamanda bu

bölgelerde malzemenin farklı özelliklerine göre yarı-iletken refrakter tuğlalar da tercih edilebilir (Ceylantekin, 2010).

Üst geçiş bölgesine geldiğimizde kimyasal ataklar, mekanik gerilmeler ve ısıl şok etkili olmaktadır. Bu bölgede alkali sülfatlar fırın içindeki uçucu bileşenlerle etkileşirken, klinker içindeki silika refrakter malzeme ile reaksiyona girer.

Sıcaklığın en yüksek olduğu bölge yanma bölgesidir. MagnezyumOksit-Spinel, magnezya-krom ve magnezya-dolomit tercih edilir. Bu bölgede refrakter tuğlalar aşırı aşınma, yüksek sıcaklık ve korozyon etkisinde kalırlar. Klinkerin bu bölgeden geçerken refrakter tuğla üzerinde koruyucu bir tabaka meydana getirmelidir. Bu bölgede refrakter tuğlalar ısıl şok etkisine uğramaz. Ayrıca, sıcaklık oldukça yüksek olsa da herhangi bir değişim gözlenmez.

Alt geçiş bölgesine geldiğimizde bu bölge de üst geçiş bölgesine göre daha zorlayıcı şartların etkisi altındadır. Refrakter tuğlaların ısıl şoka daha çok maruz kalmalarının sebebi de sıcaklık değişimlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

Son olarak çıkış bölgesine yani soğutma bölgesine geldiğimizde burada aşınma oranı fazladır. Bu bölgede aşınmadan dolayı yüksek alümina tuğlalar tercih edilmektedir (Aksel, 1998).

### **3.3. Çimento Döner Fırını Refrakter Örgüdeki Sorunlar**

Çimento döner fırınlarında kullanılan refrakter tuğlalar makine ve teçhizatları ortamda bulunan yüksek sıcaklığın etkilerinden korur. Ortamda oluşan ısıyı fırının içinde muhafaza ederek verimli bir çalışma sağlar. Aynı zamanda fırının metal aksamını ve ortamdaki çalışanları da yüksek sıcaklıktan korur. Döner fırının içi; yakıt tipine, kullanılan hammaddeye, kalsinasyon tekniğine, kullanılan bölgelere ve kaplama malzemesine göre değişiklik gösterebilmektedir.

1. Çimento döner fırın tuğlası, farin ile etkileşim halindedir. Farin ateş tuğlasının yüzey kısmında devamlı hareket edip sert ve aşındırıcı şekilde fiziksel bir etki yapar. Kaplama tuğlasının yüzeyinde yüksek sıcaklıktan dolayı içinde sıvı faz meydana gelerek kabuklaşma

oluşur. Döner fırın devamlı döndüğünden dolayı örülen tuğlalar belirli bir periyotta termal, gaz akışı ve kimyasal olguların etkisinde kalır.

2. Fırın dönerken kaplama tuğlaları da fırınla beraber döndüğü için termal dalgalanmalarının etkisinde kalır. Fırının döndüğü esnada yakıtta yanma sıcaklığının tesiriyle malzemeye temas ettiğinde sıcaklık düşerken tuğla sıcaklığı yükselir. Fırında oluşan sıcaklığın değişimi; fırın içerisindeki doluluğuna ve malzemenin tuğla ile temasının olduğu alanına bağlı

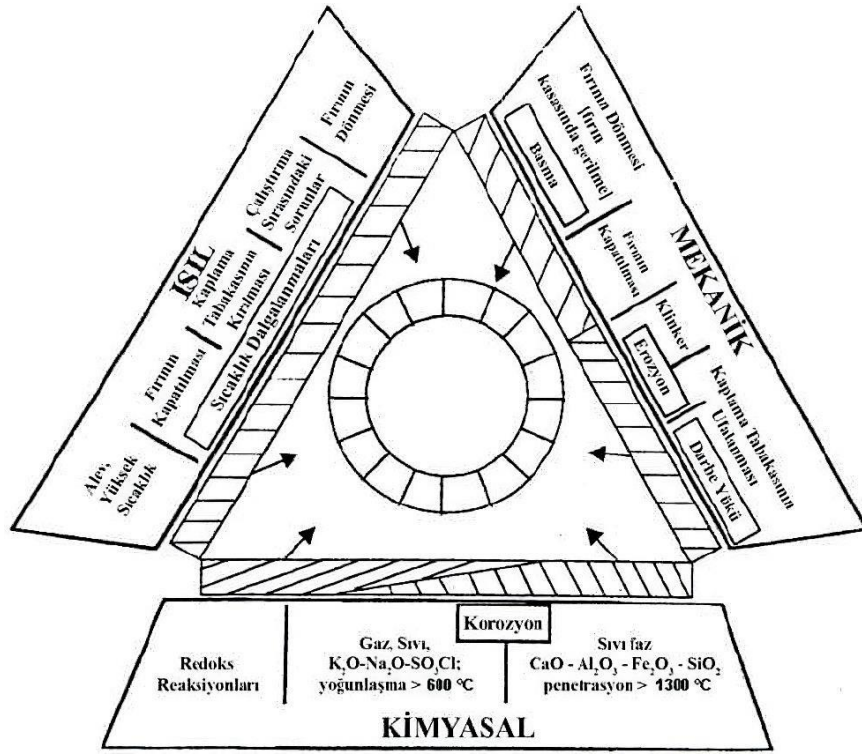
olarak değişir. Ateş bölgesine gelindiğinde sıcaklık değişiminin 100°C'ye çıktığı durumlar olur. Sıcaklıkta dalgalanma olduğu sırada tuğla içinde yaklaşık 30-40 mm kadar sıcaklık algısı oluşur. Günlük olarak baktığımızda bir günde yaklaşık olarak 1400 ile 4300 adet sıcaklık çevrimi meydana gelebilir.

3. Fırın içi tasarım nedeniyle, ateş bölgesinde tercih edilen refrakter örüm tuğlasının kalınlığı yaklaşık 200-250 mm ile sınırlı kalır. Fırının içindeki sıcaklık en üst seviyeye geldiğinde, örüm tuğlalarının içinde oluşan sıcaklık farkından dolayı ısıl gerilimlere sebep olur. Burada belirtilen nedenden fırın tuğlalarının ısıl iletkenliği çok düşük olmalıdır.

4. Refrakter örüm tuğlalarının fırının içerisine doğru şekilde montajı yapılmazsa, termal genleşmelerden dolayı tuğlada hasarlar oluşur.

5. Döner fırın çalıştırıldığı anda, dönme esnasında ve durdurulma esnasında, fırının kasa kısmında yanlarda ve boylarda titreşim, eğilme, ve burulma etkilerine maruz kalır. Sonuç olarak da refrakter kaplama malzemesi üzerinde çekme, basma ve eğilme gerilmeleri meydana getirir.

Aynı zamanda refrakter tuğlalarının çalışma süresini doğrudan ya da dolaylı olarak etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. şekil 3.4' de de etkileyen unsurlar gösterilmiştir. En önemlileri arasında ısı yalıtım malzemeleri, alevin şekli ve ısı rejimidir. Refrakter örüm malzemesinin verimini etkileyen diğer unsurlar ise; yakıt cinsi ve farındır. Kalsine edilen malzeme refrakter tuğla ile aşındırma ve darbeyle fiziksel etki oluştururken, aynı zamanda reaksiyona girerek sıvı fazın oluşmasına neden olmaktadır. Oluşan sıvı faz, refrakter tuğlanın içine nüfuz ederek yapısal deformasyona yol açmaktadır. Bununla beraber refrakter kaplama tuğlası sülfat ve alkali bileşimlerinin kimyasal olarak etkisinde kalmaktadır. Meydana gelen reaksiyonla beraber, kromat, klorür ve alkali-sülfat tuğlanın üzerinde ilerleyerek fırının metal kısmına ulaşabilirler. Refrakter tuğlanın hasar görmesine sebep bütün bu sebepler beraber veya ayrı olarak da gerçekleşebilir. Döner fırının işletme sıcaklığı, yalnızca refrakter kaplama tuğlasının özellikleri üzerinde etkili olmakla kalmaz. Aynı zamanda, refrakter tuğla ile kalsinasyon malzemesi arasındaki etkileşim derecesini, reaktif gaz bileşenlerinin refrakter tuğla yüzeyine çökelmesini, sıvı fazın tuğla içerisinde ilerleme derinliğini, refrakter tuğlanın üzerinde tabaka oluşumunu, fırının mantosunda meydana gelen gerilmeleri, ısıl direnci ve tabaka kalınlığını da doğrudan etkiler (Ceylantekin, 2010).



Şekil 3.4. Çimento Döner Fırının Maruz Kaldığı Etkiler

**Kaynak:** (Shubin, 2001)

Kuru pişirim teknolojisiyle çalışan döner fırınlarda, giriş kısmında bulunan ilk iki bölge yer almamaktadır. Bu bölgeler, döner fırının dışında konumlanarak dikey veya yatay düzlemde ısı alışverişine uygun bir şekilde kullanılabilir hale getirilmiştir. Bu tasarım sayesinde, çok yüksek derecede ve oldukça hafif ısı yalıtım sağlayan refrakter malzemeler kullanmak mümkün olur. Ancak, bu tür malzemelerin döner fırınlarda daha yaygın kullanımını kısıtlayan temel faktör, mekanik dayanımlarının düşük olmasıdır. Döner fırının farklı alanlarında olan tuğlalar için çalışma ömürleri de birbirinden farklıdır. Bundan dolayı refrakter hangi alanda kullanılıyorsa, o alanın koşullarını karşılaması gerekmektedir. Sıcaklığın en yüksek olduğu alanda aşınma da çok yüksektir. Fırının ne zaman bakıma alınacağı da sıcak alana göre ayarlama yapılır. Yani bu durumda döner fırının aktif olarak çalışma süresi sıcak alanın servis ömrüne bağlı olarak değişir. Sonuç olarak veya kural olarak, sıcak bölge bakım onarımına alındığında diğer bölgeler de bakıma alınır.

Döner fırın tuğlalarının verimliliğine etki eden üç faktör bulunmaktadır. Bunlar;

Farin (Kalsine edilen malzeme); granül ya da toz şeklinde beslenir, ergiyebilecek ya da gaz oluşturabilecek bileşikler içerir.

Alev; refrakter tuğlasında ısınma koşullarını, meydana gelen gaz bileşimini ve yakıtın

külünü oluşturur .

Fırın kasası; refrakter tuğlasına yardımcı olur ve fırın döndüğü esnada dengesiz olarak oluşan gerilimlere dirençlidir (Shubin, 2001).

### **3.4. Manyezit İçerikli Refrakter Tuğlalar**

#### **3.4.1 Manyezit**

Manyezitin ana hammaddesine bakacak olursak magnezit cevheri veya deniz suyundan elde edilen magnezitten üretilen periklas, manyezit refrakterlerin yapımında kullanılmaktadır. Deniz suyu magneziti veya doğal magnezit yaklaşık olarak 1600-2000°C arasındaki sıcaklıklarda pişirilerek refrakter özelliklere sahip manyezit üretilmektedir. Manyezit refrakterler reçinelerle katkısıyla şekillendirilerek cüruf etkilerine dayanımları artırılır (Yarbil, 2012).

Çimento döner fırınlarında, genelinde magnezya ve spinel içerikli refrakter tuğlalar kullanılır. Bu refrakter tuğlaları da elde etmek için malzemeler harmanlanarak, preslenip şekil alması sağlanır. Şekillendirilen bu tuğlalar yaklaşık 1500°C’de tünel fırınlarda pişirilir. Pişirilen bu tuğlaların bağ yapısı seramik bağa dönerek pişmiş refrakter tuğla şeklinde tanımlanır (Aşaman, 2024).

#### **3.4.2 Manyezit’in Tarihi**

1795 yılında J.E.Delanetherie, manyezit minerali bulunmadan önce, Magnezyum Sülfat, Karbonat, Klorit, ve Nitrat gibi tuzlara ‘‘Manyezit’’ adını vermiştir. A. Brongmart, magnezyum karbonat ve silikatlar üzerinde çalışmalarda bulunmuş, 1803 yılında C.F. Ludwing tarafından Moravia’da doğal magnezyum terimi kullanılmıştır. 1808 yılında ise D.L.G. Karsten, magnezyum karbonata bu ismi vermiştir. Manyezitin metalurjik işlemlerde ilk refrakter malzeme olarak kullanımına ilişkin bilgiler ise 1866-1868 yıllarına dayanmaktadır. 1885 yılında Fransa’da, deniz suyundan magnezyum hidroksit çökeltmesi yoluyla sentetik manyezit üretimi gerçekleştirilmiştir. 1890 yılına gelindiğinde manyezit, Avrupa’da açık olan fırınlarda astar malzemesi olarak kullanılmaya başlanmış, 1913 yılında ABD’de dolomitten magnezya (MgO) üretimi yapılmıştır. Maden Tetkik Arama Enstitüsü’nün raporlarına göre, ülkemizde manyezit arama çalışmaları ilk kez 1808 yılında Fransa merkezli ‘‘Elektore Coulant’’ firması tarafından Sakarya’da gerçekleştirilmiştir. İlk olarak manyezit üretimi 1929 yılında başlamış, devamlı artarak 1962 yılından itibaren hız kazanmıştır (MTA, 2025).

### 3.4.1 Magnezya Elde Edilme Yöntemleri

Sinter magnezya; zenginleştirme işleminden sonra, cevhere yaklaşık 1500-2000<sup>0</sup>C'da sıcaklıklarda işlemden geçirilmesi sonucu elde edilmektedir. Elde edilen magnezya, reaktifliğini kaybetmiş, yoğunluk değeri yüksek ve suda bozulmaya uğramayan bir malzemeye dönmüştür. Döner ve dik fırınlarda üretimi gerçekleştirilebilir. Ancak sinterleme öncesinde kalsinasyon işlemiyle üretim tamamlanmaktadır. Refrakterlerin bütün çeşitlerinde tercih edilen bir malzemedir. Ancak asıl olarak alümina manyezit grubu, magnezya-karbon grubu, magnezya-kromit grubu ve şekilsiz refrakterlerde kullanılmaktadır.

Deniz suyundan sentetik magnezya; Deniz suyundan magnezyanın üretilmesi için magnezyum klorürden elde edilmesi gerekmektedir. Klor dolomit ve kirece karşı aktivite isteğinden dolayı saflık oranı düşük magnezyum hidroksit üretilmektedir. Magnezyum klorürden hidroksit geçmek için kalsinasyon sürecine tabi tutulur. Ama bu yöntemle elde edilen magnezya, saflık açısından bakıldığında sinter magnezyaya göre düşük oranlardadır. Genel olarak baktığımızda MgO miktarı %98 oranlarında saflığa sahiptir ancak bu süreçlerde maliyet açısından harcanan enerjiden daha fazla miktarına ihtiyaç vardır. Bu yöntemle magnezya elde edilirken yapısında eriyik fazlar meydana gelmektedir. Bu tür fazlar refrakterlik özelliğini düşürebilen etkilere sahiptirler.

Fused (ergimiş) magnezya; Manyezitin 2800<sup>0</sup>C'de ergitilmesiyle fused magnezya elde edilir. Bu ergitme yönteminde, elektrikli ark ocakları kullanılarak üretim gerçekleştirilir. Bu elektrik ark ocaklarında yaklaşık olarak 3500- 4500 kWh enerji tüketimi ve 10-12 saatlik süre ihtiyaçlar karşılandığında, ergimiş magnezya ingotları üretimi yapılabilmektedir (Services R.I., 2013).

Kostik kalsine magnezya; bu yöntemde zenginleştirme işleminden geçmiş magnezya cevherinin 700-1000<sup>0</sup>C arasındaki sıcaklıklardan geçirilmesiyle elde edilmektedir. PH olarak baziktir ve reaktif bir yapıya sahiptir. Bu gibi sebeplerden dolayı da kostik ismi de kullanılmaktadır. Reaktif olmasından dolayı tanelerin yüzey alanı da geniştir. Üretimi için döner fırınlar veya dik fırınlar kullanılmaktadır (Harper, 1967).

## **4. ISIL İLETKENLİK**

Isıl iletkenlik, malzemelerin özkütle, elektrik iletkenliği, erime noktası, öz direnç, kaynama noktası gibi ana fiziksel etkenleri arasında yer alır. Malzemelerin verimliliğini ve güçlü yapısının kontrollerinde beklenen özelliklerin sağlanabilmesi bakımından ısı iletkenlik mühim bir yere sahiptir (Demir & Aksöz, 2013).

### **4.1. Isıl İletkenlikle İlgili Genel Tanımlar**

#### **4.1.1 Isı**

Isı, bir maddenin bünyesinde bulunan kinetik enerji ile potansiyel enerjinin toplamına denir. Aynı zamanda bir enerji türü olan ısı, diğer enerji türlerine de dönüşebilme özelliğine sahiptir. Birimi “kalori” ya da “joule”dür. Isı “Q” sembolü ile gösterilir ve ısı ölçümü “kalorimetre” adı verilen bir kap ile ölçülür. Isı maddenin miktarına bağlıdır. Maddenin temel yapı taşları olan atom ve moleküllerin sürekli hareket halinde olması, maddenin enerji durumunu belirler. Bu hareketin hızı arttıkça, maddenin ısısı da orantılı olarak yükselir. Atomların ve moleküllerin hızlanması ise çeşitli yöntemlerle sağlanabilir. Mesela bir yakıt yandığı zaman kimyasal tepkime ile ısı üretir, iki cisim de birbirine sürtünerek ısı üretilebilir (Aksöz & Kervan, 2013).

#### **4.1.2 Sıcaklık**

Sıcaklık, bir maddeyi meydana getiren atomların veya moleküllerin ortalama kinetik enerjilerini ifade eden bir ölçü birimi olarak tanımlanabilir. Sıcaklık, atomların veya moleküllerin kinetik enerjisine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ancak doğrudan bir enerji türü olarak kabul edilmez. Moleküllerin kinetik enerjileri birebir eşit değilse, her bir molekülün kinetik enerjisinin toplamı alınarak bu toplamın parçacıkların sayısına bölünmesi, akışkanın ortalama kinetik enerjisinin hesaplanmasını sağlar. Elde edilen enerji düzeyi yüksek olduğunda madde sıcak kabul edilir, enerji düzeyi düşük olduğunda madde soğuk kabul edilir. Sıcaklığın artırılması durumunda moleküllerde daha fazla kinetik enerji olacağından maddenin de iç enerjisinde de artma meydana gelir. Sıcaklık termometre adı verilen cihazlar ile ölçülür. Termometreler, sıvıların genleşme prensibine bağlı olarak ölçüm yapar. Termometreler de, suyun donma ve kaynama noktasını esas alan Kelvin, Celsius ve Fahrenheit gibi ölçükler tercih edilmektedir (Demir & Aksöz, 2013).

### 4.1.3 Isı Akısı

Isı akısı, bir maddenin belirli bir alanından belirli bir zaman diliminde geçen ısı miktarını ifade eder. Fourier kanunu kullanılarak hesaplanır:

$$j = -KdTdx = -K \frac{dT}{dx} \quad (4.1)$$

Burada ısı akısı(j)'nin birimi W/m<sup>2</sup> olarak ifade edilmektedir. K, malzemedeki ısı iletkenliği ifade eder birimi W/m.°C şeklindedir. T, sıcaklığı (°C); x ise ısı akışının yönündeki mesafeyi temsil eder (Hoffman, 2008).

### 4.1.4 Isı Sığası

Bir maddenin sıcaklığını 1°C veya 1K arttırmak için maddeye aktarılması gereken ısı miktarı ısı kapasitesi veya ısı sığası olarak tanımlanır.

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (4.2)$$

Burada ısı sığası birimi J/K ve C ile gösterilir. Formüldeki  $dT$  ve  $dQ$  sıcaklık değişimi için gerekli enerji miktarını ifade eder.

### 4.1.5 Özgül Isı

Bir maddenin sıcaklığını 1K veya 1°C artırmak ya da azaltmak için gereken ısı miktarına denir. Birimi J/mol.K ve c ile gösterilir. Hacim ve basıncın sabit olduğu iki çeşit özgül ısı bulunmaktadır (Basar, 2020).

