



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

## Havalandırılmalı Duvar Konstrüksiyonlarında Faz Değiştiren Malzeme Kullanımının Konut Binalarının Enerji Yüklerine Etkisinin İncelenmesi

 Deniz SAYLAM CANIM<sup>a</sup>,  Sibel MAÇKA KALFA<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> MİMARLIK Bölümü, MİMARLIK Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE

<sup>b</sup> MİMARLIK Bölümü, MİMARLIK Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, TÜRKİYE

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: sibelmacka@ktu.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.870517

### Öz

Binalarda enerjinin önemli bir kısmı ısıtma ve soğutma için kullanılmaktadır. Avrupa direktifi (EPBD-Recast) bu enerji kullanımından kaynaklı olumsuz çevresel etkileri azaltmak amacıyla, daha yüksek ısı yalıtımı seviyelerini ve hafif binaları teşvik etmektedir. Hafif binaların en büyük dezavantajı ise düşük termal kütleleridir. Son yıllarda hafif binaların termal kütlelerini artırarak enerji tasarrufu sağlayan ve enerjiyi termal kütlede gizli ısı olarak depolayan faz değiştiren malzemeler (FDM), bir alternatif olarak büyük ilgi görmekte ve binaların enerji yüklerini azaltabileceği yönünde önemli görüşlere yer verilmektedir. Bu çalışmada amaç bina kabuğunda dış duvar konstrüksiyonlarında FDM kullanımı ile ne oranda enerji yüklerinde bir iyileştirme sağlanabileceğinin tespit edilmesidir. Bu bağlamda, bu çalışma iki aşamadan oluşturulmuştur. İlk aşamada literatür araştırması ile faz değiştiren malzemelerin binada kullanım yerleri, çeşitleri, birleştirme teknikleri ve kullanılan simülasyon programları başlıklarında veriler elde edilmiştir. İkinci aşamada literatür araştırmasında elde edilen veriler doğrultusunda FDM'nin referans duvar konstrüksiyonlarının iç yüzeyine hava boşluğu bırakılarak uygulanmasına karar verilmiştir. Bu amaçla 21 ve 23 °C'lik erime noktasına sahip BioPCM'ler, 24, 36, 48 ve 60 mm'lik kalınlıklarda kullanılarak 15, 25, 35 ve 45 mm'lik hava boşluklarına sahip duvar konstrüksiyonlarının iç yüzeyine uygulanmıştır. Oluşturulan duvar konstrüksiyonlarına ait senaryolar ılıman-nemli iklime sahip Trabzon ili iklim verileri kullanılarak Design Builder simülasyon programı ile varsayımsal olarak tasarlanmış tek katlı 150 m<sup>2</sup> taban alanına sahip bir konutun dış duvar konstrüksiyonlarında kullanılmıştır. Senaryoların yıllık toplam ısıtma-soğutma enerji yükleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, FDM kullanımı ile geliştirilen havalandırılmalı duvar konstrüksiyonlarının bina enerji yüklerinde %2 ile %6 arasında iyileştirme sağlayabileceği ve en önemlisi FDM'lerin her iklim koşulunda bina kabuğunda kullanıma uygun, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir malzeme olarak geliştirilmesinin büyük önem arz ettiği belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Faz değiştiren malzeme, Havalandırılmalı dış duvar, Gizli ısı, Enerji yükü, Enerji simülasyonu

## Investigating of Effects on Energy Loads of Residential Buildings of Using Phase Change Metarials in the Ventilated Exterior Wall Constructions

### ABSTRACT

A significant portion of the energy in buildings is used for heating and cooling. The European directive (EPBD-Recast) promotes higher levels of thermal insulation and lightweight buildings in order to reduce the negative

environmental impacts from this energy use. The biggest disadvantage of lightweight buildings is their low thermal mass. In recent years, PCM, which save energy by increasing the thermal mass of lightweight buildings and store energy as latent heat in thermal mass, have attracted great interest as an alternative and important views are given that they can reduce the energy loads of buildings. The aim of this study is to determine to what extent energy loads can be improved by using PCM in exterior wall constructions in the building envelope. In this context, this study is composed of two stages. In the first stage, data were obtained under the titles of usage places, types, joining techniques and used simulation programs of phase change materials with the literature research. For this purpose, BioPCMs with melting points of 21 °C and 23 °C were used in thicknesses of 24, 36, 48 and 60 mm and applied to the inner surface of the wall construction with 15, 25, 35 and 45 mm air gaps. The scenarios of the wall construction created were used in the exterior wall constructions of a single-storey residence with a floor area of 150 m<sup>2</sup>, which was hypothetically designed with the Design Builder simulation program, using the climate data of the province of Trabzon with a moderate-humid climate. Annual total heating-cooling energy loads of the scenarios were calculated. As a result of the study, it has been determined that ventilated wall constructions developed with the use of PCM can provide an improvement between 2% and 10% in building energy loads, and most importantly, it is of great importance that PCMs are developed as a low cost and sustainable material suitable for use in the building envelope in all climatic conditions.

*Keywords: Phase change material, Ventilate dexterior wall, Latent heat, Energy load, Energy simulation*

## I. GİRİŞ

Avrupa Birliği'nde "EPBD – Binalarda Enerji Performansı Direktifi" ile birlikte binalarda enerji verimliliğini sağlamak amacı ile önemli gelişmeler ve yaptırımlar olmuştur. EPBD 2010/31/EU kapsamında, 2020 yılına kadar tüm Avrupa Birliğinin karbon salınımının 1990 yılındaki seviyelerin %20 altına düşmesi, tüm enerji tüketiminin %20 azaltılması, kullanılan enerjinin %20'sinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması ve tüm binaların yaklaşık sıfır enerjili olması hedefleri belirlenmiştir [1]. Enerji kaynaklarını sağlama bakımından yüksek oranda dışa bağımlı olan Türkiye için de binaların enerji performansını artırmak büyük önem taşımaktadır. Bu sayede ihtiyaç duyulan enerji miktarı azaltılabilecektir. Avrupa'da belirlenen hedeflere ulaşabilmek için yüksek ısı yalıtımı seviyeleri ve hafif binalar teşvik edilmektedir Hafif binaların en büyük dezavantajı düşük termal kütleleri nedeniyle büyük sıcaklık dalgalanmalarına meyilli olmalarıdır. Bina kabuğunda, enerjiyi gizli ısı olarak depolayan faz değiştiren malzeme (FDM) kullanımı ile duvar termal kütlelerini artırmak, ısı dalgalanmalarını ve bina yükünü azaltmak mümkündür. Gizli ısı depolama, termal enerjiyi depolamanın en etkin yollarından biri olarak, ısı depolama ve salıverme arasında küçük bir sıcaklık farkı olan ve yüksek depolama yoğunluğu sağlayan bir yöntemdir [2]. Su/buz yaklaşık 330 kJ/kg'lık faz değişim ısısı ile insan çevresinde terk edilmiş olarak bulunan en iyi bilinen FDM'dir. Bu nedenle kuzey kutup bölgelerinde yaşayan halk geleneksel yapıları olan igloların yapımında yüzyıllardır faz değişimi-gizli ısı konseptini kullanmaktadır. İglo yöre halkını soğuktan koruyan oldukça efektif, yapımı kolay bir malzeme olarak buz ve karın kullanıldığı bir yapıdır. Gonzales - Espada (2001)'ya göre dış hava sıcaklığının -45 °C olduğu en sert kış dönemlerinde bile, igloların iç sıcaklığı 9 °C-15 °C arasında değişim göstermektedir [3]. Teorik olarak FDM kullanımı ile bina kabuğunun enerji tüketiminin azaltılacağı biliniyor olmasına rağmen özellikle ülkemizde bu kapsamda yapılan çalışma sayısı azdır.

