

**MAGNEZYUM OKSİKLOÜR ÇİMENTOSU İLE POMZA
KATKILI HAFİF YAPI MALZEMESİ ÜRETİLMESİ**

**PRODUCTION OF PUMICE DOPED LIGHT WEIGHT
CONSTRUCTION MATERIAL BY USING MAGNESIUM
OXYCHLORIDE CEMENT**

CAN GÜVEN

PROF. DR. ABİDİN TEMEL

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

Yüksek Lisans Tezi Olarak Hazırlanmıştır.

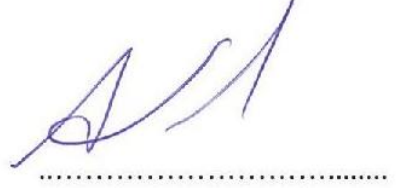
2017

Can Güven'in hazırladığı "Magnezyum Oksiklorür Çimentosu ile Pomza Katkılı Hafif Yapı Malzemesi Üretilmesi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından JEOLojİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Zehra Semra KARAKAŞ
Başkan



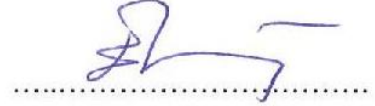
Prof. Dr. Abidin TEMEL
Danışman



Prof. Dr. A. Hakan BENZER
Üye



Doç. Dr. Elif VAROL MURATÇAY
Üye



Yrd. Doç. Dr. Elif ÇİÇEK
Üye



Bu Tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

08/02/2017



CAN GÜVEN

ÖZET

MAGNEZYUM OKSİKLORÜR ÇİMENTOSU İLE POMZA KATKILI HAFİF YAPI MALZEMESİ ÜRETİLMESİ

Can GÜVEN

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Abidin Temel

Şubat 2017, 73 sayfa

Bu tez çalışmasında, Magnezyum Oksiklorür çimentosu (Sorel çimentosu) esaslı pomza katkılı hafif yapı malzemeleri üretilmiştir ve karakterize edilmiştir. Sorel çimentosu üretimi için iki farklı molar oran belirlenmiştir. Bu iki oranın belirlenmesinde, farklı molar MgO içeriğine sahip olmasına ve Faz 5 kristallerinin oluşmuş olmasına dikkat edilmiştir. İlk olarak hazırlanan Sorel çimento karışımları, $H_2O/MgCl_2$ molar oranı 12/1'de sabit tutulmuştur ve $MgO/MgCl_2$ molar oranları 13/1 ve 6.8/1 olan iki farklı oranda hazırlanmıştır. Hafif yapı malzemesi üretimi için 0 - 4 mm (ince), 4 - 8mm (orta) ve 8 - 16 mm (iri) tane boylarına sahip üç farklı pomza türü kullanılmıştır.

Sorel çimentolar saf su ve şebeke suyu ile hazırlanıp incelenmiştir. X-Işınları Kırınım difraktogramları ve taramalı elektron mikroskobu analizleri ile Sorel çimentolarında esas olarak Faz 5 kristallerinin oluştuğu saptanmıştır. Ayrıca, her iki oran için, saf su ile hazırlanmış çimentolar, daha düşük yoğunluğa sahip olduğu durumda daha yüksek basınç dayanımına sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bu nedenlerden dolayı, hafif yapı malzemelerin saf su ile hazırlanılmasına karar verilmiştir. Pomza katkılı hafif yapı malzemeleri, pomzaların kalıplara doldurulmasının ardından Sorel çimentonun ilavesi ile hazırlanmıştır.

Hafif yapı malzemeleri üzerinde yoğunluk analizleri, basınç dayanım deneyleri, su emme ve görünür gözeneklilik, gözeneklilik ve ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre, her iki molar oranlar için, ince tane boyuna sahip pomzalar ile hazırlanmış numuneleri, en düşük gözeneklilik değerleri ile en yüksek basınç dayanımına, yoğunluğa ve ısı iletkenlik katsayı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. İri boy pomza ile hazırlanmış numuneler ise, ortanca gözeneklilik, basınç dayanım yoğunluk ve ısı iletkenlik değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Orta tane boylarına sahip pomzalar ile hazırlanmış numuneler, en yüksek gözeneklilik değerleri ile en düşük basınç dayanımına, yoğunluğa ve ısı iletkenlik katsayı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Ancak, aynı pomza tane boyları için, çimento karışımlarının farklılıkları incelendiğinde, MgO/MgCl₂ molar oranı 6.8/1 karışım için hafif yapı malzemelerin, MgO/MgCl₂ molar oranı 13/1 karışımına göre, basınç dayanımları, gözeneklilik, yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayı değerleri daha düşük iken, görünür gözeneklilik ve su emme değerleri daha yüksek çıkmıştır.

Anahtar kelimeler: Sorel çimento, pomza katkılı hafif yapı malzemesi, Micro CT, X-Işınları Kırınımı, SEM-EDS, gözeneklilik, basınç dayanımı, ısı iletkenlik.

ABSTRACT

PRODUCTION OF PUMICE DOPED LIGHT WEIGHT CONSTRUCTION MATERIAL BY USING MAGNESIUM OXYCHLORIDE CEMENT

Can GÜVEN

Master of Science, Geological Engineering Department

Supervisor: Prof. Dr. Abidin Temel

February, 2017, 73 pages

In this thesis, pumice added magnesium oxychloride cement (sorel cement) based light weight building materials were produced and characterized. Two different molar ratios were determined for production of sorel cements. While choosing the molar ratios, attention has been paid on each mixtures having different molar MgO ratios, and formation of phase 5 crystals. The molar ratio of $H_2O/MgCl_2$ in the cement mixtures was fixed at 12/1, and two different cements were prepared with $MgO/MgCl_2$ molar ratios of 13/1 and 6.8/1. In this study, pumice added light weight concrete were produced with different sizes of pumice grains, and those are 0 - 4 mm (fine), 4 - 8mm (medium), and 8 - 16 mm (coarse).

Sorel cements were prepared with distilled water and tap water and examined. Formation of Phase 5 crystals had been obtained by analyzes of X-Ray Diffraction and Scanning Electron Microscope. In addition, for each ratios, cements with distilled water have less density and more compressive strength values. It was decided to prepare light weight

building materials with distilled water. In production of light weight building materials, first, moulds were filled with pumice then sored cements were added to the moulds.

Density analyzes, compression strength tests, open porosity, water absorption, porosity and thermal conductivity measurements were performed on light weight building materials. According to the results, for both molar ratios, the materials prepared with fine size of pumice grains, was identified to have the highest compressive strength, the lowest porosity, density and thermal conductivity coefficient values. The materials prepared with coarse size of pumice grains, was identified to have median compressive strength, porosity, density and thermal conductivity coefficient values. With medium size of pumice grains, was identified to have the lowest compressive strength, the highest porosity, density and thermal conductivity coefficient values.

However, for same pumice grains, when the differences of cement mixtures are examined, the materials with MgO/MgCl_2 molar ratio 6.8/1 have lower compressive strength, porosity, density and thermal conductivity coefficient values. On the other hand, they have higher open porosity and water absorption values than the light weight building materials with MgO/MgCl_2 molar ratio 13/1.

Keywords: Sored cement, pumice doped light weight construction material, Micro CT, X-Ray Diffraction, SEM-EDS, porosity, compressive strength, heat conductivity

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması kapsamında sabırla ve devamlı olarak bilimsel rehberliğini, denetimini ve katkılarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Abidin Temel'e teşekkür ederim. Akademik danışmanım tarafından bilimsel bakış açısı ve düşünce yeteneği edindim. Akademik danışmanımın hoşgörüsü, sabrı ve yardımı ile bu tezi tamamladım.

Sayın Doç. Dr. Elif Varol Muratçay'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Elif Çiçek'e tez boyunca yönlendirmeleri, görüşleri ve motivasyonları için teşekkür ederim.

Sayın Prof. Dr. A. Hakan BENZER'e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Z. Semra KARAKAŞ'a değerleri yorumları ile bilimsel katkıları için teşekkür ederim.

Bölüm başkanımız Sayın Prof. Dr. Harun Sönmez'e ve bölüm başkan yardımcısı Sayın Prof. Dr. Murat Ercanoğlu'na ve tez kapsamında yoğun olarak kullandığım Hacettepe Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü bulunan laboratuvarlar ekibine, sağladıkları destekleri için teşekkür ederim.

Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü bünyesinde ısı iletkenlik katsayısı ölçümü için Maden Yüksek Mühendisi Gökhan Erol'a ve Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan taramalı elektron mikroskobu analizleri ve gözeneklilik ölçümleri için Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Evren Çubukçu'ya ve Sayın Efe Akkaş'a teşekkür ederim.

Son olarak bütün eğitim hayatım boyunca bulunduğum seviyeye ulaşmamda büyük sabır gösteren aileme maddi ve manevi bütün destekleri için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER	ix
ŞEKİLLER	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1. Hafif Agregalar	4
2.2. Pomza	5
2.2.1. Pomza ve Hafif Yapı Malzemeleri Hakkındaki Önemli Çalışmalar	7
2.3. Manyezit	10
2.4. Manyezit Yataklarının Jenetik Tipleri	11
2.4.1. Kristalin Manyezit	11
2.4.2. Hidrotermal Jel Manyezit Yatakları	12
2.4.3. Süzülme ile Oluşan Jel Manyezit Yatakları.....	12
2.4.4. Sedimanter Manyezit Yatakları	13
2.4.5. Deniz Sularından MgO Elde Edilmesi	14
2.5. Magnezyum Oksiklorür Çimentosu (Sorel Çimentosu)	14
2.6. Magnezyum Oksiklorür Çimentosunun Özelliklerini Etkileyen Faktörler	16
2.6.1. Aktif Kireç Miktarı	16
2.6.2. Magnezyum Oksit'in Reaktivitesi ve Tane Boyu.....	17
2.6.3. Manyezitin Kalsinasyon Sıcaklığı	17
2.6.4. Hammaddelerin Molar Oranları	18
2.6.5. Magnezyum Oksiklorür Çimentosu Hakkında Diğer Önemli Çalışmalar.....	19
2.7. Manyezit ile Hazırlanan Diğer Çimento Tipleri.....	20
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	22
3.1. Materyal	22
3.1.1. Kalsine Manyezit (MgO)	22
3.1.2. Magnezyum Klorür Hegzahidrat (MgCl ₂ .6H ₂ O).....	22

3.1.3. Su.....	23
3.1.4. Pomza..	23
3.2. Yöntem	23
3.2.1. Sorel Çimentolarının Hazırlanması	23
3.2.2. Pomza Katkılı Sorel Çimentolarının Hazırlanması	24
3.2.3. Yoğunluk Analizleri	25
3.2.4. X-Işınları Kırınım (XRD) Analizleri	26
3.2.5. İnce Kesitlerin İncelenmesi	27
3.2.6. Basınç Dayanım Deneyleri	27
3.2.7. SEM - EDS Analizleri	28
3.2.8. Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçümü	29
3.2.9. Görünür Gözeneklilik ve Su Emme Ölçümleri	30
3.2.10. Gözeneklilik Ölçümü.....	31
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	32
4.1. Saf Manyezit ve Kalsine Manyezitin X-Işınları Kırınım Analizleri	32
4.2. Pomzaların Analizleri ve Karakterizasyonu	34
4.2.1. X-Işınları Kırınım Analizi	34
4.2.2. Pomzanın Mineralojik Analizi ve Dokusal Özelliği.....	35
4.2.3. Pomzanın SEM - EDS Analizi	37
4.3. Sorel Çimentoların Deneyleri ve Analizleri	39
4.3.1. Sorel Çimentoların X Işınları Kırınım Analizleri	39
4.3.2. Sorel Çimentoların Kristal Tane Boyu Analizleri	44
4.3.3. Sorel Çimentoların Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri	45
4.3.4. Sorel Çimentoların Yoğunluğu.....	46
4.3.5. Sorel Çimentoların Basınç Dayanım Deneyleri	47
4.4. Hafif Yapı Malzemelerinin Deney ve Analizleri.....	49
4.4.1. Hafif Yapı Malzemelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi	49
4.4.2. Hafif Yapı Malzemelerin Gözeneklilik Analizi	51
4.4.3. Hafif Yapı Malzeme Numunelerinin Basınç Dayanımları	55
4.4.4. Hafif Yapı Malzemelerin Isıl İletkenlik Katsayılarının Ölçümü	57
4.4.5. Görünür Gözeneklilik ve Su Emme Deneyleri	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	63
5.1. Sonuçlar	63
5.2. Öneriler	66

KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	72



ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 2.1. İllere göre pomza rezervinin dağılımı [30].....	7
Çizelge 2.2. Li ve Chau [9] çalışmasında seçilen MgO/MgCl ₂ ve H ₂ O/MgCl ₂ molar oranlar.....	18
Çizelge 3.1. Kalsine manyezitin kimyasal analiz değerleri.....	22
Çizelge 3.2. Pomzaların tane boylarına ait birim hacim ağırlık değerleri.....	23
Çizelge 3.3. Sorel çimentoların ham madde oranları ve adlandırılması.....	24
Çizelge 3.4. Hafif yapı malzemelerinin çimento pomza karışım oranları ve isimlendirilmesi	25
Çizelge 4.1. Pomza numunelerin SEM-EDS analiz sonuçları.....	37
Çizelge 4.2. Kumtepe döküntü çökellerine ait pomza örneklerinin kimyasal analiz sonuçları [61].....	38
Çizelge 4.3. Sorel çimentoların XRD kıyaslama çizelgesi.....	43
Çizelge 4.4. Sorel çimentoların Scherrer eşitliliği ile kristal tane boyu analizi	44
Çizelge 4.5. Sorel çimentoların yoğunluk sonuçları (g/cm ³)	46
Çizelge 4.6. M6.8/H12 çimento karışımların basınç dayanım sonuçları (MPa)	47
Çizelge 4.7. M13/H12 çimento karışımların basınç dayanım sonuçları (MPa)	47
Çizelge 4.8. M13/H12 çimento karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin yoğunluk değerleri (g/cm ³).....	49
Çizelge 4.9. M6.8/H12 çimento karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin yoğunluk değerleri (g/cm ³).....	50
Çizelge 4.10. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin gözeneklilik değerleri.....	52
Çizelge 4.11. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin gözeneklilik değerleri.....	52
Çizelge 4.12. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ortalama basınç dayanım değerleri (MPa).....	55
Çizelge 4.13. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ortalama basınç dayanım değerleri (MPa).....	56
Çizelge 4.14. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları	58

Çizelge 4.15. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları	58
Çizelge 4.16. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin % su emme değerleri	59
Çizelge 4.17. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin % su emme değerleri	60
Çizelge 4.18. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin görünür gözeneklilik değerleri (%)	61
Çizelge 4.19. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin görünür gözeneklilik değerleri	61
Çizelge 5.1. Hafif yapı malzemeleri için ölçülen parametrelerin ortalama değerler tablosu	63

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 2.1. Pomza Taneleri.....	5
Şekil 2.2. Manyezit.....	10
Şekil 2.3: Kalsit - Dolomit - Manyezit reaksiyonları [43].....	11
Şekil 2.4. Sorel çimentosu içerisindeki Faz 3 kristal yapıları [44].....	15
Şekil 2.5. Sorel çimentosu içerisindeki Faz 5 kristal yapıları [44].....	16
Şekil 3.1. Kalsine manyezit	22
Şekil 3.2. Magnezyum klorür hegzahidrat ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	22
Şekil 3.3. Pomza numuneleri.....	23
Şekil 3.4. Rigaku D/Max 2200 PC, X-Işınları Kırınım Cihazı	27
Şekil 3.5. a) Besmak 50 ton kapasiteli otomatik pres, b) Zeiss EVO 50 taramalı elektron mikroskobu	28
Şekil 3.6. Unitherm 2022 ısı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı	29
Şekil 3.7. Skyscan 1272 Micro CT cihazı	31
Şekil 4.1. Saf manyezitin X-Işınları Kırınım difraktogramı.....	33
Şekil 4.2. Kalsine manyezitin X-Işınları Kırınım difraktogramı.....	34
Şekil 4.3. Pomzaların X-Işınları Kırınım difraktogramı	35
Şekil 4.4. Pomza numunelerinin 2.5X mikroskop merceğindeki görüntüsü, a. birinci nikol görüntüsü, b. ikinci nikol görüntüsü.....	36
Şekil 4.5. Pomza tanesinin SEM görüntüsü	36
Şekil 4.6. Pomza tanesinin SEM görüntüsü	37
Şekil 4.7. Volkanik kayalar için TAS diyagramı [60].....	38
Şekil 4.8. #1S isimli çimentonun XRD difraktogramı	40
Şekil 4.9. #1M isimli çimentonun XRD difraktogramı	40
Şekil 4.10. #2S isimli çimentonun XRD difraktogramı	42
Şekil 4.11. #2M isimli çimentonun XRD difraktogramı	42
Şekil 4.12. Sorel çimentoların SEM görüntüleri, a) #1S, b) #1M, c) #2S, d) #2M.....	45
Şekil 4.13. Sorel çimentoların ortalama yoğunluk değerleri kıyaslama grafiği	47
Şekil 4.14. Sorel çimentoların ortalama basınç dayanım kıyaslama grafiği	48
Şekil 4.15. Hafif yapı malzemelerin ortalama yoğunluk kıyaslama grafiği.....	51
Şekil 4.16. Hafif yapı malzemelerin gözeneklilik değerleri kıyaslama grafiği.....	52

Şekil 4.17. Hafif yapı malzemelerin Micro CT görüntüleri, a. #1FP, b. #1MP, c. #1CP, d. #2FP, e. #2MP, f. #2CP	54
Şekil 4.18. Hafif yapı malzemelerin ortalama basınç dayanım kıyaslama grafiği	57
Şekil 4.19. Hafif yapı malzemelerin ısı iletkenlik katsayısı kıyaslama grafiği	59
Şekil 4.20. Hafif yapı malzemelerin ortalama su emme değerleri kıyaslaması grafiği.....	60
Şekil 4.21. Hafif yapı malzemelerin ortalama görünür gözeneklilik değerleri kıyaslama grafiği	62



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

f_c	Basınç dayanımı
f	Kırılma anında ulaşılan en büyük yük
A_c	Numunenin üzerine basınç yükünün uygulandığı kesit alanı
d	Yoğunluk
d_{su}	Suyun Yoğunluğu
m	Kütle
v	Hacim
M_D	Suya doymun ağırlık
M_K	Kuru ağırlık
V_v	Boşluk hacmi
V	Numunelerin toplam hacmi
D	Ortalama kristal boyu
K	Şekle bağlı Sherrer eşitliği sabiti
λ	X-Işını radyasyonun dalga boyu
$B_{1/2}$	Fazın maksimum yoğunluktaki pikin yarın uzunluğundaki genişliği
θ_B	Bragg açısı
kV	Kilovolt
mA	Miliamper

Kısaltmalar

#1S	Saf su ile hazırlanmış M13/H12 çimento karışımı
#1M	Şebeke suyu ile hazırlanmış M13/H12 çimento karışımı
#2S	Saf su ile hazırlanmış M6.8/H12 çimento karışımı
#2M	Şebeke suyu ile hazırlanmış M6.8/H12 çimento karışımı
#1FP	İnce tane boylu pomza ve M13/H12 çimento karışımli hafif yapı malzemesi
#1MP	Orta tane boylu pomza ve M13/H12 çimento karışımli hafif yapı malzemesi

#1CP	İri tane boylu pomza ve M13/H12 çimento karışımı hafif yapı malzemesi
#2FP	İnce tane boylu pomza ve M6.8/H12 çimento karışımı hafif yapı malzemesi
#2MP	Orta tane boylu pomza ve M6.8/H12 çimento karışımı hafif yapı malzemesi
#2CP	İri tane boylu pomza ve M6.8/H12 çimento karışımı hafif yapı malzemesi
ASTM	American Society for Testing of Materials
B.H.A.	Birim Hacim Ağırlık
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EN	European Norm
EPS	Genleştirilmiş polistiren köpüğü
Ort.	Ortalama
SEM - EDS	Taramalı elektron mikroskobu - Enerji Dağılımı Spektrometresi
TS	Türk Standartları
Micro-CT	Bilgisayarlı mikrotomografi
XPS	Ekstrüde polistiren köpüğü
XRD	X-Işınları Kırınımı

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacının artması ile fosil yakıtlar daha hızlı tüketilmektedir. Bu durum, kullanılan enerjinin muhafaza edilmesi ve enerjide tasarrufu ön plana çıkarmıştır. Gelişmiş ülkelerde enerji tüketiminin yaklaşık %40'ı binalar da tüketilmektedir [1]. Tüketilen bu enerji, dünya üzerinde %36'lık karbon dioksit emisyonuna karşılık gelmektedir [2]. Binalardan kaynaklanan ısı kaybının yaklaşık % 33'u duvarlardan gerçekleşmektedir [3]. Bu durum yalıtımın önemini arttırmaktadır.

Ülkemizde yıllık harcanan enerjinin %72'si ithal edildiği göz önüne alındığında yalıtım büyük bir önem taşımaktadır [4]. Ülkemizde inşaat sektörünün hızla büyümesi ile inşaat ürünleri ve yan sanayi sektörleri de paralel olarak gelişmişlerdir. Ülkemizde ısı yalıtım ürünleri konusunda çeşitli yatırımlar yapılmış olup bunların bazıları; camyünü, taşyünü, genleştirilmiş polistiren köpüğü (EPS), ekstrüde polistiren köpüğü (XPS), poliüretan köpüğü, gaz beton ve bims gibi inşaat elemanlarıdır. Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı önderliğinde yeşil bina projeleri yatırımlarını başlatmışlardır. Bu gelişmelerle birlikte yalıtımlı inşaat ürünleri alanındaki bilimsel çalışmalar da hız kazanmıştır.

Tez kapsamında, mevcut yalıtım özelliğine sahip duvar elemanlarına alternatif olarak, laboratuvar ortamında, değişik karışım oranlarına sahip Sorel çimento esaslı ve pomza katkılı hafif yapı malzemesi üretilerek, bu malzemenin ısı izolasyonu ve mekanik dayanımını gibi özelliklerinin bilimsel metotlarla ortaya konulması amaçlanmıştır.

Pomza volkanik faaliyetler ile oluşan gözenekli kayadır. Oluşumu sırasında, bünyesindeki gazların ani olarak terk etmesi ve hızlı soğuma nedeni ile, makro ölçekten mikro ölçeğe kadar büyük oranda gözenek içerir. Gözenekler çoğunlukla bağlantısız olduğundan, geçirgenliği düşük, ses ve ısı izolasyonu oldukça yüksektir [5]. Ülkemiz pomza rezervince zengin olup, dünya üzerindeki pomza rezervinin yaklaşık 1/7'lik kısmını bulundurmaktadır [6]. Bu sebepten ötürü, birçok yapı ürününde pomza, yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Pomza ile üretilen bims bloklar, binaların dış duvarlarında ve iç bölme sistemlerinde kullanılmaktadır.

Pomza gözenekli ve hafif yapısından dolayı inşaat sektöründe yoğun olarak kullanılmasının yanı sıra, farklı alanlarda da kullanılmaktadır. Örneğin, tarım sektöründe, gözeneklerinde suyu uzun süre barındırarak bitki için gerekli nemlilik koşullarını yerine

getirmektedir. Bu sayede sulu tarım bitkilerinin az sulu veya susuz ortamlarda yetiştirilebilmesine imkan vermektedir [6].

Pomza ülkemizde tekstil sektöründe, kot taşlama işleminde de, pantolonun renginin ağartılmasında, ayrıca, kimya sektöründe pomza aktif olarak kullanılmaktadır. Tarım ilaçları sanayi, gübrenin topraklaşmasını engellemede, dişçilikte parlatma jelinin yapısında, akustik, yalıtım ve kaymaz boya çeşitlerinde katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır [5].

Mücevher işleme, metal cam plastik aşındırıcı olarak pomza kullanılmaktadır. Devre ve çiplerin üretiminde temizleme malzemesi olarak da kullanılmaktadır [5].

Tez kapsamında, bağlayıcı malzeme olarak Magnezyum Oksiklorür çimentosu (Sorel çimentosu) kullanılmıştır. Sorel çimentosunun ham maddesi, kalsine manyezit olup, $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ve su ile uygun oranlarda çözelti hazırlanarak kalsine manyezit ilavesi ile Sorel çimentosu hazırlanmaktadır.

Magnezyum Oksiklorür çimentosu (Sorel çimentosu), 1867'de Portland çimentosundan kısa bir süre sonra bulunmuştur [7]. Sorel çimentosu, alışagelmiş Portland çimentosuna göre bazı üstün özellikleri bulunur [8]. Şöyle ki; çimento, sertleşmesi esnasında ıslak küre ihtiyaç duymaz, yüksek yangın dayanımı vardır, düşük ısıl iletkenliğe sahiptir ve aşınmaya karşı iyi direnç gösterir, boyadan yağdan etkilenmez. Sorel çimentosunun hızlı yerleşmesi ve sertleşmesinin yanı sıra, yüksek miktarda farklı çeşitlerde dolgu malzemelerinin bağlama kabiliyetleri vardır. Sorel çimentosunun en fazla kullanıldığı alanlar; endüstriyel zemin kaplamaları, yüksek yangın dayanımının gerektiği yerlerde ve taşlama disklerinin üretiminde kullanılmaktadır [8, 9]. Geçtiğimiz yıllarda Sorel çimentosu, perlit, cam elyafı vb. katkı malzemeleri ile hafif çelik yapılarda panel malzemesi olarak ve binaların dış cephe kaplamalarında kullanılmaya başlanmıştır [10].

Magnezyum oksit veya kalsine edilmiş manyezit genellikle 750 °C ile 1000 °C aralığında elde edilmektedir. Kalsine edilmiş manyezitlerin reaktivitesi veya kalitesini termal geçmişi ve tane boyuna bağlıdır [11, 12].

MgO ve $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ çözeltilisinin karıştırılması ile dört ana faz oluşur. Bu fazlar, $2Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 4H_2O$ (Faz 2), $3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ (Faz 3), $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ (Faz 5), $9Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 5H_2O$ (Faz 9)'dur. Bu fazlardan Faz 3 ve Faz 5 reaksiyonları oda sıcaklıklarında gerçekleşirken Faz 2 ve Faz 9 reaksiyonları 100 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir [9, 13, 14]. Diğer olası reaksiyon ürünü $Mg(OH)_2$ 'dir [15].

Faz 5, Sorel çimentosu içerisinde iyi kristallenmiş nano tel yapılarıdır [16]. Sorel çimentosunun dayanıklılığının temel kaynağı iğne şekilli kristallerin iç içe beraber büyümesi sonucu, kristallerin mekanik bağı ve yoğun mikro yapısıdır [15]. Bu nedenle Sorel çimentosunun mekanik özellikleri fazların oluşumunun ardından ham maddelerin uygun karışım oranlarına bağlıdır [9]. Ham madde karışım oranları molar olarak genellikle $MgO/MgCl_2$ ve $H_2O/MgCl_2$ şeklindedir. Faz 3 ve Faz 5 bileşimine bakıldığında MgO ve H_2O 'nun değerleri değişirken $MgCl_2$ sabit kalmıştır. Bu sebepten dolayı Faz 5 ve ya Faz 3 oluşumu için seçilecek oranlarda, oranların payda kısmına $MgCl_2$ yazılmıştır.

