

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

**RT20 FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİ İLE DOLDURULMUŞ BİR KONUT
DUVARININ ISIL PERFORMANSININ İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MELİH KIRIMLIOĞLU

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2025

10693832

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

**RT20 FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİ İLE DOLDURULMUŞ BİR KONUT
DUVARININ ISIL PERFORMANSININ İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MELİH KIRIMLIOĞLU

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. MUSA ÖZKAN

BİLECİK, 2025

10693832

BEYAN

“RT20 Faz Değişim Malzemesi ile Doldurulmuş Bir Konut Duvarının Isıl Performansının İncelenmesi” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

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

Melih KIRIMLIOĞLU

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans tezinin hazırlanma sürecinde bana rehberlik eden, yol gösteren ve her aşamada destek olan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Musa Özkan'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Bilgisi, sabrı ve teşvik edici yaklaşımıyla bu akademik sürecin benim için verimli ve öğretici olmasını sağladı.

Bu yolculukta en büyük desteği her zaman ailemden gördüm. Beni sabırla destekleyen, sevgileriyle güç veren kıymetli eşime ve hayatımın en güzel renkleri olan minik kızlarım Deniz Ada ve Kumsal Maya'ya sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Onlar, neşem, umudum ve hayata dair en büyük motivasyon kaynağım.

İşimde ve hayatımda daha iyisini hedeflerken, geleceğe güvenle bakmaya, güzel günler için çalışmaya ve hayattan keyif almayı unutmamaya devam edeceğim. Bu süreçte bana katkı sunan, destek olan herkese içtenlikle teşekkür ederim.

Melih KIRIMLIOĞLU

2025

ÖZET

RT20 FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİ İLE DOLDURULMUŞ BİR KONUT DUVARININ ISIL PERFORMANSININ İNCELEMESİ

Bu çalışma, faz değiştiren malzemeler (FDM) ile doldurulmuş yalıtımlı konut duvarlarının termal performansını incelemeyi amaçlamaktadır. Enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik günümüz bina sektöründe önemli bir konu haline gelmiştir ve FDM'lerin binalarda kullanımı enerji verimliliğini artırmak için umut verici bir çözüm sunmaktadır. FDM'ler, faz değişimi sırasında ısıyı emerek veya serbest bırakarak bina iç sıcaklıklarını dengeleyebilir ve böylece enerji tüketimini azaltabilir.

Bu çalışmada, FDM'lerin bina duvarlarındaki farklı konumlarının sistemin termal performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında üç farklı konfigürasyon analiz edilmiştir. Bunlar, FDM'nin iç sıva ile tuğlalar arasına yerleştirildiği (FDM-1), yalıtım malzemesi içerisine yerleştirildiği (FDM-2) ve dış sıva ile yalıtım arasına yerleştirildiği (FDM-3) durumlardır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımıyla sayısal analizlerle bu konfigürasyonların enerji tasarrufu ve ısı kaybı azaltımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, FDM-1 konfigürasyonunun en düşük hacim ortalamalı sıcaklık değerlerine ve en düşük ısı kaybına sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum, FDM'nin iç sıva ile tuğlalar arasında yer aldığı konumda daha etkili termal enerji depolama sağladığını ve ısı akışını azalttığını ortaya koymuştur. Buna karşın, FDM'nin dış sıva ile yalıtım arasına yerleştirildiği FDM-3 konfigürasyonunda ise sınırlı bir fayda sağlanmıştır. Bu durum, dış sıvanın yüksek termal iletkenliğinin FDM'nin termal performansını olumsuz etkilediğini göstermiştir.

Sonuç olarak, faz değişim malzemelerinin bina duvarlarında kullanımı, enerji verimliliğini artırma ve ısı kaybını azaltma potansiyeli taşımaktadır. Ancak, bu malzemelerin maksimum verimle çalışabilmesi için stratejik bir yerleşim planlaması gereklidir. Bu tez çalışması, FDM'nin bina duvarlarında optimum konumunun belirlenmesine ve sürdürülebilir yapı tasarımlarına katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Faz Değiştiren Malzemeler, Termal Performans, Yalıtımlı Duvarlar, Enerji Verimliliği, Bina Enerji Tasarrufu.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THERMAL PERFORMANCE OF A RESIDENTIAL WALL FILLED WITH RT20 PHASE CHANGE MATERIAL

This study aims to investigate the thermal performance of insulated residential walls filled with phase change materials (PCM). Energy saving and sustainability have become an important issue in today's building industry and the use of PCMs in buildings offers a promising solution to increase energy efficiency. PCMs can balance the internal building temperatures by absorbing or releasing heat during phase change and thus reduce energy consumption.

In this study, the effects of different locations of PCMs in building walls on the thermal performance of the system were investigated. Three different configurations were analyzed within the scope of the study. These are cases where PCM is placed between the internal plaster and bricks (PCM-1), placed inside the insulation material (PCM-2) and placed between the external plaster and insulation (PCM-3). The effects of these configurations on energy saving and heat loss reduction were evaluated by numerical analysis with computational fluid dynamics approach.

The obtained results showed that PCM-1 configuration has the lowest volume average temperature values and the lowest heat loss. This situation has shown that PCM provides more effective thermal energy storage and reduces heat flow when it is located between the interior plaster and the bricks. On the other hand, limited benefit was achieved in the PCM-3 configuration where PCM was placed between the exterior plaster and the insulation. This situation has shown that the high thermal conductivity of the exterior plaster negatively affects the thermal performance of PCM.

As a result, the use of phase change materials in building walls has the potential to increase energy efficiency and reduce heat loss. However, a strategic layout planning is required for these materials to work with maximum efficiency. This thesis aims to determine the optimum location of PCM in building walls and contribute to sustainable building designs.

Keywords: Phase Change Materials, Thermal Performance, Insulated Walls, Energy Efficiency, Building Energy Savings.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	7
2.1. Faz Değiştiren Malzemeler (FDM)	7
2.1.1. Çalışma Prensibi.....	8
2.1.2. Faz Değiştiren Malzeme Türleri	8
2.1.3. Faz Değiştiren Malzemelerin Uygulamaları	11
2.1.4. Faz Değiştiren Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	12
2.2. Bina Uygulamalarında FDM Entegrasyonu	13
2.3. Yapı Malzemelerinde FDM Kullanımı	15
2.3.1. FDM Tabanlı Köpük Beton.....	15
2.3.2. Beton	16
2.3.3. FDM Tabanlı Çimento Sıva	16
2.3.4. FDM Alçıpan Levhalar	17
2.3.5. FDM Tuğlalar	18
2.3.6. FDM’li Kaplama Malzemeleri	18
2.4. Sayısal Model	19
2.4.1. Malzeme Özellikleri	20
2.4.2. Yürütücü Denklemler	22
2.4.3. Ağ Yapısı ve Doğrulama Çalışması	23
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	26
3.1. Kompozit Duvar İçindeki Sıcaklık Dağılımı	26

3.2. Faz Değişim Malzemesi İçindeki Sıvı Oranı	29
3.3. Kompozit Duvar İçin Sıcaklık Konturları	30
3.4. Kompozit Duvar Bileşenlerinin Hacim Ortalamalı Sıcaklıkları.....	33
4. SONUÇ.....	35
KAYNAKÇA	37



TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Yaygın olarak kullanılan hidrat tuzlarının termal özellikleri.....	10
Tablo 2.2. Organik ve inorganik FDM'ler arasındaki karşılaştırma.....	11
Tablo 2.3. FDM'nin karma duvar içerisinde yerleştirildiği farklı durumların tanımları.....	20
Tablo 2.4. FDM'nin (RT20 parafin) termo-fiziksel özellikleri	21
Tablo 2.5. Kompozit duvardaki katı malzemelerin özellikleri	21
Tablo 2.6. Ağ bağımsızlık analizleri sonucunda elde edilen değerler	24
Tablo 3.1. Karma duvar bileşenlerinin hacim ortalamalı sıcaklıkları	33
Tablo 3.2. Depolanmış termal enerjinin bir ölçüsü olarak kompozit duvar bileşenlerinin özgül enerjileri (değerler J/kg cinsinden).....	33

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Faz değıştiren malzemeler için duyulur ve gizli ısı grafiğı	8
Şekil 2.2. Kapsüllü faz değıştiren malzeme (FDM) ile doldurulmuş delikli tuğla	12
Şekil 2.3. Bir BioFDM'nin duvar zarfına tipik entegrasyonu	14
Şekil 2.4. İncelenen kompozit duvarın kesit görünümü (FDM-1 durumu için)	19
Şekil 2.5. Sayısal çözümlerde kullanılan ağ yapısı (Mesh-2)	25
Şekil 3.1. FDM olmadan karma duvar içindeki sıcaklık değışimi ($x=0$ m iç taraf, $x=0,24$ m dış taraf anlamına gelir)	26
Şekil 3.2. FDM-1 durumu için karma duvar içindeki sıcaklık değışimi ($x=0$ m iç taraf, $x=0,26$ m dış taraf anlamına gelir)	27
Şekil 3.3. FDM-2 durumu için karma duvar içindeki sıcaklık değışimi ($x=0$ m iç taraf, $x=0,26$ m dış taraf anlamına gelir)	28
Şekil 3.4. FDM-3 durumu için karma duvar içindeki sıcaklık değışimi ($x=0$ m iç taraf, $x=0,26$ m dış taraf anlamına gelir)	29
Şekil 3.5. FDM-1 durumu için çeşitli zamanlarda FDM içindeki sıvı oranı konturları.....	30
Şekil 3.6. FDM'nin olmadığı durumda çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları	31
Şekil 3.7. FDM-1 durumu için çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları	31
Şekil 3.8. FDM-2 durumu için çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları	32
Şekil 3.9. FDM-3 durumu için çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları	32

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

A	: Isı transferinin gerçekleştiği yüzey alanı
c_p	: Özgül ısı
h	: Entalpi
k	: Isı iletim katsayısı
L	: Duvar kalınlığı
p	: Basınç
S_h	: Hacimsel ısı kaynağı
t	: Zaman
T	: Malzeme sıcaklığı
T_1, T_2	: Sistemin her bir tarafındaki sıcaklıklar
$T_{dış}$	: Dış duvar yüzey sıcaklığı
$T_{dış_sıva}$	: Dış sıvanın hacim ortalamalı sıcaklığı
T_{FDM}	: FDM'nin hacim ortalamalı sıcaklığı
$T_{iç}$	: İç duvar yüzey sıcaklığı
$T_{iç_sıva}$	: İç sıvanın hacim ortalamalı sıcaklığı
T_{ref}	: Referans sıcaklığı
$T_{tuğlalar}$	: Tuğlaların hacim ortalamalı sıcaklığı
$T_{yalıtım}$	: Yalıtım malzemesinin hacim ortalamalı sıcaklığı
u	: x yönündeki hız bileşeni
v	: y yönündeki hız bileşeni
$\vec{v}$	: Hız vektörü
x, y	: Kartezyen koordinatlar
ρ	: Yoğunluk
ν	: Kinematic viskozite

$q''_{dış}$: Dış yüzeyden ortama gerçekleşen ısı akısı

$\dot{Q}_{duvar}$: Duvar üzerinden gerçekleşen ısı akısı

∇ : Türev operatörü

∇T : Sıcaklık farkı

ABD : Amerika Birleşik Devletleri

FDM : Faz Değiştiren Malzemeler

HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

RAM : Random Access Memory

TRNSYS : Transient System Simulation Tool

XPS : Extruded Polystyrene

1. GİRİŞ

Enerji verimliliği ve sürdürülebilir bina tasarımları, günümüzün en önemli araştırma konularından biri haline gelmiştir. Artan enerji tüketimi ve sınırlı fosil yakıt kaynakları, bina sektöründe enerji tasarrufuna yönelik çözüm arayışlarının ön plana çıkmasına neden olmuştur. Konut binaları, global olarak toplam enerji tüketiminin yaklaşık olarak %30'undan sorumlu olduğundan, bu binalarda enerji verimliliğini artırmak için etkili yöntemlerin belirlenmesi büyük bir önem taşımaktadır (Nejat vd., 2015).

Binalar öncelikle ısıtma, havalandırma ve klima sistemleri nedeniyle küresel enerji tüketiminin önemli bir kısmından sorumludur. Enerji kullanımını en aza indirirken kullanıcıların termal konforunu sağlamak, bina tasarımı ve işletmesinde kritik bir zorluktur. Binalarda termal konfor ve enerji verimliliği arasındaki etkileşimin incelenmesi ve her iki yönün de optimize edilmesi için stratejiler araştırılmaktadır. Sürdürülebilir bina uygulamaları arayışında, konut yapılarının termal performansı kritik bir araştırma ve inovasyon alanı haline gelmiştir. Binalardaki enerji tüketimi küresel enerji kullanımının önemli bir bölümünü oluşturduğundan, termal yalıtım sistemlerinin optimize edilmesi enerji verimliliğini artırmak ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için esastır (Kalhor ve Emaminejad, 2020).

Binalarda enerji verimliliğini artırmak için birçok yöntem kullanılmakta olup, bu yöntemlerden biri de faz değiştiren malzemelerin (FDM) kullanımudur (Derradji vd., 2017). FDM'ler, belirli bir sıcaklık aralığında faz değişikliğine uğrayarak ısıyı depolama ve salma kapasitesine sahip yenilikçi malzemelerdir. Bu özellikleri sayesinde FDM'ler, bina duvarlarında kullanıldıklarında, iç mekan sıcaklığını dengeleyerek enerji tüketimini azaltma potansiyeline sahiptir (Farid vd., 2004). FDM'lerin, bina duvarları içerisinde farklı konumlarda uygulanması, bu malzemelerin enerji tasarrufu üzerindeki etkisini önemli ölçüde değiştirir (Jin vd., 2016). Bu nedenle, FDM'lerin duvar içi konumunun bina duvarlarının ısıl performansı üzerindeki rolünün detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, sıklıkla karşılaşılabilecek iklim koşullarına maruz bırakılmış ve FDM ile doldurulmuş yalıtımlı bir konut karma duvarının ısı transferi performansı değerlendirilecektir. Çalışmanın temel amacı, FDM'lerin duvar iç yapısındaki farklı konumlarda kullanılmasının konut duvarının ısı transferi performansına etkilerini analiz etmek ve bu alandaki bilgi birikimine katkı sağlamaktır.

FDM'lerin konumlandırılması, kullanıldıkları yapıların ve kendilerinin termal performanslarını önemli ölçüde etkileyebilir. Isı transfer oranları ve genel enerji verimliliklerine

FDM konumlandırmasının etkisi oldukça fazladır (Lamrani vd., 2021). Önceki çalışmalar, FDM'lerin etkinliğinin büyük ölçüde yerleşimlerine bağlı olduğunu göstermiştir, çünkü konum, faz geçişleri sırasında ısıнын emilme veya salınma oranını etkileyebilir (Li ve Chen, 2019). Örneğin, FDM'leri duvarların dış yüzeyine daha yakın yerleştirmek, iklimsel olarak yüksek sıcaklık dönemlerinde ısı emilimini artırabilirken, iç mekanlara yakın konumlandırmalar daha soğuk iklim koşullarında daha etkili ısı salınımını kolaylaştırabilir (Rathore vd., 2022; Sharma vd., 2009).

Islam ve Ahmed (2021), sıcaklık dalgalanmalarını azaltmak için bina duvarlarında FDM olarak sodyum sülfat dekahidrat kullanmanın etkinliğini araştırdı. Araştırmacılar, özellikle kapsüllendiklerinde FDM'lerin, ısı kaynakları ve dış sıcaklık değişikliklerinin varlığında bile iç mekan sıcaklık değişimlerini önemli ölçüde azaltabileceğini gösterdiler. Faraj vd. (2022), binalarda termal enerji depolama için FDM'lerin kullanımını inceleyerek mevcut deneysel prototiplerin sınırlamalarını vurguladılar. Araştırmacılar, FDM entegrasyonunu optimize etmeyi ve net sıfır enerjili binalara katkıda bulunmayı amaçlayan çeşitli FDM yapılandırmalarına ve uygulamalarına izin veren yeni, çok yönlü bir prototip tasarımı önerdiler.

Refahi vd. (2024), Tahran'daki bir konut binasının dış duvarlarında çift katmanlı FDM duvar levhalarının termal performansını iyileştirmek için optimum konumlandırmayı araştırdılar. FDM olarak RT18 ve RT28 kullandılar ve simülasyon sonuçlarıyla, FDM duvar levhalarının ve yalıtım katmanlarının düzenlenmesinin enerji tüketimini önemli ölçüde etkilediğini, ısıtma ve soğutma gereksinimlerine göre farklı katlar için farklı optimum yapılandırmaların belirlendiğini gösterdiler.

Abdel-Mawla vd. (2022), Mısır'ın Kahire kenti gibi sıcak ve kuru bir iklimde enerji verimliliği için termal olarak aktive edilen bina sistemlerine FDM'leri entegre etmenin optimum yolunu araştırdılar. Dört konfigürasyonu karşılaştırmak için dinamik simülasyonlar kullandılar ve aktive edilmiş döşemeye (tavan veya zemin) göre FDM katmanlarının yerleşimine odaklandılar. Sonuçlar, özellikle radyant tavanlarda FDM'lerin dahil edilmesinin sırasıyla %18,80 ve %19,78'e varan önemli enerji ve maliyet tasarruflarına yol açtığını gösterdi. En uygun maliyetli tasarımda, tavana entegre edilmiş 22°C erime noktasına sahip 6 cm kalınlığında bir FDM katmanı kullanılmıştır. FDM'ler termal atalet nedeniyle konforlu saatlerin yüzdesini biraz azaltırken, genel olarak daha istikrarlı bir iç mekan termal konforu sağlamışlardır.