Bu çalışmada, hem ekolojik, hem de yeni nesil pasif bir yaklaşım olarak bina kabuğunda kullanılmaya yeni başlanmış olan faz değiştiren malzeme ile oluşturulmuş farklı havalandırılmalı duvar konstrüksiyonlarının varsayımsal olarak tasarlanmış referans tek katlı bir konut binasının enerji yüklerine ne oranda etki edeceğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu hedef doğrultusunda yapılan çalışmada konut binasında FDM'siz ve FDM'li farklı kalınlıkta havalandırma boşluğuna sahip dış duvar konstrüksiyonları uygulanmış ve FDM'li konstrüksiyonlarda erime noktası sıcaklığı ve FDM kalınlığı değiştirilerek yapılan simülasyonlar ile bina enerji yüklerine etkileri analiz edilmiştir.

## A. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (FDM)

Faz değiştiren malzemeler bina kabuğunda enerjiyi gizli ısı olarak depolayan ve bu sayede bina kabuğu termal kütlesini artıran yeni nesil pasif malzemelerdir. Dar bir sıcaklık aralığında yüksek miktarda enerji depolamak zorunda olan faz değiştiren malzemeler, geleneksel yapı malzemeleri (beton, taş) ile kıyaslandığında çok daha hafif olmalarına rağmen geleneksel yapı malzemelerinden 15 kat daha fazla ısıyı birim hacimlerinde depolayabilmektedirler. Bu özelliğinden kaynaklı olarak FDM'ler hafif ve yüksek termal kütleyle sahip bina uygulamalarında kullanımı uygun bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır. Ağır termal kütlesini hafifletmek ve kullanımını daha pratik hale getirmek için FDM ile oluşturulmuş trombe duvar modeli üzerine yapılan çalışmalar, duvar termal kapasitesini klasik beton duvara göre ortalama %50 artırmanın mümkün olduğunu göstermiştir [4-6]. FDM kullanımı ile ince bir duvarda yoğun termal kütle elde etmek mümkün olmakla beraber elde edilen FDM'li duvarın zaman gecikmesi kalın beton duvara göre çok daha kısa olmaktadır. Bu durum sağlanan enerjinin odaya ortalama iki kat daha hızlı aktarılabilmesini sağlamaktadır. Fakat azalan zaman gecikmesi, gün boyunca kullanılan ofis, alışveriş merkezi, üniversite ve okul gibi yapılar için kısmın bir avantaj olarak görülse de akşam kullanımı yoğun olan konut ve hastane gibi yapılar için bir dezavantaj olabilmektedir [2]. FDM ve ısı yalıtımının karşılaştırılması yapıldığında; bina kabuğuna yalıtım malzemesi eklemek, binanın ısı kaybını azaltıp ısı direnç değerini düşürürken, bina kabuğunda FDM kullanımı binanın termal kütlesini yani termal enerji deposunu arttırarak, pasif ısıtma-soğutma sağlamaktadır. Bu nedenle FDM' nin tek başına kullanıldığı durumlarda yaz aylarında soğutma yüklerinde daha iyi performans elde edilirken yalıtımla beraber kullanıldığı durumlarda ısıtma mevsimindeki verim artmaktadır. Bu durum yaşam döngüsü maliyeti (LCC) açısından değerlendirildiğinde ise FDM'nin tek başına kullanıldığı durumda geri ödeme süresi (yaklaşık 14,5 yıl), ısı yalıtımı ile beraber kullanıldığı duruma göre daha uzun (ortalama 7,5 yıl) olmaktadır [7]. Bina kabuğunda FDM kullanımı iklim bölgelerine göre değerlendirildiğinde, FDM'nin soğuk iklimlerde kullanımı ile gerçekleştirilen çalışmalarda, en soğuk aylarda çok etkili olmamakla birlikte yıl bazında değerlendirildiğinde FDM ile ortalama %20 verim elde edildiği görülmüştür. Gece ve gündüz sıcaklık farkının fazla olmadığı ılıman bölgelerde ise FDM'nin bina kabuğunun iç kısmında kullanılmasının iç mekan ısı dalgalanmalarının azaltılması açısından daha uygun olduğu belirtilmiştir [8]. Gece ve gündüz sıcaklık farkının fazla olduğu iklim bölgelerinde ise, FDM'nin kabuğun dış tarafında kullanımının etkili olduğu görülmüş, böylece gündüz FDM tarafından depolanan ısı, soğuk gecelerde tüketilerek bir sonraki gün yeniden şarj olabilmesi sağlanmıştır [8, 9]. FDM'lerin soğutma amacı ile kullanıldığı sıcak iklimlerde gece havalandırması (4ac / h'ye kadar), binalarda FDM'lerin etkinliğini en üst düzeye çıkarmak için önemli bir konudur. Gece havalandırması ile FDM'lerin ısı deşarjı desteklenerek, gündüz sıvılaşan FDM'nin gece katılaşması sağlanmakta, böylece tam bir çalışma döngüsü elde edilebilmektedir [10].