Çimento karışımındaki, $MgO/MgCl_2$ molar oranında MgO konsantrasyonun artması çimento harcında Faz 5 oluşumunu sağlarken, MgO konsantrasyonunun azalması Faz 3 oluşumunu sağlamaktadır. $MgO/MgCl_2$ molar oranına ek olarak, çimentonun mekanik ve kimyasal özellikleri açısından $H_2O/MgCl_2$ oranı da önemlidir. Düşük su içeriği çimento harcının dayanıklılığına büyük etkisi olur. Fakat düşük su içeriği çimento harcının işlenebilirliğini azaltmaktadır [9].

Bu tez çalışmasında hafif agrega olarak pomza ve bağlayıcı olarak ise Sorel çimentosu kullanılmıştır. Hafif yapı malzemeleri, iki farklı çimento karışımı ile 3 farklı tane boylarına sahip pomza numuneleri ile hazırlanmıştır. İki farklı çimento karışımı seçilirken, bu oranlar ile Faz 5 kristallerinin oluşabilmesi ve ana ham madde olan MgO 'nun farklı molar oranlara sahip olması istenmiştir. Bu sayede MgO farklığının çimento üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca farklı pomza tane boylarına bağlı parametrelerin farklılıkları, hazırlanan numuneler üzerinden gözlemlenmiştir.

İlk aşamada manyezit ve pomzanın X-Işınları Kırınımı, pomzanın taramalı elektron mikroskobu ile fotoğrafları, SEM-EDS ve ince kesit incelemeleri yapılmıştır. Ardından iki farklı çimento karışımının basınç dayanımları, yoğunlukları ve oluşan fazların saptanması için X-Işınları Kırınım analizi ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenmiştir.

İkinci aşamada, üç farklı tane boyuna sahip pomza agregalarına iki farklı çimento karışımı ilave edilmiş ve hafif yapı malzemeleri oluşturulmuştur. Hazırlanan numuneler üzerinde basınç dayanımları, yoğunluk analizleri, görünür gözeneklilik, su emme, gözeneklilik analizleri ve ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Son olarak, elde edilen sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir. Pomza tane boylarının ve iki farklı çimento karışımının hafif yapı malzeme numuneleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Hafif Agregalar

Hafif agrega, çimento ve çimento katkı maddeleri ile karıştırılarak hafif beton üretiminde kullanılan, birim hacim ağırlığının en yüksek değeri 1200 kg/cm^3 'ü aşmayan öğütülmüş veya öğütülmemiş gözenekli agregadır [17].

Hafif agregalar, doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar. TS 1114 EN 13055-1'e göre doğal agregalar, mekanik işlem dışında bir işleme tabi tutulmamış, doğadan elde edilen agregadır. Yapay agregalar ise, ısı veya diğer değişiklik işlemlerini bulunduran bir endüstriyel işlem sonucunda elde edilen mineral kökenli agregadır [17].

Doğal agregalar doğadan, yapay agregalar ise doğal veya atık minerallerin çoğunlukla termal işlemleri sonucunda üretilir [17]. Tüf, pomza ve diatomit gibi agregalar, oluşumları sırasında gözenekli hale gelmiştir ve doğal hafif agrega olarak karakterize edilirler. Kil ve perlit, ısı işlemler sonucu agrega haline getirilen doğal oluşuklar olup, doğal sentetik agrega olarak adlandırılırlar. Cam ve atık materyallerinden üretilen, ayrıca uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi termal işlemlerin sonucunda oluşmuş agregalar yapay sentetik agrega olarak karakterize edilirler [18, 19]. Pomzanın düşük yoğunluk, ses ve ısı izolasyonu, kolay sıva tutma ve deprem anındaki elastik davranışı gibi birçok üstün özellikleri vardır [20]. Fakat yoğunluğunun düşüklüğünden ve su emme özelliğinin yüksek olmasında dolayı, çimento karışımı hazırlanırken kullanılan suyun emilmesi gibi durumlar betonda ayrışmalara sebep olmaktadır [21, 22].

2.2. Pomza

Pomza, beyaz-açık gri, sarımsı renkler gösteren köpük veya sünger gibi bol miktarda boşluk içeren, volkanik faaliyetler sonucu oluşmuş volkan camıdır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Pomza Taneleri

TS 3234 [23]'e göre pomza, bağlantısız gözenekli, sünger görünümlü silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle 1 gr/cm^3 'den daha düşük olan, Mohs Sertlik cetveline göre sertliği yaklaşık 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir maddedir. Ayrıca, pomzanın kırma ve eleme işlemleri ile beton yapımına elverişli hale getirilmiş şekline de pomza agregası adı verilmektedir.

Pomza volkanik faaliyetler sonucu oluşmuş olup, piroklastik kayaç grubuna girmektedir. Piroklastik kayaçların oluşumu şu şekilde özetlendirilmektedir. Bazik magma nispeten daha düşük viskoziteye ve gaz içeriğine sahiptir. Ayrıca lav akıntısı durağan ve üretilen piroklastik malzeme miktarı düşüktür. Bazik magmadan daha yüksek viskoziteye sahip ve daha fazla gaz içeriğine sahip asidik magma, bazik magmaya göre lav akıntısı daha hızlı ve daha düzensizdir. Asidik magma, örneğin riyolit, en yüksek viskoziteye ve gaz içeriğine sahiptirler. Basıncın azalması ile magma yüzeye hızla ulaşır ve içerisinde gazlar hacimce genişleyerek gözenekli hale gelirler [24].

Katkılı hafif çimento üretiminde, hafif agrega olarak volkanik materyallerin kullanımı düşük sera gazı emisyonu ve sürdürülebilir yapıların oluşumuna olanak sağlar [25, 26]. Dünya çapında, yıllık 19,6 milyon ton pomza üretimi gerçekleştirilmiş olup, Türkiye yıllık 4,2 milyon tonluk üretimi ile dünya çapında dominant üretici konumundadır [27]. Diğer önde gelen ülkeler, İtalya, Şili, Ekvador, Etiyopya, Fransa, Almanya, Yunanistan, İspanya ve Amerika Birleşik Devletleri'dir [27]. Pomza, normal hafif yapı taşları, beton ve çeşitli yapı ürünleri için agrega olarak kullanılmaktadır [28]. Avrupa'da, pomzalı çimentolar hafif beton tüketiminin %3'ünü oluşturmakta iken, Almanya'da toplam tüketimin %70'ini oluşturmaktadır. Çimentoda katkı olarak pomza ve perlit kullanımının çimento harcında donmaya karşı dirençli olmasının yanısıra, çimento harcında ve betonda çözülmelere dirençli olduğu saptanmıştır [29].

Devlet planlama teşkilatının 2001 ve 2015 yıllarında yayınladığı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporlarına göre ülkemiz, pomza rezervleri açısından oldukça önemli bir potansiyele sahiptir. Araştırılmış alanlarda yaklaşık 1,4 milyar m³ kaliteli pomza rezervi olduğu, orta ve düşük kaliteli pomza rezervleri dahil edildiğinde, pomza rezervinin yaklaşık 3 milyar m³'e ulaştığı belirtilmiştir. Pomza rezervlerinin İç Anadolu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yoğunlaşmış olmasına rağmen, Akdeniz ve Ege bölgelerinde de pomza rezervlerine rastlanılmakta ve üretim faaliyetleri görülmektedir. Devlet planlama teşkilatının 2001 yılında yayınladığı Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu'na göre araştırma yapılan illere göre pomza rezervinin dağılımı Çizelge 2.1'de verilmiştir [30, 31].

Pomzanın %90'lık kısmı inşaat sektöründe ve %9,6'sı ise tekstil sektöründe kullanılmaktadır. Pomza üretiminde, düşük enerji ve yatırım gerektiğinden inşaat sektöründe kullanımı son yıllarda hızla artmaktadır. Bu sektörde pomza, hafif beton elde edilmesinde agrega olarak kullanılmaktadır [31].

Pomzadan yapılan betonun normal betondan çok daha hafif olması nedeniyle taşınması ve kullanılmasındaki kolaylıklar, zaman ve işçilikten tasarruf sağlar. Zemin mekaniği açısından da temele gelen yük azalacağından yaklaşık %17 oranında inşaat demirinden tasarruf sağlanabilmektedir [32].

Çizelge 2.1. İllere göre pomza rezervinin dağılımı [30]

YERİ	REZERV MİKTARI (m ³)	REZERV KATAGORİSİ
Nevşehir-Avanos-Ürgüp	404.412.834	A+B
Derinkuyu	48.660.500	C
Kayseri-Gömeç	13.250.000	A+B
Kayseri-Develi	58.500.000	A+B
Kayseri-Talas-Tomarza	241.000.000	A
Kayseri-Talas-Tomarza	284.000.000	B
Bitlis-Tatvan	1.100.000.000	B
Van-Erciş-Kocapınar	154.625.000	A+B
Van-Mollakasım	5.950.000	A+B
Ağrı-Patnos	27.812.000	A+B
Ağrı-Doğubeyazıt	26.875.000	A+B
Kars-Iğdır-Kavaktepe	40.156.250	B
Kars-Diğor	11.718.750	B
Kars-Sarıkamış	1.875.000	B
Ankara-Güdül-Tekköy	8.070.000	A+B
Isparta-Gölcük	30.983.250	A+B+C

A: Görünür Rezerv, B: Muhtemel Rezerv, C: Mümkün Rezerv

2.2.1. Pomza ve Hafif Yapı Malzemeleri Hakkındaki Önemli Çalışmalar

Vural ve diğerleri [33], 1/3 oranında betonarme yapı kurarak, gerçek boyutlardaki betonarme yapıların enerji karakteristiğini saptamak için çalışma yapmışlardır. Bu çalışma kapsamında, Türkiye geneli inşaatlarda kullanılan 6 farklı duvar yapı elemanı kullanılmıştır. Bunlar, gazbeton, bims briket, yatay ve dikey briket, blok tuğla ve boşluk duvarlarıdır. Çalışma kapsamında, ölçekli bina örneğinin iç sıcaklığı sabit tutularak farklı dış sıcaklıklar için, ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Elde edilen yüzey sıcaklığı verilerinin yorumlanması ile, kullanılan duvar tipleri enerji verimliliği, ısı iletkenlik katsayısı değerleri hesaplanarak ve bu 6 farklı duvar tipiyle kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, bims için 0,19 W/mK, gazbeton için 0,24 W/mK, boşluk duvarı için 0,15 W/mK, blok tuğla için 0,68 W/mK, yatay ve dikey briket için 0,45 W/mK ısı iletkenlik değerlerine

ulaşmıştır. En düşük ısı iletkenlik katsayısı değerine boşlu duvarı, ikinci olarak bims ve yüksek ısı iletkenlik katsayısı değerine sahip ürün ise blok tuğla olmuştur.

Demiral [34], hafif yapı malzemesi olarak, düşük birim hacim ağırlıkları ve düşük ısı iletkenlik katsayıları sebebi ile EPS (Genişletilmiş Polistiren Köpük) ve pomza kullanmaktadır. Çalışmanın amacı, pomza katkılı hafif beton ve EPS malzemelerin ısı iletkenlik ve dayanıklılık açısından optimum kullanım boyutlarını belirlemektir. Bu kapsamda, bahsi geçen malzemeler farklı kalınlıklarda ısı iletkenliği ve dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonuçlarına göre, ısı iletkenlik katsayısı açısından ve basınç dayanımı açısından en uygun kalınlıklar EPS için 40 mm ve pomza blok için 20 mm'dir.

Amato [35], duvarcılık için hafif beton birimleri yapmak amacıyla pomza kullanımı gösteren bir çalışma yapmıştır. Hafif beton birimlerin üretimi için çeşitli formüller önerilmiştir. Ardından, bu formüllere göre üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Pomza katkılı hafif betonların basınç dayanımları, 3. gün için 14,55 MPa, 7. gün için 16,22 MPa ve 28. gün için 22,05 MPa sonuçlarına ulaşmıştır. Hafif betonların tasarımları hazırlanmış olup yatay ve dikey yükler altında kırılma, çatlama deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, pomzanın hafif beton birimlerin üretimi için kullanıldığında, uygun mekanik karakter sergilediği ileri sürülmüştür.

Hossain [36], hafif beton üretiminde kaba agrega olarak ve volkanik pomzanın kullanımının uygunluğunu araştırmışlardır. Çimentonun yerine ağırlıkça % 0–25 pomza agrega kullanılarak pomzanın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin taze ve sertleşmiş beton üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında, numunelerin sertleşme süreleri, basınç dayanımları, kuruma büzüşmeleri, yoğunlukları ve elastiklik modülleri deneyleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda; çimento harcında, pomza içeriğinin artması ile çimentonun sertleşmesi için geçen sürenin arttığı, yeterli dayanıklılığa, uygun yoğunluğa, kabul edilebilir görünür gözenekliliğe ve su geçirgenliğe sahip olduğu belirtilmiştir.

Hossain [37], hafif beton üretiminde volkanik cürufun kaba agrega olarak kullanımı ve üretilen numunelerin özelliklerini incelemiştir. Farklı oranlarda volkanik cüruf kullanılan hafif beton numunelerin işlenebilirlik, yüzeysel emme, çekme, basınç dayanımı ve su geçirgenliği incelenmiştir. Betonun hafif beton kabul edilmesi için uygun yoğunluğa ve basınç dayanımına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fakat kontrol örneği ile kıyaslandığında düşük elastisite modülü, yüksek geçirgenliğe sahip olduğu tespit edilmiştir.

Hossain [38], cürufu çimentoda katkı maddesi olarak kullanımı için ağırlıkça farklı oranlarda çimentodan ikame edilerek harç numuneleri üretmiştir. Hafif beton için cüruf ağırlıkça, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında çimentoya eklenmiştir. Üretilen örneklerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, alkali silika reaksiyon dayanımı araştırılmıştır. Hafif betonların işlenebilme, hava içeriği, yoğunluğu, ısı geçirgenliği ve basınç dayanımı testleri yapılarak incelenmiştir. Sonuç olarak, basınç dayanımları çimento içeriğine göre 26 MPa ile 34 MPa aralığında olduğu belirlenmiştir. Isıl iletkenlik sonuçları incelendiğinde 0,15 ile 0,43 W/mK aralığında değerlere sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

Kozak ve Ünal [39], agrega olarak Isparta pomzası ve Afyonkarahisar tufünün ayrı kullanılması durumunda hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırmışlardır. 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm tane boyutlarına öğütülmüş agregalar kullanılmıştır. 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm tane boyutlarına karşılık sırası ile ağırlıkça %45, %35, %20 agrega ikame edilmiştir. İki farklı agregadan üretilen betonlar üzerinde; ısıl iletkenlik, birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri ölçülmüştür. Çalışmaların sonucunda, çimentoların miktarı, kullanılan agregaların miktarına göre arttıkça basınç dayanımların arttığı gözlemlenmiştir. Isıl iletkenlik katsayı değeri, çimento miktarının artması ile artmakta olup, pomza tane boyların azalmasına bağlı olarak da düşmektedir. Ayrıca, tuf içeren numunelerin pomza içeren numunelere göre basınç dayanımları daha düşük, ısıl iletkenlik katsayı değerleri daha yüksek ve birim hacim ağırlıklarının daha yüksek çıktığı saptanmıştır.

Şimşek ve diğerleri [40], 150x150x150 mm boyutlarında pomza katkılı hafif betonlar yapılmıştır. Bunlar, C20 beton hedeflenerek, 0 - 4 mm, 4 - 8 mm ve 8 - 16 mm tane boylu pomzalar kullanılarak üretilmiş olup, yoğunlukları 1809 - 1787 kg/cm³ arasında değişmektedir. Bu betonların 28 günlük basınç dayanımları 22-27 MPa arasında değişmektedir.

Özdemir [41], su emme miktarlarının yapı malzemelerinin cinsine göre değişiminin belirlenmesi için, doğal ve yapay yapı malzemelerinin su emme değerlerini hesaplamıştır. Andezitik tuf, traverten kireçtaşı ve granit gibi doğal yapı malzemeleri ile gazbeton beton ve bims ürünlerinin su emme miktarlarını ölçmüştür. 0.67 g/cm³ kuru yoğunluğa sahip gaz betonun kütlece su emme miktarı %89.4; 0.97 g/cm³ kuru yoğunluğa sahip bimsin kütlece su emme miktarı %33.1; 2.09 g/cm³ kuru yoğunluğa sahip betonun kütlece su emme miktarı %9.1; 2.26 g/cm³ kuru yoğunluğa sahip andezitik tufün kütlece su emme miktarı %3.9; 2.47 g/cm³ kuru yoğunluğa sahip travertenin kütlece su emme miktarı %0.9; 2.59

g/cm^3 kuru yoğunluğa sahip kireçtaşının kütlege su emme miktarı %1.2; ve 2.67 g/cm^3 kuru yoğunluğa sahip granitin kütlege su emme miktarı %0.4 olarak hesaplamıştır.

2.3. Manyezit

Manyezit; formülü MgCO_3 olup, teorik olarak bileşiminde, %52.3 CO_2 , %47.7 MgO ve çok az miktarda Fe_2O_3 ve SiO_2 bulunabilen, Mohs Sertliği 3.4-4.5 arasında, özgül ağırlığı $2.9\text{-}3.1 \text{ g/cm}^3$ olan mineraldir. Rengi beyaz, sarı veya gri ve kahverengi arasında değişir (şekil 2.2) [42].



şekil 2.2. Manyezit

Manyezitin en büyük kullanım alanı refrakter sanayiidir. Üretilen manyezitin % 90'dan fazlası kalsine manyezit ve sinter manyezit olarak refrakter tuğla imalatında kullanılmaktadır. Türkiye'nin bilinen manyezit rezervi 111 milyon ton civarındadır. Bu rezervlerin çok büyük bir bölümü Eskişehir, Kütahya ve Konya illerinde olup bunlar genellikle jel manyezit oluşumlarıdır. Bunun dışında Çankırı-Eskipazar, Ilgaz ve şabanözü, Erzincan-Çayırılı, Refahiye, Erzurum-Aşkale civarlarında da manyezit potansiyelleri bulunmaktadır. Ham manyezit üretiminin bir kısmı sinter ve kalsine manyezit imalatı amacıyla yurtiçinde tüketilmekte, bir kısmı ise ham olarak ihraç

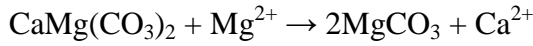
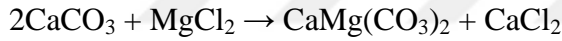
edilmektedir. 2011 yılında manyezit ihracatı 276 bin ton, ithalatımız ise 58,5 bin ton olarak gerçekleşmiştir [31].

2.4. Manyezit Yataklarının Jenetik Tipleri

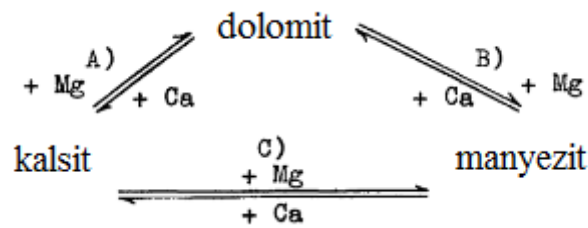
Manyezit yatakları, dolomit ve serpantin gibi magnezyumca zengin mineral içeren kayalarla ilişkilendirilmektedir. Kristalin manyezit, magnezyum elementini, hidrotermal koşullar altında, karbonatlı kayalardan sağlar. Jel manyezit, CO₂'in serpantinlerle hidrotermal etkileşiminden veya ayrışma-sızma sayesinde magnezyum getirimi ile oluşur. Manyezit ayrıca sedimanter türeme ile oluşabilir. Ek olarak, manyezit deniz suyundan ve yeraltı suyundan elde edilebilmektedir [43].

2.4.1. Kristalin Manyezit

Kristalin manyezit, dolomitin, kireçtaşının, kumlu ve killi şeyillerin, orojenik ve magmatik süreçler ile hidrotermal-metasomatik raplasman yolu ile oluşmaktadır (Pireneler, Doğu Alpler, Karpatlar, Urallar) [43]. Aşağıdaki eşitliğe göre (Babcan, 1975; Aktaran: Kuzvart, 1984) [43]:



Şematik olarak:



Şekil 2.3: Kalsit - Dolomit - Manyezit reaksiyonları [43]

Reaksiyon "A", 100 °C'nin altında gerçekleşirken; reaksiyon "A" ve "C", 150 °C'de eş zamanlı olarak gerçekleşirler (dolomit ve manyezit karışımı oluşur). Sıcaklığın 200 °C'ye ulaşmasıyla sadece Reaksiyon "C" gerçekleşir. Reaksiyon "B" ise, 100 °C'de sadece %1-2 manyezit oluşumu sağlarken, 150 °C %3-15, 200 °C %20-35 manyezit ve brüsit oluşumunu sağlar (Şekil: 2.3) [43].

Magnezyumlu bileşikler, asidik veya bazik magma ile ilişkili hidrotermal sularla taşınmaktadır. Fakat yüzey suları nispeten daha az magnezyum içerdiğinden dolayı magnezyumun kendisinin, derinlerdeki dolomitlerden geldiği düşünülmektedir [43].

2.4.2. Hidrotermal Jel Manyezit Yatakları

Manyezit, ultrabazik kayaların serpantinitleşmesi sonucu oluşabilir. Manyezitlerin kökeni, hidrotermal solüsyonlar ile serpantinitlerden sızan magnezyum ve atmosferdeki CO₂'tir [43].

Hidrotermal jel manyezit yataklarının oluşumunun uygun koşulları, düşük sıcaklık ve düşük basınç ortamlarıdır. Bu tarz oluşumlar, 200 metreden daha derinlerde gözlenmemektedir. Bununla birlikte yüksek sıcaklık koşullarında oluşan manyezitler daha büyük tane boylarına sahip olduğu önerilmiştir [43].

Kraubath yatakları (Avusturya), 6 metre kalınlıkta damar şeklinde oluşuklardır, 140 metre derinliğe kadar inerler. Santa Clara dyatakları (Kaliforniya, A.B.D.), 1,5-3 metre kalınlığa sahip, damar tipi olup, 150 metre derinliğe ulaşmaktadır. Kanada, Quebec'de manyezit damarı, 10 metre kalınlığa sahip olup serpantinit ile kontakt haldedir [43].

2.4.3. Süzülme ile Oluşan Jel Manyezit Yatakları

Bu tip manyezit yatakları, serpantinitlerin CO₂ içeren yeraltı suları tarafından alterasyonu ile oluşurlar. Fakat magnezyum haricinde diğer bazı bileşenler de yeraltı suları ile gelebilir. Serpantinitten ayrılan Al ve Fe³⁺, magnezyum içeren çözeltiliye katılırlar ve ardından serpantinitin yüzeyinde birikirler. Bu durum magnezyum içeren çözeltinin pH'ının artmasına sebep olur. pH'ın 11 olması ile magnezyumlar, Mg(OH)₂ veya MgCO₃.XH₂O olarak çökelirler. Bununla beraber çözeltideki diğer bileşenler de manyezit yataklarında yer alır. Bu mekanizma, Avusturya Kraubath'da kimyasal analizleri yapılan yeraltı suları ile kanıtlanmıştır. Buna göre pH'ı 8,4 – 9 arası olan sular 300 – 600 mg/L çözülmüş bileşenler içerir, bu çözeltinin kimyasal analizine göre; %84 MgO, %4 CaO, %5 SiO₂, %2 Al₂O₃ ve %1 SO₃ içerdiği gözlemlenmiştir. Serpantinitten ayrılan magnezyumlar, yeraltı suyu zonunda çatlaklar boyunca birikir. İlk olarak muhtemelen Mg(OH)₂, ardından rekristalizasyon ile MgCO₃.XH₂O oluşur. Rekristallenme yavaş ve bu esnada dehidrasyon gerçekleşirse, hacimce %5 - %25 arası gözenek oluşur. Bu tür jel manyezit yataklarının

damaları, 0,2 - 0,3 metre kalınlıkta gözlemlenir. Bu manyezit yatakların %20'si işlenebilir [43].

Bu yatakların tipik örnekleri, Urallardaki Khalilovo yatakları, Almanya'nın doğusundaki St. Egidien yatakları, Polonya ve Yugoslavya'da Mramor yataklarıdır (Manojlovic, 1970; Aktaran: Kuzvart, 1984) [43].

2.4.4. Sedimanter Manyezit Yatakları

Sedimanter manyezit yatakları, lagün ve tuz göllerinde veya tatlı su göllerinde oldukça olağan üstü koşullarda altında oluşurlar. Tuzlu sularda manyezit, alkali indirgeme ortamında yüksek seviyede $MgSO_4$ ve diğer tuzların içeriği ile, yüksek CO_2 kısmi basıncı (360 mg/L'nin üzerinde) ve düşük Ca içeriğinde (50 mg/L'nin altında), H_2S , NH_3 ve organik tuzların varlığı ve artan su sıcaklığı gerekmektedir. Sedimanter manyezit yatakları, dolomiti, kireçtaşını ve piriti de barındırırlar. Magnezyum, muhtemelen ilk olarak $Mg(OH)_2$, ardından $MgCO_3 \cdot XH_2O$ ve son olarak suyunu kaybederek $MgCO_3$ 'e dönüşür. Wakefield (Kanada) yataklarında kireçtaşlarının içinde, 1,5 - 3 mm arası çapta rekristalize olmamış $Mg(OH)_2$ bulunur. Manchuria'da (Çin), metamorfizma ile rekristalize olmuş manyezit yataklarının boyutları 200 ile 2000 metre arası değişmektedir. Bu yatak dolomitler ile ilişkili olup, dereceli geçişe sahiptir. Bu kadar fazla miktarda magnezyumun kaynağının hidrotermal çözeltilerin olması olanak dışı görülmekte, bu yüzden sedimanter kökenli yatak olduğu hipotezini desteklemektedir [43].

Tatlı su göllerindeki manyezitin, magnezyum kaynağının, magma kaynaklı sıcak çözeltilerden veya ultrabazik kayaçları ve serpantinileri yoğun olarak aşındıran yüzey sularından olabileceği ileri sürülmüştür [43].

İlk tip olan sedimanter manyezit yataklarına örnek olarak Yugoslavya'daki Bela Stena ve Beli Kamen yatakları verilmiştir. Bela Stena 250 x 190 x 95 m boyutlarındaki manyezit yatakları, marnlar, kumtaşları ve şeyller ile çevrelenmiştir. Beli Kamen'de ise onlarca metre kalınlığında tatlı su marnlarında, kumtaşı ve tüflerle beraber bulunur (Illic ve Popovic, 1970; Aktaran: Kuzvart, 1984) [43].