Anter vd. (2023), FDM malzemesi olarak RT-35HC'nin bina duvarlarında iç ve dış duvar yüzeylerinden 1,5 cm uzağa yerleştirilmesi ile termal performansın önemli ölçüde

iyileştirilebildiğini göstermişlerdir. Bu uygulama ile yaz boyunca toplam enerji kazanımında %66 oranında azalma sağlamışlardır.

Liu vd. (2020), yapısal yalıtımlı panel ile kullanılan FDM'nin tam potansiyeline ulaşmak için sayısal simülasyon yöntemine dayalı olarak, FDM konumunun ve kalınlığının konut binalarının dış duvarının dinamik termal özellikleri üzerindeki etkilerini araştırdılar. Çalışmalarında sonlu farklar yöntemini kullanarak faz değişim duvarının özgül ısı matematiksel modelini çıkarmışlar ve tipik yaz ve kış aylarındaki hava koşullarını sınır koşulları olarak tanımlamışlardır. Analizler neticesinde optimum duvar içi FDM kalınlığı olarak 0,04 m önermişlerdir.

Yüksek katlı binalarda bina ağırlığını azaltmak için genellikle hafif malzemeler kullanılır, ancak bunların ısıl ataleti, klima ve ısıtma yükündeki dalgalanmayı arttırmakta ve iç mekan ısıl konforunu azaltmaktadır. Hafif malzemeli duvarlardaki bu dezavantaj, FDM kullanılarak önlenabilir ancak FDM'nin duvar içi konumu oldukça önemlidir. Liu vd. (2024) bu sorunu ele aldıkları sayısal incelemelerinde, FDM katmanının iç tarafa yerleştirilmesi, FDM katmanının dış tarafa yerleştirilmesi ve FDM'nin köpük betona eşit şekilde dağıtılmasıyla karşılaştırıldığında, zayıflama faktörünü sırasıyla %101,25 ve %33,87 oranında düşürebildiğini, gecikme süresini sırasıyla %40,00 ve %17,14 oranında arttırabildiğini ve pik ısı akışını sırasıyla %47,69 ve %17,28 oranında azaltabildiğini göstermişlerdir.

Sayısal incelemelere ek olarak deneysel olarak da araştırmalar süregelmektedir. Örneğin, Gounni vd. (2018), FDM duvar panellerinin potansiyelini, laboratuvar koşullarında FDM'li veya FDM'siz duvarlar içeren ısıtılmış ve küçültülmüş ölçekli bir boşluk kullanarak deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Azaltılmış ölçekteki boşluk, çoğu duvar yapısının gerçek zamanlı olarak test edilmesine olanak tanımış ve test duvarlarının daha hızlı monte edilip sökülmesine sağlamıştır. Duvarların içindeki üç farklı FDM katman konumu, ısı akışı azalması ve dış yüzey sıcaklıkları açısından incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, FDM katmanının referans duvara (FDM'siz duvar) kıyasla en yüksek ısı akışını azalttığı doğrulanmıştır. Gerçekten de, FDM katmanı, ısı kaynağına yakın, duvarların iç yüzüne yerleştirildiğinde en yüksek ısı akışını büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu konumda, referans duvara kıyasla tepe ısı akışı azalması %32,9'dur.

Sun vd. (2022), pasif alan soğutması için FDM katmanıyla donatılmış bir bina duvarının termal tepkisi üzerine parametrik bir çalışma sunmuşlardır. Bu incelemeye göre, duvar yalıtımının termal direnci arttıkça, FDM katmanının optimum konumu duvarın dış yüzeyine doğru hafifçe kaymıştır. İncelenen durumlar için, optimum FDM katman kalınlığı 7 mm olarak

verilmiştir. Alan soğutması sırasında daha iyi sonuç alabilmek için, iç hava sıcaklığı 24°C'ye ayarlandığında FDM faz geçiş sıcaklığının 27°C - 31°C aralığında olması gerektiği gözlemlenmiştir.

Hamidi vd. (2021), FDM ile doldurulmuş içi boş tuğla duvarın enerji performansını araştırmışlardır. FDM'nin davranışını, içi boş tuğlalardan oluşan çift duvardaki FDM yerleşiminin etkisini analiz ederek incelemişlerdir. Bu bağlamda, içi boş tuğlalardaki dört FDM konumu sıcak iklimli bir şehirde sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar, tüm tuğlayı doldurmak yerine seçili yerlerdeki blokları FDM ile doldurma olasılığını göstermiştir. Enerji tasarrufu açısından, tespit edilen konumlarda faz değişim malzemesi, 26°C'lik sabit bir sıcaklıkta iç termal konforu korumak için gereken enerjinin %97'sine kadar tasarruf sağlamaktadır.

Vukadinović vd. (2020) çalışmalarında, 20 cm kalınlığında betondan yapılmış, FDM içeren veya içermeyen bir güneşlenme alanına ve termal depolama duvarına sahip müstakil konut binaları analiz etmişlerdir. Çalışma, Sırbistan'daki beş lokasyonda (Niş, Belgrad, Novi Sad, Kopaonik ve Zlatibor) FDM'nin duvar içindeki türüne ve konumuna bağlı olarak bir yıl boyunca ısıtma ve soğutma enerjisi tüketimi açısından binaların performansına odaklanmaktadır. Gözlemlenen lokasyonlar, ılıman sıcak ve nemli iklime sahip kentsel alanlar veya nemli boreal (kuzey rüzgarı sebebiyle soğuk ve dondurucu) iklime sahip dağlık turizm merkezlerinde bulunmaktadır. Çalışmanın sonuçları, orta duvar FDM pozisyonunun her lokasyon için en verimli olduğunu göstermiştir. Diğer durumlar ile karşılaştırıldığında, orta duvar FDM pozisyonuna sahip olan konfigürasyon için toplam enerji gereksinimi Niş'te %2,37, Belgrad'da %2,41, Novi Sad'da %2,14, Kopaonik'te %1,06 ve Zlatibor'da %1,77 daha düşük bulunmuştur.

Bir başka deneysel çalışmada iki taraflı yapay bir ortamda FDM ve normal duvarları aynı anda test etmek için yeni bir cihaz tasarlanmıştır (Tian vd., 2021). Buradaki yaklaşımla, bu tür duvarlar ayrı ayrı test edildiğinde oluşabilecek hatalardan kaçınmak amaçlanmıştır. Tuğla duvarlar, duvarın dışında, ortasında (sandviç) veya içinde bir FDM tabakası ile inşa edilmiştir. Duvarın bir tarafı yaz dış koşullarını simüle etmek için dalgalanan bir hava sıcaklığına tabi tutulurken, diğer tarafı iç mekan klimalı koşullarını simüle etmek için sabit bir sıcaklığa tabi tutulmuştur. Duvarların çeşitli yerlerine yerleştirilen sensörler ve test aparatı kullanılarak sıcaklık dağılımı ve yüzey ısı akış yoğunluğu gibi özellikler test edilmiştir. Dış yüzeyinde FDM tabakası olan duvar en iyi yalıtım performansını göstermiştir. Sıradan bir duvarla karşılaştırıldığında, iç yüzeyinin maksimum sıcaklığı 0,2°C daha düşük, yüzey ısı akış yoğunluğu %19,6 daha düşük, ortalama ısı transfer katsayısı %19,94 daha düşük ve sıcaklık

gecikme süresi 1,33 saat daha uzundur. Bu çalışmanın sonuçları, bina duvarlarında FDM katmanlarının optimum konumlarının belirlenmesi için bir temel oluşturmuştur.

Khan vd. (2020), FDM'nin bir bina duvarındaki ısı transfer oranı üzerindeki etkisini ve FDM'nin binanın iç mekan termal konforu üzerindeki rolünü araştırmışlardır. Bu deneysel çalışma için iki bina duvarı parçası modeli geliştirilmiştir. Bir modelde, FDM katmanının duvar içindeki optimum konumunu belirlemek için bina duvarındaki farklı konumlarda testler yürütülmüştür. Başka bir modelde, FDM'nin bina duvar parçasındaki ısı transfer oranı üzerindeki rolünü araştırmak için FDM, hava boşluğu ve diğer geleneksel yapı malzemelerini (tuğla hamuru ve kum) birer birer entegre ederek testler yürütülmüştür. Sonuçlar, FDM katmanının ısı kaynağına daha yakın yerleştirilmesinin, ısı emiciye yakın FDM katmanına kıyasla soğuk su banyosunun (iç mekan durumu) düşük sıcaklık kazanımı sağladığını göstermektedir. FDM ile, bina duvar parçasının soğuk su banyosunun (iç mekan durumu) sıcaklık artışı en düşüktür ve soğuk su banyosunun sıcaklık artışının eğimi zamanla daha sabit hale gelmiştir. Bir başka ifadeyle daha az sıcaklık dalgalanması olmuştur. Soğuk su banyosunun belirli bir sıcaklığa ulaşması için önemli bir zaman gecikmesi vardır. Soğuk su banyosunun sıcaklığındaki birim derecelik artış için gereken ısı daha yüksektir ve duvarın en yüksek ısı akısı diğer yapı malzemelerine göre daha düşük çıkmıştır.

Al-Absi vd. (2020), FDM katmanlarının bina duvarları içindeki optimum konumlarını ve bu tip problemlerdeki etkili parametreleri bulmak için bina duvarları içindeki farklı konumlarda FDM'lerin uygulamasını inceleyen ilgili literatürü gözden geçirmişlerdir. FDM'lerin optimum konumlarının, ertesi güne hazır olmak için günlük tam bir erime/donma döngüsü gerçekleştirmeye büyük ölçüde bağlı olduğunu bulmuşlardır. İklim ve hava koşulları, uygulama hedefi, FDM'lerin erime sıcaklığı ve füzyon ısısı, FDM'lerin miktarı, duvar malzemelerinin termal özellikleri, mekanik ısıtma/soğutma veya serbest çalışan bir iç ortam ve duvar yönü dahil olmak üzere birçok parametrenin bu durumu etkilediği literatürde belirtilmiştir. FDM'lerin optimum konumunun belirlenebilmesi için simülasyon araçları kullanılarak optimizasyon süreçlerinin yürütülmesinin önemi bu çalışmada bir kez daha vurgulanmıştır.

Literatürde bu alanda yapılan çalışmalar incelendiğinde, FDM'lerin bina duvarları içerisinde kullanılmaları durumunda, ısı performansını etkileyebilecek birçok etkenin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu alanda yapılacak çalışmalar, güncel enerji politikaları ve hedefleri penceresinden de bakıldığında, araştırmacıların ilgisini ve motivasyonunu çekmeye devam edecektir.

Bu motivasyonla, bu tez çalışmasında da, yalıtımlı duvarlardaki çeşitli FDM yapılandırmalarını analiz ederek konut uygulamaları için termal performansı optimize etmeye yönelik içgörüler sağlanması amaçlanmaktadır. Araştırma, kullanılan FDM türü, karma duvar yapısı ve çevresel koşullar gibi farklı faktörleri ele alarak bu değişkenlerin genel bina performansını etkilemek üzere nasıl etkileşime girdiğini araştıracaktır.

Bu çalışmada ayrıca, konut duvarı olarak kullanılan tipik karma duvar yapısındaki bileşenlerin ısı performansları ayrı ayrı da ele alınacaktır. Bu bağlamda, karma duvar içerisinde bulunan iç ve dış sıvalar, tuğla yapıları ve kullanılan yalıtım malzemeleri ile kalınlıkları da incelenecektir. FDM'nin bu karma duvar içerisinde hangi aralıkta konumlandırıldığı ve bu konumlandırmaya istinaden hem karma duvarın genel ısı transferi kabiliyeti üzerindeki etkisi hem de tek tek karma duvar içindeki diğer elemanların ısı transferi üzerindeki etkileri incelenecektir.

Bu kapsamda, çalışmada öncelikle faz değiştiren malzemeler ve uygulama alanlarıyla ilgili literatür taraması yapılacak ve mevcut araştırma eksiklikleri tespit edilecektir. Sonrasında, FDM'lerin termofiziksel özellikleri ve binalarda enerji verimliliğini artırma potansiyelleri ele alınacaktır. Son olarak, bu tezde hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yoluyla FDM'lerin duvar içerisindeki konumunun, duvarların ısı transferi performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenecek ve elde edilen bulgular çerçevesinde çözümler sunulacaktır.

Bu tez çalışmasının sonucunda, faz değiştiren malzemelerin bina duvarlarında verimli şekilde kullanılmasına yönelik öneriler geliştirilecek ve bu yöntemlerin enerji tasarrufu açısından potansiyel faydaları ortaya konulacaktır. Bu sayede, bina enerji performansının iyileştirilmesi ve sürdürülebilir yapı tasarımlarına katkı sağlanması hedeflenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında, faz değıştiren malzemelerin (FDM) yalıtımlı konut duvarlarının termal performansı üzerindeki etkilerini değerdendirmek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiğine (HAD) dayanan sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda öncelikle faz değıştiren malzemeler ile ilgili bilgi verilecektir.

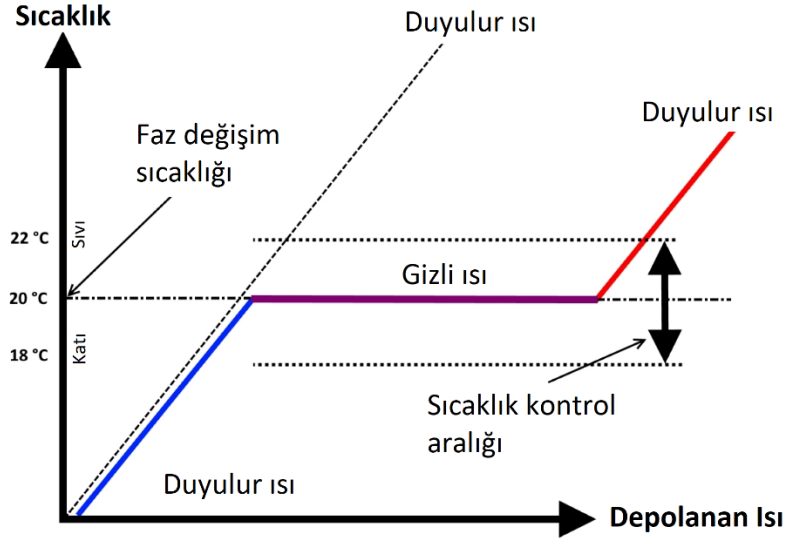
2.1. Faz Değıştiren Malzemeler (FDM)

Faz değıştiren malzemeler (FDM), belirli bir sıcaklık aralığında faz değıştirerek ısıyı depolama ve serbest bırakma yeteneğine sahip özel malzemelerdir (Raoux, 2009). Bu malzemeler, katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya faz değışimi sırasında büyük miktarda gizli ısı depolayabilir. FDM'lerin temel prensibi, belirli bir sıcaklıkta erime veya donma sürecinde enerjiyi absorbe etmek veya salmaktır. Çevre sıcaklığı arttığında, FDM'ler katıdan sıvıya geçerken ısıyı emer ve böylece çevredeki ortamdaki sıcaklık artışını azaltır. Tersine, sıcaklık düştüğünde, ise FDM'ler katılaşıırken depolanan ısıyı serbest bırakarak sabit bir iç mekan sıcaklığının korunmasına yardımcı olur. Bu özellikleri sayesinde FDM'ler, termal enerji depolama sistemlerinde ve binalarda ısı dengeleme amacıyla kullanılmaktadır (Pielichowska ve Pielichowska, 2014).

Malzemeler genellikle katı, sıvı veya gaz olarak sınıflandırılırlar. FDM'ler farklı faz dönüşüm yöntemleri gösterebilirler. Örneğin, katıdan sıvıya, sıvıdan gaza vb. dönüşebilirler. FDM'ler bu faz dönüşümünü geçirdiğinde gizli ısı açığa çıkar. Gizli ısı, duyulur ısıya kıyasla önemli ölçüde daha yüksektir. Suyun faz değışim ısısı, 25°C'de 2441 kJ/kg'dır. Bu değır, suyun 10°C çalışma aralığında sahip olduğu duyulur ısı depolama kapasitesinin 50 katından fazladır. Bu özellik, FDM'leri çeşitli uygulamalar için kompakt bir enerji depolama çözümü haline getirir. Bu uygulamalar konut, ticari, kurumsal veya endüstriyel alanlarda olabilir.

FDM'ler avantajlı termal özelliklere sahiptir; ancak tarihçeleri 1900'lü yılların başlarına dayanmaktadır. FDM'lerin çoğu o dönemde keşfedilmiş olmasına rağmen, uygulama alanları oldukça sınırlıydı. 1980'lerden itibaren FDM'ler ve uygulamaları üzerine birçok araştırma rapor edilmiştir (Abhat, 1983). Son birkaç on yılda FDM'ler üzerine yapılan araştırmaların sayısı üstel bir şekilde hızla artmaktadır.

FDM'lerde farklı faz dönüşümleri rapor edilmiştir. Bu dönüşümler katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz şeklinde olabilir. En yaygın olanı, dönüşümün katıdan sıvıya gerçekleştiği erime sürecidir. Bunun tersi ise katılaşma sırasında meydana gelir.



Şekil 2.1. Faz değıştiren malzemeler için duyulur ve gizli ısı grafiğı

2.1.1. Çalışma Prensipleri

FDM'ler faz geçişleriyle ilişkili enerjiden yararlanır. Bir FDM ısıyı emdiğinde, katıdan sıvıya erir ve enerjiyi gizli ısı olarak depolar. Tersine, ısıyı serbest bıraktığında, sıvıdan katıya katılaşıp ve depolanan enerjiyi serbest bırakır. Bu süreç, FDM'lerin faz değışimini sırasında nispeten sabit bir sıcaklığı korumasını ve sıcaklık dalgalanmalarına karşı etkili bir şekilde tampon oluşturmalarını sağlar.