**Tablo 4.1.** Bazı Malzemelerin Özgül Isı Değerleri

Malzeme	Cp(kj/kg.K)	Malzeme	Cp(kj/kg.K)
Gümüş	0,23	Alüminyum	0,88
Bakır	0,38	Magnezyum	0,03
Nikel	0,44	Polystyrene	1,20
İndium Bakır	0,23	Polytetrafluoroethylene	1,05
1025 Çelik	0,48	Naylon 6,6	0,16
Demir	0,44	Polypropylene	0,18
Tungsten	0,13	Polyethylene(HDPE)	0,18

**Kaynak:** (Kök, 2006)

#### 4.1.6 Isı İletkenliği

Isı iletiminden bahsetmek gerekirse; moleküler ya da atomik seviyedeki durumlar ile ilişkili olup, maddenin molekülleri arasındaki temasından dolayı, daha yüksek enerjiye sahip olan moleküllerden daha düşük enerjiye sahip moleküllere doğru enerji transferi olarak tanımlanabilir (Kılıç & Yiğit, 2000). Başka bir ifadeyle; Isı iletimi; katı bir malzeme veya durağan akışkan içinde, sıcaklığın yüksek olduğu bir bölgeden daha düşük olduğu bir bölgeye doğru ısının hareket etmesidir (Korkmaz Ş. , 2019).

Bu ısı aktarma işlemi 3 şekilde meydana gelir;

i. Işıma (Radyasyon)

ii. İletim

iii. Taşınım (Konveksiyon)

Işıma diğer adıyla radyasyon, fotonlarla veya elektromanyetik dalgalarla gerçekleşen ısı iletimidir (Onaran, 2000). Termal radyasyondan bahsederek, herhangi bir maddenin içerisinde atomların ve moleküllerin gelişigüzel oluşan hareketlerinin bir sonucudur. Örnek verecek olursak güneşin dünyaya sağladığı enerji bu şekilde sağlanır.

Tüm malzemeler sıcaklığa bağlı olarak termal enerji oluştururlar. Bir malzemede sıcaklık ne oranda yüksekse o oranda ısı enerjisi yaydığı anlamına gelmektedir. Oda sıcaklığına bakıldığında termal enerji kızılötesi dalgalar aracılığıyla yayılım gösterirler. Malzemenin sıcaklığına göre yayılan dalganın boyu ve frekansı değişir. Sıcaklık yükseldikçe dalga boyu kısa ve yüksek frekanslıdır.

Radyasyon değerini hesaplamak için Stefan-Boltzman yasası kullanılır:

$$P = \sigma A e T^4 \quad (4.3)$$

Burada,  $P$  ısı gücü ifade eder ve birimi watt'tır,  $\sigma$  Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ),  $A$  ısı akışına dik olan yüzey alan ve birimi  $\text{m}^2$ ,  $e$  yayılabilirliği,  $T$  ise kelvin cinsinden sıcaklığı ifade eder (MÜHENDİSTAN, 2025).

Taşınım diğer adıyla konveksiyon, burada ısı transferi sıvı ya da gaz olması durumunda aktarılma söz konusudur. Bir akışkanın değişik sıcaklıklarda etkileşime geçmesiyle akışkanın hareketi, ısı transfer olayını arttırır. Bu sebeple, akışkanın hızının artmasıyla ısı transferi de artar.

Yaptığı harekete bağlı olarak akışkan doğal, zorlanmış ve taşınım olarak 3 sınıfa ayrılır. Doğal akışkan, yüzdürme etkisiyle doğal yollardan kaynaklanır. Zorlanmış akışkan, herhangi bir yüzeyin üzerinde yada bir boru içerisinde, pompa yardımıyla veya fan gibi makinelerle akması için zorlanır (Özmihçi, 2009).

Gazlarda veya akışkanlarda taşınım, Newton soğuma yasası ile hesaplanır:

$$Q_t = Ah(T_y - T_ç) \quad (4.4)$$

Burada,  $Q_t$  taşınım ile aktarılan ısı transferi ve birimi watt'tır,  $A$  ısı akışına dik olan yüzey alan ve birimi  $m^2$ ,  $h$  taşınım katsayısı,  $T_y$  ısı transferini yapan cismin yüzeydeki sıcaklığı,  $T_ç$  çevre sıcaklığını ifade eder. Burada  $h$  taşınım katsayısı, yüzeyin geometrisine, şekline ve maddenin cinsine bağlıdır (MÜHENDİSTAN, 2025).

İletim, maddedeki parçacıkların doğrudan teması ile ısı enerjisinin aktarılması olayıdır. Sıvılara baktığımızda bu olay, düşük enerjiye sahip molekül ile yüksek enerjiye sahip molekülün çarpışması sonucu ısı transferi meydana gelmiş olur.

Katı ve sıvılarda ısı iletimi, Fourier kanunu ile hesaplanır:

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4.5)$$

Burada  $Q_x$ ,  $x$  doğrultusundaki ısı transfer miktarı ve birimi watt'tır,  $A$  yüzeydeki alanı  $m^2$  cinsinden,  $k$  ısı iletkenlik katsayısını ve  $dT$  sıcaklıktaki değişimi Kelvin türünden ifade eder (Yüksel, 2010).

#### 4.1.7 Termoelektrik Özellikler

Termoelektrik etkiler ile ısı doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülebilir veya elektriğin ısıtma ya da soğutma amacıyla kullanılmasını sağlar (PAU, 2025).

Termoelektrik özellikler üç temel olayda kendini gösterir:

a) Seebeck etkisi: Sıcaklıkları farklı olan bir metal çubuğun uçları arasında bir gerilim farkı oluşur.

b) Thompson etkisi: İki ucu farklı sıcaklıklara sahip bir metal çubuktan akım geçirildiğinde, akım yönüne bağlı olarak ısı ya emilir ya da yayılır.

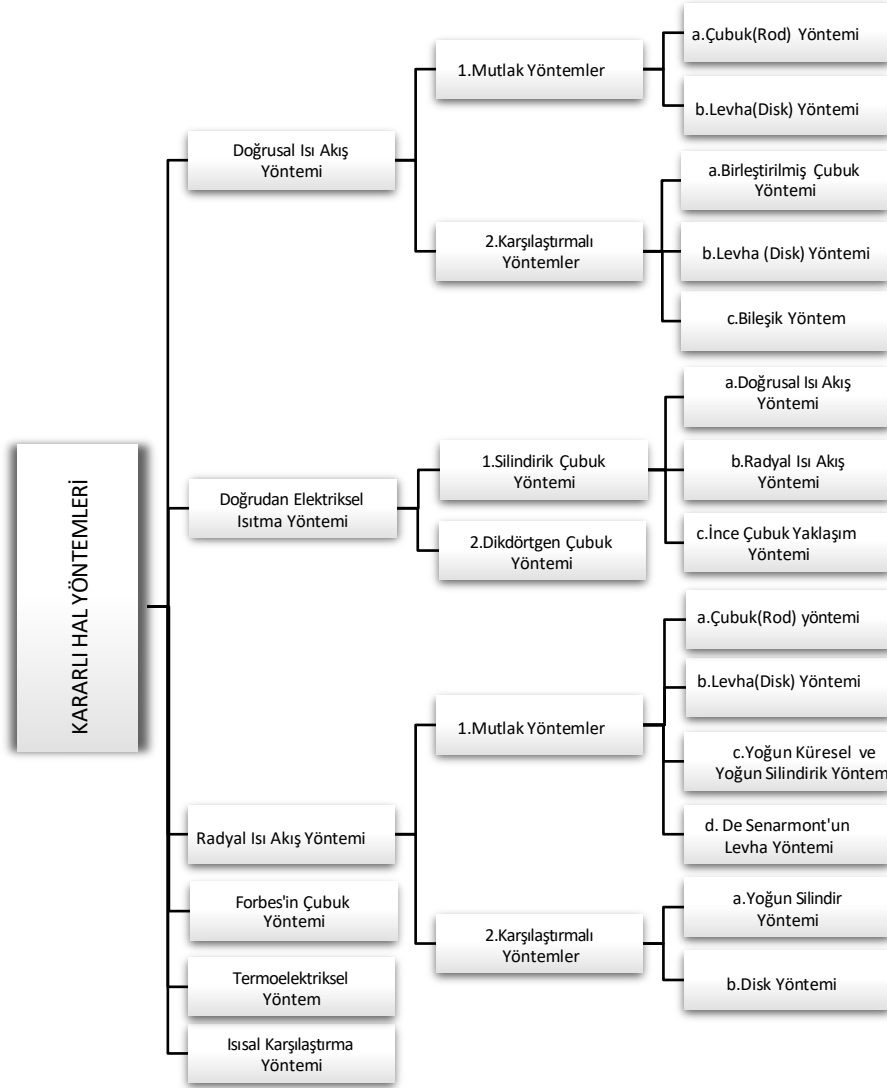
c) Peltier etkisi: İki farklı metal iletkenin birleşim noktalarında akım geçirildiğinde, akım yönüne bağlı olarak ısı ya soğutulur ya da dışarı aktarılır (Onaran, 2000).

## 4.2. Isıl İletkenlik Ölçüm Metotları

Katı malzemelerde ısı iletkenliklerini bulmak için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler ile malzemenin sıcaklık ve cinsine göre karar verilebilir. Tüm şartlarda uygulanabilir bir yöntem bulunmamaktadır. Bir yöntemin uygunluğunu; malzemedeki geometrik yapı, fiziksel özelliği, deneyin hızı, elde edilecek sonuçların gerçekliği, zaman kavramı ve maddiyata dayalı destek gibi etkenler belirler.

Isıl iletkenliği ölçme yöntemi kararlı hal yöntemi ve kararsız hal yöntemi olmak üzere iki kısma ayrılır. Kararlı hal ölçüm yöntemi, belirli bir sıcaklıkta sabit tutulan numunenin ısı iletkenliğini, sistem denge durumuna ulaştıktan sonra birim alandaki ısı akış oranı üzerinden hesaplayarak belirler. Kararsız hal ölçüm yönteminde ise, numunede gerçekleşen ısı yayılımı sabit değildir ve sürekli bir değişim gösterir. Bu nedenle ısı akış oranı bulmak yerine, numunede oluşan sıcaklık değişimi dikkate alınır. Daha sonra bu hesaplama doğrultusunda malzemenin ısı dağılım değeri, özgül ısısı ve yoğunluk değeri ile beraber ısı iletkenlik belirlenir (Basar, 2020).

**Tablo 4.2.** Kararlı Hal Yöntemlerinin Sınıflandırılması



**Kaynak:** (Kök, 2006)

#### 4.2.1 Doğrusal Isı Akış Yöntemleri

Bu yaklaşım ile kurulan düzenek numunenin eksenel yönde ısı akışının gerçekleşmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Düzeneğe yerleştirilen numunede ısı kaybı yada kazancı minimumdur.

Eğer hiçbir ısı transferinin olmadığı kabul edilirse, kararlı durumlarda ısı iletim denklemini Fourier-Biot,

$$k = -\frac{Q \Delta x}{A \Delta T} \quad (4.6)$$

ile hesaplanır. Denklemdaki k ısı iletkenlik katsayısını, Q ısı akış hızını, Δx mesafeyi, A numune kesit alanını, ΔT sıcaklığı ifade eder (Fourier, 1955).

### **4.2.1.1 Mutlak Yöntemler**

#### **Çubuk (Rod) Yöntemi**

Bu yöntem, hemen hemen her sıcaklıkta (yüksek sıcaklıklar dışında) iletkenliği iyi malzemeler için uygun bir yöntemdir. Fakat genel olarak 25°C'nin altındaki sıcaklıklardaki deneylerde bu yöntem uygulanmıştır. Numunenin geometrik şekli uzun çubuk şeklindedir. Numunenin uzun çubuk şeklinde olmasının sebebi numune boyunca meydana gelecek olan ısı düşüşünün doğru ve net olarak ölçülmek istenmesidir.

Numunenin bir ucundan ısı kaynağı belirli sıcaklıkta tutularak uygulanmaya başlanır. Isı kaynağının olduğu kısımdan diğer kısma doğru aksel şekilde akma olur. Buradaki radyal olarak kullanılan ısı görmezden gelinmelidir. Düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sırasında radyal ısı kaybı genellikle önemli bir sorun oluşturmaz. Korumalı yada yalıtımlı ısıtıcılara bu sebeple gerek duyulmamaktadır. Ölçüm olarak vakumlu ortamı tercih edilir. Radyasyon sebebiyle oluşacak ısı kaybının önüne geçmek için radyasyon koruma kalkanı tercih edilir. Numunenin ucuna ısı, karbon rezistansıya yada ince telli bir ısıtma bobini ile sağlanabilir. Sıcaklık değerleri, direnç termometreleriyle, buhar-basınç termometreleriyle, gaz termometreleriyle, manyetik termometrelerle ya da termal çiftlerle ölçülebilir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan deneysel çalışmalarda ısıdan dolayı kayıp çok mühim sorun teşkil edilebilir. Çünkü sıcaklığın artmasıyla beraber ısı transferi de artmış olur. Radyal ısı kaybını önlemek amacıyla, numunenin çevresine kontrollü bir koruma ısıtıcısı veya koruma tüpü yerleştirilebilir (Basar, 2020).

#### **Levha (Disk) Yöntemi**

Levha yöntemi ile iletkenliği düşük metal parçalar, metal tozları ve yalıtkan malzemelerin ölçümü için tercih edilir. Rod metoduyla benzerdir. Farklı olarak sadece numune ebatları daha küçüktür. İletkenliği zayıf malzemelerin ölçümü için daha kullanışlıdır. Bunun sebebi ısının akışı esnasında, malzemenin küçük olması denge hali durumunun daha kısa sürede sağlanması ve daha az ısı kaybı olmasıdır. İstenen numunelerin boyutları farklı malzemeler için tasarlanmış cihazlarda farklılık gösterebilmektedir (ASTM, 1967).

Levha yönteminde tek levha yöntemi ve çift levha yöntemi olmak üzere iki çeşit deney yöntemi vardır. Tek levhada numune soğuk ve sıcak iki levha arasına yerleştirilir. Çift levhada

sıcak olan levha iki numunenin ortasına yerleştirilir ve soğuk olan levhalar ise dış kısma yerleştirilir (Basar, 2020).

#### **4.2.1.2 Karşılaştırmalı Yöntemler**

Bu yöntemi ilk keşfeden Franklin olup daha sonra Ingen-Hausz geliştirmiştir. Çalışma yöntemi çubuk şeklinde olan metal numune balmumu malzemesiyle kaplanır. Kaplama işleminden sonra numunelerin bir taraftaki uçları su veya yağ içerisine daldırılarak aynı anda aynı değer sıcaklığa getirilir. Bunun sonucunda ise hangi malzemenin iletkenliği yüksekse o malzeme balmumu çubuğunun üzerinde daha fazla yol kat ettiği görülür. Geçmişte bunun üzerinde yapılan çalışmada numunenin kararlı olması durumunda numunelerin iletim hızları balmumunun ilerleme mesafesinin karesiyle doğru orantılı olduğu farkedilmiştir. Günümüzde bu yöntemler; birleştirilmiş çubuk yöntemi ve disk yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır (Basar, 2020).

#### **Birleştirilmiş (Uç Uca Eklenmiş) Çubuk Yöntemi**

Bu çubuk yöntemi üzerinde ilk olarak 1878 yılında Lodge deneme yapmıştır. Daha sonra çok sayıda bilim adamı yöntemi kullanmaya devam etmiştir. Isıl iletkenliği bilinen örnek alınacak numune veya numuneler ile ısıl iletkenliği ölçülmesi planlanan numune artarda dizilir. Isı akışkan hızı numune boyunca tüm numuneler için aynı olduğu düşünülebilir. Bu şekilde şartların sağlandığında numunenin ısıl iletkenliği,

$$k = k_r \frac{A_r (\Delta T / \Delta x)_r}{A (\Delta T / \Delta x)} \quad (4.7)$$

formülü ile verilir. Burada  $r$  ile gösterilen sembol alt indisin referans numunesidir. Bu yöntem ile ölçülen ısıl iletkenlik, zayıf ve güçlü iletkenler olmak üzere ikiye ayrılır. Güçlü iletkenlerde genellikle uzun çubuk yöntemi tercih edilirken, zayıf iletkenlerde ise kısa çubuk yöntemi tercih edilir. Karşılaştırmalı yöntemler numunelerin kolay hazırlanması, kolay ve daha basit cihazlarla işlem yapabilme bakımından diğer yöntemlere oranla, daha avantajlı yöntemlerdir (Franel & Kingery, 2011).

#### **Levha (Disk) Yöntemi**

Bu yönteme genel olarak baktığımızda birleştirilmiş çubuk yöntemiyle aynı prensibe sahiptir. Yalıtkan ve zayıf iletkenler için bu yöntem idealdir. Ancak burada numuneler sıcak ve soğuk olmak üzere iki düz levha plaka arasına konulmaktadır. Christiansen bu yöntemi 1881

senesinde have ile sıvı ısı iletkenliklerini kıyaslamak için kullanan ilk bilim adamıdır (C. Christiansen, 1881).

### **Bileşik Yöntem**

Bu yöntemle beraber mutlak ve karşılaştırmalı yöntemlerin özellikleri bir arada ele alınır. Bu yöntemde ölçüm numunesi ve referans seri şekilde koyulur. Aynı anda ısı akış kalorimetresi veya ısıtıcının elektrik gücünün ölçülmesiyle termal akış hızı hesaplanmaktadır (Powell R. , 1936).

### **4.2.2 Doğrudan Elektriksel Isıtma Yöntemi**

Bu yöntemde, ısıtma işlemi bir ısıtıcı tarafından değilde doğrudan elektrik akımı tarafından yapılır. Bundan dolayı bu yöntem, elektrik iletimi yüksek olan malzemelerde sınırlı kalmıştır. Fakat diğer yöntemlerle kıyaslandığında avantajlarının daha fazla olduğu görülmektedir. Mesela bu yöntem ile yüksek sıcaklıklara rahatça ulaşılabilir. Buna ilaveten bu yöntemde küçük numuneler kullanıldığından sistem kısa sürede denge durumuna gelmektedir. Bu yöntem numunenin şekline göre dikdörtgen ve silindirik çubuk olmak üzere ikiye ayrılır.

#### **4.2.2.1 Silindirik Çubuk Yöntemleri**

Bu yöntemde numunenin şekilleri ince tel, tüp ya da çubuk şeklinde tercih edilebilir. Şekil seçildikten sonra numunelerden uygun elektrik akımları geçirilir. Sıcaklık değerleri ve potansiyel düşmeler termal iletkenlik değerinin hesaplanması açısından oldukça önemlidir. Bu yöntem üçe ayrılmaktadır.

#### **Doğrusal Isı Akış Yöntemi**

Bu yöntemde, numune etkili bir şekilde yalıtıldığında, ortaya çıkan ısı numunenin her iki yönüne akma eğiliminde olabilir. Bu durumda ısı, çubuk numunenin her iki tarafına akar. Çubuğun her iki tarafının da aynı sıcaklıkta olduğu düşünülürse ısı iletkenliği,

$$k = \frac{\frac{1}{8\rho}(V_1 - V_2)^2}{T_2 - T_1} \quad (4.8)$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $\rho$  elektriksel öz direnci,  $V_1$  ve  $V_2$  numune üzerindeki elektriksel potansiyeli,  $T_1$  ve  $T_2$  ise sıcaklığı ifade etmektedir.

## Radyal Isı Akış Yöntemi

Radyal ısı akış yönteminde kullanılan numune tüp ya da kalın çubuk şeklinde olur ve Bu yöntemde numune kalın çubuk veya tüp şeklindedir ve akış radyal olarak meydana gelir. Numune kararlı durumdayken meydana gelen ısı numunenin uç kısımlarından yüzey kısımlarına doğru akar. Böylelikle ısı, ışıma ve taşınım ile çevreye doğru taşınmış olur. Isıl ve elektriksel iletkenlikleri küçük sıcaklık değişimlerinde bağımsız olduğunu kabul edersek ısı iletkenlik,

$$k = \frac{EI}{4\pi\ell(T_1 - T_2)} \quad (4.9)$$

formülü ile elde edilir. Buradaki E numune merkezinden  $I$  boyu kadar potansiyel düşüşü,  $\ell$  elektrik akımını,  $T_1$  ve  $T_2$ 'de yüzey ve eksendeki sıcaklıkları belirtmektedir.

