



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT/KAPRIK ASİT KOMPOZİTİ İÇEREN
KÖPÜK BETONLARIN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE
TERMOREGÜLASYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

ZELİHA YÜKSEL

DANIŞMAN

DOÇ. DR. ALİ YARAŞ

BARTIN-2024



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT/KAPRIK ASİT KOMPOZİTİ İÇEREN KÖPÜK
BETONLARIN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE TERMOREGÜLASYON
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZELİHA YÜKSEL

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN-2024

KABUL VE ONAY



BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun Doç. Dr. Ali YARAŞ danışmanlığında hazırlamış olduğum “GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT/KAPRIK ASİT KOMPOZİTİ İÇEREN KÖPÜK BETONLARIN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE TERMOREGÜLASYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin içindeki tüm bilgilerin doğru olduğunu ve özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

29.08.2024
Zeliha YÜKSEL

ÖN SÖZ

Tez çalışması boyunca özverili desteği, anlayışlı yaklaşımı, bilgi ve tecrübesiyle her konuda bana yol gösteren danışman hocam sayın Doç. Dr. Ali YARAŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, köpük beton üretimi sırasında engin deneyimlerini benimle paylaşan Prof. Dr. Osman GENÇEL ve Prof. Dr. Ertuğrul ERDOĞMUŞ hocalarıma, termoregülasyon ölçümlerinin alınmasında yardımını esirgemeyen Doç. Dr. Abid USTAOĞLU hocama da ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan sevgili dostum Sultan ASLANTAŞ KAYIŞLI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatımın her anında desteklerini benden esirgemeyen başta aileme ve saygıdeğer aile büyüğümüz Hakan YÜKSEL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Zeliha YÜKSEL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GENLEŞTİRİLMİŞ PERLİT/KAPRIK ASİT KOMPOZİTİ İÇEREN KÖPÜK BETONLARIN ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE TERMOREGÜLASYON PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Zeliha YÜKSEL

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali YARAŞ

Bartın-2024, sayfa: 60

Yapı malzemelerinin üretiminde faz değiştiren malzemelerin (FDM) kullanımı binalarda termal enerjinin verimli bir şekilde kullanılmasına olanak sağlar. Böylece, binaların ısıtma ve soğutma işlemleri için ihtiyaç duyduğu enerji azaltılabilir. Bu tez çalışmasında, destek materyali olarak gözenekli yapıdaki genleştirilmiş perlit (GP), FDM olan kaprik asite (KA) doğrudan emdirme yöntemiyle emdirilmiştir. Sızıntı testi sonucunda genleştirilmiş perlitin en fazla kütlece %58 oranında KA absorplayabildiği belirlendi. Sonrasında, hazırlanan GP/KA kompoziti farklı oranlarda (kütlece %15, %20, %25 ve %30) köpük beton karışımına silis kumuna ikame olarak ilave edildi. Hazırlanan GP/KA kompozitine ait erime sıcaklığı ve erime entalpi değerleri sırasıyla 29,2°C ve 96,4 J/g olarak belirlendi. GP/KA kompozit miktarının artışına bağlı olarak, köpük beton numunelerin yayılma çapı ve kuru birim ağırlıkları azalırken su absorpsiyon ve görünür gözeneklilik değerleri artış gösterdi. Köpük beton numunelerin basınç dayanımları ve termal iletkenlik değerleri ise GP/KA miktarının artışına bağlı olarak azalma eğilimi sergiledi. Kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton numunesi için, en düşük basınç dayanımı ve termal iletkenlik katsayısı sırasıyla 4,04 MPa ve 0,213 W/m.K olarak ölçüldü. Referans numuneye kıyasla, %30 GP/KA katkılı köpük beton ortam sıcaklığının yüksek olduğu saatlerde iç ortamı daha serin tutabilmektedir.

Ayrıca, gece saatlerinde ve ortam soğuduğunda daha sıcak bir iç ortam sıcaklığı sağlayabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzeme, fiziko-mekanik özellikler, genleştirilmiş perlit, köpük beton, termal enerji depolama.



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

PRODUCTION, CHARACTERIZATION AND INVESTIGATION OF THERMOREGULATION PERFORMANCE OF FOAM CONCRETES CONTAINING EXPANDED PERLITE/CAPRIC ACID COMPOSITE

Zeliha YÜKSEL

Bartın University

Graduate School

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ali YARAŞ

Bartın-2024, pp: 60

The usage of phase change materials (FDM) in the production of building materials allows the efficient use of thermal energy in buildings. Thus, the energy required for heating and cooling of buildings can be reduced. In this thesis study, porous expanded perlite (GP) as support material was impregnated with capric acid (CA), which is a phase change material, by direct impregnation method. As a result of the leakage test, it was determined that GP could absorb up to 58% CA by weight. Afterwards, the prepared GP/KA composite was incorporated to the foam concrete mixture at different rates (15%, 20%, 25% and 30% by weight) as a substitute for silica sand. The melting temperature and melting enthalpy values of the prepared GP/CA composite were determined as 29,2°C and 96,4 J/g, respectively. Depending on the increase in the amount of GP/CA composite, the flow diameter and dry unit weights of the foam concrete samples decreased, while water absorption and apparent porosity values increased. The compressive strength and thermal conductivity values of the foam concrete samples showed a decreasing trend depending on the increase in the amount of GP/CA. For the foam concrete sample containing 30% GP/CA by weight, the lowest compressive strength and thermal conductivity coefficient were measured as 4,04 MPa and 0,213 W/m.K, respectively. Compared to reference sample, foam concrete with 30% GP/KA

can keep indoor environment cooler where ambient temperature is high. Additionally, it can provide a warmer indoor temperature at night and when the environment gets colder.

Key Words: Phase change material, physico mechanical properties, expanded perlite, foam concrete, thermal energy storage.



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	iii
BEYANNAME.....	iv
ÖN SÖZ.....	v
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Enerji Depolama Teknolojisi.....	2
1.2 Faz Değiştiren Malzemeler (FDM).....	3
1.2.1 FDM'lerin Avantaj ve Dezavantajları.....	5
1.2.2 FDM Uygulamaları.....	6
1.2.2.1 Güneş Enerjisi Sistemlerinde FDM Kullanımı.....	6
1.2.2.2 Elektronik Cihazlarda FDM Kullanımı.....	7
1.2.2.3 Medikal Malzemelerde FDM Kullanımı.....	7
1.2.2.4 Termal İçerikli Tekstil Ürünlerinde FDM Kullanımı.....	8
1.2.2.5 Bina Uygulamalarında FDM Kullanımı.....	8
1.3 Beton.....	10
1.3.1 Hafif Beton.....	10
1.3.1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması.....	10
1.4 Köpük Beton.....	11
1.4.1 Köpük Betonun Özellikleri.....	11
1.4.2 Köpük Betonun Avantaj ve Dezavantajları.....	12
1.4.3 Köpük Betonun Kullanım Alanları.....	12
1.5 Perlit ve Özellikleri.....	13
1.5.1 Genleştirilmiş Perlit ve Özellikleri.....	14
1.5.1.1 Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları.....	15
1.5.2 Dünyada Perlitin Mevcut Durumu.....	15
1.5.3 Türkiye'de Perlit Durumu.....	16
1.6 Kaprik Asit.....	17

2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	18
2.1 Yapı Malzeme Üretiminde FDM'siz Perlit Kullanımı	18
2.2 Vakum Yöntemi ile FDM İçeren Kompozit Üretimi.....	18
2.3 Doğrudan Emdirme Yöntemi ile FDM İçeren Kompozit Üretimi	21
2.4 Köpük Beton İle İlgili Çalışmalar	22
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	24
3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	24
3.2 Kaprik Asit (KA) İçeren Genleştirilmiş Perlit (GP) Kompozitlerin Hazırlanması.....	25
3.3 GP/KA Kompoziti İçeren Köpük Betonların Üretimi.....	27
3.4 Karakterizasyon İşlemleri.....	29
3.5 Termoregülasyon Testi.....	32
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	34
4.1 FTIR Analizi	34
4.2 DSC Analizi	35
4.3 Yayılma Çapı ve Kuru Birim Ağırlık.....	36
4.4 Görünür Gözeneklilik ve Su Absorpsiyonu.....	38
4.5 Basınç Dayanımı.....	39
4.6 Termal İletkenlik.....	40
4.7 SEM ve EDS Analizleri.....	40
4.8 Termoregülasyon Performans Sonuçları.....	47
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Gizli ısı depolama	3
1.2: FDM'nin hal değişiminin şematik gösterimi (a), FDM hal değişimi grafiği (b)	3
1.3: FDM'lerin erime sıcaklık aralıkları ve entalpileri.....	4
1.4: FDM içeren kan ve medikal nakliye kutuları.....	7
1.5: Serbest soğutma çalışma ilkesi: FDM'nin gece çalışma ilkesi (a), FDM'nin gündüz çalışma ilkesi (b)	9
3.1: Deneyde kullanılan malzemeler	25
3.2: GP/KA kompozitinin hazırlanması	26
3.3: Farklı KA içeriğine sahip GP/KA kompozitlerinin sızıntı test görüntüleri	27
3.4: Köpük beton numunelerin hazırlanması	28
3.5: GP'nin partikül boyut dağılım analizi.....	29
3.6: GP'nin XRD grafiği	30
3.7: GP'nin TGA-DTG eğrisi.....	31
3.8: GP'nin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.....	31
3.9: Basınç dayanım testi (a) ve termal iletkenlik ölçümü (b)	32
3.10: Termal regülasyon deney düzeneği.....	33
4.1: GP, KA ve GP/KA kompozitin FTIR analiz sonuçları	35
4.2: KA ve GP/KA kompozitin DSC eğrileri.....	36
4.3: Köpük beton numunelerine ait yayılma çapı ve kuru birim ağırlık sonuçları.....	37
4.4: Köpük beton numunelerin su absorpsiyon ve görünür gözeneklilik sonuçları	38
4.5: Köpük beton numunelerin basınç dayanım sonuçları	39
4.6: Köpük beton numunelerin termal iletkenlik sonuçları.....	40
4.7: GP/KA kompozitinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri.....	41
4.8: GP/KA kompozitinin SEM-EDS analizi.....	42
4.9: Referans köpük beton numunesinin SEM-EDS görüntüleri ve mapping analizi.....	43
4.10: Kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton numunesinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri	44
4.11: Kütlece %30 GP/KA kompozit içeren köpük beton numunesinin SEM-EDS analizi.	45
4.12: Kütlece %30 GP/KA kompoziti içeren köpük beton numunesinin mapping analizi.	46

4.13: Global güneş ışınlmı, doğrudan gelen güneş ışınlmı ve dağınık güneş ışınlmının değişimi (15-19.06.2023)	48
4.14: Küttelece %30 GP/KA iğerren köpük beton ve referans plakaların kullanıldığı test odalarındaki alt yüzey (a) ve üst yüzeydeki (b) sıcaklık değişimi (15-19.06.2023)	49
4.15: Küttelece %30 GP/KA iğerren köpük beton ve referans plakaların kullanıldığı test odalarındaki yakın yüzey (c) ve merkezdeki (d) sıcaklık değişimi (15-19.06.2023)...	50
4.16: Küttelece %30 GP/KA iğerren köpük beton ve referans plakaların alt yüzey ile üst yüzey (a) ve oda merkezi ile yakın yüzey (b) arasındaki sıcaklık farkları (15-19.06.2023)	51



TABLULAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Ham perlit ve genişletilmiş perlitin bazı fiziksel özellikleri.....	13
1.2: Perlitin kimyasal özellikleri	14
3.1: Deneyleerde kullanılan çimentonun özellikleri	24
3.2: Hazırlanan köpük beton karışımları	28
4.1: KA ve GP/KA kompozitine ait DSC verileri.....	36



SİMGELER VE KISALTMALAR

MPa	: mega paskal
T_f	: son sıcaklık, °C
T_{fd}	: faz değişim sıcaklığı, °C
T_i	: başlangıç sıcaklık, °C
°C	: santigrat derece
ΔH_{fd}	: faz değişim entalpisi

KISALTMALAR

ACK	: Aktifleştirilmiş Ceviz Kabuğu
AFK	: Aktifleştirilmiş Fındık Kabuğu
AMT	: Atık Mermer Tozu
CK	: Ceviz Kabuğu
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
FK	: Fındık Kabuğu
GESİ	: Güneş Enerjili Su Isıtma Sistemi
GG	: Genleştirilmiş Grafit
GP	: Genleştirilmiş Perlit
GV	: Genleştirilmiş Vermikülit
İPP	: İzopropil Palmitat
KA	: Kaprik Asit
LA	: Laurik Asit
MA	: Miristik Asit
MP	: Metil Palmitat
nOD	: n-oktadekan
PA	: Palmitik Asit
PKK	: Pirinç Kabuğu Külü
RT	: Rubiterm
SA	: Stearik Asit

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu
TED : Termal Enerji Depolama
XRF : X-ışınları Floresans



1. GİRİŞ

Yaşamın vazgeçilmez bir bileşeni olarak kabul edilen enerji, ekonomik büyümenin sürdürülebilir olması ve ülke ekonomisinin ilerlemesi dikkate alındığında temel ve önemli bir parametredir. Dünyanın ihtiyaç duyduğu enerji talebinin büyük bölümü geçmişte olduğu gibi günümüzde de fosil yakıt kaynakları tarafından karşılanmaktadır (Sharma vd., 2009).

Çevreye zarar verme ve sınırlı kullanım gibi istenmeyen özellikleri olmasına rağmen fosil yakıtlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu durum enerji kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından endişe vericidir. Dünyadaki enerji talebinin gittikçe artması, temiz ve yenilenebilir enerji için alternatif enerji kaynak arayışlarını gündeme getirmiştir. Güneş enerjisinin etkin ve verimli bir şekilde kullanımı bu soruna uygun çözümler sunabilir. Güneş enerjisi özellikle binaların ısıtma/soğutma, iklimlendirme ve havalandırma işlemleri için gerekli olan enerji ihtiyaçlarını karşılamak adına alternatif bir kaynaktır (Tuncel, 2020).

Son dönemde, yeni nesil enerji malzemeleri olarak bilinen faz değiştiren malzemeler (FDM) enerji uygulamalarında büyük rağbet görmektedir. Bunlar, erime sürecinde endotermik bir şekilde ısıyı absorbe ederken, katılaşma sırasında ise ekzotermik bir şekilde ısı yaymaktadır. FDM'ler, ısı enerji depolama potansiyellerinin yüksek olması nedeniyle, enerjinin etkin ve verimli kullanımına yönelik uygulamalar için dikkat çekmektedir (Bayram vd., 2023).

Dünya çapında tüketilen enerjinin yaklaşık %51'i bina yalıtımlarının yetersizliği sebebiyle ısı kaybı şeklinde meydana gelmektedir. Bina dış yüzeylerinde gözenekli, hafif ve termal iletkenliği düşük yapı malzemelerinin kullanılması bu sorunun çözümü için alternatif bir yöntem olabilir. Piyasada çeşitli formlarda ve farklı iç boşluk geometrilerine sahip gözenekli yapı malzemeleri bulunmaktadır. Bünyelerindeki hava boşlukları sayesinde, bu malzemelerin ısı verimleri yüksek olduğundan bina yüzeyinde daha düşük miktarda ısı kaybı meydana gelir. Binalardaki enerji tüketimini en aza indirmek için bir diğer yöntem ise termal enerji depolayabilen malzemelerin bina bileşenleriyle entegrasyonudur. Termal enerji depolama özelliğine sahip bu malzemelerin başında FDM'ler gelmektedir. Özellikle son yıllarda binalardaki iç ortam sıcaklığını daha stabil tutabilmek için FDM'lerin yapı malzeme bünyesinde kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Al-Absi vd., 2022 ;Cabeza vd., 2011).

1.1 Enerji Depolama Teknolojisi

Enerjinin verimli ve etkin bir şekilde sağlanması ve kullanılması için enerjinin güvenli ve ekonomik bir biçimde depolanması gerekir. Enerji; kimyasal, mekanik, elektriksel ve ısı enerjisi olarak olmak üzere 4 farklı şekilde depolanabilir (Evans vd., 2012).

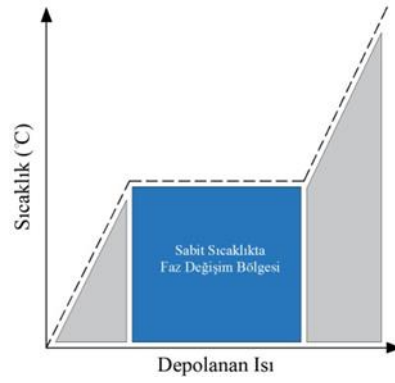
Mekanik enerji: Hareket enerjisinden meydana gelen enerji üretim biçimidir. Hareket enerjisi, iş yapıldığında mekanik enerji olarak ortaya çıkarır. Mekanik enerji ile çeşitli işler yapılabilmekle birlikte elektrik enerjisi de üretilebilir.

Kimyasal enerji: Kimyasal tepkimeler sonucu ortaya çıkan enerjiye verilen isimdir. Günlük hayatta kullanılan piller ve aküler, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürür. Pil ve akülerde elektrik enerjisi, kimyasal olarak depolanır. Ayrıca, kimyasal enerjiyi mekanik, termal ve ışık enerjisine dönüştürmek mümkündür.

Elektriksel enerji: Elektrik yüklerinin bulunduğu konumdan veya hareketlerinden kaynaklanan enerji türüne elektrik enerjisi adı verilmektedir. Elektrik enerjisinin en büyük özelliği, dönüşebilir olmasıdır. Yapılan iş vasıtasıyla elektrik enerjisi kinetik enerjiye dönüştürülebilir.

Isı enerjisi: Kömür, petrol, linyit, doğalgaz gibi fosil yakıtların yanması sonucu açığa çıkan enerjidir. Elde edilen ısı enerjisi, türbinler aracılığıyla mekanik enerjiye dönüştürüldükten sonra jeneratörlerle elektrik enerjisine çevrilebilir (Kozak ve Kozak, 2012).

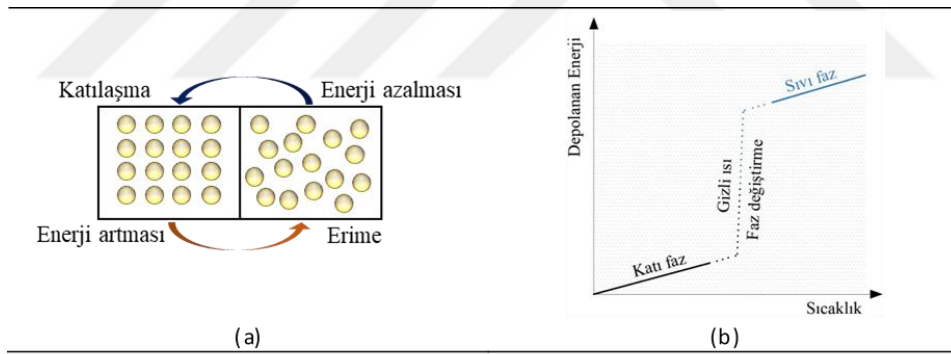
Termal enerji; ekonomik ve verimli bir biçimde FDM'lerin kullanılması ile depolanabilir. Enerji depolama özelliğine sahip olan FDM'ler, birim hacim başına yüksek miktarda ısıyı depolayabilir. Diğer bir ifadeyle, FDM'ler faz değişimi sırasında (örneğin, sıvıdan katı hale veya katıdan sıvı hale geçiş sırasında) sıcaklığı sabit tutarak büyük miktarda ısı depolayabilir veya serbest bırakabilir (Şekil 1.1) (Sharma vd., 2009).



Şekil 1.1: Gizli ısı depolama (De Gracia ve Cabeza, 2015)

1.2 Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)

FDM'ler, belirli sıcaklıklarda katı ve sıvı fazlar arasında geçiş yapabilen malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde enerji depolama ve serbest bırakma süreçlerinde kullanılırlar. Faz değiştirme sırasında, malzemeler gizli ısıyı depolar veya serbest bırakır, bu da onları enerji verimliliği sağlamak için ideal hale getirir (Şekil 1.2).



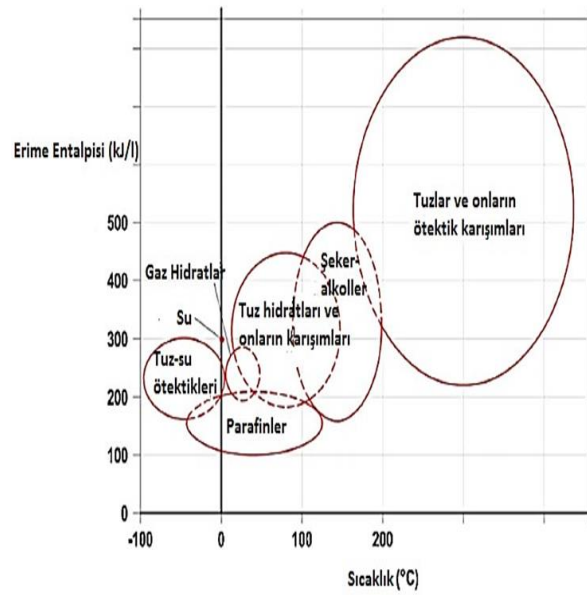
Şekil 1.2: FDM'nin hal değişiminin şematik gösterimi (a), FDM hal değişimi grafiği (b)

(Beltrán ve Martínez-Gómez, 2019)

FDM'ler özelliklerine ve kullanım alanlarına göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Örneğin; faz değişim sıcaklığına göre düşük (0°C - 20°C), orta (20°C - 60°C) ve yüksek ($>60^{\circ}\text{C}$) sıcaklık FDM'ler olarak 3'e ayrılır. Ayrıca faz değiştiren malzemeler organik, inorganik ve ötektik olarak 3 ana kategori altında da incelenebilir (Podara vd., 2021). Organik FDM'ler, karbon esaslı bileşiklerden oluşan yüksek gizli ısı kapasitesine ve çeşitli faz değiştirme sıcaklıklarına sahip, genellikle kimyasal stabiliteleri yüksek, düşük toksisite özelliği olan malzemelerdir. Parafinler (parafin wax) ve çeşitli karboksil asitleri (örneğin,

stearik asit) bu organik FDM'lere örnek olarak verilebilir. İnorganik FDM'ler ise mineral bazlı bileşenlerden meydana gelir. Bu tür FDM'ler yüksek termal iletkenlikleri sayesinde hızlı ısı transferi sağlarlar ve genellikle daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptirler. Ancak, bazıları sıvı fazda yüksek hacim değişimi gösterebilir. Tuz çözeltileri ve metal hidratlar (kalsiyum klorür hegzahidrat gibi) inorganik FDM türlerindedir. Ötektik FDM'ler de, istenen erime noktasına ulaşmak için en az iki FDM'nin karıştırılmasıyla elde edilen, FDM'lerdir. Bu FDM'ler, kimyasal ve fiziksel özellikler açısından diğer FDM türlerine göre daha fazla esneklik sunabilirler (Baetens vd., 2010; Cabeza, 2021; Gallart-Sirvent vd., 2017; Memon, 2014; Memon vd., 2015).