Şekil 2.1'de bir FDM için duyulur ve gizli ısı ifadelerini içeren grafik görülmektedir. Bu grafikte x-ekseni malzeme üzerinde depolanan ısıyı, y-ekseni ise malzemenin sıcaklığını belirtmektedir. Normalde malzemelerin depoladıkları ısı arttıkça sıcaklıkları da artmaktadır. FDM'lerde ise belirli sıcaklık aralıklarında malzeme üzerinde ısı depolanmaya devam etse de sıcaklığında bir değışim gözlenmez. Bu bölgeye faz değışim bölgesi denmektedir. Sıcaklığın sabit kaldığı bölgede depolanan ısıya gizli ısı denirken, sıcaklık değışiminin gözlemlendiği bölgelerde depolanan ısıya duyulur veya ölçülebilen ısı denmektedir (Mazman, 2006).

2.1.2. Faz Değıştiren Malzeme Türleri

Faz değıştiren malzemeler kimyasal bileşimlerine göre genel olarak organik, inorganik ve ötektik olarak üç türe ayrılırlar.

Organik FDM'ler (örneğin parafin mumu, yağ asitleri) yüksek gizli ısı kapasiteleri, kararlılıkları ve aşındırıcı olmayan özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılır. Ayrıca nispeten düşük bir erime noktasına sahiptirler ve bu da onları konut binalarındaki uygulamalar için uygun hale getirir (Shukla vd., 2008).

Fiyatları, karşılık gelen inorganik FDM'lerin fiyatlarından daha yüksektir. Parafinler, farklı yağların rafine edilmesiyle elde edilen bir ürün olarak hazırlanır. Bu durum onları bol miktarda bulunabilir kılar; ancak yine de pahalıdırlar. Fiyatları kilogram başına 2 ABD dolarına kadar çıkabilir. Parafin türleri, karbon atomu zincirlerinden oluşur. Karbon zinciri uzadıkça erime sıcaklığı artar. Ancak, faz değişiminde açığa çıkan gizli ısı bu korelasyonu takip etmez.

Yağ asitleri, organik FDM'lerin bir diğer ana kategorisidir. Erime sıcaklıkları 16°C ile 65°C arasında değişen bir asit ailesinden oluşurlar. Fiyatları da yüksektir; ancak parafinler kadar pahalı değildirler. Bir kilogram stearik asit yaklaşık 1,5 ABD dolarıdır (Ali, 2024).

Organik FDM'ler birçok avantaja sahiptir. Yüksek kimyasal kararlılığa sahiptirler. Ayrıca toksik değildirler, korozyif özellik göstermezler ve yangına dayanıklıdırlar. Bu özellikler, kapsüllenmelerini ve kullanım süreçlerini kolaylaştırır. Organik malzemelerde faz değişimi gerçekleştiğinde, hacimlerinde yalnızca küçük bir değişim meydana gelir, bu da kapsülleme boyutlandırmasını basitleştirir. Yağ asitleri doğal hammaddelerden elde edilir. İki veya daha fazla yağ asidinin karıştırılması, istenen erime sıcaklığını değiştirebilir. Doğal kökenli olmaları, karbon dioksit emisyonlarını azaltarak çevresel etkilerini minimize etmeye yardımcı olur.

Organik FDM'lerin en büyük dezavantajı, inorganiklere kıyasla düşük termal iletkenliğe sahip olmalarıdır. Çoğu uygulamada, şarj ve deşarj süreleri sınırlıdır. Düşük termal iletkenlik, FDM'nin yalnızca kısmen erimesine veya katılaşmasına neden olabilir. Bu da faz değişiminin tam olarak kullanılmasını engelleyebilir. Bu durumu azaltmak için saf FDM'ye bazı nanopartiküller eklenebilir. Ancak, bu işlem FDM'nin orijinal özelliklerini değiştirebilir.

İnorganik FDM'ler (örneğin tuz hidratları, metalikler) organik FDM'lerden daha yüksek termal iletkenliğe ve gizli ısı kapasitesine sahip olma eğilimindedirler. Ancak faz ayrımı ve aşırı soğutma sorunları yaşayabilirler. Genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar (Junaid vd., 2021).

Hidrat tuzları, su ve inorganik tuzların bir karışımıdır. Faz geçişi gerçekleştiğinde, hidrat tuz kristalleri suya ve daha az sulu tuzlara ayrışır. Metaller ise, inorganik FDM'lerin ikinci büyük kategorisidir. Yüksek termal iletkenlik gibi avantajlı termal özelliklere sahiptirler. Faz değişim sıcaklıkları geniş bir aralığa yayılmıştır, bu da onları yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun hale getirir. Galyum, indiyum ve sezyum gibi metaller düşük sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirken, magnezyum, alüminyum ve çinko yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. 400–1000°C arasındaki yüksek sıcaklıklara dayanabilen metal alaşımları ise aşırı yüksek sıcaklık sistemlerinde kullanılırlar (Salunkhe ve Shembekar, 2012). Yaygın olarak

kullanılan hidrat tuzlarının termal özellikleri Tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1. Yaygın olarak kullanılan hidrat tuzlarının termal özellikleri

Hidrat tuzu	Kimyasal formülü	Erime sıcaklığı (°C)	Erime ısısı (kJ/kg)
Kalsiyum klorür hekzahidrat	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	170
Sodyum sülfat dekahidrat	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32.4	239
Sodyum hidrojen fosfat dodekahidrat	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	36.5	279
Çinko nitrat hekzahidrat	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	36.4	147
Demir (III) klorür hekzahidrat	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	37	186.2
Kalsiyum klorür tetrahidrat	$\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	44.2	99.6
Kalsiyum nitrat tetrahidrat	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	47	142
Sodyum tiyosülfat pentahidrat	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48	206
Sodyum asetat trihidrat	$\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58	252

Kaynak: (Ushak vd., 2016)

İnorganik FDM'ler genellikle organiklere kıyasla daha yüksek faz değişim sıcaklıklarına sahiptir. Bu özellik, onları yüksek sıcaklık uygulamaları için daha uygun hale getirir. Ayrıca birçok başka avantaja da sahiptirler. Daha yüksek gizli ısı değerine sahip oldukları için yüksek depolama potansiyeline sahiptirler. Organik FDM'lere kıyasla piyasada daha düşük fiyatlarla bulunabilirler. Bunun yanı sıra, organik FDM'lerin aksine düşük termal iletkenlik dezavantajına sahip değildirler.

Öte yandan, inorganik FDM'lerin çeşitli dezavantajları da vardır. Faz dönüşümü sırasında büyük hacim değişiklikleri gösterirler, bu da kapsülleme boyutlandırmasını zorlaştırır. Ayrıca yüksek derecede faz ayrışması ve aşırı soğuma eğilimi gösterirler. Organiklere kıyasla daha koroziv özelliklere sahiptirler.

FDM araştırmalarının çoğu, organik ve inorganiklerin kullanımına odaklanmaktadır. Farklı uygulamalara uygunluklarını değerlendirmek için, termal özellikleri su ile karşılaştırılarak incelenir. Organik FDM yoğunluğu, suyun yoğunluğunun yaklaşık %80'idir. Özgül ısı kapasitesi ise suyun karşılık gelen kapasitesinin yarısı kadardır. Faz dönüşüm ısısı ise yaklaşık 150 MJ/m³'tür. İnorganik FDM'ler, suyun yoğunluğunun neredeyse iki katına kadar çıkabilen daha yüksek yoğunluklara sahiptir. Özgül ısı kapasiteleri, organik FDM'lerin

kapasitesinden pek farklı değildir. Suyu kıyasla yaklaşık olarak yarı yarıya bir değere sahiptir. Gizli ısıları ise yüksektir ve organik FDM'lerin iki katına kadar ulaşabilir. Bu durum, FDM entegrasyonunun çoğunlukla dar sıcaklık aralıklarında uygulanabilirliğini vurgulamaktadır. Bu koşul altında, yüksek gizli ısı yüksek depolama kapasitesini yansıtır. Ancak, daha geniş bir işletme sıcaklık aralığı düşünüldüğünde, FDM entegrasyonunun faydası azalır, çünkü suyun duyulur ısı özellikleri, karşılık gelen FDM özelliklerinden çok daha iyidir (Nazir vd., 2019). Organik ve inorganik FDM'ler arasındaki temel farklılıklar Tablo 2.2'de özetlenmektedir.

Tablo 2.2. Organik ve inorganik FDM'ler arasındaki karşılaştırma

	Organik FDM'ler	İnorganik FDM'ler
Ana kategoriler	Yağ asitleri, parafinler	Tuz hidratları
Erime sıcaklığı	Düşük	Yüksek
Gizli ısı	Düşük	Yüksek
Isıl iletkenlik	Düşük	Yüksek
Fiyat	Yüksek	Düşük
Kimyasal kararlılık	Yüksek	Düşük
Koroziflik	Düşük	Yüksek
Faz değişikliği sonrasında hacim değişimi	Düşük	Yüksek
Aşırı soğutma	Düşük	Yüksek
Faz ayrımı	Düşük	Yüksek

Kaynak: (Ali, 2024)

Ötektik FDM'ler, tek bir sıcaklıkta eriyen ve donan, kararlı bir faz geçişi sağlayan organik ve inorganik bileşenlerin bir kombinasyonudur. Organik ve inorganik FDM'lerin avantajları arasında bir denge sunarlar (Sun vd., 2023).

2.1.3. Faz Değiştiren Malzemelerin Uygulamaları

Faz değiştiren malzemeler (FDM) aşağıda verilen çeşitli alanlarda uygulama bulabilirler.

Bina termal düzenlemesi: Yapı malzemelerine entegre edilen FDM'ler gün boyunca aşırı ısıyı emebilir ve geceleri serbest bırakarak ısıtma ve soğutma için enerji tüketimini azaltabilir (Pomianowski vd., 2013). Şekil 2.2'de bir delikli tuğlanın, kapsüllü FDM ile doldurulmasına örnek gösterilmiştir.

Termal enerji depolaması: FDM'ler daha sonra kullanılmak üzere güneş veya endüstriyel atık ısıdan gelen termal enerjiyi depolayabilir ve enerji verimliliğini artırabilir (Huang vd., 2019).



Şekil 2.2. Kapsüllü faz değıştiren malzeme (FDM) ile doldurulmuş delikli tuğla

Kaynak: (Kumar vd., 2020)

Elektronik soğutma: FDM'ler, çalışma sırasında oluşan aşırı ısıyı emerek elektronik cihazlarda aşırı ısınmayı önleyebilir (Krishna vd., 2017; Bondareva ve Sheremet, 2018).

Tekstiller: Giysilere entegre edilen FDM'ler vücut sıcaklığını düzenleyerek değışen hava koşullarında konforu artırabilir (Yang vd., 2022).

Bu tez çalışmasında da FDM'lerin bina duvarlarına uygulanması ile ısı performans artırımı amaçlanmaktadır. FDM'lerin binalarda kullanımı, iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak enerji tüketimini optimize etme potansiyeline sahiptir. Özellikle, FDM'ler gündüz saatlerinde fazla ısıyı depolayarak iç mekanların aşırı ısınmasını engeller ve gece saatlerinde bu ısıyı serbest bırakarak mekanın daha konforlu olmasını sağlar. Bu nedenle, faz değıştiren malzemeler, enerji verimliliğini artırmak ve yenilenebilir enerji sistemleriyle entegre edilmek üzere giderek daha fazla ilgi görmektedir. Ancak, FDM'nin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için doğru malzeme seçimi ve duvar yapısındaki yerleşim stratejisi önemlidir.

2.1.4. Faz Değıştiren Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Faz değıştiren malzemeler yukarıdaki başlıkta sayılan çeşitli uygulama alanlarındaki sistemlerin termal özelliklerini arttırsalar da dezavantajlara da sahiptirler. Bu malzemelerin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

FDM'lerin avantajları arasında; yüksek enerji depolama yoğunluğu, faz değışimi sırasında izotermal davranış, geniş erime sıcaklığı aralığı ve tekrar kullanılabilirlik vardır (Zalba vd., 2003).

FDM'lerin dezavantajları olarak ise bazı FDM'lerin pahalı olması, bazı inorganik FDM'ler için aşırı soğutmanın bir sorun olması, bazı inorganik FDM'ler için korozyon

potansiyeli, termal iletkenliğin sınırlayıcı bir faktör olması ve bazı inorganik FDM'lerin çevreye zararları sıralanabilir (Giro-Paloma vd., 2016).

2.2. Bina Uygulamalarında FDM Entegrasyonu

Faz değiştiren malzemeler, binaların termal performansını artırma yetenekleri nedeniyle son yıllarda giderek artan ilgi çekmekte ve çeşitli uygulama alanları bulmaktadır (Frigione vd., 2019). Modern bina tasarımlarındaki temel amaçlardan biri, iç ortamların termal konforunu korurken enerji tüketimini en aza indirmektir. Fiberglas, köpük veya selüloz gibi geleneksel termal yalıtım malzemeleri ısı transferini yavaşlatmada etkilidir ancak ısıyı depolama ve serbest bırakma yeteneğinden yoksundur (Jelle, 2011). FDM'ler, bina bileşenlerine entegre edildiğinde, iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını tamponlayarak bu ek işlevselliği sağlayabilir ve böylece enerji verimliliğine ve termal konfora katkıda bulunabilir (de Gracia ve Cabeza, 2015).

FDM'ler genellikle çeşitli biçimlerde bina zarflarına (duvarlar, zeminler ve tavanlar gibi) dahil edilir. FDM entegrasyonunun bazı yaygın yöntemleri arasında FDM aşılınmış sıva veya beton, FDM paneller ve FDM ile geliştirilmiş yalıtım bulunur (Santos vd., 2017).

FDM'ler, termal olarak aktif yapı bileşenleri oluşturmak için alçı, beton veya alçıpan gibi inşaat malzemeleriyle karıştırılabilir. FDM paneller, inşaat veya tadilat sırasında duvarların, zeminlerin veya tavanların bir parçası olarak monte edilebilen FDM'lerle doldurulmuş önceden üretilmiş panellerdir. Dahası, geleneksel yalıtım malzemeleri, termal kapasitelerini daha da iyileştirmek ve dinamik bir yalıtım sistemi oluşturmak için FDM'lerle birleştirilebilir (Wang vd., 2022).

Stritih vd. (2018) çalışmalarında, farklı FDM'lerle dolu bir kompozit duvarı, pasif sıfıra yakın bina uygulamalarına entegre edilmesi amacıyla TRNSYS yazılımını kullanarak geliştirmişler ve analiz etmişlerdir. Sonuçlar, duvarlardaki FDM'lerin günlük bazda bina enerji kullanımını azaltabileceğini ve gelecekte net sıfır enerjili bina hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Álvarez vd. (2013), gece soğutma havalandırmasının FDM'lere eklenmesinin, binaların soğutma talebini azaltmak için çok güçlü bir strateji olduğunu belirtmişlerdir. Araştırmalarında, FDM ile hava arasındaki temas alanını yaklaşık 3,6 kat artırarak, taşınım ile ısı transfer katsayısını önemli ölçüde arttırmışlar ve soğuk deponun gerektiğinde gerçekten kullanılmasını sağlayan aktif kontrol sistemlerinin dahil edilmesi nedeniyle kullanım faktörünü iyileştirmişlerdir.

Terhan ve Ilgar (2023) çalışmalarında, dış duvarlara farklı kalınlıklarda ve erime

sıcaklıklarında entegre edilmiş iki farklı FDM kullanılması binanın termal enerji performansına etkilerini incelemiştir. Enerji simülasyon analizlerine göre yıllık bazda en yüksek ısıtma enerjisi tasarrufunu (%21,32) sağlayan konfigürasyonu, erime sıcaklığı 21°C olan üç katmanlı BioPCM27 entegre dış duvar olarak bulmuşlardır. Yıllık ortalama optimum erime sıcaklığının, dış duvara ve malzeme tiplerine bağlı olarak 18 ile 19°C arasında değiştiğini raporlamışlardır. Ayrıca, üç katmanlı InfiniteRPCM21C konfigürasyonu ile, soğutma sezonunda %24,45 ve ısıtma sezonunda %14,76 toplam enerji tasarrufu ile tüm dış duvar tipleri arasında en iyi termal enerji performansını elde etmişlerdir.



Şekil 2.3. Bir BioFDM'nin duvar zarfına tipik entegrasyonu

Kaynak: (Baniassadi vd., 2019)

Şekil 2.3'te organik bir FDM'nin tabaka halinde gerçek bir bina duvarına entegrasyonu gösterilmektedir. Bu çalışma sonuçları, bazı koşullar altında eriyik sıcaklığının hem enerji verimliliği hem de ısı dayanıklılığı açısından optimize edilmesinin mümkün olduğunu, ancak diğer koşullar altında bir sonucun optimize edilmesinin diğerini olumsuz etkilediğini göstermiştir (Baniassadi vd., 2019).

Kishore vd. (2020), Amerika Birleşik Devletleri'ndeki binaların, bu ülkedeki toplam enerji kullanımının neredeyse yarısını oluşturduğunu belirterek, yaşam alanlarının iklimlendirilmesi için kullanılan enerjinin FDM'ler gibi termal enerji depolarının bina zarflarında kullanılması ile azaltılabileceğini önermişlerdir. Bu çalışmanın sonuçları, bina duvarlarında FDM kullanmanın her zaman bir iyileştirmeye yol açmadığını göstermiştir. Hatta, FDM'lerin yanlış uygulamaları binalarda enerji kullanımını önemli ölçüde artırabilmektedir. Bu

çalışmada incelenen iklimlerde, FDM'lerin soğutma mevsiminde ısı kazanımlarını azaltmada etkili olduğu, ancak ısıtma mevsiminde ısı kayıplarını yönetmede çoğunlukla etkisiz olduğu bulunmuştur. İklima bağlı olarak, ABD bina duvarlarındaki optimize edilmiş FDM'ler yıllık ısı kazanımında %3,5-%47,2 aralığında ve yıllık ısı kaybında -%2,8-%8,3 aralığında azalma sağlayabileceği belirtilmiştir.