İkinci tip, kayaç alterasyonu ile oluşan manyezit yatakları dolomit ile birlikte bulunurlar. Bu oluşum değişken iklim koşulları ile açıklamıştır. Sıcak dönemlerde dolomit düşük CO_2 kısmi basınç koşullarında gelişmiş ve soğuk dönemlerde magnezyum karbonat yüksek CO_2 kısmi basınç koşullarında oluşmuştur. Bu tip oluşuma Yunanistan'da Servia'nın batısında

Vourinos dağlarında rastlanmıştır. Manyezit, marn, kalkerli kil ve kum ile aralanmalı bulunurlar [43].

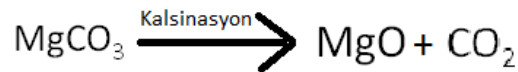
2.4.5. Deniz Sularından MgO Elde Edilmesi

Deniz suyunda veya mineralli yeraltı suyunda bulunan $MgCl_2$ ve $Ca(OH)_2$ 'in reaksiyonu ile $Mg(OH)_2$ oluşumu mümkündür [43]. Oluşan $Mg(OH)_2$ 'in kalsinasyon işlemi ile refrakter malzeme yapımında kullanılan MgO elde edilebilmekte olup, bu yöntem ile ortalama 1 litre deniz suyundan 2,1 gram MgO üretilmektedir [43].

2.5. Magnezyum Oksiklorür Çimentosu (Sorel Çimentosu)

Sorel 1867'de, kalsine manyezit ile magnezyum klorür çözeltisinin karışımı ile çimento elde etmiştir [7]. Bu tip çimento, Magnezyum Oksiklorür çimentosu veya Sorel çimentosu olarak adlandırılmaktadır. Sorel çimentosunun, Portland çimentosuna göre çeşitli alanlarda üstünlüğü bulunmaktadır. Sertleşmesi esnasında ıslak küre ihtiyaç duymaz, yüksek yangın dayanımı vardır, düşük ısıl iletkenliğe sahiptir ve aşınmaya karşı iyi direnç gösterirler, boyadan yağdan etkilenmezler. Sorel çimentosunun hızlı yerleşmesi ve sertleşmesinin yanı sıra, yüksek miktarda farklı çeşitlerde dolgu malzemelerinin bağlama kabiliyetleri vardır [8, 9].

Saf halde bulunan manyezit cevherleri öğütülerek kalsinasyon işlemine tabi tutulmaktadır. Bu işlem esnasında manyezitte bulunan CO_2 yapıdan ayrılarak MgO oluşur.



$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ve su ile çözelti hazırlanmaktadır. Hazırlanan çözeltilere MgO eklenerek çimento karışımı elde edilmektedir. Son olarak, hazırlanan çimento karışımı kürlenmeye bırakılmaktadır. Sorel Çimentosunun yapısında, ham maddelerin molar oranlarına bağlı olarak çeşitli fazlar gerçekleşmektedir. Bu fazlar:

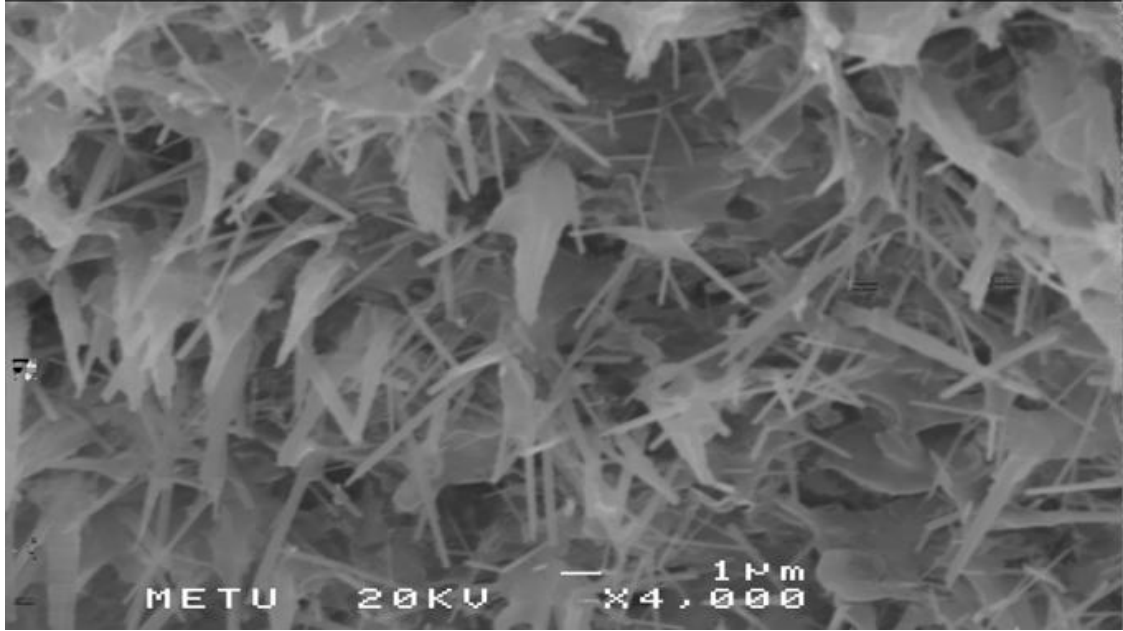
- $2Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 4H_2O$ (faz 2)
- $3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ (Faz 3)
- $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ (Faz 5)
- $9Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 5H_2O$ (faz 9)

Bu fazlardan Faz 3 ve Faz 5 reaksiyonları oda sıcaklıklarında gerçekleşirken faz 2 ve faz 9 reaksiyonları 100 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir [9, 8, 13, 14].

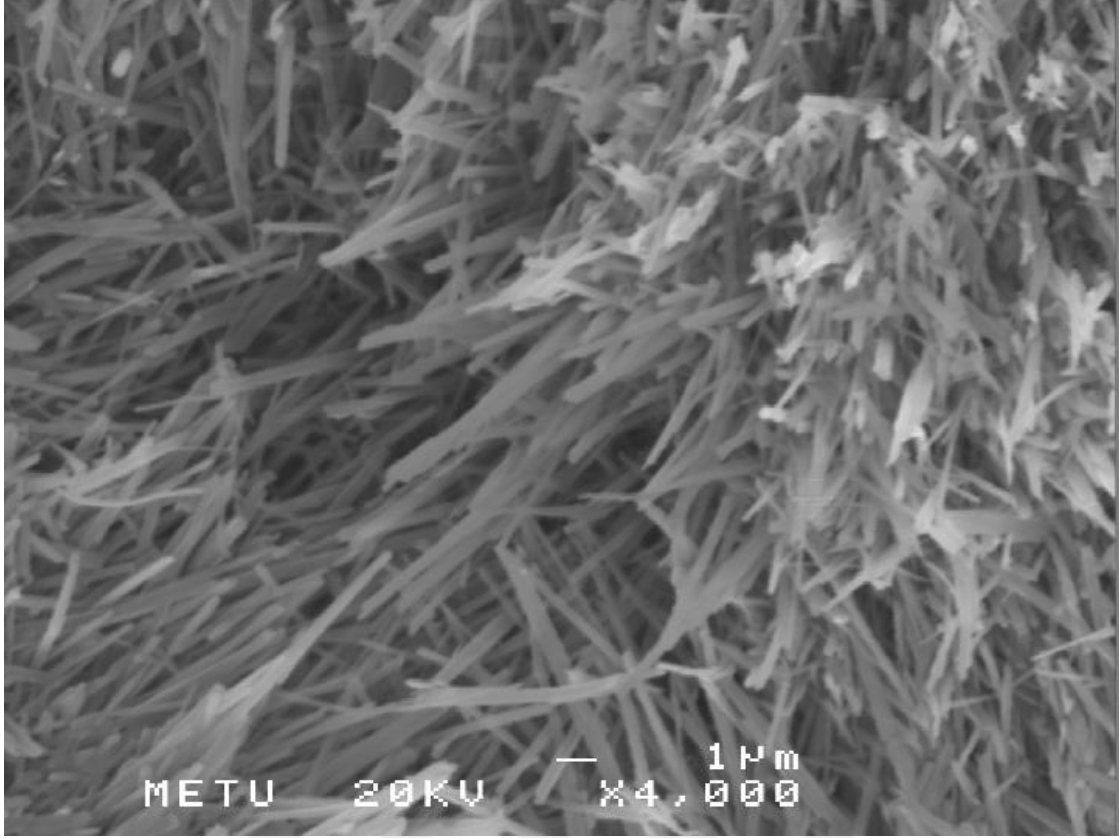
Sertleşmiş çimento harcında, ana 2 faz bulunmaktadır, Faz 3 ve Faz 5'dir. Faz 5, çimento oluşumu ile iğnemi, iplikli kristaller oluşmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüsünde (Şekil 2.4'de) olduğu gibi nano teller birbirine kenetlenmiş durumdadır. Kristal büyüme esnasında kristallerin kalabalıklaşması ve alan eksikliğinden dolayı daha yoğun bir yapı oluşur. Bundan dolayı kristaller daha fazla kenetlenerek daha kuvvetli bağ oluştururlar [11, 12].

Faz 5'in bağ gücü, boşluk doldurma özelliği ve minimum boşluklu yoğun mikro yapıya bağlıdır [15, 16].

Öztürk ve diğerlerinin [44] yaptığı çalışmada Faz 3 ve Faz 5 kristal yapılarını taramalı elektron mikroskop ile görüntülemişlerdir. Resimlere göre Faz 3 kristalleri (Şekil 2.4) ve Faz 5 kristalleri (Şekil 2.5) kıyaslandığında MgO/MgCl₂ oranı 5/1 ve üzeri oranlar için iğnemi kristallerin oluşumunun daha fazla olduğu, aynı oran 3/1 olduğu takdirde iğnemi kristallerin oluşumunun daha sınırlı hale geldiğini raporlamışlardır.



Şekil 2.4. Sorel çimentosu içerisindeki Faz 3 kristal yapıları [44]



Şekil 2.5. Sorel çimentosu içerisindeki Faz 5 kristal yapıları [44]

2.6. Magnezyum Oksiklorür Çimentosunun Özelliklerini Etkileyen Faktörler

- Aktif Kireç Miktarı
- Magnezyum Oksit'in (MgO) Reaktivitesi
- Kalsine Edilmiş MgO Tozlarının Tane Boyu
- Manyezitin Kalsinasyon Sıcaklığı
- Ham Maddelerin Molar Oranları

2.6.1. Aktif Kireç Miktarı

Shand' a göre [16], aktif kireç, toplam kireç miktarının $MgCl_2$ ile reaksiyona girebilen kısmıdır. Bunlar CaO , $Ca(OH)_2$ ve bazı kalsiyum silika formudur. Aktif kireç miktarının %2,5'i aşmaması istenir. Aktif kireç miktarının artması, dayanımın düşmesine yol açar. Bu etki $MgSO_4$ ilavesi ile aktif kireçten $CaSO_4$ 'a dönüşmesi ile azaltılabilir.

2.6.2. Magnezyum Oksit'in Reaktivitesi ve Tane Boyu

Li ve Chau [45] çalışmasında, üç farklı manyezit yığınının (A, B ve C yığınları) reaktivitesini 100 ml asetik asit ile karıştırarak ölçülmüş; bu işleme göre, karışımın pH derecesi en kısa sürede nötr hale gelen manyezit yığınının, en reaktif magnezyum oksit olacağını ileri sürülmüştür. Bu deneye göre, en reaktif yığın A, ardından B ve en az reaktif MgO yığını C olmuştur. MgO'ların reaktivitesinin Sorel çimentoları üzerinde etkilerini belirlemek için aynı ham madde oranlarında çimento karışımları hazırlanmıştır ve bu çimentoların ilksel sertleşme zamanları ve 3., 7., 14., ve 28. günlerdeki basınç dayanımları kıyaslanmıştır. MgO'ların reaktiviteleri azaldıkça ilksel sertleşme süreleri arttığı gözlemlenmiştir. Yani en reaktif A yığını en hızlı sertleşen, en geç sertleşen çimento ise en az reaktif manyezit yığını ile hazırlanmış C yığını olmuştur. Fakat bu durum, basınç dayanımları için geçerli değildir. En reaktif olan A yığını ile hazırlanmış olan sorel çimentosu 3. günlük basınç dayanımı testine göre en yüksek basınç dayanımına sahip iken 28. gündeki basınç dayanımları kıyaslandığında B yığınının daha düşük ve en az basınç değerine ise C yığını ile hazırlanmış çimento olduğu raporlanmıştır. Bu fark, Scherrer eşitliğinde ortaya koyulan tane boylarından kaynaklandığı anlaşılmıştır. En küçük tane boyu değerine sahip B yığınının 28. günde en yüksek basınç dayanımına, en büyük tane boyu değerine sahip C yığından üretilen çimento en düşük basınç dayanım değerine sahip olduğu raporlanmıştır.

2.6.3. Manyezitin Kalsinasyon Sıcaklığı

Harper [11] çalışmasında, manyezitin kalsinasyon sıcaklığının Sorel çimentosu üzerindeki etkilerini araştırmak için Hindistan ve Yunanistan'dan iki farklı manyezit seçmiş olup, bu manyezit yığınlarını 600 °C, 700 °C, 800 °C, 840 °C, 900 °C, 950 °C ve 1000 °C'lerde kalsine işlemine tabi tutulmuştur. Ardından önceden belirlenmiş oranlarda hazırlanan sorel çimentoların 7., 14., ve 28. günlerdeki basınç dayanımları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre 600 °C'den 950 °C'ye kadar kalsine edilmiş manyezitler ile hazırlanan çimentoların basınç dayanımları artmaktadır. Fakat 1000 °C'de kalsine edilmiş manyezitler ile hazırlanmış olan çimentoların basınç dayanımları nispeten, 950 °C'de kalsine edilmiş manyezitler ile hazırlanan çimentoların basınç dayanımlarına göre daha düşük olduğu ileri sürülmüştür.

2.6.4. Hammaddelerin Molar Oranları

Li ve Chau [9] çalışmasında $MgO/MgCl_2$ ve $H_2O/MgCl_2$ molar oranlarının sorel çimento sisteminin üzerindeki etkilerini araştırmak için yapılmıştır. Reaksiyon ürünlerinin basınç dayanımı gelişimini ve Sorel çimento fazları için X-Işını Kırınım difraktogramlarını incelenmiştir. $MgO/MgCl_2$ ve $H_2O/MgCl_2$ molar oranları, Faz 5 için $MgO/MgCl_2$ oranı, 7-19; $H_2O/MgCl_2$ oranı ise 10 - 22 olarak belirlenmiştir. $MgO/MgCl_2$ için M harfi ve $H_2O/MgCl_2$ için H harfi kısaltma olarak kullanıldığında, molar oranlar kısaca M/H olarak gösterilmekte ve gösterime göre seçilen molar oranlar Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.2. Li ve Chau [9] çalışmasında seçilen $MgO/MgCl_2$ ve $H_2O/MgCl_2$ molar oranlar

$MgO/MgCl_2$ (M)	$H_2O/MgCl_2$ (H)						
	10	12	14	16	18	20	22
07	√	√	√	√			
09	√	√	√	√			
11		√	√	√	√	√	
13		√	√	√	√	√	
15			√	√	√	√	
17				√	√	√	√
19					√	√	√

Bu oranlara göre hazırlanmış Sorel çimentoların 3, 7 ve 14. günler aralığındaki basınç dayanımları kıyaslandığında en yüksek basınç dayanım değerine sahip karışım M13/H12 iken en düşük basınç dayanımı M07/H16'dır. Buna nedeni, M13/H12'nin ağırlıkça düşük su içeriğine (%25) sahip olduğu ileri sürülmüştür. Kıyaslamaya göre, %25 ile düşük ağırlıkça su içeriğine sahip M13/H12 en yüksek basınç dayanımına, %28 su içeriğine sahip M11/H12 ikinci en yüksek basınç dayanımına, %26 ağırlıkça su içeriğine sahip M17/H16 karışımı üçüncü en yüksek basınç dayanımına, %31 ağırlıkça oranında su içeriğine sahip M07/H10 karışımı en düşük basınç dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir. Dolayısı ile su içeriğinin tek başına sorel çimentosunun dayanımını etkilemediği saptamıştır. Karışımların X-Işınları Kırınım difraktogramları incelenmiş olup, daha keskin ve daha yoğun Faz 5 piklerini içeren karışımların basınç dayanımları daha yüksek iken, daha çok Faz 3 pikleri

içeren karışımlar nispeten daha düşük dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca benzer $H_2O/MgCl_2$ molar oranlara sahip karışımlar için daha düşük $MgO/MgCl_2$ molar oranlara sahip karışımların basınç dayanımları daha düşük olduğu belirtilmiştir.

2.6.5. Magnezyum Oksiklorür Çimentosu Hakkında Diğer Önemli Çalışmalar

Dehua ve Chuanmei çalışmalarında [46], Sorel çimentosunun faz oluşumunu incelemiş olup, MgO ve $MgCl_2$ ile doğrudan oluşmadığını ileri sürmüşlerdir. Faz oluşumu, ilk aşamada, çözünme ile Mg^{++} , Cl^- , OH^- , ve H^+ 'den oluşan iyonik bileşenlere ayrılma ile başladığını; daha sonra, H_2O ve Cl^- iyonları birbiri ile jel oluşturularak devam ettiğini; son aşamada ise çimento fazının oluşum reaksiyonu ile son bulduğunu ileri sürmüşlerdir. Çimento karışımında daha az MgO 'nun bulunması çimentoda Faz 3 oluşumuna, MgO 'nun fazlalığı ise Faz 5 oluşumuna sebep olduğunu belirtmişlerdir.

Yunsong [47] çalışmasında, köpürtme ajanı ile Sorel çimentosu karışımı hazırlanmasını incelemiştir. Fosforik asidin Sorel çimentosuna köpürtme ajanı olarak eklendiğinde, fosforik asidin çimento kristallerini kaplayarak sulu ortamda çimentoyu koruduğunu gözlemlemiştir. X-Işınları kırınım difraktogramları ile fosforik asidin, çimentonun faz oluşumuna ve kristal yapılarına zarar vermediği ortaya konulmuştur. Ayrıca, $0,15$ 'den $0,60$ g/cm^3 yoğunluklara sahip numunelerin üretilmesinin mümkün olduğu ortaya konulmuştur. Numunelerin eğilme dayanımları, basınç dayanımları, ısı iletkenlik katsayıları, gözenek açıklığı saptanmıştır. Numunelerin binalarda hafif duvar, ses yalıtımlı tavan malzemesi, soğuk ve sıcak hava koşullarında izolasyon malzemesi olarak kullanılabileceği ileri sürülmüştür.

Casella ve diğerleri [48], Sorel çimentosu ile hazırlanmış tuğlaları ele almışlardır. Çalışmada kullanılan örneklerde, depolarda bekletildiği sırada çatlakların oluşumu gözlemlenmiştir. Çatlakların oluşum sebebi olarak, çimento üzerindeki karbonasyon reaksiyonlarının oluşturduğu stres olarak açıklanmıştır. Buna benzer durum sorel çimentosu ile mermer yapılarının restorasyonunda da ortaya konulmuştur. Maravelaki ve Moraitou [49], çimento üzerindeki karbonasyon reaksiyonunu, havadaki CO_2 içeriği ve havanın nemliliği ile açıklamışlardır.

Chau ve diğerleri [50], f sınıfı uçucu külün Sorel çimentosu üzerindeki etkilerini incelemiştir. Belirledikleri molar oranların faz gelişimini X-Işınları Kırınım difraktogramları ile incelemiş olup, oluşan fazları belirlemişlerdir. Daha sonra, ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında uçucu kül eklenen örneklerin taramalı elektron mikroskobu

ile mikro yapılarını incelemişlerdir. Uçucu kül katkılı çimentoların piriz sürelerini, işlenebilirliğini, basınç dayanımlarını ve suya karşı dayanımlarını incelemişlerdir. Deneylein sonucunda, uçucu külün Sorel çimentosunun akışkanlığını ve işlenebilirliğini arttırmış olup, piriz süresini arttırdığı belirtmişlerdir. Ancak, uçucu külün Sorel çimentoların basınç dayanımlarını azalttığını, fakat suya karşı olan dayanımını arttırdığını belirlemişlerdir. Sonuç olarak, uçucu kül ile birleştirilmiş Sorel çimentoların iyi tamir harcı olabileceği ileri sürülmüştür.

Zhou ve Li [51], ekstüzyon yöntemi ile, hafif ahşap Sorel çimentosu, talaş ve / veya perlit kullanılarak kompozit yapı malzemesi üretmişlerdir. Bu kompozit ürünlerin fiziksel, çivileme ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kompozit ürünün kuru yoğunluklarının 1,0 g/cm³'e yakın oldukları ve sert doğal ahşap gibi çivilebilir olduğu tespit edilmiştir. Ancak ortam sıcaklığının artması ile numunelerin eğilme mukavemetinin azaldığını belirtmişlerdir. Kullanılan talaşın %50'si perlit ile değiştirildiğinde, kompozit yapıda daha az şişme gözleendiği ve yüksek sıcaklığa karşı daha iyi performans sergilediği ileri sürülmüştür.

Chau ve Li [15], Sorel çimentosunun mikro yapısını ve farklı reaksiyon fazlarının kristal yapısını incelemek için çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, Sorel çimentosunun, granüler yüzeyli, farklı formlarda toplanmış iğne şekilli kristallerden oluştuğu belirlenmiştir. Faz 3 kristallerin mikro yapısı genellikle bozuk şekilli olduğunu, ancak Faz 5 kristalleri, daha homojen ve birbirleri ile daha kenetli iğne şeklinde kristallerden oluştuğunu belirtmişlerdir. Birbiri içinde sıkı büyüyen içiçe geçmiş bu yapının Sorel çimentosunun sağlamlığını oluşturan önemli bir mekanizma olduğu ileri sürülmüştür. Faz 3 ve Faz 5 kristalleri haricinde taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde, tabakalı halde Brusit kristali gözlemlenmiştir. XRD analizlerine göre Scherrer eşitliği ile Faz 3 ve Faz 5 kristallerinin boyutlarının sırası ile yaklaşık 20 nm ile 30 nm arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

2.7. Manyezit ile Hazırlanan Diğer Çimento Tipleri

Shand [16], manyezit hammaddesi kullanılarak hazırlanan iki farklı çimento türünden bahsetmiştir. Bunların ilki, Magnezyum Oksisülfat çimentosu olup, söz konusu bu çimento magnezyum klorür çözeltisi yerine manyezitin magnezyum sülfat çözeltisinde reaksiyon vermesiyle oluşur. Sorel çimentosu ile benzer özellikler gösterdiği ileri sürülmüştür. Magnezyum Oksisülfat çimentosunun dört farklı fazı vardır. Bu fazlar:

- $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (form 5)
- $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ (form 3)
- $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Sadece form 5 ve form 3 oda sıcaklığında stabil olduğu belirtilmiştir. Magnezyum Oksisülfat çimentosu, hafif yalıtım panelleri üretiminde kullanılmaktadır [52]. Ayrıca Magnezyum Oksisülfat çimentosu, Magnezyum Oksiklorür çimentosu gibi suya karşı dayanıksızdır [16].

Diğer çimento türü ise Magnezyum Fosfat Çimentosudur. Kalsine manyezit ile fosfat çözeltilisinin reaksiyonu sonucu oluşmaktadır [16].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kalsine Manyezit (MgO)

Sorel çimentosunun ana ham maddesi olan kalsine manyezit, Kütahya ilinden Özmaltaş Madencilik firmasından temin edilmiştir (Şekil 3.1). Manyezitler 950 °C’de 2 saat boyunca kalsine edilmiştir. Özmaltaş Madencilik firmasının ürün kataloğunda yer alan, kalsine manyezitin kimyasal analiz sonucu Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kalsine manyezit

Çizelge 3.1. Kalsine manyezitin kimyasal analiz değerleri

MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Ateşte Kayıp
%85	%5,5	%2,5	%1,25	%0,10	%5

3.1.2. Magnezyum Klorür Hegzahidrat (MgCl₂.6H₂O)

Sorel çimentosunun çözeltisini oluşturmak için gerekli olan magnezyum klorür hegzahidrat (MgCl₂.6H₂O) Alkan Kimya’dan alınmıştır (Şekil 3.2).



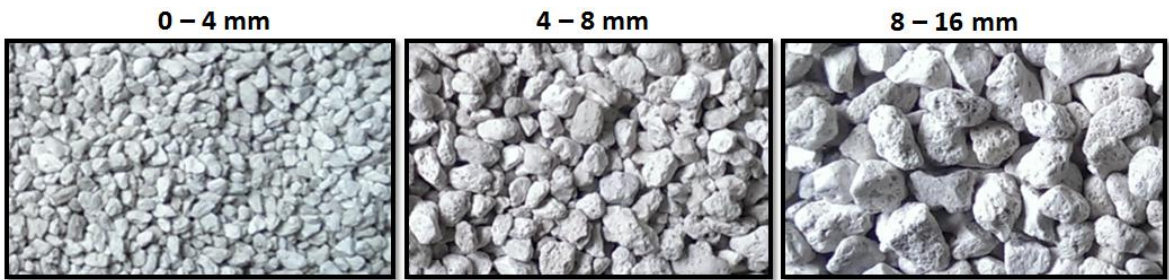
Şekil 3.2. Magnezyum klorür hegzahidrat (MgCl₂.6H₂O)

3.1.3. Su

Saf su ve şebeke suyu, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Kil Ayırma Laboratuvarından temin edilmiştir.

3.1.4. Pomza

Nevşehir ilinde faaliyet gösteren Tekno Bims firmasından 0-4 mm, 4-8 mm ve 8-16 mm tane boyutlarına sahip üç farklı pomza örnekleri temin edilmiştir (Şekil 3.3). Ayrıca pomza tanelerinin boylarına göre, üreticiye ait birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Pomza numuneleri

Çizelge 3.2. Pomzaların tane boylarına ait birim hacim ağırlık değerleri

Pomza Tane Boyu	0 – 4 mm	4 – 8 mm	8 – 16 mm
Kuru B.H.A. (g/cm ³)	0,857	0,565	0,440
Doğal B.H.A. (g/cm ³)	0,968	0,680	0,575

3.2. Yöntem

3.2.1. Sorel Çimentolarının Hazırlanması

Deneysel çalışmalara başlamadan önce, yapılan literatür araştırmalarında Magnezyum oksiklorür çimentosunda Faz 5’in oluşumu, çimentonun mekanik özellikleri açısından önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu kapsamda iki farklı Faz 5 oluşturan oranlar, literatür araştırmaları ile saptanmıştır. Bu oranlardan ilki Li ve Chau’nun çalışmasından [9] alınmıştır. Bu makaleden tercih edilen ham madde molar oranları, MgO/MgCl₂ oranı 13/1, H₂O/MgCl₂ oranı 12/1’dir. Bu molar oranların, yüzde ağırlıkça oranları karışığı, MgO %63, MgCl₂ %12 ve H₂O %25’dir. İkinci oran ise Chau ve Li’nin çalışmasından [15] alınmıştır. Bahsi geçen yayına göre molar oranlar, MgO/MgCl₂ oranı 6.8/1, H₂O/MgCl₂

oranı 12/1'dir. Bu molar oranların ağırlıkça oranları, MgO %47, MgCl₂ %16 ve H₂O %37'dir. Bu iki oranların seçilmesinin en önemli gerekçelerinden biri, H₂O/MgCl₂ molar oranlarının birbirine eşit olması nedeniyle, MgO'nun molar olarak farklılığının numuneler üzerindeki etkilerinin ortaya konulmasıdır. Molar oranlar isimlendirilirken MgO/MgCl₂ oranı için Mxx ve H₂O/MgCl₂ oranı için Hyy kısaltmaları kullanılmıştır. Birinci çimento karışımı için M13/H12, ikinci çimento karışımı için M6.8/H12 şeklinde kısaltılmıştır.