FDM'lerin her bir türünün karakteristik bir erime ısısı ve erime entalpisi bulunmaktadır. Bir FDM'nin erime noktası, malzemenin uygulanabilirliği açısından kritik bir faktördür. Bu nedenle FDM seçiminin uygulama sıcaklığına göre yapılması gerekir. Erime entalpisi yüksek olan FDM'ler, belirli bir zamandaki sıcaklık dalgalanmalarında daha fazla enerji depolayabilir. Dolayısıyla, enerji depolama uygulamaları için ideal malzemeler, genellikle yüksek erime entalpisi ve uygun erime noktasına sahip olmalıdır. En genel anlamda; bir FDM'nin erime noktası, hangi sıcaklık koşullarında çalışacağını belirtirken, erime entalpisi, depolayabileceği enerji miktarı hakkında bilgi verir (Şekil 1.3). Bu nedenle, enerji depolama uygulamalarında, bu iki parametrenin uyumlu bir şekilde seçilmesi kritik öneme sahiptir.



Şekil 1.3: FDM'lerin erime sıcaklık aralıkları ve entalpileri (Baetens vd., 2010)

Organik formdaki FDM'lerin ısı iletkenlikleri 0,1- 0,2 W/m.K arasında değişim gösterirken, inorganik FDM'ler genellikle daha yüksek ısı iletkenlik değerine (0,3-1,5 W/m.K) sahiptir. Faz değişimi sırasında, ısı transferi hızlı bir şekilde gerçekleşirken katılaşma sırasında, FDM yüksek dirençli katı bir tabaka üzerinde kalmaya çalışarak ısı transferini engeller ve ısı aktarımı daha yavaş bir şekilde gerçekleşir. Isı depolama özelliklerini geliştirmek için FDM'lerin ısı transfer performansını artırmak gerekir. Bu nedenle, FDM'lerin ısı iletkenliğini iyileştirmek için; yüksek ısı iletkenliğe sahip dolgu maddelerinin FDM'ye katılması, mikro veya nano yapıların ilavesiyle yüzey alanının artırılması ve kimyasal modifikasyon gibi teknikler kullanılabilir (Agyenim vd., 2010; Cárdenas ve León, 2013; Jegadheeswaran ve Pohekar, 2009)

1.2.1 FDM'lerin Avantaj ve Dezavantajları

FDM'lerin başlıca avantaj ve dezavantajlarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür;

Avantajları;

Yüksek Enerji Depolama Kapasitesi: FDM'ler, faz değişimi sırasında büyük miktarda enerji depolayabilir, bu da onları enerji verimliliği için ideal kılar.

Isı Yönetimi: FDM'ler, sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyebilir. Faz değiştirme süreci, belirli sıcaklık aralıklarında enerjiyi absorbe eder veya serbest bırakır. Böylece, iç mekan sıcaklık konforu iyileşir.

Düşük Isı Kaybı: FDM'ler, uygun koşullarda yavaş bir ısı transferi sağladığı için enerji kayıplarını minimize eder.

Çeşitli Uygulama Alanları: FDM'ler; binalar, güneş enerjisi sistemleri, gıda muhafazası ve elektrikli araçlar olmak üzere geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

Dezavantajları;

Sınırlı Isıl İletkenlik: Bazı FDM'ler, düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle ısının geçiş hızını yavaşlatabilir. Bu durum, faz değişim süreçlerini etkiler.

Maliyet: Bazı FDM'lerin üretim maliyetleri, kimi geleneksel enerji depolama yöntemlerine kıyasla daha yüksek olabilir.

Kimyasal Değişim: Zamanla bazı FDM'lerin, çevresel etkenler veya tekrarlanan faz değişim süreçleri sonucunda kimyasal yapısında değişimler meydana gelebilir. Bu da performans düşüklüğüne yol açabilir (Mert vd., 2018; Baetens vd., 2010).

1.2.2 FDM Uygulamaları

Faz değişimi sırasında termal enerjiyi depolayabilme özelliğinden dolayı FDM'ler çeşitli endüstriyel ve günlük uygulamalarda enerji depolama ve ısı yönetimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır (Hekimoğlu, 2022).

1.2.2.1 Güneş Enerjisi Sistemlerinde FDM Kullanımı

FDM'ler, güneş enerjisi sistemlerinde ısının yönetilmesine ve sistem verimliliğinin artırılmasına katkıda bulunabilir (Sharma vd., 2015). Bu sistemleri; güneş enerjili su ısıtma (GESI) sistemi ve termal güneş enerjisi üretim sistemi olmak üzere 2 gruba ayırmak mümkündür (Wang vd., 2015).

GESI sistemi, enerji tasarrufu sağlayan ve gece saatlerinde ciddi ısı kayıplarının oluşmasını engelleyen bir tesis türüdür. Bu sistemde FDM'ler, güneş enerjisiyle ısıtılan su veya hava sistemlerinde kullanılmaktadır. Ancak, geleneksel GESI sistemleri soğuk ve kapalı havalarda verimsizdir ve güneş enerjisini etkili bir şekilde kullanamazlar. FDM'ler, enerjiyi depolayarak, güneşin olmadığı bu tip zamanlarda ısıtma yapılmasına yardımcı olur.

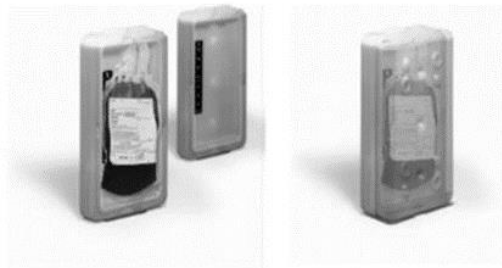
Geleneksel bir termal güneş enerjisi üretim sistemi ile güneş ışığını toplamak ve güçlü bir ısı üretmek amaçlanır. Bunun için çeşitli geometrilere sahip reflektörler veya toplayıcılar kullanılır ve üretilen ısı bir ısı transfer sıvısı aracılığıyla termal santrale iletilir. FDM'lerin bu tür termal güneş enerji sistemlerinde kullanımı sistem verimliliğini artırır (Py vd., 2013).

1.2.2.2 Elektronik Cihazlarda FDM Kullanımı

Elektronik cihazlar çalışırken ısı üretir ve bu ısı, cihaz bileşenlerinin performansını etkileyebilir. FDM'lerin elektronik cihazlardaki kullanımı, ısının etkin bir şekilde yönetilmesi ve sistem verimliliğinin artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Elektronik cihazların çoğu, belirli bir sıcaklık aralığında olabilecek en verimli şekilde çalışır. Çalışma sırasında aşırı yüksek veya düşük sıcaklıkların meydana gelmesi arızalara veya verimin düşmesine neden olabilir. Örneğin, cep telefonu bataryaları aşırı ısındığında bozulabilir. Bu nedenle ısınan elektronik cihazların sıcaklıklarının düşürülmesi için soğutma işlemi yapılır. FDM'ler bu tür soğutma işlemini başarılı şekilde gerçekleştirebilir (Hekimoğlu ve Sarı, 2022; Mehling ve Cabeza, 2008).

1.2.2.3 Medikal Malzemelerde FDM Kullanımı

FDM'ler, sağlık hizmetlerinin farklı alanlarında önemli avantajlar sunar. Medikal bir materyalin istenmeyen şekilde ısınması ve soğuması malzemeyi olumsuz yönde etkileyebilir. Örneğin, kan taşıma nakliyesi sırasında donma veya belirli bir sıcaklığın üzerinde ısınma gibi durumların önüne geçilmesi istenir. Aksi takdirde, materyal kullanılamaz hale gelebilir. Bu tür malzemelerin taşınmasında FDM'ler, malzeme ısısının dengede tutulmasına yardımcı olabilir. Şekil 1.4'te kolay ve ucuz nakliye imkanı sunan FDM'li nakliye kutuları görülmektedir. Delta T firmasının ürettiği özel kan taşıma ambalajı sayesinde sıcaklık yaklaşık 2°C ile 10°C arasında ve 12 saat boyunca stabil tutulabilmektedir (Mehling ve Cabeza, 2008).



Şekil 1.4: FDM içeren kan ve medikal nakliye kutuları (Mehling ve Cabeza, 2008)

1.2.2.4 Termal İçerikli Tekstil Ürünlerinde FDM Kullanımı

Tekstilde FDM kullanımı, kumaşların ısı transferini yönetmesini sağlayarak, vücuttan yayılan veya emilen ısı enerjisini dengelemeye yardımcı olur. Bu materyaller, faz değişim sıcaklık aralığında, tekstil yüzeylerinde fazla ısı birikimini azaltır ve kullanıcıya konforlu bir kullanım sunar. Örneğin, aktif spor giysilerinde FDM kullanıldığında, vücut sıcaklığını kontrol ederek sıcak havalarda terleme etkisini azaltır ve soğuk havalarda ısı kaybını önler. FDM içeren yatak ürünleri, gece boyunca vücut sıcaklığını dengeleyerek daha konforlu bir uyku deneyimi sunabilir. Sağlık çalışanlarının kullandığı tekstil ürünlerinde FDM kullanımı, uzun süreli kullanım sırasında konforu artırır ve terlemeyi önler. Ceket ve mont gibi dış giyimde, FDM sayesinde dış ortam sıcaklık değişimlerine karşı direnç sağlanabilir, böylece kullanıcının sıcak kalması mümkündür (Mehling ve Cabeza, 2008).

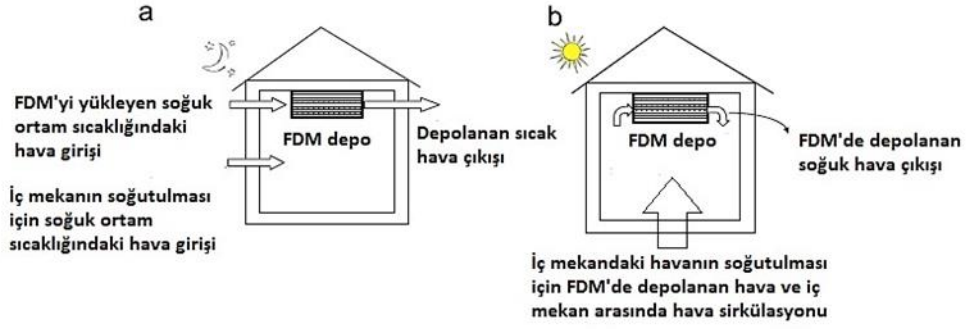
1.2.2.5 Bina Uygulamalarında FDM Kullanımı

İnsanların yaşam alanları olan binalardaki termal konfor talebi, yaşam standartlarının iyileştirilmesiyle birlikte paralel olarak artmaktadır. Bu artış yaz ve kış aylarında ısıtma ve soğutmadan kaynaklı olarak enerji tüketiminde de artışa yol açar. FDM'lerin binalardaki potansiyel uygulamaları aşağıda belirtilmiştir.

Serbest soğutma, dış ortamdan sağlanan soğuk havanın iç mekanların soğutulmasında kullanılması olarak bilinir. FDM'ler, serbest soğutma sistemlerinde şu şekilde kullanılabilir;

Enerji Tasarrufu: FDM, gün boyunca güneşten gelen ısıyı emerek, gece olduğunda bu ısıyı salarak serinletme sağlar. Bu sayede enerji tüketimi azalır.

Soğuk Havadan Faydalanma: Gece sıcaklıkların düştüğü saatlerde binaların pencereleri açılarak, FDM'lerin depoladığı serinlik kullanılabilir. Bu da iç mekan sıcaklığını düşürmeye yardımcı olur (Alavy vd., 2021; Morovat vd., 2019; Nair vd., 2022; Ortega Del Rosario vd., 2021). FDM'nin gece ve gündüz koşullarındaki çalışma mekanizması Şekil 1.5'te görülmektedir.



Şekil 1.5: Serbest soğutma çalışma ilkesi: FDM'nin gece çalışma ilkesi (a), FDM'nin gündüz çalışma ilkesi (b) (Waqas ve Din, 2013)

Aktif sistemler, enerji kullanarak mekanik veya elektrikli yöntemlerle iç ortamın iklimlendirilmesidir. FDM'nin bu sistemlerdeki kullanımı aşağıdaki gibi özetlenebilir;

Isıtma ve Soğutma Entegrasyonu: FDM'ler, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri ile entegre edilerek, enerji verimliliğini artırabilir. Örneğin, ısıtma veya soğutma sırasında FDM'ler, fazla sıcaklığı depolayarak, daha verimli bir soğutma işlemi sağlayabilir.

Dinamik Enerji Yönetimi: Aktif sistemler, FDM kullanarak enerji talebini dengeleyebilir ve belirli dönemlerde enerji tüketimini düşürebilir.

Pasif sistemler, doğrudan enerji kaynaklarını kullanmadan iç mekânın termal açıdan konforunu sağlamaya yönelik tasarım yaklaşımlarıdır. FDM'nin pasif sistemlerdeki rolü 2 şekildedir;

Doğal Isı Yönetimi: FDM'ler, gün boyunca ısıyı emerek ve geceleyin bu ısıyı salarak iç mekân sıcaklığını dengeleyebilir. Bu, klima ihtiyacını en aza indirir.

İzole Edici Özellikler: FDM'nin bina elemanlarına entegrasyonu, duvarlarda, çatılarda ve zeminlerde kullanıldığında ısı geçişini azaltır. Bu durum yaz aylarında serin, kış aylarında ise sıcak bir iç ortam sağlar (Cabeza vd., 2007; Kuznik ve Virgone, 2009).

1.3 Beton

Beton; çimento, su, agrega (ince veya kalın) ve gerekirse katkı maddelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen bir inşaat malzemesidir. Bu şekilde hazırlanan beton karışımına taze beton adı verilir. Taze beton, belirli bir süre su banyosunda bekletilmek suretiyle kütleme işlemine tabii tutulur ve bu işlem sonucunda sertleşerek dayanımı artar. Yapı sektöründe geniş bir kullanım alanına sahip olan beton, yüksek dayanıklılığı, şekil alabilme özelliği ve çeşitli iklim koşullarına direnç gösterme yeteneği ile bilinir. Beton, dayanıklı yapılar, yollar, köprüler ve diğer inşaat projeleri için temel bir bileşendir (Akman ve Akçay, 2005).

1.3.1 Hafif Beton

Hafif beton, normal betondan daha düşük yoğunluğa sahip olan bir beton türüdür. Hafif bir beton genellikle hafif agregalar kullanılarak üretilir. Hafif beton; yapısal uygulamalarda olduğu kadar izolasyon ve hafiflik gerektiren uygulamalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Hafif betonlar, 300-2000 kg/m³ arasında değişen yoğunluk, 1-60 MPa basınç dayanımı ve 0,2-1,0 W/m.K aralığında ısı iletkenlik değerlerine sahip betonlardır.

1.3.1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonlar, yoğunlukları, mekanik dayanımları, kullanım alanları ve üretim yöntemlerine göre sınıflandırılmaktadır. Yoğunlukları 1600-2000 kg/m³ ve basınç dayanımları 15 MPa'dan daha yüksek olan ve ısı iletkenlik değerleri aranmayan betonlar yapısal hafif beton olarak kabul edilir. Yoğunlukları 1600 kg/m³'ten düşük, basınç dayanımı 3,5 MPa'dan fazla ve ısı iletkenlik katsayısı 0,75 W/m.K'den düşük olan betonlar hem yapısal hem de yalıtım hafif betonu olarak sınıflandırılır. Yoğunlukları 1450 kg/m³'ten düşük, en az 0,5 MPa dayanıma sahip ve 0,30 W/m.K ısı iletkenlik değerlerine sahip betonlar ise yalıtım hafif betonu olarak adlandırılır.

Üretim yöntemlerine göre hafif betonlar iki kategoriye ayrılabilir. Bunlardan biri, perlit ve pomza gibi yoğunluğu 2,6 kg/m³'ten düşük agregaların kullanıldığı "hafif agregalı" betonlardır. Diğer de, çeşitli süreçlerle üretilen agregalar (genleştirilmiş polistiren gibi)

kullanılarak üretilen “yapay hafif agregalı” betonlardır. Bunların dışındaki bir diğer hafif beton türü de gaz betonlar’dır. Gaz betonlar, bünyesinde hava boşlukları bulunan hafif betonlar olup üretim yöntemlerine göre otoklavlanmamış gaz betonlar (köpük beton) ve otoklavlanmış gaz betonlar olmak üzere iki gruba ayrılır (Mohammed ve Hamad, 2014).

1.4 Köpük Beton

Köpük beton, hava kabarcıkları içeren ve bu sayede hafif bir yapı kazanan bir tür betondur. Genellikle, su, çimento, agrega ve köpük ajanlarının karıştırılmasıyla üretilir. Köpük beton, düşük yoğunluğu ve yüksek ısı yalıtım özellikleri ile bilinir. Yaklaşık olarak hacminin %75-%80’i birbirinden bağımsız kapalı gözeneklerden oluşur. Köpük beton, bina dış ve iç duvarları ile zeminde kullanılan köpük yapı elemanlarının yerine kullanılabilir. Hafif, ekonomik, kolay uygulanabilir, ısı ve ses izolasyon özelliklerinden dolayı tercih edilen bir yapı malzeme türüdür.

1.4.1 Köpük Betonun Özellikleri

Hafif bir yapı malzemesi olan köpük beton sahip olduğu özellikler sayesinde inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmakta ve enerji verimliliği ile sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif sunmaktadır. Köpük betonun başlıca özellikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

Düşük Yoğunluk: Köpük betonun yoğunluğu bünyesindeki gözenek miktarına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Köpük betonun yoğunluğu arttıkça basınç dayanım değerleri de artış gösterir. Köpük beton, normal betona göre çok daha hafif bir yapıya sahiptir. Bu, taşıma ve uygulama süreçlerini kolaylaştırır.

Gözeneklilik: Köpük beton bünyesindeki kabarcıklar, betonun içinde homojen bir şekilde dağılır ve gözenekli bir yapı meydana getirir. Köpük betonun gözenek boyutu genellikle mikron seviyesindedir. Gözenek boyutu, betonun fiziksel özelliklerini etkiler. Bununla birlikte, gözeneklerin dağılımı, betonun dayanıklılığı ve yalıtım performansı üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, köpük betonun gözenek oranı, yoğunluğunu belirler. Daha yüksek gözenek oranı, daha hafif bir beton anlamına gelir ki bu durum dayanıklılığı da etkileyebilir. Diğer taraftan, köpük betonun gözenekliliğini etkileyen faktörler ise köpük

ajanının türü ve miktarı, karışım oranları, karıştırma süresi ve hızı, kalıplama yöntemleri olarak sıralanabilir.

Isı yalıtımı: Köpük beton, sahip olduğu iç hava boşlukları sayesinde iyi bir ısı ve ses yalıtımı sağlar. Bu özellikleri sayesinde köpük beton bir binanın yıllık enerji tüketimini yaklaşık %40 oranında azaltabilir. Betonun gözenek yapısı ve boyutu, betonun ısı yalıtımı ve ses emme özellikleri üzerinde etkilidir.

1.4.2 Köpük Betonun Avantaj ve Dezavantajları

Köpük beton, birçok avantajı ile inşaat sektöründe önemli bir malzeme olmasına rağmen, bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu nedenle, kullanım amacına ve koşullarına göre dikkatli bir değerlendirme yapılması gerekir.

- Köpük betonun içeriği sağlığa zararlı olmadığı gibi geri dönüştürülebilir malzemeler kullanılarak üretilmesi çevresel sürdürülebilirliği de destekler.
- Donma çözünme direnci yüksektir.
- Normal betona kıyasla mekanik dayanımı daha düşük olduğundan yapısal uygulamalarda sınırlamalar gerekebilir.
- Hafif yapısı nedeniyle bina yükünü azaltır.
- Mükemmel ses ve ısı yalıtım özellikleri gösterir.
- Bina duvar uygulamalarında bina iç mekan konfor sıcaklığını belirli bir seviyede tutarak binaların yıllık enerji tüketimini önemli ölçüde azaltır.
- Gözenekli yapısı nedeniyle su emme kapasitesine sahip olabileceğinden rutubete karşı güçlü değildir.
- Aşınmaya karşı zayıftır (Demirel ve Yazıcıoğlu, 2010; Kocakerimoğlu, 2019; Öztürk, 2019).

1.4.3 Köpük Betonun Kullanım Alanları

Köpük beton, hafifliği ve ısı ve ses yalıtım özelliklerinden dolayı çeşitli kullanım alanlarına sahiptir. Köpük betonun yaygın olarak kullanıldığı alanlar aşağıda verilmiştir;

- Binalarda enerji verimliliğini artırmak için dış cephe, çatı ve zemin yalıtımı gibi uygulamalarda kullanılır.

- Akustik yalıtım gerektiren mekanlarda, özellikle ofisler, stüdyolar ve konutlarda ses geçişini azaltmak için tercih edilir.
- Prefabrik yapı elemanlarının üretiminde, hafifliğinden dolayı taşıma ve montaj kolaylığı sağlar.
- Su geçirmezlik özelliği sayesinde, suya maruz kalan alanlarda yalıtım sağlamak amacıyla kullanılabilir (Awana ve Kumar, 2017; Bekaroğlu, 2012).

1.5 Perlit ve Özellikleri

Doğal volkanik bir cam olan ham perlit, yüksek sıcaklıklara (800-1200°C) ısıtıldığında genişleyen bir malzemedir. Bu süreçte ham perlit bünyesindeki su buharlaşır ve ham perlitin hacmi 20 katına kadar artabilir. Sonuç olarak, yoğunluğu 2,2-2,4 g/cm³ arasında değişen düşük yoğunluklu geliştirilmiş perlit (GP) elde edilir. GP'nin erime sıcaklığı yaklaşık 1300°C civarındadır. Ayrıca, ham perlit açık griden parlak siyaha kadar farklı renk tonlarına sahip olabilir. Genleştirildiğinde ise rengi tamamen beyaza dönüşür (Arslan, 2022). Ham perlit ve GP'in fiziksel özellikleri Tablo 1.1'de ve ham perlitin kimyasal özellikleri ise Tablo 1.2'te verilmiştir.