## İnce Çubuk Yaklaşım Yöntemi

Bu yöntem şöyledir; ince ve uzun bir çubuk önce vakumlanır. Ardından, elektriksel ışıma kullanılarak çubuğu ısıtma işlemi yapılır. Işıma tekniği sayesinde, hem dikey hem de yatay doğrultuda ısı transferi etkili bir şekilde gerçekleştirilir. Bu yöntem numuneye ait radyal doğrultudaki ısı farklılıklarını gözardı ederek tüm düzlemlerde sıcaklıkların doğru olduğunu kabul eder.

Birden fazla amaç doğrultusunda kullanılabilen bu yöntem kesin olarak elektriksel öz direnci ısı iletkenliği, Thomson katsayısını, Lorenz fonksiyonunu, toplam ve yarıküresel emitansı gibi değerleri aynı numunede ölçülebilmektedir. Aynı zamanda bu yöntem ile Seebeck katsayısı, Richardson katsayısı, Peltier katsayısı, entalpi, ısı dağılma gücü, özgül ısı ve termal genleşme ölçülebilmektedir (Basar, 2020).

### 4.2.2 Dikdörtgen Çubuk Yöntemi

Numune şekil olarak kare ve uzun şekilde bir çubuktur. Bu geometrisinden dolayı numunenin tüm yüzeylerinde ısı ölçümleri yapılmasına olanak sağlar. Aynı zamanda çubuğun dar kısımdaki merkez sıcaklığı geniş kısımdaki merkez sıcaklığından düşük olmaktadır. Bu iki yüzeyde meydana gelen farklı sıcaklıklar, elektriksel iletkenlik sayesinde ısı iletkenlik hesaplamalarında da tercih edilir.

### 4.2.3 Radyal Isı Akış Yöntemi

Radyal ısı akışını belirlemek için çeşitli yöntemlerle tercih edilir ve bu yöntemlerin seçiminde genellikle numunenin şekli belirleyici bir faktördür. Radyal ısı akış yöntemimutlak

ve karşılaştırmalı olarak ikiye ayrılır (Basar, 2020).

### 4.2.3.1 Mutlak Radyal Isı Akış Yöntemi

#### Silindirik Radyal Isı Akış Yöntemi

Bu yöntemde, numune orta kısmında eş eksenli ve merkezinde boşluk bulunan silindirik şeklindedir. Burada ısı akışının istenilen yöne doğru olabilmesi için ısıtıcı veya soğutucu kullanılmaktadır. Numunenin uç kısımlarında meydana gelen ısı kayıpları, numune boyutları daha uzun kullanılarak ve elektrik gücünün uç kısımlarından uzak noktalardan ölçülerek engellenmiştir. Korumalı silindirik yöntemde, numunenin çevresini levhalar oluşturur ve orta kısmında, ısıtıcı veya soğutucu yerleştirilmesi için aynı ekseninde konumlanan merkezi bir boşluk bulunur. Numunede meydana gelen sıcaklık optik pirometrelerle veya ısı çiftleriyle ölçülebilir. Bu yöntemle ısı iletkenlik,

$$k = \frac{q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi\ell(T_1 - T_2)} \quad (4.10)$$

formülü ile hesaplanır. Buradaki  $q$  üretilen ısı,  $T_1$  ve  $T_2$  ise sırasıyla  $r_2$  ve  $r_1$ 'deki sıcaklık değerlerini  $\ell$  ise ısıtıcı tel uzunluğu gösterir.

#### Küresel Radyal Isı Akış Yöntemi

Bu yöntemde, küre biçimindeki boşluklu numunenin iç kısmına ısıtıcı yerleştirilir. Isıtıcıdan iletilen ısı, radyal yönde hiçbir kayıp olmadan doğrudan numuneye aktarılır. Teorik olarak ideal görünen bu yöntem, pratikte uygulandığında çeşitli zorluklarla karşılaştığını gösterir. Örneğin, radyal yönlerin tümünde sabit bir ısı dağılımı sağlayabilecek şekilde bir ısıtıcı tasarlamak oldukça karmaşık bir iştir. Bunun yanı sıra, numunenin küresel bir geometriye sahip olacak şekilde üretilmesi de başka bir önemli zorluktur. Aynı zamanda başka bir problem ısı çiftlerinin küresel izoterm boyunca yerleştirilmesidir. Bütün bu problemler metodun yaygın olarak kullanılamamasının bir nedenidir. Bu yöntemle ısı iletkenliği,

$$k = \frac{q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}{4\pi(T_1 - T_2)} \quad (4.11)$$

formülü ile elde edilir.

## **Yoğun Küresel ve Yoğun Silindirik Radyal Isı Akış Yöntemleri**

Bu yöntemler genel olarak tozlar, lifler ve gevşek yapıdaki malzemelerin üzerinde kullanılmaktadır. Numune, küre ya da silindir şeklindeki iki kabuk arasına yerleştirilir. İçteki kabuk, ısıtıcı veya soğutucu görevi görmektedir. Bu yöntemler, gevşek yapılı malzemelerin ısı iletkenlik ölçümlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

### **De Senarmont'un Levha Yöntemi**

Bu yöntemde, numune inceltirilmiş bir levha haline getirilir ve ardından ince bir film kalınlığına sahip beyaz balmumu ile kaplanır. Numune merkezine doğru açılan bir deliğe gümüş bir tüp sıkıca yerleştirilir ve ısı, doğrudan numunenin merkezine uygulanır. Isı uygulanan tarafta, balmumunun erime süreciyle birlikte sınır çizgileri net bir şekilde görünür hale gelir. Bu sınır çizgilerinin oluşumu, ısının akış yönünün farklı doğrultulara sahip olduğunu gösterir. Erimiş balmumunun eğriliği incelenerek cismin izotropik yapıda mı anizotropik yapıda mı olduğuna karar verilir. Meydana gelen eğrinin şekli daire biçimindeyse cisim izotropik özellik gösterir; elips biçimindeyse cisim anizotropik özelliktedir. Yöntem kapsamında, elipsin a ve b eksenleri boyunca elde edilen iki farklı ısı iletkenlik değeri,

$$\frac{k_a}{k_b} = \left(\frac{a}{b}\right)^2$$

(4.12)

formülü ile hesaplanır (Basar, 2020).

### **4.2.3.2 Karşılaştırmalı Yöntemler**

#### **Yoğun Silindir Yöntemi**

Bu yöntemde, numune silindir biçiminde olup çevresi ısı iletkenliği bilinen bir referans malzeme ile sarılmıştır. Numunenin merkezinde bir ısı kaynağı yer alır. Bu yapı, ısının akışını hem numunenin hem de referans malzemenin üzerinden geçecek şekilde yönlendirir. (Basar, 2020). Bu yöntemin sıradan maddeler için uygun bir metot olmasını sınırlandırılmasının nedeni mutlak yöntemlere göre büyük avantajlara sahip olmamasından kaynaklanır. Bu sebeple daha çok reaktif benzeri özel maddeler ve radyoaktif maddeler için kullanıma uygundur (Dumas, Mansard, & Rousset, 1965).

Reaktif veya radyoaktif gibi özel maddelerin ölçümlerinde bu yöntemin sağladığı en büyük avantaj numunenin etrafında ısı yalıtımı olarak da görev yapmasıdır. Bu yöntemde ısı iletkenliği,

$$k = \frac{kr(T_3-T_4)\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{(T_1-T_2)\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)} \quad (4.13)$$

formülü ile hesap edilir. Denklemden bulunan  $T_1$  ve  $T_2$  numuneleri üzerindeki  $r_1$  ve  $r_2$  noktalarında ölçülen sıcaklık değerlerini,  $T_3$  ve  $T_4$  ise referans numuneleri üzerindeki  $r_3$  ve  $r_4$  noktalarında ölçülen sıcaklık değerlerini ifade etmektedir.

### **Disk Yöntemi**

Bu yöntem iletken disk ismiyle de bilinmektedir. Yalıtkan malzemeler ile kıyaslanabilir ölçümler yapabilmek için tasarlanmıştır. Referans olarak kullanılan iki disk arasına yine disk şeklindeki olan numune yerleştirilir. Diskler, makul bir termal iletkenlik özelliğine sahiptir ve çevresine dairesel bir şekilde yerleştirilmiş bir ısıtıcı ile desteklenir. Bu düzenleme sonucunda, sabit ve düşük bir sıcaklığa sahip disk, sandviç benzer bir şekle sahiptir. Fakat, burada meydana gelen ısı akışı radyal bir düzende ilerlemez. Çünkü burada ısı, iletken olan disklerden numune tarafına doğru radyal bir şekilde hareket ederken, aynı zamanda numuneden diskler doğru ters yönde bir ısı transferi de gerçekleşmektedir. Bu durum, diskin sıcaklığının merkez bölgelerine doğru azalmasına neden olur ve bu sıcaklık düşüşü, numunelerin ısıl iletkenlik özellikleriyle doğrudan bağlantılıdır (Basar, 2020).

#### **4.2.4 Forbes'in Çubuk Yöntemi**

Bu yöntemde göre, dinamik ve statik olmak üzere iki farklı türde deney düzenine girer. Dinamik deneyde, dövme demir çubuk belirli koşullar altında soğutulur ve ısı kaybı hızı hesaplanır. Statik deneyde ise dövme demir çubuk bir ucu eriyik halde bulunan lehim ya da kurşun ile yüksek bir sıcaklıkta tutulur. Her iki deneydeki ısıl iletkenlik;

$$k = \frac{1}{A} \left( \frac{dg}{dx} \right) \left( \frac{1}{\frac{d^2T}{dx^2}} \right) \quad (4.14)$$

formülü ile hesaplanır (Forbes, 1851).

#### **4.2.5 Termoelektriksel Yöntem**

Bu yöntem genel olarak termoelektrik maddeler için daha idealdir. Yöntemin uygulanması için iki metalik bağlantı arasında bulunan numunenin üzerinden doğru akımın geçmesiyle sağlanmaktadır. Numunenin bir yüzeyi Peltier etkisiyle ısınırken, diğer yüzeyi Peltier etkisiyle soğur. Bu durumda numune boyunca sıcaklık değişimi oluşur. Kararlı durum

şartlarında, Peltier etkisiyle oluşan ısı üretim miktarı, sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru iletilen ısı iletkenlik oranıyla dengeye ulaşır. Bu durumda ısı iletkenlik,

$$k = \frac{\pi I \ell}{2 \Delta T} \quad (4.15)$$

formülü ile hesaplanır. Burada  $\pi I$  Peltier ısı üretim oranını,  $\ell$  uzunluğu, A kesit alanını,  $\Delta T$  numunenin uçları arasındaki sıcaklık farkını gösterir.  $\pi = S \times T$  olarak bulunur. Burada S sembolü Seebeck sabitini ifade eder. Seebeck sabiti  $\Delta T$  sıcaklık farkından dolayı numunenin uçları arasındaki potansiyel farktan meydana gelebilir. Burada numune üzerinden doğru akım geçirilirse ısınma oluşur. Ancak, akım yeterince düşük seviyede seçildiği takdirde, uygun termoelektrik özelliklere sahip malzemelerde bu ısınma etkisi ihmal edilebilir. Bu durumun nedeni, Peltier ısı üretiminin akımla (I) orantılı olması, normal ısı üretiminin ise akımın karesiyle (I<sup>2</sup>) orantılı şekilde gerçekleşmesidir (Basar, 2020).

#### 4.2.6 Isısal Karşılaştırma Yöntemi

Nu yöntem Powell tarafından ısı iletkenliği basit ve hızlı biçimde ölçmek için tasarlanmıştır (Powell R. , 1936). Tekniğin merkezinde, yönlendirilmiş ve izole edilmiş bir ucu bulunan özel bir sonda sistemi yer almaktadır. Sonda, ortam sıcaklığının üzerinde, genellikle 15-20°C arasında bir sıcaklığa sahip bir ısı haznesi ile birlikte kullanılmaktadır. Sondanın ucuna ve ısı haznesine bağlanan termal çiftler, iki yapı arasındaki sıcaklık farkını kaydetmek üzere görevlendirilmiştir. Deney esnasında, sonda numune yüzeyine hafifçe temas ettirilerek ölçüm işlemi gerçekleştirilir.

$$T_1 - T = (T_1 - T_2) \left( \frac{k_2}{k_1 + k_2} \right) \quad (4.16)$$

formülü ile hesap edilir. Burada  $k_1$  sondanın temas eden ucunun ısı iletkenliğini,  $T_1$  sondanın temas eden ucunun sıcaklığını,  $k_2$  numune yüzeydeki termal iletkenliği,  $T_2$  oda sıcaklığını, T ise sonda uç sıcaklığını ifade eder. Burada meydana gelen sıcaklık farkı, çok kısa sürede ısı iletkenliği bilinen referans malzemeler kullanılarak bir kalibrasyon eğrisi oluşturulabilir ve bu eğri üzerinden numunenin ısı iletkenliği belirlenebilir (Basar, 2020).

## 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Ham olarak çıkartılan manyezitler sinter manyezite dönüştürülür. Manyezit grubu, özellikle yüksek ısıya dayanıklılık özellikleri sayesinde refrakter malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye, bu mineralin dünya çapındaki rezervleri açısından önemli bir konuma sahiptir. Ülkemizdeki manyezit oluşumları, genellikle altere ultramafik kayalar ve sedimanter kayalarla ilişkili olarak gelişmiştir. Bu oluşumlar, serpantinleşmiş ultramafik kayaların çatlak ve kırık bölgelerinde damar veya stokverk şeklinde gözlemlenmektedir. Yapısal analizlere göre, bu tip manyezit yatakları Kraubath tipi manyezit oluşumları ile benzerlik göstermektedir. Manyezitin kalitesini değerlendirmek için ise  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$  ve  $CaO$  bileşenlerinin oranı büyük bir öneme sahiptir (Yılmaz & Kuşçu, 2012).

Yapılan bu çalışmada ilk olarak yerli kaynaklardan elde edilen hammaddeler kullanılarak sinterlenmiş spinel üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştiren sinter spinelde porozite ve yoğunluk analizleri, mikroyapı incelemesi, faz analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra çimento döner fırınlarının sinterleme bölgesinde kullanılan refrakter tuğlalar, tamamen yerli hammaddelerden üretilmiştir. Üretimi yapılan refrakterlere soğukta basma mukavemeti, yoğunluk, su emme, gözenek miktarı, üç nokta eğme, ısıl genleşme analizleri yapılmış ve korozyonla ilgili davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda bu numunelerin SEM incelemeleri de yapılmıştır. Kırılma yüzey enerjisi, kırılma tokluğu, elastik modül, iş enerjisi değerleri ölçülerek incelenmiş ve bu değerlerin, ısıl stres/şok parametre oranları hesaplanmıştır (Çakır, 2014).

Manyezit içerikli tuğlalar bazik karakterli refrakter malzeme grubuna girmektedir. Bu tuğlaların kullanım alanı olarak çimento döner fırınlarının sinter bölgesinde kullanım sırasında oluşan çeşitli reaksiyonlar nedeniyle  $Cr^{+6}$  iyonları, zararlı etkiler ortaya çıkarabilir. Manyezit-spinel, manyezit-krom ve manyezit-hersinit refrakterler geliştirilmiştir. Geliştirilen farklı refrakterlerin mukavemet, porozite, yoğunluk, yük altında refrakterlik testi, kimyasal analizleri ve mikroskopik yapıları birbirleriyle kıyaslanmıştır. Kıyaslama neticesinde porozite ve yoğunluk değerlerinde belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Mukavemet değerleri incelendiğinde ise manyezit-hersinit refrakterin  $75,23 \text{ N/mm}^2$  ile en iyi sonuçları verdiği görülmüştür. Ayrıca, RUL testinden elde edilen verilere göre her üç refrakter malzemenin de  $1450-1500^\circ\text{C}$  aralığında kullanılabilir olduğu belirlenmiştir (Kaya, 2014).

Bu çalışmada farklı oranlarda karıştırılan bazı refrakter hammaddelerin özellikleri incelenmiştir. İlk olarak bazı refrakter hammaddelerin kimyasal ve mineralojik özellikleri tespit

edilmiştir. Daha sonra farklı oranlarda refrakter hammaddeler ve katkıları kullanılarak üretilmiş olan tuğlaların teknolojik, fiziksel ve kimyasal özellikleri tanımlanmıştır. Yapılan incelemelerin sonucunda, refrakter tuğlaların içeriğindeki malzemelere türlerine göre farklı sıcaklıklarda kullanılabilirliği ve bu malzeme türlerine göre farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştır (Kılıç & Yarbil, 2016).

Magnezyum alüminat spinel, 1400°C'de katı oksit reaksiyonu yolu ile sentezlenmiş ve daha sonra magnezyum refrakter tuğla bileşimlerine 0-30 ağırlık yüzdesi aralığında eklenmiştir. Magnezya-spinel refrakter kompozitlerinin optimum pişirme sıcaklığı, yoğunlaştırma çalışması ve faz analizinden belirlenmiştir. Nihai refrakter ürünler daha sonra termal genleşme, yük altında refrakterlik, soğuk mukavemet, termal şoktan sonra soğuk mukavemetin korunması, farklı sıcaklıklarda sıcak mukavemet ve mikro-yapısal analiz ile karakterize edildi. Spinel (ağırlıkça %20) içeren magnezya bileşiminin üstün özelliklere sahip olduğu görülmüştür (Ghosh ve ark., 2004).

Refrakter malzemelerin çokca kullanıldığı çimento döner fırınlarında gözenekli yapılar tercih edilmektedir. Bunun nedeni olarak havanın ısı iletkenliği ve ısı iletim mekanizmaları ile ilgilidir. Yüksek por miktarı izolasyon performansını artırırken mukavemet, darbe dayanımı ve kırılma tokluğu gibi parametreleri de düşürdüğü görülmektedir. Bu çalışma ile Aktif karbon, Elektrot kırığı, MgOH, Polivinil alkol, Kok kömürü, Kalsine manyezit ve SiC gibi bazı katkı maddeleri kullanılarak gözenek miktarının artırılarak mukavemet değerinin de istenilen değer aralığında olması hedeflenmiştir (Dayıoğlu, 2022).

Bu çalışmada öncelikle yerli hammaddeler kullanılarak sinter spinel üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen sinter spinelin üzerinde porozite ve yoğunluk analizleri, mikroyapı incelemeleri, minerolojik ve faz analizi çalışmaları, X-ışını difraktometresi yardımıyla detaylı bir şekilde incelenmiştir. Daha sonra çimento döner fırınlarının sinterleme bölgesinde uygulanan refrakter tuğlalar tamamen yerli hammaddelerden üretilmiştir. Üretilen refrakter tuğlalara yoğunluk, soğukta basma mukavemeti, su emme, gözenek miktarı, üç nokta eğme ve ısı genleşme testleri uygulanarak korozyon davranışları analiz edilmiştir. Ayrıca, bu numuneler üzerinde SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerde kırılma yüzey enerjisi, kırılma tokluğu, elastik modül ve iş enerjisi değerleri ölçülmüş; termal stres/şok parametre oranları hesaplanarak kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır (Peng ve ark., 2021).

İnorganik bir malzemenin ısı yalıtım olarak geliştirilmesinde sinterleme sıcaklığı, süresi, katkıları ve oranları gibi farklı parametreler olduğundan çok sayıda numunenin ısı

iletkenliğini ölçmek gerekir. Yapılan bu çalışma ile, Peltier'in ısı akışı sensörü olarak kullanılarak uygun maliyetli bir cihaz geliştirilmiştir. Sıcaklıkları farklı iki plaka arasına numune yerleştirilerek üzerindeki ısı akışı ile oran kurularak ısı iletim katsayısı ölçümü yapılmıştır (Korkmaz ve ark., 2022).