FDM'lerin binalarda kullanılmaları ile ilgili kapsayıcı derleme çalışmalar literatürde mevcuttur (El Majd vd., 2024; Souayfane vd., 2016; Iten vd., 2016; Osterman vd., 2012).

Genel olarak, FDM'lerin yapı malzemelerine entegrasyonu, pasif termal yönetime yönelik ileri görüşlü bir yaklaşımı temsil eder ve enerji açısından verimli ve sürdürülebilir inşaat sektörüne katkıda bulunur. Yapı standartları ve enerji düzenlemeleri daha katı hale geldikçe, FDM'lerin, kullanıcı konforunu artırırken performans hedeflerini karşılamada giderek daha önemli bir rol oynaması muhtemeldir.

2.3. Yapı Malzemelerinde FDM Kullanımı

FDM'lerin çeşitli yapı malzemelerine entegrasyonu, farklı entegrasyon yöntemleriyle sağlanır. Yapı zarfı, ısıtma/soğutma yükü azalmasını etkileyen önemli bir yapı bileşenidir ve FDM entegrasyonu için birincil yapı olarak hizmet eder (Al-Yasiri ve Szabó, 2021). FDM katmanının konumu kritik bir rol oynar. Genellikle, katman yapı zarfının iç kısmına veya iç mekan ortamına yakın bir yere yerleştirilir. Bu bağlamda, FDM katmanları, fazla ısıнын etkili bir şekilde depolanarak iç mekanın termal konforuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Depolanan bu ısı, gerektiğinde dikkatlice yeniden kullanılabilir veya yeterli havalandırma ile dışarı atılabilir. Böyle bir süreç, yalnızca termal yükü hafifletmekle kalmaz, aynı zamanda rahatsızlık saatlerini de azaltarak genel enerji verimliliğini artırır (Amran vd., 2015).

2.3.1. FDM Tabanlı Köpük Beton

FDM tabanlı köpük beton, binaların termal depolama kapasitesini artırmak ve termal performansını optimize etmek için umut verici bir yol sunmaktadır. Ancak, uygulama etkinliği, farklı faz geçiş sıcaklıkları ve mevcut iklim koşullarından önemli ölçüde etkilenir. Düşük yoğunluklar için özel olarak tasarlanmış köpük beton, çimento ve su karışımıyla çimento harcı tabanlı köpük beton veya çimento, kum ve su karışımıyla harç tabanlı köpük beton üretilebilir (Findik, 2022). Protein bazlı veya sentetik köpük ajanının eklenmesi, harç içinde aralıklı hava boşlukları oluşturulmasında önemli bir rol oynar. Köpük beton, istenen özellikleri oluşturma ve elde etme için özel bir stratejiye sahip değildir. Ancak, karışım oranlarını doğru bir şekilde belirlemenin pek çok yolu yoktur (Xu ve Li, 2013). Köpük betonun avantajı, yapısal yükü

artırmadan gözenekli ve hafif bir yapı sunduğu için FDM kapsüllerinin yerleştirilmesi için ideal bir alt tabaka oluşturmaktadır.

Parafin FDM, uygun fiyatı, çevre dostu oluşu ve stabilitesi nedeniyle en uygun ısı depolayan madde olarak kabul edilmektedir. Yapı malzemeleriyle uyumluluğu nedeniyle, köpürmüş silika, FDM'leri kapsüllemek için en uygun malzemedir. Köpük çimentonun en stabil yapısı ve uygun kompoziti, %45 parafin içeriğine sahip bir FDM kompozitidir. Deneylere göre, FDM tabanlı köpük betonun termal iletkenliği ve ısı emme kapasitesi, geleneksel köpük betona kıyasla çok daha yüksektir. Ayrıca, kompozit FDM'nin içeriği arttıkça, termal iletkenliği nihayetinde azalabilir ve ısı depolama kapasitesi önemli ölçüde artabilir (Marani ve Nehdi, 2019).

2.3.2. Beton

Betona doğrudan FDM'ye eklemek, belirli sıcaklıklarda termal iletkenliği düşürür ve termal kütleyi artırır. Diğer yandan, betonun basma dayanımı, önemli bir özelliktir ve bu özellik etkilenebilir. FDM betonunun gösterdiği bazı olumsuz özellikler arasında daha düşük dayanım, belirsiz uzun vadeli stabilite ve azalmış yangına karşı direnç yer almaktadır. FDM betonuyla yapılan çalışmalar, özellikle sıcak iklimlerde iç mekan sıcaklıklarını düşürme konusunda faydalarını kanıtlamıştır. FDM'lerle beton birleştirmeye yönelik birkaç farklı yaklaşım arasında betona delikler açıp bunları FDM ile doldurmak ve boşluklu beton zemindeki mevcut boşlukları doldurmak potansiyel seçenekler arasında yer almaktadır (Alqallaf ve Alawadhi, 2013).

2.3.3. FDM Tabanlı Çimento Sıva

%60 FDM ikamesi içeren FDM tabanlı çimento harcının, birçok yapı uygulaması için uygun olduğu bulunmuştur (Cunha vd., 2022). Çimento harcının seçiminde, hacim olarak 1:4 çimento-kum oranı ve çimentonun %50 su içeriği önceliklendirilmiştir. FDM tabanlı çimento sıva üretmek için, çimento ve kum bir karıştırıcıda karıştırılarak homojen bir renk elde edilene kadar titiz bir karıştırma süreci uygulanır. Renk tutarlılığını sağlamak için, ilk olarak çimento, kumun %40'ı ile karıştırılır ve ardından FDM tozu (kumun hacminin %60'ı) düşük hızda kademeli olarak eklenir. Bu dikkatli yaklaşım, FDM mikro kapsüllerinin zarar görmemesi için gereklidir. Karıştırma ve FDM tozunun eklenmesi, tutarlı bir renk elde edilene kadar tekrarlanır. Bu süreçte, su kademeli olarak eklenir ve sürekli karıştırma sağlanır. Taze harcın işlenebilirliği ve tutarlılığı, BS EN 1015-3'te belirtildiği gibi akış tablası yöntemiyle değerlendirilir. Son olarak, taze karıştırılmış harç kalıplara dökülerek gerekli örnekler yapılmıştır. Kalıplarda 24

saat bekledikten sonra örnekler kalıptan çıkarılmış ve test yaşlarına ulaşana kadar 28 gün süreyle su içinde saklanmıştır.

Bazı önceki çalışmalarda, araştırmacılar çimento harcındaki kumun bir kısmını, çeşitli oranlarda FDM entegrasyonu ile değiştirdiler ve %60 FDM içeren çimento harcının, yapıların sıva oluşturmak için birçok kullanımında uygun olduğunu gösterdiler. FDM çimento sıvası, kumun %40'ı ile oluşturulur ve homojen bir renk elde edilene kadar karıştırılır. Bunun ardından, kumun hacminin %60'ını oluşturan FDM tozu, FDM mikro kapsüllerinin korunmasını sağlamak için karıştırıcı daha düşük hızda çalışırken kademeli olarak eklenir. Daha sonra su kademeli olarak eklenir ve karıştırma sürekli olarak devam eder (Wu vd., 2021).

2.3.4. FDM Alçıpan Levhalar

FDM'lerin alçıpan levhalarda kullanımı, 1990'lı yıllardan bu yana incelenmektedir. FDM içeren alçıpan levhaların, bina soğutma yüklerini %7–20 oranında azalttığı bildirilmiştir (Shukla vd., 2012). Genellikle, FDM'lerin artırdığı termal eylemsizlik nedeniyle duvarın iç tarafına yerleştirilirler.

Alçıpan levhalarda FDM kullanımı, levhaların mekanik özelliklerini etkileyebilir, bunları düşürerek verimsizliğe yol açabilir. Ancak, bazı çalışmalar bu dezavantajı dengelemek için takviyeler eklemeyi önermektedir. FDM yüzdesinin %7 artışı ile bir alçıpan levhadaki enerji depolama kapasitesi %20 artış gösterir. Sadece iç taraftan sıcak hava akışı ile bina zarfına yerleştirildiğinde, enerji de bir taraftan değiş tokuş edilir. Sonuç olarak, daha ince alçıpan levhalar, termal değişim konusunda daha iyi sonuçlar gösterir. Bir çalışma, 1,5 cm kalınlığındaki levhaların termal değişimden %66,66 oranında etkilendiğini, 2,5 cm kalınlığındaki alçıpan levhaların ise %40 termal değişim kazandığını göstermektedir. En iyi sonuçlar, her iki taraftan hava akışından etkilenen, iç mekandaki eğik bağımsız alçıpan levhalarda elde edilir. Bu çalışma, levhanın konumu ve kalınlığı ile hava akışı ile temas eden alanın yüzdesinin, termal değişim sonuçlarını etkileyebileceğini kanıtlamaktadır. Dahası, %45 FDM içeren bir alçıpan levha, tuğlaya kıyasla birim kütle başına 9,5 kat daha fazla enerji depolayabilir, ısıya dayanıklı tuğlaya göre beş kat daha fazla, normal alçıpan levhaya göre ise üç kat daha fazla enerji depolayabilir (Oliver, 2012).

Isı depolama ve sıcaklık gecikmesi açısından, FDM tabanlı alçıpan levha yeterli performans sergileyerek iç mekan sıcaklıklarındaki değişiklikleri en aza indirir. Ayrıca, geleneksel alçıpan levhaya kıyasla, nem emme kapasitesi önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu

nedenle, FDM tabanlı alçıpan levha, binalarda enerji verimliliğini artırmak için kullanılan ve inşaatta umut verici bir kompozit malzeme olarak öne çıkmaktadır (Saffari vd., 2022).

2.3.5. FDM Tuğlalar

Bu uygulamalardaki genel amaç, binaların inşasında sıkça kullanılan bir yapı malzemesi olan tuğlanın depolama kapasitesini ve yalıtım direncini iyileştirmektir. Tuğla duvarının, yükleri taşıyabilmesi için gerekli mekanik özellikleri koruması önemlidir (Azmi vd., 2021). Bir FDM seçerken, gizli ısı ve erime sıcaklığı en önemli değişkenler olarak dikkate alınmalıdır. Eğer uygun ise, erime sıcaklığının dışsal ısı dalgalanının matematiksel ortalamasına yakın olması tercih edilir. Tuğlaların ısı performansını, tuğlaya dahil edilen FDM miktarının artırılmasıyla önemli ölçüde iyileştirilir, ancak bu miktar finansal ve yapısal güç nedenleriyle daha fazla ayarlanmalıdır. Tuğlanın iç yüzey sıcaklık dalgalanması, dışsal konvektif ısı transfer katsayısından çok az etkilenirken; içsel konvektif ısı transfer katsayısı özellikle kritik öneme sahiptir (Tunçbilek vd., 2020).

Genel olarak, boşluklu tuğlanın depolama kapasitesi ve yalıtım gücü, FDM entegrasyonu ile artırılmaktadır. Bu durum, FDM içeren tuğla duvarından geçen termal dalgalanımın önemli bir genlik azalması ve belirgin bir faz kayması ile gösterilmektedir. Sonuç olarak, bu teknik, optimum tasarım (kalınlık) ile yapı malzemeleri sağlar. Ayrıca, ilginç bir pasif sıcaklık düzenlemesi sunar, iç mekan konforunu artırır ve böylece bina enerji talebini azaltmaya yardımcı olur. Boşluklu tuğla duvarları kullanılarak inşa edilen bir bina zarfı, gelen ısı miktarını ve dolayısıyla mekanik soğutma ihtiyacını önemli ölçüde etkiler (Al-Yasiri ve Szabó, 2021).

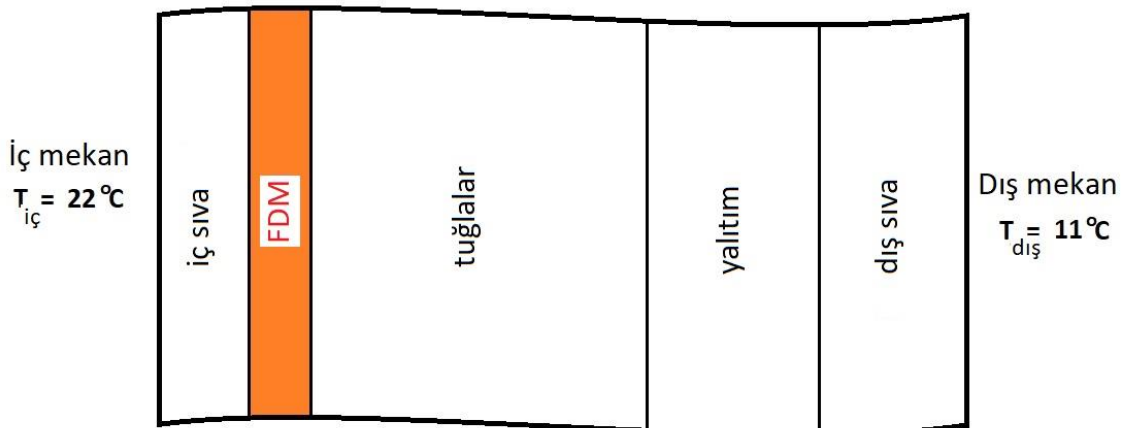
2.3.6. FDM'li Kaplama Malzemeleri

Kaplama, binaların ısı yalıtım malzemeleri gibi termal özelliklerini geliştirmek için bina duvarına eklenen bir malzemedir. FDM katmanları, iç mekan sıcaklığını yönetmek amacıyla genellikle iç mekanlara yakın bina iç mekanlarında uygulanır. Ancak, FDM eklenerek dış zarfın termal yalıtımı iyileştirilebilir, bu da dış ortamdan gelen ısı kazanımını azaltabilir (Durakovic vd., 2020). Bina zarfı, binalarda en fazla ısı girişi veya kaybının meydana geldiği yerdir. Bu nedenle, bina zarfı, soğutma ve ısıtma için enerji kullanımını sınırlayacak şekilde doğru bir şekilde planlanmalıdır. FDM'ler, nispeten sabit bir sıcaklıkta büyük miktarda ısıyı tutma ve boşaltma gücüne sahip oldukları için, öncelikle bina zarflarının inşasında kullanılmaktadır (Wahid vd., 2017).

FDM'leri bina yapısına entegre etmek için en iyi konum, dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. FDM katmanı, ısı kaynağına daha yakın bir şekilde yerleştirilmelidir, zira bu en mantıklı açıklamadır. Örneğin, sıcak bölgelerde, FDM dış zarf katmanlarına yakın bir şekilde yerleştirilmelidir. Bunun başlıca nedeni, bu koşullarda FDM'nin bir yalıtkan (ısı bariyeri) olarak çalışmasıdır. Bu nedenle, depolanan ısıнын iç mekandan mümkün olduğunca uzak bir yerde olması gerekir; böylece istenmeyen ısı salınımı engellenir ve gece boyunca soğutma etkisinden faydalanılır. Dışarıda soğuk olduğunda ise, FDM katmanı, iç mekandan dışarıya ısı çıkışını engelleyerek veya sınırlandırarak ısıyı depolar ve sıcaklık düştüğünde bu ısıyı iç mekana geri salarak ısı kaynağı olarak işlev görür (Pirdavari ve Hossainpour, 2020).

2.4. Sayısal Model

Bu çalışmada, sayısal incelemeler katılaşma ve erime yetenekleri etkinleştirilmiş hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü Ansys/Fluent 18.1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ansys/Fluent, erime ve katılaşma sürecini simüle etmek için entalpi-gözeneklilik yaklaşımını kullanır (Chauhan vd., 2017). Bu yaklaşımda, erime arayüzü açıkça takip edilmez. Bunun yerine, sıvı oranı adı verilen bir parametre (hücre hacminin sıvı formda olan kısmını temsil eder) FDM alanındaki her hücreye atanır. Sıvı oranı, her yinelemeden sonra bir entalpi dengesine dayanarak hesaplanır. Faz değişimi arayüzü, sıvı oranının 0'dan 1'e geçtiği yumuşak bir bölge olarak temsil edilir. Bu bölgeye peltemsi bölge denmektedir (Kılıç, 2024). Peltemsi bölge, gözenekliliği 1'den 0'a azalan bir sanki-gözenekli bölge gibi davranır. Malzeme katılaştıkça gözeneklilik sıfıra ulaşır ve bu bölgedeki hızın sıfıra düşmesine neden olur (Hassab vd., 2017).



Şekil 2.4. İncelenen kompozit duvarın kesit görünümü (FDM-1 durumu için)

Bu tez çalışmasında, Şekil 2.4'te bir kesiti görülen yalıtımlı kompozit duvar sayısal

olarak Ansys/Fluent programı kullanılarak modellenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi karma duvar kompozit bir yapıda farklı duvar elemanlarından oluşmaktadır. İç mekan sıcaklığının 22°C’de sabit kaldığı iç duvardan itibaren sırasıyla karşılaşılan genel ve standart duvar elemanları; iç sıva, tuğlalar, yalıtım malzemesi ve dış sıva şeklindedir. Dış sıva sonrasındaki dış duvar ile 11°C’de sabit olduğu düşünülen dış ortam arasında ısı transferi gerçekleşecektir.