Tablo 1.1: Ham perlit ve geliştirilmiş perlitin bazı fiziksel özellikleri (Kalaycı, 2016)

Özellik	Ham Perlit	Genleştirilmiş Perlit
Renk	Gri ve tonları, siyah	Beyaz
Yumuşama noktası	800-1100°C	871-1343°C
Erime noktası	1315-1390°C	1260-1343°C
Sertlik	-	5-6 mohs
Özgül ısı	0,2 cal/g.°C	0,2 cal/g.°C
Özgül ağırlık	2,2-2,4 g/cm ³	-
Isıl iletkenlik	-	0,04 W/m.K

Tablo 1.2: Perlitin kimyasal özellikleri (Kalaycı, 2016)

Kimyasal Bileşenler	Miktar (%)
SiO ₂	71,0 - 75,0
Al ₂ O ₃	12,5 - 18,0
Na ₂ O	2,9 - 4,0
K ₂ O	0,5 - 5,0
CaO	0,5 - 2,0
Fe ₂ O ₃	0,1 - 1,5
MgO	0,02 - 0,5
TiO ₂	0,03 - 0,2
H ₂ O	2,0 - 5,0
MnO ₂ , FeO, Cr	0,1
Ba	0.05
PbO	0.03
SO ₃ , serbest silis ve klorürler	0.2

1.5.1 Genleştirilmiş Perlit ve Özellikleri

GP, doğal volkanik camın yüksek sıcaklıklarda ısıtılmasıyla elde edilen hafif ve gözenekli bir malzemedir. GP'nin elde edilme süreci aşağıda ifade edildiği üzere 5 adımda gerçekleştirilir;

Hammadde Temini: GP üretimi için öncelikle doğal perlit kayaları temin edilir. Bu kayalar, volkanik patlamalar sonucu oluşmuş ve cam benzeri bir yapıya sahip olan silika (SiO₂) içeren minerallerdir.

Kırma ve Eleme: Temin edilen perlit kayaları, uygun boyutlarda parçalar haline getirilmek üzere kırılır. Kırma işlemi sonrasında, istenilen boyut aralığına ulaşmak için eleme yapılır. Genellikle 1-5 mm arası boyutlar tercih edilir.

- **Isıtma (Genleştirme):** Eleme işlemi sonrası elde edilen perlit partikülleri, genellikle 800-1200°C arasında bir sıcaklığa ısıtılır. Bu aşamada, perlitin içindeki su buharlaşır ve gaz haline geçer. Bu gaz, perlitin genişlemesine ve gözenekli bir yapı oluşturmasına neden olur. Genleştirme işlemi sırasında, perlit hacim olarak 4 ila 20 kat kadar genişleyebilir. Kullanılan perlitin çeşidi, ısıtma süresi, tane boyutu ve ısıtma sıcaklığı gibi parametreler genleştirme işlemi üzerinde etkin rol oynarlar (Kaya, 2019; Uluer vd., 2018).

- Soğutma: Isıtma işlemi tamamlandıktan sonra, GP soğutulur. Soğutma işlemi, genellikle doğal havalandırma şeklinde gerçekleştirilir.
- Paketleme: Soğutulan GP, kullanım alanlarına göre uygun ambalajlarda paketlenir.

1.5.1.1 Genleştirilmiş Perlitin Kullanım Alanları

Çok yönlü bir malzeme olan GP birçok sektörde maliyet avantajı sağlayarak inşaat, tarım ve sanayi gibi alanlarda tercih edilmektedir. GP'nin sıkça kullanıldığı sektörler şunlardır:

İnşaat: GP, hafif ve iyi bir ısı ve ses yalıtım malzemesi olduğundan, binaların yalıtımında kullanılır. Çatı, duvar ve zemin yalıtımında etkili bir çözüm sunar. Beton karışımlarına eklendiğinde, ağır betonu hafifletir ve aynı zamanda mekanik özelliklerini artırır. Özellikle prefabrik yapıların üretiminde sıkça kullanılır.

Tarım: GP, hafif yapısı sayesinde toprağın fiziksel özelliklerini geliştirmekte ve elverişli toprak koşullarını sağlamaktadır. Ayrıca, toprağın sıkışmasını azaltarak su drenajını düzenler, nemin tutulmasını sağlar, fidelerin üremesine yardımcı olur ve toprağı havalandırır. Tarla tarımı, seracılık, bahçecilik ve çimli spor alanlarında kullanımı yaygındır.

Sanayi: GP, yüksek sıcaklıklara karşı dayanım özelliğinden dolayı ateşe dayanıklı ürünlerin üretiminde kullanılır. Bununla birlikte, su ve diğer sıvıların filtrasyonunda da kullanılan etkili bir malzemedir.

1.5.2 Dünyada Perlitin Mevcut Durumu

Dünyadaki perlit kaynakları, genel olarak volkanik aktivite ile oluşmuş olan doğal silikat mineralleridir. Bu nedenle, perlit kaynakları genellikle volkanik kuşak bölgelerinde bulunmaktadır. Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri, Yunanistan ve Japonya perlit rezervi açısından diğer ülkelere kıyasla daha fazla perlit kaynağına sahip olan ülkelerdir. Perlitin görünür rezerv miktarının dünyada ortalama 700 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Bu rezervin yaklaşık %74'ü ise Türkiye'de yer almaktadır.

ABD, özellikle batı kıyısında önemli perlit rezervlerine sahiptir. Özellikle de Büyük Kanyon Eyaleti (Arizona, New Mexico, Texas) gibi bölgelerde önemli yataklar bulunmaktadır. Bununla birlikte, Oregon ve Washington eyaletlerinde de perlit çıkarımı yapılmaktadır. Yunanistan, özellikle Ege Adaları'nda ve Peloponez Yarımadası'nda bulunan önemli perlit kaynakları ile bilinir. Yunan perlitinin kalitesi yüksektir ve Avrupa pazarında önemli bir yer tutar. Japonya, perlit üretiminde aktif olan bir başka ülkedir. Ülkenin farklı bölgelerinde perlit yatakları bulunmaktadır ve tarım ile inşaat sektöründe kullanılır. Her ülkenin perlit rezervlerinin büyüklüğü, yerel jeolojik koşullara ve volkanik aktivitelere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

1.5.3 Türkiye'de Perlit Durumu

Türkiye, dünya genelinde önemli perlit kaynaklarına sahip ülkelerden biridir ve bu alanda zengin bir çeşitliliğe sahiptir. Türkiye'de perlit yatakları, genellikle volkanik bölgelerde yer almaktadır. Özellikle aşağıdaki bölgeler, önemli perlit rezervlerine sahiptir;

Marmara Bölgesi (İstanbul çevresi, Şile, Kocaeli ve Tekirdağ), İç Anadolu Bölgesi (Niğde ve Nevşehir), Ege Bölgesi (Manisa ve İzmir çevresi) ve Batı Karadeniz Bölgesi'nde (Zonguldak ve Bartın çevresi) perlit kaynakları bulunmaktadır.

Türkiye, perlit üretiminde dünya sıralamasında önemli bir konumdadır. Üretim, hem iç talebi karşılamak hem de ihracat yapmak amacıyla gerçekleştirilmektedir. Türkiye'deki perlit rezervlerinin büyük bir kısmı, yapı malzemeleri, tarım ve sanayi sektörlerinde kullanılmaktadır. Toprak yapısını iyileştirici, su tutma kapasitesini artırıcı ve kök gelişimini destekleyici özellikleri sayesinde, tarımda ve seracılıkta perlit sıkça tercih edilmektedir. Perlitin doğal bir malzeme olması, çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Türkiye, perlit rezervlerini sürdürülebilir bir biçimde kullanarak, hem ekonomik fayda sağlamak hem de çevresel etkileri dikkate almaktadır. Türkiye, ürettiği perlitin önemli bir kısmını yurtdışına ihraç etmektedir (Başar, 2023; Kaya, 2019).

1.6 Kaprik Asit

Kaprik asit ($C_{10}H_{20}O_2$), doymuş bir yağ asidi olup, 10 karbon atomuna sahip bir kısa zincirli yağ asididir. Molekül ağırlığı 172,27 g/mol, kaynama noktası $246^{\circ}C$ ve erime sıcaklığı $31,5^{\circ}C$ olan kaprik asit (KA), su ile sınırlı oranda çözünürken organik çözücülerdeki çözünürlüğü yüksektir.

KA, çeşitli endüstriyel ve gıda uygulamalarında kullanılan bir bileşiktir. Bazı gıda ürünlerinde tatlandırıcı ve aroma verici olarak kullanılabilir. Süt ve süt ürünlerinde doğal olarak bulunduğu için peynir ve yoğurt gibi ürünlerde de yer alır. Cilt bakım ürünlerinde emolient (yumuşatıcı) ve nemlendirici özellikleri nedeniyle kullanılır. Sabun ve şampuan gibi ürünlerin formülasyonlarında da yer alabilmektedir. KA, çeşitli kimyasal bileşiklerin sentezinde ara madde olarak kullanılmaktadır. KA aynı zamanda insektisit veya fungusit olarak bazı tarım uygulamalarında da tercih edilmektedir (URL-1, 2024).

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde perlit içeren (FDM ihtiva etmeyen) yapı malzemelerinin üretimine dair çalışmaların yanı sıra farklı teknikler kullanılarak FDM içeren malzemelerin hazırlanmasına yönelik de çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bununla birlikte, FDM içeren kompozitler kullanılarak köpük beton üretimine dair sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Yukarıda bahsi geçen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

2.1 Yapı Malzeme Üretiminde FDM'siz Perlit Kullanımı

Rashad yaptığı çalışmada karışımdaki perlit miktarındaki artışın termal iletkenlik değerini azalttığını beirlemiştir. Örneğin; kütlece %10 perlit içeren çimentonun termal iletkenliği 0,62 W/m.K iken, kütlece %60 perlit içeren çimentonun termal iletkenliği 0,18 W/m.K olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara dayanarak perlitin çimento esaslı ısı yalıtım yapı malzeme üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabileceği söylenebilir (Rashad, 2016).

Altuncı vd. geliştirilmiş cam agregası ve GP katkılı çimentolu harçların fiziksel ve mekanik özellikleri ile ısı ve ses yalıtım performanslarını incelemiştir. Deneylerde, bağlayıcı olarak 4 farklı çimento türü (CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 N, CEM II 42,5 R ve CEM IV 32,5 N) kullanılmış, geliştirilmiş cam agregası ve GP ise kum yerine farklı oranlarda (kütlece %0, %15 ve %30) ikame edilmiştir. Deney sonuçlarına göre katkılı numunelerin basınç dayanımı (17,60 MPa - 58,00 MPa), eğilme dayanımı (4,00 MPa - 11,16 MPa), aşınma direnci ($9,22 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ - $17,26 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$), yoğunluk ($1,669 \text{ g/cm}^3$ - $2,192 \text{ g/cm}^3$), ses yutma katsayısı (0,151 - 0,249) ve ısı iletkenlik ($0,446 \text{ W/m.K}$ - $0,817 \text{ W/m.K}$) olarak elde edilmiştir (Altuncı vd., 2021).

2.2 Vakum Yöntemi ile FDM İçeren Kompozit Üretimi

Wi vd, FDM olarak termal olarak kararlı ve yüksek gizli ısı kapasitesine sahip organik yapıdaki parafin grubundan n-oktadekan'ı (nOD) kullanmışlardır. Destek materyali olarak kullandıkları GP ve geliştirilmiş vermikülit'e (GV) vakum emdirme yöntemi ile farklı oranlarda (%2,5, %5, %7,5 ve %10) nOD emdirerek kompozitler hazırlamışlardır. GP/FDM kompozitinin entalpi değeri 128,5 kJ/kg ve GV/FDM kompozitinin ise 87,2 kJ/kg olarak belirlenmiştir. Entalpi değerlerinden GV'nin GP'ye kıyasla daha az miktarda nOD

absorplayabildiği söylenebilir. Sonrasında, hazırlanan GP/FDM ve GV/FDM kompozitleri ayrı ayrı kırmızı kil (KK) ile karıştırılarak panel tipi plakalar hazırlanmıştır. 25°C’de nOD, GP/FDM ve GV/FDM kompozitlerin termal iletkenlikleri sırasıyla 0,265, 0,231, ve 0,157 W/m.K olarak ölçülmüştür (Wi vd., 2020).

Zhu vd. çalışmalarında, vakum emdirme yöntemiyle hazırladıkları nOD/GP kompoziti farklı oranlarda alçı bünyesine dahil ederek alçı plakalar üretmişlerdir. SEM görüntüleri, nOD’nin GP gözeneklerine homojen bir şekilde dağıldığını göstermiştir. En düşük ısı transfer katsayısına hacimce %20 nOD/GP kompozit içeriğinde ulaşılmıştır. Ayrıca, nOD/GP kompozit varlığı alçı levhanın mekanik özelliğinde azalmaya neden olmuştur. Alçı levhanın mekanik performansını iyileştirmek amacıyla nano boyutta Al₂O₃ partikülleri alçı bünyeye dahil edilmiştir. Nano boyuttaki Al₂O₃ miktarı %0,5 ulaştığında alçı levhanın mekanik özelliklerinin etkili bir şekilde arttığı gözlenmiştir (Zhu vd., 2019).

FDM olarak KA ve destek malzemesi olarak da GP’nin kullanıldığı bir başka çalışmada vakum emdirme tekniği ile KA/GP kompozitleri hazırlanmıştır. Herhangi bir sızdırma olmaksızın GP’nin KA’yı maksimum emme oranı %55 olarak belirlenmiştir. Kompozitin termal iletkenlik değerinde ise kütlece %10 genişletilmiş grafit (GG) eklenerek yaklaşık %64 oranında artış kaydedilmiştir. KA/GP ve KA/GP/GG kompozitlerinin erime sıcaklıkları ve gizli ısıları sırasıyla 31,80°C ve 31,61°C; 98,12 J/g ve 90,06 J/g olarak ölçülmüştür. Deneysel veriler, KA/GP/GG kompozitinin iç mekan termal konforunu iyileştirebilen bir yapı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini göstermiştir (Sarı ve Karaipekli, 2008).

Destek materyali olarak hidrofobik kaplı GP ve kaplanmamış GP (KGP) granülleri ile FDM olarak parafin’in kullanıldığı çalışmada, parafin’in vakum ve doğrudan emdirme teknikleri ile emdirilmesi sağlanmıştır. Her iki yöntem için, üretilen parafin/GP kompozitinin sızdırmazlık değerinin parafin/KGP kompozitine kıyasla %5 daha fazla olduğu tespit edilmiştir (Ramakrishnan vd., 2015).

Zhang vd, hazırladıkları KA ve palmitik asit (PA) ötektik karışımını GP’ye emdirerek KA/PA/GP kompoziti elde etmişler ve bu kompozitleri farklı oranlarda alçı bünyeye dahil etmişlerdir. Termal analizler sonucunda, KA/PA ötektik karışımının ve KA/PA/GP kompozitinin erime sıcaklıkları ve gizli ısı değerlerinin sırasıyla 24,1°C - 31°C ve 137,9 - 88,39 J/g olduğu belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, FDM içeren kompozit miktarının

artışının alçı levhanın termal iletkenlik değerlerinde azalmaya neden olduğunu ortaya koymuştur. Alçı levhanın en düşük termal iletkenlik değeri (0,2759 W/m.K) kütlece %30 KA/PA/GP kompozit varlığında elde edilmiştir (Zhang vd., 2015).

Sarı vd, KA ve miristik asit (MA) kullanarak hazırladıkları ötektik karışımı destek materyali olarak vermikülit'e vakum ortamında emdirerek kompozitler üretmişlerdir. Üretilen KA/MA/vermikülit bünyesine kütlece %2 oranında GG ekleyerek kompozitin termal iletkenliğin yaklaşık %85 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. KA/MA/vermikülit ve KA/MA/vermikülit/GG kompozitlerinin erime sıcaklıkları ve gizli ısıları sırasıyla 19,8°C - 19,7°C; 27,0 J/g - 26,9 J/g olarak ölçülmüştür (Karaipekli ve Sarı, 2009).

KA'nın destek materyali olarak perlitte vakum ortamında emdirildiği çalışmada hazırlanan KA/perlit kompozitleri farklı oranlarda (kütlece %10, %15 ve %20) çimento bünyesine ilave edilmiştir. Sonuç olarak, %10, %15 ve %20 oranında kompozit katkılı çimentoların erime sıcaklıkları ve gizli ısıları sırasıyla 30,11°C, 30,57°C ve 30,76°C; 7,08 J/g, 10,61 J/g ve 14,1 J/g olarak bulunmuştur. Ayrıca, çimento karışımındaki kompozit miktarı arttıkça termal iletkenlik değerinin düştüğü gözlenmiştir. Kütlece %20 oranında FDM'li kompozit ihtiva eden çimentonun en düşük termal iletkenlik değeri 0,4352 W/m.K olarak ölçülmüştür (Li vd., 2017).

Jiao vd, laurik asit (LA) ve stearik asitten (SA) oluşan iki bileşenli ötektik karışımı vakum ortamında destek malzemesi olan GP'ye farklı oranlarda emdirmişlerdir. Sızdırmazlık testi sonucunda hazırlanan LA/SA/GP kompozitinin sızdırma olmaksızın maksimum %43,5 oranında LA/SA karışımını absorplayabileceği belirlenmiştir. Hazırlanan LA/SA/GP kompozitinin erime sıcaklığı 33,0°C ve gizli ısı değeri ise 131,3 J/g olarak tespit edilmiştir (Jiao vd., 2012).

Yousefi vd, grafit tozu ve nano boyuttaki titanyum dioksiti sonikasyon yöntemiyle ayrı ayrı FDM içerisine dağıttıktan sonra genişletilmiş cam agregalara vakum yöntemi ile emdirmişlerdir. Kütlece %3 oranında titanyum dioksit ve kütlece %3 oranında grafit tozunun FDM bünyesine katılanmasıyla elde edilen kompozitlerin erime sıcaklıkları ve gizli ısıları sırasıyla 23,7°C, 22,7°C ve 113,2 J/g, 111,7 J/g olarak belirlenmiştir (Yousefi vd., 2022).

Hekimoğlu vd, ceviz kabuğunu kimyasal aktivasyon işlemi ile modifiye ederek hafif ve gözenekli yapıda bir malzeme elde etmişlerdir. İşlem görmemiş ceviz kabuğuna (CK) ve kimyasal aktivasyon uygulanan aktifleştirilmiş ceviz kabuğuna (ACK), FDM olarak metil palmitat (MP) emdirilerek kompozitler hazırlanmıştır. DSC ölçümlerine göre MP/CK ve MP/ACK kompozitlerin erime sıcaklıklarının sırasıyla 26,27°C ve 26,65°C ve gizli ısı değerlerinin ise sırasıyla 108,3 J/g ve 138,1 J/g olduğu belirlenmiştir. Sızdırmaz formdaki MP/CK ve MP/ACK kompozitlerin termal iletkenlik değerleri saf MP'den sırasıyla yaklaşık 1,9 ve 1,58 kat daha yüksek olarak ölçülmüştür. Bulgular, CK ve ACK'nın saf MP'nin termal iletkenliğini iyileştirmede başarılı olduğunu göstermiştir (Hekimoğlu vd., 2021).

Hekimoğlu vd., fındık kabuğunu (FK) karbonize ederek düşük maliyetli ve çevre dostu bir destek materyali olan aktifleştirilmiş fındık kabuğu (AFK) elde etmişlerdir. FDM olarak kullanılan KA, sırasıyla işlem görmemiş FK ve karbonize fındık kabuğunun (AFK) gözenekli yapısına emdirilmiştir. SEM, FTIR ve XRD sonuçları, FK/KA ile AFK/KA kompozitlerinde FDM ile KA arasında iyi bir kimyasal uyumluluğun olduğunu göstermiştir. Kompozitlerin termal iletkenlikleri saf KA'dan daha yüksek olarak ölçülmüştür. DSC sonuçları, sızıntı yapmayan FK/KA ve AFK/KA kompozitlerin erime sıcaklıklarının ve gizli ısılarının sırasıyla 28,5°C ve 28,9°C; 111,3 J/g ve 110,3 J/g olduğunu göstermiştir. TGA analizleri, kompozitlerin çalışma sıcaklıklarının termal bozunma sıcaklıklarından daha düşük olduğunu ortaya koymuştur (Hekimoğlu vd., 2021).

2.3 Doğrudan Emdirme Yöntemi İle FDM İçeren Kompozit Üretimi

Dixit vd, FDM içeren kompozit üretimi için GP'yi izopropil palmitat'a (İPP) 5 farklı oranda (kütlece %40, %45, %50, %55 ve %60) doğrudan emdirmişlerdir. Sızdırmazlık testi sonucunda GP'nin en fazla %55 oranında İPP absorplayabildiği belirlenmiştir. Kütlece %55 İPP içeren GP kompozitinin erime sıcaklığı 18,75°C ve gizli ısı değeri 80,32 J/g olarak ölçülmüştür (Dixit vd., 2021).

Bayram vd., emülsiyon kalıplama yöntemiyle modifiye edilmiş kaolinit kil içeren gözenekli polimerleri sentezlemişler ve sentezlenen malzemeye FDM olarak n-nonadekan'ı doğrudan emdirmişlerdir. Sentezlenen gözenekli formdaki kompozitin sızdırma olmaksızın en fazla %52,5 oranında FDM absorplayabildiği belirlenmiştir. Hazırlanan FDM'li kompozitin erime sıcaklığı 36,37°C ve erime entalpisi 132,3 J/g olarak tespit edilmiştir (Bayram vd., 2023).

FDM olarak Rubiterm (RT)'in destek malzemesi olan GP'ye emdirildiği bir başka çalışmada ise hazırlanan FDM'li kompozitler çimento bünyeye katılmıştır. Üretilen çimentolu kompozitlerin ısı enerji depolama performansının değerlendirilmesi için altı panodan oluşan kübik test odaları tasarlanmıştır. Deneysel sonuçlarında, çimentolu kompozit levhaların kullanılması durumunda iç ortam sıcaklığı ile üst levhanın dış yüzey sıcaklığı arasındaki farkın, RT içermeyen levhalara kıyasla 13,3°C daha yüksek olduğu bulunmuştur (Ye vd., 2015).