Bu çalışmada, gözenekli yapı taşlarının ısı iletim katsayıları hem deneysel hem de teorik yöntemlerle detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme için matematiksel model geliştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda deneysel değerler ile geliştirilen bu denklemden elde edilen değerlerin uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşıldı. Her iki deneysel çalışmada kullanılmak üzere örnekler alınmıştır. Alınan örnekler üzerinde yapılan incelemelerle, kimyasal bileşimleri, ısı iletkenlik değerleri, su emme özellikleri, özgül ısı kapasiteleri ve mekanik dayanımları belirlenmiştir. Elde edilen değerler ile diğer yapı malzemeleri karşılaştırılmıştır (Biçer ve ark., 2003).

Uzun zaman kullanılan döner fırın tuğlası astar kalınlığı düşerek termal verimliliği düşürür. Döner fırının termal verimliliği, kaplamaya daha düşük termal iletkenliğe sahip yalıtım malzemesi eklenerek iyileştirilebilir. Astar kısmının aşınması esnasında astarın iç yüzeyinin sıcaklığı, ısı akışı ve kabuğun dış yüzeyinin sıcaklığı için sayısal bir deney yapılmıştır. Yapılan deneyde biri astarta yalıtım malzemesi bulunan diğeri bulunmayan iki durum dikkate alınmıştır. Deneye göre, döner fırının yüksek sıcaklık bölgesindeki astar belirli oranda aşındığında, astarın iç yüzeyinin ortalama ısı akışı da artmaktadır. Bununla beraber, yalıtım malzemesi eklendikten sonra, astarın iç yüzeyindeki ortalama ısı akışı belirli oranında artmaktadır. Isı yalıtım malzemesi olmayan döner fırının termal verimliliği ile karşılaştırıldığında, astarın iç yüzeyinin ortalama ısı akışı azalır (Donghu & Shcherbina, 2023).

Çimento döner fırınlarında refrakterden beklenen özelliklerden bir tanesi de alkali direncinin yüksek olmasıdır. Bu çalışmada andaluzit hammaddesi kullanılmıştır, aynı zamanda mikro silika ilavesi ile andaluzit etkisinin artması beklenmiştir. Meydana getirilen kompozisyondan alkali direnç, termal şok direnci, aşınma direnci, boyutsal değişim ve yük altında refrakterlik gibi testler yapılmıştır. Boksit yerine andaluzit kullanılması, alkali direncini de pozitif yönde etkilemiştir. Ayrıca oluşturulan kompozisyona %1 oranda mikro silika ilavesi alkali direncini ve aşınma direncini iyi yönde etkilemiştir (Till M.J. ve ark., 2023).

Binalarda enerji verimliliğini arttırmak için ısı yalıtımı büyük önem taşır. Isı yalıtım malzemesi seçimi veya yeni malzeme geliştirme süreçlerinde, malzemenin ısı iletme katsayısının bilinmesi gerekir. Düşük ısı iletim katsayısı, daha iyi ısı yalıtımı anlamına gelir. Bu nedenle ısı

gereksinimlerini karşılamak için ısı iletim katsayısını belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılır ve sonuçlar literatürdeki verilerle karşılaştırılır. Bu çalışmada, farklı malzemelerin ısı iletim katsayıları analiz edilerek ısı iletim katsayısının malzemenin yapısına bağlı olduğu ve düşük ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin daha iyi yalıtım sağladığı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle iyi bir yalıtım için düşük ısı iletim katsayılı malzemeler tercih edilmelidir (Peker & Taştan, 2018).

Bu çalışmada ile seramik köpük üretim aşamasında borik asit katkısının, değişik sinterleme sıcaklıklarında alümina ve sepiyolit esaslı malzemelerin termal iletkenlik ve yoğunluk özelliklerine etkisine bakılmıştır. Sinterleme sıcaklığı 700–1200°C, borik asit oranı ise %0–50 arasında değiştirilmiştir. Alümina esaslı kompozisyonlarda hem sıcaklık hem de borik asit oranı arttıkça ısıl iletkenlik ve yoğunluk azalmıştır. Sepiyolit esaslı kompozisyonlarda ise borik asit oranı arttıkça ısı iletkenliği ve yoğunluk düşerken, sıcaklık artışı bu değerleri artırmıştır. En yüksek ısıl iletkenlik 2,36 W/mK ile saf alüminada (1200°C), en düşük değer ise 0,249 W/mK ile %70 sepiyolit + %30 borik asit kompozisyonunda (700°C) elde edilmiştir (Palacı, 2020).

Türkiye’de yaygın olarak kullanılan EPS ve XPS ısı yalıtım levhalarının düşük yangın dayanımı nedeniyle yüksek katlı binalarda kullanımı kısıtlanmıştır. Alternatif olarak kullanılan camyünü ve taşıyünü levhalar ise su emme ve yüksek maliyet sorunları taşımaktadır. Ayrıca piyasada bulunan "ısı yalıtım sıvası" ürünleri de genellikle düşük ısıl performansa sahiptir. Bu çalışmada, ekonomik, yüksek performanslı ve kolay uygulanabilir çimento esaslı bir sıva köpüğü geliştirilmiştir. Portland çimentosu ve kireç bağlayıcı olarak tercih edilmiş, hafif agrega malzemesi olarak ise genişletilmiş perlit, kaplı perlit, cam küre ya da diatomit kullanılmıştır. Elde edilen sıva köpüğü, 250 kg/m<sup>3</sup> kuru yoğunluğa, 250 kPa basınç dayanımına, ≤ 0,4 kg/m<sup>2</sup> dak kılcal su emme katsayısına ve 0,065 W/mK ısıl iletkenlik değerine sahiptir. Ayrıca birim maliyetlerinin geleneksel malzemelere kıyasla 1,5–3,5 kat daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilen köpük sıvanın geleneksel ısı yalıtım malzemelerine güçlü bir alternatif olabileceğini göstermektedir (Davraz ve ark., 2020).

Bu çalışmada, CuO, ZnO, MgO ve bunların hibrit kombinasyonlarını içeren nano boyuttaki metal oksit parçacıklarının saf su ile oluşturduğu nanoakışkanların termofiziksel özellikleri teorik olarak incelenmiştir. Nanoakışkanların %0,5, %1, %2 ve %2,5 hacimsel konsantrasyonlarda hazırlanmasıyla, ısıl iletkenlik, özgül ısı ve viskozite değerleri çeşitli literatür modelleri kullanılarak hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde

edilen bulgular, nanoakışkanların geleneksel akışkanlara kıyasla daha yüksek ısı iletkenliğe sahip olduğunu ve bu nedenle ısı sistemlerde çalışma akışkanı olarak daha verimli performans sunabileceklerini ortaya koymuştur (Aytaç, 2020).

Yüksek sıcaklık gradyanlarına maruz kalan boru ve ekipmanlarda meydana gelen hasarları azaltmak ve enerji kayıplarını en aza indirmek amacıyla, yerli hammaddeler olan perlit ve bor kullanılarak yeni bir ısı yalıtım malzemesi geliştirilmiştir. Üretilen yalıtım numuneleri ASTM ve EN standartlarına göre test edilmiş, mekanik ve ısı özellikleri değerlendirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda boru kaplama malzemesi olarak en uygun özelliklere sahip "K1" numunesi tercih edilmiştir. Ansys Fluent uygulaması kullanılarak oluşturulan modelleme ile farklı kalınlıklarda yalıtım uygulanmış boruların ısı kayıpları analiz edilmiştir. Test sonuçlarına göre, K1 numunesi referans G sınıfı betona kıyasla basınç dayanımında %99, özgül ısıda %27 azalma gösterirken, ısı yayılımında %25 artış sağlanmıştır. Isı iletkenlik ve yoğunlukta ise sırasıyla %92 ve %91 oranında azalma elde edilmiştir. Yapılan simülasyon neticesinde, 10 cm kalınlığındaki yalıtım uygulamasıyla petrol çıkış sıcaklığı 23,7°C'den 36,1°C'ye yükselmiş, ısı kaybı ise %27,1 oranında azaltılmıştır. Elde edilen bulgular, geliştirilen yalıtım malzemesinin petrol ve jeotermal üretim kuyularında enerji verimliliğini artırarak boru tıkanmalarını ve ekipman hasarlarını önlemede etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir (Kızıl, 2021).

Bu çalışmada, analsim ve klinoptilolit adlı iki farklı doğal zeolit minerali içeren katkı çimentolar ile üretilen ince yapılı hamur ve harç levhaların fiziksel, mekanik ve termal özellikleri deneysel olarak ele alınmıştır. Plakalar, %0, %10, %30 ve %50 oranlarında zeolit katkısı içerecek şekilde üretilmiştir. Amaç; bu iki zeolitin yapı malzemesi olarak köpük beton alternatiflerinde kullanım potansiyelini değerlendirmek ve üretim maliyetlerini düşürebilecek katkı malzemeleri için veri oluşturmaktır. Sonuçlar, her iki zeolit türünün %10 oranında kullanılması durumunda, termal performans açısından en iyi sonuçların elde edildiğini göstermiştir. Bu da, analsim ve klinoptilolit köpük beton uygulamalarında maliyet ve performans açısından etkili katkılar olabileceğini ortaya koymaktadır (Rıza Ali, 2021).

Bu çalışmada, magnezyum hidritten hidrojen desorpsiyon sürecinde sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin etkisi sayısal olarak incelenmiştir. COMSOL Multiphysics yazılımı ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak yapılan analizlerde, sabit ısı iletkenlik varsayımı yerine sıcaklığa bağlı değişkenlik dikkate alınmıştır. Termokimyasal depolama sistemleri (TCSS) ve radyal ısı akısı koşullarında yürütülen simülasyonlar, sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin

desorpsiyon süresini önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Yavaş desorpsiyon koşullarında süre yaklaşık 9 dakika, hızlı koşullarda ise 0,6 dakika kısalmıştır. Ayrıca, bu modellemede denge basıncı 2,09 MPa'dan 1,96 MPa'a düşerken, Darcy hızında artış gözlenmiştir. Sonuçlar, sıcaklığa bağlı ısıl iletkenliğin hidrojen salım verimliliğini artırdığını ve sistem performansının daha doğru modellenmesini sağladığını ortaya koymuştur (Lanbaran ve ark., 2025).

Yapılan literatür araştırmasına göre, refrakter malzemelerde hangi konularda çalışmalar yapıldığı incelenmiştir. Bu çalışmalar ışığında, manyezit spinel tuğlalarda kullanılan farklı kalınlık ve farklı basınçlarda üretim yapılarak üretim neticesinde fiziksel analizlerine göre uygun özellikte tuğlayı bulmak amaçlanmıştır.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

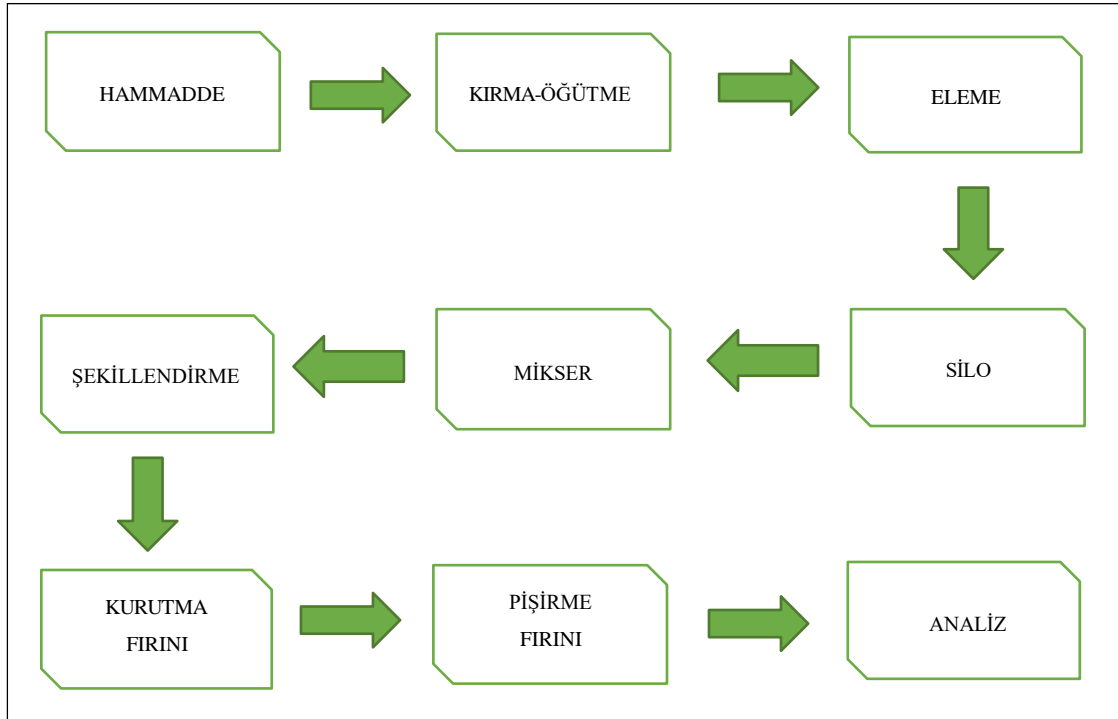
### 6.1. Kullanılan Refrakter Tuğlanın Malzemesi

Bu çalışma SÖRMAŞ fabrikasında üretimi yapılan ve daha çok çimento döner fırınında tercih edilen bazik içerikli tuğla seçilmiştir. Kullanılan ana malzemeler ve bağlayıcı katkı malzemeleri buradan temin edilmiştir.

### 6.2. Kullanılan Refrakter Tuğla Malzemesinin Üretimi

Hammaddeler kırıcılarda(çeneli ve konik) kırılarak toz(63µm), 0-1mm, 1-3mm, 3-5mm şekline getirilir. Daha sonra silolarda depolanır. Reçetede belirtilen oranlarda ve belirtilen malzemelerde harman olarak 1250 kg olarak hazırlanır. Hazırlanma işlemi sonrası mikserlerde 10-15 dakika karıştırılarak harman hazır hale gelir. Daha sonra, LAİES firmasının 1600 tonluk HPF III modelindeki hidrolik preste, 1400-1500-1600 kg/cm<sup>2</sup>'lik basınçta ve 60-70-80 mm kalınlığında tuğlalar şekillendirilmiştir. Şekillendirme sonrası 180°C'de tünel kurutma fırınında rutubet atma işlemlerinden sonra 1540°C'de tünel fırında pişirilmiştir. Pişirilme işlemi sonrasında gerekli analizler yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın hammaddeden analiz kısmına kadar ki üretim basamakları Şekil 6.1'de verilmiştir. Her basamak detaylı olarak anlatılacaktır.



Şekil 6.1. Yapılan Çalışmanın Üretim Basamakları Şeması

### 6.2.1. Hammadde

Bu çalışma için kullanılan hammaddeler deniz suyu sinter manyezit, sinter spinel, kimyasal bağlayıcılar olup, bu malzemeler SÖRMAŞ A.Ş.'den temin edilmiştir. Hammaddelerden deniz suyu sinter manyeziti Şekil 6.2 ve sinter spinel Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Deniz Suyu Sinter Manyeziti



Şekil 6.3. Sinter Spinel

### 6.2.2. Kırma-Öğütme

İşletmeye gelen hammadde boyutlarına göre, çeneli ve konik kırıcıdan geçirilerek istenilen boyutlara getirilmektedir. Toz hale getirmek için ise değirmen kullanılmaktadır. Üretim kısmında 5 mm boyutun üzerinde malzeme kullanılmamaktadır. Kullanılan kırıcılar Şekil 6.4 ve değirmen Şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Kırıcılar



Şekil 6.5. Değirmen

### 6.2.3. Eleme-Silo

Kırıcılarda istenilen boyuta getirilen hammaddeler elekler yardımıyla 0-1mm, 1-3 mm ve 3-5 mm fraksiyonlarına ayrılarak silolara gönderilir ve depolanır. Toz hale getirmek için genel olarak 0-1 mm boyutundaki hammadde değirmene beslenerek, toz (63µm altı) hale getirilmektedir.

### 6.2.4. Mikser

Mikserlerde istenilen harmana göre, karıştırma işlemi yapılmaktadır. Karıştırma işleminde ilk olarak iri taneler atılır, üzerine sıvı reçineler eklenir ve son olarak toz da eklenerek karıştırma işlemi tamamlanmaktadır. Bu karışım mikserde yaklaşık olarak 15 dk sürmektedir. Hazırlanan bu karışım transfer arabaları yardımıyla pres bunkerine gönderilir. Kullanılan mikser Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.6. Mikser

### 6.2.5. Şekillendirme

Karışım oluşturulurken, tuğla ölçülerine göre hedeflenen hacim değerinin hesabı yapılır. Hazırlanan harman dinlendirme işlemi sonrası şekillendirilmek üzere preslenme işlemi uygulanır. Kullanılan hidrolik pres Şekil 6.7'de, üretilen tuğlaların şekillendirme sonrası fırın araba dizimi Şekil 6.8'de verilmiştir.



**Şekil 6.7.** Hidrolik Pres



**Şekil 6.8.** Üretilen Tuğlaların Şekillendirme Sonrası Fırın Arabasındaki Görünümü

### **6.2.6. Pişirim**

Presleme sırasında ölçüm kontrolleri, presleme sonrası yoğunluk kontrolleri yapılır. Daha sonra 180°C’de tünel kurutma fırınında rutubet atma işlemlerinden sonra sonra manyezit spinel tuğlalarının ideal pişme sıcaklığı olan 1540°C de tünel fırında sinterleme işlemi yapılmıştır. Tuğlalar ateş bölgesinde (1540°C) 2 saat kalırken, fırında toplamda yaklaşık 72 saat veya 3 gün süre sonrasında çıkarılmaktadır. Kullanılan pişirme fırını Şekil 6.9’da, üretilen tuğlaların pişirim sonrası görünümü Şekil 6.10’da verilmiştir.



**Şekil 6.9.** Tünel Fırın



**Şekil 6.10.** Üretilen Tuğlaların Pişirim Sonrası Görünümü

### **6.2.7. Analizler**

Fırın iç astarlarında kullanılan refrakteri kullanılacak amaca uygun seçebilmek, malzemenin kullanım sırasında meydana gelen değişimlere karşı neler yapılabilir bunu bilmek, kullanılacak olan malzemenin özelliklerini bilmekte mümkündür. Bu sebeble refrakter malzemelerin üretimi yapıldıktan sonra kullanıldığı ortama uygun şekilde test yapılması gerekmektedir. Malzemelerin özellikleri, standartlaştırılmış muayene yöntemleri kullanılarak belirlenir (Nakagava, 1998).

#### **6.2.7.1. Kimyasal analiz**

Refrakter malzeme için kimyasal analiz XRF (X-Ray Fluorescence) cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz AMETEK firmasına ait olup SPECTRO XEPOS modeli kullanılarak SÖRMAŞ fabrikasında yapılmıştır. XRF analizi için cam tabletlerle ölçüm yapılmıştır. Bu cam

tabletlerin oluşturulması için eritiş metodu kullanılmıştır. Bunun için ise numuneler 63 mikron altına öğütölme işlemleri yapılarak toz haline getirilmiştir. Toz haline getirilen numune, lityumtetraborat ilavesi ile karışım hazır hale getirilmiştir. Daha sonra platin krozelerde eritiş yapılarak cam tablet elde edilmiştir. Böylelikle cam tablet cihaza yerleştirilerek kimyasal analiz gerçekleştirilmiştir. Kullanılan kimyasal analizin yapıldığı XRF cihazı Şekil 6.11’de verilmiştir.



**Şekil 6.11. XRF Cihazı**

### **6.2.7.2. Yoğunluk, Görünür Porozite, Su Emme**

Refrakter malzemenin yapısına bakıldığında farklı tanecikler, tanecikler arasında bağlar ve boşluklardan meydana geldiği görülür. Taneciklere bakılarak refrakterin genel özellikleri, bağlar bakılarak sıcakta ve soğuktaki davranışları, boşluklara bakılarak ise tuğlanın yoğunluğunu ve porozitesini bulunur. Bu boşlukların az veya çok olması, açık veya kapalı olması tuğlanın ısı iletimine, cüruf atağına, gaz geçirgenliğine ve mekanik mukavemetine etki eder (Nakagava, 1998).