Teorik olarak çoğu FDM entegre bina kabuğu bileşeninin günde en az bir kere erime/ katılaşma süreci geçirmesi beklenir. Bu nedenle mümkün olduğunca az FDM kullanarak FDM'nin depolama/ bırakma kapasitesini arttırmak gerekir. Yani kullanılacak FDM'nin optimizasyonu yapılmalıdır. Tam bir günlük döngüde depolanan enerji FDM hacmine orantılıdır. FDM tamamen eridikten sonra, sadece hissedilir ısı emilir. FDM'lerin düşük ısıl iletkenliği nedeniyle, bu sistemlerin şarj etme ve boşaltma işlemleri sırasında doğal olarak yavaş bir ısı transferine sebep oldukları unutulmamalıdır. FDM kütlesi fazla tahmin edilirse, ısının FDM'ye nüfuz etmesi için gereken süre güneş ışığı süresinden daha büyük olabilir ve erime süreci tamamlanamaz. Benzer şekilde, eğer FDM kütlesi fazla tahmin edilirse, iç mekanlarda ısının serbest bırakılması için gereken süre, boşalma süresinden daha büyük olabilir ve katılaşma süreci tamamlanamaz. Böylece, FDM ne erimiş ne de katılaşmazsa, yetersiz termal depolama elde edilir [11]. Çok çeşitli sıcaklıklarda eriyen ve katılaşan çok sayıda faz değiştiren malzeme mevcuttur. Fakat bina uygulamalarında kullanılan FDM'ler sınırlıdır. Bunun nedeni sadece insan konfor sıcaklığına (20°C-28°C) yakın sıcaklıklarda faz değişimine sahip FDM'lerin bina uygulamalarında kullanılabilmesidir. Günümüzde bilinen organik ve inorganik FDM'ler; parafinler, yağ asitleri, şeker alkoller, tuz hidratları ve metaliklerdir. Binalarda kullanıma uygun FDM'ler parafin ve yağ asitleridir. FDM'ler geleneksel yapı malzemelerine doğrudan birleştirme, daldırma ve kapsülleme olmak üzere üç yöntem ile entegre edilir. Doğrudan birleştirme tekniğinde, sıvı veya toz FDM üretim sırasında alçı, beton veya sıva gibi inşaat malzemeleriyle doğrudan karıştırılırken; daldırma tekniğinde, alçı levha, tuğla veya beton blok gibi gözenekli yapı malzemeleri, erimiş FDM'nin içine daldırılarak uygulanır [11,12]. Kapsülleme

teknîği ise FDM'yi çevre ile zararlı etkileşimlerden korumak için bir engel görevi görerek, ısı transferi için yeterli yüzey alanı, yapısal dayanıklılık ve kolay kullanım sağlar. Bu nedenle bina elemanlarında kullanımı en uygun olan birleştirme tekniğidir. Mikro kapsülleme ve makro kapsülleme olmak üzere iki tip kapsülleme tekniği vardır.

## II. YÖNTEM

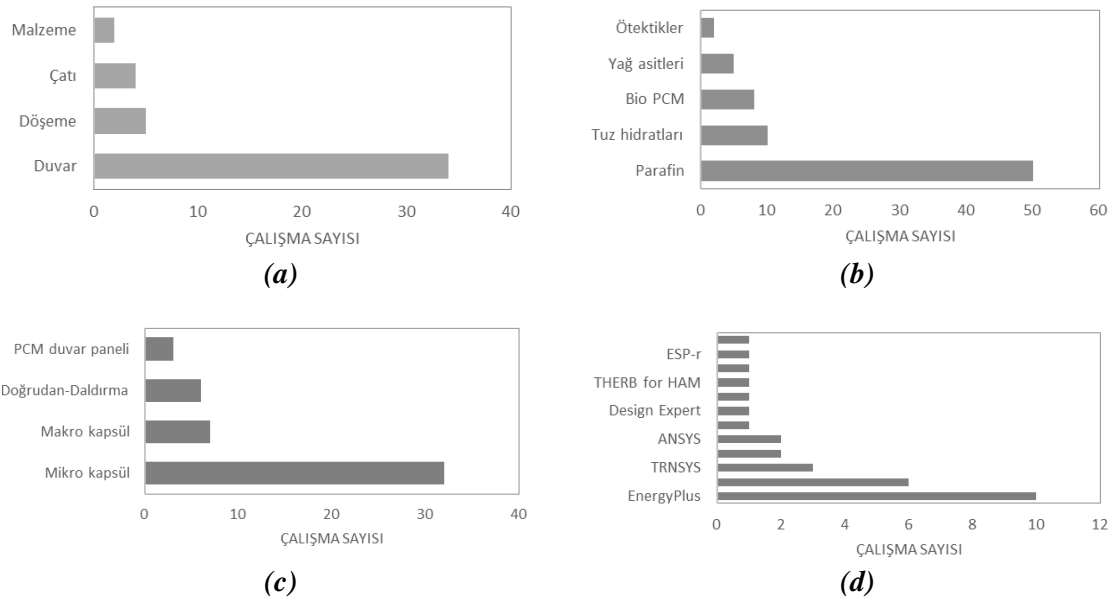
Bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama olan literatür çalışması sonucunda elde edilen veriler ışığında ikinci aşama olan simülasyon çalışmasına veri sağlanmıştır.

### A. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bina kabuğunun uzun ömürlü olabilmesi için FDM'nin kullanıldığı bina bileşeni, FDM çeşidi, bina bileşeni ile birleştirilme tekniği ve faz değişim sıcaklık aralığı önemlidir. Yapılan literatür çalışmasında son yıllarda yapılmış FDM ile ilgili yaklaşık 50 bilimsel yayın incelenmiştir. Bu çalışmalardan faz değiştiren malzemelerin çoğunlukla duvar bileşeninde kullanıldığı, parafinin en fazla tercih edilen, BioPCM'in ise son yıllarda üzerinde en fazla çalışmalar yapılan faz değiştiren malzeme çeşidi olduğu görülmüştür. Şekil 1'de çalışmada kullanılan BioPCM görülmektedir. Literatür çalışması sonucunda elde edilen veriler Şekil 2'de grafikler halinde ifade edilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan faz değiştiren malzeme (BioPCM) [13]



Şekil 2. (a) FDM'nin kullanıldığı bina bileşeni (b) FDM çeşidi (c) FDM'nin birleştirilme tekniği, (d) Çalışmalarda kullanılan simülasyon programları [14-62]

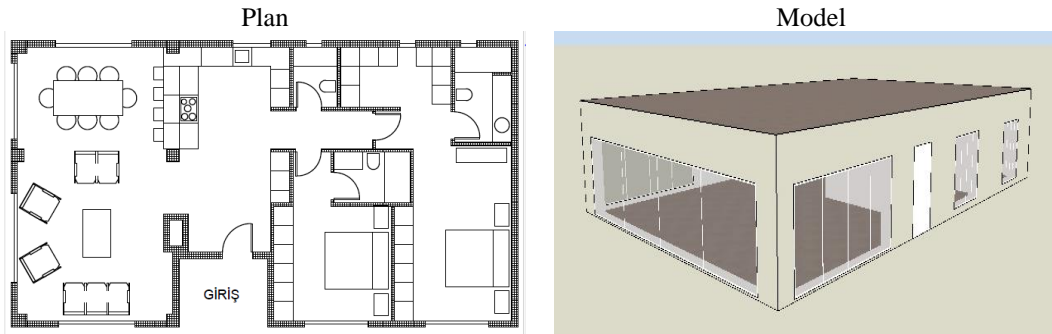
Literatür çalışmasından, FDM erime noktası sıcaklık aralığı üzerine yapılan çalışmalar, soğutma amaçlı kullanımlarda 22-24 °C aralığının en uygun aralık olduğunu [14], doğrudan güneş ışınımı ile ısıtmada ise ortalama oda sıcaklığının 1-3 °C üzerinde olması gerektiği bilgisine ulaşılmıştır [15,16]. Tablo 1’de literatür çalışmasında elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