Guardia vd, mikro kapsül FDM, hafif agrega olarak GP ve termal iletkenliği azaltmak amacıyla selüloz lifleri kullanarak çimento-kireç harçları (çimento:kireç:agrega oranı 1: 0,5: 4,5) hazırlamışlardır. Harçların ısı özelliklerini iyileştirmek için destek materyali olan GP'ye kütlece %10 ve %20 oranında FDM emdirilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre; referans çimentonun basınç dayanımı 14,33 MPa iken %10 ve %20 FDM ihtiva eden çimento harçlarının basınç dayanımları sırasıyla 4,6 MPa ve 5,33 MPa olarak ölçülmüştür. Harç özellikleri üzerine selüloz liflerinin önemli bir etkisi gözlenmemiştir. GP varlığı gözenekliliği artırırken mukavemeti ve termal iletkenliği ise azaltmıştır. Bununla birlikte, GP, FDM çimento-kireç harçlarının entalpisini artırmıştır (Guardia vd., 2019).

2.4 Köpük Beton İle İlgili Çalışmalar

Çimentoya ve kuma ikame olarak sırasıyla pirinç kabuğu külü (PKK) ve atık mermer tozunun (AMT) kullanıldığı çalışmada, yüksek sıcaklık ve donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan köpük betonun mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, 40 kg/m³ ve 80 kg/m³ olmak üzere iki farklı köpük miktarı kullanılmıştır. Çimento PK ile kütlece %10 ve %20; kum ise AMT ile kütlece %25 ve %50 oranlarında ikame edildi. 90 gün kürlenme işlemi sonundaki köpük betonların mekanik performans sonuçlarına göre, en iyi mekanik performansın 40 kg/m³ köpük varlığında, kütlece %10 PKK ve kütlece %50 AMT ikamesi içeren karışım oranlarında elde edildiği belirlenmiştir (Bayraktar, 2021).

GP ve atık camın agrega olarak kullanıldığı bir başka çalışmada, farklı kompozisyonlarda köpük beton karışımları hazırlanmıştır. Deneysel sonuçlara göre; atık cam varlığının köpük betonun mekanik dayanımını iyileştirdiği belirlenmiştir. Diğer taraftan, atık cama kıyasla

daha fazla gözenkliliğe sahip GP'nin köpük betona ilavesi termal iletkenliği düşürerek köpük betonun ısı yalıtım performansını arttırmıştır (Arslan, 2022).

Türeyen vd, köpük beton üretiminde katkı maddesi olarak GV'yi kullanmışlardır. Hazırlanan GV içeren köpük betonlar, 28 gün boyunca kürleme işlemine bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik testlere tabi tutulmuştur. Test sonuçlarına göre; köpük betonun su absorpsiyon kapasitesi %75,2, gözeneklilik değeri %40,3 ve basınç mukavemeti 0,47 - 3,49 MPa aralığındadır. Sonuçlar, köpük beton üretiminde köpük oranı ve GV miktarının köpük betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğunu ortaya koymuştur (Türeyen vd., 2019).

Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde; farklı üretim yöntemleri ve farklı FDM'ler kullanılarak GP içeren kompozitlerin hazırlandığı ve termal özelliklerinin incelendiği görülmektedir. Ancak, hazırlanan FDM'li GP kompozitlerin termal özelliklerinin incelenmesi sadece TGA/DSC gibi analizler ile sınırlandırılmıştır. Ayrıca, FDM'li GP'nin köpük betonda kullanımına yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bununla birlikte, FDM ihtiva eden kompozitlerin gerçek hava şartlarındaki termal enerji depolama performanslarına yönelik çalışmalar da oldukça sınırlıdır. Bu çalışma kapsamında, literatürden farklı olarak vakum emdirme tekniğine kıyasla daha basit bir yöntem olan doğrudan emdirme tekniği ile GP/KA kompozitleri hazırlanarak fiziksel, kimyasal ve termal açıdan karakterize edilecektir. Hazırlanan GP/KA kompoziti farklı oranlarda köpük beton bünyesine kuma ikame olarak dahil edilerek köpük beton numuneleri üretilen köpük beton numunelerinin termal enerji performansları gerçek hava şartları altında test edilecektir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Köpük beton karışımlarının hazırlanmasında bağlayıcı olarak kullanılan Portland çimentosu (CEM I 42,5 R) ve agrega olarak kullanılan kum (TS EN 196-1) Bartın'daki Çimko Çimento ve Beton San. Tic. A.Ş'den temin edildi. Köpük beton üretiminde kullanılan organik yapıya sahip sıvı formdaki köpük ajanının (Genfil) yoğunluğu $1,05 \text{ kg/m}^3$ olup açık kahve rengindedir ve Artra İnşaat Peyzaj Plastik Ltd. Şti 'den satın alınmıştır. Deneylerde, faz değiştiren malzemeler (FDM) olarak kullanılan teknik saflık derecesine sahip (>%99) dekanolik asit olarak da bilinen kaprik asit (KA) ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$) Merck firmasından temin edildi. FDM içeren kompozitleri hazırlamak için destek materyali olarak gözenekli yapıya sahip geliştirilmiş perlit (GP), İstanbul'daki Genper Geliştirilmiş Perlit San. ve Tic. A.Ş'den temin edilerek deneylerde kullanıldı. Kullanılan çimentonun ve GP'nin kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiştir. Çimento, GP ve agreganın spesifik gravite değerleri ise sırasıyla $3,13 \text{ g/cm}^3$, $1,98 \text{ g/cm}^3$ ve $2,67 \text{ g/cm}^3$ 'tür. Köpük beton karışımlarının hazırlanmasında şebeke suyu kullanılmış olup deneylerde kullanılan malzemelerin dijital fotoğraf görüntüleri Şekil 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Deneylerde kullanılan çimentonun özellikleri

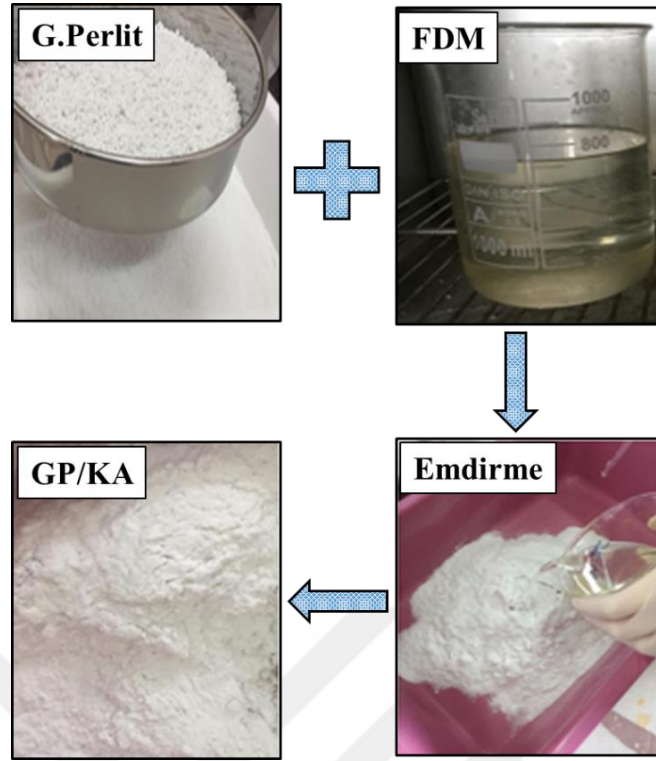
Bileşen	Değer (kütlece %)	
	Çimento	GP
CaO	60,1	0,74
SiO ₂	20,8	75,85
Al ₂ O ₃	5,1	12,89
Fe ₂ O ₃	4,9	0,91
MgO	2,0	0,02
Na ₂ O	0,6	2,72
K ₂ O	0,7	4,68
SO ₃	3,6	-
Kızdırma kaybı (%)	2,2	2,19
Spesifik gravite (g/cm^3)	3,13	1,98



Şekil 3.1: Deneyde kullanılan malzemeler

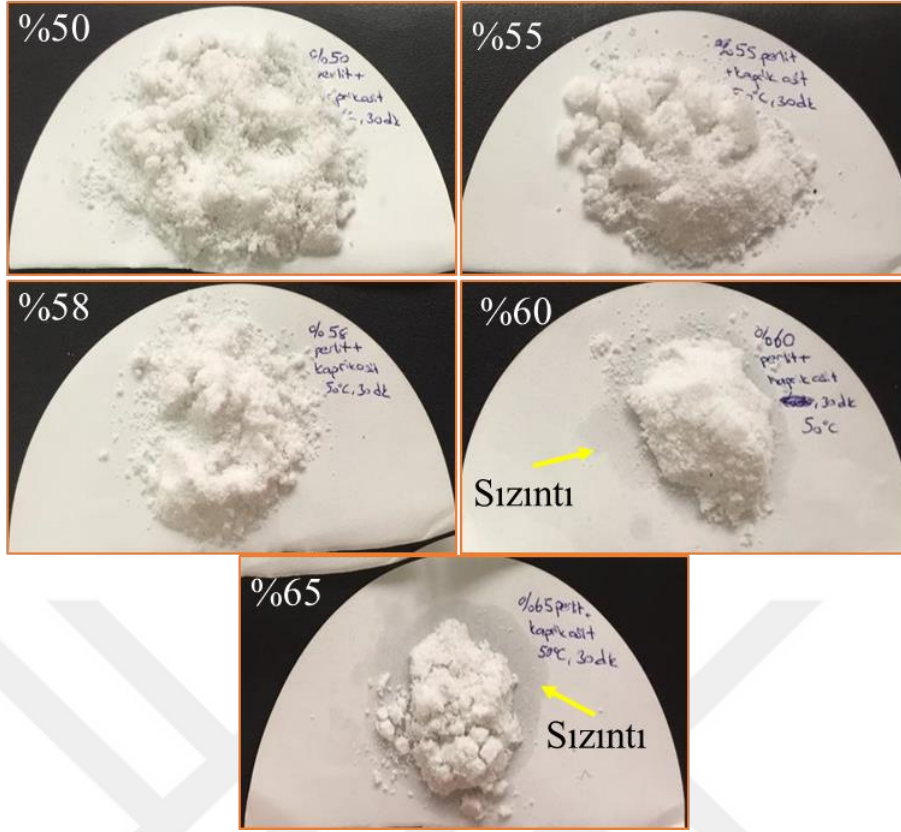
3.2 Kaprik asit (KA) İçeren Genleştirilmiş Perlit (GP) Kompozitlerin Hazırlanması

Deneylerde, GP/KA kompozitleri üretimi için doğrudan emdirme yöntemi kullanıldı. Emdirme işleminden önce GP, bünyesindeki suyun uzaklaştırılması amacıyla 24 saat boyunca 105°C'de sıcaklıktaki etüvde kurutma işlemine tabi tutuldu. Erime sıcaklığı 31,6°C olan katı haldeki KA, yaklaşık 40°C'deki etüve konularak sıvı hale getirildi. Sonrasında kütlece %50, %55, %58, %60 ile %65 arasında değişen KA içeriğine sahip farklı GP/KA kompozitleri hazırlamak üzere gerekli GP ve KA miktarları hesaplandı. Belirlenen miktarlardaki toz formda bulunan GP ve erimiş haldeki KA bir beher içerisine alınarak homojenliği sağlamak amacıyla 5 dk boyunca karıştırıldı. GP bünyesindeki KA'nın tamamen katılaşmasını sağlayabilmek adına hazırlanan karışımlar oda sıcaklığında 30 dk boyunca bekletildi (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: GP/KA kompozitinin hazırlanması

Daha sonra, GP/KA kompozitinin absorplayabildiği maksimum KA miktarını belirleyebilmek için sızıntı testi uygulandı. Bu test yönteminde, hazırlanan GP/KA kompozit tozları bir filtre kağıdı üzerine yerleştirildikten sonra yaklaşık 45°C sıcaklıkta 30 dk boyunca ısıtıldı. Isıtma işleminin ardından filtre kağıdı üzerinde KA'dan dolayı herhangi bir sızıntının olup olmadığı görsel olarak incelendi. GP/KA kompozitinin %50 ve %55 oranlarında sızıntı gözlemlenmezken %60 ve %65 oranlarında sızıntı gözlemlendi. Daha sonra %55 ile %60 arasındaki bir değerde (%58) tekrar sızıntı testi yapıldı. Buna göre; GP/KA en fazla %58 (kütlece) oranında KA absorplayabildiği belirlendi (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Farklı KA içeriğine sahip GP/KA kompozitlerinin sızıntı test görüntüleri

3.3 GP/KA Kompoziti İçeren Köpük Betonların Üretimi

GP/KA kompoziti içeren köpük beton numunelerinin üretimi için Tablo 3-2'deki karışım oranları kullanıldı. Karışım reçetesinde kum ile GP/KA kompozitinin yer değiştirilmesi sağlanarak çimento (450 g), su (300 ml) ve köpük ajanı (50 ml) miktarları sabit tutuldu. Buna göre; ilk olarak köpük ajanı ve su mekanik bir karıştırıcı kullanılarak 3 dk boyunca karıştırıldı ve köpük elde edildi. Ardından, daha önce hazırlanan kütlece %58 FDM içeren GP/KA kompoziti, çimento içerisine kum ile farklı oranlarda yer değiştirilerek ilave edildi ve 3 dk süre ile mekanik bir karıştırıcı ile karıştırıldı. Son olarak, bu karışım daha önce hazırlanan köpük içerisine ilave edilerek homojenliği sağlamak amacıyla 3 dk mekanik bir karıştırıcı yardımıyla karıştırıldı. Hazırlanan köpük beton karışımları prizma (40 x 40 x 160 mm) ve plaka (20 x 20 x 2 cm) kalıplara döküldü ve priz alması için oda sıcaklığında 1 gün bekletildi. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra 20°C sıcaklığa sahip su banyosunda 28 gün küremeye bırakıldı. Köpük beton numunelerinin hazırlanma süreci ile ilgili görseller Şekil 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.2: Hazırlanan köpük beton karışımları

Numune	Miktar				
	GP/KA, g	Kum, g	Çimento, g	Köpük ajanı, ml	Su, ml
Referans	0	596,5	450	50	300
%15 GP/KA	52,1	507,0	450	50	300
%20 GP/KA	69,5	477,2	450	50	300
%25 GP/KA	86,9	447,4	450	50	300
%30 GP/KA	104,3	417,6	450	50	300

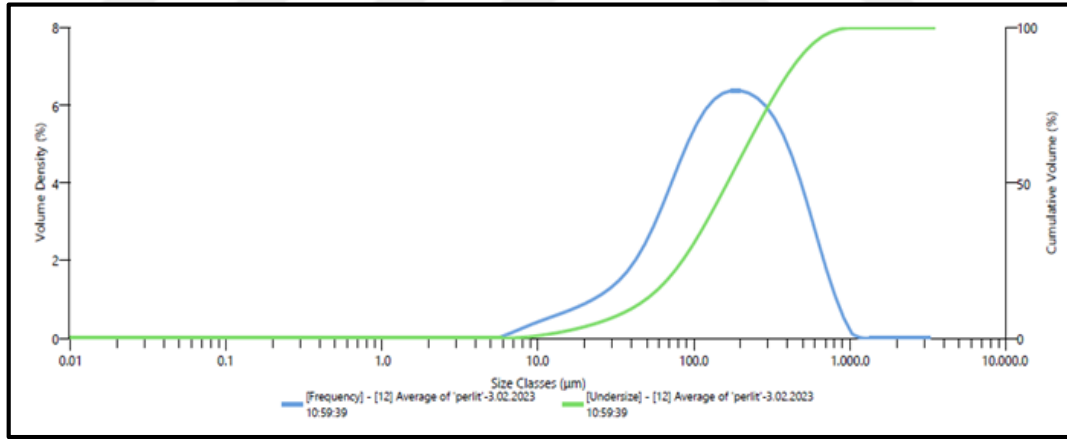


Şekil 3.4: Köpük beton numunelerin hazırlanması

3.4 Karakterizasyon İşlemleri

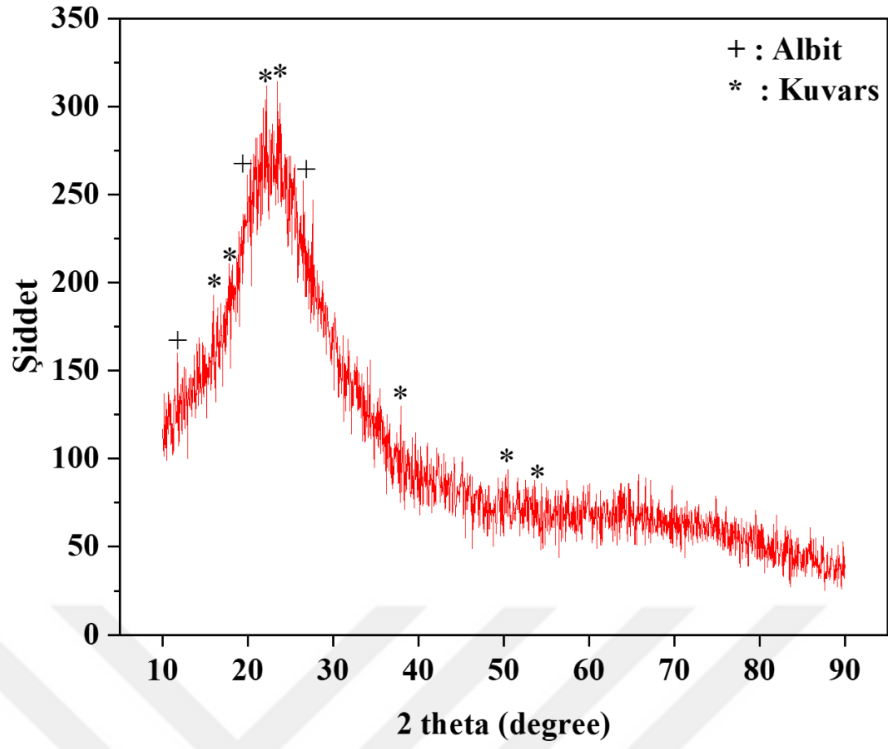
KA ve GP/KA kompozitinin termal özellikleri 3 °C/dk ısıtma/soğutma hızı ve 30 ml/dk akış hızına sahip azot atmosferinde diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC, Hitachi 7020) kullanılarak belirlendi. Numunelerin termal bozunma davranışları 20°C/dk ısıtma hızına sahip termal gravimetrik analiz (TGA) (Linseis STA PT1600) cihazında 25-600°C sıcaklık aralığında ve azot ortamında ölçüldü. KA, GP ve GP/KA kompozit yapısına ait kimyasal bağların analizi 4000-500 cm⁻¹ dalga boyu aralığında Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) (Shimadzu IRSpirit) ile gerçekleştirildi. Numunelerin mikroyapı ve yüzey özelliklerinin karakterizasyonunda Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) (TESCAN MAIA3 XMUv) kullanıldı. Numune bünyesindeki elementlerin dağılımı ise enerji dağılım X-ışını spektroskopisi (EDS) ile belirlendi.

Partikül boyut dağılım analizi için partikül boyut ölçüm cihazı (Malvern, mastersizer 3000) kullanıldı. Buna göre; GP'nin partikül boyutları ise D10 (41,4 µm), D50 (164 µm) ve D90 (473 µm) olarak ölçülmüştür (Şekil 3.5).



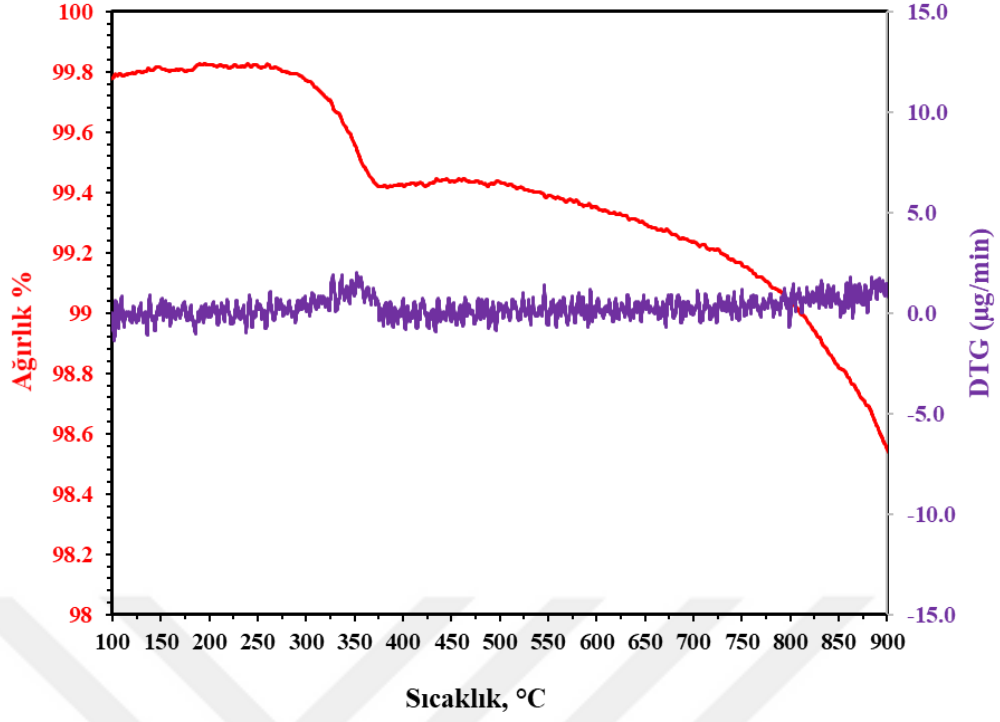
Şekil 3.5: GP'nin partikül boyut dağılım analizi

GP'nin faz analizi X-ışını difraktometresi (XRD) (RIGAKU, SmartLab) kullanılarak gerçekleştirildi. Buna göre; kullanılan GP'nin amorf yapıda olduğu, esas itibariyle başta kuvars (SiO₂) olmak üzere albit (NaAlSi₃O₈) fazını da içerdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.6).