Sorel çimentoların isimlendirilmelerinde, M13/H12 çimento karışımı için “#1” ve çimentoda kullanılan suyun cinsine göre saf su ise “#1S”, şebeke suyu ise “#1M” şeklinde isimlendirilmiştir. Aynı şekilde M6.8/H12 çimento karışımı için “#2”, çimento saf su ile hazırlanmış ise “#2S”, şebeke suyu ise “#2M” şeklinde isimlendirilmiştir (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Sorel çimentoların ham madde oranları ve adlandırılması

Numune Kodu	Hammaddelerin oranları (MgO:MgCl ₂ :H ₂ O Molar)	Ağırlıkça % MgO	Ağırlıkça % MgCl ₂	Ağırlıkça % H ₂ O
#1S (saf su)	13 MgO : 1 MgCl ₂ : 12 H ₂ O (M13/H12)	63	12	25
#1M (şebeke suyu)				
#2S (saf su)	6.8 MgO : 1 MgCl ₂ : 12 H ₂ O (M6.8/H12)	47	16	37
#2M (şebeke suyu)				

Sorel çimentolar, ilk olarak önceden belirlenen oranlara göre, MgCl₂.6H₂O ile su karıştırılarak çözeltinin hazırlanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Ardından, hazırlanmış olan çözeltiliye kalsine edilmiş manyezitin belirlenen oranlarda eklenerek yaklaşık 3 - 5 dakika arası elde karıştırılmıştır. Hazırlanan çimento karışımı yapılacak olan deneylerin türlerine göre kalıplara dökülmüştür.

3.2.2. Pomza Katkılı Sorel Çimentolarının Hazırlanması

Tezin amacı olan hafif yapı malzemesi üretimi için, gözeneklilik büyük bir önem teşkil etmektedir. Bu sebepten dolayı çimento karışımları içinde en yüksek seviyede pomza kullanımı hedeflenmiştir. Pomza katkılı çimentoların hazırlanmasında ilk olarak, temin edilen 0-4 mm (ince), 4-8 mm (orta) ve 8-16 (iri) mm üç farklı tane boylarına sahip öğütülmüş pomzalar, katkılı çimentoların hazırlanacağı kalıplara doldurulmuştur. Bunu takiben, önceden hazırlanan iki farklı çimento karışımı pomza ile dolu kalıplara dökülüp,

kürlemeye bırakılarak tezin konusu olan hafif yapı malzemeleri elde edilmiştir. Temel olarak, 2 farklı çimento karışımı ve 3 farklı pomza boyutu ile nihai olarak 6 farklı ürün oluşturulmuştur.

Numuneler, kullanılan çimento türü ve pomza tane boyuna göre isimlendirilmiştir. M13/H12 çimento karışımında ince taneli pomza kullanılıyor ise “#1FP”, orta taneli pomza kullanılıyor ise “#1MP”, iri taneli pomza kullanılıyor ise “#1CP” şeklinde isimlendirilmiştir. M6.8/H12 çimento karışımı için, ince taneli pomza kullanılıyor ise “#2FP”, orta taneli pomza kullanılıyor ise “#2MP”, iri taneli pomza kullanılıyor ise “#2CP” şeklinde isimlendirilmiştir (Çizelge 3.4).

Çizelge 3.4. Hafif yapı malzemelerinin çimento pomza karışım oranları ve isimlendirilmesi

Numune Kodu	Çimento Harç Türü	Kullanılan Pomza Boyutu	Ağırlıkça % Çimento Harcı	Ağırlıkça % Pomza Agregası
#1CP	13 MgO:1MgCl ₂ :12 H ₂ O (M13/H12)	8-16 mm (iri)	80,66	19,34
#1MP		4-8 mm (orta)	68,49	31,51
#1FP		0-4 mm (ince)	75,74	24,26
#2CP	6.8MgO:1MgCl ₂ :12 H ₂ O (M6.8/H12)	8-16 mm (iri)	68,12	31,88
#2MP		4-8 mm (orta)	41,75	58,25
#2FP		0-4 mm (ince)	67,23	32,67

3.2.3. Yoğunluk Analizleri

Sorel çimento numunelerinin ve hafif yapı malzeme numunelerinin, yoğunluk analizleri oda koşullarında 28 günlük deney numuneleri üzerinde TS EN 772-13'e [53] uygun olarak yapılmıştır. Numune boyutları elektronik kumpas ile ölçülmüş olup aşağıdaki eşitlik ile yoğunluklar hesaplanmıştır.

$$d = \frac{m}{v} \quad \text{Eşitlik (3.2)}$$

d : Yoğunluk, g/cm³,

m : Kütle, g,

v : Hacim, cm³.

Numunelerin tartım işlemi Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Jeolojisi laboratuvarında bulunan 0.01 gr hassasiyetine sahip tartı cihazı ile yapılmıştır.

3.2.4. X-Işınları Kırınım (XRD) Analizleri

Saf manyezit, kalsine manyezit, pomza, sorel çimento numunelerinin mineral fazlarının anlaşılabilmesi için X-Işınları Kırınım analizleri yapılmıştır. Numunelerin mineral analizleri, kullanılan ham maddelerin saflıklarının belirlenmesi, çimentoların faz oluşumları, Scherrer eşitliği ile Sorel çimentosunu oluşturan kristallerin boylarının belirlenmesi gibi konuların incelenmesi için gerekli analizler olup, bu analizler Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, X-Işınları laboratuvarında bulunan Rigaku D/Max 2200 PC markalı cihaz ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4).

Örnekler: 2-70^o aralığında,

Goynometre hızı: 4^o/dk

Anot: Cu K α

Gerilim: 40 kV

Akım: 40 mA

İncelemesi yapılan manyezit, kalsine manyezit ve çimento içinde bulunan mineraller belirlenmesinde Uluslararası Difraksiyon Veri Merkezinin [54] 2004 yılı veri tabanında ve ASTM [55] kartotekslerinden yararlanılmıştır. Ek olarak, çimentonun fazlarının belirlenmesinde Li ve Chau [9] ve Maravelaki ve Moraitou [49]'dan yararlanılmıştır.



Şekil 3.4. Rigaku D/Max 2200 PC, X-Işınları Kırınım Cihazı

3.2.5. İnce Kesitlerin İncelenmesi

Pomzalara ait iki adet ince kesit, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği'nde yer alan, İnce Kesit Hazırlama Laboratuvarında hazırlanmış, daha sonra alttan aydınlatmalı mikroskop yardımı ile incelenmiş olup, ince kesitlerin fotoğrafları bilgisayar bağlantılı mikroskop ile çekilmiştir.

3.2.6. Basınç Dayanım Deneyleri

Tez çalışmaları kapsamında pomza katkılı ve Sorel çimentosu numuneler üzerinde basınç dayanım testleri yapılmıştır. Bütün basınç dayanımı testleri için numuneler 4*4*4 cm'lik ölçülerde hazırlanmış olup, yükleme hızları ve sonuçların gösterimi TS EN 12390-3'e [56] uygun yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyleri Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarında bulunan Besmak markalı 50 ton kapasiteli pres cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.5.a).

Basınç dayanım ölçümü yapılırken presin çalışması esnasında numunede çarpma etkisi oluşmaması için presin hızı TS EN 12390-3 standarda bahsi geçen 0,2 – 1,0 MPa/sn hızı aralığında olması gerekmektedir. Bundan dolayı basınç dayanım testlerinin yükleme hızı 0,3 MPa/sn seçilmiştir.

Sorel çimentoların ve hafif yapı malzeme numuneleri basınç dayanım testleri TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmış ve aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır. Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin boyutları 4*4*4 cm'dir. Sorel çimentoların basınç dayanımları 3., 7., 14., ve 28. günlerdeki değerleri verilmiştir.

$$f_c = \frac{f}{A_c} \quad \text{Eşitlik (3.1)}$$

Bu eşitlikte:

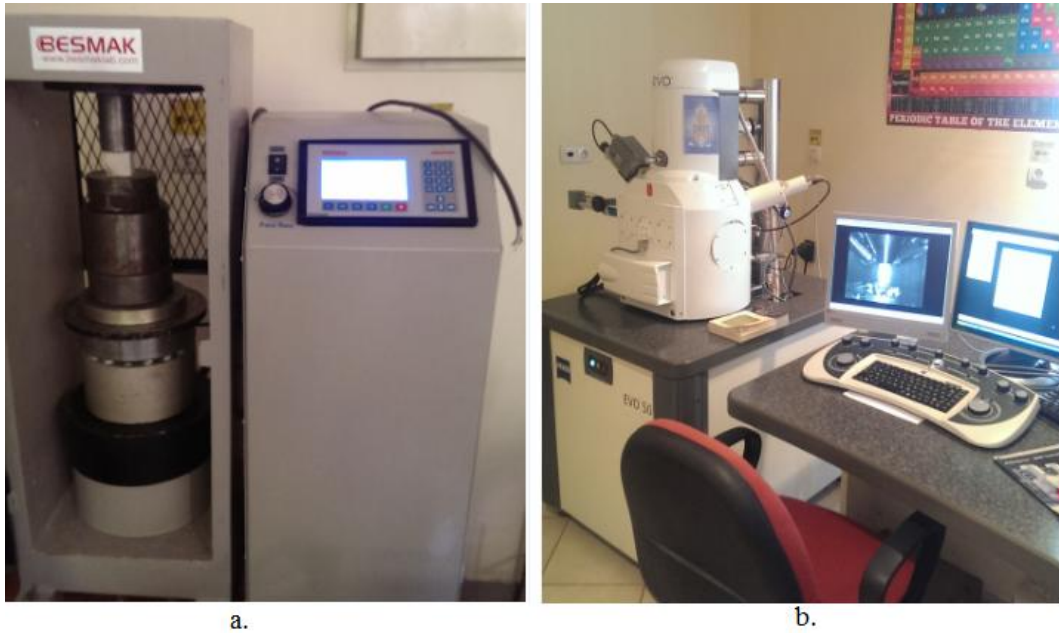
f : kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c : numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı kesit alanı, mm²,

f_c : basınç dayanımı, MPa, N/mm².

3.2.7. SEM - EDS Analizleri

Pomza numunelerinin ile hazırlanan Sorel çimentosunda oluşan fazların mikro yapıların belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen SEM - EDS analizleri, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümünde bulunan Zeiss EVO 50 markalı SEM cihaz ve bu cihaza entegre Bruker Xflash 3001 SDD ile gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.5.b).



Şekil 3.5. a) Besmak 50 ton kapasiteli otomatik pres, b) Zeiss EVO 50 taramalı elektron mikroskobu

3.2.8. Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçümü

Tez çalışması kapsamında hazırlanmış olan hafif yapı numunelerinin en önemli parametrelerinden birisi ısı iletkenlik katsayılarıdır. Farklı tane boylarındaki pomzalar ve farklı oranlarda hazırlanmış çimentolar ile oluşturulmuş numunelerin ısı iletkenlik katsayı sonuçları kıyaslanması yapılmıştır.

Isıl iletkenlik katsayısı ölçümü, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü'nün bünyesinde bulunan seramik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüm, ASTM E 1530-11'e [57] uygun olarak Unitherm 2022 markalı ısı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 3.6).

Numuneler, 2 inç (5.08 cm) çapa ve 1 cm uzunluğa sahip karotlar olarak hazırlanmıştır. Ölçümler, numuneler üzerine 40 Psi (0.28 MPa) yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bir numunenin ısı iletkenlik ölçümü, cihazın hazırlanması ile birlikte yaklaşık bir saat sürmektedir.



Şekil 3.6. Unitherm 2022 ısı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı

3.2.9. Görünür Gözeneklilik ve Su Emme Ölçümleri

Su emme, yapı malzemeleri için önemli bir parametredir. Değişken iklim ve hava koşullarına uzun yıllar boyunca maruz kalan duvar ve çatı elemanlarının su emme oranlarının bilinmesinde fayda vardır [58]. Hafif yapı malzemelerinin yüksek gözeneklilik özelliklerinden dolayı su emme oranlarının yüksek olması beklenmektedir. Ancak karışımlara katılan su iticiler veya özel kaplamalar sayesinde hafif yapı malzemelerinin su emme oranları düşürülmektedir. Bu çalışmada, Sorel çimentosu bazlı hafif yapı malzeme numunelerinin herhangi bir su itici karışım ve kaplama olmaksızın görünür gözenekliliği ve su emme değerleri hesaplanmıştır.

Su emme ve görünür gözeneklilik deneyleri TS 4633 EN 993-1 [59] standardına göre yapılmıştır. Bu standarda göre sadece ağırlık ölçümlerinin hassas olması istenirken, boyut konusunda herhangi bir sınırlama bulunmamaktadır. Bu deneye göre numuneler ilk olarak 105°C'lik etüvde 1 gün bekletilerek kurutulmuştur ve ağırlıkları ölçülmüştür. Buna, kuru ağırlık denir (M_K). Ardından örnekler su dolu bir kap içerisinde yaklaşık 4 saat boyunca kaynatılmıştır. Su oda sıcaklığına inmesi için bekletilmiştir. Akabinde numuneler sudan çıkarılmıştır, numunelerin üzerindeki film suyu nemli bir bez yardımı ile hafifçe silinmiş ve tekrar ağırlıkları ölçülmüştür. Buna da doymun ağırlık denir (M_D). Doymun ağırlıktan kuru ağırlık çıkarılır, ardından kuru ağırlığa bölünerek 100 ile çarpılır ve numunelerin su emme değerleri bulunur.

$$\% \text{ Su Emme} = (M_D - M_K) / (M_K) * 100 \quad \text{Eşitlik (3.3)}$$

M_D : Suyu doymun ağırlık (g).

M_K : Kuru ağırlık (g).

Görünür gözeneklilik ise su emme için kullanılan suya doymun ağırlık ile kuru ağırlığın farkı alınarak suyun yoğunluğuna bölünerek boşluk hacmi hesaplanır. Ardından boşluk hacmi toplam hacime bölünerek 100 ile çarpılır.

$$\% \text{ Görünür gözeneklilik} = (V_V / V) * 100 \quad \text{Eşitlik (3.4)}$$

$$V_V = (M_D - M_K) / d_{su}$$

V: Numunelerin toplam hacmi

V_V : Boşlukların hacmi

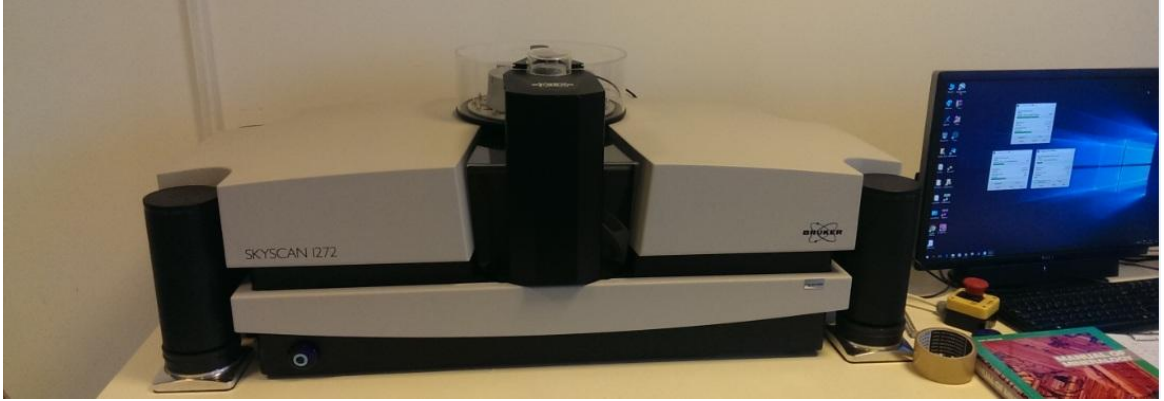
Bu deney kapsamında, uzunluk ölçümleri dijital kumpas ile yapılmıştır. Ağırlıklar 0.01 gr ölçüm hassasiyetine sahip tartı cihazı ile, numunelerin etüvde kurutma işlemleri, Hacettepe

Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Jeolojisi laboratuvarında bulunan fırın ile yapılmıştır.

3.2.10. Gözeneklilik Ölçümü

Hafif yapı malzemeleri için gözeneklilik önemli bir parametre olup gözeneklilik hafif yapı malzemesi numunelerinin dayanıklılıklarını, yoğunluklarını, ısı iletkenlik katsayı vb. değerleri ile doğrudan ilişkilendirilebilen bir parametredir.

Gözeneklilik ölçümü, Hacettepe Üniversitesi, İleri Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Skyscan 1272 Micro CT cihazı ile numunelerin görüntüleri alınmıştır (Şekil 3.7). Temel olarak cihaz, X-ışınları ile numunelerin röntgenini çekmektedir. Bu görüntüler ile, CTan isimli bilgisayar programı yardımı ile numunelerin gözenekliliği hesaplanmıştır. Ölçüme uygun numuneler, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümünde yer alan Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarındaki karot alım ve hızar cihazları ile hazırlanmıştır. Bu cihazlar yardımı ile 1.5 cm çaplara ve 1 cm yüksekliklere sahip numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 3.7. Skyscan 1272 Micro CT cihazı

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Sorel çimentolar için belirlenmiş oranlar,

Birincisi (#1): Molar olarak; MgO/MgCl₂ oranı 13/1, H₂O/MgCl₂ oranı 12/1 ve kısaca M13/H12'dir.

Ağırlıkça oranları; MgO %63, MgCl₂ %12 ve H₂O %25'dir.

İkincisi (#2): Molar olarak; MgO/MgCl₂ oranı 6.8/1, H₂O/MgCl₂ oranı 12/1 ve kısaca M6.8/H12'dir.

Ağırlıkça oranları; MgO %47, MgCl₂ %16 ve H₂O %37'dir.

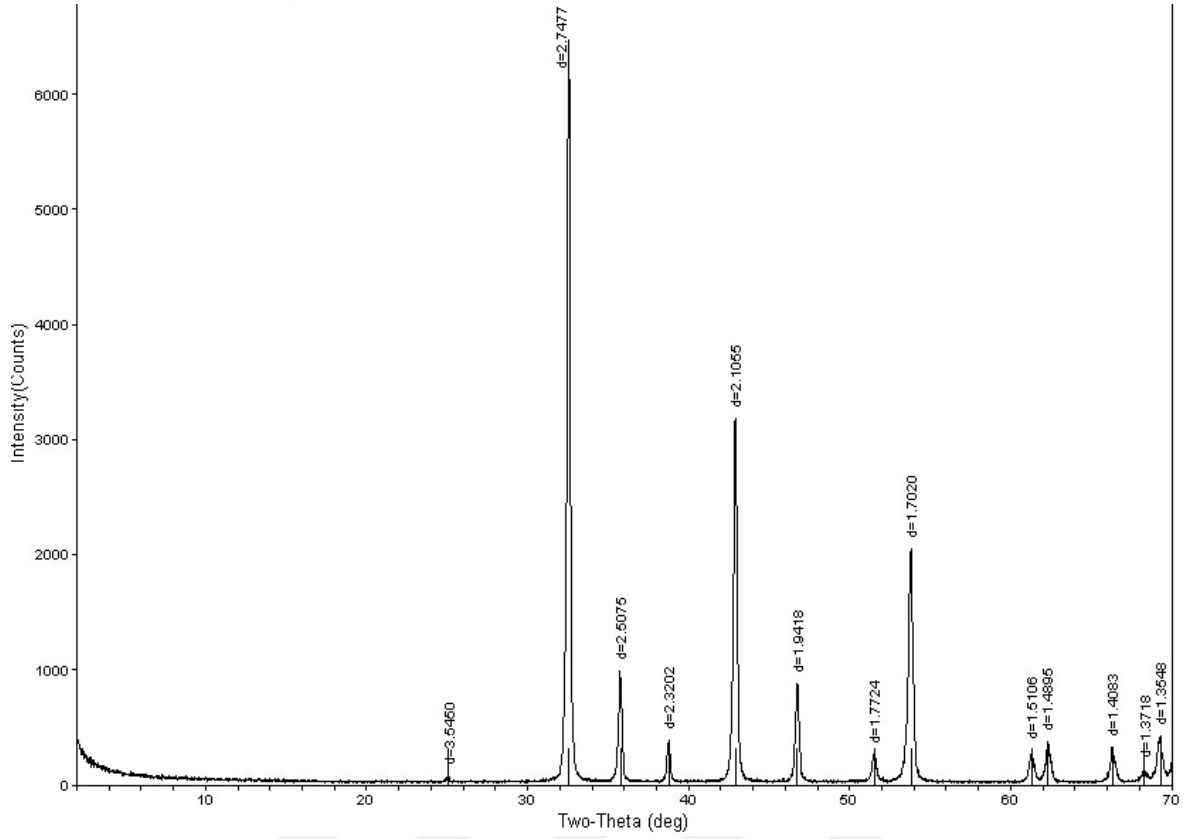
Bu iki farklı çimento karışımının her biri, hem saf su, hem de şebeke suyu kullanılarak hazırlanmıştır. Bu sayede şebeke suyu ve saf suyun Sorel çimentosu üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Sorel çimentoları, M13/H12 çimento karışımı için "#1" ve çimentoda kullanılan suyun cinsine göre saf su ise "#1S", şebeke suyu ise "#1M" şeklinde isimlendirilmiştir. Aynı şekilde M6.8/H12 çimento karışımı için "#2", çimento saf su ile hazırlanmış ise "#2S", şebeke suyu ise "#2M" şeklinde isimlendirilmiştir (Çizelge 3.3).

Hafif yapı malzemeleri, kullanılan çimento türü ve pomza tane boyuna göre isimlendirilmiştir. M13/H12 çimento karışımında ince taneli pomza kullanılıyor ise "#1FP", orta taneli pomza kullanılıyor ise "#1MP", iri taneli pomza kullanılıyor ise "#1CP" şeklinde isimlendirilmiştir. M6.8/H12 çimento karışımı için, ince taneli pomza kullanılıyor ise "#2FP", orta taneli pomza kullanılıyor ise "#2MP", iri taneli pomza kullanılıyor ise "#2CP" şeklinde isimlendirilmiştir (Çizelge 3.4).

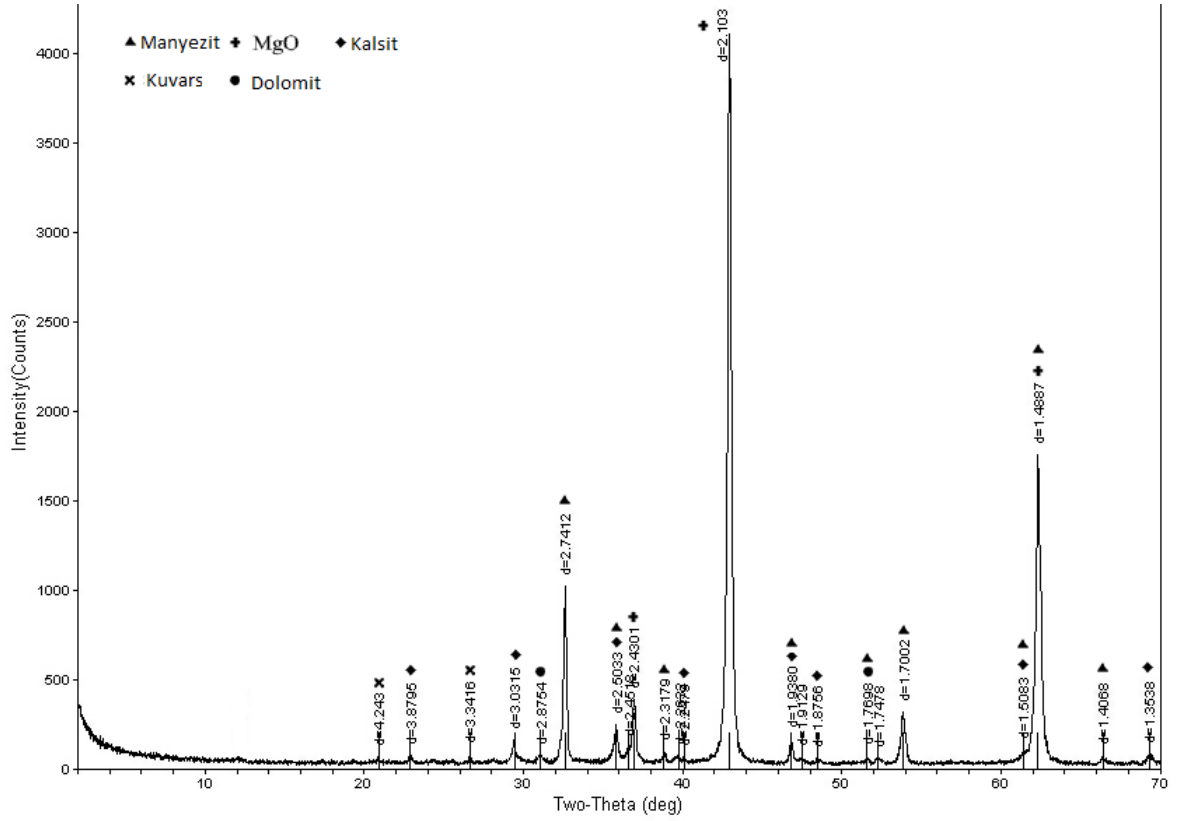
4.1. Saf Manyezit ve Kalsine Manyezitin X-Işınları Kırınım Analizleri

İlk olarak Kütahya ilinden alınan saf manyezitin X-Işınları Kırınım analizi yapılmıştır. X-Işınları Kırınım difraktogramı Şekil 4.1'de verilen analiz sonucuna göre bütün piklerin manyezit fazına ait olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Saf manyezitin X-Işınları Kırınım difraktogramı

Ardından sorel çimento yapımında kullanılacak olan kalsine edilmiş manyezitin X-Işınları Kırınım analizi yapılmıştır ve Şekil 4.2’de verilmiştir. Üretici verisi olan, %85 saflıktaki kalsine manyezitin içinde farklı minerallerin varlığı beklenmektedir. X-Işınları Kırınım difraktogramında kalsit, kuvars, dolomit, manyezit, kalsine manyezit ve dolomit mineralleri tebit edilmiştir. Manyezitler, 950 °C’de 2 saat boyunca kalsinasyon işlemine tabi tutulmuş olmasına karşın, manyezitlerin tamamının kalsine olmadığı X-Işınları Kırınım difraktogramlarında $MgCO_3$ ’in varlığı ile gözlemlenmiştir. Sorel çimentosu hakkında yapılmış çalışmaların X-Işınları Kırınım difraktogramları incelendiğinde aynı şekilde tamamen kalsine olmamış manyezitin varlığına rastlanılmaktadır.