**Tablo 1.** Literatür incelemesi sonucu çalışmalarda en fazla tercih edildiği görülen veriler [14-62]

FDM'nin kullanıldığı yapı bileşeni	FDM çeşidi	FDM birleştirme tekniği	FDM erime noktası sıcaklık aralığı	Kullanılan program
Dış Duvarlar	Parafin BioPCM	Mikro kapsülleme	Soğutma için: 22-24°C Isıtma için: Oda sıcaklığı + 1-3 °C	EnergyPlus DesignBuilder

## B. ENERJİ SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Literatür çalışmasında elde edilen veriler ışığında, çalışmada Design Builder simülasyon programında örnek bir varsayımsal konut binası oluşturulmuştur. Oluşturulan tek katlı, teras çatılı örnek konuta ait uzunluk ölçüleri 15mx10m olup, taban alanı 150 m<sup>2</sup> olarak tasarlanmıştır. 2+1 olarak düşünülen örnek konutta; salon, açık mutfak ve biri soyunma odalı iki yatak odası bulunmaktadır. Konutta mekanik havalandırma kullanılmamıştır. Şekil 2’de oluşturulan konutun planı ve Design Builder programı ile oluşturulan model görünüşü verilmiştir.



**Şekil 2.** Referans bina planı ve model görünüşü [63]

### B.1. Bina Kabuğuna Ait Bilgiler

Bina kabuğu elemanlarının U değerleri belirlenirken TS 825 standardında belirtilen aralıklarda olmasına dikkat edilmiştir. Dış duvar gövde malzemesi olarak ısı geçirgenliğinin düşük olmasından dolayı gaz beton, ısı yalıtım malzemesi olarak ise yaygın kullanımından dolayı Ekstrüde Polistiren (XPS) tercih edilmiştir. Bina kabuğu saydamlık oranı TS 825’in konutlar için uygun görüldüğü aralıklar dikkate alınarak %30 olarak varsayılmıştır [64]. Çift tabaka camlı, PVC doğramalı bir pencere sistemi tercih edilmiştir. Pencerelerde kullanılan cam sistemi argon gaz dolguludur ve kalınlıkları 6mm x 13mm x 6mm’dir. Örnek konut binasına ait kabuk elemanlarının fiziksel ve boyutsal özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Bina kabuğu elemanlarının fiziksel ve boyutsal özellikleri [63,64]

Eleman	Katman	Isıl iletkenlik $\lambda$ (W/mK)	Kalınlık, $d$ (mm)	Isı geçirgenlik kat, $U$ (W/m <sup>2</sup> K)	
Çatı		Çakıl	0,36	40	0,37
		Su yalıtımı	0,027	13	
		Eğim betonu	0,8	50	
		XPS ısı yalıtımı	0,034	70	
		B.A Döşeme	2,5	120	
		Alçı sıva	0,25	25	
Dış Duvar		Dış sıva	0,3	30	0,43
		XPS ısı yalıtımı	0,034	50	
		Gaz beton blok	0,51	200	
		Havalandırma boşluğu	-	15	
		Havalandırma boşluğu	-	25	
		Havalandırma boşluğu	-	35	
Havalandırma boşluğu	-	45			
Havalandırma boşluğu	-	45			
Alçı sıva	0,25	24			
Zemin Döşemesi		Ahşap parke	0,14	20	0,32
		Koruma betonu	0,8	50	
		XPS ısı yalıtımı	0,034	70	
		Eğim betonu	0,8	50	
		Su yalıtımı	0,027	13	
		Grobeton	0,8	100	
		Blokaj	0,36	150	
Pencere	Doğrama	Ahşap	0,13	50	2,27
	Cam sistemi	Berrak cam+argon+berrak cam	-	6mm+13mm+6mm	2,66

## B.2. FDM'li Duvar Konstrüksiyonlarına Ait Senaryolar

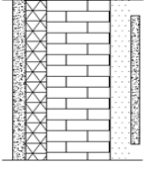
Faz değiştiren malzemelerin bina enerji performansı üzerine etkisini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada kullanılacak parametreler Tablo 1'deki veriler baz alınarak belirlenmiştir. Belirlenen parametreler Tablo 3'de verilmiştir.

**Tablo 3.** Çalışmada kullanılan parametreler

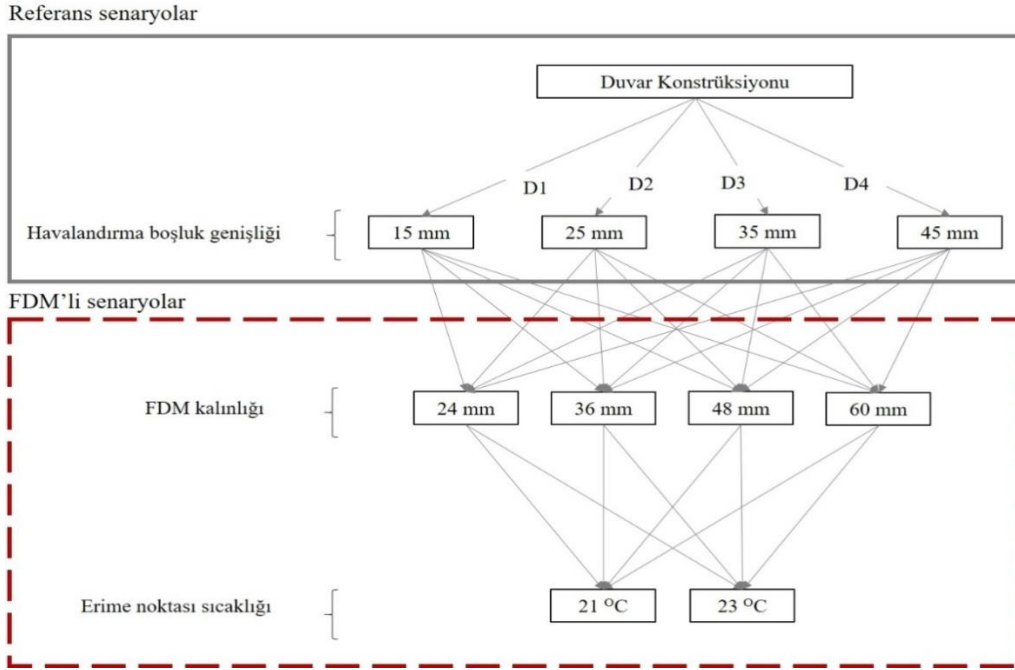
FDM'nin kullanıldığı yapı bileşeni	FDM çeşidi	FDM birleştirme teknigi	FDM erime noktası sıcaklık aralığı	Kullanılan Simülasyon program
Dış Duvarlar	BioPCM	Mikro kapsülleme	21 °C ve 23 °C	Design Builder

Tablo 3'deki parametreler doğrultusunda 21 ve 23 °C'lik erime noktasına sahip BioPCM'lerin 24, 36, 48 ve 60 mm kalınlıklarda 15, 25, 35 ve 45mm'lik farklı hava boşlukları ile dış duvar iç yüzeyine uygulanmasına karar verilmiştir. FDM kalınlıkları Design Builder simülasyon programı içerisinde kayıtlı bulunan BioPCM kalınlıkları baz alınarak belirlenmiştir [63]. Bu durumda oluşturulan yeni duvar modelinin katman ve kalınlıkları Tablo 4'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Simülasyonu yapılan dış duvar modeline ait parametreler [63,64]