Bu çalışmanın temel motivasyonu faz değiştiren bir malzemenin karma duvar içerisindeki farklı pozisyonlanmaları durumunda duvarın ısı transfer performansına etkisini incelemektir. Bu kapsamda, kullanılacak olan FDM, karma duvar içerisinde farklı bölgelere yerleştirilerek duvarın ısı transfer performansı bu durumlar için incelenecektir. Örneğin, Şekil 2.4’de temsil edilen durumda faz değiştiren malzeme iç sıva ile tuğlalar arasına yerleştirilmiştir. Bu durum çalışma boyunca "Durum-1" olarak isimlendirilecektir. Diğer durumlarda FDM’nin nasıl pozisyonlandığı ile ilgili tanımlamalar aşağıdaki Tablo 2.3’de listelenmektedir.

Tablo 2.3. FDM’nin karma duvar içerisinde yerleştirildiği farklı durumların tanımları

Durum	İsimlendirme	Tanımı
Durum 1	FDM-1	"FDM", "iç sıva" ve "tuğlalar" arasında
Durum 2	FDM-2	"FDM", "tuğlalar" ve "yalıtım" arasında
Durum 3	FDM-3	"FDM", "yalıtım" ve "dış sıva" arasında

2.4.1. Malzeme Özellikleri

Çalışmada, faz değiştiren malzeme olarak RT20 parafin mumu tercih edilmiştir. Bu malzeme, literatürde bina duvarlarına FDM uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bir malzeme olduğu için seçilmiştir (Paroutoglou, 2023). Belirli sıcaklık aralıklarında faz değişimi gerçekleştiren ve termal enerji depolama kapasitesi yüksek bir faz değiştiren malzemedir (Kenisarin ve Mahkamov, 2016).

RT20 parafin mumu, yaklaşık 18-22°C arasında faz değişimi gerçekleştirir. Bu sıcaklık aralığı, konutlarda iç mekân konfor sıcaklıklarına yakın olduğu için enerji tasarrufu ve iç ortam sıcaklığını dengeleme açısından oldukça uygundur. Ayrıca, parafin mumlarının ısı enerji depolama kapasiteleri de yüksektir. RT20, faz değişimi sırasında büyük miktarda gizli ısıyı depolayarak, iç mekân sıcaklık dalgalanmalarını azaltır ve enerji tüketimini düşürür. Bu özellik, binanın soğutma ve ısıtma yüklerini dengelemek açısından önemli bir katkı sağlar (Farid ve Sherref, 2010).

Bunlara ek olarak, RT20, kimyasal olarak kararlı bir malzemedir ve uzun süreli

kullanımında bozunma göstermez. Bu durum, FDM'nin tekrar tekrar faz değişimi yaparak enerji depolama kapasitesini uzun yıllar boyunca koruyabileceğini gösterir. Ayrıca, toksik olmayan ve çevre dostu bir malzeme olması da tercih edilmesinde etkili olmuştur. RT20, ticari olarak kolayca temin edilebilen ve inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir FDM türüdür (Reddy vd., 2024). Bu nedenle, deneylerde kullanım kolaylığı sağlamak ve gelecekteki bina uygulamaları için pratik bir çözüm sunmaktadır. RT20 parafin mumu, güvenli bir kullanım profiline sahiptir ve uygun koruyucu kaplamalarla birlikte uygulandığında yangın riskini azaltır. Bu özellik, bina içindeki güvenliği artırmaktadır (Rathore ve Shukla, 2021).

Tablo 2.4. FDM'nin (RT20 parafin) termo-fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Yoğunluk (kg/m ³)	870
Özgül ısı (J/kgK)	2900
Isıl iletkenlik (W/mK)	0,24
Dinamik viskozite (Ns/m ²)	0,0057933
Gizli ısı (kJ/kg)	141,4
Tam katılaşma sıcaklığı (°C)	19,7
Tam sıvılaşma sıcaklığı (°C)	21,1

Sayısal analizlerde kullanılan RT20 parafin mumunun termofiziksel özellikleri Tablo 2.4'de verilmiştir. Görüldüğü üzere RT20 parafin mumu bir kilogram başına yaklaşık olarak 141.400 Joule gibi oldukça yüksek bir ısı miktarını, sıcaklığında çok fazla değişim yaşamadan taşıyabilmektedir. Ayrıca tam katılaşma ve sıvılaşma sıcaklıkları 18-22°C aralığındadır. Faz değişiminin gerçekleştiği bu sıcaklık aralığı da standart olarak istenen bir iç ortam sıcaklığı seviyelerinde olduğundan, yaşam alanlarını içeren hacimlerin termal konforunu artırmakta için kullanılmıştır.

FDM'ye ek olarak, analiz edilen karma duvar içerisinde kullanılan tüm katı malzemelerin özellikleri de Tablo 2.5'te listelenmektedir.

Tablo 2.5. Kompozit duvardaki katı malzemelerin özellikleri

Malzeme	XPS (yalıtım)	Tuğlalar	Sıva
Yoğunluk (kg/m ³)	38	2000	1250
Özgül ısı (J/kg/K)	1450	850	1088
Isıl iletkenlik (W/mK)	0,031	0,45	0,87 (iç) 1,4 (dış)
Karma duvar içindeki kalınlık (m)	0,06	0,13	0,02 (iç) 0,03 (dış)

Tablodan da görüldüğü gibi duvar içerisinde yalıtım malzemesi olarak XPS kullanılmıştır. XPS (Extruded Polystyrene), ısı yalıtımında yaygın olarak kullanılan, kapalı hücre yapısına sahip bir yalıtım malzemesidir. Polistirenin ekstrüzyon yöntemiyle işlenmesiyle elde edilen XPS, düşük ısı iletkenliği, su geçirmezlik, dayanıklılık ve mekanik mukavemet özellikleri sayesinde yapı sektöründe tercih edilen bir yalıtım malzemesidir (Yoo vd., 2021).

Bu çalışmada incelenen karma duvarın toplam kalınlığı 24 cm'dir. Bunun 13 cm'si iç bölgedeki tuğlalardan, 6 cm'si XPS yalıtım malzemesinden ve 2 ve 3 cm'leri de sırasıyla iç ve dış sıvadan oluşmaktadır. Son olarak da 2 cm'lik bir FDM entegrasyonu ile incelemeler gerçekleştirilmiştir.

2.4.2. Yürütücü Denklemler

Ansys/Fluent programında erime ve katılaşma modülü ile çözüm yapılırken, hem katı bölgeler için hem de erimiş (sıvı) bölgeler için yürütücü denklemler ayrı olacaktır. Katı bölgeler için enerji taşıma (korunum) denklemi aşağıdaki Denklem 2.1 ile verilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\vec{v}\rho h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h \quad (2.1)$$

Burada, ρ yoğunluğu, k termal iletkenliği ve S_h hacimsel ısı kaynağını temsil eder. Denklem 2.1'in sol tarafındaki gradyan, katı bölgenin dönme veya öteleme hareketinden kaynaklanan hız vektörü ($\vec{v}$) ile taşınım ile enerji transferini temsil eder. Bu çalışmada, katı bölge sabittir ve bu nedenle bu terim atlanmıştır. Duyulur entalpi, aşağıdaki Denklem 2.2 ile hesaplanan h ile ifade edilir.

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'deki T malzeme sıcaklığını, T_{ref} referans sıcaklığını ve c_p de özgül ısıyı temsil etmektedir.

Analizler esnasında faz değiştiren malzemenin sıcaklığı, tam sıvılaşma sıcaklığının üzerine çıktığında, FDM eriyecek ve bir sıvı gibi hareket edecektir. Bu sebeple sayısal çözümlerinde sadece katı bölgelerdeki enerjinin korunumu değil, sıvı bölgelerdeki kütle ve momentum korunumlarının da sağlanması gerekmektedir. Sıvılaşan bölgelerde akışkan hızı çok yavaş olduğu için de analizlerin laminer akış şartları altında yürütülmesi doğru olacaktır. Zamana bağlı, sıkıştırılamaz ve iki boyutlu bir laminer akış için yürütücü denklemler aşağıdaki

gibi olacaktır. Kütle korunumu, Denklem 2.3 ile hesaplanırken, x ve y yönlerindeki momentum korunum denklemleri ise sırasıyla Denklem 2.4 ve 2.5 ile verilmektedir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.5)$$

Bu denklemlerde, u ve v sırasıyla x ve y yönlerindeki hız bileşenleridir. Ayrıca, x ve y kartezyen koordinatları temsil ederken t zaman ifadesini belirtmektedir. Yoğunluk, kinematik viskozite ve basınç ifadeleri de sırasıyla ρ , ν ve p terimleri ile temsil edilmektedirler.

2.4.3. Ağ Yapısı ve Doğrulama Çalışması

Sayısal analizler esnasında iteratif olarak çözülen yürütücü denklemlerde, artık/kalan (residual) terimleri her bir iterasyonda hesaplanmaktadır. Öncelikle sayısal yaklaşımın yakınsaması için bu terimlerin belirli bir sayısal değerin altına düşene kadar iteratif çözümlemelere devam edilmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, enerji, momentum ve süreklilik denklemlerinin yakınsama kriteri olarak sırasıyla, 10^{-10} , 10^{-8} ve 10^{-5} değerleri seçilmiştir. İlgili literatür de incelendiğinde bu değerlerin oldukça hassas sonuçlar üretebildiği görülmektedir (Bergan ve Clough, 1972).

Bunun dışında, sistemin ısı transfer kabiliyeti zamana bağlı olarak incelendiği için analizlerde zaman adımı olarak sabit 0,1 saniye seçilmiş ve her bir zaman adımı başına en fazla 10 iterasyon gerçekleştirilecek şekilde numerik model oluşturulmuştur. Sayısal analizler, 16 çekirdekli ve 32 GB RAM'li 1,7 GHz Intel Xeon işlemcide yürütülmüştür.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmalarında numerik modelin doğrulanabilmesi için ağ bağımsızlık testlerinin yürütülmesi elzemdir. Ağ bağımsızlık testlerindeki temel mantık, çözüm bölgesinin farklı yapılarıdaki sonlu elemanlara ayrılması ile çözümlerin tekrarı esasına dayanır. Bu testler, çözüm açısından bağımsız sonuçlar elde edene kadar sürecin sürdürülmesi esasına dayanmaktadır. Nihayetinde, ağ yapısı değişse de gözlemlenen bir veya birkaç parametrenin çözüm sonunda aldığı değerler değişmemeye başlayacaktır. Bu noktada hem hassas ve doğru çözüm üretebilen hem de hesaplama maliyeti çok yüksek olmayan bir ağ yapısı hedeflenir.

Tablo 2.6. Ağ bağımsızlık analizleri sonucunda elde edilen değerler

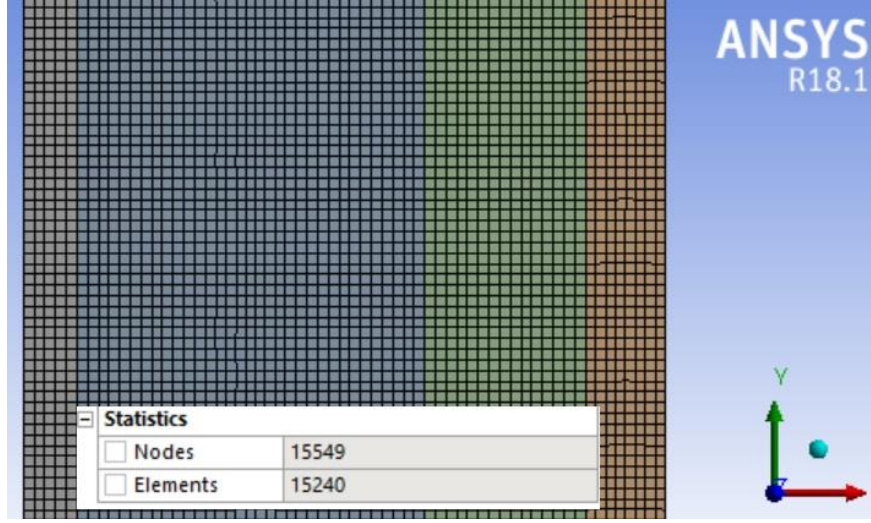
Ağ yapısı	Eleman boyutu [m]	Eleman sayısı	Isı akısı [W/m^2]	$T_{iç}$ [°C]	$T_{dış}$ [°C]
Mesh 1 (kaba)	0,006	6.680	4,41	21,04	11,58
Mesh 2 (orta)	0,004	15.240	4,506	21,45	11,23
Mesh 3 (ince)	0,002	38.310	4,507	21,452	11,229

Bu çalışmada da ağ bağımsızlık testleri yürütülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 2.6’da sunulmuştur. Testler esnasında kontrol parametreleri olarak duvardan gerçekleşen ısı akısı ile iç ve dış duvarların yüzey sıcaklıkları seçildi.

Tablo 2.6’da üç adet ağ yapısı için değerler verilmiştir. Birinci ağ yapısı "Mesh-1" olarak isimlendirilmiş ve eleman boyutu 0,006 m olarak kullanılmıştır. Bu durumda çözüm bölgesinde toplam 6.680 eleman kullanılmaktadır. Bu ağ yapısı "kaba" ağ olarak isimlendirilmiştir. Sonrasında eleman boyutu 0,004 m’ye düşürülmüş ve toplamda 15.240 elemanlı bir bölge için çözüm elde edilmiştir. Bu ağ yapısına "Mesh-2" denmiş ve "orta" kalitede olarak tanımlanmıştır. En ince ağ yapısı olan "Mesh-3"’ün elde edilmesi içinse eleman boyutu 0,002 m’ye düşürülmüştür. Bu durumda çözüm bölgesinde toplam 38.310 eleman oluşmuştur. Bu yapısı da "ince" olarak tabir edilmiştir.

Öncelikle tabloda bu üç farklı ağ yapısı için elde edilmiş olan ısı akıları incelenecek olursa Mesh-1 için ısı akısı $4,41 W/m^2$ olarak bulunmuştur. Ağ yapısı biraz daha inceltirilerek Mesh-2 kullanıldığında ise ısı akısı $4,506 W/m^2$ olarak hesaplanmıştır. Ağ yapısında çok daha fazla eleman kullanıldığında Mesh-3 için bu değer $4,507 W/m^2$ olarak hesaplanmış ve bir önceki Mesh-2 değerinden farkının sadece %0,02 olduğu görülmüştür.

Benzer şekilde $T_{iç}$ ve $T_{dış}$ yüzey sıcaklıkları arasındaki farklar üç adet ağ yapısı arasında kıyaslandığında $T_{iç}$ için Mesh-1 ve Mesh-2 arasındaki fark %1,91 iken Mesh-2 ile Mesh-3 arasındaki fark sadece %0,009 olmuştur. Değerler arasındaki farklar $T_{dış}$ için kıyaslandığında ise Mesh-1 ve Mesh-2 arasındaki fark %3,12 iken Mesh-2 ile Mesh-3 arasındaki fark sadece %0,0089 olmuştur. Bu kıyaslamalardan yola çıkarak bu tez çalışmasında Mesh-2 olarak isimlendirilen orta incelikteki ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu ağ yapısı sayesinde hem eleman sayısından bağımsız hassas bir çözüm elde edilmiş hem de bunu yaparken hesaplama maliyeti en aza indirilmiştir.



Şekil 2.5. Sayısal çözümlerde kullanılan ağ yapısı (Mesh-2)

Sayısal çözümlerde kullanılan ağ yapısının görseli Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Bu ağ yapısı (Mesh-2) için eleman sayısının 15.240 olduğu Tablo 2.4'te gösterildi. Bu elemanları birbirine bağlayan noktaların sayısı ise 15.549 olarak elde edilmiştir. Burada ağ yapısını göstermek için temsil edilen konfigürasyonda faz değiştiren malzeme duvar içerisine yerleştirilmemiştir. Görselde farklı renk skalaları ile görülen bölgelerin her biri karma duvar elemanlarını temsil etmektedir. Bu elemanların numerik model içerisinde farklı hacimler tanımlanarak ve farklı malzemeler atanarak oluşturuldukları için kullanılan Ansys programı tarafından buradaki gibi farklı renklerle temsil edilmişlerdir. Her bir renk geçişinde soldan sağa doğru sırasıyla iç sıva, tuğlalar, yalıtım ve dış sıva gelmektedir.

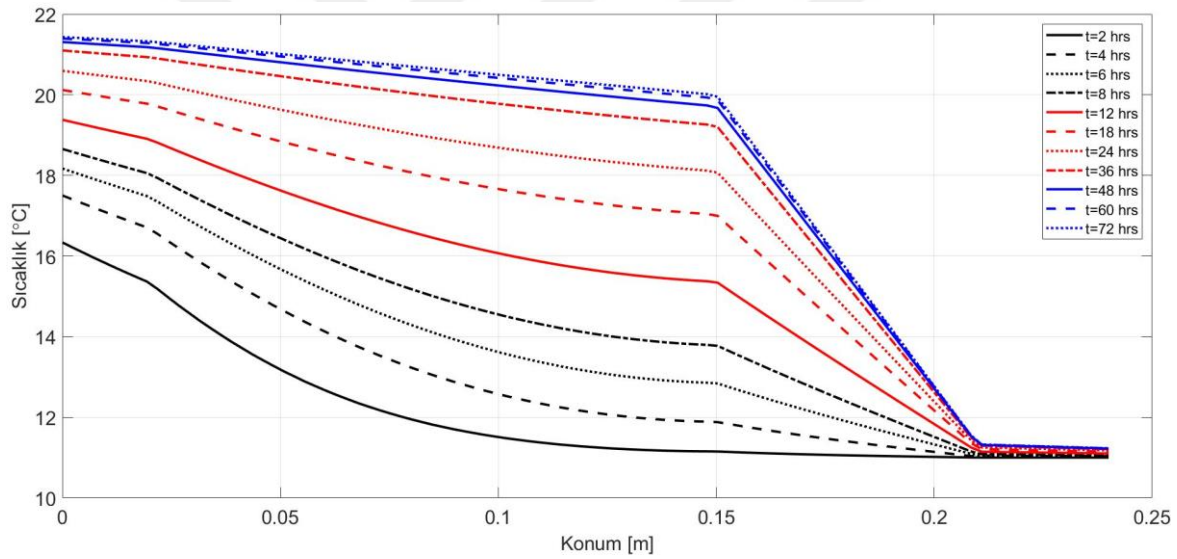
Analizlerde kullanılan Mesh-2 ağ yapısının minimum ortogonallik kalitesi 0,812'dir ve maksimum en boy oranı 3,32'dir. Bu değerlerin, en iyi sayısal çözümleri elde edebilmek için 0,1'in üzerinde minimum ortogonallik kalitesi ve 1'e yakın bir en boy oranı sağlaması önerilmektedir (Zhang vd., 2004; Knupp, 2001). Bu öneriler göz önüne alındığında kullanılan ağ yapısının önerilen değerleri oldukça iyi seviyede sağladığı görülmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tipik bir bina karma duvarı üzerinde gerçekleşen ısı transferi mekanizması hem faz değiştiren malzeme entegre edilmiş durumda hem de FDM'siz olarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmadaki tüm sayısal analizler, sonlu hacimler yöntemine dayalı olan Ansys/Fluent programı kullanılarak yürütülmüştür. Analizler zamana bağlı, sıkıştırılmaz ve iki boyutlu sistem koşulları düşünülerek gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar bu başlık altında irdelenmektedir.