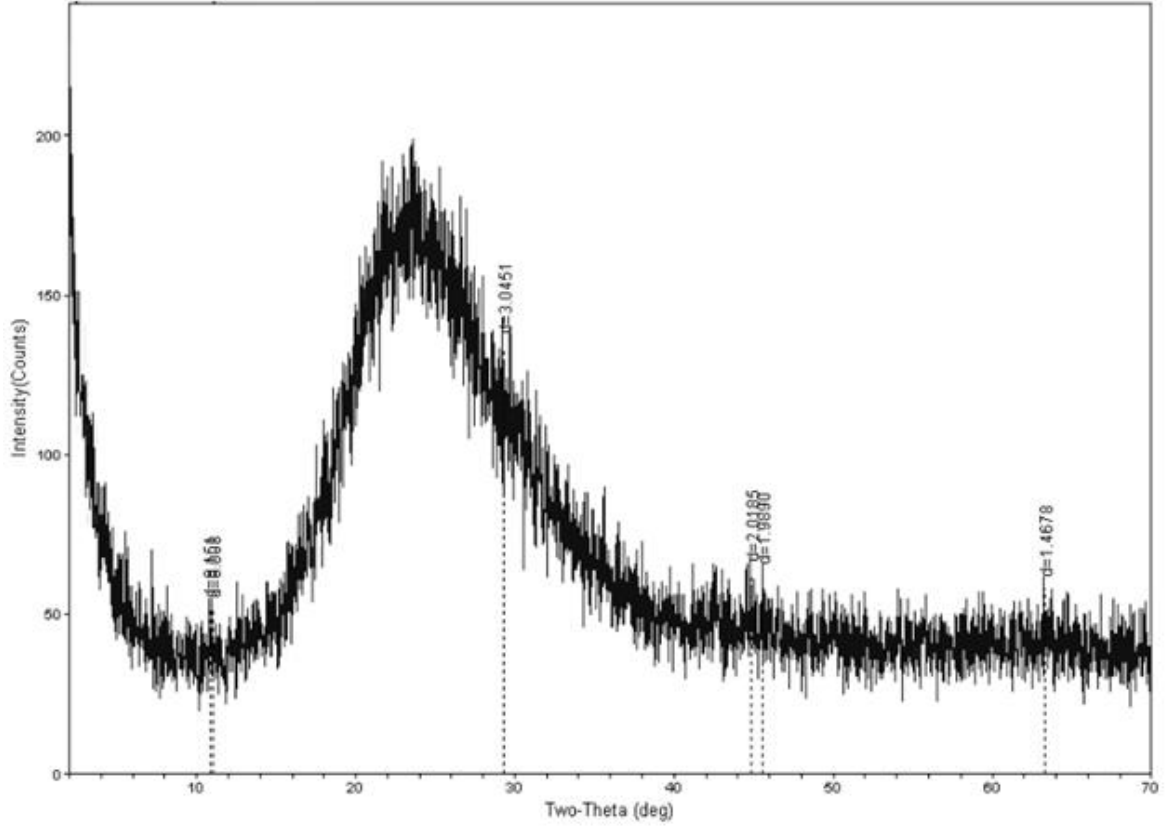


Şekil 4.2. Kalsine manyezitin X-Işınları Kırınım difraktogramı

4.2. Pomzaların Analizleri ve Karakterizasyonu

4.2.1. X-Işınları Kırınım Analizi

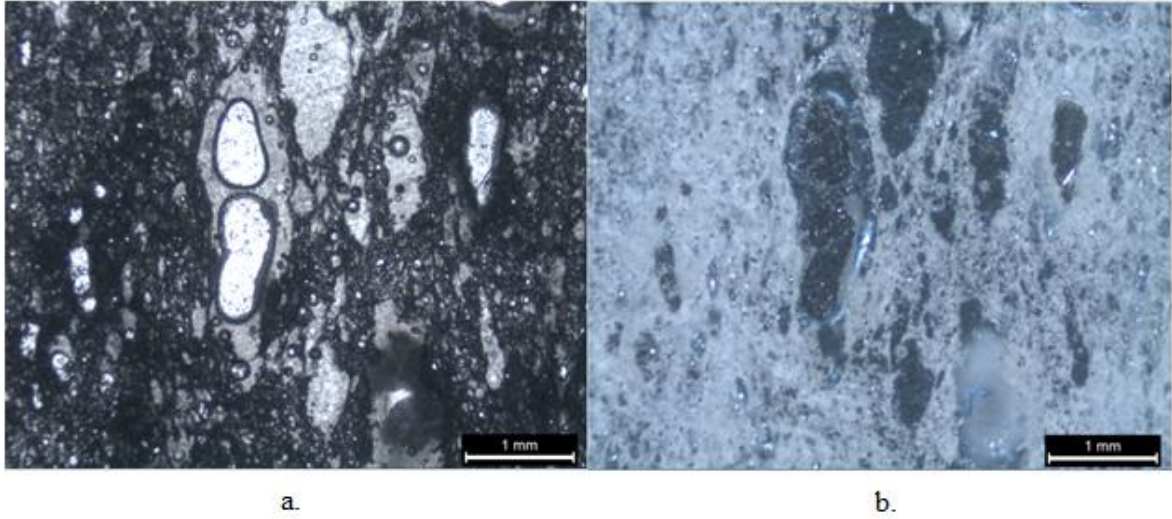
Nevşehir ilinden temin edilen pomzalara ait X-Işını Kırınım difraktogramı Şekil 4.3'de verilmiştir. Pomzada hakim faz, amorf silika fazı olup herhangi bir mineral fazının varlığına rastlanılmamıştır.



Şekil 4.3. Pomzaların X-Işınları Kırınım difraktogramı

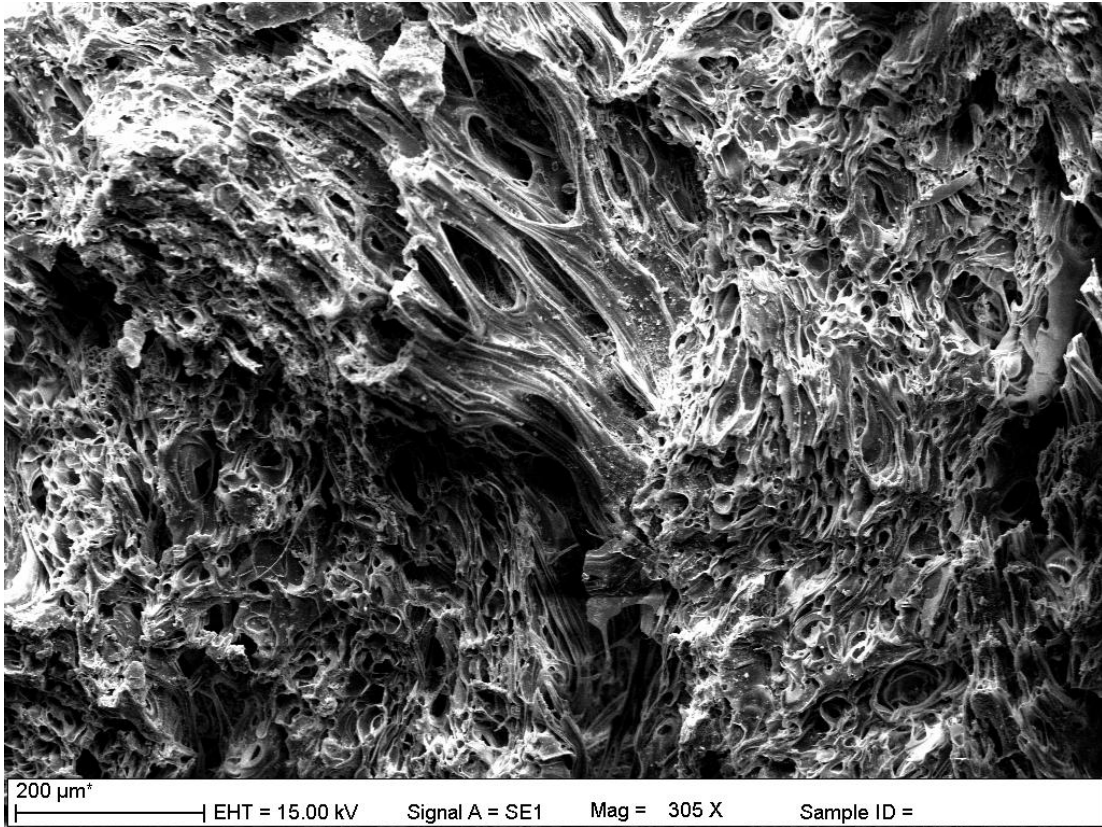
4.2.2. Pomzanın Mineralojik Analizi ve Dokusal Özelliği

Pomza örneklerinden alınan ince kesitler alttan aydınlatmalı mikroskop ile incelenmiş olup birinci ve ikinci nikol resimler çekilmiştir. Şekil 4.4'de görüldüğü üzere pomza örnekleri volkan camından oluşmakta olup, başka bir mineral tespit edilememiştir.

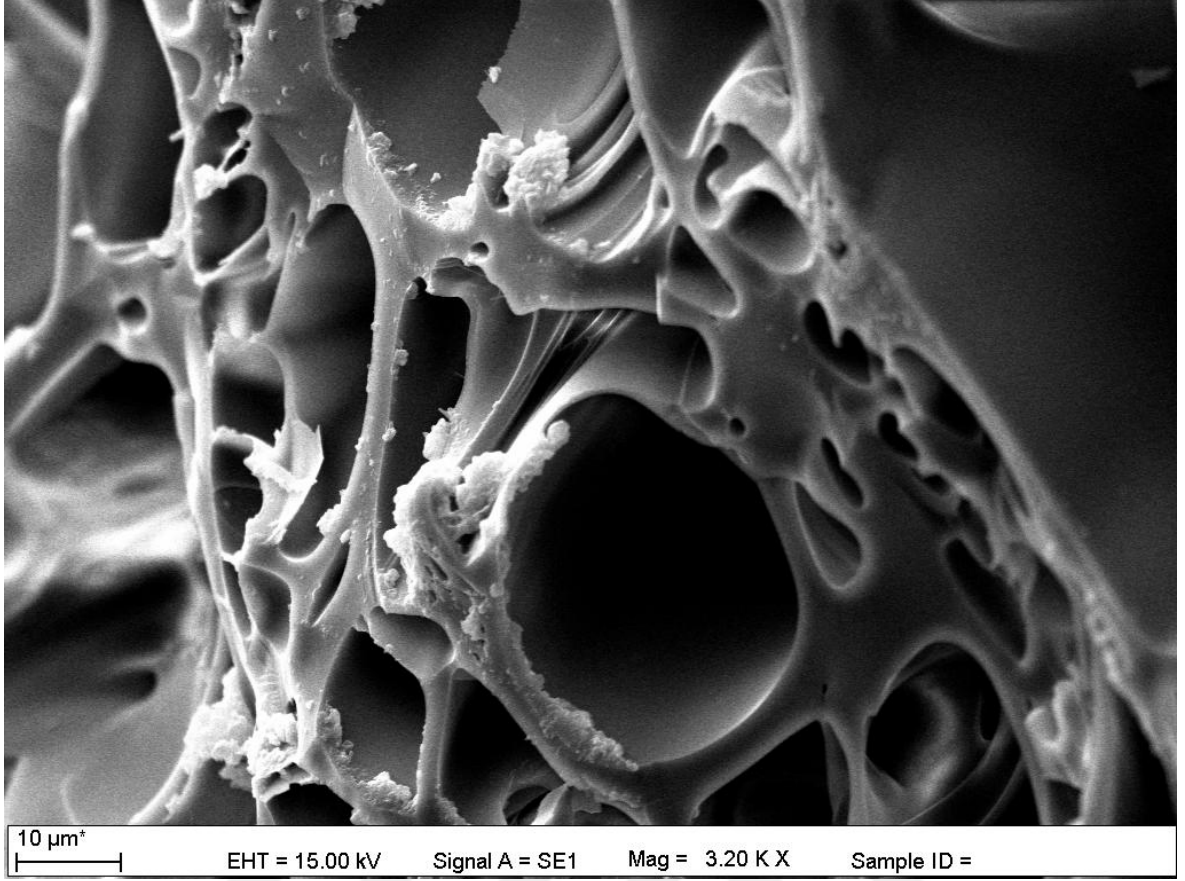


Şekil 4.4. Pomza numunelerinin 2.5X mikroskop merceğindeki görüntüsü, a. birinci nikol görüntüsü, b. ikinci nikol görüntüsü

Ayrıca pomza numuneleri, taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiştir. Şekil 4.5 ve 4.6'da çekilen mikro fotoğraflarda pomza örneğinin, birbirleriyle bağlantısı olmayan düzensiz veya oval, çok sayıda farklı büyüklüklerdeki boşluklardan oluşan, gözenekli dokuya sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.5. Pomza tanesinin SEM görüntüsü



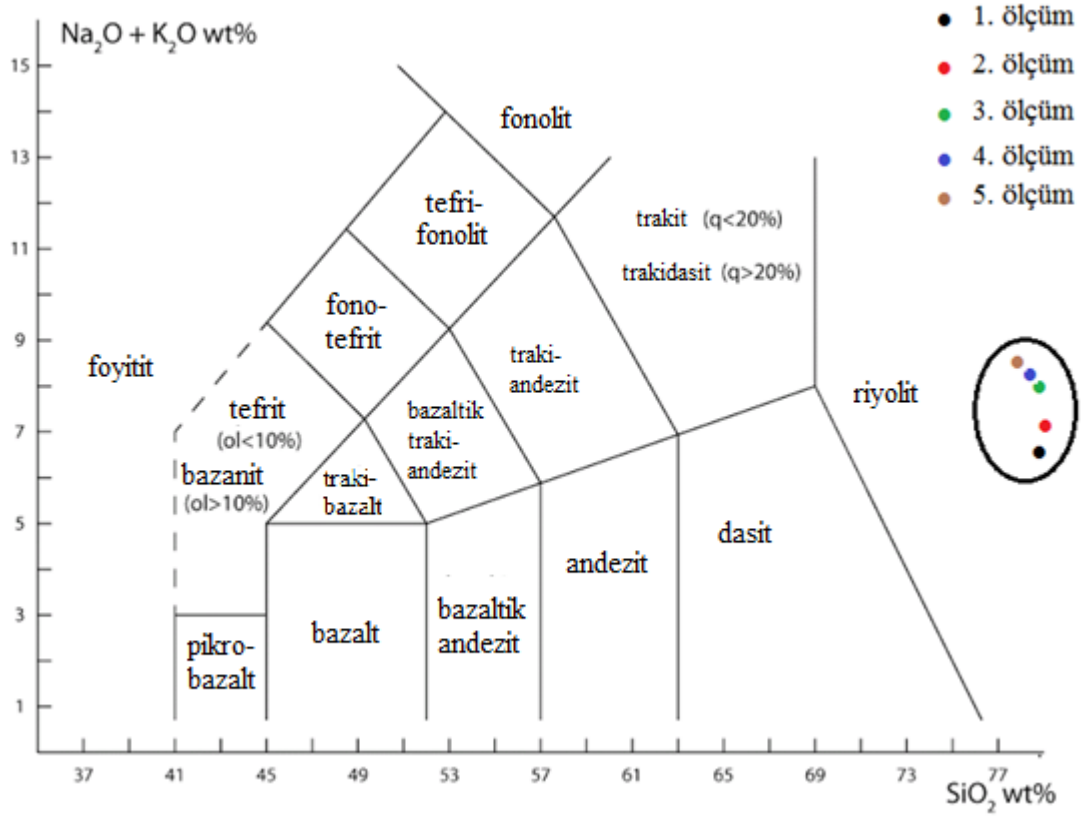
Şekil 4.6. Pomza tanesinin SEM görüntüsü

4.2.3. Pomzanın SEM - EDS Analizi

Nevşehir ilinden alınan pomzaların yarı nicel kimyasal bileşimi, SEM - EDS analizi ile belirlenmiş olup, sonuçlar, Çizelge 4.1’de verilmiştir. Pomzaların SEM - EDS analizlerine göre, volkanik kayalar için TAS diyagramında riyolit alanında yer aldığı görülmektedir (Şekil 4.7).

Çizelge 4.1. Pomza numunelerin SEM-EDS analiz sonuçları

	% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% K ₂ O	% Na ₂ O
1. ölçüm	78,47	14,67	4,62	2,25
2. ölçüm	78,81	13,51	4,73	2,95
3. ölçüm	78,64	13,21	5,66	2,48
4. ölçüm	78,16	13,59	4,87	3,38
5. ölçüm	77,66	13,70	4,71	3,94



Şekil 4.7. Volkanik kayalar için TAS diyagramı [60]

Temel ve diğerleri [61] çalışmalarında, Nevşehir ilinde, Kapadokya ignimbritlerin petrografik ve jeokimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında, döküntü çökelleri olarak tanımlanmış olan Kumtepe formasyonuna ait pomzaların kimyasal analiz değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre Kumtepe pomzaları, tez çalışmasında kullanılan pomzalar gibi TAS diyagramında riyolit alanına karşılık gelmektedir. Nevşehir bölgesinde işletilmekte olan ve tez kapsamında kullanılan pomza örnekleri Kumtepe birimine aittir.

Çizelge 4.2. Kumtepe döküntü çökellerine ait pomza örneklerinin kimyasal analiz sonuçları [61]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅
U-416	75,94	13,30	4,57	4,02	1,12	0,06	0,10	0,79	0,08	0,02
U-513	75,98	13,40	4,66	3,80	1,13	0,05	0,006	0,81	0,08	0,02

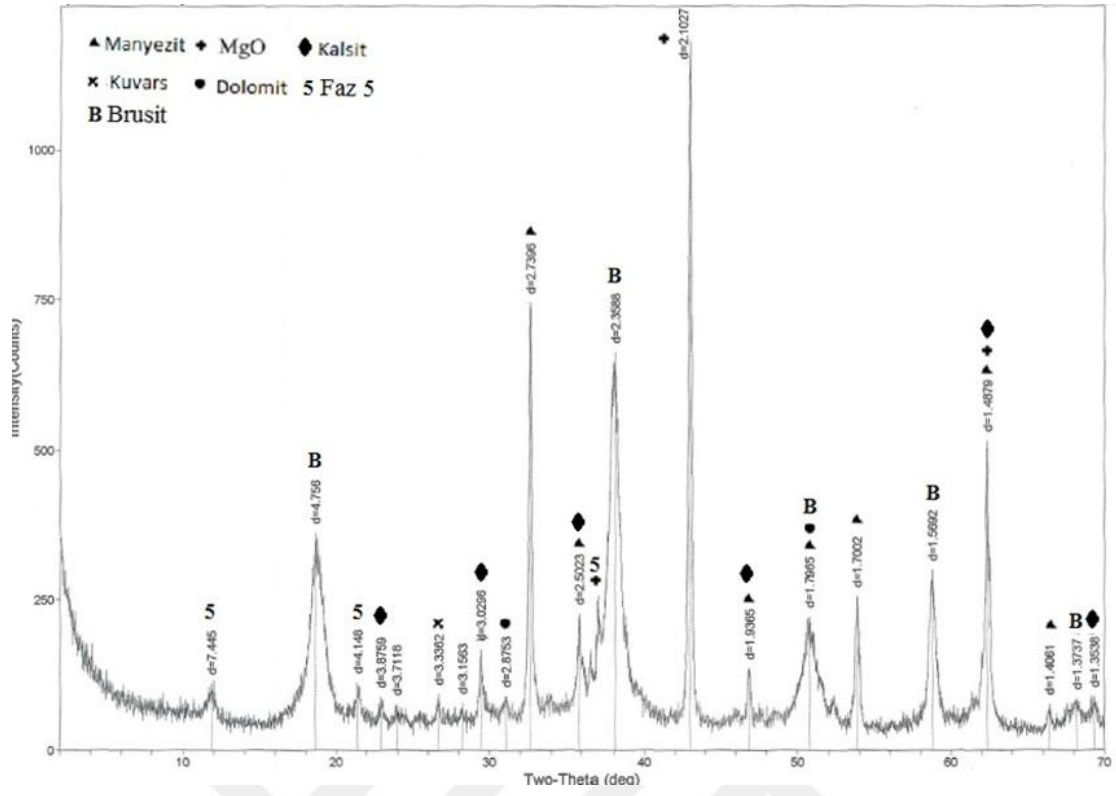
4.3. Sorel Çimentoların Deneyleri ve Analizleri

4.3.1. Sorel Çimentoların X Işınları Kırınım Analizleri

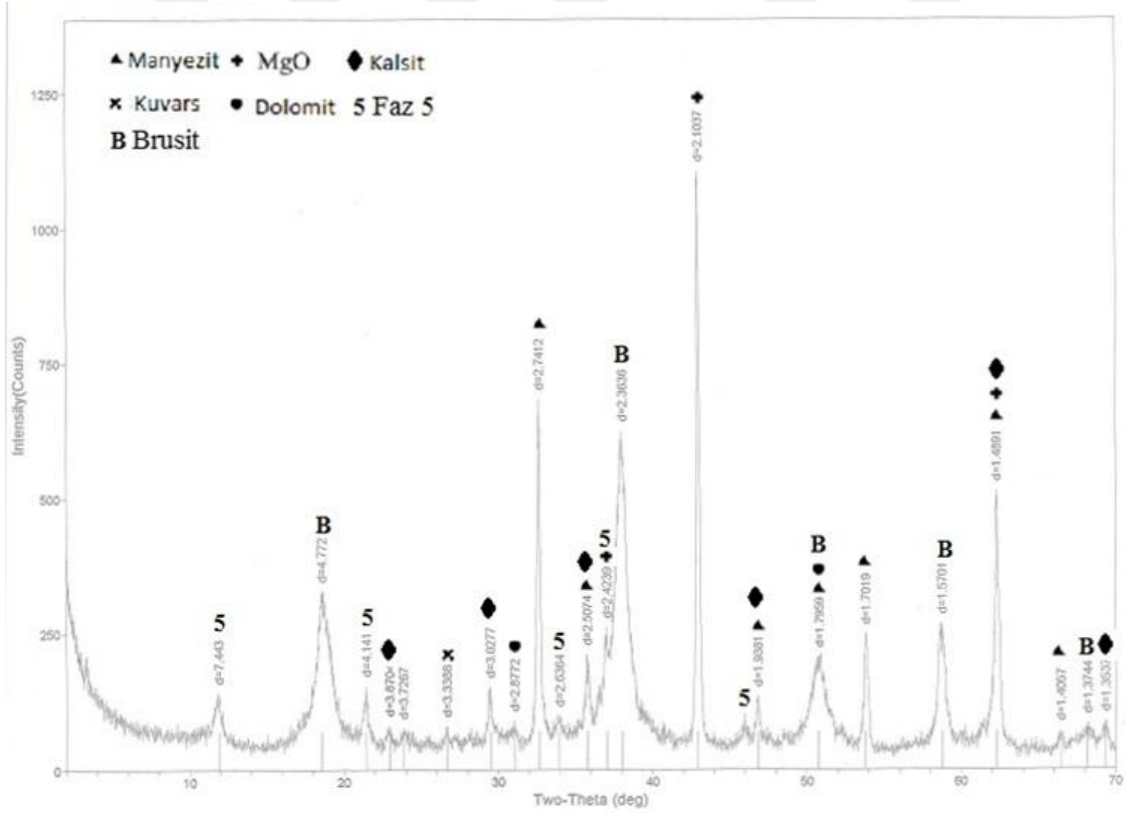
İki farklı çimento oranları için hazırlanmış dört farklı çimento karışımlarının X-Işınları Kırınım difraktogramları incelenmiştir. Bu analizler sonucu çimento örneklerinde Sorel çimentosu için önemli olan Faz 5 pikleri hakimdir.

#1S kod adlı saf su ile hazırlanmış M13/H12 çimento karışımının X-Işınları Kırınım difraktogramı Şekil 4.8’de verilmiş olup kalsit, kuvars, manyezit, kalsine manyezit (MgO), brusit ve dolomit minerallerin fazları gözlemlenmiştir. Ayrıca, çimentoya ait Faz 5 pikleri oluşmuş olup Faz 3 piklerine rastlanılmamıştır.