Dış Duvar Konstrüksiyonu	Katmanlar	Kalınlık, $d$ (mm)
	Dış sıva	30
	Isı yalıtımı	50
	Gaz beton	200
	Hava boşluğu	15,25,35,45
	BioPCM	24,36,48,60

Şekil 3’de referans senaryolar ve faz değiştiren malzemenin kullanıldığı senaryolar görülmektedir. 4 referans senaryo olmak üzere toplam 36 senaryonun enerji simülasyonu gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.** Çalışmada ele alınan senaryolar

Çalışma alanı olarak seçilen ılıman-nemli iklim bölgesindeki Trabzon şehrinin simülasyonlarda kullanılacak iklimsel veri dosyaları epw dosya formatında Design Builder simülasyon programına yüklenmiştir. Veri girişleri tamamlandıktan sonra örnek konut binasının mevcut durum ve oluşturulan senaryolardaki enerji simülasyonları Design Builder simülasyon programında yapılmış, her bir duvar modeli için yıllık ısıtma, soğutma ve toplam enerji yükleri hesaplanmıştır.

### **III. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME**

Design Builder enerji simülasyon programında Şekil 3’de detaylı olarak gösterildiği üzere hava boşluk genişliğinin değişimine göre 4 referans senaryo dahil olmak üzere faz değiştiren malzeme kalınlığı ve FDM’nin erime noktası sıcaklığı değiştirilerek 36 senaryo oluşturulmuştur. Senaryoların Design Builder programında simülasyonu yapılarak her bir senaryoya ait yıllık ısıtma- soğutma toplam enerji yükleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5 ve Tablo 6’da verilmiştir.

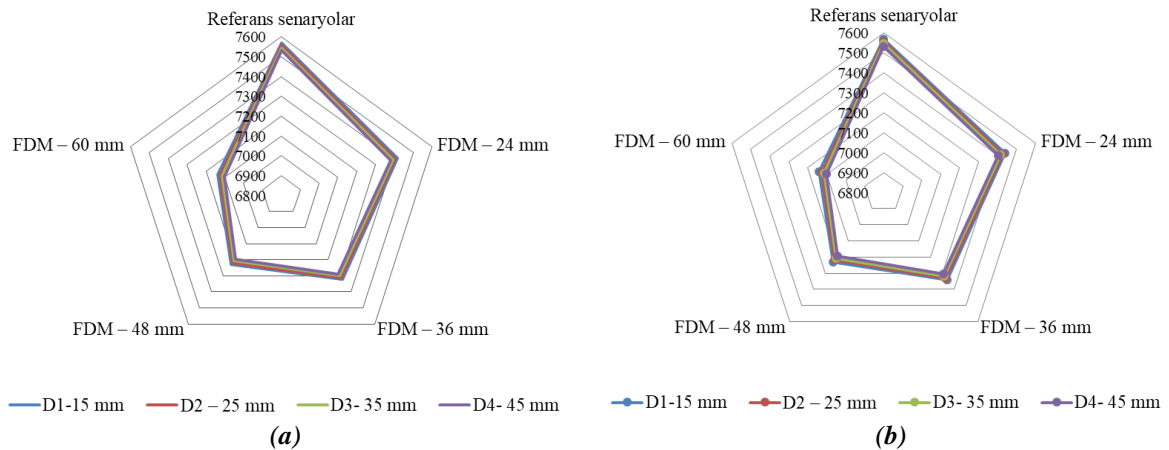
**Tablo 5.** 21 °C erime noktasına sahip BioPCM ile oluşturulmuş duvar konstrüksiyonu senaryoları ile elde edilen yıllık toplam enerji yükleri

Hava boşluk genişliği	Enerji Yüğü (kWh)				
	Referans senaryolar	FDM – 24 mm	FDM – 36 mm	FDM – 48 mm	FDM – 60 mm
D1-15 mm	7568,07	7414,12	7323,62	7231,38	7137,15
Verim	—	% 2	% 3,2	% 4,4	% 5,7
D2 – 25 mm	7556,05	7402,28	7311,82	7219,35	7125,07
Verim	—	% 2	% 3,2	% 4,4	% 5,7
D3- 35 mm	7544,05	7390,45	7299,85	7207,36	7113,12
Verim	—	% 2	% 3,2	% 4,4	% 5,7
D4- 45 mm	7532,22	7378,66	7287,87	7195,29	7101,13
Verim	—	% 2	% 3,2	% 4,4	% 5,7

**Tablo 6.** 23 °C erime noktasına sahip BioPCM ile oluşturulmuş duvar konstrüksiyonu senaryoları ile elde edilen yıllık toplam enerji yükleri (kWh)

Hava boşluk genişliği	Enerji Yüğü (kWh)				
	Referans senaryolar	FDM – 24 mm	FDM – 36 mm	FDM – 48 mm	FDM – 60 mm
D1-15 mm	7568,07	7437,79	7341,24	7230,87	7138,91
Verim	—	% 1,7	% 3	% 4,5	% 5,7
D2 – 25 mm	7556,05	7426,19	7329,36	7218,96	7126,91
Verim	—	% 1,7	% 3	% 4,5	% 5,7
D3- 35 mm	7544,05	7414,41	7317,6	7206,11	7114,75
Verim	—	% 1,7	% 3	% 4,5	% 5,7
D4- 45 mm	7532,22	7402,73	7305,74	7195,08	7102,68
Verim	—	% 1,7	% 3	% 4,5	% 5,7

Tablo 5 ve Tablo 6’da elde edilen sonuçlar incelendiğinde referans senaryolarda hava boşluk genişliğinin artmasıyla bina enerji yüklerinde lineer bir düşüşün olduğu görülmüştür. Tablolarda verilen verim değerleri ise ilgili satırdaki referans durum senaryosuna göre enerji yükünde elde edilen yüzdelik olarak verimi ifade etmektedir. Verim değerleri sütunlar için değil aynı hava boşluğu genişliğine sahip senaryolar içindir. İncelenen tüm senaryolara ait enerji yükleri Şekil 4’de grafik olarak ifade edilmiştir.