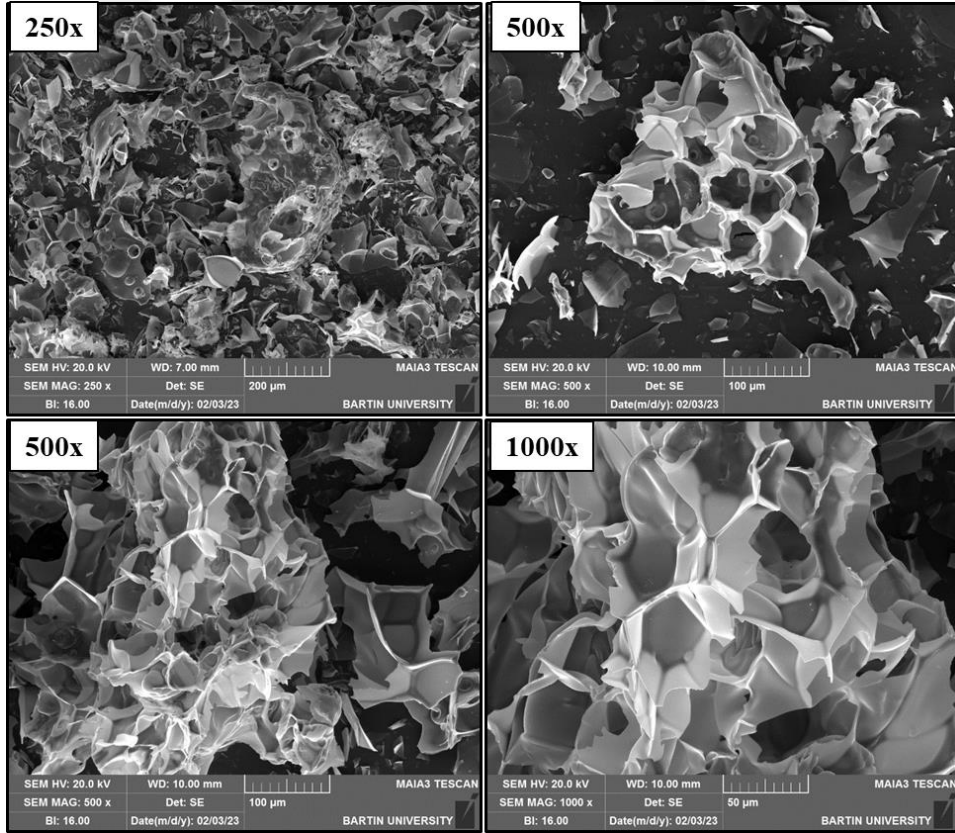


Şekil 3.6: GP'nin XRD grafiği

Şekil 3.7'deki GP'nin TGA analiz sonucuna göre; toplam kütle kaybının yaklaşık %2 seviyesinde olduğu görülmektedir. GP üretim sürecinde perlit hızlı bir şekilde 760-1100°C gibi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılır (Tekin vd., 2006). Bu esnada perlit bünyesindeki fiziksel su buharlaşarak perlitin genişmesi sağlanır. Dolayısıyla, GP'nin TGA eğrisinde önemli bir kütle kaybı meydana gelmemiştir.



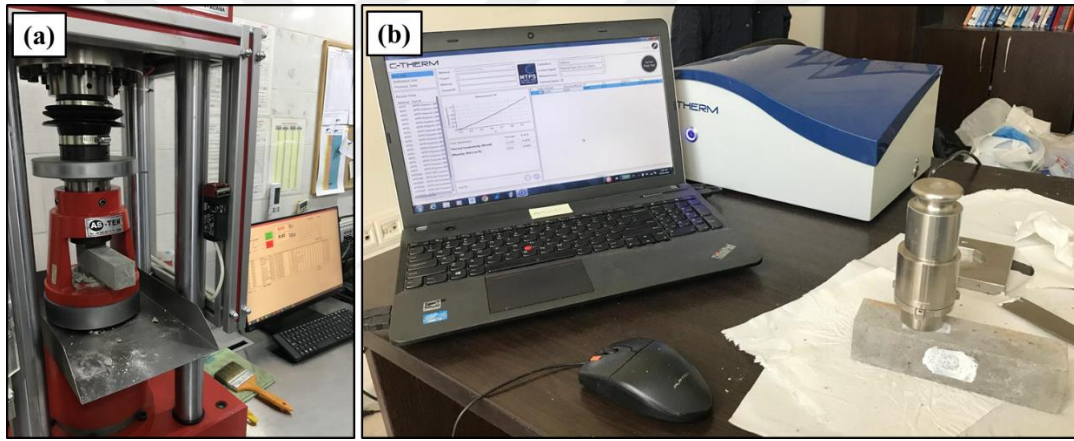
Şekil 3.7: GP'nin TGA-DTG eğrisi



Şekil 3.8: GP'nin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri

Şekil 3.8'deki SEM görüntüleri, GP'nin süngerimsi ve farklı büyüklükte boşluklar içeren ince tabakalı gözenekli bir yapıdan oluştuğunu göstermektedir. SEM görüntülerinde pul şeklinde perlit geometrilerinin oluşmasının nedeni, genleştirme işlemi sırasında yapılan pulverizasyon gibi işlemler olabilir.

Hazırlanan köpük beton numunelerinin su absorpsiyonu, kuru birim ağırlık ve görünür gözeneklilik gibi bazı fiziksel özellikleri Arşimet yöntemine göre belirlendi. 28 gün kürlenme işlemine tabi tutulan köpük beton numunelerin basınç dayanım testleri Bartın Çimento fabrikası laboratuvarındaki mekanik test cihazında (As-Tek Makine, Adana) gerçekleştirildi. Üretilen numunelerin ısı iletim katsayıları Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan termal iletkenlik ölçüm cihazı (C-Therm TCi, Kanada) kullanılarak belirlendi (Şekil 3.9).

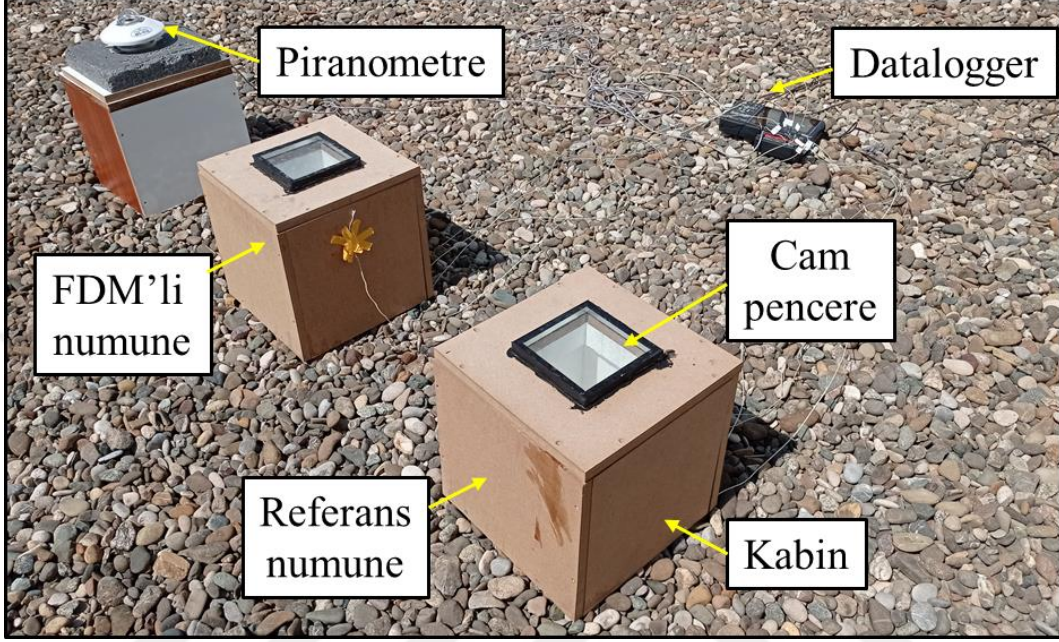


Şekil 3.9: Basınç dayanım testi (a) ve termal iletkenlik ölçümü (b)

3.5 Termoregülasyon Testi

Referans ve %30 GP/KA katkılı köpük beton plaka numunelerinin gerçek şartlar altındaki termoregülasyon ölçümleri özel olarak tasarlanan test kabinleri kullanılarak gerçekleştirildi. Ahşap malzeme kullanılarak yapılan test kabinlerinin (39 x 39 x 39 cm) iç yüzeyi 5 cm kalınlığındaki polistiren köpük malzeme ile kaplanmıştır. Kabin üst yüzeyinde bulunan çift camlı pencere (20 x 20 cm) yardımıyla güneş ışınlarının kabine girmesi sağlanmaktadır. Üretilen köpük beton plakalar (20 x 20 x 2 cm) kabin tabanına yerleştirildi. Numune yüzeyindeki ve kabin içerisindeki sıcaklık değişimlerini ölçebilmek için 0,006 mV/°C hassasiyetine sahip K tipi termokapıllar kullanıldı. Güneş ışınım yoğunluğu piranometre (Eco MS-410) kullanılarak ölçüldü ve ilgili akı verileri datalogger (Graptect GL-240) cihazı

tarafından kaydedildi. Termoregülasyon testleri, Bartın Üniversitesi Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi binasının çatı katında (41,6°K ve 32.3°D) gerçekleştirildi. Termal regülasyon deneyleri 15/06/2023 tarihinde saat 12:30'dan 19/06/2023 saat 14:30'a kadar olan sürede gerçekleştirildi. Test deney düzeneği Şekil 3-10'da gösterilmiştir.



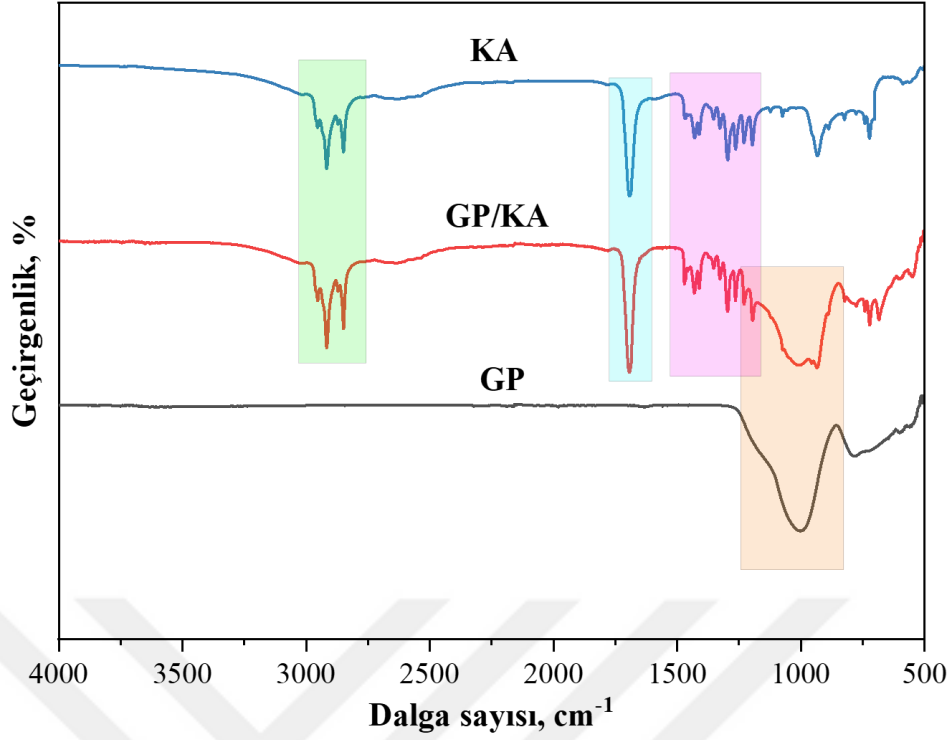
Şekil 3.10: Termal regülasyon deney düzeneği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, hazırlanan GP/KA kompozitinin termal ve kimyasal yapılarını belirlemek için gerçekleştirilen DSC ve FTIR analiz sonuçları sunulmuştur. Ayrıca, köpük beton numunelerinin bazı fiziksel özellikleri (su absorpsiyon ve görünür gözeneklilik), ısı iletkenlik katsayıları ve basınç dayanım özellikleri incelenmiştir. Üretilen köpük beton numunelerinin mikroyapı özelliklerinin yanı sıra gerçek hava şartlarındaki termal performanslarına dair sonuçlar da aşağıda yer almaktadır.

4.1 FTIR Analizi

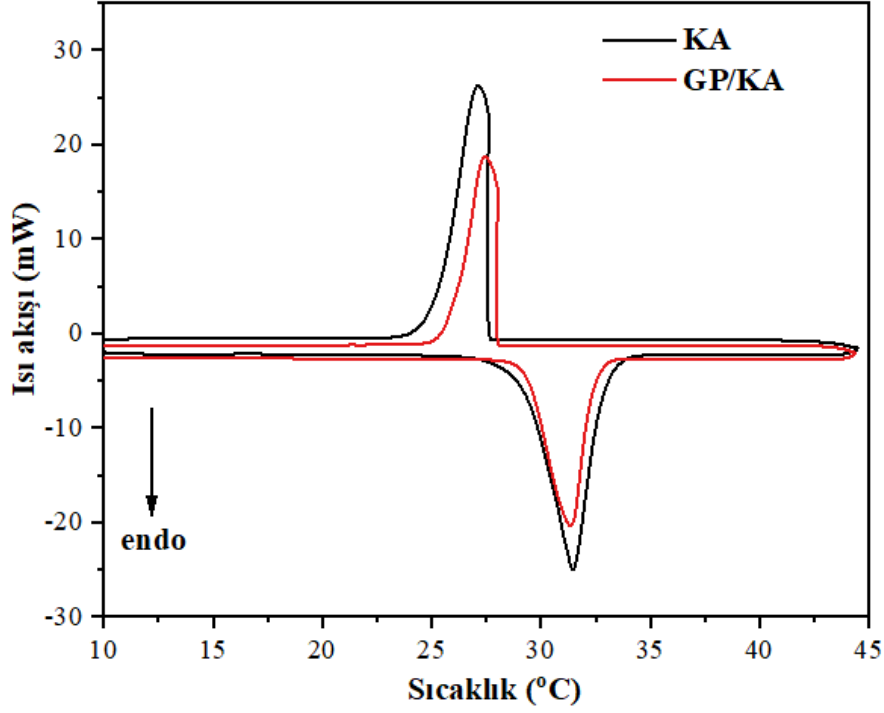
GP, KA ve GP/KA kompozitin kimyasal bağ yapıları FTIR analizi ile belirlendi. Şekil 4.1'deki verilere göre; KA spektrumunda 2912 ve 2851 cm^{-1} 'deki pikler $-\text{CH}_3$ ve $-\text{CH}_2$ simetrik gerilme titreşimlerine, 941 cm^{-1} ve 1695 cm^{-1} 'deki pikler C-O ve C=O gruplarının simetrik esneme titreşimlerine atfedilebilir. 1430 ve 1302 cm^{-1} 'deki pikler ise $-\text{OH}$ 'ın asimetrik gerilme titreşimlerine aittir. GP'ye ait spektrumda, 1008 cm^{-1} 'de gözlenen güçlü absorpsiyon bandı, silika yapısındaki Si-O-Si bağlarının asimetrik gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bu durum, silika esaslı malzemelerin FTIR spektrumunda gözlenen baskın bir özelliktir. Si-O-Si bağlarının bükülme titreşimleri ise 800 cm^{-1} 'de gözlenmiştir. KA ve GP'nin FTIR sonuçları ile karşılaştırıldığında, GP/KA kompozit yapısında yeni bir pikin ortaya çıkması veya mevcut bir pikin kaybolması yönünde bir değişim gözlenmedi. Bu sonuca göre, kompozit bileşenleri arasında fiziksel etkileşimin meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 4.1: GP, KA ve GP/KA kompozitin FTIR analiz sonuçları

4.2 DSC Analizi

KA ve GP/KA kompozitinin DSC eğrileri Şekil 4.2’de verilmiş ve sonuçlar Tablo 4.1 ’de özetlenmiştir. Buna göre; KA ve GP/KA kompozitinin erime ve donma sıcaklıkları sırasıyla 29,4°C ve 27,7°C; 29,2°C ve 28,0°C olarak bulunmuştur. KA ve GP/KA kompozitinin erime ve donma entalpi değerleri ise sırasıyla 194 J/g ve 193,0 J/g; 96,4 J/g ve 95,9 J/g olarak belirlenmiştir. Burada, GP/KA kompoziti, KA’ya benzer faz geçiş özellikleri sergilemektedir ki bu KA’nın GP’ye fiziksel olarak adsorplandığını gösterir. Nitekim, GP/KA kompozitinin faz değişim sıcaklıkları, KA’nın faz değişim sıcaklık değerleri ile karşılaştırıldığında çok az bir miktar kaydığı görülmektedir. Bu durum, GP/KA kompozitine ait bileşenler arasındaki zayıf fiziksel etkileşimlere atfedilebilir.



Şekil 4.2: KA ve GP/KA kompozitin DSC eğrileri

Tablo 4.1: KA ve GP/KA kompozitine ait DSC verileri

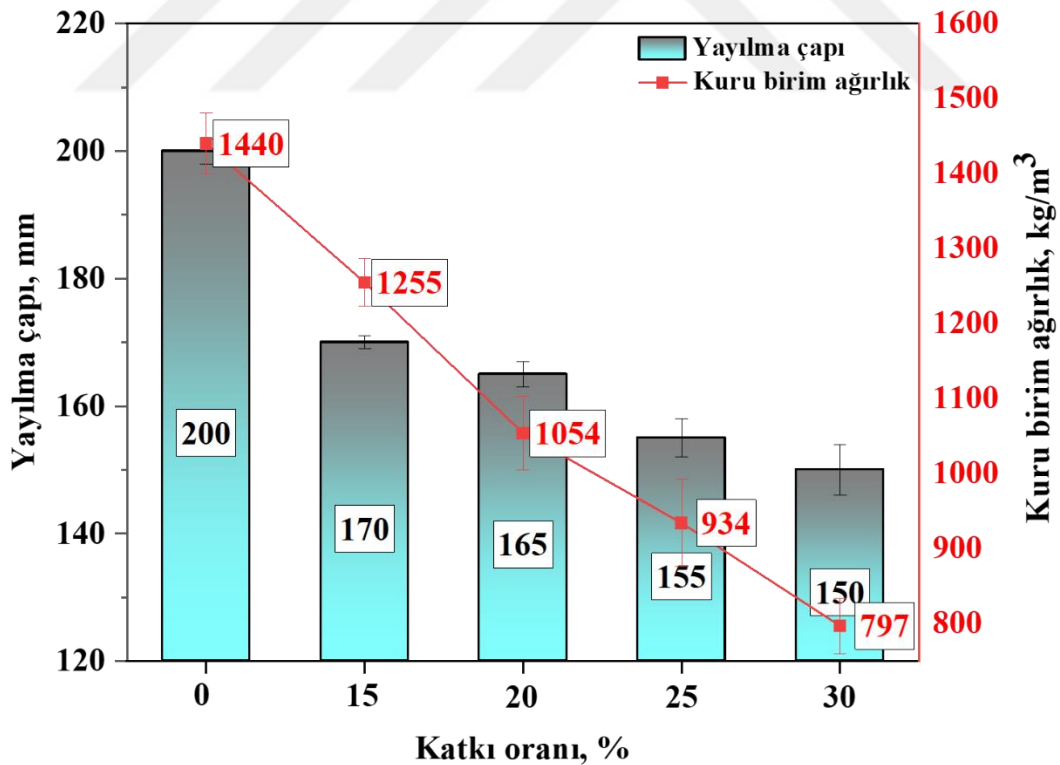
Numune	Erime sıcaklığı, °C	Erime entalpisi, J/g	Donma sıcaklığı, °C	Donma entalpisi, J/g
KA	29,4	194,0	27,7	193,0
GP/KA	29,2	96,4	28,0	95,9

4.3 Yayılma Çapı ve Kuru Birim Ağırlık

Şekil 4.3, hazırlanan taze köpük beton harcının yayılma çapındaki değişimi göstermektedir. Yayılma çapı, GP/KA kompozit içeriğine bağlı olarak 200 mm ile 150 mm aralığında değişim sergilemiştir. Silis kumuna ikame olarak GP/KA kompozitinin eklenmesiyle köpük beton harçlarının yayılma çapında azalma gözlenmiş ve bünyedeki GP/KA miktarının artışı ile bu azalma daha da artmıştır. Referans numune ile karşılaştırıldığında, %15, %20, %25 ve %30 GP/KA ihtiva eden köpük beton harçlarının yayılma çaplarında sırasıyla %15, %17.5, %22.5 ve %25 oranında azalma kaydedilmiştir. Bu durum, gözenekli yapıdaki GP'nin su absorpsiyon kapasitesinin ve yüzey alanının yüksek olmasından kaynaklanabilir (Memon, 2014; Ramakrishnan vd., 2015). Bununla birlikte, köpük beton üretiminde agrega yüzeyinin

ıslak olması istenir. Ancak, karışımdaki GP'nin varlığı, karışımın agrega yüzeyini yükseltir ve bunu engelleyebilir. Dolayısıyla, agrega yüzeylerinin ıslatılması için karışımdaki su/çimento oranının artırılması gerekir (Gencel vd., 2021). Bu çalışmada, hazırlanan tüm karışımlar için su ve çimento miktarı sabit tutulmuştur.