#1M kod adlı şebeke suyu ile hazırlanmış M13/H12 çimento karışımının X-Işınları Kırınım difraktogramı Şekil 4.9’de verilmiş olup, aynı karışım oranına sahip saf su ile hazırlanmış çimento karışımına benzer mineral fazları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.8. #1S isimli çimentonun XRD difraktogramı

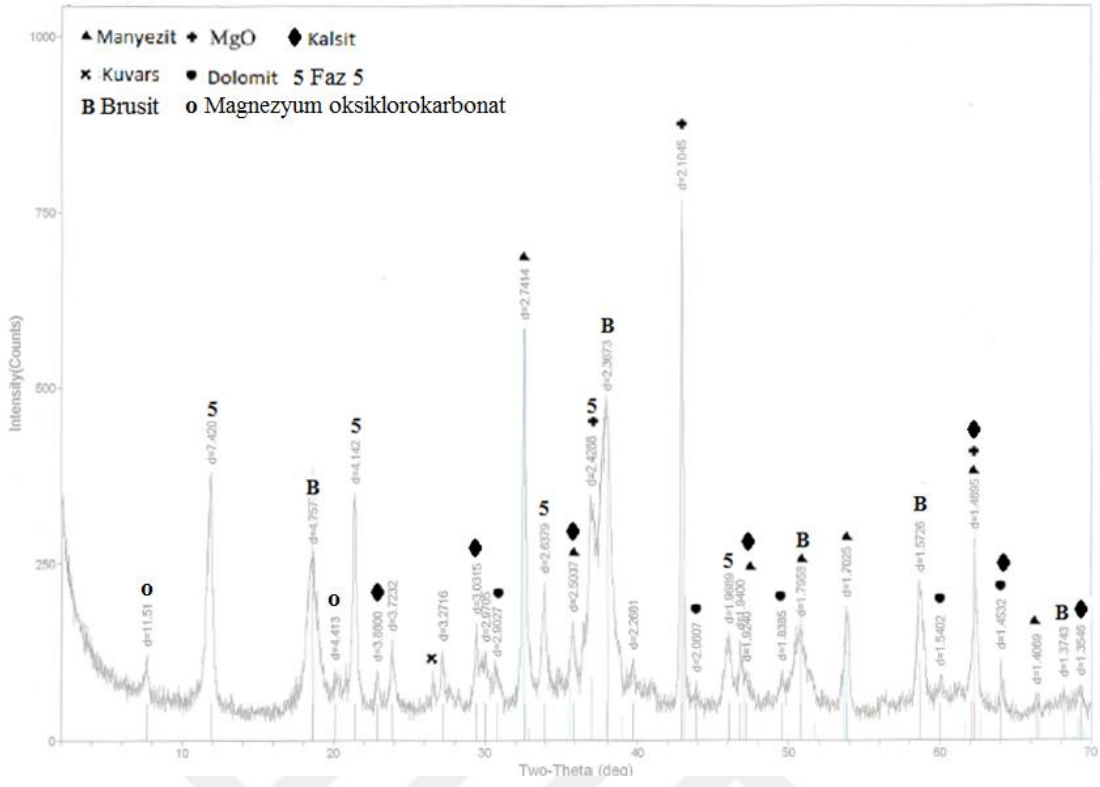


Şekil 4.9. #1M isimli çimentonun XRD difraktogramı

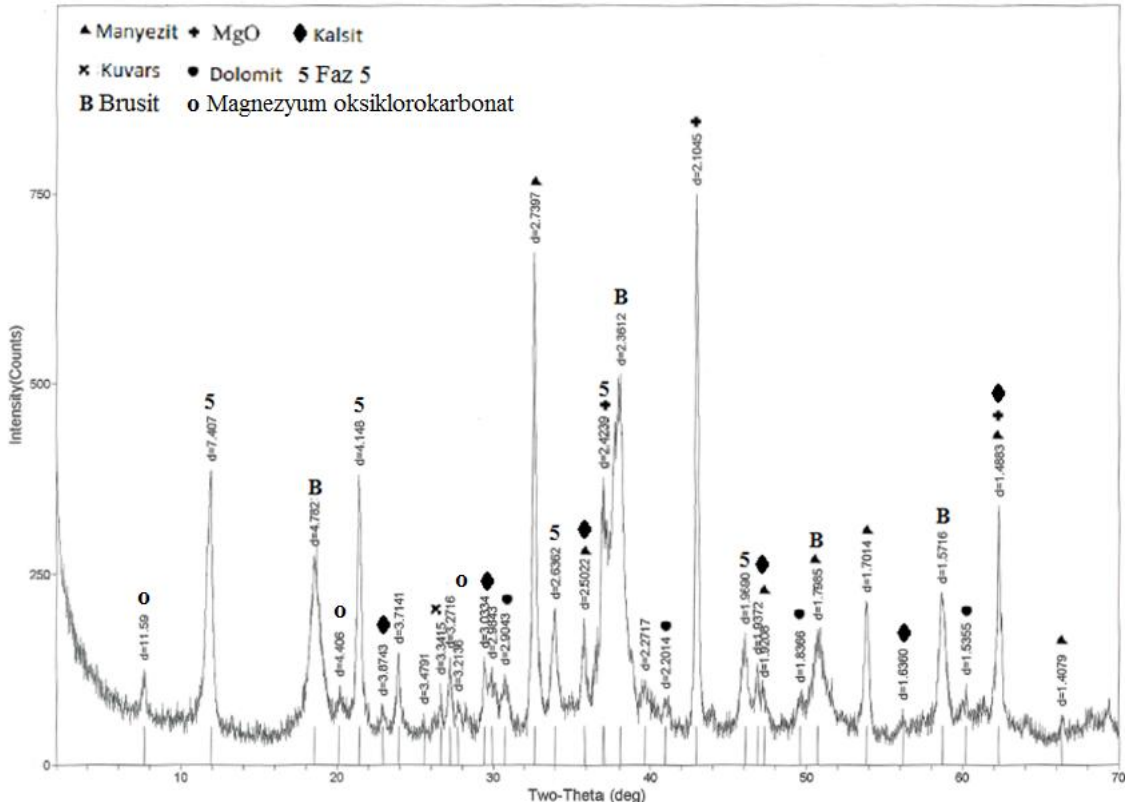
#2S kod adlı saf su ile hazırlanmış M6.8/H12 çimento karışımının X-Işınları Kırınım difraktogramı Şekil 4.10'de verilmiştir. Difraktogramda kalsit, kuvars, manyezit, kalsine manyezit (MgO), brusit ve dolomit minerallerin fazları gözlemlenmiştir. Ayrıca çimentoya ait Faz 5 pikleri oluşmuş olup, Faz 3 piklerine rastlanılmamıştır. #1S ve #1M isimli örneklerin fazlarından farklı olarak magnezyum oksiklorokarbonat $[\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{MgCO}_3 \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$ fazı saptanmıştır.

#2M kod adlı şebeke suyu ile hazırlanmış M6.8/H12 çimento karışımının X-Işınları Kırınım difraktogramı Şekil 4.11'de verilmiş olup, aynı karışım oranına sahip saf su ile hazırlanmış çimento karışımına benzer mineral fazları gözlemlenmiştir.





Şekil 4.10. #2S isimli çimentonun XRD difraktogramı



Şekil 4.11. #2M isimli çimentonun XRD difraktogramı

Li ve Chau [9] ve Chau ve Li [15] çalışmalarından seçilen oranlar ile hazırlanmış Sorel çimentolarda, Faz 5'in hakim olduğu tez çalışması kapsamında belirlenmiştir. Ayrıca kalsine manyezit ve su reaksiyonu sonucu Brusit fazının oluştuğu anlaşılmıştır.

XRD sonuçları kıyaslandığında, M13/H12 karışımlarındaki MgO piki, M6.8/H12 karışımlarındaki MgO pikinden daha şiddetli olduğu anlaşılmıştır. Ağırlıkça daha fazla MgO içeren M13/H12 karışımlarının reaksiyona girmemiş MgO'lardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat Faz 5 pikleri kıyaslandığında, M6.8/H12 karışımlarının Faz 5 pikleri daha keskin olup, M13/H12 karışımlarından daha az yoğunluk göstermektedir. Bu pik şiddetlerindeki farklılığın kristal tane boylarına etkisinin anlaşılması için Sherrer eşitliği ile Faz 5 kristallerinin tane boyu hesaplanmıştır. Sorel çimentolarda Faz 5 mekanik dayanıklılığı açısından büyük öneme sahip olduğu belirtilmiştir [9]. Fakat #2S ve #2M isimli çimentoların Faz 5 piklerinin daha keskin olmasına karşın basınç dayanımları #1S ve #1M isimli çimentolardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

M6.8/H12 karışımlarında (#2S ve #2M), M13/H12 karışımından (#1S ve #1M) farklı olarak magnezyum oksiklorokarbonat $[Mg(OH)_2 \cdot 2MgCO_3 \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O]$ fazı saptanmıştır. Bu faz, çimentonun uzun süre atmosferik CO_2 'e maruz kalması ile Faz 5 ve Faz 3 bileşiklerinin magnezyum oksiklorokarbonata dönüşmesi olarak açıklanmıştır [13, 48]. Ayrıca magnezyum oksiklorokarbonatın oluşması için, ortamın yüksek nemliliğe sahip olması gerektiği önerilmiştir [48, 49, 62]. Aynı şekilde ve zamanda hazırlanan çimento karışımları aynı nemlilik ve CO_2 koşullarına maruz kalmıştır. Fakat bu faz sadece M6.8/H12 karışımlarında gözlemlenmektedir. Bunun sebebi, M6.8/H12 karışımlarının ağırlıkça su içeriğinin M13/H12 karışımlarından fazla oluşu, çimentonun kendisinin daha nemli olmasından dolayı bu fazın oluştuğu düşünülmektedir. Sorel çimento oluşan fazların genel olarak Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Sorel çimentoların XRD kıyaslama çizelgesi

	Manyezit	MgO	Kalsit	Kuvars	Dolomit	Brusit	Faz 5	Faz 3	MOCC
#1S	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
#1M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	-
#2S	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓
#2M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-	✓

MOCC: Magnezyum oksiklorokarbonat $[Mg(OH)_2 \cdot 2MgCO_3 \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O]$

4.3.2. Sorel Çimentoların Kristal Tane Boyu Analizleri

Sorel çimentolarını oluşturan Faz 5 kristallerinin tane boyu analizi ile kristal oluşumlarını kıyaslamak için gerekli olacağı düşünülmektedir. Bu amaç doğrultusunda Chau ve Li [15] çalışmasında Sorel çimentolarının kristal tane boyu analizde kullanılan yöntemden yararlanılmıştır. Çalışmaya göre Faz 5 kristal boyları, X-Işınları Kırınım difraktogramları kullanılarak Scherrer eşitliği ile hesaplanmıştır. Scherrer eşitliği:

$$D = \frac{K\lambda}{B_{1/2} \cos \theta_B} \quad \text{Eşitlik (4.1)}$$

Bu denkleme göre;

D: Ortalama kristal boyu,

K: Şekle bağlı Scherrer eşitliği sabiti (0.89 alınmıştır),

λ : X-Işını radyasyonun dalga boyu (1.540562 angström),

$B_{1/2}$: Fazın maksimum pikinin yarı uzunluğundaki genişliği, (radyan),

θ_B : Bragg açısı

$B_{1/2}$ değeri, Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümünde bulunan X-Işınları Kırınım difraktogramlarının incelendiği bilgisayar yazılımından yararlanılmıştır. Scherrer eşitliğine göre hesaplanan tane boyları Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Sorel çimentoların Scherrer eşitliliği ile kristal tane boyu analizi

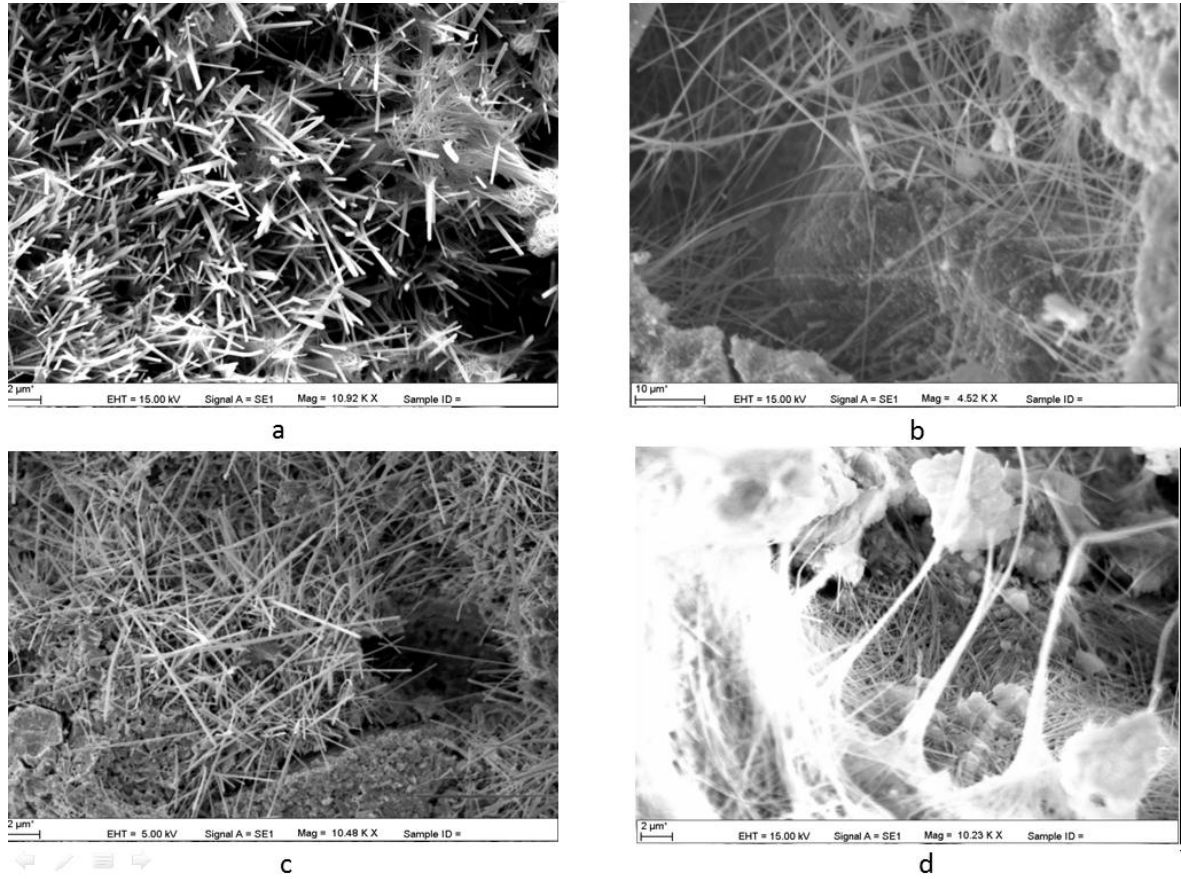
Çimentolar (Karışım Oranları)	Ortalama Kristal Boyu (nm) Faz 5 için $2\Theta=11.9^\circ$
#1S (M13/H12)	20,45
#1M (M13/H12)	20,00
#2S (M6.8/H12)	21,98
#2M (M6.8/H12)	20,75

Tabloda gösterildiği gibi Scherrer eşitliğine göre Faz 5 kristalleri için ortalama tane boyları yaklaşık 20.8 nm'dir. Sorel çimentolar farklı molar oranlarda ve farklı sular ile

hazırlanılmış olmasına karşın, kristal tane boyları arasında ciddi bir fark gözlemlenmemiştir.

4.3.3. Sorel Çimentoların Taramalı Elektron Mikroskobu Analizleri

M13/H12 karışımların saf su (#1S) ve şebeke suyu (#1M) içeren numuneler ile M6.8/H12 karışımların saf su (#2S) ve şebeke suyu (#2M) içeren numunelerin taramalı elektron mikroskobu ile çekilen fotoğraflar Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu fotoğraflar incelendiğinde Faz 5 kristallerine ait iplik ve iğnemsî yapıdaki kristallerin varlığı gözlemlenmiştir. Bununla beraber, Faz 3 kristallerinin varlığına rastlanılmamıştır.



Şekil 4.12. Sorel çimentoların SEM görüntüleri, a) #1S, b) #1M, c) #2S, d) #2M

Her iki çimento karışımları için arzu edilen Faz 5'e ait iplik ve iğnemsî yapıdaki kristallerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Faz 5 kristallerin varlığı X-Işınları Kırınım analizleri ile de desteklenmiştir.

4.3.4. Sorel Çimentoların Yoğunluğu

Belirlenen molar oranların ve kullanılan su tipinin Sorel çimentoların yoğunluklarına etkisi ve üretilecek olan hafif yapı malzemesinin yoğunluğu hakkında öngörüye sahip olma açısından önemlidir. Yoğunluk analizi oda koşullarında 28 günlük priz süresinde numuneler üzerinde TS EN 772-13'e uygun olarak 4*4*4 cm'lik ölçülerdeki numuneler üzerinden yapılmıştır.

Sorel çimentoların yoğunluk analizleri, Çizelge 4.5'de verilmiştir. Sorel çimentoların yoğunlukları, çimento tiplerine ve içerdikleri su tipine göre isimlendirilmiştir.

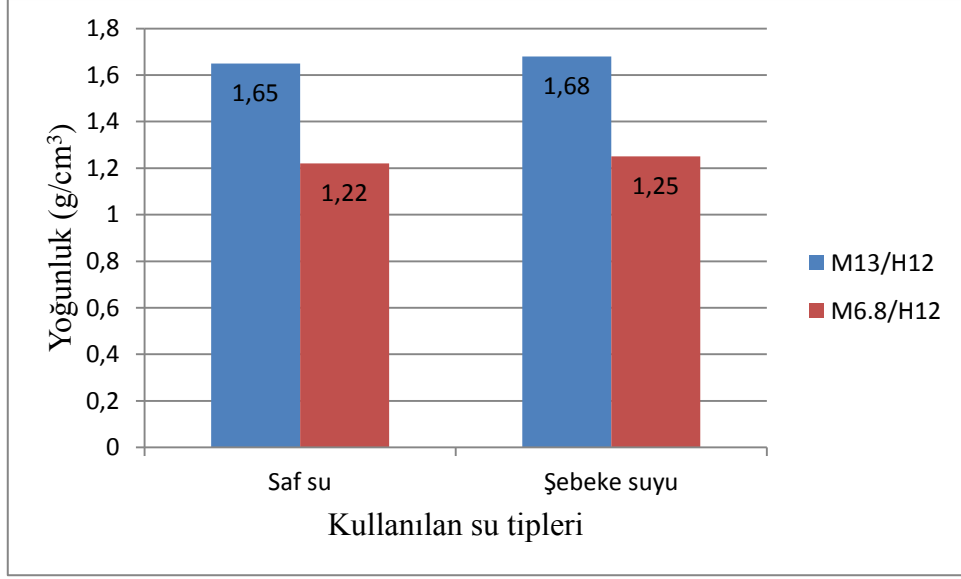
Çizelge 4.5. Sorel çimentoların yoğunluk sonuçları (g/cm³)

	#1S	#1M	#2S	#2M
1. ölçüm	1,67	1,67	1,24	1,24
2. ölçüm	1,63	1,69	1,22	1,27
3. ölçüm	1,66	1,66	1,22	1,24
4. ölçüm	1,65	1,69	1,21	1,26
Ortalama	1,65	1,68	1.22	1.25

M13/H12 karışımlardan saf su içeren çimentoların ortalama yoğunluk değeri 1,65 g/cm³ iken, şebeke suyu ile hazırlanmış çimentonun ortalama yoğunluğu 1,68 g/cm³ ile diğerine göre %1,7 daha yüksektir.

M6.8/H12 karışımlardan saf su içeren çimentoların ortama yoğunluğu 1,22 g/cm³ iken, şebeke suyu içeren çimentoların ortalama yoğunluğu 1,25 g/cm³ ile diğerine göre %2,4 daha yüksektir.

Numuneler seçilirken MgO/MgCl₂ ve H₂O/MgCl₂ molar oranları dikkate alınmıştır. Bu oranlardan H₂O/MgCl₂ oranı sabit iken MgO/MgCl₂ oranı değişkendir. MgO/MgCl₂ molar oranı arttıkça yoğunluk artmaktadır (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Sorel çimentoların ortalama yoğunluk değerleri kıyaslama grafiği

4.3.5. Sorel Çimentoların Basınç Dayanım Deneyleri

Sorel çimentoların basınç dayanım testleri, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. Tez çalışması kapsamında üretilen numunelerin boyutları 4*4*4 cm'dir. Sorel çimentoların basınç dayanımların 3., 7., 14., ve 28. günlerdeki sonuçları M6.8/H12 çimento karışımları için Çizelge 4.6 ve M13/H12 çimento karışımları için Çizelge 4.7'de verilmiştir.

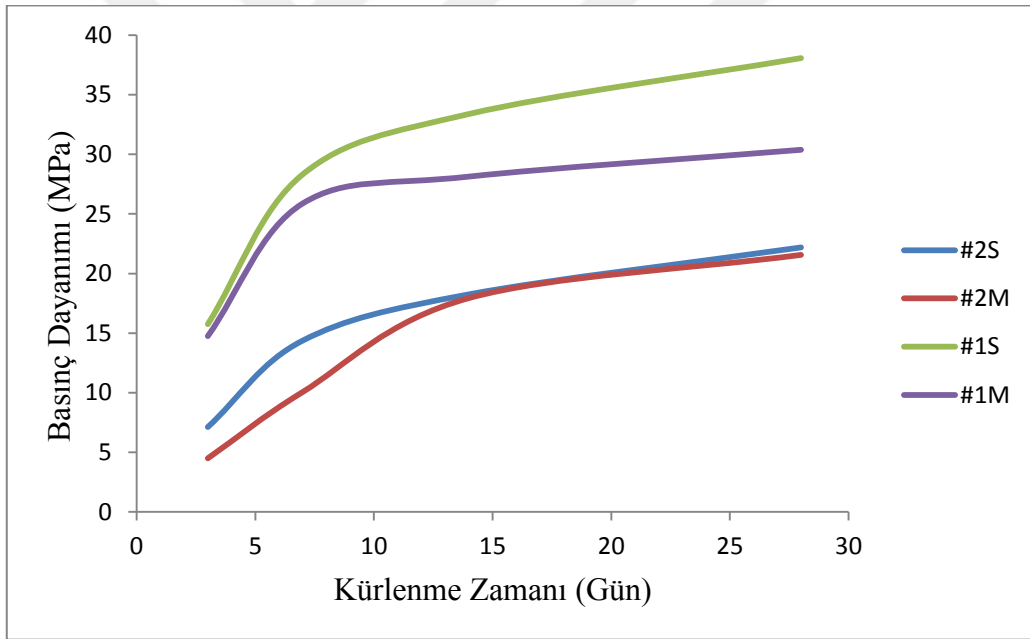
Çizelge 4.6. M6.8/H12 çimento karışımların basınç dayanım sonuçları (MPa)

	#2S (M6.8/H12 çimento ve saf su)					#2M (M6.8/H12 çimento ve şebeke suyu)				
	1.	2.	3.	4.	Ort.	1.	2.	3.	4.	Ort.
3. gün	7,22	6,94	7,31	7,06	7,13	4,75	4,44	4,44	4,37	4,50
7. gün	14,63	13,98	14,65	14,24	14,38	10,25	9,48	10,13	10,38	10,06
14. gün	20,13	17,06	17,79	18,03	18,25	17,32	17,54	18,35	18,56	17,94
28. gün	22,92	21,96	22,43	21,46	22,19	20,43	22,67	20,45	20,69	21,56

Çizelge 4.7. M13/H12 çimento karışımların basınç dayanım sonuçları (MPa)

	#1S (M13/H12 çimento ve saf su)					#1M (M13/H12 çimento ve şebeke suyu)				
	1.	2.	3.	4.	Ort.	1.	2.	3.	4.	Ort.
3. gün	16,75	15,06	14,75	16,75	15,75	14,98	14,5	15,69	13,81	14,75
7. gün	27,81	28,94	28,75	27,75	28,31	25,81	25,94	26,92	24,84	25,88
14. gün	32,6	34,17	33,19	33,55	33,38	28,3	27,88	28,19	28,15	28,13
28. gün	39,44	37,29	37,38	38,13	38,06	29,27	31,65	28,32	32,37	30,38

Basınç dayanımı testlerin sonuçlarına göre molar MgO'nun artışının dayanımı arttırdığı, şebeke suyu kullanımının ise dayanımı düşürdüğü gözlemlenmiştir. Fakat M6.8/H12 karışımları için saf su ve şebeke suyu ile hazırlanan numunelerin 14. ve 28. günlerdeki ortalama basınç dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğu saptanmıştır. Ancak M13/H12 karışımları için saf su ile hazırlanan çimentoların basınç dayanımları arasında şebeke suyu ile hazırlanan numunelere göre 14. ve 28. günlerdeki farkın açıldığı saptanmıştır (Şekil 4.14). Bunun yanı sıra, X-Işınları Kırınım difraktogramlarına göre M6.8/H12 karışımlarının Faz 5 pikleri daha keskin olmasına karşın, ağırlıkça %25 su içeriğine sahip M13/H12 karışımlarının basınç dayanımları, %37 su içeriğine sahip M6.8/H12 karışımların basınç dayanımlarından daha yüksektir. Ayrıca M6.8/H12 karışımların basınç dayanımlarının daha düşük olmasında, X-Işınları Kırınım difraktogramlarında saptanan magnezyum oksiklorokarbonat bileşiğinin de etkisi olduğu düşünülmektedir [48, 49, 58].



Şekil 4.14. Sorel çimentoların ortalama basınç dayanım kıyaslama grafiği

Sorel çimentoların basınç dayanımları $MgO/MgCl_2$ ve $H_2O/MgCl_2$ molar oranları farklılıkları açısından birçok bilim adamı tarafından incelenmiştir. Tez çalışmasında kullanılan ham madde oranlarının alındığı çalışmalardan ilkinde Li ve Chau [9], $MgO/MgCl_2$ molar oranın 13/1 ve $H_2O/MgCl_2$ molar oranın 12/1 olduğu numunenin 14. gün basınç dayanımını 150 MPa olarak tespit etmişlerdir. Chau ve Li [15] ise, $MgO/MgCl_2$ molar oranın 6.8/1 ve $H_2O/MgCl_2$ molar oranın 12/1 olduğu numunenin 14. gün basınç

dayanımını 154 MPa olarak raporlamışlardır. Tez kapsamında yapılan basınç dayanım deneylerinin sonuçları ile kıyaslandığında, büyük fark olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın nedenleri arasında, kullanılan kalsine manyezitlerin saflığı düşünülmektedir. Çünkü tez çalışmasında kullanılan kalsine manyezitin saflığı %85 iken, makalelerde kullanılan kalsine manyezitin saflığı yaklaşık %96 seviyelerindedir. Tez çalışması kapsamında üretilen çimento karışımlarının XRD difraktogramlarına göre, $MgCO_3$ pikinin makalelerde hazırlanan çimentoların $MgCO_3$ piklerine göre daha şiddetli olduğu gözlemlenmiş olup, tez çalışmasında kullanılan kalsine manyezitin, kalsinasyon derecesinin ve reaktivitesinin daha düşük olduğu düşünülmektedir. Fakat tez çalışması kapsamında basınç dayanım deneyleri, çokça tekrar edilerek sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir.

4.4. Hafif Yapı Malzemelerinin Deney ve Analizleri

4.4.1. Hafif Yapı Malzemelerin Yoğunluklarının Ölçülmesi

Belirlenen molar oranların ve kullanılan pomzanın boyutunun hafif yapı malzemelerinin yoğunluklarına etkisi olacaktır. Ayrıca, pomza ve çimento kullanım miktarlarının numunelerin yoğunluklarına etkisinin olacağı düşünülmektedir. M13/H12 karışımı ile hazırlanmış hafif yapı malzemelerin yoğunluk ölçüm sonuçları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. M13/H12 çimento karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin yoğunluk değerleri (g/cm^3)

	#1FP	#1MP	#1CP
1. ölçüm	1,45	1,23	1,30
2. ölçüm	1,51	1,24	1,26
3. ölçüm	1,47	1,20	1,27
4. ölçüm	1,47	1,19	1,32
Ortalama	1,48	1,22	1,29

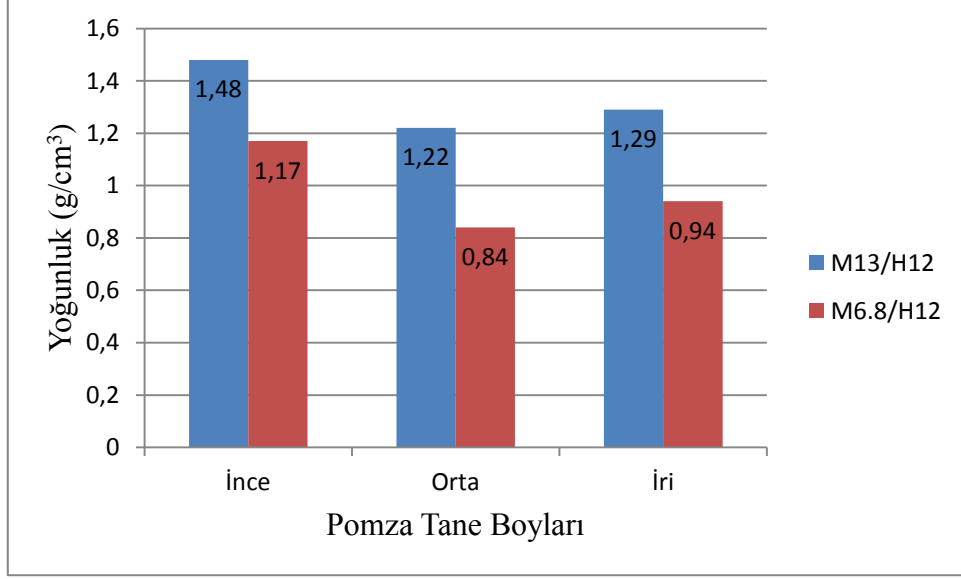
M13/H12 karışımı içeren numunelerden ince pomza tane boyuna sahip olan #1FP isimli numunenin ortalama yoğunluğu $1,48 g/cm^3$ ’tür. Ardından $1,29 g/cm^3$ ile iri pomza tane boyuna sahip #1CP isimli numune ve en düşük yoğunluğa sahip numune $1,22 g/cm^3$ ile orta pomza tane boyuna sahip #1MP isimli numunedir.