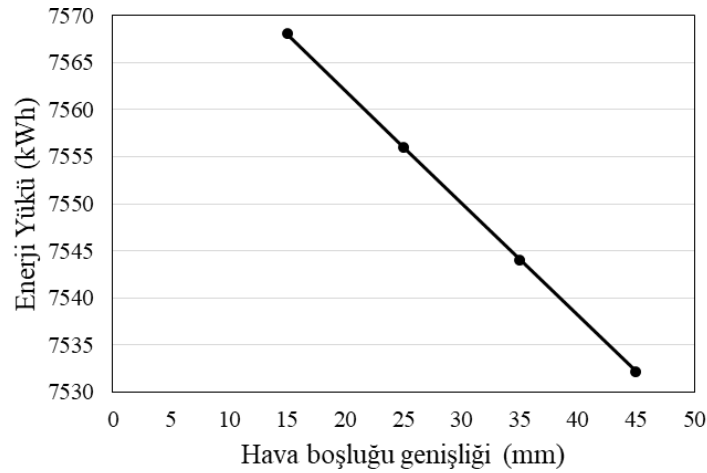
**Şekil 4.** İncelenen senaryoların enerji yüklerinin karşılaştırılması (kWh) (a) 21°C erime noktasına sahip FDM’li senaryolar (b) 23°C erime noktasına sahip FDM’li senaryolar



Şekil 4 incelendiğinde, FDM'nin duvar iç yüzeyinde kullanımıyla enerji yüklerinde gözle görülür bir iyileşme sağlandığı, bu iyileşmenin etkisinin FDM'nin kalınlığının artırılmasıyla arttığı anlaşılmıştır. Farklı iki erime noktası sıcaklığına sahip FDM'lerin ise enerji yüklerinde farklı etki yarattığı, düşük erime noktasına sahip FDM'lerin ılıman-nemli iklim bölgesinde daha etkin olduğu gözlenmiştir. 21°C erime noktası sıcaklığında enerji yükü açısından referans FDM'siz senaryolara göre %2 ile %5,7 arasında bir verim elde edilirken, 23°C erime noktası sıcaklığında elde edilen verim %1,7 ile %5,7 arasında değişmiştir. Her iki erime noktası sıcaklığında da en iyi verim 60 mm kalınlığında FDM'li ve hava boşluk genişliği 45 mm olan duvar konstrüksiyonu ile elde edilmiştir.

## A. REFERANS SENARYO DUVAR KONSTRÜKSİYONLARINDA HAVA BOŞLUK GENİŞLİĞİNİN BİNA ENERJİ YÜKLERİNE ETKİSİ

Referans senaryoların Tablo 5 ve Tablo 6'da verilen enerji yüklerine ait veriler incelendiğinde, Şekil 6'da görüldüğü üzere duvar konstrüksiyonunda sadece hava boşluk genişliğinin değişimiyle bina yıllık toplam enerji yükünde lineer bir iyileşme sağlanabileceği sonucuna varılmıştır. Diğer bir ifadeyle Şekil 6'dan da görüldüğü üzere hava boşluğu aynı zamanda bir yalıtım görevi gördüğü için genişliği arttıkça enerji yüklerine pozitif yönde etki etmektedir.

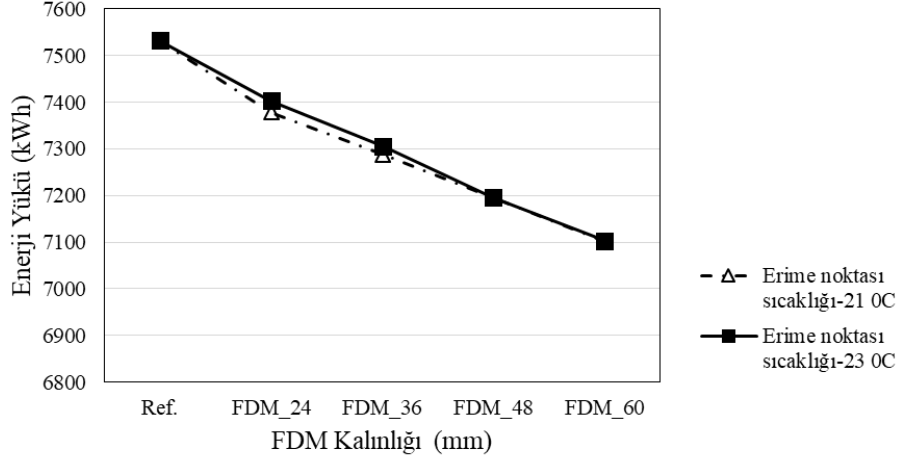


Şekil 6. Referans senaryo duvar konstrüksiyonlarında hava boşluk genişliğinin bina enerji yüküne etkisi (kWh)

Şekil 6'daki 4 referans senaryoda enerji yükü açısından en iyi performansı hava boşluk genişliği 45 mm olan D4 duvar konstrüksiyonu gösterdiği için incelemeler ve değerlendirmeler D4 senaryosuna uygulanan FDM ile elde edilen sonuçlara odaklanmıştır.

## B. FDM'Lİ DUVAR KONSTRÜKSİYONLARINDA ERİME NOKTASI SICAKLIĞI VE FDM KALINLIĞI DEĞİŞİMİNİN BİNA ENERJİ YÜKLERİNE ETKİSİ

Çalışmada kullanılan 21 ve 23°C erime noktası sıcaklıklarına sahip BioPCM'ler ile elde edilen bina enerji yükleri ile ilgili sonuçlar Tablo 5 ve Tablo 6'da sunulmuştur. Buradan hareketle Şekil 7'de 45 mm hava boşluklu D4 referans senaryosuna farklı erime noktası sıcaklıklarında ve 24-36-48-60mm kalınlıklarda FDM kullanılması bina enerji yüküne olan etkileri görülmektedir.



**Şekil 7.** Referans senaryo D4'e uygulanan farklı erime noktası sıcaklıklarına ve farklı kalınlıklara sahip FDM'lerin bina enerji yüklerine etkisi (kWh)

Şekil 7 incelendiğinde FDM kalınlığının artmasıyla enerji yüklerinde de lineer bir iyileşme olduğu görülmektedir. Genel tabloya baktığımızda ılıman-nemli iklim bölgesinde 21°C erime noktası sıcaklığına sahip FDM'lerin 23°C erime noktasına sahip FDM'lerden enerji yükü açısından daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Ayrıca D4 duvarı 60 mm kalınlığında FDM kullanımıyla D1 duvarı referans duruma göre bina enerji yüklerinde %6 azalma elde edildiği görülmüştür.

## IV. SONUÇLAR

Çalışmada günümüzde bina kabuğunda kullanılmaya yeni başlanmış olan faz değiştiren malzeme kullanımıyla ılıman-nemli iklim bölgesinde yer alan konut binalarında bina enerji yüküne ne oranda iyileştirme sağlanabileceği üzerine örnek bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunun için, literatür araştırması sonucunda FDM olarak duvar iç yüzeyinde kullanıma uygun olan BioPCM seçilmiş ve farklı kalınlıklarda duvar iç yüzeyine uygulanmıştır. Yapılan simülasyonlar ile havalandırma boşluk genişliğinde yapılan değişim ile oluşturulan referans duvar konstrüksiyon senaryoları ve bu konstrüksiyonlara farklı erime noktası sıcaklıklarına ve farklı kalınlıklara sahip FDM'lerin uygulanması ile oluşturulan FDM'li duvar konstrüksiyon senaryoları olmak üzere toplam 36 senaryoya ait bina enerji yükleri belirlenmiştir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre, erime noktası sıcaklık değişiminin enerji yüklerinde ılıman-nemli iklim bölgesi için az bir etki yaptığı, 21 °C'lik erime noktasına sahip BioPCM'lerin bina enerji yükü verimi olarak 23°C erime noktasında sahip BioPCM'lerden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Duvar konstrüksiyonunda, FDM arkasında bırakılan hava boşluğu hem yalıtım görevi görmüş hem de FDM'nin hava ile temas eden yüzey alanının artırılmasını sağlamıştır. Bu nedenle hava boşluk genişliği arttıkça bina enerji yüklerinde aynı oranda bir düşüşün gerçekleştiği tespit edilmiştir. FDM kalınlıklarındaki değişimin etkisine bakıldığında ise kalınlık arttıkça elde edilen verimin de arttığı görülmüştür. Ancak FDM'lerin maliyeti yüksek bir malzeme olması kalınlık bakımından seçim yapılırken önemli bir kriter olarak karşımıza çıkmaktadır.