Yoğunluk, görünür porozite, su emme analizleri ASTM C0830 standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu standarta göre, refrakter tuğlaya uygulanan görünür porozite testi, vakum altında su ile beslenerek belirli bir süre etkileşim sonucu test gerçekleştirilmiştir.

Analiz yapabilmek için tuğla dörtte bir haline getirilmiştir (küp şekli). Numune küp şekline getirilirken kesim işlemi sırasında ıslak kesim yapıldığı için, etüv fırınında yaklaşık olarak 105-110°C sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Kurutma işlemi yaklaşık olarak 2-3 saat civarı sürmüştür. Numune desikatör denilen aletle oda sıcaklığında soğutulmuştur. Numuneler hassas terazide 0,1 g hassasiyetle tartılır. Tartım sonucu oluşan değer  $M_1$  olarak

kaydedilmiştir (Kuru Tartım). Kuru tartım yapıldıktan numune sonra bir sepet içerisinde vakum kapına koyularak test başlatılır. Cihaz otomatik hesaplama yaptığı için herhangi bir farklı işlem yapmaya gerek yoktur. Cihazın kapağı kapatılır, vakum kabındaki basınç, 6,4 kPa mutlak basınç seviyesine yükseltilir. Bu basınç değeri sağlandıktan sonra 30 dakika boyunca bu şekilde bekler. Otomatik olarak su vanası açılır ve numunenin üzeri biraz geçene kadar su ile dolar. Ardından vakum hattı kapatılır ve hava hattı devreye alınarak içeriye basınç uygulanır. Uygulanacak olan basıncın yaklaşık değeri 30 psi seviyesinde yer almalıdır. İşlem 60 dakika boyunca sürdürülerek test tamamlanır. Son olarak basınç boşaltılır ve kapak açılır. Su dolu kaptaki numunelerin tartım işlemi yapılır. Numuneler su üzerinde askıda tartım yapılır ( $M_2$ ). Daha sonra numuneler sudan çıkarılarak, yüzeyindeki su bez ile alınarak tartım yapılır ( $M_3$ ).

Aşağıdaki hesaplamalar yapılarak; Yoğunluk, Görünür Porozite ve Su Emme değerleri bulunmuştur.

$$\text{Yoğunluk (g/cm}^3\text{)} = [M_1 / (M_3 - M_2)] \times d_{\text{sıvı}}$$

$$\text{Görünür Porozite (\%)} = [(M_3 - M_1) / (M_3 - M_2)] \times 100$$

$$\text{Su Emme (\%)} = [(M_3 - M_1) / M_1] \times 100$$

Kullanılan tam otomatik vakum altında porozite ölçüm test cihazı Şekil 6.12’de verilmiştir. Su üzerindeki askıda tartım ve numune sudan çıkarılıp, yüzeyindeki su bez ile alınarak tartım yapılan düzenek Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6.12. Porozite Ölçüm Test Cihazı



Şekil 6.13. Porozite Tartım Sehpası

### 6.2.7.3. Soğukta Basma Mukavemeti (C.C.S)

Soğukta basma mukavemeti ASTM C133’e standartına uygun şekilde yapılmıştır. Bu analiz için numuneler  $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$  boyutlarında kesilerek küp haline getirilmiştir. Yüzeyin

düzgün olması için basınç uygulanacak yüzeye taşlama işlemi yapılmıştır. Yapılan kesim ve taşlama işlemleri sulu yapıldığından numuneler 110°C’da yaklaşık olarak 2 saat sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Daha sonra analiz için cihaza yerleştirilen numuneler standartta belirtilen basınca göre(0,52 kn/sn) yük verilerek basma mukavemet değerleri elde edilmiş olur.

Bu değeri hesaplamak için;

Soğukta basma mukavemeti =  $F_{\max} / A \times 1000$  (N/mm<sup>2</sup>) formülü kullanılır.

Fmax : Numuneye uygulanan en yüksek yük (KN)

A : Yükün etkilediği yüzey alanı (mm<sup>2</sup>)

Analiz yapılan cihazda numune ölçüleri girildiği zaman cihaz otomatik sonuç verdiği için dolay üstteki formülü kullanarak hesaplamaya ihtiyaç duyulmamıştır. Kullanılan soğukta basma mukavemeti cihazı Şekil 6.14’de verilmiştir.



Şekil 6.14. Soğukta Basma Mukavemet Cihazı

#### 6.2.7.4. Pişirim Sonucunda Boyut Kontrolü

Refrakter malzemelerde pişirim sonucu az da olsa boyutsal olarak değişim meydana gelir ancak bu değişim pek istenilen bir durum değildir. Boyutsal değişim kullanılan hammaddeye, oluşturulan reçeteye, fırın sıcaklığına ve yüzey basıncı gibi farklı etkenlere bağlıdır.

İlk olarak şekillendirme sonrası tuğlaların ölçüleri ve ağırlığı alınmış yoğunluğuna bakılmıştır. Daha sonrasında pişirilen tuğlaların ölçüleri ve ağırlığı alınmış yoğunluğu kontrol edilmiştir. Şekillendirme ve pişirim sonucunda boyut konusunda ki değişim karşılaştırılmıştır.

Bu kontroller yapılırken hatayı en aza indirmek için, ölçüm yapılan kumpasla ölçüm yapan personelin aynı olmasına dikkat edilmiştir.

#### 6.2.7.5. Isıl İletkenlik Katsayısı

Isıl iletkenlik katsayısı ISO 22007-2 standartına uygun olarak yapılmıştır. Bu analiz için numuneler 50×50×20, 50×50×30, 50×50×40 mm<sup>3</sup> boyutlarında kesilerek ölçüme hazır hale getirilmiştir.

Ölçümler, Hot Disk TPS 2500 S Thermal Constants Analyzer cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, geçici düzlemsel ısı kaynağı yöntemi (Transient Plane Source, TPS) ile çalışmakta olup, yüksek hassasiyetle termal iletkenlik ve yayılma katsayılarını eş zamanlı olarak ölçebilmektedir. TPS yöntemi, özellikle heterojen yapıya sahip refrakter malzemelerde doğruluğu yüksek sonuçlar vermesiyle tercih edilmektedir. Her türlü malzemenin (katı, sıvı, toz ve macun) termal iletim özelliklerinin hassas analizi için tasarlanmıştır. Isıl iletkenlik değerleri 0,005 ile 1800 W/m/K arasındadır. Termal difüzyon hızı değerleri 0,01 ile 1200 mm<sup>2</sup>/s arasındadır. Ölçüm süresi 1 ile 1280 saniye arasındadır. Ölçüm sıcaklık aralığı -235 ile 1000°C arasındadır. Sensör olarak tüm kapton, mika, teflonlar uygundur. Kullanılan ölçüm cihazı Şekil 6.15’de verilmiştir.



Şekil 6.15. Hot Disk TPS2500S Termal İletkenlik Ölçüm Cihazı

**Kaynak:** (Hot Disk Instruments, 2025)

Ölçüm sürecinde, cihazın özel nikel sensörü iki numune arasında konumlandırılmış; sensör aynı anda hem ısı kaynağı hem de sıcaklık ölçüm aracı olarak işlev görmüştür. Numuneler oda sıcaklığında (yaklaşık 24–26°C) test edilmiş, her ölçüm için cihaz tarafından otomatik olarak belirlenen güç ve süre ayarları uygulanmıştır.

## 7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda hammadde analizi, boyutsal kontroller, yoğunluk, görünür porozite, su emme, mukavemet ve ısıl iletim katsayısı başlıklar halinde incelenmiştir

### 7.1. Kimyasal Analiz Sonuçları

**Tablo 7.1.** Deneylerde Kullanılan Hammaddenin Kimyasal Analiz Sonuçları

Tanım	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)
Analiz	0,19	0,32	1,09	9,66	88,66

Bu çalışmada kullanılan hammaddelerin kimyasal bileşimi Tablo 7.1'de sunulmuştur. Analizler, refrakter malzemenin ana bileşeninin MgO (%88,66) olduğunu göstermektedir; bu durum, malzemenin ağırlıklı olarak magnezyum oksit bazlı bileşiklerden oluştuğunu ifade etmektedir. Bu yüksek MgO içeriği, yüksek sıcaklıklara ve cüruf korozyonuna karşı mükemmel direnç sağlayarak malzemeyi aşırı termal ortamlar için uygun hale getirmektedir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği (%9,66), mekanik mukavemeti ve termal şoklara karşı direnci artıran nispeten orta düzeyde bir katkıdır. CaO içeriği (%1,09), küçük miktarda safsızlıkların veya eklenen akı maddelerinin varlığını göstermektedir; bu durum, refrakter tuğlaların sinterleme davranışı ve yoğunlaşmasını etkileyebilir. SiO<sub>2</sub> (%0,19) ve Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%0,32) seviyelerinin oldukça düşük olması avantajlıdır; çünkü aşırı miktarda silika ve demir oksit, düşük erime noktasına sahip fazlar oluşturarak refrakterin yüksek sıcaklıktaki dayanımını azaltabilir. Genel olarak, hammaddelerin kimyasal bileşimi, üretilen refrakter tuğlaların yüksek termal stabilite, cüruf penetrasyonuna karşı direnç ve yüksek sıcaklık koşulları altında mekanik mukavemet sergilemesi gerektiğini göstermektedir

### 7.2. Fiziksel Kontrol Sonuçları

Deneylerde kullanılan tuğlaların presleme sonrasında ölçü ve yoğunluk kontrolü yapılmıştır. Bu kontroller esnasında terazi ve elektronik kumpas kullanılmıştır. Ölçümler ve yoğunluklar Sörmaş datasheetlerinde belirtilen aralıkta gelmiştir. Presleme sonrası ölçü ve yoğunluk sonuçları Tablo 7.2'de verilmiştir.

**Tablo 7.2.** Kompozisyonların Preslenme Sonrası Yoğunluk Değerlerine Etkileri

Presleme Sonrası Ölçü ve Yoğunluk Kontrolü								
Basınç Değeri (kg/cm <sup>2</sup> )	Kalınlık Değeri (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (a) (mm)	Kalınlık (b) (mm)	(a+b)/2 (mm)	Ağırlık (kg)	Preslenme Sonrası Ham Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
1400	60	220,1	197,7	64,2	54,2	59,2	7740	3,00
1400	70	220,2	197,6	75,0	64,8	69,9	9130	3,01
1400	80	220,2	197,9	85,8	75,5	80,6	10600	3,02
1500	60	220,2	198,0	65,3	55,3	60,3	7950	3,02
1500	70	220,2	197,9	74,5	64,7	69,6	9150	3,02
1500	80	220,3	197,9	84,3	74,4	79,3	10400	3,01
1600	60	220,3	197,9	64,2	54,4	59,3	7830	3,07
1600	70	220,3	197,8	75,0	64,8	69,9	9220	3,03
1600	80	220,3	197,8	85,5	75,6	80,5	10630	3,03

Pişirim sonrası tekrar ölçü ve yoğunluk kontrolü yapılmıştır. Pişirim sonrası tuğlalarda oksidasyon meydana geldiğinden ölçülerde ve yoğunluklarda değişimler meydana gelmiştir. Pişirme sonrası ölçü ve yoğunluk sonuçları Tablo 7.3’de vermiştir.

**Tablo 7.3.** Kompozisyonların Pişirme Sonrası Yoğunluk Değerlerine ve Ölçü Değişimlerine Etkisi

Pişirme Sonrası Ölçü ve Yoğunluk Kontrolü								
Basınç Değeri (kg/cm <sup>2</sup> )	Kalınlık Değeri (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (a) (mm)	Kalınlık (b) (mm)	(a+b) / 2 (mm)	Ağırlık (kg)	Pişirme Sonrası Ham Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )
1400	60	219,8	197,5	64,1	54,4	59,3	7450	2,89
1400	70	219,8	197,5	75,1	64,9	70,0	8810	2,90
1400	80	219,9	197,6	85,8	75,6	80,7	10220	2,91
1500	60	219,8	197,4	65,8	55,3	60,5	7660	2,92
1500	70	219,9	197,8	74,6	64,6	69,6	8840	2,92
1500	80	219,9	197,8	84,1	74,3	79,2	10050	2,92
1600	60	220,0	197,8	64,1	54,3	59,2	7540	2,93
1600	70	220,2	197,5	75,0	64,7	69,8	8900	2,93
1600	80	219,7	197,7	85,5	75,7	80,6	10240	2,92

Daha sonra tuğlanın ham ve pişmiş olarak boyutlarında meydana gelen değişimi yüzdesel olarak değerlendirilmiştir. En ve boy yönlerinde değişim oranlarına baktığımızda, genel olarak bir negatiflik gözlemlenmektedir. Bu negatiflik ise tuğlanın küçüldüğünü yani çekme/kısalma olduğunu ifade eder. En ve boy değişimleri Tablo 7.4’de verilmiştir.

**Tablo 7.4.** Üretimi Yapılan Tuğlaların Şekillendirme ve Pişirim Sonrasındaki Boyut Değişimleri

Kalınlık Değeri (mm)	Boy (mm)			En (mm)		
	Ham Boyutlar	Pişişmiş Boyutlar	Boyut Değişimi	Ham Boyutlar	Pişişmiş Boyutlar	Boyut Değişimi
60	220,1	219,8	-0,136	197,7	197,5	-0,101
70	220,2	219,8	-0,182	197,6	197,5	-0,051
80	220,2	219,9	-0,136	197,9	197,6	-0,152
60	220,2	219,8	-0,182	198,0	197,4	-0,304
70	220,2	219,9	0,136	197,9	197,8	0,050
80	220,3	219,9	-0,182	197,9	197,8	0,050
60	220,3	220,0	-0,136	197,9	197,8	0,050
70	220,3	220,2	0,045	197,8	197,5	-0,152
80	220,3	219,7	-0,273	197,8	197,7	-0,051

$$\text{Boyut Değişimi} = \frac{\text{Pişişmiş Boyut} - \text{Ham Boyut}}{\text{Pişişmiş Boyut}} \times 100 \text{ formülüyle bulunur.}$$

Arge bölümünde pişirim sonrası tuğlaların hacim ağırlık, görünür porozite, su emme, mukavemet analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Tablo 7.5’de verilmiştir.

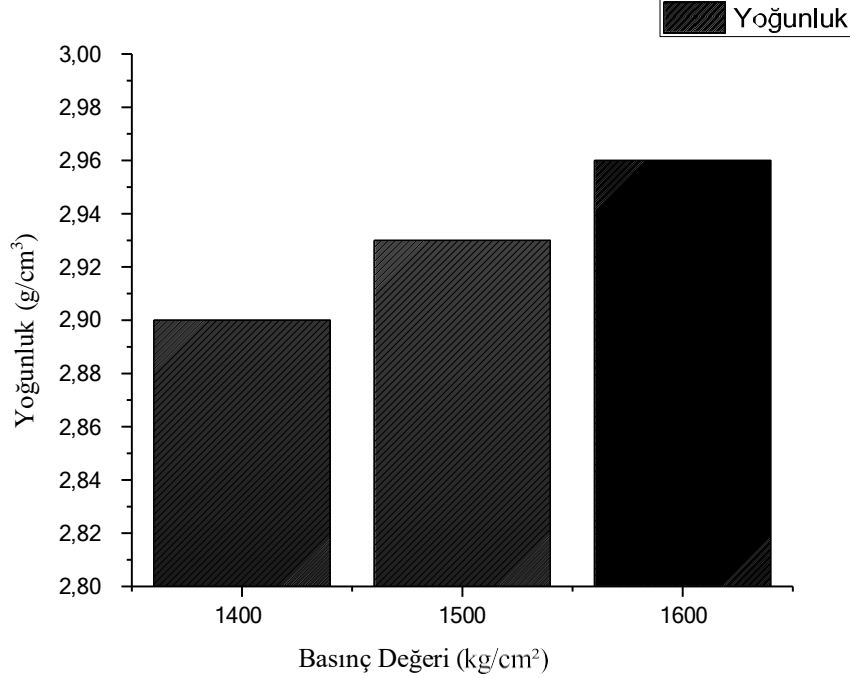
**Tablo 7.5.** Üretimi Yapılan Tuğlaların Pişirim Sonrasındaki Hacim Ağırlık, Görünür Porozite, Su Emme, Mukavemet Analiz Değerleri

Deney No	Basınç Değeri (kg/cm <sup>2</sup> )	Kalınlık Değeri (mm)	Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Görünür Porozite (%)	Su Emme (%)	Mukavemet (N/mm <sup>2</sup> )
1	1400	60	2,89	17,02	5,89	79,58
2	1400	70	2,90	16,58	5,71	79,97
3	1400	80	2,96	15,01	5,07	78,05
4	1500	60	2,95	15,06	5,10	80,74
5	1500	70	2,93	15,82	5,40	78,05
6	1500	80	2,90	16,69	5,75	75,74
7	1600	60	2,91	16,28	5,59	78,82
8	1600	70	2,96	14,88	5,03	88,04
9	1600	80	2,93	15,64	5,33	81,89

Şekil 7.1, 70 mm kalınlığındaki refrakter tuğlalar için farklı presleme basınçlarının yoğunluk üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, presleme basıncı ile tuğlaların yoğunluğu arasında net bir pozitif korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınçta yoğunluk 2,90 g/cm<sup>3</sup>tür. 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınçta yoğunluk 2,93 g/cm<sup>3</sup>e yükselmektedir. En yüksek basınç olan 1600 kg/cm<sup>2</sup>’de yoğunluk 2,96 g/cm<sup>3</sup>e kadar artmaktadır. Bu eğilim, üretim sırasında presleme basıncının artırılmasının malzemenin sıkışmasını artırdığını, poroziteyi azalttığını ve yoğunluğu yükselttiğini göstermektedir. Daha yüksek presleme basıncıyla yoğunluktaki artış, refrakter malzemelerin beklenen davranışlarıyla (mekanik mukavemet, termal iletkenlik ve cüruf ile gaz nüfuzuna karşı

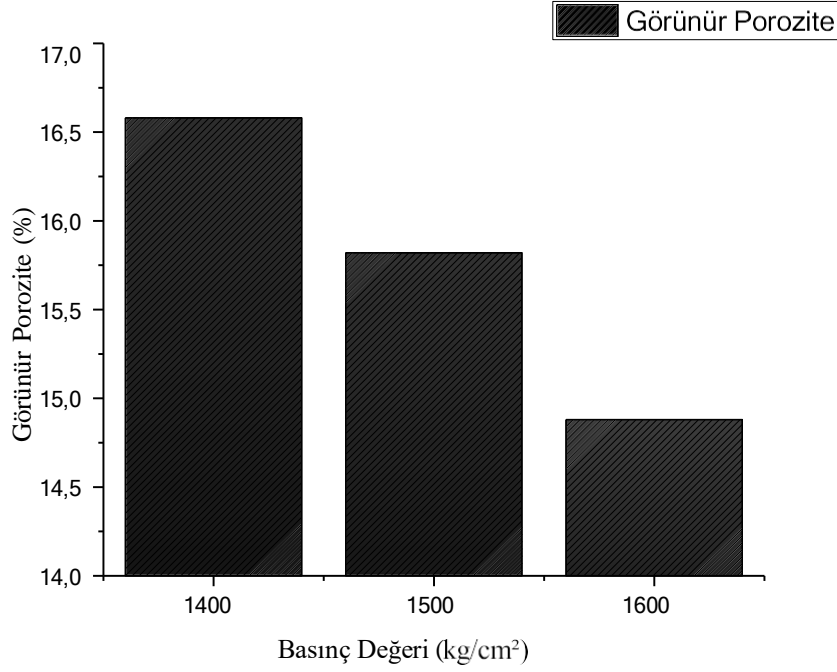
dirençle) uyumludur.

Sonuç olarak, üretim sırasında presleme basıncının artırılması, refrakter tuğlaların yoğunluğunu artırarak malzemenin sıkışmasını ve performansını iyileştirmektedir. Ancak, diğer özelliklerin korunması açısından basınç seviyesi dikkatle optimize edilmelidir.