3.1. Kompozit Duvar İçindeki Sıcaklık Dağılımı

Şekil 3.1, FDM entegre edilmediğinde kompozit duvar içindeki sıcaklık değişimini göstermektedir. Duvarın iç ve dış tarafları sırasıyla $x=0$ m ve $x=0,24$ m ile temsil edilmektedir. Sıcaklık profilleri, $t=2$ saatten $t=72$ saate kadar değişen on bir farklı zaman aralığında gösterilmektedir.



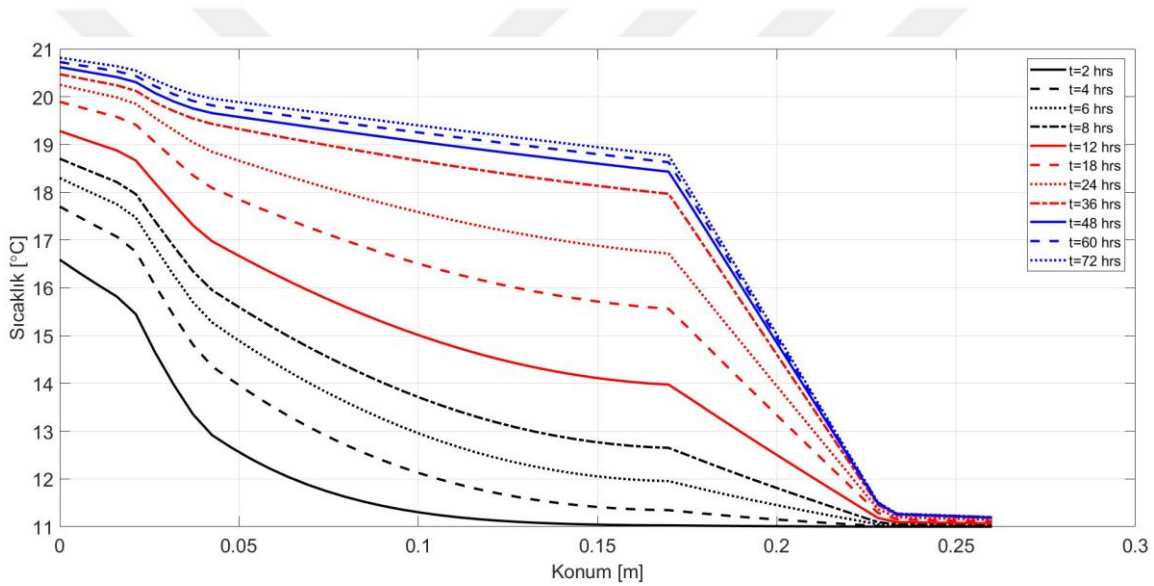
Şekil 3.1. FDM olmadan karma duvar içindeki sıcaklık değişimi ($x=0$ m iç taraf, $x=0,24$ m dış taraf anlamına gelir)

Şekil 3.1'e bakıldığında ilk gözlemlenen, yeterli bir süreden sonra, yaklaşık $t=36$ saat, sıcaklığın sabitlenmesidir. Bu gözleme göre yaklaşık olarak $t=36$ saat sonra, ısı transferi açısından sürekli rejim koşullarının oluştuğunu göstermektedir. Bu koşullar altında, duvarın iç tarafı iç mekan sıcaklığıyla aynı sıcaklığa, yaklaşık $t=22^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşır. Bir diğer gözlem ise, sabit durumda, yalıtımın sol tarafı ile sağ tarafı arasındaki sıcaklık farkının kompozit duvarın diğer kısımlarından daha fazla olmasıdır. Grafikte yalıtıma karşılık gelen bölge $x=0.15$ m ile $x=0.21$ m arasında kalan kısımdır. Bir başka ifadeyle, örneğin $t=72$ saatte, yalıtımın iç ortama yakın kısmındaki ($x=0.15$ m) sıcaklık yaklaşık olarak 20°C iken, yalıtımın dış ortama yakın olan

tarafındaki ($x=0.21$ m) sıcaklık ise yaklaşık olarak 11°C 'dir. Denklem 3.1 incelendiğinde bu beklenen bir durumdur çünkü yalıtımın çok düşük ısı iletkenliği ile ısı transferi arasında doğru orantı olduğu görülmektedir. Yani bu malzemedeki çok düşük ısı iletkenlik ısı transferini de önemli ölçüde azaltarak engellemiştir. Dahası, iç sıva ve tuğlaların nispeten yüksek ısı iletkenlikleri nedeniyle, bu bölümlerdeki sıcaklık değişimleri ihmal edilebilir düzeydedir ve bu da bu malzemeler içerisinde yüksek bir ısı transferi oranına işaret etmektedir.

$$\dot{Q}_{duvar} = -kA \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki $\dot{Q}_{duvar}$, duvar üzerinden gerçekleşen ısı akısını, k ısı iletkenlik katsayısını, A ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanını, L duvar kalınlığını ve T_1, T_2 de duvarın her bir tarafındaki sıcaklıkları ifade etmektedir.



Şekil 3.2. FDM-1 durumu için karma duvar içindeki sıcaklık değişimi ($x=0$ m iç taraf, $x=0,26$ m dış taraf anlamına gelir)

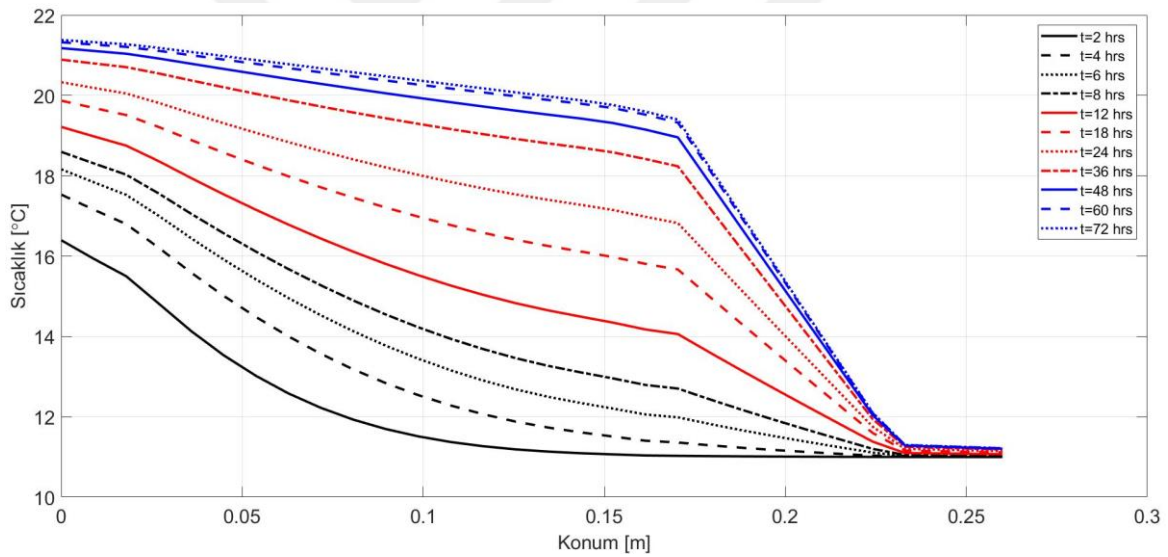
Şekil 3.2'de FDM-1 durumu için karma duvar içindeki sıcaklık değişimi gösterilmektedir. FDM-1 durumunun tanımı daha önce Tablo 2.1'de yapılmıştır. Bütünlüğün sağlanabilmesi için tekrar edilecek olursa, FDM-1 durumunda 2 cm kalınlıktaki faz değiştiren malzeme karma duvar içerisinde iç sıva ile tuğlalar arasına yerleştirilmiştir. Bu durumda FDM eklenmesinden kaynaklanan 2 cm'lik kalınlık artışı grafik üzerinden de anlaşılmaktadır. FDM'nin olmadığı durumda duvarın dış ortamla temas ettiği dış yüzeyinin konumu $x=0,24$ m iken, FDM eklenmesi ile bu konumun değeri $x=0,26$ m olmuştur.

Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 karşılaştırıldığında fark edilen en büyük gözlemlerden birisi FDM bölgesini temsil eden lokasyonlar arasındaki sıcaklık farkının oldukça yükselmiş olmasıdır.

Grafikte, FDM'nin iç ortama yakın tarafı $x=0.02$ m ve dış ortama yakın tarafı da $x=0.04$ m'ye karşılık gelmektedir. Özellikle $t=12$ saatten önceki zaman dilimleri incelendiğinde FDM öncesi ve sonrasındaki sıcaklıklar arasında büyük farklar olduğu görülmektedir. Bu durum FDM'nin, ısıyı üzerinde tutarak transfer etmediği ve dolayısıyla bir yalıtım malzemesi gibi hareket ettiğini göstermektedir.

Ayrıca Şekil 3.2'ye bakıldığında sürekli rejim koşulunun gerçekleşmeye başladığı zaman açısından, FDM kullanılmamış olan duruma göre gözle görülür bir fark oluşmamıştır. Bir başka ifadeyle FDM-1 durumu ile FDM'siz durum, yaklaşık olarak aynı zamanda sürekli rejim koşullarına ulaşmıştır.

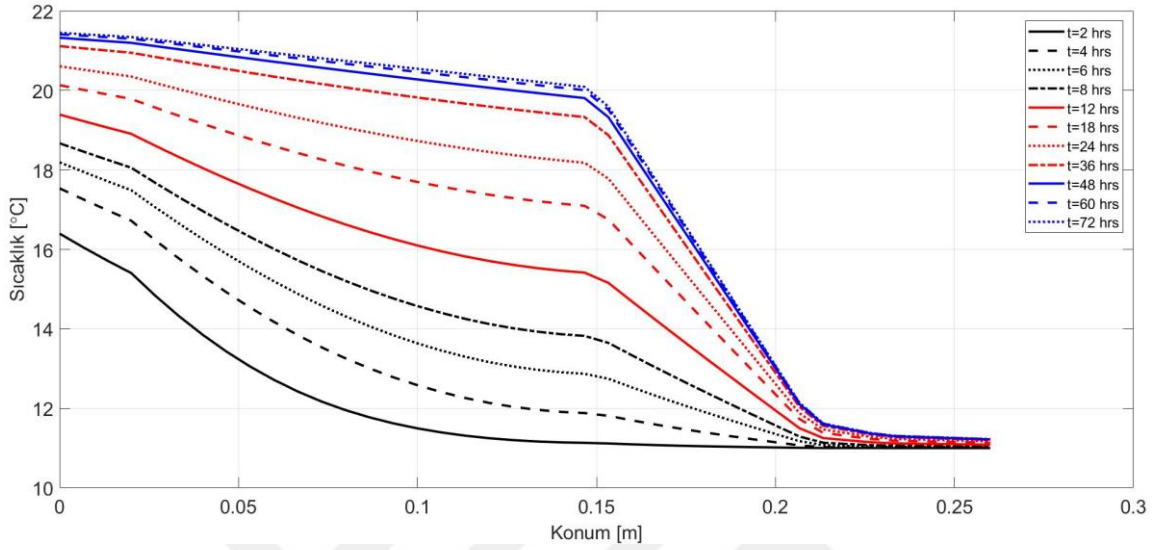
Bunların yanı sıra FDM'nin dahil edilmesiyle ortaya çıkan bir diğer fark, yalıtımın iki tarafındaki sıcaklık farkının azalmasıdır. Başka bir ifadeyle, yalıtımın engellemesi gereken ısı miktarı FDM kullanımı ile azaltılmıştır. Yani FDM kullanımı sayesinde gerek duyulan yalıtım kalınlığı azaltılabilir ve dolayısıyla genel maliyetlerin düşürülmesine katkıda bulunulabilir.



Şekil 3.3. FDM-2 durumu için karma duvar içindeki sıcaklık değişimi ($x=0$ m iç taraf, $x=0,26$ m dış taraf anlamına gelir)

FDM-2 durumunda, yani FDM'nin karma duvar içerisinde tuğlalar ve yalıtım malzemesi arasına yerleştirildiği durumda, karma duvar içindeki sıcaklık dağılımı Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Bu durumda, FDM'nin her iki tarafındaki sıcaklık farkı, FDM-1'de olduğu gibi anlaşılabilir seviyelerde değildir. FDM-2'de faz değiştiren malzeme, $x=0,15$ m ile $x=0,17$ m arasına denk gelmektedir. Yine de yalıtım malzemesinin sağ ve sol tarafındaki sıcaklık farkı dikkate alındığında bir avantaj sağlandığı söylenebilir. Bir başka deyişle, FDM'siz durumda yalıtım malzemesinin her iki tarafındaki sıcaklıklar sırasıyla yaklaşık olarak 20°C ve

11°C iken, FDM-2 durumunda bu sıcaklıklar sırasıyla yaklaşık olarak 19°C ve 11°C olmuştur. Dolayısıyla FDM-2 durumunda yalıtım malzemesinin maruz kaldığı sıcaklık farkı 9°C'den 8°C'ye düşmüştür. Bu sayede bir miktar daha az kalınlığa sahip bir yalıtım malzemesine geçilebileceği çıkarımı yapılabilir.



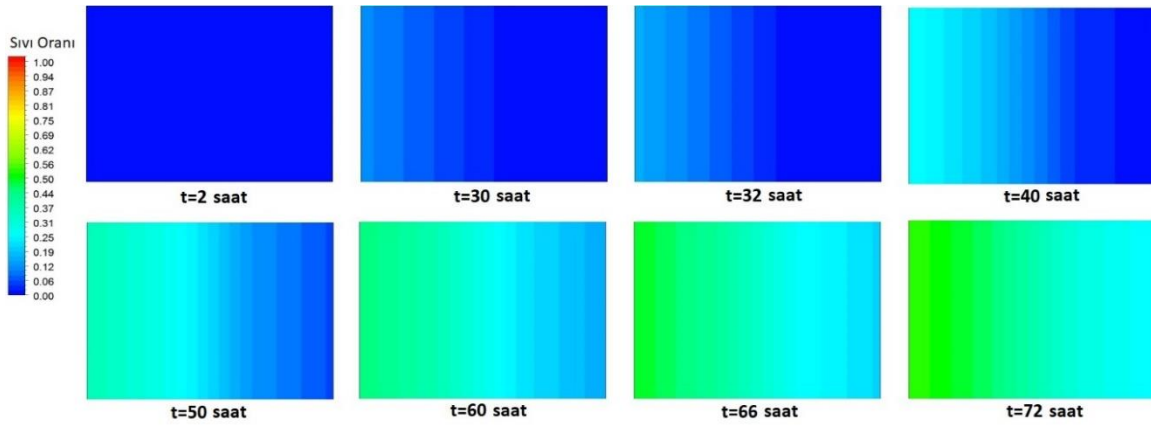
Şekil 3.4. FDM-3 durumu için karma duvar içindeki sıcaklık değişimi (x=0 m iç taraf, x=0,26 m dış taraf anlamına gelir)

Şekil 3.4'te FDM-3 durumu için, yani FDM'nin yalıtım malzemesi ile dış sıva arasına yerleştirildiği durumdaki karma duvar içindeki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. FDM-3 durumunda faz değiştiren malzeme x=0,21 m ile x=0,23 m arasına denk gelmektedir. Grafikte bu aralıklardaki sıcaklık farkları incelendiğinde, FDM'yi yalıtım ile dış sıva arasına yerleştirmenin avantajlı olmadığı anlaşılmaktadır. Yalıtım malzemesinin dış ortama yakın olan sağ yüzeyi ve dış sıvanın iç ortama yakın sol tarafındaki sıcaklıklar neredeyse aynı olduğundan böyle bir sonucun ortaya çıkması beklenmektedir. Bunun başlıca nedeni dış sıvanın kalınlığının küçük olması ve nispeten yüksek termal iletkenliğidir. Sonuç olarak, bu bölgedeki düşük sıcaklık farkı FDM'nin yeterli gizli ısıyı depolamasını önleyerek bu konuma yerleştirilmesini etkisiz hale getirmektedir.

3.2. Faz Değişim Malzemesi İçindeki Sıvı Oranı

Mevcut tez araştırmasında, faz değişim malzemesi belirli durumlarda tam sıvılaşma sıcaklığına ulaşır. Sonuç olarak, önemli miktarda gizli ısıyı emdiği için FDM içindeki sıvı oranı zamanla değişmektedir. İncelenen durumlar arasında, FDM içindeki sıcaklığın, tam sıvılaşma sıcaklığına yalnızca FDM-1 konfigürasyonunda ulaştığı görülmektedir. Dolayısıyla, FDM içindeki sıvı oranı yalnızca bu durumda değişkenlik göstereceğinden bu başlık altında sadece

FDM-1 durumundaki sıvı oranları gösterilecektir.