M6.8/H12 karışımı ile hazırlanmış hafif yapı malzemelerin yoğunluk ölçüm sonuçları Çizelge 4.9’de verilmiştir. M6.8/H12 çimento karışımı içeren numunelerden #2FP isimli en küçük pomza taneli numunenin ortalama yoğunluk değeri $1,17 \text{ g/cm}^3$ ile en yüksek, ardından $0,94 \text{ g/cm}^3$ ile #2CP en büyük pomza boyutuna sahip numune, en düşük yoğunluk değerine sahip, orta boyutlu pomza içeren #2MP isimli numunenin ortalama yoğunluğu ise $0,84 \text{ g/cm}^3$ ’dür.

Çizelge 4.9. M6.8/H12 çimento karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin yoğunluk değerleri (g/cm^3)

	#2FP	#2MP	#2CP
1. ölçüm	1,18	0,84	0,92
2. ölçüm	1,19	0,85	0,97
3. ölçüm	1,16	0,82	0,93
4. ölçüm	1,16	0,83	0,93
Ortalama	1,17	0,84	0,94

İki farklı çimento karışımından hazırlanan hafif yapı malzeme numuneleri pomza boyutları sabit tutularak, çimento farklılıklarına göre karşılaştırıldığında, M13/H12 karışımı içeren numune yoğunluklarının, M6.8/H12 karışımı içeren numunelerden daha yüksek yoğunluğa sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15. Hafif yapı malzemelerin ortalama yoğunluk kıyaslama grafiği

4.4.2. Hafif Yapı Malzemelerin Gözeneklilik Analizi

Numunelerin gözenekliliği, numunelerin yoğunluğu, basınç dayanımları, ısıl iletkenlik katsayı değerlerini doğrudan etkilemektedir. Gözeneklilik deneyi, Skyscan 1272 Micro CT cihazı ile yapılmış ve numunelerin temel olarak röntgeni çekilmiştir ve katmanlar halinde resimlenmiştir. Bu resimler CTan isimli bilgisayar programında 3 boyutlu hale getirilerek gözeneklilik ölçümü sağlanmıştır.

Hafif yapı malzemelerinden M13/H12 karışımını içeren numunelerin gözeneklilik ölçüm sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde en az gözenekliliğe sahip numune %53,35 ile #1FP isimli numunelerdir. Bütün numuneler arasında en dayanıklı olan numuneler her iki çimento karışımı için ince taneli pomza kullanılan numunelerdir. Pomza tane boyu arttıkça, pomzanın gözeneklilik miktarı artmasına karşın, analiz sonuçlarına göre orta pomza tane boyutuna sahip numunelerin gözenekliliğinin iri pomza tanelerine sahip numuneden yaklaşık %4,5 daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Bu durumun, ağırlıkça çimento ve pomza kullanım oranlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. #1MP için #1CP'a göre, %12 daha fazla pomza kullanılmıştır (Çizelge 3.4).

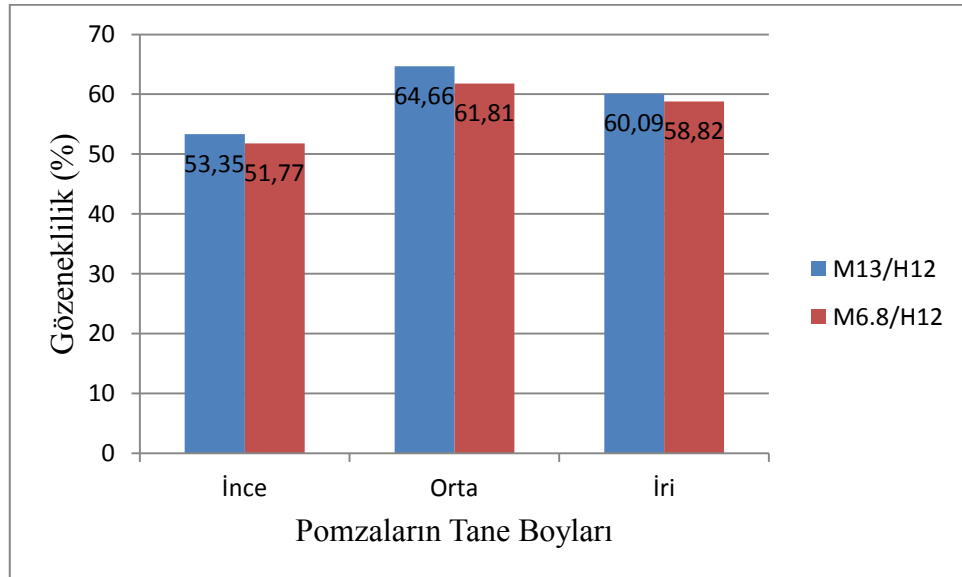
Çizelge 4.10. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin gözeneklilik değerleri

	#1FP	#1MP	#1CP
Gözeneklilik (%)	53,35	64,66	60,09

M6.8/H12 karışımı içeren numunelerin gözeneklilik ölçüm sonuçları Çizelge 4.11’de verilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, en az gözenekliliğe sahip numune %51,77 ile #2FP isimli numunedir. Aynı şekilde #2MP isimli numune de #2CP isimli numuneden daha düşük boyutta pomza kullanılmasına karşın #2MP, #2CP’den %2,99 daha gözeneklidir. Bu durum #2MP için #2CP’ye göre %26.37 daha fazla pomza kullanılmasıyla açıklanmıştır (Çizelge 3.4). Gözenekliliğin, pomza ve çimento tiplerine göre karşılaştırılması Şekil 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.11. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin gözeneklilik değerleri

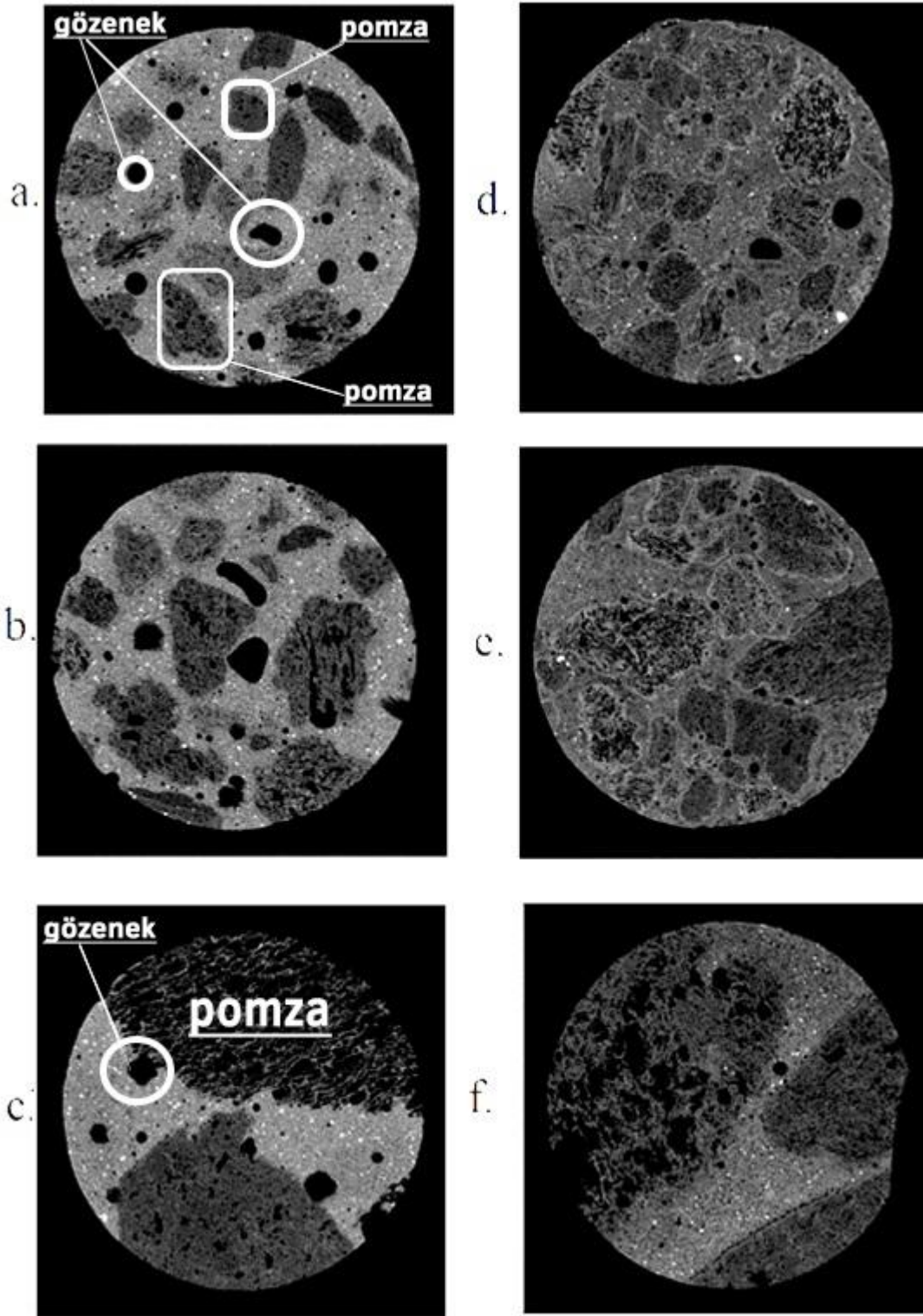
	#2FP	#2MP	#2CP
Gözeneklilik (%)	51,77	61,81	58,82



Şekil 4.16. Hafif yapı malzemelerin gözeneklilik değerleri kıyaslama grafiği

Hafif yapı malzeme numunelerinin gözeneklilikleri, benzer pomza tane boylarına sahip fakat farklı çimento karışımların hazırlanmış örnekler kendi aralarında kıyaslanmıştır. Aynı pomza yığınlarının kullanılmasına karşın bu fark numunelerin kendileri ve Skyscan 1272 Micro CT cihazı ile çekilmiş resimler incelendiğinde anlaşılmıştır. M6.8/H12 çimento karışımı içeren numuneler, M13/H12 çimento karışımı içeren numunelere göre, daha akışkandır ve işlenebilirliği daha kolaydır. M6.8/H12 çimento karışımı, pomza dolu olan kalıplara ilave edildiğinde pomzaların arasına kolayca yerleşmiştir, ancak M13/H12 çimento karışımı pomza dolu olan kalıplara döküldüğünde pomzaların arasına yerleşmesi zaman almıştır ve çimento ile pomza aralarında gözenek oluşmuştur (Şekil 4.17).





Şekil 4.17. Hafif yapı malzemelerin Micro CT görüntüleri, a. #1FP, b. #1MP, c. #1CP, d. #2FP, e. #2MP, f. #2CP

4.4.3. Hafif Yapı Malzeme Numunelerinin Basınç Dayanımları

Pomza katkılı hafif yapı malzemelerin basınç dayanımı testleri, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak yapılmıştır. 3., 7., 14., ve 28. günlerdeki değerleri M6.8/H12 çimento karışımları Çizelge 4.12 ve M13/H12 çimento karışımları Çizelge 4.13'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ortalama basınç dayanım değerleri (MPa)

		3. gün	7. gün	14. gün	28. gün
#2FP	1. ölçüm	5,23	7,59	8,36	10,32
	2. ölçüm	5,08	7,72	8,21	10,36
	3. ölçüm	5,16	7,78	8,4	10,24
	4. ölçüm	5,29	7,68	8,28	10,27
	Ortalama	5,19	7,69	8,31	10,3
#2MP	1. ölçüm	2,92	2,87	4,67	5,22
	2. ölçüm	2,78	2,97	4,56	5,25
	3. ölçüm	2,96	2,93	4,69	5,18
	4. ölçüm	2,86	2,99	4,61	5,19
	Ortalama	2,88	2,94	4,63	5,21
#2CP	1. ölçüm	3,39	3,82	4,84	5,78
	2. ölçüm	3,51	3,84	4,79	6,05
	3. ölçüm	3,41	3,83	4,83	5,98
	4. ölçüm	3,45	3,78	4,78	5,96
	Ortalama	3,44	3,81	4,81	5,94

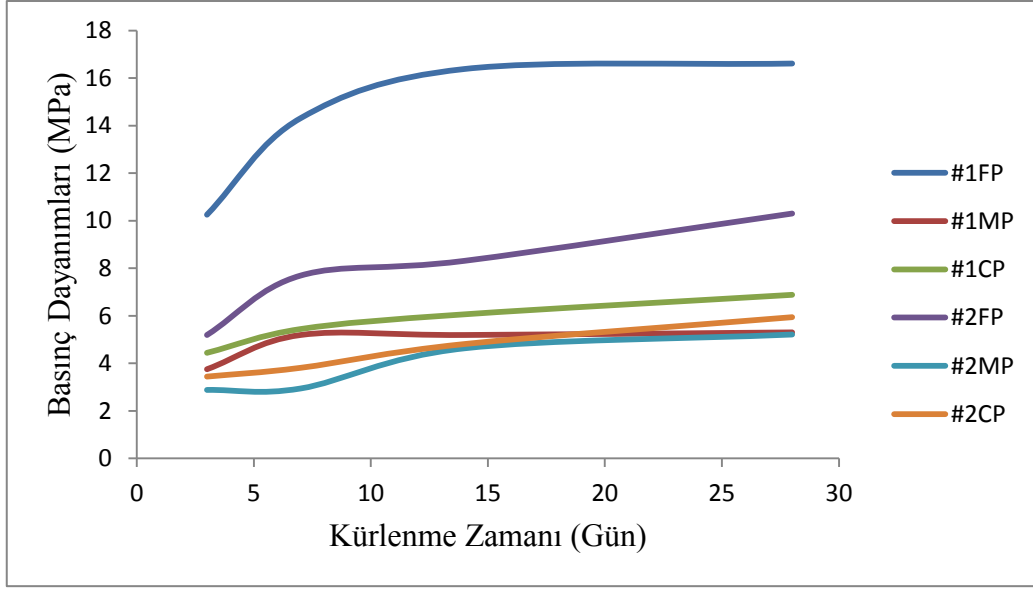
Çizelge 4.13. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ortalama basınç dayanım değerleri (MPa)

		3. gün	7. gün	14. gün	28. gün
#1FP	1. ölçüm	9,87	13,68	15,99	16,18
	2. ölçüm	10,47	14,48	16,93	16,84
	3. ölçüm	9,98	15,07	16,22	16,79
	4. ölçüm	10,68	14,01	16,38	16,63
	Ortalama	10,25	14,31	16,38	16,61
#1MP	1. ölçüm	3,85	5,18	5,14	5,36
	2. ölçüm	3,68	5,27	5,25	5,52
	3. ölçüm	3,71	5,13	5,17	5,19
	4. ölçüm	3,76	5,16	5,21	5,12
	Ortalama	3,75	5,19	5,19	5,3
#1CP	1. ölçüm	4,54	5,31	5,95	6,93
	2. ölçüm	4,18	5,49	6,19	6,78
	3. ölçüm	4,54	5,56	6,09	6,81
	4. ölçüm	4,49	5,39	6,01	6,98
	Ortalama	4,44	5,44	6,06	6,88

Basınç deneylerinin sonuçlarına göre, M6.8/H12 çimento karışımlarını içeren grupta en yüksek dayanımı ince taneli pomzaya sahip numuneler verirken, en düşük dayanımı orta ölçekli pomza boyuna sahip numuneler vermektedir. Bununla beraber, M13/H12 çimento karışımlarını içeren grubun basınç dayanım deneylerinin sonuçları, pomza tane boylarına bağlı olarak M6.8/H12 çimento karışımlarını içeren grup ile benzerlik göstermektedir.

Ortalama basınç dayanım değerleri incelendiğinde, numunelerin kürlenme sürelerinde benzer eğilim olan gün geçtikçe artan basınç dayanımı, #1MP numuneleri için geçerli değildir 3. gün basınç dayanımı 3,75 MPa iken 7. ve 14. gün dayanımları 5,19 MPa ile birbirine eşittir. 28. gün deneyi sonucuna göre sadece 0,11 MPa'lık bir artış gözlemlenmiştir. #1FP isimli numunenin 14. günde yapılan basınç dayanım testinin sonucu 16,38 MPa iken 28. günde yapılan basınç dayanımı sonucunda göre 0,23 MPa'lık artış ile 16,61 MPa olarak ölçülmüştür. 14. gün ve sonrası için basınç dayanımlarında ciddi bir artış gözlenmemiştir (Şekil 4.18).

M6.8/H12 çimento karışımlarını içeren hafif yapı malzeme numunelerinin ortalama basınç dayanım deneylerinin sonuçları incelendiğinde piriz için geçen süre arttıkça numunelerin dayanımı artmaktadır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Hafif yapı malzemelerin ortalama basınç dayanım kıyaslama grafiği

#2MP ile #1MP ve #2CP ve #1CP numunelerinin basınç dayanımları kendi aralarında kıyaslandığında aralarında ciddi bir farkın oluşmadığı gözükmemektedir. Bu durumu açıklamak için oranlar dikkate alındığında, gözeneklilik analizinde olduğu gibi, M13/H12 çimento karışımını içeren numuneler %25 su içeriğine sahiptir, M6.8/H12 çimento karışımını içeren numuneler %37 su içermektedir. Bu durum çimentonun işlenebilirliğini büyük ölçüde etkilemiştir. M13/H12 karışımın, M6.8/H12 karışımına göre oldukça viskoz olduğu numunelerin hazırlanışı sırasında gözlenmiştir. M13/H12 karışımı, pomzaların arasına M6.8/H12 karışımı kadar yerleşmediği, boşlukların kaldığı deney sonucunda kırılan örnekler üzerinden gözlenmiş olup basınç dayanımdaki farkın oluşmamasının sebebi bu olduğu düşünülmektedir.

4.4.4. Hafif Yapı Malzemelerin Isıl İletkenlik Katsayılarının Ölçümü

Tez çalışmasındaki en önemli konulardan biri Sorel çimentosunun pomza katkısı ile hafifletilmesi ve farklı pomza boyutlarının etkilerinin araştırılmasıdır. Buna bağlı olarak da ısı iletkenlik katsayılarının belirlenmesidir. Bu kapsamda laboratuvar ortamında üretilen numunelerin ısı iletkenlik katsayı analizleri yapılmıştır. Isıl iletkenlik katsayısı ASTM E 1530-11'e uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Oda koşullarında bekletilen numuneler %40-50 nemli ortam şartlarında test edilmiştir. M6.8/H12 ve M13/H12 karışımlarını içeren pomza katkılı numunelerin test sonuçları, sırası ile Çizelge 4.14 ve Çizelge 4.15'da verilmiştir.

Çizelge 4.14. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları

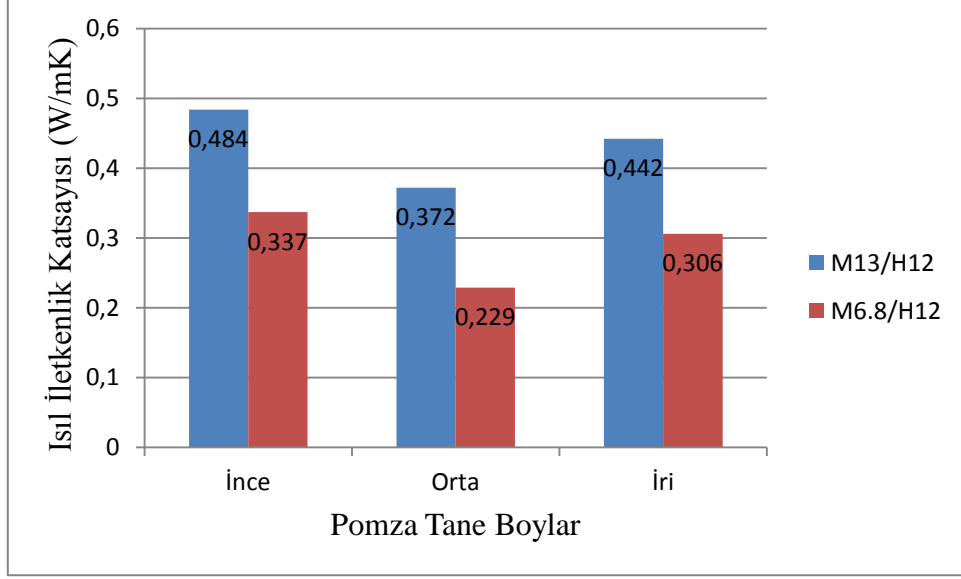
	#2FP	#2MP	#2CP
Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)	0,337	0,229	0,306

Çizelge 4.15. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin ısı iletkenlik katsayıları

	#1FP	#1MP	#1CP
Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)	0,484	0,372	0,442

Isıl iletkenlik değerlerini etkileyen en önemli faktörlerden biri olan gözeneklilik ile sonuçlar birlikte dikkate alındığında, hafif yapı malzeme numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı değişimlerinde benzer eğilim mevcuttur. M6.8/H12 ve M13/H12 çimento karışımları içeren numuneler ayrı ayrı incelendiğinde, ince boyutlu pomza tanelerine sahip numunelere kendi içlerinden en yüksek ısı iletkenlik katsayısı değerine sahip, ikinci en yüksek ısı iletkenlik katsayısı değerine sahip numuneler iri boyutlu pomza kullanılan iken, en düşük ısı iletkenlik katsayısı değerlerine sahip numuneler orta boyutlu pomza kullanılan numunelerdir (Şekil 4.19).

M6.8/H12 içeren grup ile M13/H12 içeren grup karşılaştırıldığında, kalsine manyezitin kullanımının artması ile ısı iletkenlik katsayı değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Hafif yapı malzemelerin ısı iletkenlik katsayısı kıyaslama grafiği

4.4.5. Görünür Gözeneklilik ve Su Emme Deneyleri

Su emme ve görünür gözeneklilik deneyleri TS 4633 EN 993-1 standardına göre yapılmıştır. Su emme deneyi, temel olarak numunenin suya doygun ağırlığı ile kuru ağırlığın farkı alınarak, kuru ağırlığa oranlanması ile hesaplanmıştır.

M13/H12 karışımı içeren hafif yapı malzemelerin % su emme değerleri Çizelge 4.16'da verilmiştir. Çıkan sonuçlara göre en az su emme miktarına sahip ürün en düşük pomza tane boyuna sahip olan #1FP kod adlı numune olmuştur. Fakat orta boy ve iri boy pomza tanelerini kullanan karışımlar için pomza tane boyu arttıkça su emme miktarları azalmıştır. Bu durum #1MP numuneleri için #1CP numunelerine göre ağırlıkça %12 daha fazla pomza kullanılması ile açıklanmıştır (Çizelge 3.4).

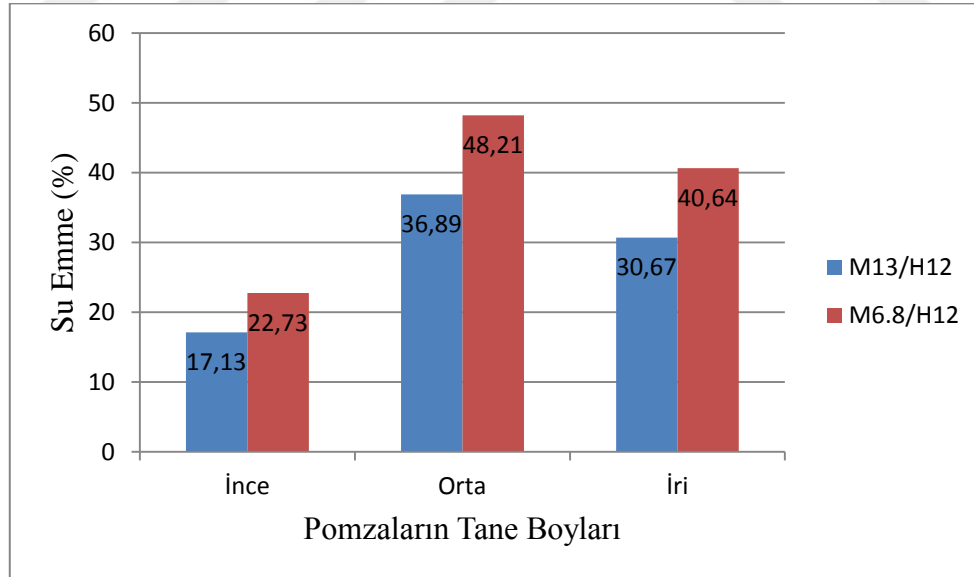
Çizelge 4.16. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin % su emme değerleri

	#1FP	#1MP	#1CP
1. ölçüm	17,34	36,76	31,12
2. ölçüm	17,05	37,02	30,65
3. ölçüm	16,95	36,83	30,29
4. ölçüm	17,18	36,96	30,62
Ortalama	17,13	36,89	30,67

M6.8/H12 karışımını içeren hafif yapı malzemesi numunelerinin su emme miktarları Çizelge 4.17’de verilmiştir. Çıkan sonuçlar, M13/H12 karışımını içeren hafif yapı malzemelerin değerlerine paralellik göstermektedir. #2MP isimli numunelerde, #2CP isimli numunelerin su emme değerlerindeki farklılık, #2MP isimli numunede #2CP’ye göre ağırlıkça %26,37 daha fazla pomza kullanımı ile açıklanmıştır (Çizelge 3.4). Hafif yapı malzemelerin ortalama su emme değerleri için, pomza ve çimento tiplerine göre kıyaslaması grafiği, Şekil 4.20’de verilmiştir.

Çizelge 4.17. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin % su emme değerleri

	#2FP	#2MP	#2CP
1. ölçüm	23,19	47,16	40,71
2. ölçüm	22,74	49,25	41,55
3. ölçüm	22,21	48,23	40,73
4. ölçüm	22,78	48,19	39,56
Ortalama	22,73	48,21	40,64



Şekil 4.20. Hafif yapı malzemelerin ortalama su emme değerleri kıyaslaması grafiği

Görünür gözeneklilik ise su emme için kullanılan suya doymun ağırlık ile kuru ağırlığın farkı alınarak numunelerin hacmine oranlanması ile hesaplanır.

M13/H12 karışımını içeren numunelerin sonuçları Çizelge 4.18’de verilmiştir. En az gözeneklilik, %25,01 ile #1FP isimli numunedir. Ardından %39,88 ile #1CP ve en gözenekli numune %43,81 ile #1MP’dir.