**Şekil 7.1.**Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri için yoğunluk değişimi

Şekil 7.2, 70 mm kalınlığındaki refrakter tuğlalar için farklı presleme basınçlarının görünür porozite üzerindeki etkisini göstermektedir. Veriler, presleme basıncı arttıkça görünür porozitenin azaldığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınçta görünür porozite %16,58'dir. 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınçta, porozite %15,82'ye düşmektedir. En yüksek basınç olan 1600 kg/cm<sup>2</sup>'de, porozite %14,88'e kadar azalmaktadır. Bu durum, presleme basıncının artırılmasının refrakter tuğlalardaki porozite miktarını azalttığını ve bunun muhtemelen partikül paketlemesinin iyileşmesi ve boşluk alanlarının azalmasından kaynaklandığını göstermektedir. Azalan porozite, termal iletkenliği artırır çünkü ısı akışını engelleyen hava ceplerinin sayısı azalır. Bu durum, malzemeyi etkili ısı transferi gerektiren uygulamalar için daha uygun hale getirir. Aynı zamanda düşük porozite, cüruf ve sıvı nüfuz etme potansiyelini azaltır, bu da refrakter malzemenin zorlu ortamlardaki hizmet ömrünü uzatır.

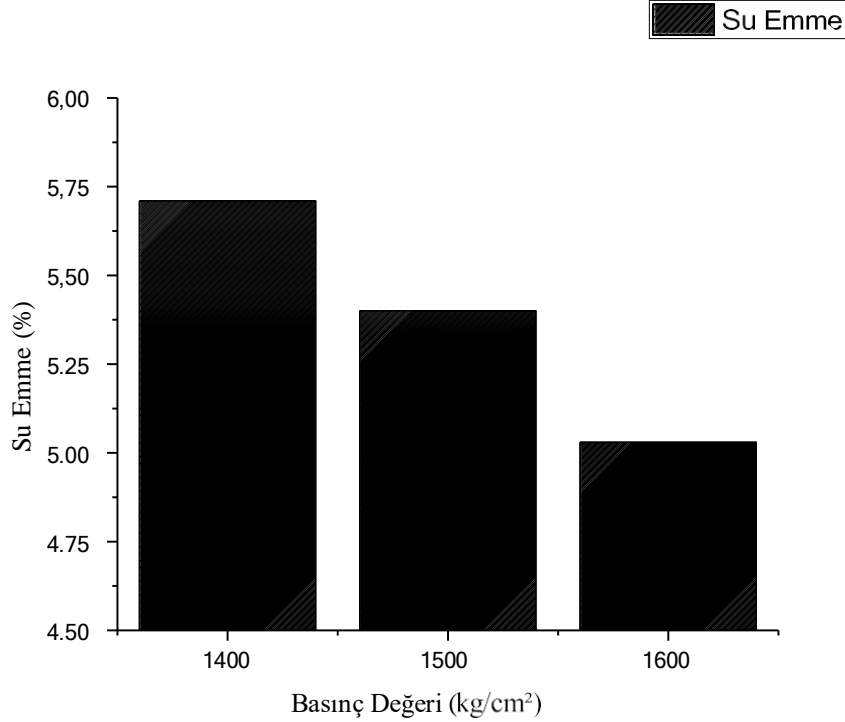


**Şekil 7.2.** Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri için porozite değişimi

Şekil 7.3, 70 mm kalınlığındaki refrakter tuğlalar için farklı presleme basınçlarının su emme yüzdesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, presleme basıncı arttıkça su emme oranının azaldığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınçta, su emme oranı %5,71'dir. 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınçta, su emme oranı %5,40'a düşmektedir. En yüksek basınç olan 1600 kg/cm<sup>2</sup>'de, su emme oranı %5,03'e kadar azalmaktadır. En düşük basınçtan en yüksek basınca doğru görünür porozitenin yüzde 11,3 oranında azaldığı görülmektedir. Bu eğilim, daha yüksek presleme basınçlarının malzemenin su emme yeteneğini azalttığını ve bunun muhtemelen porozitenin azalmasından kaynaklandığını göstermektedir. Presleme basıncı arttıkça partikül paketlenmesi sıkılaşır ve porozite azalır. Bu durum, önceki analizlerde gözlemlenen görünür porozite azalması ile doğrulanmaktadır. Daha düşük su emme oranı, refrakter malzemeler için avantajlıdır; çünkü bu, kullanım sırasında suyun buharlaşmasıyla oluşabilecek termal şok nedeniyle çatlama riskini azaltır. Azaltılmış porozite, ayrıca, malzemenin cüruf ve erimiş materyallerin nüfuz etmesine karşı direncini artırır ve yüksek sıcaklık ortamlarındaki ömrünü uzatır. Su emme eğilimi, görünür porozite eğilimiyle yakından örtüşmektedir ve her ikisinin de presleme aşamasında elde edilen sıkışma derecesinden etkilendiğini doğrulamaktadır. Örneğin, 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınçta porozite %16,58'dir ve bu, en yüksek su emme değeri olan %5,71 ile örtüşmektedir. Daha yüksek presleme basınçları su emme oranını azaltırken, veriler, 1600 kg/cm<sup>2</sup>'de soğukta basma mukavemetindeki hafif düşüşte görüldüğü gibi, presleme basıncı ile diğer mekanik özellikler arasında bir denge olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, 1500 kg/cm<sup>2</sup> presleme basıncı, su emme oranını

azaltırken iyi mekanik mukavemeti koruma açısından en dengeli değer olarak görünmektedir.

Sonuç olarak, presleme basıncının artırılması, malzemeyi yoğunlaştırarak ve boşlukları en aza indirerek su emme yüzdesini etkili bir şekilde azaltmaktadır. Bu sonuçlar, refrakter tuğlalar için su direnci, porozite ve mekanik performans arasında istenen dengeyi sağlamak için presleme parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.



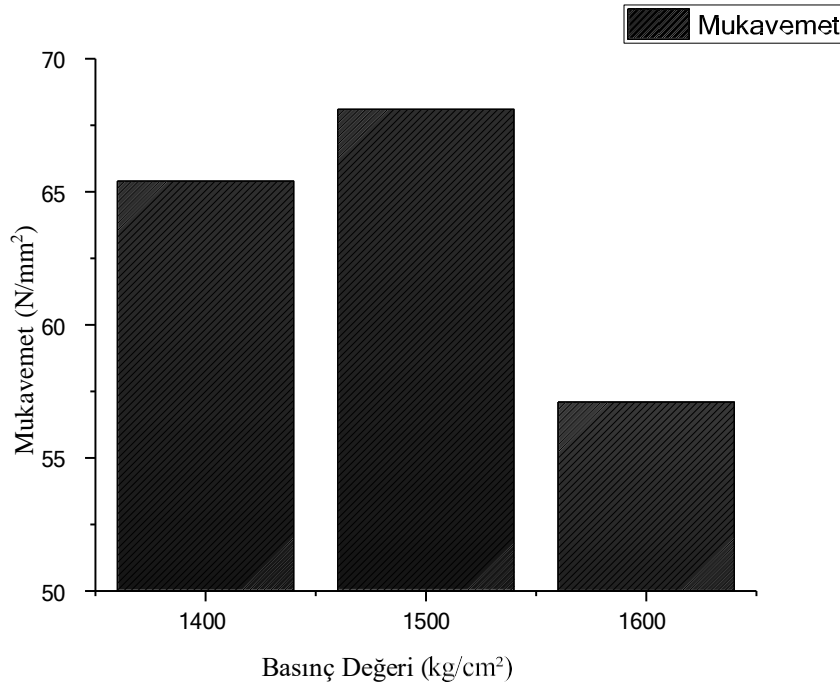
**Şekil 7.3.** Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri için su emme yüzdesinin değişimi

Şekil 7.4, 70 mm kalınlığındaki refrakter tuğlalar için presleme basıncı ile soğukta basma mukavemeti arasındaki ilişkiyi göstermektedir. 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınçta, soğukta basma mukavemeti 65,4 N/mm<sup>2</sup>'dir. 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınçta, mukavemet en yüksek değeri olan 68,1 N/mm<sup>2</sup>'ye ulaşmaktadır. En yüksek basınç olan 1600 kg/cm<sup>2</sup>'de, mukavemet 57,1 N/mm<sup>2</sup>'ye düşmektedir.

Bu eğilim, soğukta basma mukavemetinin başlangıçta artan basınçla birlikte arttığını, ancak aşırı presleme basınçlarında azalmaya başladığını göstermektedir. Gözlemlenen bu eğilim, sıkışma ile presleme işlemi sırasında oluşan potansiyel iç stresler veya kusurlar arasındaki etkileşime bağlanabilir. 1400 kg/cm<sup>2</sup> ile 1500 kg/cm<sup>2</sup> arasındaki basınçlarda, partikül sıkışmasının iyileşmesi ve porozitenin azalması nedeniyle mukavemet artmaktadır. Bu yoğunlaşma, refrakter malzemenin yapısal bütünlüğünü artırarak uygulanan kuvvetlere karşı daha büyük bir direnç sağlamaktadır. 1600 kg/cm<sup>2</sup> basınçta, daha yüksek

yoğunluğa rağmen mukavemet azalmaktadır. Bu durum, aşırı sıkışmadan kaynaklanan mikro çatlakların veya iç streslerin oluşumu ile açıklanabilir. Bu kusurlar, malzemenin basma kuvvetlerine dayanma yeteneğini azaltarak, yüksek yoğunluğun faydalarını ortadan kaldırmaktadır. En yüksek mukavemet, 1500 kg/cm<sup>2</sup>'de elde edilmektedir. Bu, bu basıncın sıkışma ve iç kusurların önlenmesi arasında en iyi dengeyi sağladığını göstermektedir. Bu basınç, en düşük porozite değerine (%15,82) ulaşırken yüksek mekanik performansı korumaktadır. Yüksek soğukta basma mukavemetine sahip refrakter tuğlalar, yüksek sıcaklık ortamlarında kritik öneme sahiptir; çünkü bu tuğlalar mekanik yükleri ve stresleri karşılamak zorundadır. Ancak, aşırı presleme basıncı, mukavemeti azaltabileceği ve üretim maliyetlerini artırabileceği için kaçınılmalıdır.

Sonuç olarak, veriler presleme basıncının refrakter tuğlaların mekanik performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Daha yüksek basınçlar yoğunlaşmayı artırsa da, malzemenin mukavemetinin bozulmaya başladığı kritik bir eşik vardır. Bu çalışma için, 1500 kg/cm<sup>2</sup>, mukavemeti maksimize ederken diğer özelliklerin iyi bir dengede tutulduğu optimal presleme basıncı olarak belirlenmiştir.



**Şekil 7.4.** Refrakter kalınlığı 70 mm ve farklı basınç değerleri mukavemet değerinin değişimi

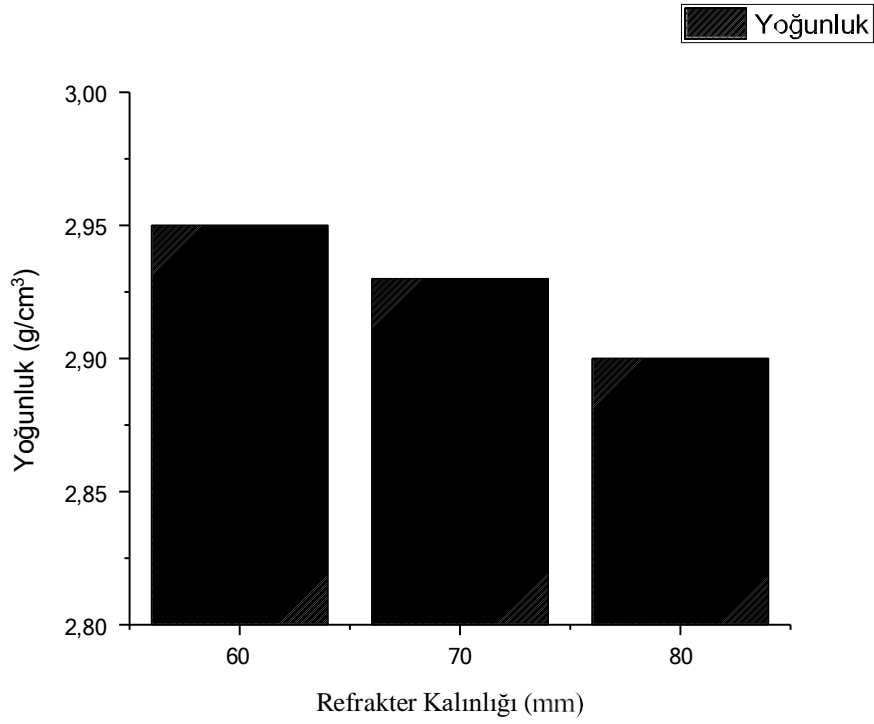
Şekil 7.5, 1500 kg/cm<sup>2</sup> sabit presleme basıncında farklı refrakter tuğla kalınlıklarının yoğunluk üzerindeki etkisini göstermektedir. Sonuçlar, kalınlık arttıkça yoğunlukta hafif bir azalma olduğunu ortaya koymaktadır. 60 mm kalınlıkta yoğunluk 2,95 g/cm<sup>3</sup>'tür. 70 mm

kalınlıkta yoğunluk, hafif bir düşüfle 2,93 g/cm<sup>3</sup>'e inmektedir. 80 mm kalınlıkta ise yoğunluk, 2,90 g/cm<sup>3</sup>'e kadar azalmaktadır. Bu durum, tuğla kalınlığı arttıkça yoğunlukta küçük ama tutarlı bir azalma olduğunu göstermektedir.

Refrakter kalınlığı arttıkça yoğunlukta gözlemlenen azalma, presleme süreci ve malzeme davranışı ile ilgili çeşitli faktörlere bağlanabilir. Refrakterin kalınlığı arttıkça, homojen bir basınç sağlanması daha zor hale geldiğinden sıkıştırma verimliliği hafifçe azalabilir. Daha büyük bir kalınlıkta basıncın eşit şekilde dağıtılması daha zorlu olabilir ve bu durum, partiküllerin daha az etkili bir şekilde sıkışmasına neden olabilir. Daha kalın numunelerde hafif bir porozite artışı da görülebilir; bu, tablo verilerinde gözlemlenen görünür porozite ve su emme oranındaki artışlarla da desteklenmektedir. Örneğin; Porozite, 60 mm kalınlıktaki tuğlalar için %15,06'dan, 80 mm kalınlıktaki tuğlalar için %16,69'a yükselmektedir. Su emme oranı ise aynı aralıkta %5,1'den %5,75'e çıkmaktadır.

Yoğunluk farkları nispeten küçük olsa da, bu durum yine de tuğlaların mekanik ve termal özelliklerini etkileyebilir. Daha yüksek yoğunluk, genellikle daha iyi mukavemet ve daha düşük porozite ile ilişkilidir; bu da yüksek performanslı refrakter uygulamaları için kritik öneme sahiptir. Veriler, daha ince tuğlaların (örneğin, 60 mm) aynı presleme basıncı altında daha iyi yoğunluk ve daha düşük porozite elde ettiğini göstermektedir. Bununla birlikte, farklı kalınlıkların uygunluğu, termal direnç ve mekanik yükleme koşulları gibi belirli uygulama gereksinimlerine de bağlıdır.

Sonuç olarak, refrakter tuğla kalınlığının sabit bir presleme basıncı altında artırılması, yoğunlukta hafif bir azalmaya ve buna bağlı olarak porozitede bir artışa yol açmaktadır. Bu bulgular, yoğunluk, porozite ve genel performans arasında bir denge sağlamak için kalınlık ve presleme parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.

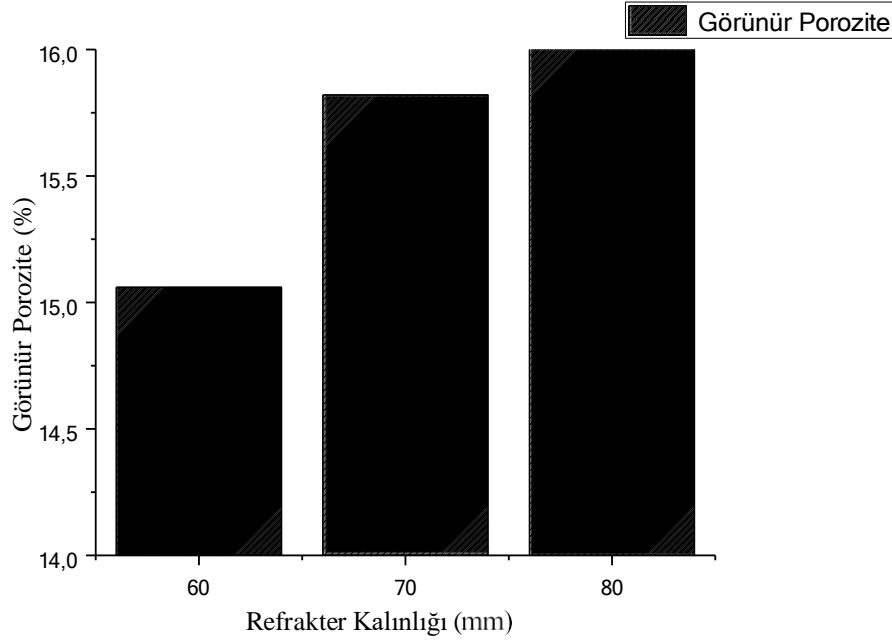


**Şekil 7.5.** 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için yoğunluğun değişimi

Şekil 7.6, 1500 kg/cm<sup>2</sup> sabit presleme basıncında refrakter tuğla kalınlığı ile görünür porozite arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sonuçlar, kalınlık arttıkça görünür porozitenin de artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. 60 mm kalınlık için görünür porozite %15,06'dır. 70 mm kalınlık için görünür porozite %15,82'ye yükselmektedir. 80 mm kalınlık için ise görünür porozite %16,69'a kadar çıkmaktadır. Bu eğilim, daha kalın tuğlaların aynı presleme basıncı altında daha yüksek poroziteye sahip olma eğiliminde olduğunu göstermektedir. Tuğla kalınlığı ile görünür porozitedeki artış, presleme sırasında daha kalın malzemelerin homojen şekilde sıkıştırılmasındaki zorluklarla açıklanabilir. Tuğla kalınlığı arttıkça, presleme işlemi sırasında uygulanan basınç tüm hacme eşit şekilde dağıtılamamaktadır. Bu durum, tam bir yoğunlaşmanın sağlanamamasına ve daha kalın numunelerde daha fazla boşluğun oluşmasına neden olmaktadır. Daha yüksek porozite, genellikle azalmış mekanik mukavemet ve artan su emme oranı ile ilişkilidir. Bu durum, su emme oranının daha kalın tuğlalarda porozite ile birlikte artış gösterdiğini ortaya koyan verilerle uyumludur (örneğin, 60 mm kalınlıkta %5,1'den, 80 mm kalınlıkta %5,75'e yükselmiştir). Yükselen porozite, refrakter tuğlaların ısı iletkenliğini ve cüruf direncini azaltabilir; bu da yüksek sıcaklıklı endüstriyel ortamlardaki performanslarını sınırlayabilir. Ancak bazı durumlarda daha yüksek porozite, termal şok direncini artırabilir; çünkü boşluklar, hızlı sıcaklık değişiklikleri sırasında stres azaltıcı bölgeler olarak işlev görebilir. Daha düşük porozite gerektiren uygulamalar için, 60 mm gibi daha ince tuğlalar, aynı presleme basıncı altında daha iyi yoğunlaşma sağladıkları için daha uygundur. Kalınlık seçimi, termal iletkenlik, mekanik mukavemet veya termal şok direnci

gibi uygulamaya özgü gereksinimlere bağlı olmalıdır.

Sonuç olarak, veriler, refrakter tuğla kalınlığının sabit bir presleme basıncı altında artmasının daha yüksek poroziteye yol açtığını ve bunun mekanik ve termal özelliklerini etkileyebileceğini göstermektedir. Presleme sürecinin optimize edilmesi veya kalınlığın uygulama gereksinimlerine göre ayarlanması, istenen özelliklerin dengeli bir şekilde elde edilmesine yardımcı olabilir.