Şekil 3.5. FDM-1 durumu için çeşitli zamanlarda FDM içindeki sıvı oranı konturları

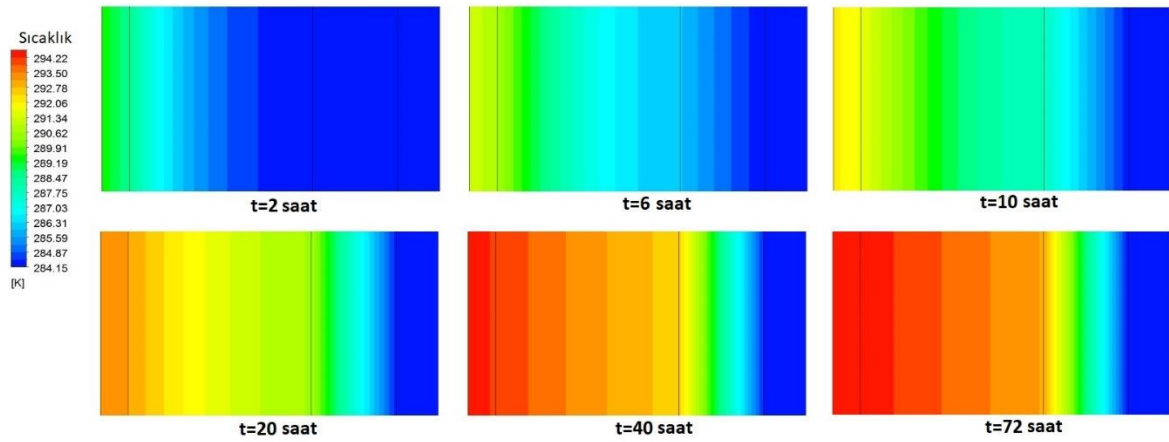
Şekil 3.5'te, FDM-1 durumu için çeşitli zamanlarda FDM'nin içindeki sıvı oranı görülmektedir. Şekilde renk konturları 0 ve 1 aralığında değişmektedir ve 0 (mavi) tamamen katı, 1 (kırmızı) ise tamamen sıvı bölgeleri temsil etmektedir. Kontur grafikleri incelendiğinde, FDM'nin yaklaşık olarak t=30 saatte erimeye başladığı anlaşılmaktadır. Bu zamandan önce, FDM içerisinde önemli bir faz değişimi meydana gelmemektedir. Erime süreci, iç ortama yakınlığı nedeniyle sıcaklığın daha yüksek olduğu FDM'nin sol tarafında başlamaktadır ve bu da nispeten daha yüksek bir sıcaklığı koruyabildiği anlamına gelmektedir.

Ayrıca, FDM içindeki sıcaklığın artmasına bağlı olarak, malzeme içerisindeki sıvı oranı zaman ilerledikçe sistem boyunca soldan sağa doğru artmaktadır. Sürekli rejim durumuna ulaşıldığı düşünülen zamanda (t=72 saat), malzeme içinde hiçbir katı bölge kalmamış gibi görünmektedir. Bunun yanında, t=72 saat anında FDM halem tamamen erimemiştir ve bu bölge daha önce tanımlanan "peltensi" bölgeyi ifade etmektedir (Kılıç, 2024).

3.3. Kompozit Duvar İçin Sıcaklık Konturları

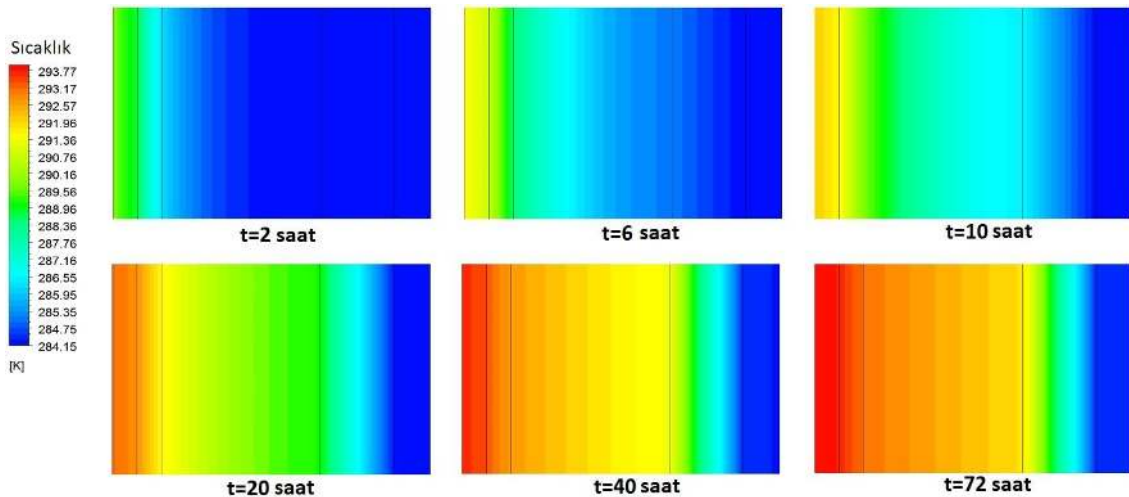
Şekil 3.6, FDM'nin uygulanmadığı durumdaki kompozit duvar içindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Zaman ilerledikçe, ısı sistem boyunca soldan (iç ortam tarafından) sağa (dış ortam tarafına) doğru aktarılmıştır. Bunun neticesi olarak da duvar içinde bir sıcaklık dağılımı oluşmuştur. Duvarın iç ortama yakın olan kısımlarında sıcaklık daha yüksekken, dış ortam tarafına doğru ilerledikçe sıcaklığın düştüğü gözlenmiştir.

Şekil 3.6 incelendiğinde özellikle yalıtım malzemesine denk gelen bölgelerdeki yüksek sıcaklık konturları dikkat çekmektedir. Bu gözlem yalıtım malzemesinin ısıl geçirgenliğinin düşük olmasının bir sonucudur. Ayrıca özellikle iletim katsayısı diğer malzemelere kıyasla çok yüksek olan dış sıva üzerinde ısıнын hızla iletildiği de görülmektedir.

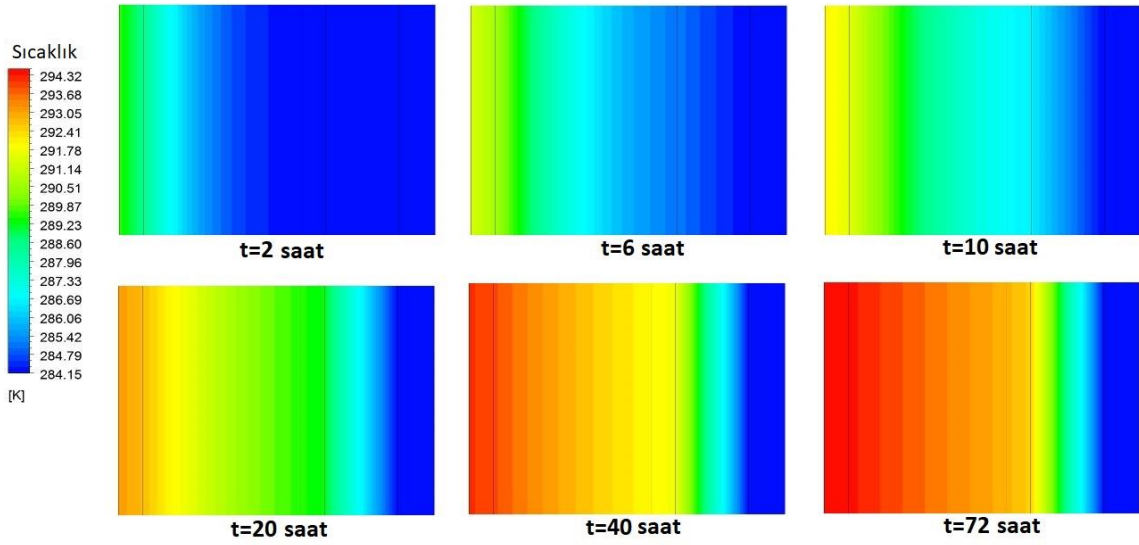


Şekil 3.6. FDM'nin olmadığı durumda çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları

Şekil 3.7, FDM-1 durumu için kompozit duvarın içindeki sıcaklık dağılım konturlarını göstermektedir. FDM'siz durumla karşılaştırıldığında, iç sıva ile tuğlalar arasında FDM uygulanması sayesinde ısı bu bölgede daha etkili bir şekilde muhafaza edilmiştir. Bu sayede FDM ilave bir yalıtım katmanı görevi görerek, ısı kayıplarını azaltmakta ve sistemin termal performansını arttırmaktadır. Ayrıca, FDM kullanılmayan durumla kıyaslandığında zamanla duvar içindeki, özellikle FDM bölgesi içinde, ısı geçişi azalmış ve bu şekilde yalıtım malzemesinin izole etmesi gereken ısı miktarı azalmıştır. Bu sayede ilerleyen çalışmalarla desteklenerek FDM ve yalıtım malzemesi (XPS) arasında bir maliyet analizi yürütülerek, yalıtım kalınlığının azaltıldığı ve dolayısıyla imalat maliyetlerinin azaltılabildiği bir konfigürasyon önerilebilir.

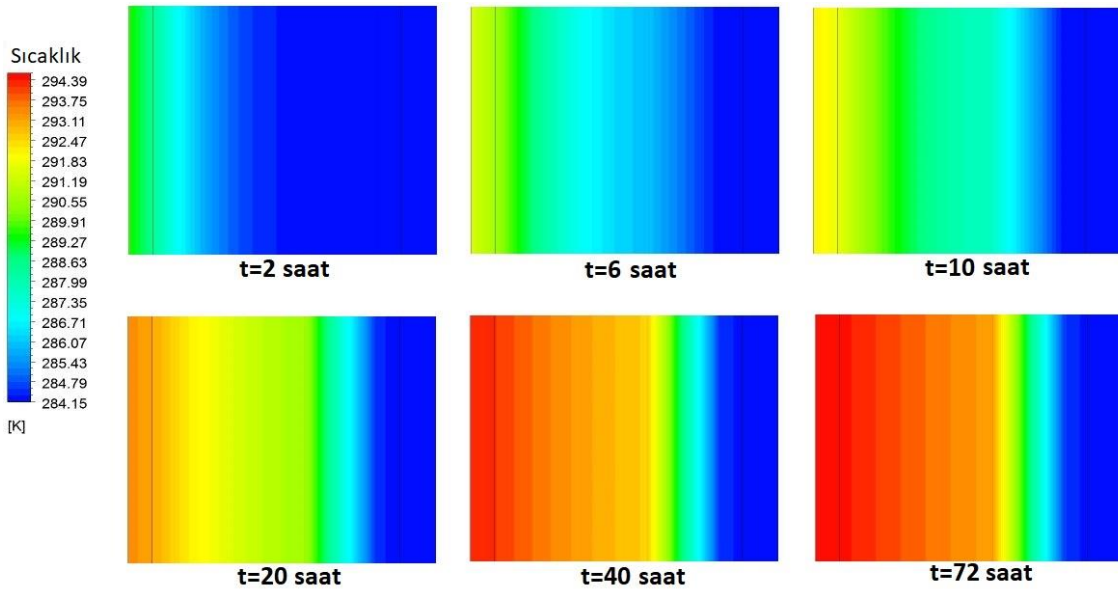


Şekil 3.7. FDM-1 durumu için çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları



Şekil 3.8. FDM-2 durumu için çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları

Şekil 3.8’de, FDM-2 durumu için farklı anlardaki karma duvar içi sıcaklık dağılımı gösterilmektedir. Bu grafikler, FDM’nin iç sıva ile tuğlalar arasına yerleştirildiği (FDM-1) durumuna göre tuğlalar ile yalıtım arasına yerleştirildiği durumun, ısı transferi açısından daha az etkili olduğunu göstermektedir. Bu şekilde, FDM’nin iç ortama yakın olan tarafa daha yakın yerleştirilmesini ve yalıtım malzemesinden çok daha önce ısıyı absorbe etmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 3.9. FDM-3 durumu için çeşitli zamanlarda kompozit duvarın içindeki sıcaklık konturları

Şekil 3.9’da, FDM-3 durumu için yani FDM’nin yalıtım malzemesi ile dış sıva arasına yerleştirildiği durumdaki duvar içi sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bu durum, FDM’nin ısı transferi açısından en etkisiz kaldığı durumdur. Yalıtım malzemesi olan XPS iki yüzeyi arasında ısı geçişini en aza indirmiştir. Dolayısıyla, bu malzemenin sonrasında gelen FDM’nin ısıyı absorbe etme potansiyelinden faydalanılamamaktadır. Bir başka ifadeyle, bu lokasyonda FDM gizli ısı kapasitesini gösterememekte ve işlevsiz kalmaktadır. Isıl iletkenliği de 0,24 W/mK gibi nispeten yüksek bir değer olduğu için ısıl iletkenlik değeri 1,4 W/mK olan dış sıva üzerinden hızla dış ortama doğru olan ısı kaybına ayrıca destek olmaktadır.

3.4. Kompozit Duvar Bileşenlerinin Hacim Ortalamalı Sıcaklıkları

Kompozit duvarın her bir bileşeninin hacim ortalamalı sıcaklıkları, iç ve dış duvarların yüzey sıcaklıklarıyla birlikte Tablo 3.1’de listelenmiştir. Dış ortam tarafındaki alan ortalamalı yüzey sıcaklığının tüm durumlarda neredeyse aynı olduğu görülebilir. Ancak, iç ortam tarafındaki alan ortalamalı yüzey sıcaklığı FDM-1 için en düşükken (20,82°C), diğer durumlarda birbirine çok yakın değerler ($\approx 21,43^\circ\text{C}$) gözlenmiştir.

Tablo 3.1. Karma duvar bileşenlerinin hacim ortalamalı sıcaklıkları

	FDM’siz	FDM-1	FDM-2	FDM-3
$T_{iç} [^\circ\text{C}]$	21,43	20,82	21,38	21,45
$T_{dış} [^\circ\text{C}]$	11,23	11,20	11,22	11,22
$q''_{dış} [\text{W/m}^2]$	4,47	3,86	4,20	4,32
$T_{iç_sıva} [^\circ\text{C}]$	21,37	20,70	21,32	21,39
$T_{dış_sıva} [^\circ\text{C}]$	11,28	11,24	11,26	11,27
$T_{tuğlalar} [^\circ\text{C}]$	20,65	19,36	20,53	20,69
$T_{yalıtım} [^\circ\text{C}]$	15,66	15,02	15,38	15,87
$T_{FDM} [^\circ\text{C}]$	-	20,24	19,62	11,50

Ayrıca, FDM-1 için dış duvardan dışarıya ısı akışı da minimumdur. Bu, sistemden en düşük ısı kaybının FDM'nin iç sıva ile tuğlalar arasına yerleştirildiğinde meydana geldiğini gösterir.

Tablo 3.2. Depolanmış termal enerjinin bir ölçüsü olarak kompozit duvar bileşenlerinin özgül enerjileri (değerler J/kg cinsinden)

Bileşen	FDM’siz	FDM-1	FDM-2	FDM-3
Tuğlalar	3,695	4,792	3,800	3,659
Dış sıva	14,927	14,969	14,946	14,937
İç sıva	3,941	4,672	4,002	3,920
Yalıtım	13,542	14,462	13,954	13,243
FDM	-	41,276	14,425	39,275

FDM-1 için tüm bileşenlerin hacim ortalama sıcaklıkları diğer durumlarla karşılaştırıldığında en düşüktür. Bu, FDM-1'deki FDM bileşeninin en yüksek özgül enerjiye sahip olduğu açıkça görülen Tablo 3.2'de listelenen özgül enerji değerleriyle açıklanabilir. Başka bir deyişle, FDM bu durumda termal enerjiyi daha etkili bir şekilde emer ve bu da ısı kaybını en aza indirir.



4. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, faz değişim malzemesi (FDM) olarak kullanılan RT20 parafin mumunun, tipik bir bina kompozit duvarının içerisinde farklı konumlara yerleştirilmesi ile elde edilen karma duvarın ısıl geçirgenlik performansı incelenmiştir. FDM'lerin gizli ısı kapasitelerinden farklı ısıl sistem tasarımlarında faydalandığı bilinmektedir. Özellikle son yıllarda, bu malzemelerin konutlara entegrasyonu ile iç ortamların ısıl konforunun daha enerji verimli bir şekilde sağlanabilmesi için incelemeler artmıştır.

Gerek global olarak artmakta olan enerji ihtiyacı ve enerji kaynaklarının kısıtlılığı, gerekse de enerji tasarrufu açısından bina uygulamaları için getirilen yasal düzenlemeler sebebiyle sıfır enerjili veya pasif bina uygulamaları alanındaki araştırmalara ihtiyaç artmaktadır. Mühendislik araştırma ve geliştirme faaliyetleri açısından düşünüldüğünde de FDM'lerin bu tarz sıfır enerjili binalara uygulanabilirliği tekniğin bilinen sınırlarını da zorlamaktadır.