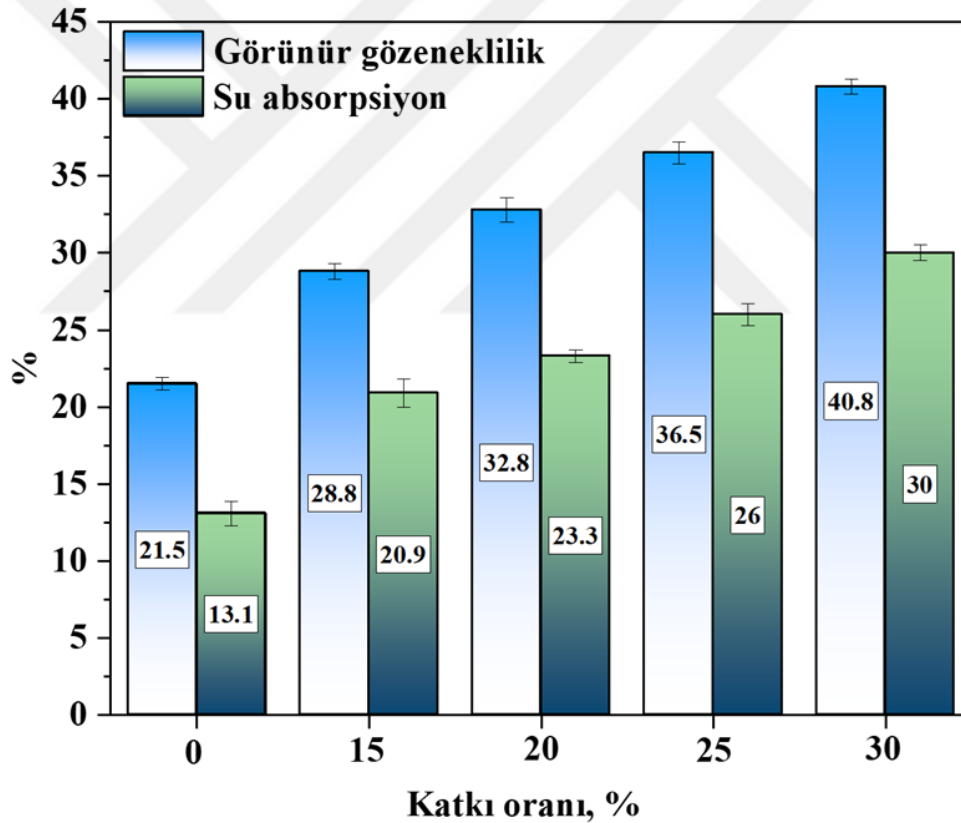
Şekil 4.3, referans numuneye kıyasla kuru birim ağırlığın yayılma çapına benzer şekilde düşüş eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bünyesinde %15, %20, %25 ve %30 oranında GP/KA kompozit içeren köpük betonların kuru birim ağırlıkları sırasıyla 1255, 1054, 934 ve 797 kg/m³'tür. Silis kumunun özgül ağırlığı (2,67 kg/m³), GP'nin özgül ağırlığından (1,98 kg/m³) yüksek olduğundan GP/KA ilavesi köpük betonların kuru birim ağırlığında azalmaya neden olmuştur. Referans numune ile karşılaştırıldığında, kuru birim ağırlığındaki azalma oranları, %15, %20, %25 ve %30 oranında GP/KA içeren köpük beton numuneler için sırasıyla %12,8, %26,8, %35,1 ve %44,6'dır. Betonun kütle yoğunluğunun düşük olması, yapıların ağırlığının da az olması anlamına gelir ve bu durum deprem sırasında yapının davranışı açısından önemlidir.



Şekil 4.3: Köpük beton numunelerine ait yayılma çapı ve kuru birim ağırlık sonuçları

4.4 Görünür Gözeneklilik ve Su Absorpsiyonu

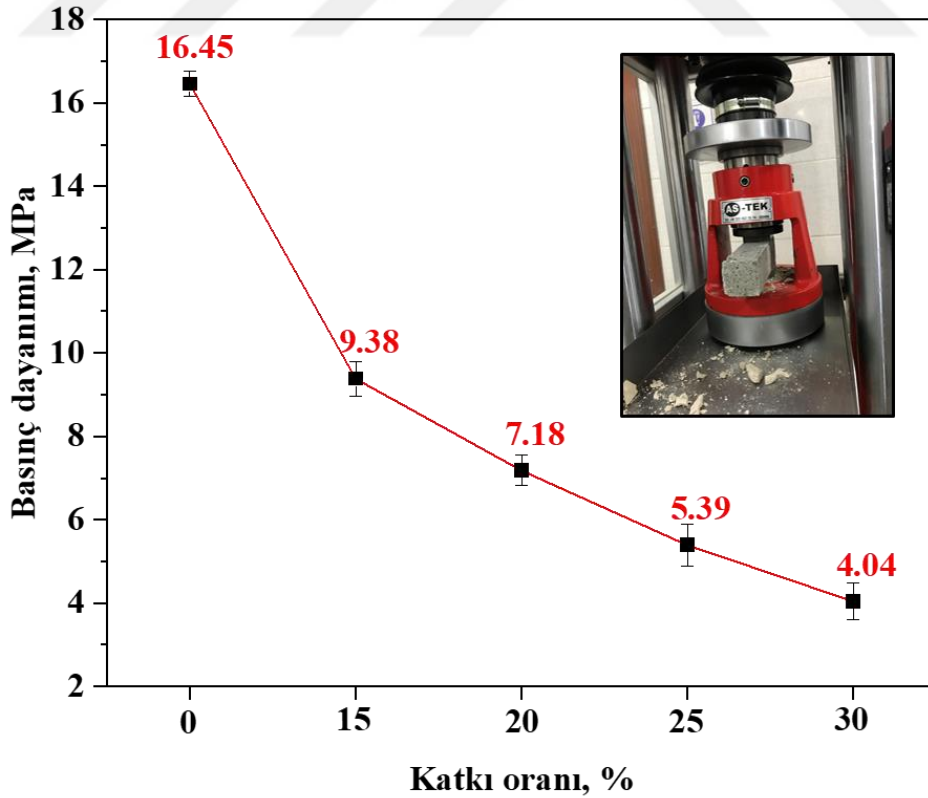
Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, hem görünür gözeneklilik hem de su absorpsiyon değerleri referans numuneye kıyasla artış eğilimindedir. Numunelerin görünür gözeneklilik ve su emme değerleri sırasıyla %21,5 - 40,8 ile %13,1 - 30 aralığında değişim göstermektedir. Görünür gözeneklilik ve su absorpsiyon oranları açısından en yüksek artış %30 GP/KA kompozit içeren köpük beton numunesi için sırasıyla %89,9 ve %129 olarak belirlendi. GP bünyesinde bulunan çok sayıdaki küçük hava kabarcıkları veya boşluklar yapının gözenekli ve yüzey alanının yüksek olmasına olanak sağlar ki bu durum GP'nin su absorplama kapasitesinin yüksek olması demektir. Diğer taraftan, silis kumu daha yoğun bir yapıya sahip olması nedeniyle düşük gözenekliliğe sahiptir.



Şekil 4.4: Köpük beton numunelerin su absorpsiyon ve görünür gözeneklilik sonuçları

4.5 Basınç Dayanımı

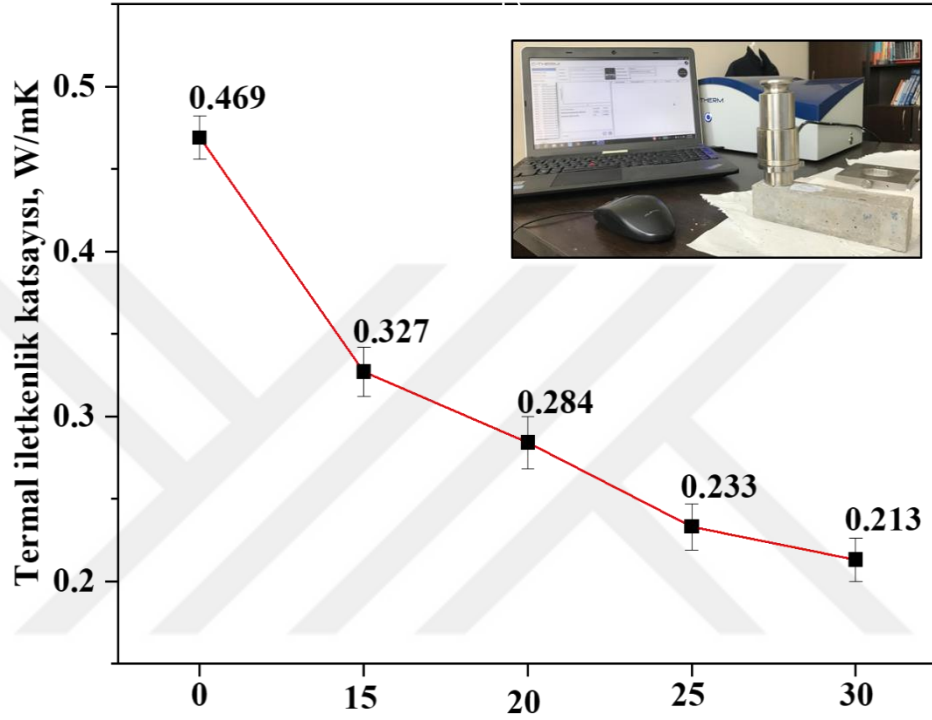
28 gün kürleme işlemi sonrasındaki köpük beton numunelerin basınç dayanım sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir. Deneysel sonuçlar, GP/KA kompozit ile silis kumunun yer değiştirmesi nedeniyle basınç dayanımının azaldığını net bir şekilde ortaya koymaktadır. Referans numuneye kıyasla %15, %20, %25 ve %30 GP/KA ihtiva eden numunelerin basınç dayanımlarında sırasıyla %42,9, %56,3, %67,2 ve %75,4 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum, gözenekli formdaki GP'nin kuvarsa göre daha düşük bir özgül ağırlığa sahip olmasıyla açıklanabilir. Bu bulgular; numunelerin su absorpsiyon, görünür gözeneklilik, yayılma çapı ve kuru birim ağırlık sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Basınç dayanımındaki bu azalmanın bir başka nedeni, GP bünyesine emdirilmiş KA'nın varlığı olabilir. Şöyle ki; köpük beton karışımındaki FDM miktarının artması betonun hidrasyon sürecini uzatabilir. Bu da basınç dayanımında düşüslere sebep olabilir. Diğer bir ifadeyle, FDM varlığı, betonun hidrasyon reaksiyonlarını etkileyebilir (Cunha vd., 2020). Benzer sonuçlar, literatürde başka araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Gencel vd., 2021; Hekimoğlu, Nas, vd., 2021).



Şekil 4.5: Köpük beton numunelerin basınç dayanım sonuçları

4.6 Termal İletkenlik

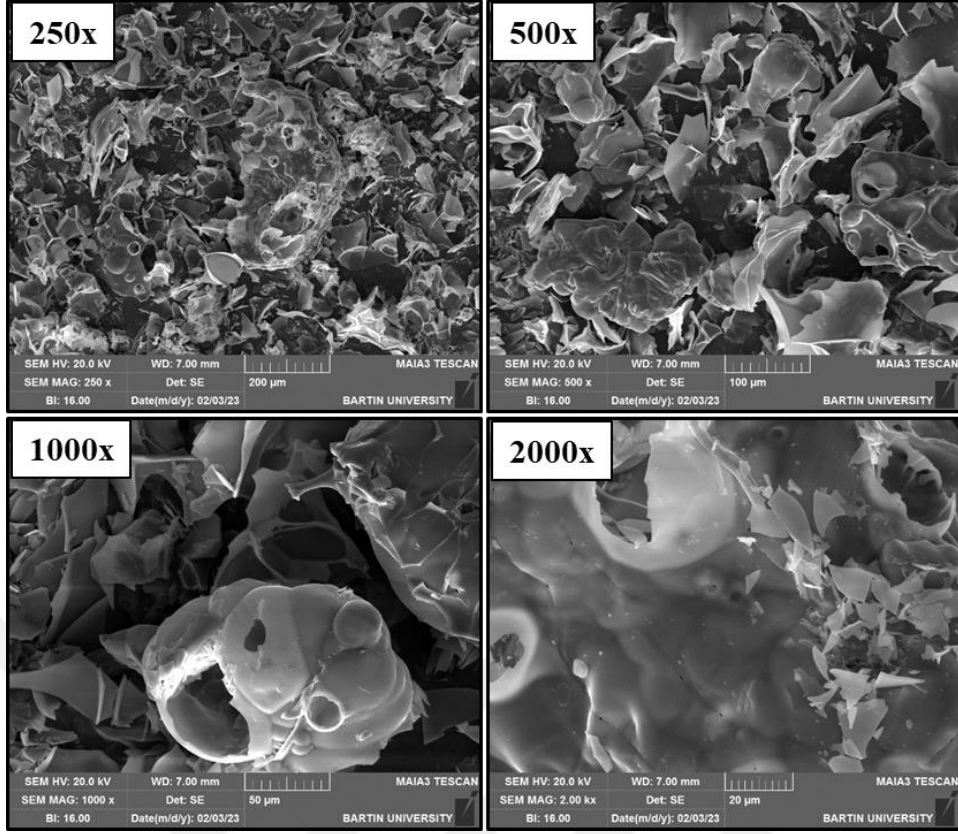
Şekil 4.6, referans ve GP/KA kompoziti içeren köpük beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayı değerlerini göstermektedir. Referans numune ile karşılaştırıldığında, ısı iletkenlik katsayısı 0,469 W/m.K'den 0,213 W/m.K'e düşerek yaklaşık %54,6 oranında azalmıştır.



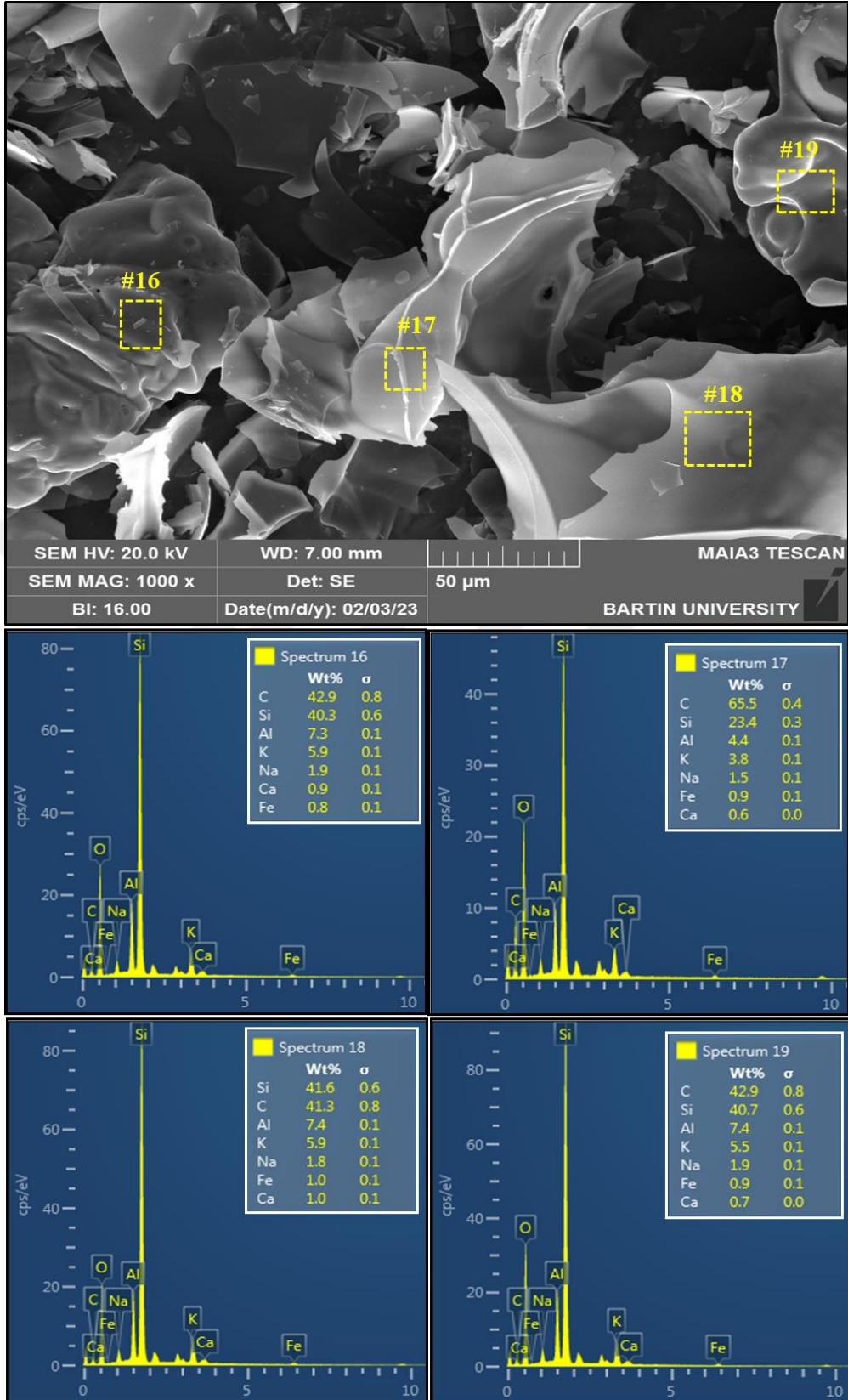
Şekil 4.6: Köpük beton numunelerin termal iletkenlik sonuçları

4.7 SEM ve EDS Analizleri

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8, GP/KA kompozitine ait sırasıyla farklı büyütmelelerdeki SEM görüntülerini ve EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Buna göre; farklı partikül boyutlarındaki GP'nin gözeneklerinin KA ile dolduğu ve GP partikül yüzeylerinin KA ile kaplandığı görülmektedir. EDS sonuçlarında, yüksek orandaki karbon (C) ve silisyum (Si) elementlerinin varlığı dikkat çekmektedir. Buradaki karbon elementi organik yapıdaki KA'dan ve silisyum da GP'den kaynaklanmaktadır.

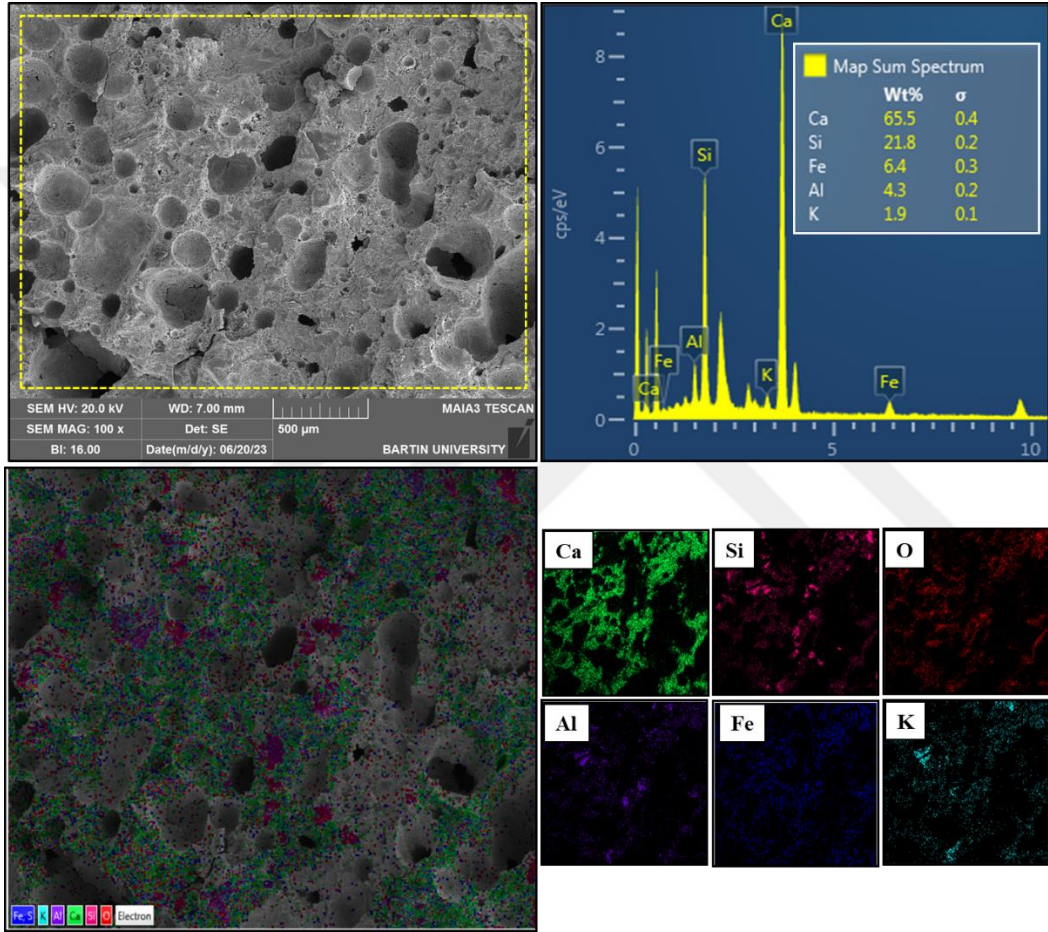


Şekil 4.7: GP/KA kompozitinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri



Şekil 4.8: GP/KA kompozitinin SEM-EDS analizi

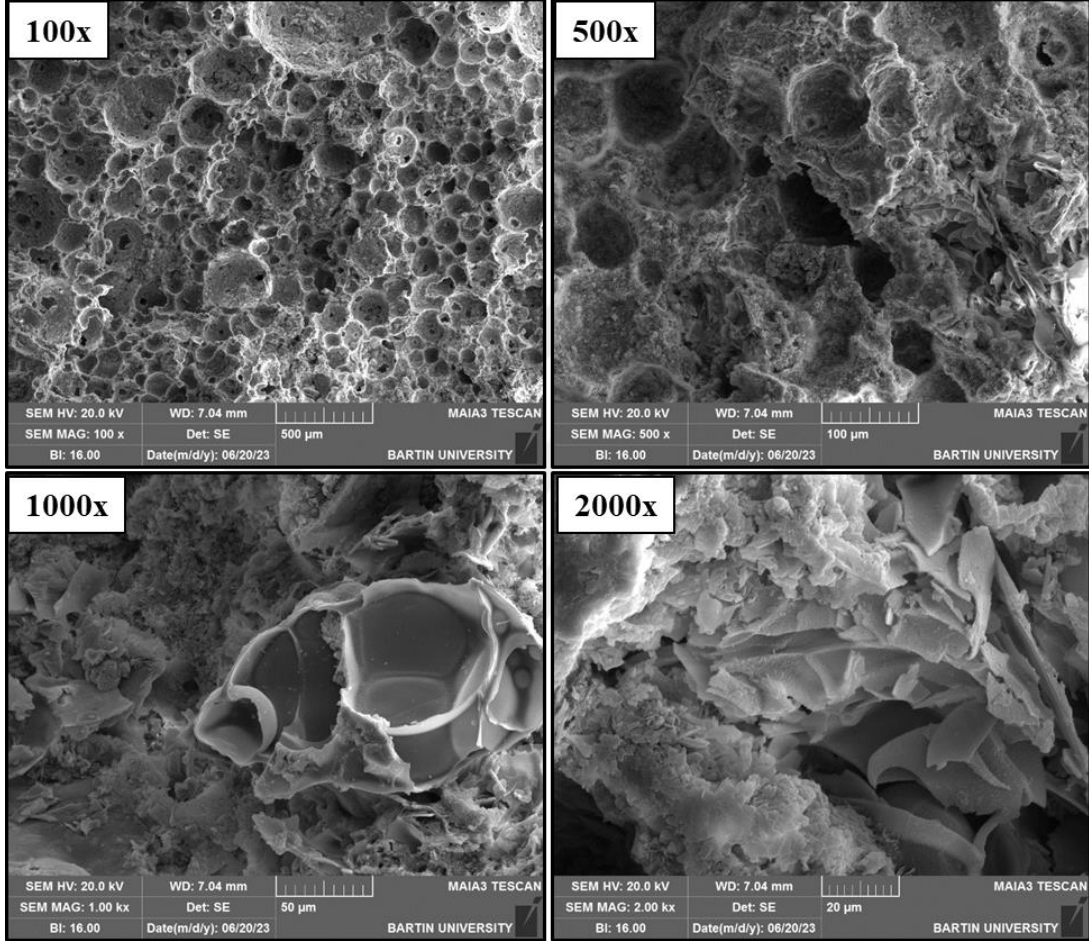
Şekil 4.9'daki, GP/KA kompoziti içermeyen referans köpük beton numunesinin SEM görüntüsünde köpük betonun kendi yapısından kaynaklanan gözenekler bulunmaktadır. EDS sonuçlarındaki başta kalsiyum (Ca) ve Si elementlerinin yanı sıra alüminyum (Al) elementinin varlığı ise kullanılan çimentonun kimyasal bileşiminden ve silis kumundan kaynaklanmaktadır. Çimento ve silis agregasının köpük beton bünyesindeki dağılımı da mapping analiz görüntüsünde verilmiştir.