Sonuç olarak FDM'ler yapı teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte bina kabuğunda kullanılmaya başlanmıştır ve ileriki yıllarda hiç şüphesiz bu malzemelerin bina kabuğunda kullanımıyla daha sık karşılaşacağız. Şu anda bu malzemeler ile ilgili birçok konuda bilgi eksikliği mevcuttur. Malzemeleri üreten firmalar yurt dışı temellidir ve sayıları oldukça azdır. Bu da maliyetlerinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Konu ile ilgili birçok deneysel çalışma yürütülmekle birlikte henüz elimizde yeterli ve gerçekçi veriler mevcut değildir. Tüm bu nedenlerden ötürü bu çalışma faz değiştiren malzemelerin bina kabuğunda kullanılmasıyla elde edilecek enerji yükündeki iyileşme oranını sunması açısından önemlidir.

## **V. KAYNAKLAR**

- [1] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on energy performance of buildings (recast), Official journal of the European Union, May 19th, 2010.
- [2] J. Kosny, *PCM- Enhanced Building Components*, 1st ed., London, UK: Springer, 2015, ch. 1, pp. 21-59.
- [3] W. J. Gonzales-Espada, L.A. Bryan and N-H. Kang, “The intriguing physics inside an igloo,” *Physics Education*, vol. 36, no. 4, pp. 290-298, 2001.
- [4] M. Telkes, *Trombe Wall with Phase Change Storage Material*, 1st ed., Philadelphia, USA: American Section, International Solar Energy Society, 1978, pp. 350-363.
- [5] P.T. Leang, L. Zalewski and S. L. Enghok, “Numerical study of a composite trombe solar wall integrating microencapsulated (PCM),” *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 1009-1014, 2017.
- [6] F. Fiorito, “Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hot climates exploring the use of phase change materials for performances improvement,” *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 1110–1119, 2012.
- [7] G. P. Panayiotou, S. A. Kalogirou and S. A. Tassou, “Evaluation of the application of phase change materials (PCM) on the envelope of a typical dwelling in the mediterranean region,” *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 24-32, 2016.
- [8] L. Kancane, R. Vanaga and A. Blumberga, “Modeling of building envelope’s thermal properties by applying phase change materials,” *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 175-180, 2016.
- [9] A. Tokuç, “Faz değişim malzemelerinin ısı enerji depolama amacıyla yapı elemanlarında kullanılması,” Doktora tezi, Mimarlık Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, 2013.
- [10] G. Evola, L. Marletta and F. Sicurella, “A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings,” *Building Environment*, vol. 59, pp. 517-527, 2013.
- [11] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gasparand and P. Santos, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings,” *Energy Efficiency*, vol. 59, pp. 82-103, 2013.
- [12] P. Schossig, H. M. Henning, S. Gschwanderand and T. Haussmann, “Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 89, no. 2–3, pp. 297-306, 2005.
- [13] Katahdin Cedar Log Homes. (2013, August 15). Green tip: Thermal mass insulation through phase change materials. [Online]. Available: <https://www.katahdincedarloghomes.com/blog/green-tip-thermal-mass-insulation-through-phase-change-materials/>.
- [14] E. Leang, P. Tittlein, L. Zalewskiand and S. L. Enghok, “Numerical study of a composite trombe solar wall integrating microencapsulated (PCM),” *Energy Procedia*, vol. 122, pp. 1009-1014, 2017.
- [15] A. Graciaa and L. F. Cabeza, “Phase change materials and thermal energy storage for buildings,” *Energy and Buildings*, vol. 103, no. 15, pp. 414-419, 2015.

- [16] F. Kuznik, J. Virgone and J. Noel, "Optimization of a phase change material wallboard for building use," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 11–12, pp. 1291–1298, 2008.
- [17] A. D. Gracia and L. F. Cabeza, "Phase change materials and thermal energy storage for buildings," *Energy and Buildings*, vol. 103, no. 15, pp. 414–419, 2015.
- [18] F. Kuznik, J. Virgone and J. J. Roux, "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 2, pp. 148–156, 2008.
- [19] L. Kancane, R. Vanaga and A. Blumberga, "Modeling of building envelope's thermal properties by applying phase change materials," *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 175–180, 2016.
- [20] A. K. Çırakman, "Faz değiştiren madde içeren bina güney duvarının deneysel olarak incelenmesi," Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, 2010.
- [21] Y. Konuklu, "Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu," Doktora tezi, Kimya Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2008.
- [22] L. Zalewski, A. Joulin, S. Lassue, Y. Dutil and D. Rouse, "Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material," *Solar Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 208–219, 2012.
- [23] B. M. Diaconu and M. Cruceru, "Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 10, pp. 1759–1772, 2010.
- [24] F. Guarino, V. Dermardiros, Y. Chen, J. Rao, A. Athienitis, M. Cellura and M. Mistretta, "PCM thermal energy storage in buildings: experimental study and applications," *Energy Procedia*, vol. 70, pp. 219–228, 2015.
- [25] G. P. Panayiotou, S. A. Kalogirou and S. A. Tassou, "Evaluation of the application of phase change materials (PCM) on the envelope of a typical dwelling in the mediterranean region," *Renewable Energy*, vol. 97, pp. 24–32, 2016.
- [26] A. Laaouatni, N. Martaj, R. Bennacer, E.O. Mohamed Mohammed and E. Ganaoui, "Phase change materials for improving the building thermal inertia," *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 744–749, 2017.
- [27] Z. Wuand and M. Q. Z. Chen, "Phase change humidity control material and its application in buildings," *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 1011–1018, 2017.
- [28] S. Ramakrishnan, X. Wang, J. Sanjayan and J. Wilson, "Experimental and numerical study on energy performance of buildings integrated with phase change materials," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 2214–2219, 2016.
- [29] Y. Han and J.E. Taylor, "Simulating the impact of phase change material embedded building envelopes on the inter-building effect in non-tropical cities," *Procedia Engineering*, vol. 118, pp. 760–765, 2015.
- [30] W. I. W. M. Nazi, Y. Wang, H. Chen, X. Zhang and A. P. Roskilly, "Passive cooling using phase change material and insulation for high-rise office building in tropical climate," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2295–2302, 2017.