Konu üzerindeki bu güncel motivasyon ve teknik zorluklar sebebiyle, bu tez çalışmasında elde edilen sayısal analiz sonuçlarının, ilgili literatüre değerli katkılar sunacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada incelenen kompozit duvar içerisindeki yapılar iç ortamdan dış ortama doğru sırasıyla iç sıva, tuğlalar, yalıtım malzemesi (XPS) ve dış sıvadan oluşmaktadır. RT20 parafin mumu duvar içinde üç farklı konuma yerleştirilerek sayısal analizler yürütülmüştür. Bu üç farklı durumda FDM, iç sıva ve tuğlalar arasına (FDM-1), tuğlalar ve yalıtım arasına (FDM-2) ve yalıtım ile dış sıva arasına (FDM-3) konumlandırılmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde, FDM'nin iç sıva ile tuğlalar arasına yerleştirildiği (FDM-1) durumda, sistem bileşenlerinin en düşük hacim ortalamalı sıcaklıkları sergilediği ve ısı kaybının en aza indirildiği gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre FDM-1 konfigürasyonunda diğer iki örneğe kıyasla, FDM'nin yüksek özgül enerjisinden ve gizli ısı kapasitesinden en iyi faydalanılan durum gerçekleşmiştir. Bu konfigürasyonda FDM üzerinde büyük miktarda ısı enerjisini absorbe edebilmiş ve ısının iç ortam dış ortama doğru kaybını en aza indirmiştir. Ayrıca, bu sayede yalıtım malzemesinin izole etmesi gereken ısı miktarını da en aza indirdiği için yalıtım malzemesi kalınlığı azaltılarak daha düşük bir maliyet avantajı sağlanabilir.

Buna karşılık, FDM'yi yalıtım ile dış sıva arasına yerleştirmek (FDM-3) ısı transferi performansı açısından önemli bir fayda sağlamamıştır. Çünkü bu bölgedeki sıcaklık farkları, dış sıvanın nispeten yüksek termal iletkenliği ve de yalıtım malzemesinin yüksek sıcaklığı iç

ortam tarafında hapsetmesi sebebiyle zaten minimum seviyelerde gerçekleşmektedir. Bu bulgu, FDM'nin bu konfigürasyondaki termal performansının daha az etkili olduğunu ve faydalarını en üst düzeye çıkarmak için duvarın içinde stratejik bir yerleşime ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, FDM'nin iç ortama en yakın şekilde konumlandırıldığı (FDM-1) konfigürasyon optimum durum olarak önerilmektedir. Bu durum anlaşılabilir çünkü FDM olarak kullanılan RT20 parafin mumunun katılaşma/sıvılaşma sıcaklıkları bir iç ortam sıcaklığına yakındır. Doğal olarak da bu faz değişim sıcaklık aralığına yakın çalışma sıcaklıklarında malzeme faz değiştirmekte ve üzerinde büyük miktarda ısıyı tutabilmektedir. Bu tez çalışmasında incelenmemiş olsa da, iç ortam sıcaklığını sabit tutmak için harcanan iş ortadan kalktığında ve ortamın sıcaklığı düşmeye başladığında, FDM şarj döngüsü esnasında üzerinde tutmuş olduğu ısıyı, deşarj döngüsüne girerek tekrar iç ortama vererek ısınma sağlama potansiyeline de sahiptir.

Genel olarak sonuçlar, FDM'nin bina duvarları içerisinde doğru konumlandırılarak entegrasyonu sayesinde bina duvarlarının ısııl performansını artırabileceğini göstermektedir. Ancak istenen enerji tasarrufunu ve ısı kaybı azaltımını elde etmek için FDM yerleşiminin dikkatli bir şekilde düşünülmesi ve hatta uygun deney tasarımı yaklaşımları ve sonrasında optimizasyon teknikleri ile değerlendirilmesi esastır.

Gelecekteki çalışmalar, gerçek zamanlı iklim koşulları altında FDM entegrasyonunun uzun vadeli etkilerini sayısal ve deneysel olarak da araştırabilir. Bu sayede bölgesel olarak da belirli bazı bina uygulamaları için yapıların projelendirmelerini etkileyebilecek ve değiştirebilecek FDM uygulamalarını önerme potansiyelini araştırabilir.

KAYNAKÇA

- Abdel-Mawla, M. A., Hassan, M. A., & Khalil, A.** (2022). Impact of placement and design of phase change materials in thermally activated buildings. *Journal of Energy Storage*, 56(Part A), 105886.
- Abhat, A.** (1983). Low temperature latent thermal energy storage system: Heat storage materials, *Solar Energy*, 30, 313–332.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., & Ali, A. A. A.** (2015). Properties and applications of foamed concrete: A review, *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005.
- Al-Absi, Z. A., Isa, M. H., & Ismail, M.** (2020). Phase Change Materials (PCMs) and Their Optimum Position in Building Walls. *Sustainability*, 12(4), 1294.
- Al-Yasiri, Q., & Szabó, M.** (2021). Effect of encapsulation area on the thermal performance of PCM incorporated concrete bricks: A case study under Iraq summer conditions. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00686.
- Ali, H. M.** (2024). Phase Change Materials for Thermal Energy Management and Storage Fundamentals and Applications, CRC Press Taylor & Francis Group.
- Alqallaf, H. J., & Alawadhi, E. M.** (2013). Concrete roof with cylindrical holes containing PCM to reduce the heat gain. *Energy Build*, 61, 73-80.
- Álvarez, S., Cabeza, L. F., Ruiz-Pardo, A., Castell, A., & Tenorio, J. A.** (2013). Building integration of PCM for natural cooling of buildings. *Applied Energy*, 109, 514-522.
- Anter, A. G., Sultan, A. A., Hegazi, A. A., & El Bouz, M. A.** (2023). Thermal performance and energy saving using phase change materials (PCM) integrated in building walls. *Journal of Energy Storage*, 67, 107568.
- Azmi, N. A., Arıcı, M., & Baharun, A.** (2021). A review on the factors influencing energy efficiency of mosque buildings. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126010.
- Bergan, P. G., & Clough, R. W.** (1972). Convergence Criteria for Iterative Processes. *AIAA Journal*, 10(8), 1107-1108.
- Bondareva, N. S., & Sheremet, M. A.** (2018). Conjugate heat transfer in the PCM-based heat storage system with finned copper profile: Application in electronics cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, 1275-1284.

- Chauhan, V., Yadav, A., & Koni, S. K.** (2017). Simulation of Melting Process of a Phase Change Material (PCM) using ANSYS (Fluent). *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5), 3289–3294.
- Cunha, S., Aguiar, I., & Aguiar, J. B.** (2022). Phase change materials composite boards and mortars: Mixture design, physical, mechanical and thermal behavior. *Journal of Energy Storage*, 53, 105135.
- de Gracia, A., & Cabeza, L. F.** (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414–419.
- Derradji, L., Errebai, F. B., & Amara, M.** (2017). Effect of PCM in Improving the Thermal Comfort in Buildings. *Energy Procedia*, 107, 157–161.
- Durakovic, B., Yildiz, G., & Yahia, M. E.** (2020). Comparative performance evaluation of conventional and renewable thermal insulation materials used in building envelops. *Tehnicki Vjesnik*, 27(1), 283–289.
- El Majd, A., Sair, S., Ousaleh, H. A., Berardi, U., Moulakhnif, K., Belouaggadia, N., El Bouari, A.** (2024). Advancing PCM research in building efficiency: A comprehensive investigation into PCM selection and critical integration strategies. *Journal of Building Engineering*, 96, 110485.
- Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C.** (2022). A Summary Review on Experimental Studies for PCM Building Applications: Towards Advanced Modular Prototype. *Energies*, 15(4), 1459.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A., & Al-Hallaj, S.** (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9–10), 1597–1615.
- Farid, M., & Sherrif, A.** (2010). Phase change materials for energy storage and thermal comfort in buildings. *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, 384–398.
- Findik, F.** (2022). Green concrete for structural buildings. *Heritage and Sustainable Development*, 4(1), 67–76.
- Frigione, M., Lettieri, M., & Sarcinella, A.** (2019). Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars. *Materials*, 12(8), 1260.

- Giro-Paloma, J., Martínez, M., Cabeza, L. F., & Fernández, A. I.** (2016). Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1059-1075.
- Gounni, A., El Alami, M., Mabouk, M. T., & Kheiri, A.** (2018). Experimental Study of Thermal Performance of a Reduced Scale Cavity Equipped With Phase Change Material: Study of the Optimal Phase Change Material Layer Location. *Journal of Solar Energy Engineering*, 140(4), 041001.
- Hamidi, Y., Malha, M., & Bah, A.** (2021). Analysis of the thermal behavior of hollow bricks walls filled with PCM: Effect of PCM location. *Energy Reports*, 7(Supplement 5), 105-115.
- Hassab, M. A., Sorour, M. M., Mansour, M. K., & Zaytoun, M. M.** (2017). Effect of volume expansion on the melting process's thermal behavior. *Applied Thermal Engineering*, 115, 350-362.
- Huang, X., Zhu, C., Lin, Y., & Fang, G.** (2019). Thermal properties and applications of microencapsulated PCM for thermal energy storage: A review. *Applied Thermal Engineering*, 147, 841-855.
- Islam, M. N., & Ahmed, D. H.** (2021). Delaying the temperature fluctuations through PCM integrated building walls—Room conditions, PCM placement, and temperature of the heat sources. *Energy Storage*, 3(5), e245.
- Iten, M., Liu, S., & Shukla, A.** (2016). A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 175-186.
- Jelle, B. P.** (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549-2563.
- Jin, X., Medina, M. A., & Zhang, X.** (2016). Numerical analysis for the optimal location of a thin PCM layer in frame walls. *Applied Thermal Engineering*, 103, 1057-1063.
- Junaid, M. F., Rehman, Z., Čekon, M., Čurpek, J., Farooq, R., Cui, H., & Khan, I.** (2021). Inorganic phase change materials in thermal energy storage: A review on perspectives and technological advances in building applications. *Energy and Buildings*, 252, 111443.
- Kalhor, K., & Emaminejad, N.** (2020). Qualitative and quantitative optimization of thermal insulation materials: Insights from the market and energy codes. *Journal of Building Engineering*, 30, 101275.

- Kenisarin, M., & Mahkamov, K.** (2016). Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 371-398.
- Khan, R. J., Bhuiyan, Z. H., & Ahmed, D. H.** (2020). Investigation of heat transfer of a building wall in the presence of phase change material (PCM). *Energy and Built Environment*, 1(2), 199-206.
- Kılıç, G. A.** (2024). Entegreli Termal Yönetim Sisteminde Gizli Isı Depolamanın Etkisi. *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2(1), 1-13.
- Kishore, R. A., Bianchi, M. V., Booten, C., Vidal, J., & Jackson, R.** (2020). Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in U.S. Buildings. *Energy and Buildings*, 226, 110355.
- Knupp, P. M.** (2001). Algebraic Mesh Quality Metrics. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 23(1), 193-218.
- Krishna, J., Kishore, P. S., & Solomon, A. B.** (2017). Heat pipe with nano enhanced-PCM for electronic cooling application. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 81, 84-92.
- Lamrani, B., Johannes, K., & Kuznik, F.** (2021). Phase change materials integrated into building walls: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110751.
- Li, W., & Chen, W.** (2019). Numerical analysis on the thermal performance of a novel PCM-encapsulated porous heat storage Trombe-wall system. *Solar Energy*, 188, 706-719.
- Liu, S., Wang, J., Meng, L., Hu, C., & Meng, X.** (2024). Location of the phase-change material layer on thermal performance of light-weight walls. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 19, 127–134.
- Liu, T., Liu, Y., Yang, L., Liu, J., Qiao, Y., & Yan, D.** (2020). Impacts of PCM Location and Thickness on Dynamic Thermal Characteristics of External Walls for Residential Buildings. *Proceedings of the 11th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning (ISHVAC 2019)* (s. 127–135). Singapore: Springer.
- Marani, A., & Nehdi, M. L.** (2019). Integrating phase change materials in construction materials: Critical review. *Construction and Building Materials*, 217, 36–49.
- Mazman, M.** (2006). *Gizli ısı depolaması ve uygulamaları*. Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Nazir, H., Batool, M., Osorio, F. J. B., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan,**

P., & Kannan, A. M. (2019). Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 129, 491-523.

Nejat, P., Jomehzadeh, F., Taheri, M. M., Gohari, M., & Majid, M. Z. (2015). A global review of energy consumption, CO₂ emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO₂ emitting countries). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 843-862.

Oliver, A. (2012). Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy Build*, 48, 1-7.

Osterman, E., Tyagi, V. V., Butala, V., Rahim, N. A., & Stritih, U. (2012). Review of PCM based cooling technologies for buildings. *Energy and Buildings*, 49, 37-49.

Paroutoglou, E. (2023). *Microencapsulated phase change materials for thermal energy storage in buildings: design, characterization and modelling*. Doktora Tezi. Faculty of Engineering and Science, Aalborg University, Aalborg.

Pielichowska, K., & Pielichowska, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, 65, 67-123.

Pirdavari, P., & Hossainpour, S. (2020). Numerical study of a Phase Change Material (PCM) embedded solar thermal energy operated cool store: A feasibility study. *International Journal of Refrigeration*, 117, 114-123.

Pomianowski, M., Heiselberg, P., & Zhang, Y. (2013). Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings. *Energy and Buildings*, 67, 56-69.

Raoux, S. (2009). Phase Change Materials. *Annual Review of Materials Research*, 39, 25-48.

Rathore, P. K., Gupta, N. K., Yadav, D., Shukla, S. K., & Kaul, S. (2022). Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103690.

Rathore, P., & Shukla, S. (2021). Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review. *Energy and Buildings*, 236, 110799.

Reddy, V. J., Ghazali, M. F., & Kumarasamy, S. (2024). Advancements in phase change materials for energy-efficient building construction: A comprehensive review. *Journal of*

Energy Storage, 81, 110494.

Refahi, A., Rostami, A., & Amani, M. (2024). Implementation of a double layer of PCM integrated into the building exterior walls for reducing annual energy consumption: Effect of PCM wallboards position. *Journal of Energy Storage*, 82, 110556.

Saffari, M., Roe, C., & Finn, D. P. (2022). Improving the building energy flexibility using PCM-enhanced envelopes. *Applied Thermal Engineering*, 217, 119092.

Salunkhe, P. B., Shembekar, P. S. (2012). A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 5603-5616.

Santos, T., Nunes, L., & Faria, P. (2017). Production of eco-efficient earth-based plasters: Influence of composition on physical performance and bio-susceptibility. *Journal of Cleaner Production*, 167, 55-67.

Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.

Shukla, A., Buddhi, D., & Sawhney, R. L. (2008). Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. *Renewable Energy*, 33(12), 2606-2614.

Shukla, N., Fallahi, A., & Kosny, J. (2012). Performance characterization of PCM impregnated gypsum board for building applications. *Energy Procedia*, 30, 370-379.

Souayfane, F., Fardoun, F., & Biwole, P. H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Energy and Buildings*, 129, 396-431.

Stritih, U., Tyagi, V. V., Stropnik, R., Paksoy, H., Haghighat, F., & Joybari, M. M. (2018). Integration of passive PCM technologies for net-zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 41, 286-295.

Sun, M., Liu, T., Sha, H., Li, M., Liu, T., Wang, X., Jiang, D. (2023). A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications. *Journal of Energy Storage*, 68, 107713.

Sun, X., Zhang, Y., Xie, K., & Medina, M. A. (2022). A parametric study on the thermal response of a building wall with a phase change material (PCM) layer for passive space cooling. *Journal of Energy Storage*, 47, 103548.

- Terhan, M., & Ilgar, G.** (2023). Investigation of used PCM-integrated into building exterior walls for energy savings and optimization of PCM melting temperatures. *Construction and Building Materials*, 369, 130601.
- Tian, G., Lv, H., Huang, J., Liu, P., & Feng, W.** (2021). Experimental study on the heat transfer characteristics of different walls with phase change materials in summer. *Journal of Building Engineering*, 44, 103354.
- Tunçbilek, E., Arıcı, M., Krajčák, M., Nižetić, S., & Karabay, H.** (2020). Thermal performance based optimization of an office wall containing PCM under intermittent cooling operation. *Applied Thermal Engineering*, 179, 115750.
- Ushak, S., Suárez, M., Véliz, S., Fernández, A. G., Flores, E., & Galleguillos, H. R.** (2016). Characterization of calcium chloride tetrahydrate as a phase change material and thermodynamic analysis of the results. *Renewable Energy*, 95, 213–224.
- Vukadinović, A., Radosavljević, J., & Đorđević, A.** (2020). Energy performance impact of using phase-change materials in thermal storage walls of detached residential buildings with a sunspace. *Solar Energy*, 206, 228–244.
- Wahid, M. A., Hosseini, S. E., Hussien, H. M., Akeiber, H. J., Saud, S. N., & Mohammad, A. T.** (2017). An overview of phase change materials for construction architecture thermal management in hot and dry climate region. *Applied Thermal Engineering*, 112, 1240–1259.
- Wang, X., Li, W., Luo, Z., Wang, K., & Shah, S. P.** (2022). A critical review on phase change materials (PCM) for sustainable and energy efficient building: Design, characteristic, performance and application. *Energy and Buildings*, 260, 111923.
- Wu, D., Rahim, M., el Ganaoui, M., Djedjig, R., Bennacer, R. & Liu, B.** (2021). Experimental investigation on the hygrothermal behavior of a new multilayer building envelope integrating PCM with bio-based material. *Build Environ*, 201, 107995.
- Xu, B., & Li, Z.** (2013). Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage. *Applied Energy*, 105, 229–237.
- Yang, K., Venkataraman, M., Zhang, X., Wiener, J., Zhu, G., Yao, J., & Militky, J.** (2022). Review: incorporation of organic PCMs into textiles. *Journal of Materials Science*, 57, 798–847.
- Yoo, J., Chang, S. J., Yang, S., Wi, S., Kim, Y. U., & Kim, S.** (2021). Performance of the hygrothermal behavior of the CLT wall using different types of insulation; XPS, PF board and

glass wool. *Case Studies in Thermal Engineering*, 24, 100846.

Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.

Zhang, Y., Jia, Y., & Wang, S. S. (2004). 2D nearly orthogonal mesh generation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 46(7), 685-707.