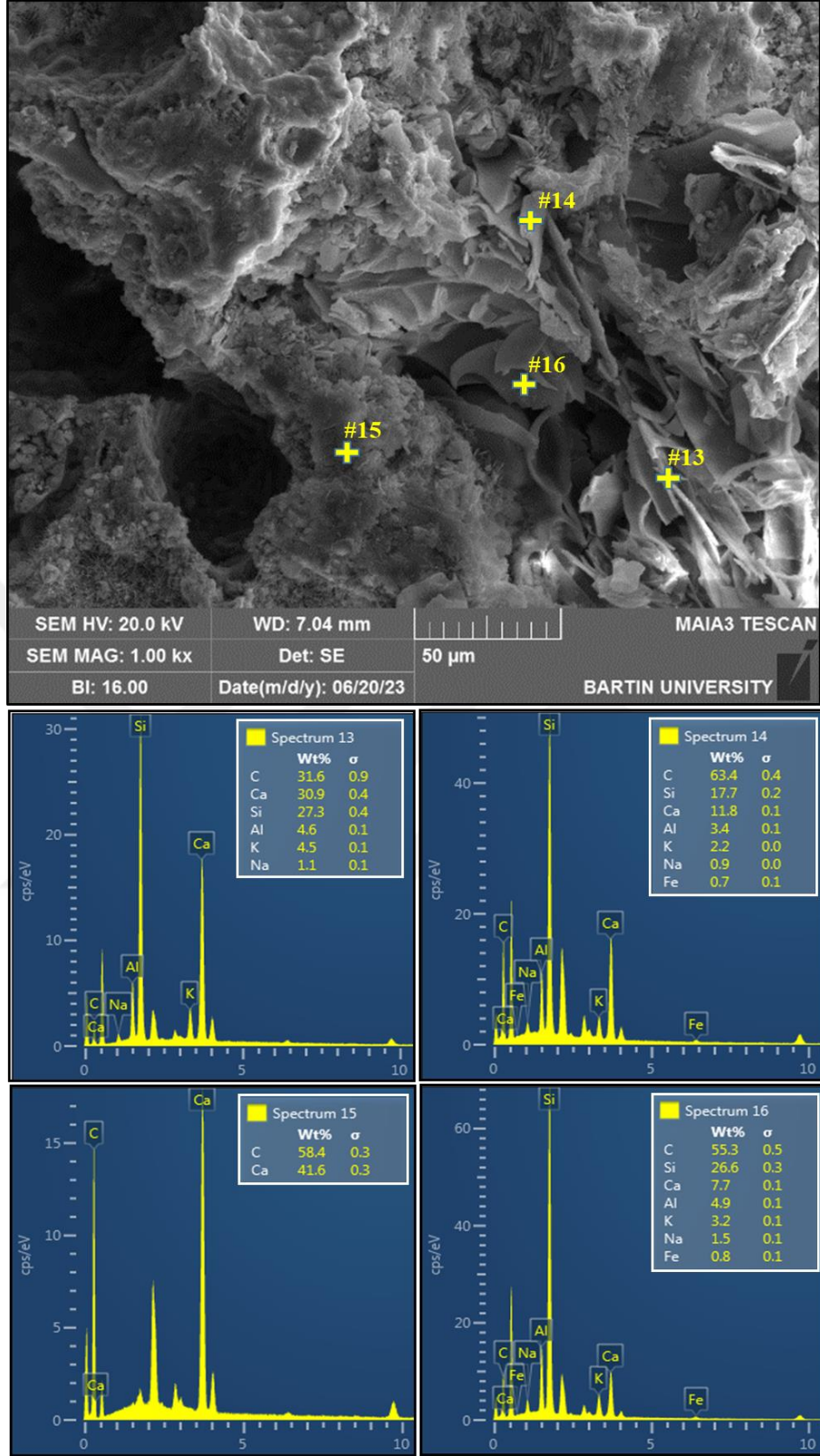
Şekil 4.9: Referans köpük beton numunesinin SEM-EDS görüntüleri ve mapping analizi

Kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton numunesinin farklı büyütme ölçeklerindeki SEM görüntüleri, EDS ve mapping analiz sonuçları sırasıyla Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 verilmiştir. Buna göre; yapıda farklı boyutlarda gözeneklerin olduğu ve tamamen homojen bir dağılım sergilemediği söylenebilir. Bununla birlikte, özellikle yüksek büyütme ölçeklerindeki görüntülerde GP bünyesindeki gözeneklerin KA ile dolduğu ve GP partikül yüzeyinin KA

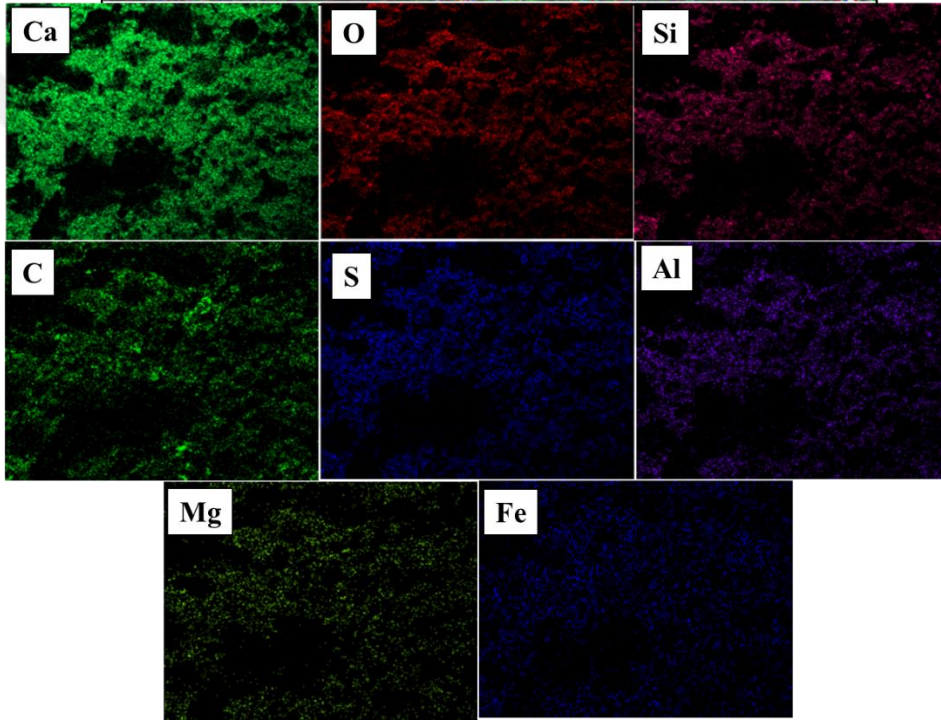
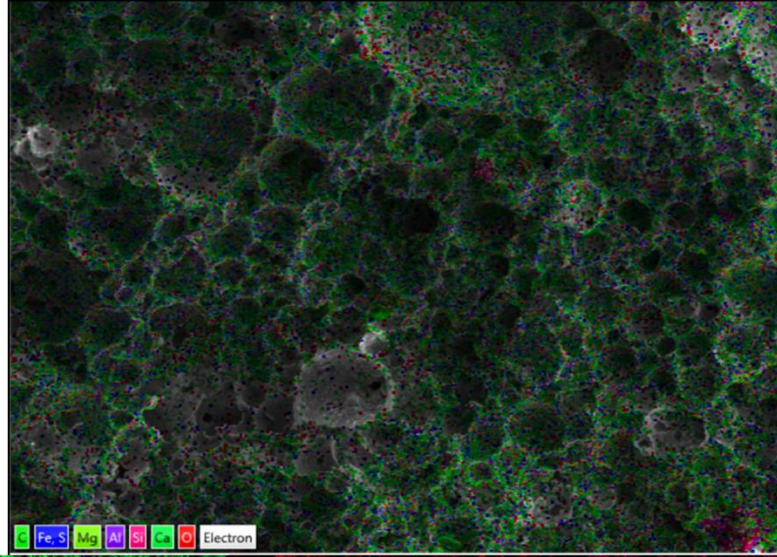
ile kaplandığı görülmektedir (Şekil 4.10). Nitekim EDS analiz sonuçlarında yüksek oranda gözlenen C elementinin varlığı buna işaret etmektedir. Ayrıca, yüksek oranda gözlenen Si ve Ca elementlerinin varlığı çimentonun kimyasal bileşiminden kaynaklanmaktadır (Şekil 4.11). Köpük beton bünyesinde yer alan elementlerin yapıdaki dağılımı da Şekil 4.12'deki mapping analizinde verilmiştir.



Şekil 4.10: Kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton numunesinin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri



Şekil 4.11:Kütlece %30 GP/KA kompoziti içeren köpük beton numunesinin SEM-EDS analizi



Şekil 4.12: Kütlece %30 GP/KA kompoziti içeren köpük beton numunesinin mapping analizi

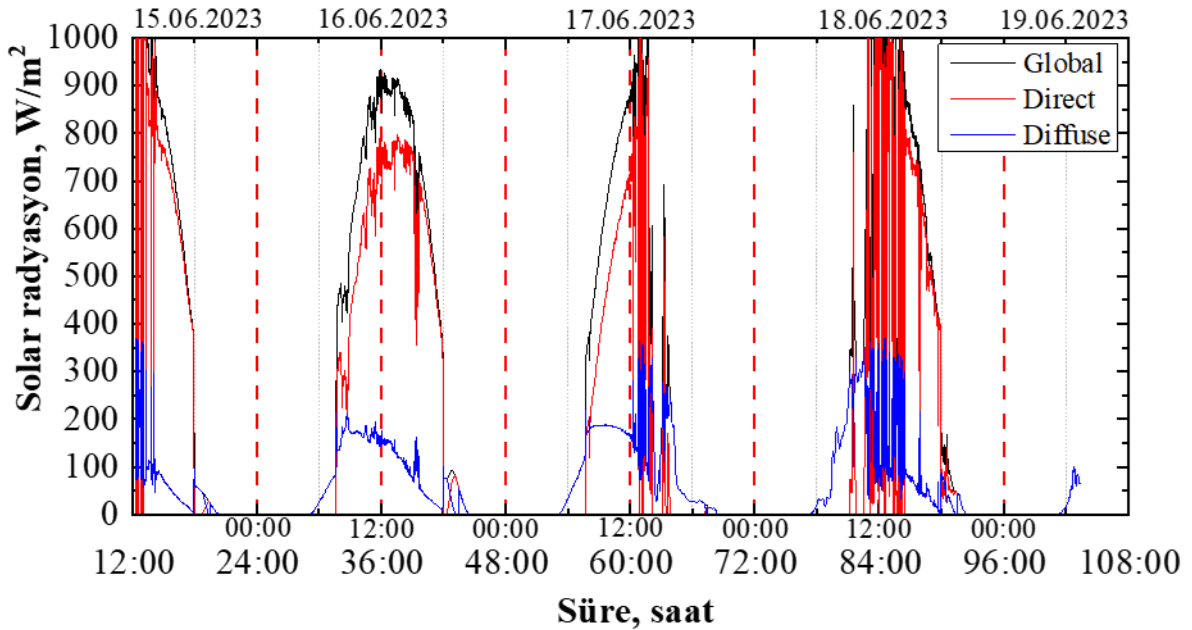
4.8 Termoregülasyon Performans Sonuçları

Üretilen referans ve kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton numunelerinin termal regülasyon testleri 5 gün boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, genel olarak bulutlu ve açık gökyüzülü hava koşulları görülmüştür. Şekil 4.13'te global, doğrudan gelen ve yayılı güneş radyasyon değerleri gösterilmektedir. Deney süresince gökyüzünün en açık olduğu tarih 16.06.2023 olarak gözlenmiştir. Yayılı güneş radyasyon yoğunluğuna göre havadaki kapalılık belirlenebilmektedir. Burada, en yüksek yayılı radyasyon 18.06.2023 günü gerçekleşmiştir. Hava koşullarının yoğun bulutlu olmasından dolayı 17 - 18 Haziran 2023 günleri için maksimum güneş radyasyon değerleri doğrudan anlaşılamamaktadır. Bununla birlikte, art arda gelen günler olmaları nedeniyle açık hava durumlarında birbirlerine yakın güneş radyasyon değerlerine ulaşılacağı düşünülebilir. 16.06.2023 gününde, en yüksek güneş radyasyon değeri yaklaşık 924 W/m^2 olarak güneş öğlesinde ölçülmüştür. Doğrudan gelen güneş radyasyon değeri ise 774 W/m^2 civarlarındadır. Buradan, yatay yüzeye düşen global güneş radyasyonunun yaklaşık %83,7'lik bir kısmının doğrudan gelen güneş radyasyonundan oluştuğu söylenebilir. Yayılı güneş radyasyonu oranı ise %16,3 civarlarındadır. Bu oran bölgenin nem oranına veya havanın kapalılığına göre değişim gösterebilmektedir. Deney odalarından 4 farklı bölgeden sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bunlar malzemenin alt ve üst yüzeyleri, yüzeyin yaklaşık 1 cm yakınındaki hava sıcaklığı ve odanın tam merkezinin sıcaklığıdır. Ayrıca gölgedeki çevre sıcaklığı da ölçülmüştür. Deney süresince oda sıcaklığı 16.06.2023 günü en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Bu durum, 16.06.2023 tarihinde havanın diğer günlere göre daha az bulutlu olmasından kaynaklanmaktadır.

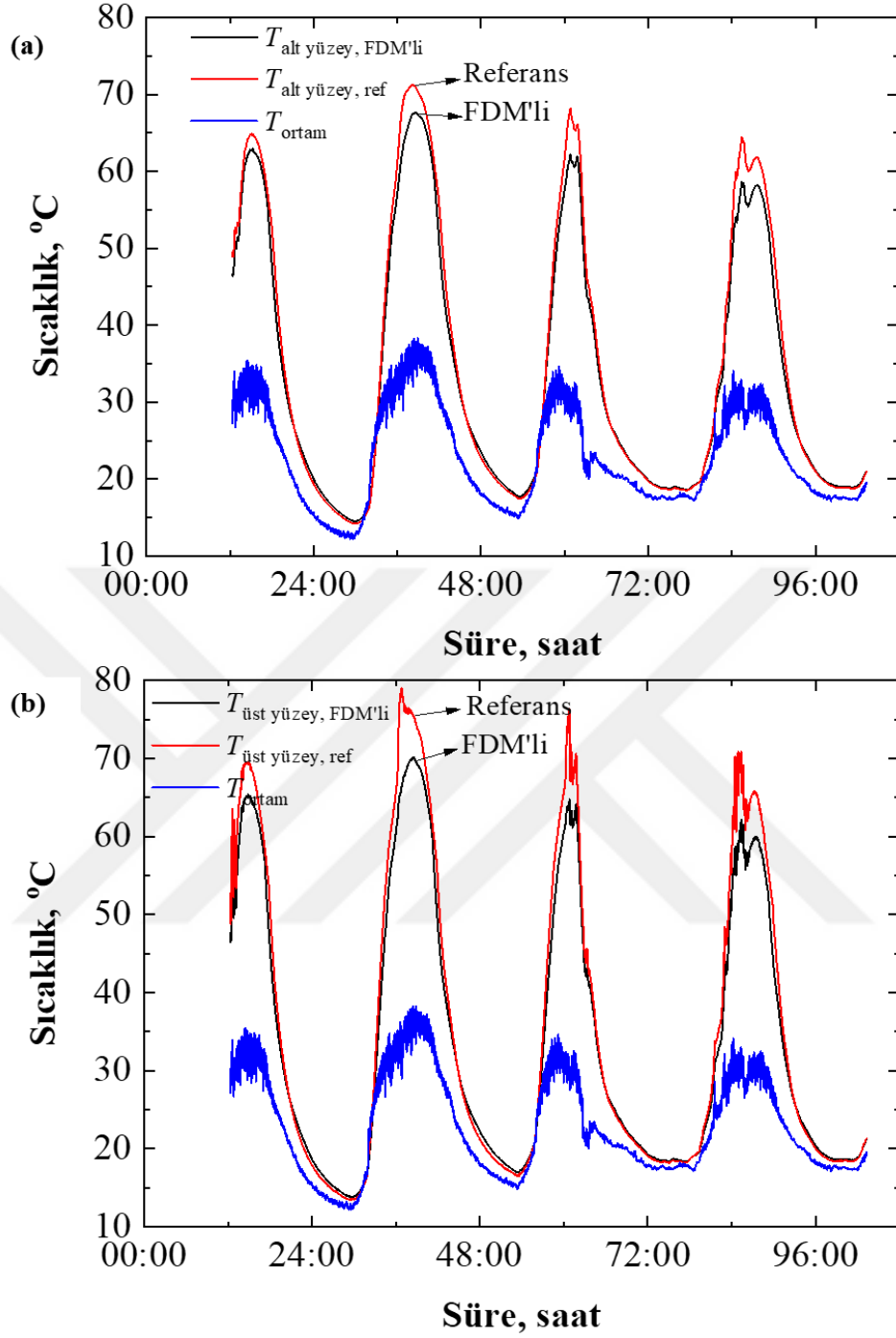
FDM'nin soğutma etkisi bütün günlerde ve ölçüm noktalarında belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. En yüksek sıcaklık değerleri malzemenin üst yüzeyinde görülmüştür. Bu, güneş radyasyonunun üst yüzeye gelmesinden kaynaklanmaktadır. Bu durumda malzemenin yüzey özellikleri önemli bir rol oynamaktadır. Yansıtıcılık oranı görece büyük olan yüzeylerde, ortam sıcaklığı yüzeyden daha önce artabilmektedir. Ancak, yüzey soğuruculuğu yükseldikçe malzemenin sıcaklığı daha yüksek olabilir. Ortamın kapalı olması nedeniyle, iç ortam sıcaklığı çevre sıcaklığının oldukça üzerine çıkmaktadır. Bu şekilde, iyi yalıtımlı odaların kullanılmasının amacı malzemenin enerji depolama özelliğini daha iyi gözlemleyebilmektir. Bütün günlerde değişik oranlarda bir sıcaklık farkı meydana gelmiştir. 16.06.2023 günü incelendiğinde, alt yüzey ve oda merkez sıcaklıklarında kütlece %30

GP/KA katkılı köpük beton plaka sırasıyla yaklaşık %6,5 ve %5,3'lük daha serin bir ortam sağlamıştır.