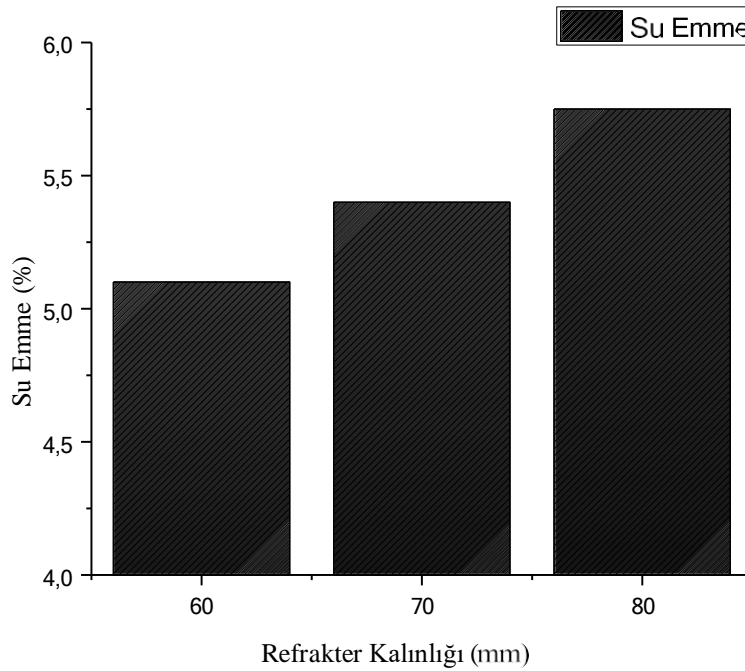


**Şekil 7.6.** 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için porozite değişimi

Şekil 7.7, 1500 kg/cm<sup>2</sup> sabit presleme basıncında farklı refrakter tuğla kalınlıkları için su emme yüzdesindeki değişimi göstermektedir. Sonuçlar, tuğla kalınlığı arttıkça su emme oranında bir artış eğilimi olduğunu göstermektedir. 60 mm kalınlık için su emme oranı %5,1'dir. 70 mm kalınlık için su emme oranı %5,4'e yükselmektedir. 80 mm kalınlık için ise su emme oranı %5,75'e ulaşmaktadır. En düşük kalınlıktan en yüksek kalınlığa doğru görünür porozitenin yüzde 11,3 oranında arttığı görülmektedir. Bu durum, daha kalın tuğlaların aynı presleme koşulları altında suyu emmeye daha yatkın olduğunu göstermektedir. Tuğla kalınlığı ile su emme oranındaki artış, gözlemlenen görünür porozite artışı ile uyumludur; çünkü su emme oranı, doğrudan malzemenin porozitesinden etkilenmektedir. Su emme oranı, porozite artışı ile paralel olarak artmaktadır; bu oran, 60 mm kalınlıktaki tuğlalar için %15,06'dan, 80 mm kalınlıktaki tuğlalar için %16,69'a yükselmektedir. Bu durum, daha kalın tuğlaların, suyun daha fazla nüfuz etmesine olanak tanıyan daha fazla bağlantılı boşluğa sahip olduğunu göstermektedir. Porozite analizinde de belirtildiği gibi, daha kalın tuğlalarda azalan

sıkıştırma verimliliği, muhtemelen bu eğilime katkıda bulunmaktadır. Daha kalın örneklerde, basıncın homojen bir şekilde dağıtılması daha zordur, bu da partiküllerin daha az etkili bir şekilde sıkışmasına ve daha fazla boşluk içeriğine yol açmaktadır. Daha yüksek su emme oranı, özellikle termal şok direncinin kritik olduğu uygulamalarda refrakter tuğlaların performansını olumsuz etkileyebilir. Aşırı nem, hızlı ısınma ve buharlaşma sırasında çatlamaya neden olabilir. Daha kalın tuğlalardaki su emme oranını en aza indirmek için presleme sürecinde ayarlamalar yapılması gerekebilir; örneğin, presleme basıncının artırılması veya yoğunluğu artırmak için çok aşamalı presleme tekniklerinin uygulanması düşünülebilir. Alternatif olarak, tuğla kalınlığının azaltılması, doğal olarak daha düşük su emme oranı ve poroziteye yol açabilir.

Sonuç olarak, veriler, refrakter tuğlaların kalınlığı arttıkça su emme oranının porozite artışı nedeniyle arttığını göstermektedir. Üretim sürecinin optimize edilmesi veya uygulama gereksinimlerine bağlı olarak uygun kalınlıkların seçilmesi, malzeme performansını iyileştirmeye yardımcı olabilir.



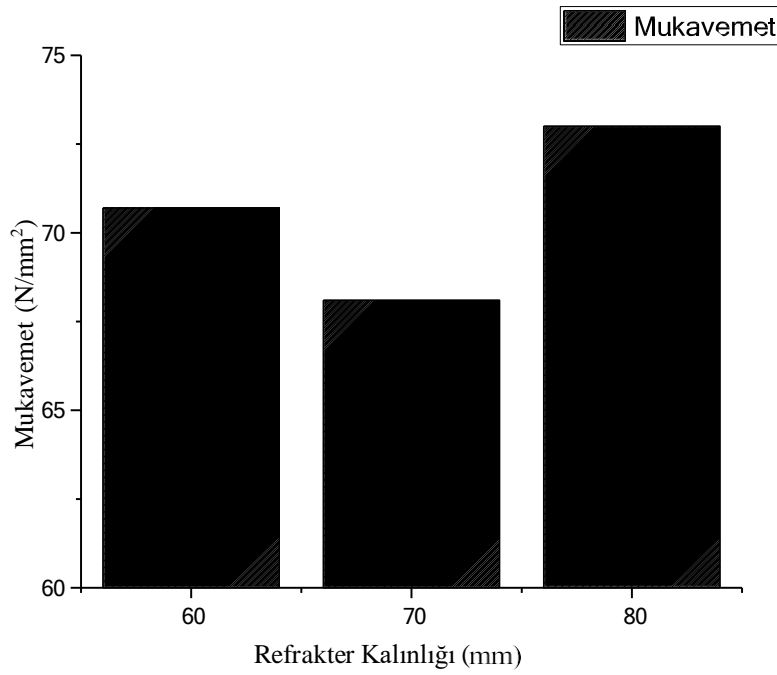
**Şekil 7.7.** 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için su emme yüzdesi değişimi

Şekil 7.8 ve ilgili tablo, 1500 kg/cm<sup>2</sup> sabit presleme basıncında refrakter tuğla kalınlığı ile soğukta basma mukavemeti (mekanik mukavemet) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Sonuçlar doğrusal olmayan bir eğilim ortaya koymaktadır. 60 mm kalınlık için mukavemet 70,7 N/mm<sup>2</sup>'dir. 70 mm kalınlık için mukavemet 68,1 N/mm<sup>2</sup>'ye düşmektedir. 80 mm kalınlık için mukavemet, 73,0 N/mm<sup>2</sup>'ye yükselmektedir. Bu eğilim, kalınlık değişikçe

mekanik mukavemetteki farklılıkları vurgulamaktadır.

Refrakter tuğlaların mekanik mukavemeti, hem yoğunluk hem de iç poroziteden etkilenmektedir. Gözlemlenen doğrusal olmayan eğilim, birkaç faktörün birleşimiyle açıklanabilir. 60 mm kalınlıkta, tuğlalar daha iyi sıkıştırma ve görece düşük porozite (%15,06) nedeniyle yüksek mukavemet göstermektedir. 70 mm kalınlıkta, porozitenin artması (%15,82) ve yoğunluğun azalması ( $2,93 \text{ g/cm}^3$ ) nedeniyle mukavemet hafifçe azalmaktadır. Bu durum, malzemenin iç yapısını zayıflatmaktadır. 80 mm kalınlıkta, daha yüksek porozite (%16,69) ve daha düşük yoğunluk ( $2,90 \text{ g/cm}^3$ ) olmasına rağmen, mukavemet  $73,0 \text{ N/mm}^2$ 'ye yükselmektedir. Bu, daha kalın numunelerde daha iyi stres dağılımı veya pişirme sürecinde daha güçlü partikül bağlarının gelişimi gibi iç yapısal faktörlerden kaynaklanıyor olabilir. Genel olarak, daha yüksek porozite düşük mukavemetle ilişkilendirilir; ancak, 80 mm kalınlıkta mukavemetteki artış, diğer mikro yapısal faktörlerin baskın olabileceğini göstermektedir. Bu anomali, mikro yapının ve tuğlaların kırılma davranışlarının incelenmesi gibi daha ileri analizleri gerektirmektedir. Daha yüksek mekanik mukavemete sahip refrakter tuğlalar, yüksek mekanik yüklerin bulunduğu uygulamalarda daha uygundur. Örneğin, 80 mm kalınlıktaki tuğlalar, daha yüksek poroziteye rağmen, önemli basma streslerinin bulunduğu ortamlarda daha iyi performans gösterebilir. Bununla birlikte, 80 mm kalınlıktaki tuğlalar en yüksek mukavemeti gösterirken, 60 mm kalınlıktaki tuğlaların biraz daha düşük mukavemeti, daha düşük porozite ve su emme oranı ile telafi edilmektedir. Bu durum, cüruf direncinin ve düşük ısı iletkenliğinin kritik olduğu ortamlarda 60 mm kalınlıktaki tuğlaların daha uygun olabileceğini göstermektedir.

Sonuç olarak, refrakter tuğlaların soğukta basma mukavemeti, kalınlıkla birlikte değişmekte ve yoğunluk, porozite ve potansiyel mikro yapısal faktörlerden etkilenerek doğrusal olmayan bir ilişki göstermektedir. Termal şok direnci ve mikro yapı çalışmaları gibi daha ileri analizler, tuğla kalınlığı ile mukavemet değişimleri hakkında daha derin içgörüler sağlayabilir.



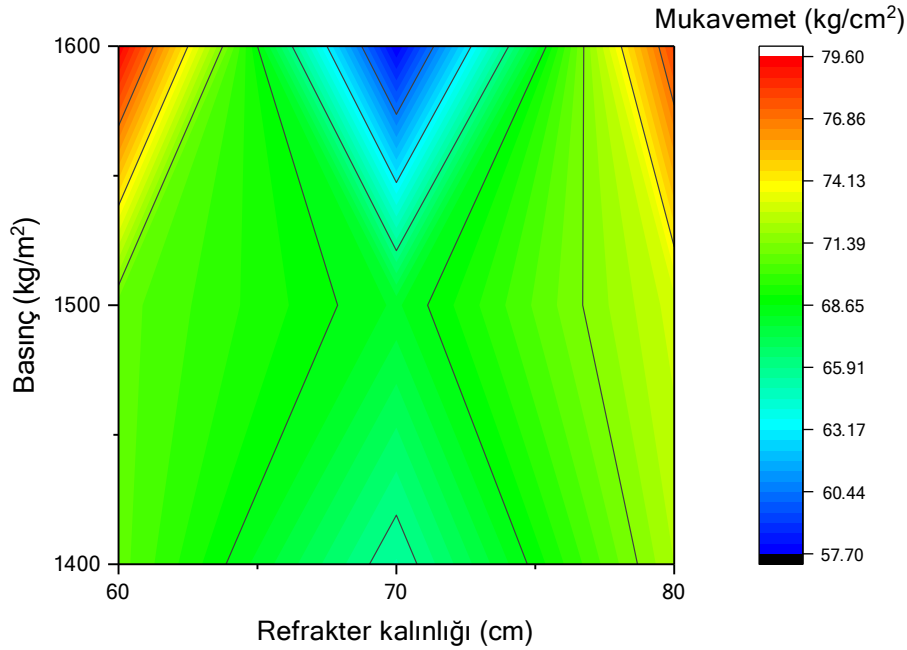
**Şekil 7.8.** 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınç ve farklı refrakter kalınlıkları için mukavemet değerinin değişimi

Şekil 7.9, presleme basınçlarındaki ve refrakter tuğla kalınlıklarındaki değişimin, refrakter tuğlaların mekanik mukavemeti (soğukta basma mukavemeti) üzerindeki etkisini göstermektedir. Mukavemet, 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınçta sırasıyla 60, 70 ve 80 mm kalınlıklar için 70,7, 65,4 ve 72,3 N/mm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür. 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınçta mukavemet, sırasıyla 60, 70 ve 80 mm kalınlıklar için 70,7, 68,1 ve 73,0 N/mm<sup>2</sup> değerindedir. 1600 kg/cm<sup>2</sup> basınçta mukavemet, sırasıyla 60, 70 ve 80 mm kalınlıklar için 66,4, 57,7 ve 78,0 N/mm<sup>2</sup> olarak tespit edilmiştir.

Veriler, mekanik mukavemetin presleme basıncı ve tuğla kalınlığına bağlı olarak doğrusal olmayan bir davranış sergilediğini göstermektedir. Presleme basıncı ve refrakter kalınlıkları arasındaki etkileşim, soğukta basma mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha düşük basınçlarda (1400 kg/cm<sup>2</sup>), mukavemet genellikle daha kalın örneklerde artış göstermiştir, çünkü daha az yoğun kuvvetler altında daha kalın numunelerde daha iyi sıkıştırma sağlanmıştır. Orta basınçlarda (1500 kg/cm<sup>2</sup>), mukavemet eğilimleri dengelenmiş ve sıkıştırma ile porozite azaltımı arasında optimal bir denge sağlanmıştır. Yüksek basınçlarda (1600 kg/cm<sup>2</sup>), daha ince örnekler aşırı kuvvetten kaynaklanan mikro çatlakların oluşumu nedeniyle mukavemette azalma göstermiştir, buna karşın daha kalın örnekler daha fazla sıkışma ile artan mukavemet sergilemiştir. Daha ince örnekler (60 mm), basınçlar arasında nispeten tutarlı mukavemet göstermiş, ancak yüksek basınçlarda biraz daha az dayanıklı olmuştur. Daha kalın örnekler (80 mm), porozite ve boşluk sınırlamalarını aşan daha

iyi yoğunlaşma nedeniyle yüksek basınçlarda daha iyi mukavemet göstermiştir. Mekanik mukavemet ne basınçla ne de kalınlıkla doğrusal bir şekilde artmamaktadır. Yüksek basınçlarda, daha ince örneklerde mukavemet azalması, aşırı sıkışmadan kaynaklanan stres yoğunlukları ve mikro yapısal hasarlardan kaynaklanmaktadır. Ancak, daha kalın örnekler bu etkilere daha iyi direnç göstererek 1600 kg/cm<sup>2</sup>'de artan mukavemet sergilemiştir. Yüksek mekanik mukavemet gerektiren uygulamalar için en uygun kombinasyonun, mukavemetin 78 N/mm<sup>2</sup>'ye ulaştığı 1600 kg/cm<sup>2</sup> basınç ve 80 mm kalınlık olduğu görülmüştür. Maliyet etkin ve çok yönlü bir performans için 1500 kg/cm<sup>2</sup> basınç ve 80 mm kalınlık, sıkıştırma verimliliği, düşük porozite ve yüksek mukavemet arasında bir denge sağlamaktadır.

Refrakter tuğlaların mekanik mukavemeti, presleme basıncı ve kalınlık arasındaki etkileşimden etkilenmektedir. Daha yüksek basınçlar ve daha kalın tuğlalar genellikle artan mukavemetle sonuçlanırken, daha ince tuğlalarda aşırı sıkışma zayıflıklara yol açabilir. Bu bulgular, üretim sürecinin belirli uygulama gereksinimlerine uygun hale getirilmesinin optimal performansı sağlamak için önemini vurgulamaktadır.



**Şekil 7.9.** Farklı basınç ve refrakter kalınlıkları için mukavemetin değişimi

### 7.3. Isıl İletim Katsayısı Analiz Sonuçları

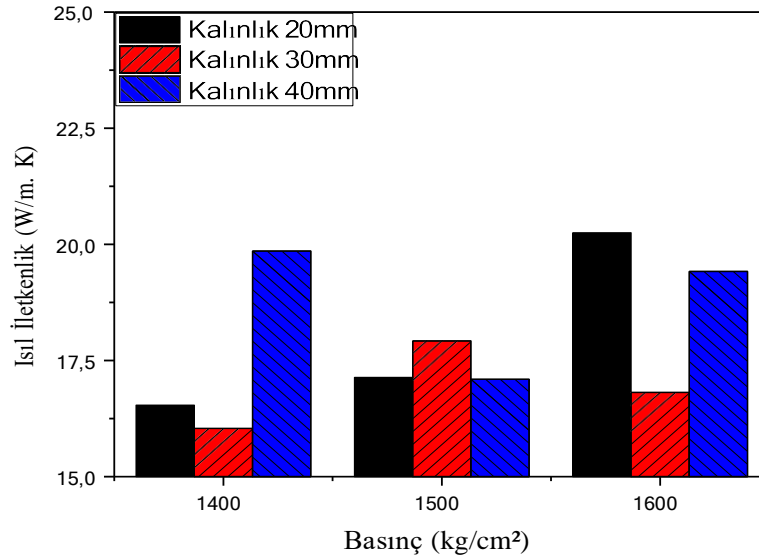
Isıl iletim katsayısının ölçümü sonrası iletkenlik ve yayılma değerleri Tablo 7.6 'da, farklı kalınlık ve basınca göre ısı iletim katsayısı için oluşturulan şekilde Şekil 7.10'da verilmiştir.

**Tablo 7.6.** Farklı basınç ve Farklı kalınlıkta üretimi yapılan refrakterin Isıl iletkenlik ve yayılma analiz değerleri

Basınç (kg/cm <sup>2</sup> )	Kalınlık (mm)	Sıcaklık (°C)	Sıcaklık Direnç Katsayısı (K <sup>-1</sup> )	Isıl İletkenlik (W/(m. K))	Isıl Yayılma (m <sup>2</sup> /sn)
1400	20	24,6	0,004666	16,538	0,22
1400	30	24,5	0,004669	16,037	0,19
1400	40	25,5	0,004662	19,855	0,28
1500	20	25,0	0,004665	17,136	0,21
1500	30	24,8	0,004666	17,922	0,28
1500	40	24,7	0,004667	17,097	0,24
1600	20	25,6	0,004661	20,250	0,57
1600	30	25,1	0,004664	16,813	0,23
1600	40	24,9	0,004666	19,417	0,35

Basınç arttıkça ısıl iletkenlik genel olarak artma eğilimindedir. Malzeme daha sıkışır, boşluklar azalır, ısı daha kolay iletilir.

Kalınlık arttıkça iletkenlik net bir artış veya azalış göstermiyor. Bazı durumlarda artıyor, bazen düşüyor. Bu da kalınlığın tek başına etkili olmadığını, basınç ve sıcaklık gibi diğer faktörlerle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini gösterir.



**Şekil 7.10.** Farklı kalınlıktaki manyezit tuğlaların değişen sıkıştırma basınçları altında ısıl iletkenlik değerleri

Isıl iletkenlik, bir malzemenin birim zamanda birim alan başına ne kadar ısı transfer ettiğini gösteren kritik bir termodinamik parametredir. Şekil 7.10'da görüldüğü gibi, deneysel sonuçlara göre, basınç arttıkça ısıl iletkenlik değerlerinin genel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek basınç altında oluşturulan numunelerde taneler arası temas alanlarının artması ve porozitenin azalması ile açıklanabilir. Gözenekler genellikle hava ile dolu olduğu

için ısı iletkenlik oldukça düşüktür. Dolayısıyla gözenek oranındaki azalma malzemedeki toplam ısı transfer yollarının verimliliğini artırmakta ve ısı iletimini kolaylaştırmaktadır. Örneğin 1600 kg/cm<sup>2</sup> basınca ve 20 mm kalınlığa sahip numune en yüksek iletkenlik değerine (20,25 W/m.K) ulaşmıştır. Bu değer, düşük kalınlıkla birlikte yüksek yoğunluğun etkisinin bir sonucudur. Buna karşılık, 1400 kg/cm<sup>2</sup> ve 30 mm kalınlığa sahip numune en düşük iletkenlik değerini (16,037 W/m.K) ölçmüştür. Bu, düşük presleme basıncı ve orta kalınlık kombinasyonunun malzeme içinde daha fazla mikro gözenek ve temas eksikliği yarattığını göstermektedir. Kalınlık parametresi, basınca kıyasla termal iletkenlik üzerinde daha sınırlı bir etkiye sahiptir. Bu durum, termal iletkenliğin malzemenin kimyasal ve fiziksel özelliklerine (gözeneklilik, tane yoğunluğu, bağlayıcı fazlar) daha duyarlı olduğunu göstermektedir. Yoğun ve kompakt refrakterlerde mikro gözeneklerin ve bağlayıcı fazların azaltılması, ısı taşıyıcı yolların sürekliliğini artırarak iletkenliği doğrudan artırır.