Çizelge 4.18. M13/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin görünür gözeneklilik değerleri (%)

	#1FP	#1MP	#1CP
1. ölçüm	24,92	43,85	40,01
2. ölçüm	25,15	43,75	39,78
3. ölçüm	24,99	43,83	39,85
4. ölçüm	24,96	43,82	39,89
Ortalama	25,01	43,81	39,88

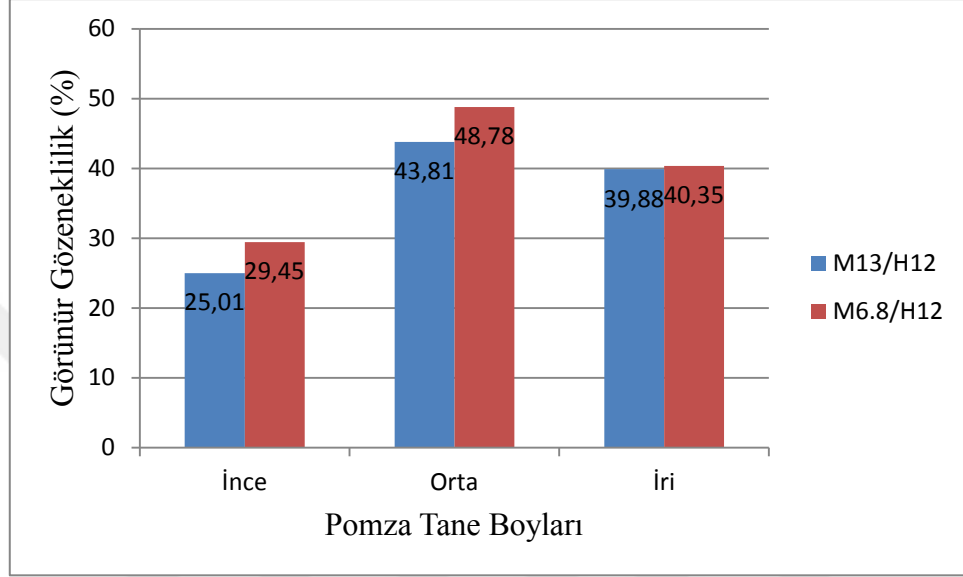
M6.8/H12 karışımını içeren numunelerin sonuçları, Çizelge 4.19’da verilmiştir. En az gözeneklilik gösteren %29,45 ile #2FP isimli numunedir. Ardından 40,35 ile #2CP ve en gözenekli numune %48,78 ile #2MP’dir. Her iki çimento karışımı ile hazırlanan hafif yapı malzemeleri için, pomza ve çimento tipine bağlı olarak kıyaslama grafiği Şekil 4.21’de verilmiştir.

Çizelge 4.19. M6.8/H12 karışımlarından hazırlanmış hafif yapı malzemelerin görünür gözeneklilik değerleri

	#2FP	#2MP	#2CP
1. ölçüm	28,38	48,48	39,98
2. ölçüm	29,49	49,01	40,38
3. ölçüm	29,52	48,81	40,51
4. ölçüm	30,42	48,83	40,52
Ortalama	29,45	48,78	40,35

Farklı çimento karışımlarına sahip olup aynı tip pomza kullanılan numuneler, kendi aralarında kıyaslandığında görünür gözeneklilik sonuçlarında oluşan fark, su emme deneylerinde oluşan farktan daha azdır. Hesaplamalar yapılırken ilk olarak numunenin suya doygun ağırlığı ile kuru ağırlığının farkı alınmıştır. Bu fark, su emme deneyi için her

bir numunenin kuru ağırlığına oranlanırken, görünür gözeneklilik hesabında numunenin hacmine oranlanmaktadır. Her bir numunenin kendine ait bir kuru ağırlığı var iken, numunelerin hacimleri birbirine eşittir. Bu sebepten dolayı çimento tiplerine bağlı görünür gözeneklilik farkı, su emme hesabında oluşan farktan daha azdır.



Şekil 4.21. Hafif yapı malzemelerin ortalama görünür gözeneklilik değerleri kıyaslama grafiği

Hafif yapı malzeme numunelerinin su emme ve görünür gözeneklilik sonuçları, benzer pomza tane boylarına sahip fakat farklı çimento karışımlarından hazırlanmış örnekler, kendi aralarında kıyaslanmıştır. Yani #2FP ile #1FP, #2MP ile #1MP ve #2CP ile #1CP kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonuçlarına göre, gözeneklilik ölçümlerinin aksine, M6.8/H12 karışımını içeren numunelerin su emme ve görünür gözeneklilik değerlerinin her zaman daha yukarıda olduğu saptanmıştır. İki farklı çimento tipinin ağırlıkça ham madde oranları incelendiğinde M6.8/H12 karışımında %37 su bulunurken, M13/H12 çimento harcında %25 su bulunmaktadır. Bu deneyin bir parçası olan etüvde bekleme işlemi ile çimento kendi yapısındaki suyu da vermekte ve numunelerin kaynatılma işlemi ile numunelerin sadece gözenekleri su ile dolmamakta ayrıca çimento etüvde kaybettiği suyu geri kazandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla M6.8/H12 karışımını içeren numuneler, yapısından daha çok su vererek tekrar geri almıştır. İki farklı çimento karışımları ile hazırlanan numunelerin su emme ve görünür gözeneklilik değerlerini, pomzadan ve pomza ve çimento arasında oluşan boşluklardan ziyade çimento tiplerinin kontrol ettiği anlaşılmıştır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tezin amacı, piyasada üretilen ve kullanılan gözenekli hafif duvar yapı malzemelerine (bims, gazbeton vb.) alternatif olarak, Magnezyum Oksiklorür Çimentosu (Sorel Çimento) esaslı alternatif ürün ortaya koymaktır. Bu kapsamda, Sorel çimento esaslı pomza katkılı hafif yapı malzeme numuneleri üretilmiştir ve çeşitli parametreleri ölçülmüştür. Hafif yapı malzemeleri için ölçülen parametrelerin ortalama değerleri tablosu Çizelge 5.1.'de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 5.1. Hafif yapı malzemeleri için ölçülen parametrelerin ortalama değerler tablosu

	#1FP	#1MP	#1CP	#2FP	#2MP	#2CP
Yoğunluk (g/cm ³)	1,48	1,22	1,29	1,17	0,84	0,94
Gözeneklilik (%)	53,35	64,66	60,09	51,77	61,81	58,82
Basınç Dayanımları (MPa) 28. gün	16,61	5,3	6,88	10,3	5,21	5,94
Isıl İletkenlik Katsayıları (W/mK)	0,484	0,372	0,442	0,337	0,229	0,306
Su emme (%)	17,13	36,89	30,67	22,73	48,21	40,64
Görünür Gözeneklilik (%)	25,01	43,81	39,88	29,45	48,78	40,35

Sorel çimentolar için:

- Hazırlanan çimentoların fazları, X-Işınları Kırınım difraktogramları ile incelenmiş ve hedeflenen Faz 5 kristallerinin oluşumu tespit edilmiştir. Arzu edilmeyen Faz 3 kristallerinin varlığına rastlanılmamıştır.
- M6.8/H12 çimento karışımlarında (#2S, #2M), M13/H12 çimento karışımlarından (#1S, #1M) farklı olarak, magnezyum oksiklorokarbonat fazının varlığı X-Işınları Kırınım difraktogramları ile saptanmıştır.
- M6.8/H12 çimento karışımlarının (#2S, #2M) yoğunluk ve basınç dayanım değerleri, M613/H12 çimento karışımlarına (#1S, #1M) göre daha düşük çıkmıştır. Ayrıca saf su ile hazırlanan çimento karışımlarının yoğunlukları, şebeke suyu ile hazırlanan numunelerden daha düşük, basınç dayanım değerleri ise daha yüksek çıkmıştır.

Pomza katkılı hafif yapı malzemeleri için:

a) Pomza tane boylarına göre,

- Orta tane boyu pomza kullanan numuneler, en düşük yoğunluk, gözeneklilik, basınç dayanımları ve ısıl iletkenlik katsayı değerlerine sahiptirler.
- İnce tane boyu pomza kullanan numuneler, en yüksek yoğunluk, gözeneklilik, basınç dayanımları ve ısıl iletkenlik katsayı değerlerine sahiptirler.

b) Çimento tiplerine göre,

- M13/H12 çimento karışımı ile hazırlanmış numunelerin yoğunluk, gözeneklilik, basınç dayanımları ve ısıl iletkenlik katsayı değerleri, M6.8/H12 çimento karışımları ile hazırlanmış numunelere göre daha yüksektir.

Su emme ve görünür gözeneklilik deneyleri için, orta tane boyu pomza ile hazırlanmış numuneler en yüksek, ince tane boyu pomza ile hazırlanmış numuneler ise en düşük su emme ve görünür gözeneklilik değerlerine sahiptirler. Ayrıca M13/H12 çimento karışımları ile hazırlanmış numunelerin su emme ve görünür gözeneklilik değerleri, M6.8/H12 çimento karışımları ile hazırlanmış numunelere göre daha düşüktür.

Tez çalışması kapsamında üretilen Sorel çimentoların X-Işınları Kırınım analiz sonuçları incelendiğinde; birbirlerine benzer fazları içerdiği, beklenen Faz 5 kristal oluşumu kanıtlanmış, oluşması istenmeyen Faz 3 kristallerin varlığına ise rastlanmamıştır. Bununla birlikte, M6.8/H12 karışımların, M13/H12 karışımlarından farklı olarak magnezyum oksiklorokarbonat fazını içerdiği saptanmıştır. Bu faz oluşumu, Sorel çimentosunun atmosferik CO₂'e maruz kalmasından kaynaklanabileceği gibi [13, 48, 49], numunelerin yüksek nemli ortamda bulunması ile de oluşabileceği ileri sürülmektedir [62]. Fakat çimentolar aynı koşullarda hazırlanıp bekletilmesine karşın, bu fazın oluşumunun sadece M6.8/H12 karışımlarında gözükmesinin sebebi, daha fazla su içeriğinin çimentonun nemli olmasını sağlayarak bu fazın oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca, Sorel çimentoların X-Işınları Kırınım difraktogramlarına göre, MgO miktarının önemli miktarda arttığı, bunun yanında, brusitin [Mg(OH)₂] oluştuğu saptanmıştır. Bu durum, Sorel çimentosunun suya karşı olan dayanıklılığını düşürebileceği ve havadaki nemden etkilenecek zayıflayacağı düşünülmektedir. Bunun yanında, nemden kaynaklandığı düşünülen, M6.8/H12 karışımlarındaki magnezyum oksiklorokarbonat fazın varlığı, bu

örneklerin basınç dayanımlarının, M13/H12 karışımlarına göre daha düşük olmasında bir etken olduğu kanaatine varılmıştır.

M13/H12 karışımı için MgO'nun fazlalığı, çimentonun akışkanlığını düşürdüğü, bundan dolayı çimentonun işlenebilirlik özelliğini azalttığı, ancak çimentonun basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. M6.8/H12 karışımları içeren numunelerin daha fazla su içermesi, çimentonun dayanımını azaltırken, işlenebilirliğini arttırdığı gözlenmiştir.

Sorel çimentolar hem saf su ile hem de şebeke suyu ile hazırlanmış olup, saf su içeren karışımların yoğunlukları daha düşük, basınç dayanımları ise daha yüksek olduğu saptandığından, hafif yapı malzemesi numunelerinin saf su ile hazırlanılmasına karar verilmiştir.

Hafif yapı malzemeleri, 0-4 mm (ince), 4-8 mm (orta) ve 8-16 mm (iri) üç farklı pomza yığınlarına, iki farklı oranlarda hazırlanmış Sorel çimentolarının ilavesi ile hazırlanmıştır. Tez kapsamında yapılan literatür incelemesinde, çoğunlukla pomza tanelerinin büyümesiyle yoğunluğun ve basınç dayanımın düştüğü saptanmıştır. Bu durumun aksine, her iki çimento karışımı için de, orta boy (4-8 mm) pomza taneleri kullanılmış olan hafif yapı malzemeleri, en düşük yoğunluk, gözeneklilik, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayı değerlerine sahip iken; en büyük pomza tane boyu kullanan numunelerin, yoğunluk ve basınç dayanım gözeneklilik basınç dayanımı ve ısı iletkenlik katsayı değerleri ikinci sırada gelmektedir. Bu durum, hafif yapı malzeme numunelerinin hazırlama tekniğindeki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Şöyle ki, literatür çalışmalarında pomza agregasının çimentodaki ağırlıkça bulunma oranını sabit tutarak numunelerin hazırlandığı tespit edilmiştir. Ancak, tez çalışmasında hazırlanmış olan numuneler, en yüksek seviyede pomza kullanımını sağlamak için ilk olarak pomzaların kalıplara yerleştirilmesi, ardından çimentonun dökülmesi şeklinde üretilmiştir. Numunelerin bu şekilde üretilmesi ile ağırlıkça çimento ve pomza oranları değişkenlik göstermektedir. Fakat bu sayede, farklı ham madde oranlarında sahip çimentoların pomzaların aralarına yerleşebilme ve buna bağlı olarak işlenebilirliği gözlenebilmiştir. İşlenebilirlik ise su içeriği ile açıklanmıştır. M6.8/H12 karışımında %37 su bulunurken, M13/H12 çimento karışımında %25 su bulunmaktadır. M13/H12 karışımı çok daha viskoz olup, pomzaların arasına yerleşebilmesi daha uzun zaman sürecinde gerçekleştiğinden, pomza ile çimento arasında boşluklar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durum ile ilişkili olarak aynı pomza tane boylarına sahip farklı çimentolar ile hazırlanmış numunelerin gözeneklilik değerleri incelendiğinde, işlenebilirlikten kaynaklı olarak M13/H12 çimento karışımları pomzaların arasına

yerleşmesi zaman almıştır ve pomza ile çimento arasında gözenekler oluşmuştur. Bu oluşan gözenekler micro-CT analizleri ile ortaya konulmuştur.

Sonuç olarak, çimento karışımlarında MgO miktarı arttıkça, su oranı azalmakta, basınç dayanımı, yoğunluğu, gözenekliliği ve ısı iletkenlik katsayısı artmaktadır. Orta (4-8 mm) tane boyuna sahip pomzalar ile hazırlanmış numuneler daha gözenekli, yalıtkan ve hafiftirler. M6.8/H12 karışımı ve orta tane boyuna sahip pomzalar ile hazırlanmış numunelerin yalıtım için en ideal ürünler olduğu sonucuna varılmıştır.

5.2. Öneriler

Ülkemizde hali hazırda birçok hafif yapı malzemeleri (bims, gazbeton vb.) ürünleri üretilmekte ve yapılarda kullanılmaktadır. Fakat, Sorel çimentosu bu ürünlerin arasında yer almamaktadır. Tez çalışması ile pomzanın gözenekli yapısından yararlanılarak, Sorel çimento esaslı hafif yapı malzemesi üretimi için karmaşık teknolojiye gerek kalmadığı gösterilmiş olup, numuneler laboratuvar ortamında kolaylıkla hazırlanmıştır.

Sorel çimentoların suya dayanıksız oluşu birçok çalışmacı tarafından değinilmiştir [16, 47, 50]. Yunsong [47], fosforik asit ve inorganik köpük ajanı, sorel çimentosunu suya dayanıklı hale getirdiğini önermişlerdir. Chau ve diğerleri [50], uçucu kül ile sorel çimentosunun suya karşı dayanıklılığın arttığını belirtmişlerdir. Hazırlanan numunelerin su emme değerleri yaklaşık %17 ile %48 arasında değişmektedir. Numunelerin su emme oranları, su iticilerle kaplanarak azaltılabilir. Bu kapsamda, suya dayanıklı numunelerin geliştirilmesi durumunda, Sorel çimentosu ile hazırlanan hafif yapı malzemelerinin dış cephe kaplaması olarak kullanılmasını olanaklı hale getirebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Diaz, J. C., García Nieto, P.J., Domínguez Hernández, J., Suárez Sánchez, A., Thermal design optimization of lightweight concrete blocks for internal one-way spanning slabs floors by FEM, *Energy Build.*, 41, 1276–1287, **2009**.
- [2] Munoz, P., Morales, M., Mendivil, M., Juárez, M., Munoz, L., Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction, *Constr. Build. Mater.* 71, 181–187, **2014**.
- [3] Sütçü, M., Akkurt, S., The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity, *Ceram. Int.* 35, 2625–2631, **2009**.
- [4] Wildcat Publishing – *The Oil & Gas Year Turkey 2010*.
- [5] Özkan Ş. G., Tuncer G., "Pomza Madencilğine Genel Bir Bakış", *4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 118-19, **2001**.
- [6] Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E., Gönen, T., 2003. Pomza Taşının Kullanım Alanları ve Ekonomiye Etkisi, *F.Ü. DAUM Dergisi*, 1, 118-123, **2003**.
- [7] Sorel, S., Sur un nouveau ciment magnésien. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences* 65: 102–104 **1867**.
- [8] Bensted, J., Barnes, P., *Structure and Performance of Cements*, 2nd edition Spon Press, London, **2002**.
- [9] Li, Z. and Chau, C. K., Influence of Molar Ratios on Properties of Magnesium Oxychloride Cement, *Cement Concrete Res.*, 37, 866-870, **2007**.
- [10] Henau, P., Dupas, M., Study of the alternation in acropolis monuments, *Proceedings of Second International Symposium on the Deterioration of Building Stone*, Athens, 319–325, **1976**.
- [11] Harper, F.C., Effect of calcinations temperature on the properties of magnesium oxides for use in magnesium oxychloride cements, *Journal of Applied Chemistry*, 17, 5-10, **1967**.
- [12] Matkovic, B., Popovic, S., Rogic, V., Zunic, T., Young, J. F., Reaction products in magnesium oxychloride cement pastes system MgO–MgCl₂–H₂O, *Journal of the American Ceramic Society*, 60, 504–507, **1977**.
- [13] Cole, W.F., Demediuk, T., X-ray, thermal and dehydration studies on magnesium oxychloride, *Australian Journal of Chemistry*, 8, 234–237, **1955**.
- [14] Sorrell, C. A., Armstrong, C. R., Reactions and equilibria in magnesium oxychloride cements, *Journal of the American Ceramic Society* 59, 51–59, **1976**.

- [15] Chau, C. K., Li, Z., Microstructures of magnesium oxychloride, *Materials and Structures* 41, 853–862, **2007**.
- [16] Shand, M. A., *The Chemistry and Technology of Magnesia*, John Wiley & Sons. Inc., 231 – 238, **2006**.
- [17] TS 1114 EN 13055-1, Hafif agregalar - Bölüm 1: Beton, harç ve şerbette kullanım için, **2004**.
- [18] Chandra, S., Berntsson, L., Lightweight aggregate concrete, *Science, Technology and Application*, USA: Noyes Publications, 193, **2003**.
- [19] Gunduz, L., The construction sector pumice stone, *Suleyman Demirel University, Pumice Research and Application Center*, **2003**.
- [20] Şengün, N., *Pomzanın Hafif Harç Yapımında Endüstriyel Hammadde Olarak Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Isparta, **2004**.
- [21] Yoğurtçu, E., Çadır, Ö., Ramyar, K., Öner, S., Mixture proportions, strength and cost analysis of self compacting concrete. *Hazır Beton J*, 79, **2012**.
- [22] Popovic, S., Concrete materials, properties, specifications and testing. New Jersey, US: Noyes Publications, **1992**.
- [23] TS 3234, Bimsbeton yapım kuralları, karışım hesabı ve deney metotları, **1978**.
- [24] Hall, A., *Igneous Petrology*, Addison Wesley Publishing Company; 2 Sub edition, 45-46, **1996**.
- [25] Hossain, K. M. A., Properties of volcanic ash and pumice concrete. *IABSE Report*, Zurich, Switzerland, vol. 81, 145–50, **1999**.
- [26] Hossain, K. M.A., Blended cement using volcanic ash and pumice. *Cem Concr Res*. 33(10), 1601–5, **2003**.
- [27] Crangle, R. D., Pumice and pumicite. *US Geological Survey Minerals Year Book – Mineral Commodity Summaries*, 124–25, **2010**.
- [28] Yeginobali, A., Sobolev, K. G., Soboleva, S. V., Tokyay, M., High strength natural lightweight aggregate concrete with silica fume. *ACI SP-178-38*, vol. 178, 739–58, **1998**.
- [29] Litvan, G. G., Further study of particulate admixtures for enhanced freeze–thaw resistance of concrete. *ACI J*; 82(5):724–30, **1985**.
- [30] Devlet Planlama Teşkilatı, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Edüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri, **2001**.

- [31] Devlet Planlama Teşkilatı, Onuncu Kalkınma Planı, Madencilik Politikaları, Özel İhtisas Komisyonu Raporu, **2015**.
- [32] Güngör, N., Tombul, M., Pomzanın Kullanım Alanı İle İlgili Özellikleri ve Mevzuatın Pomza Madenciliğine Etkisi. *1. Isparta Pomza Sempozyumu*, 26-28 Haziran, Isparta 19-24, **1997**.
- [33] Vural, I., Akgül, T., Aydın, E., Aydın, F., Sarıbiyık, M., Examination of the Energy Efficiency of Wall Building Elements Used in Dwellings, *Proceedings of the 4th International Congress*, April, Fethiye, Turkey, **2014**.
- [34] Demirel, B., Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks, *Construction and Building Materials* 40, 306–313, **2013**.
- [35] Amato, G., Campione, G., Cavaleri, L., Minafo, G., Miraglia, N., The use of pumice lightweight concrete for masonry applications, *Materials and Structures* 45, 679–693, **2012**.
- [36] Khandaker, M., Hossain, A. ‘Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, 2478, **2002**.
- [37] Hossain, K. M. A., Properties of volcanic scoria based lightweight concrete, *Magazine of Concrete Research*, 56(2), 111-120, **2004**.
- [38] Hossain, K. M. A., Blended cement and lightweight concrete using scoria: mix design, strength, durability and heat insulation characteristics, *Int. Journal of Physical Sciences (IJPS)*, 1(1), 5-16, **2006**.
- [39] Kozak M., Ünal O., Hafif agregalı blokların özelliklerinin araştırılması, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2) 17-30, **2010**.
- [40] Şimşek, O., Sancak, E., Erdal, M. ve Bolat, H., Bims Agregası İle Üretilen Silis Dumani Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonların Konut Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması, *e-Journal of New World Sciences Academy*, Volume: 2, Number: 4, **2007**.
- [41] Özdemir, A., Bazı Yapı Malzemelerin Kapiler Su Emme Potansiyelleri, *Jeoloji Mühendisleri Odası*, **2002**.
http://www.jmo.org.tr/resimler/ekler/217bb4e7fa0541e_ek.pdf (Eylül, 2016).
- [42] Devlet Planlama Teşkilatı, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Toprak Sanayii Hammaddeleri, **2001**.
- [43] Kuzvart, M., *Industrial Minerals and Rocks*, Elsevier, London, 212 – 220, **1984**.
- [44] Öztürk, A., Timuçin, M., Göktaş, A., Özer, M. S., GRE Esaslı Seramik Karoların Yüzeylerinin Parlatılmasında Kullanılabilecek Kompozit Parlatma Disklerinin Üretimi, *TÜBİTAK MAG Proje 105M140*, 1-57, **2008**.

- [45] Li, Z., and Chau, C. K., Accelerated Reactivity Assessment of Light Burnt Magnesium Oxide, *The American Ceramic Society*, 91 [5] 1640–1645, **2008**.
- [46] Dehua, D., Chuanmei, Z., The formation mechanism of the hydrate phases in magnesium oxychloride cement, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1365–1371, **1999**.
- [47] Yunsong, J., A new type of light magnesium cement foamed material, *Materials Letters*, Vol. 50, 28 – 31, **2001**
- [48] Casella, M. D., Lorentz, J. C., Traveria A., Tura, J. M., Cracks in Sorel’s Cement polishing bricks as a result of magnesium oxychloride carbonatation, *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, 1199-1202, **1996**.
- [49] Maravelaki, K. P., Moraitou, G., Sorel’s Cement mortars decay susceptibility and effect on pentelic marble, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, 1929–1935, **1999**.
- [50] Chau, C.K., Chan, j., Li, Z., Influences of fly ash on magnesium oxychloride mortar, *Cement & Concrete Composites*, 31, 250–254, **2009**.
- [51] Zhou, X., Li, Z., Light-weight wood–magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion, *Construction and Building Materials*, 27, 382–389, **2012**.
- [52] Demediuk, T., Cole, W. F., A study on magnesium oxysulfates, *Australian J. Chern.* 10, 287 - 94 **1957**.
- [53] TS EN 772-13, Kağır birimler - Deney metotları - Bölüm 13: Kağır birimlerin net ve brüt kuru birim hacim kütlelerin tayini (doğal taş hariç), **2002**.
- [54] ICDD, Powder Diffraction File, PDF-2 release 2004, The International Centre for Diffraction Data, U.S.A. **2004**.
- [55] ASTM Inorganic Index to the powder diffraction file: Joint Committee on Powder Diffraction Standart, 1432p., Pennsylvania, **1972**.
- [56] TS EN 12930-3, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, **2003**.
- [57] ASTM E 1530-11, Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique, **2014**.
- [58] Efe, T., *Yalıtımlı Hafif Beton Kiremit Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, **2011**.
- [59] TS 4633 EN 993-1, Yoğun refrakter mamuller için deney metotları-Kısım 1: Kaba yoğunluk, görünür porozite ve hakiki porozitenin tayini, **1996**.

- [60] Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M. J., Bonin, B., Bateman, P., *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*, Cambridge University Press, **2005**.
- [61] Temel, A., Gündoğdu, M.N., Gourgaud, A., Le Pennec, J., L., Ignimbrites of Cappadocia (Central Anatolia, Turkey): Petrology and Geochemistry, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 85/1-4, 447-471, **1998**.
- [62] Ball, M. C., Reactions of compounds occurring in Sorrel's cement, *Cem. Concr. Res.* 7, 575 – 584, **1977**.



ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Can Güven

Doğum Yeri : Ankara

Medeni Hali : Bekar

E-posta : canguven@hacettepe.edu.tr

Adresi : Eryaman 5. Etap Tunahan Mah. Okyanus Plaza No: 5A/9
Etimesgut/ANKARA

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2009 – 2013)

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü (2013 -)

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce – İleri

Almanca – Başlangıç

İş Deneyimi

Ar&Ge projeleri sanayi danışmanlığı, serbest (20014-2016)

Envy Enerji ve Çevre Yatırımları A.Ş., Jeoloji Mühendisi (2016 -)

Deneyim Alanları

Coğrafik bilgi sistemleri uzmanı, ortofoto yorumlama ve sayısallaştırma

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 07/02/2017

Tez Başlığı / Konusu: MAGNEZYUM OKSİKLORÜR ÇİMENTOSU İLE POMZA KATKILI HAFİF YAPI MALZEMESİ ÜRETİLMESİ

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç ve e)Kaynakça kısımlarından oluşan toplam 72 sayfalık kısmına ilişkin, 06/02/2017. tarihinde tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

07.02.2017

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: CAN GÜVEN

Öğrenci No: N13124299

Anabilim Dalı: JEOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Programı:

Statüsü: Y.Lisans Doktora Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Abidin Temel

(Unvan, Ad Soyad, İmza)