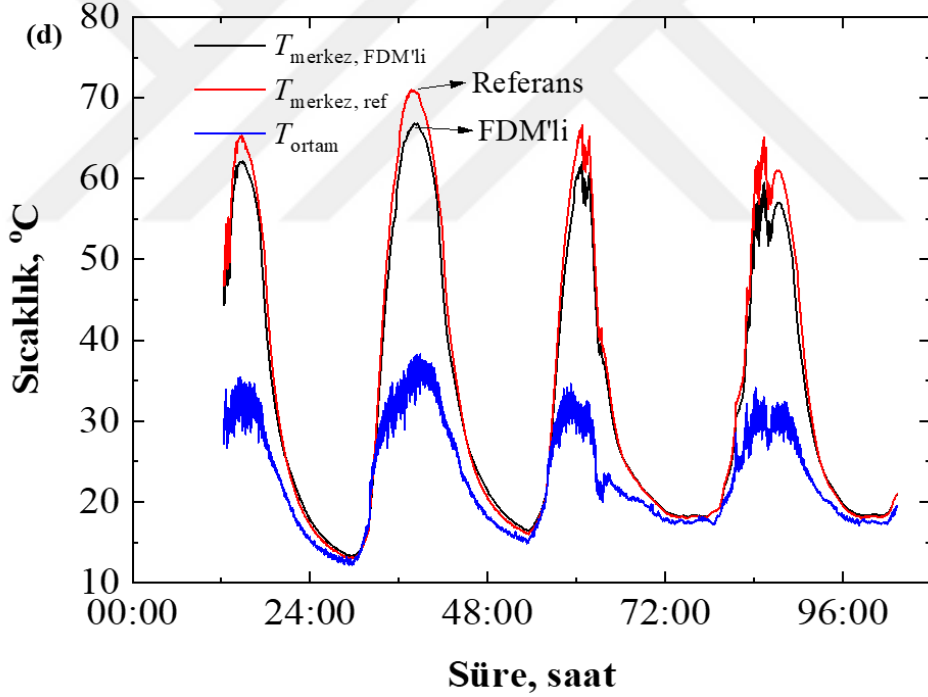
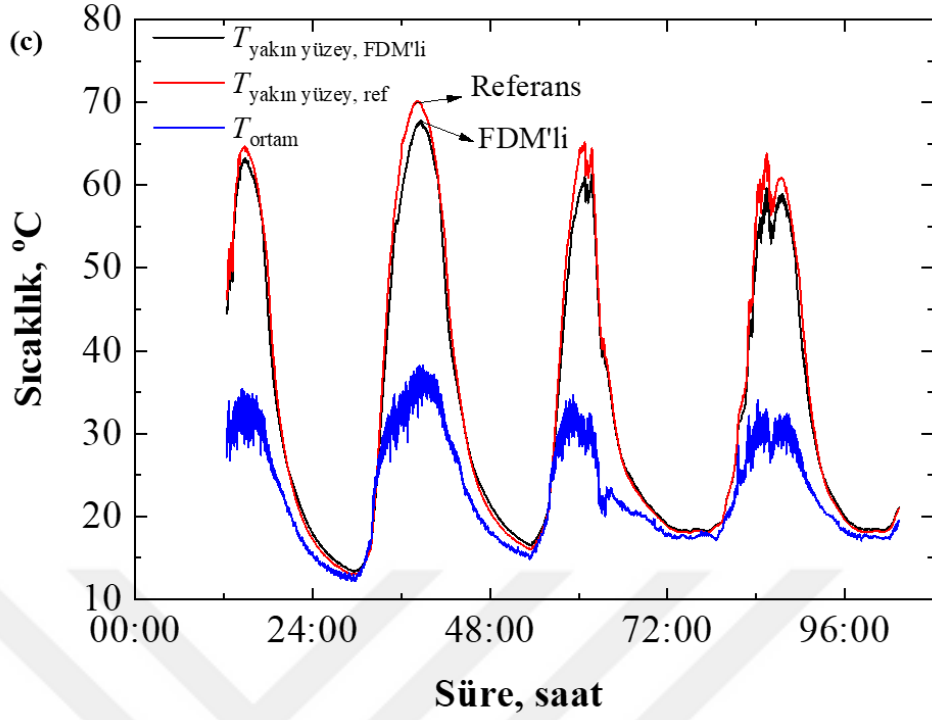
FDM etkisini daha net görebilmek adına sıcaklık farkları Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te görselleştirilmiştir. Burada; alt yüzey, üst yüzey, yakın yüzey ve oda merkezleri arasındaki sıcaklık farkları gösterilmiştir. Üst yüzeyler sıcaklık farkları 12°C civarlarına ulaşırken, alt yüzey, yakın yüzey ve oda merkezinde 6 - 6,5°C civarlarında farklar görülmüştür. Üst yüzey için en yüksek sıcaklık farkı yine 16.06.2023 gününde 12,9°C olarak ölçülmüştür. Alt yüzey sıcaklık farkları bütün günlerde birbirlerine yakın karakteristik göstermiş ve alt yüzey sıcaklık farkları yaklaşık 6°C civarlarında olmuştur. Oda merkezinde sıcaklık farkları güneş öğlesinde 4,9°C civarlarındadır. Oda merkezlerindeki 6,5°C'lik en yüksek sıcaklık farkı, saat 18:00 civarlarında görülmüştür. FDM'nin soğutma etkisi ile birlikte göreceli daha az olmakla birlikte gece vakitlerinde ısıtma etkisi de görülmüştür. Bu bağlamda en yüksek etki, 16 Haziran'ı 17 Haziran'a bağlayan gecede gözlemlenmiştir. Üst yüzey sıcaklıklarında 1°C daha sıcak bir yüzey oluşurken, oda merkezinde bu sıcaklık farkı 1,13°C civarlarına ulaşabilmektedir (Şekil 4.16). Sonuç olarak; üretilen kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton yapı malzemesi yüzey ve ortam sıcaklıklarında önemli miktarda bir azalma (serinleme) sağlarken, gece vakitlerinde ısıtma yükünün azaltılması noktasında katkı sağlayacağı açıkça görülmektedir.



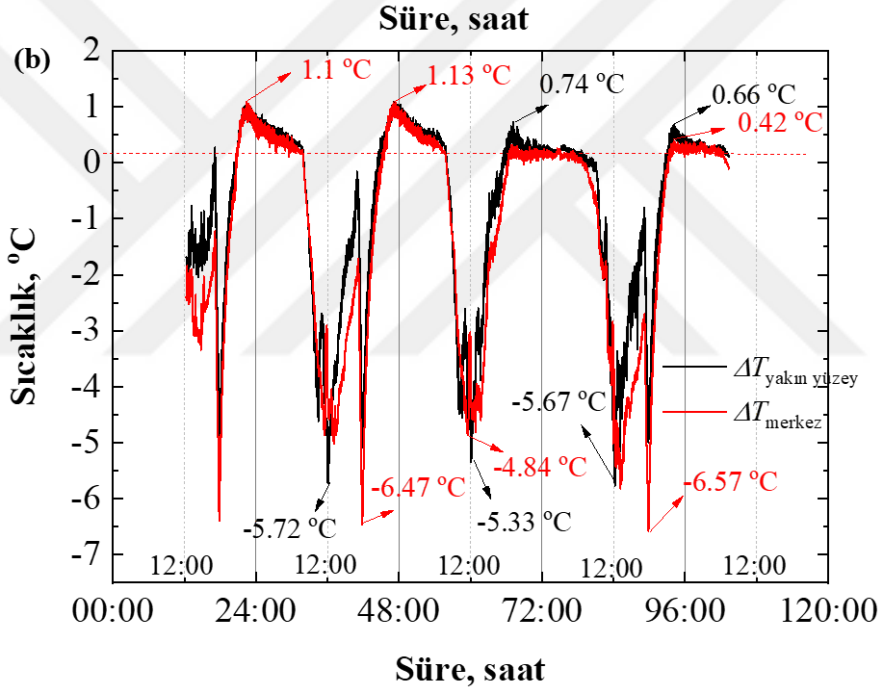
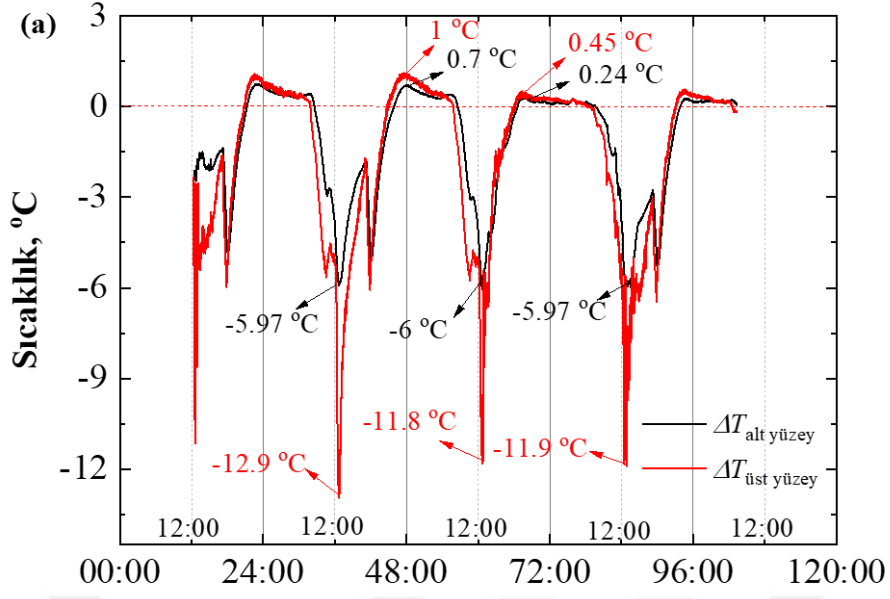
Şekil 4.13: Global güneş ışınımı, doğrudan gelen güneş ışınımı ve dağınık güneş ışınımının değişimi (15-19.06.2023)



Şekil 4.14: Kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton ve referans plakaların kullanıldığı test odalarındaki alt yüzey (a) ve üst yüzeydeki (b) sıcaklık değişimi (15-19.06.2023)



Şekil 4.15: Kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton ve referans plakaların kullanıldığı test odalarındaki yakın yüzey (c) ve merkezdeki (d) sıcaklık değişimi (15-19.06.2023)



Şekil 4.16: Kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton ve referans plakaların alt yüzey ile üst yüzey (a) ve oda merkezi ile yakın yüzey (b) arasındaki sıcaklık farkları (15-19.06.2023)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, GP/KA içeren köpük beton numunelerin üretimi ve karakterizasyon işlemleri (fiziksel, mekanik, termal ve mikroyapı özellikleri) gerçekleştirilerek üretilen numunelerin gerçek hava şartlarında termoregülasyon performansları test edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçları aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür;

- GP'nin sızdırma olmaksızın en fazla %58 oranında (kütlece) KA emebildiği belirlendi.
- GP/KA kompozitinin erime entalpisinin 96,4 J/g ve katılma entalpisinin ise 95,9 J/g kadar gizli ısıyı serbest bıraktığı tespit edildi.
- FTIR sonuçlarına göre, doğrudan emdirme işlemi sonrasında elde edilen GP/KA kompozit yapısındaki KA ve GP bileşenleri arasındaki etkileşimin fiziksel olduğu belirlendi.
- Silis kumuna ikame olarak GP/KA kompozitinin köpük beton harcına ilavesi yayılma çapı ve kuru birim ağırlık değerlerinde azalmaya neden oldu.
- Referans numune ile karşılaştırıldığında, GP/KA kompozit içeriğine bağlı olarak görünür gözeneklilik ve su absorpsiyon değerlerinde artış gözlemlendi.
- 28 gün kürlenme işlemi sonrasında, referans numuneye kıyasla, GP/KA kompozit içeriğinin artışıyla köpük beton numunelerin basınç dayanımlarında ve termal iletkenlik değerlerinde azalma meydana geldi. En düşük basınç dayanımı ve termal iletkenlik katsayısı kütlece %30 GP/KA içeren köpük beton numunesi için sırasıyla 4,04 MPa 0,213 W/m.K olarak ölçüldü.
- Kütlece %30 GP/KA kompoziti ihtiva eden köpük beton, yüksek güneş yoğunluğu ve norma ortam sıcaklıklarında referans numuneye kıyasla iç ortam sıcaklığını azaltarak odayı daha serin tutabilmektedir. Bununla birlikte, GP/KA (kütlece %30) içeren köpük beton kullanımı, gece saatlerinde ve ortam soğuduğunda daha sıcak bir iç ortam sıcaklığı sağlayabilir. Dolayısıyla, GP/KA katkılı köpük beton, odanın ısıtma/soğutma için ihtiyaç duyduğu enerji yükünü azaltarak enerji tasarrufuna katkı sunabilir.

Sonraki çalışmalar için;

- Kompozit hazırlamada farklı FDM'ler ve doğrudan emdirme dışında farklı teknikler kullanılabilir.
- Destek materyali olarak alternatif gözenekli malzemeler (özellikle atık esaslı) denenebilir.

- Üretilen kompozitler köpük beton dışında alçı veya çimento bünyeye dahil edilerek yapı malzemeleri elde edilebilir.
- Üretilen FDM katkılı yapı malzemelerinin termoregülasyon performans ölçümleri pilot ölçekte gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

- Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P. ve Smyth, M. (2010). A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 615–628.
- Akman, M. ve S.Akçay, B. (2005). Kimyasal katkıların gelişimi ve çimentolarla uyumu. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*. 16-18 Ocak 2011, Ankara, 278
- Al-Absi, Z.A., Hafizal, M.I., Ismail, M., Awang, H. ve Al-Shwaiter, A. (2022). Properties of PCM-based composites developed for the exterior finishes of building walls. *Case Studies in Construction Materials*, 16,e00960
- Alavy, M., Peiris, M., Wang, J. ve Rosen, M. A. (2021). Assessment of a novel phase change material-based thermal caisson for geothermal heating and cooling. *Energy Conversion and Management*, 234, 113928.
- Altuncı, Y.T., Öcal, C., Saphioğlu, K., İnce, H.H. ve Cevikbas, M. (2021). Genleştirilmiş Cam Agregalı ve Genleştirilmiş Perlit Agregalı Şap Harçlarının Performans Özelliklerinin Belirlenmesi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 11–20.
- Arslan, O. (2022). *Genleştirilmiş perlit ile üretilen köpük betonlarda atık camların değerlendirilmesinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kastamonu, 98.
- Awana, M. ve Kumar, C. (2017). Cellular lightweight concrete. *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology, Sciences and Management, Adithya Institute of Technology*, 241–246.
- Baetens, R., Jelle, B. P., ve Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361–1368.
- Başar, F. S. (2023). *Seramik çamurlarında perlit katkısının araştırılması ve uygulamaları*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Seramik ve Cam Ana Sanat Dalı, Sakarya, 95.
- Bayram, S., Mert, H. H. ve Mert, M. S. (2023). Preparation of shape-stabilized composite phase change materials containing n-nonadecane with modified kaolinite clay-doped poly (styrene-co-divinyl benzene) matrix and determination of their properties. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38(1), 435–449.
- Bayraktar, O.Y. (2021). *Atık mermer tozu ve pirinç kabuğu külü katkılı köpük betonların mekanik ve bazı durabilite özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi,

Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği, Kastamonu, 115.

- Bekaroğlu, M. (2012). *Kompozit yapıda pomza agregası içeren kopuk betonun özellikleri ve teknik parametrelerinin irdelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Isparta, 124.
- Beltrán, R. D. ve Martínez-Gómez, J. (2019). Analysis of phase change materials (PCM) for building wallboards based on the effect of environment. *Journal of Building Engineering*, 24, 100726.
- Cabeza, L.F. (2021). Advances in thermal energy storage systems: Methods and applications. *In Advances in thermal energy storage systems*, (pp. 37–54).
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A. ve Fernández, A.I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695.
- Cabeza, L. F., Castellon, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R. ve Zubillaga, O. (2007). Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy and Buildings*, 39(2), 113–119.
- Cárdenas, B. ve León, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 724–737.
- Cunha, S., Silva, M. ve Aguiar, J. (2020). Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 230, 117011.
- De Gracia, A. ve Cabeza, L.F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414–419.
- Demirel, B. ve Yazıcıoğlu, S. (2010). Uçucu külün karbon fiber takviyeli hafif betonun mekanik özelliklerine etkisi, *Journal of Selcuk-Technic Dergisi*, Fırat Üniversitesi, 40.
- Dixit, P., Vennapusa, J.R., Parvate, S., Singh, J., Dasari, A. ve Chattopadhyay, S. (2021). Thermal buffering performance of a propyl palmitate/expanded perlite-based form-stable composite: experiment and numerical modeling in a building model. *Energy & Fuels*, 35(3), 2704–2716.
- Evans, A., Strezov, V. ve Evans, T.J. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4141–4147.
- Gallart-Sirvent, P., Martín, M., Villorbina, G., Balcells, M., Solé, A., Barrenche, C., Cabeza, L.F. ve Canela-Garayoa, R. (2017). Fatty acid eutectic mixtures and

derivatives from non-edible animal fat as phase change materials. *RSC Advances*, 7(39), 24133–24139.

Gencil, O., Hekimoğlu, G., Sarı, A., Sutcu, M., Er, Y. ve Ustaoglu, A. (2021). A novel energy-effective and carbon-emission reducing mortars with bottom ash and phase change material: Physico-mechanical and thermal energy storage characteristics. *Journal of Energy Storage*, 44, 103325.

Guardia, C., Barluenga, G., Palomar, I. ve Diarce, G. (2019). Thermal enhanced cement-lime mortars with phase change materials (PCM), lightweight aggregate and cellulose fibers. *Construction and Building Materials*, 221, 586–594.

Hekimoğlu, G. (2022). *Binalarda ısı enerjisi depolama amaçlı kompozit faz değişim malzemelerinin geliştirilmesi, karakterizasyonu ve laboratuvar ölçekli uygulamaları*. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Trabzon, 143.

Hekimoğlu, G., Nas, M., Ouikhalfan, M., Sarı, A., Kurbetci, Ş., Tyagi, V. V., Sharma, R. K., & Saleh, T. A. (2021). Thermal management performance and mechanical properties of a novel cementitious composite containing fly ash/lauric acid-myristic acid as form-stable phase change material. *Construction and Building Materials*, 274, 122105.

Hekimoğlu, G. ve Sarı, A. (2022). A review on phase change materials (PCMs) for thermal energy storage implementations. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1360–1367.

Hekimoğlu, G., Sarı, A., Kar, T., Keleş, S., Kaygusuz, K., Tyagi, V.V, Sharma, R.K., Al-Ahmed, A., Al-Sulaiman, F.A., ve Saleh, T.A. (2021). Walnut shell derived bio-carbon/methyl palmitate as novel composite phase change material with enhanced thermal energy storage properties. *Journal of Energy Storage*, 35, 102288.

Hekimoğlu, G., Sarı, A., Kar, T., Keleş, S., Kaygusuz, K., Yıldırım, N., Tyagi, V.V., Sharma, R.K. ve Saleh, T.A. (2021). Carbonized waste hazelnut wood-based shape-stable composite phase change materials for thermal management implementations. *International Journal of Energy Research*, 45(7), 10271–10284.

Jegadheeswaran, S. ve Pohekar, S.D. (2009). Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2225–2244.

Jiao, C., Ji, B. ve Fang, D. (2012). Preparation and properties of lauric acid–stearic acid/expanded perlite composite as phase change materials for thermal energy storage. *Materials Letters*, 67(1), 352–354.

- Kalaycı, F. (2016). *Perlit Esaslı Isı Yalıtım Malzemesi Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kahramanmaraş, 158.
- Karaipekli, A. ve Sarı, A. (2009). Capric–myristic acid/vermiculite composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy*, 83(3), 323–332.
- Kaya, E. S. (2019). *Ham perlit ve geliştirilmiş perlitin puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Balıkesir, 92.
- Kocakerimoğlu, F. (2019). *Köpük beton üretiminde farklı mineral katkıların fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Afyonkarahisar, 104.
- Kozak, M. ve Kozak, Ş. (2012). Enerji depolama yöntemleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(2), 17–29.
- Kuznik, F. ve Virgone, J. (2009). Experimental assessment of a phase change material for wall building use. *Applied Energy*, 86(10), 2038–2046.
- Li, T., Yuan, Y. ve Zhang, N. (2017). Thermal properties of phase change cement board with capric acid/expanded perlite form-stable phase change material. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6), 1687814017701706.
- Mehling, H. ve Cabeza, L.F. (2008). Heat and cold storage with PCM. *Heat and Mass Transfer*, 11–55.
- Memon, S.A. (2014). Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 870–906.
- Memon, S. A., Cui, H.Z., Zhang, H. ve Xing, F. (2015). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete. *Applied Energy*, 139, 43–55.
- Mert, M. S., Sert, M. ve Mert, H.H. (2018). Isıl enerji depolama sistemleri için organik faz değiştiren maddelerin mevcut durumu üzerine bir inceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 161–174.
- Mohammed, J.H. ve Hamad, A.J. (2014). Materials, properties and application review of Lightweight concrete. *Technical Review of the Faculty of Engineering University of Zulia*, 37(2), 10–15.
- Morovat, N., Athienitis, A.K., Candanedo, J.A. ve Dermardiros, V. (2019). Simulation and performance analysis of an active PCM-heat exchanger intended for building operation optimization. *Energy and Buildings*, 199, 47–61.

- Nair, A. M., Wilson, C., Huang, M. J., Griffiths, P., & Hewitt, N. (2022). Phase change materials in building integrated space heating and domestic hot water applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 54, 105227.
- Ortega Del Rosario, M. D. L.Á., Chen Austin, M., Bruneau, D., Nadeau, J.P., Sebastian, P., ve Jaupard, D. (2021). Operation assessment of an air-PCM unit for summer thermal comfort in a naturally ventilated building. *Architectural Science Review*, 64(1–2), 37–46.
- Öztürk, E. (2019). *Yapılarda hafif beton kullanımında son gelişmeler*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 85.
- Podara, C.V, Kartsonakis, I.A. ve Charitidis, C.A. (2021). Towards phase change materials for thermal energy storage: classification, improvements and applications in the building sector. *Applied Sciences*, 11(4), 1490.
- Py, X., Azoumah, Y. ve Olives, R. (2013). Concentrated solar power: Current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 306–315.
- Ramakrishnan, S., Sanjayan, J., Wang, X., Alam, M. ve Wilson, J. (2015). A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites. *Applied Energy*, 157, 85–94.
- Rashad, A.M. (2016). A synopsis about perlite as building material–A best practice guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*, 121, 338–353.
- Sarı, A. ve Karaipekli, A. (2008). Preparation, thermal properties and thermal reliability of capric acid/expanded perlite composite for thermal energy storage. *Materials Chemistry and Physics*, 109(2–3), 459–464.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R. ve Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318–345.
- Sharma, R.K., Ganesan, P., Tyagi, V.V, Metselaar, H.S.C. ve Sandaran, S.C. (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, 95, 193–228.
- Tekin, N., Kadıncı, E., Demirbaş, Ö., Alkan, M., Kara, A., & Doğan, M. (2006). Surface properties of poly (vinylimidazole)-adsorbed expanded perlite. *Microporous and Mesoporous Materials*, 93(1–3), 125–133.
- Tuncel, E.Y. (2020). *Thermal and mechanical performance of cementitious PCM composites*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 156.

- Türeyen, A. C. (2019). *Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen köpük betonların fiziksel ve mekanik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 141.
- Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanlari, A. ve Çelik, D.N. (2018). Genleştirilmiş perlitin ısı yalıtım teknolojilerinde kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 36–42.
- URL-1. (2024). <https://atamankimya.com>, capric acid (Kaprik asit), (10.02.2023).
- Wang, Z., Qiu, F., Yang, W. ve Zhao, X. (2015). Applications of solar water heating system with phase change material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 645–652.
- Waqas, A. ve Dincer, Z.U. (2013). Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 607–625.
- Wi, S., Yang, S., Park, J. H., Chang, S. J. ve Kim, S. (2020). Climatic cycling assessment of red clay/perlite and vermiculite composite PCM for improving thermal inertia in buildings. *Building and Environment*, 167, 106464.
- Ye, R., Fang, X., Zhang, Z. ve Gao, X. (2015). Preparation, mechanical and thermal properties of cement board with expanded perlite based composite phase change material for improving buildings thermal behavior. *Materials*, 8(11), 7702–7713.
- Yousefi, A., Tang, W., Khavarian, M. ve Fang, C. (2022). Effects of thermal conductive fillers on energy storage performance of Form-Stable phase change material integrated in Cement-Based composites. *Applied Thermal Engineering*, 212, 118570.
- Zhang, J., Guan, X., Song, X., Hou, H., Yang, Z. ve Zhu, J. (2015). Preparation and properties of gypsum based energy storage materials with capric acid–palmitic acid/expanded perlite composite PCM. *Energy and Buildings*, 92, 155–160.
- Zhu, J., Guo, B., Hou, H. ve Zhang, W. (2019). Preparation and Property Modification on Novel Energy Storage Material: n-Octadecane PCMs/Expanded Perlite Composite Gypsum Board. *Advances in Civil Engineering*, 2019(1), 4501354.

ÖZGEÇMİŞ