## 8. SONUÇLAR

Bu çalışma, magnezyum oksit bazlı refrakter tuğlaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki presleme basıncı ve tuğla kalınlığının etkilerini araştırmıştır. Aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Presleme basıncı arttıkça yoğunluk artmış ve tuğlaların görünür porozitesi azalmıştır. Ancak, aşırı presleme basınçları (ör. 1600 kg/cm<sup>2</sup>), özellikle daha ince örneklerde, verim kaybına ve potansiyel mikro yapısal hasara neden olmuştur. Daha kalın tuğlalar, aynı presleme koşullarında daha yüksek porozite ve daha düşük yoğunluk göstermiştir; bu durum, büyük hacimlerde homojen sıkıştırma sağlanmasındaki zorluklardan kaynaklanmaktadır.

Hacim ağırlığı(yoğunluk) farklı basınçlarda ve farklı kalınlıklarda birbirine yakın değerler olduğu için bir sorun teşkil etmediği görülmüştür. Genel olarak analizlerde değerlerin 2,89-2,96 g/cm<sup>3</sup> aralığında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin de ideal hacim değerleri arasında olduğundan sorun yok demektir.

Porozitenin farklı basınçlarda ve farklı kalınlıklarda birbirine yakın değerler olduğu için bir sorun teşkil etmediği görülmüştür. Genel olarak analizlerde değerlerin % olarak 14,88-17,02 aralığında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin de ideal porozite değerleri arasında olduğundan sorun yok demektir.

Su emme değerinin farklı basınçlarda ve farklı kalınlıklarda birbirine yakın değerler olduğu için bir sorun teşkil etmediği görülmüştür. Genel olarak analizlerde değerlerin 5,03-5,89 N/mm<sup>2</sup> aralığında olduğu görülmüştür. Bu değerlerin de ideal su emme değerleri arasında olduğundan sorun yok demektir.

Soğukta basma mukavemeti doğrusal olmayan bir davranış sergilemiştir. Optimal performans, orta seviyedeki basınçlarda (ör. 1500 kg/cm<sup>2</sup>) ve daha kalın tuğlalarda (ör. 80 mm) gözlemlenmiştir; bu koşullar, sıkışmayı optimize ederken mikro çatlak riskini en aza indirir. Daha yüksek basınçlarda (ör. 1600 kg/cm<sup>2</sup>), daha kalın tuğlalar (80 mm) partikül sıkışmasının iyileşmesiyle en yüksek mukavemet değerine (78 N/mm<sup>2</sup>) ulaşmıştır. Mukavemet değerinin yüksek olması, yük taşıma kapasitesini artırarak malzemenin mekanik dayanımını ve kimyasal direnç gibi özelliklerini geliştirir. Aynı zamanda tuğlanın sıcaklık değişimlerine ve termal şoklara karşı daha dayanıklı olmasını sağlar.

Yoğunluk, porozite, su emme ve mukavemet açısından dengeli bir performans için 1500 kg/cm<sup>2</sup> presleme basıncı ve 80 mm kalınlık optimal değerler olarak belirlenmiştir. Ancak, maksimum mekanik mukavemetin öncelikli olduğu uygulamalar için 1600 kg/cm<sup>2</sup>

presleme basıncı ve 80 mm kalınlık önerilmektedir.

Bu bulgular, refrakter tuğla üretiminde presleme basıncı ve tuğla kalınlığının optimize edilmesinin, malzemenin özelliklerini belirli uygulamalara uyarlamak için önemli olduğunu vurgulamaktadır. Sıkıştırma koşullarındaki değişkenlerin mikro yapısal etkileri ve endüstriyel ortamlarda performans üzerindeki etkileri üzerine yapılacak daha ileri araştırmalar, refrakter tuğla performansını iyileştirme konusunda daha derin içgörüler sağlayacaktır. Aynı zamanda farklı presleme basınçlarında ve kalınlıklarında üretilen manyezit esaslı refrakter tuğlaların ısı özellikleri incelenmiş, elde edilen veriler üretim parametrelerinin ısı iletkenlik etkileri açısından değerlendirilmiştir. Bulgular, malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin ısı transferi davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Presleme basıncındaki artışın refrakter tuğlaların fiziksel yoğunluğunu artırdığı ve gözenekliliği azalttığı, bunun da ısı iletkenlikte önemli bir artışa yol açtığı gözlemlenmiştir. Yoğun yapıların, hava boşluklarının neden olduğu termal dirençleri en aza indirerek ısı transferini kolaylaştırdığı bilinmektedir. Sonuçlar, özellikle 1600 kg/cm<sup>2</sup> basınçla şekillendirilmiş numunelerde yüksek termal iletkenlik (20,25 W/m-K) ve difüzyivite (0,57 m<sup>2</sup>/s) değerleri ile bunu doğrulamıştır.

Presleme aynı zamanda taneler arası bağ yapısını güçlendirir, malzemenin fiziksel bütünlüğünü artırır ve ısı taşıma yollarında süreklilik sağlar. Bu da termal iletkenlik üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Refrakter malzemelerin basınca duyarlı termal davranışı, özellikle yüksek sıcaklık fırın tasarımlarında dikkate alınması gereken önemli bir üretim parametresidir. Kalınlık değişimi, özellikle termal difüzyivite katsayısı üzerinde önemli bir etki göstermiştir. Artan kalınlık, ısının malzeme boyunca daha uzun bir yol kat etmesini gerektirerek yayılma hızını sınırlar. Bu durum, daha kalın yapının termal direnç görevi görerek enerji aktarım hızını azaltmasıyla açıklanabilir. 1400 kg/cm<sup>2</sup> basınç altında 30 mm kalınlığındaki numunede ölçülen düşük difüzyivite değeri (0,19 m<sup>2</sup>/s) bu etkinin açık bir örneğidir. Öte yandan, kalınlığın termal iletkenlik üzerindeki etkisi daha sınırlı olmuş ve basınç faktörüne kıyasla daha zayıf bir eğilim göstermiştir. Bu da iletkenliğin daha çok malzemenin fiziksel yoğunluğu ve kimyasal bileşimi ile ilgili olduğunu göstermektedir. Kimyasal bağ yapıları, doping fazları ve malzeme içindeki tane boyutu dağılımı gibi parametreler bu noktada belirleyici olmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, mevcut literatürdeki refrakter malzemelerin fiziksel yoğunluğu, gözenekliliği ve termal özellikleri arasındaki ilişkileri desteklemektedir. Ancak bu çalışma, endüstriyel ölçekli üretim süreçlerinden elde edilen numunelere dayanması bakımından benzersiz bir katkı sağlamaktadır. Özellikle Hot Disk TPS 2500 S cihazı ile yapılan ölçümler,

fiziksel özelliklerdeki değişikliklerin termal performans üzerindeki etkisini doğrudan ve güvenilir bir şekilde yansıtmakta, bu da çalışmanın bilimsel gücünü artırmaktadır. Ayrıca bu çalışma, üretim parametrelerinin optimize edilmesinin termal iletkenliği ve termal difüziviteyi iyileştirebileceğini göstermiştir. Bu tür optimizasyonlar, enerji tasarruflu endüstriyel sistemlerde termal kayıpların azaltılması ve refrakter ömrünün artırılması için kritik öneme sahiptir.

## KAYNAKÇA

**Aksel, C.** (1998). *Thermal shock behaviour and mechanical properties of magnesia-spinel composites*. Leeds: Doctoral dissertation, University of Leeds.

**Aksöz, N., & Kervan, S.** (2013). *Metalik Alaşımın Termofiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.

**Apaydın, F., & Kaya, K.** (2017). Çimento Döner Fırınlarında Kullanılan Bazik Refrakter Tuğlaların Özelliklerinin Karşılaştırılması. Sakarya Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(5) 1-1.

**ASTM.** (1967). "Standard Method of Test for Thermal Conductivity of Materials by Means of the Guarded Hot Plate," ASTM Designation: C177-63, ed: in 1967 *Book of ASTM Standards*.

**Aşaman, O.** (2024). *Manyezit Spinel Tuğla Üretiminde Bağlayıcı Olarak Kalsiyum Naftalen Sülfonat Kullanımının Araştırılması ve Optimum Şartların Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Aytaç, İ.** (2020). Hibrit Nano akışkanların Termofiziksel Özelliklerinin Isıl Davranışları. Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 8(4), 810-829.

**Basar, Z.** (2020). *Titanyum, Zirkonyum ve Bor Katkılı A356 Alaşımının Termal İletkenliklerinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Batıçim.** (2025). *Batı Çimento* [Erişim : 09.03.2025, <https://www.baticim.com.tr/urunler/klinker> ].

**Bazhin, V., & Glazev, A.** (2022). Microsilica as a Strengthening Additive in Refractory Mixtures. *Ceramics International Journal*, 48(7), 890-899.

**Biçer, Y., Devocioğlu, A., & Akpınar, K.** (2003). Effective thermal conductivity of different porous stones. Fırat Üniversitesi, *Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(4), 613-622.

**C. Christiansen.** (1881). Some Experiments on Heat Conduction, *Ann. Physik*, vol. 3, pp. 23-33.

**Ceylantekin, R.** (2010). *ZrSiO<sub>4</sub> ve ZrO<sub>2</sub> İlavelerinin MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Refrakterlerinin Mekanik, Isıl Şok Ve Korozyon Davranışlarına Etkileri*. Doktora Tezi, Eskişehir Anadolu

Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

**Çakır, A.** (2014). *Yerli Hammadde Kullanımı Ile Çimento Döner Fırınları İçin Manyezit-Spinel Refrakter Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Ana Bilim Dalı.

**Çiçekdağı, A. T.** (2022). *Zirkon/Mullit İlavesi ile ASC Refrakterlerin Termo-Mekanik ve Termo Kimyasal Özelliklerin İyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Çimsa.** (2025). *Çimsa* [Erişim:10.04.2025, <https://cimsa.com.tr/formulhane/gri-cimento/cimento-hakkinda-bilmeniz-gerekenler>].

**Davraz, M., Gökçe, Y., Kuru, M., & Akdağ, A.** (2020). Çimento Esaslı Köpük Sıvanın Fiziksel, Mekanik ve Termal Özellikleri. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 42-53.

**Dayıoğlu, T.** (2022). *Döner Çimento Fırınlarına Yönelik Gözenekli Refrakter Malzemelerin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Demir, M., & Aksöz, S.** (2013). *İkili Kurşunsuz Lehim Alaşımalarının Isı İletiminin Ölçümü*. Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı.

**Donghu, Z., & Shcherbina, V.** (2023). *Thermal Efficiency Analysis of The Rotary Kiln Based on The Wear of The Lining*. National Technical University of Ukraine, Faculty of Chemical Engineering, Department of Chemical, Polymer and Silicate Engineering.

**DPT.** (2001). *Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Toprak Sanayi Hammaddeleri III. Çalışma Grubu Raporu, Ankara*. [Erişim : 13.04.2025 <https://www.sbb.gov.tr> ].

**Dumas, J., Mansard, B., & Rousset, P.** (1965). *Uranium Monocarbide Shaping and Irradiation Study*. Final Report No. 2, March 1, 1962-December 31, 1963 (No. EURAEC-1179). France. Commissariat a l'Energie Atomique. Centre d'Etudes Nucleaires, Saclay.

**Forbes, J.** (1851). On the Progress of Experiments on the Conduction of Heat, *undertaken at the Meeting of the British Association at Edinburgh, in 1850*.

**Fourier, J.** (1955). *The Analytical Theory of Heat, Fauthier-Villars, Paris, 1822; English translation by Freeman, A., Cambridge University Press, 466 pp., 1878; new edition of the*

English translation, Dover Publications, New York.

**Franchi, J., & Kingery, W.** (2011). Thermal Conductivity: IV, Apparatus for Determining Thermal Conductivity by a Comparative Method. *Journal of the American Ceramic Society*, 32(2):80-84.

**Ghosh, A., Sarkar, R., Mukherjee, B., & Das, S.** (2004). Effect of spinel content on the properties of magnesia–spinel composite refractory. *Journal of the European Ceramic Society*, 24.7 (2004): 2079-2085.

**Harper, F. C.** (1967). Effect of calcination temperature on the properties of magnesium oxides for use in magnesium oxychloride cements. *Journal of Applied Chemistry*, 17(1), 5-10.

**Hoffman, P.** (2008). *Band structure of aluminum determined by angle-resolved photoemission spectroscopy*. Data taken from Physical Review B 66.

**İça, M.** (1991). *Refrakter malzemelerin tanımı ve çimento döner fırınlarında refrakterlerin kullanımı*. Çitosan Krom–Manyezit Tuğla AŞ. Konya.

**Instruments, H. D.** (2025). *Hot Disk* [Erişim:18.05.2025 <http://www.hotdiskinstruments.com>].

**Kalkan, Ş. Ç.** (2021). *Kalsiyum Ligno Sülfonat Kullanılarak Killi Bir Zeminin İyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Kaya, K.** (2014). *Çimento Döner Fırınlarında Kullanılan Bazı Refrakter Tuğlaların Kontrol Parametrelerinin Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Kılıç, M., & Yiğit, A.** (2000). *Isı Transferi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Güçlendirme Vakfı. Yayın no:153, Bursa s. 3-53.

**Kılıç, Ö., & Yarbil, S.** (2016). Refrakter tuğlaların teknolojik özelliklerinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi, *Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(ÖS2), 117-126.

**Kızıl, S.** (2021). *Petrol-Doğalgaz ve Jeotermal Kuyularında Yeni Üretilen Isı Yalıtım Malzemeleri Kullanılarak Isı Kayıplarının Engellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Korkmaz, Ş.** (2019). *Tarihi Yapılarda Kullanılan Tuğla Malzemelerin, Termal İletkenlik, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Saptanması*. Yüksek Lisans Tezi, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.

- Kök, M.** (2006). *Dsc ile Termal İletkenlik Ölçümü ve Uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Elazığ Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı.
- Kurukavak, Ö.** (2015). *Refrakter Malzemeler İçin İnovatif Spinellerin Üretilmesi ve Refrakter Tuğla Özelliklerinin Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Lanbaran, D., Wang, C., Wen, C., Wu, Z., & Li, B.** (2025). Modeling the impact of temperature dependent thermal conductivity on hydrogen desorption from magnesium hydride. *International Journal of Hydrogen Energy*, 491-508.
- Malzeme Bilimi Net.** (2025). *Malzeme Bilimi Net* [Erişim : 20.03.2025, <https://malzemebilimi.net/refrakter-malzeme-nedir-nerelerde-kullanilir.html>].
- MTA.** (2025). *Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü* [Erişim : 11.05.2025, <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/manyezit>].
- MÜHENDİSTAN.** (2025). *Mühendistan* [Erişim : 18.06.2025 <https://muhendistan.com/isi-transferi-nedir>].
- Nakagava, Z.** (1998). Refractories Handbook, The Technical Association of Refractories of Japan. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Cilt.1 No.1. 2002.
- Neşet, C.** (2008). *Cam Fırınlarına Yönelik Zirkonya Mullit Esaslı Dökülebilir Refrakter Betonlarının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Nova Makina.** (2025). *Nova Engineering* [Erişim : 16.04.2025, <https://www.nova-makina.com/tr/g/refrakter-malzeme-nedir-ve-nerelerde-kullanilir>].
- Onaran, K.** (1993). *Malzeme Bilimi*, s. 100-104, 168, 171-173, 178-182. Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Özmiğçi, F.** (2009). *Enhancement Of Thermal, Electrical And Optical Properties Of Zinc Oxide Filled Polymer Matrix Nano Composites*. Doktora Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kimya Mühendisliği.
- Palacı, Y.** (2020). Borik Asit Katkısı ve Sinterleme Sıcaklığının Alümina ve Sepiyolitın Isıl İletkenliğe Etkisinin İncelenmesi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1): 488 - 493.

- PAU.** (2025). *Pamukkale Üniversitesi Termoelektrik Laboratuvarı* [Erişim:19.05.2025, <https://www.pau.edu.tr/termoelektrik/tr/sayfa/termoelektrik-nedir-2>].
- Peker, A., & Taştan, M.** (2018). *Farklı Malzeme Türlerinin Isı İletim Katsayılarının Hesaplaması*. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü.
- Peng, W., Chen, Z., Yan, W., Schafföner, S., Li, G., Li, Y., & Jia, C.** (2021). Advanced Lightweight Periclase-Magnesium Aluminate Spinel Refractories with High Mechanical Properties and High Corrosion Resistance. *Construction and Building Journal*, Volume 291, 12.
- Powell, R.** (1936). The thermal and electrical conductivities of metals and alloys: Part 2, some heat-resistant alloys from 0° C. to 800° C. *Proceedings of the Physical Society*, 48(3), 381.
- Rıza Ali, Y.** (2021). *Analim Ve Klinoptilolit Katkılı Çimentolar İçeren Hafif Harç Plakaların Isıl Performanslarının Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yenilenebilir Enerji Anabilim Dalı.
- Savaş, A.** (2004). *Paralel Akışlı Ön Kalsinasyonlu Çimento Fabrikasında Enerji Ve Ekserji Analizi Modellemesi*. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Services R.I.** (2013). *Magnesium Compounds and Chemicals*, Twelfth Edition. Londra.
- Sezer, B.** (1994). Gümrük Birliğine Girerken Türk Refrakter Sektörü. *Seramik ve Refrakter Üreticileri Yayınları*, İstanbul.
- Shubin, V.** (2001). Design and service conditions of the refractory lining for rotary kilns. *Refractories and Industrial Ceramics*, 42 (3-4), 130-136.
- Şimşek, B., Şimşek, E., & Altunok, T.** (2013). Bir Çimento Döner Fırın Sistemi Yüzeyinden Isı Kayıplarının Ampirik ve İstatistikî Modellenmesi. Gazi Üniversitesi, *Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 28, no.1, pp. 59-66.
- Türk Çimento.** (2025). *Türk Çimento* [Erişim:23.04.2025, [https://www.turkcimento.org.tr/tr/cimento\\_nasil\\_uretilir](https://www.turkcimento.org.tr/tr/cimento_nasil_uretilir)].
- Till M.J., S., Enrico, S., Nora, B., Anne-Marie, L., Ondşej, J., Thomas, S., . . . Christos, G.** (2023). MgO–C Refractories Based on Refractory Recyclates and Environmentally Friendly Binders. *Open Ceramics*, Volume 16, 100469.
- Timofeeva, M., Ivanova, K., & Pavlov, P.** (2021). Impact of Cement Content on Refractory

Concrete Properties. *Construction Materials Journal*, 45(4), 223-234.

**URL-1.** (2025). *Britannica* [Erişim : 30.03.2025  
<https://www.britannica.com/technology/refractory>].

**Wang, X., Zhao, L., & Chen, Y.** (2024). Effect of MgO Content on Spinel Formation in Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Based Refractories. *Journal of Materials Science*, 59(3), 1024-1035.

**Wu, H., Anora, T., & Zhao, X.** (2022). Effects of High-Pressure Hydraulic Pressing on Microstructure Refinement. *Metallurgical Transactions A*, 53(2), 345-356.

**Yarbil, S.** (2012). *Refrakter Tuğla Üretiminde Kullanılan Hammaddelerin ve Refrakter Tuğlaların Bazı Teknolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Adana Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı.

**Yılmaz, A., & Kuşçu, M.** (2012). Manyezit yataklarının oluşumu, sınıflandırılması, kullanım alanları ve kalite sınıflandırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, *Fen Bilimleri Dergisi*, 28(1), 65-72.

**Yılmaz, Ş., Toplan, H., & Demirkıran, Ş.** (2016). *Seramik Malzemeler*, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, s. 136-155.

**Yüksel, M.** (2010). *"Enhancement Of Thermal Conductivity Using Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) And Silver (Ag) Nanoparticles,"* Master of Science, Yeditepe University, Istanbul.