- [31] Y. Li, J. Darkw and W. Su, “Investigation on thermal performance of an integrated phase change material blind system for double skin façade buildings,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 5116–5123, 2019.
- [32] M. Auzeby, S. Wei, C. Underwood, C. Chen, H. Lin., S. Pan, B. Ng, J. Tindall and R. Buswell, “Using phase change materials to reduce overheating issues in UK residential buildings,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 4072-4077, 2017.
- [33] T. Mols, K. P. Dzene, R. Vanaga, R. Freimanis and A. Blumberga, “Experimental study of small-scale passive solar wall module with phase change material and fresnel lens,” *Energy Procedia*, vol. 147, pp. 467–473, 2018.
- [34] Y. Li, W. Liang, J. Zhou and E. Long, “Experimental study on thermal performance improvement of building envelopes integrated with phase change materials in an air-conditioned room,” *Procedia Engineering*, vol. 205, pp. 190–197, 2017.
- [35] F. Guarino, S. L. M. Cellura, M. Mistretta and V. La Rocca, “Phase change materials applications to optimize cooling performance of buildings in the mediterranean area: a parametric analysis,” *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1708-1713, 2015.
- [36] Y. Li, Y. Wang, X. Meng, M. Wang and E. Long, “Research on indoor thermal environment improvement of lightweight building integrated with phase change material under different climate conditions,” *Procedia Engineering*, vol. 121, pp. 1628-1634, 2015.
- [37] A. S. Bejan and T. Catalina, “The implementation of phase changing materials in energy efficient buildings. case study: efden project,” *Energy Procedia*, vol. 85, pp. 52-59, 2016.
- [38] Q. Ma, H. Fukuda, X. Wei and A. Hariyadi, “Optimizing energy performance of a ventilated composite trombe wall in an office building,” *Renewable Energy*, vol. 134, pp. 1285-1294, 2018.
- [39] E. Meng, H. Yuand and B. Zhou, “Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 126, pp. 212–225, 2017.
- [40] S. Soudian and U. Berardi, “Experimental investigation of latent thermal energy storage in highrise residential buildings in Toronto,” *Energy Procedia*, vol. 132, pp. 249–254, 2017.
- [41] J. Xie, W. Wang, J. Liu and S. Pan, “Thermal performance analysis of PCM wallboards for building application based on numerical simulation,” *Solar Energy*, vol. 162, pp. 533–540, 2018.
- [42] S. Li, N. Zhu, P. Hu, F. Lei and R. Deng, “Numerical study on thermal performance of PCM trombe wall,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 2441–2447, 2019.
- [43] S. M. Sajjadian, J. Lewis and S. Sharples, “The potential of phase change materials to reduce domestic cooling energy loads for current and future UK climates,” *Energy and Buildings*, vol. 93, pp. 83–89, 2015.
- [44] P. Principi, C. Di Perna, G. Borrelli and A. Carbonari, “Experimental energetic evaluation of changeable thermal inertia PCM containing walls,” presented at 482th International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, Santorini, Greece, 2005, pp. 481-486
- [45] P. Schossig and H.M. Henning, S. Gschwander ve T. Haussmann, “Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 89, no. 2–3, pp. 297–306, 2005.

- [46] D. Zhou, C. Y. Zhao and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Applied Energy*, vol. 92, pp. 593–605, 2012.
- [47] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar and P. Santos, "Review of passive pcm latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency," *Energy and Buildings*, vol. 59, pp. 82–103, 2013.
- [48] A. Karaoulis, "Investigation of energy performance in conventional and lightweight building components with the use of phase change materials (PCMs): energy savings in summer season," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 38, pp. 796–803, 2017.
- [49] E. Köse and G. Manioğlu, "Evaluation of the performance of phase change materials in relation to balanced distribution of heating energy cost in residential buildings," *REHVA Journal*, vol. 2, pp. 52–57, 2018.
- [50] A.I. Mays, R. Ammar, M. Hawa and M. A. A. Farouk, "Using phase change material in under floor heating," *Energy Procedia*, vol. 119, pp. 806–811, 2017.
- [51] M. Alama, J. Sanjayan, X. W. Patrick, Z. S. Ramakrishnan and J. Wilson, "A comparative study on the effectiveness of passive and free cooling application methods of phase change materials for energy efficient retrofitting in residential buildings," *Procedia Engineering*, vol. 180, pp. 993–1002, 2016.
- [52] T. Knowles, "Proportioning composites for efficient thermal storage walls," *Solar Energy*, vol. 31, no. 3, pp. 319–326, 1983.
- [53] M. M. Farid, A. M. Khudhai, S. Ali and K. Razack, "A review on phase change energy storage: materials and applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 1597–1615, 2004.
- [54] Y. Cui, J. Xie, J. Liu and S. Pan, "Review of phase change materials integrated in building walls for energy saving," *Procedia Engineering*, vol. 121, pp. 763–770, 2015.
- [55] K. Cellat, "Binalarda enerji tasarrufu için güneş enerjisini faz değiştiren maddede pasif depolayan yeni beton karışımların geliştirilmesi ve uygulanması," Doktora tezi, Kimya Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, 2017.
- [56] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack and S. Al-Hallaj, "A review on phase change energy storage: materials and applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 1597–1615, 2004.
- [57] A. V. Pasupathy and R. Velraj, "Phase change material based thermal storage for energy conservation in building architecture," *International Energy Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 147–159, 2006.
- [58] H. B. Madessa, "A review of the performance of buildings integrated with phase change material: opportunities for application in cold climate," *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 318 – 328, 2014.
- [59] L. Navarro, A. D. Garcia, C. Solé, A. Castelland and L. F. Cabeza, "Thermal loads inside buildings with phase change materials: experimental results," *Energy Procedia*, vol. 30, pp. 342 – 349, 2012.
- [60] N. Hanchi, H. Hamza, J. Lahjomri and A. Oubarra, "Thermal behavior in dynamic regime of a multilayer roof provided with two phase change materials in the case of a local conditioned," *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 92–97, 2017.

- [61] V. D. Cao, S. Pilehvar, C. Salas-Bringas, A. M. Szczotok, J. F. Rodriguez, M. Carmona, N. Al-Manasir and A. L. Kjøniksen, “Microencapsulated phase change materials for enhancing the thermal performance of portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 133, pp. 56–66, 2017.
- [62] A. L. Pisello, V. L. Castaldo and F. Cotana, “Dynamic thermal-energy performance analysis of a prototype building with integrated phase change materials,” *Energy Procedia*, vol. 81, pp. 82-88, 2015.
- [63] *Binalarda ısı yalıtım kuralları*, Türk Standartlar Enstitüsü TS825, 2010.
- [64] Design Builder, *Bilgisayar Programı*, v6.1.8.021 versiyon, Gloucestershire (UK), DesignBuilder Software Limited, 2021.