



Effect of thickness and melting temperature of phase change material integrated into exterior wall on building energy performance and CO₂ emission reduction

Gamze İlgar^{ID}, Meryem Terhan*^{ID}

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Gumushane University, 29050, Gumushane, Türkiye

Highlights:

- Analysis of PCM-integrated exterior wall in buildings
- Investigation of the effect of thickness and melting temperature of PCM on building energy performance
- Energy savings and reduction of CO₂ emissions for PCM-integrated exterior wall

Keywords:

- Building energy performance
- Thermal energy storage in buildings
- Phase change material
- Reduction of CO₂ emission

Article Info:

Research Article
Received: 14.12.2022
Accepted: 15.05.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1218950

Correspondence:

Author: Meryem Terhan
e-mail:
phone: +90 456 233 1000 / 1602

Graphical/Tabular Abstract

In the study, the effect of phase change materials integrated into the building's exterior wall has been investigated in terms of material type, thickness, and melting temperature of phase change material on the building energy performance. A villa project has been modelled in 3D using DesignBuilder energy simulation software and two different external wall configurations have been designed by changing the position, thickness and melting temperature of the PCMs into the wall. The amount of CO₂ emission reductions that PCMs will provide according to the fuel type of the building's heating system has been calculated. Using PCMs in the exterior wall not only provides high heating and cooling energy savings but also increases thermal comfort indoors by reducing temperature fluctuations. The PCM melting temperature of 23°C performs quite well compared to other temperatures in both cooling energy and heating energy demand reduction. By increasing the triple thickness of the PCM, 18.81% in heating energy and 22.85% in cooling energy savings can be achieved (Figure A). Depending on the exterior wall and phase change material types, different thicknesses and melting temperatures of PCM, annual total energy saving of the phase-change material is calculated between 10,349.50-83,345.98 kJ/m².year and the annual CO₂ emission reduction according to fuel types has been found as 0.672-14,284 kgCO₂/m² year.

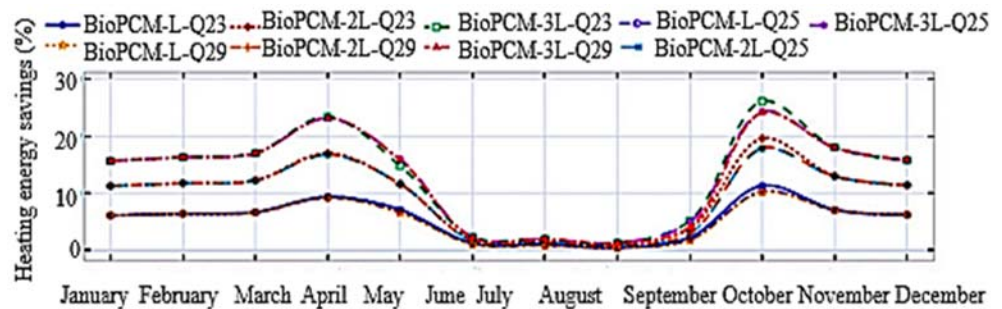


Figure A. Monthly heating and cooling energy savings rates for PCM-integrated exterior wall

Purpose:

It has been purposed to investigate the effect of PCM integrated into the exterior wall on the building energy performance depending on material type, thickness, and melting temperature of PCM.

Theory and Methods:

Finite Difference Method and DesignBuilder energy simulation software were used to examine the effect of PCMs integrated into the exterior wall.

Results:

By increasing the thickness of the PCM, 18.81% in heating energy and 22.85% in cooling energy savings can be achieved. Annual CO₂ emission reduction according to fuel types has been found as 0.672-14,284 kgCO₂/m².year.

Conclusion:

Using PCMs in the exterior wall not only provides high heating and cooling energy savings but also increases thermal comfort indoors by reducing temperature fluctuations.



Dış duvara entegre edilen faz değıştiren malzemenin kalınlığı ve erime sıcaklığının bina enerji performansı ve CO₂ emisyon azalımına etkisi

Gamze İlgar^{ID}, Meryem Terhan*^{ID},

Gümüşhane Üniversitesi, Doğa Bilimleri ve Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 29050, Gümüşhane, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Binalarda PCM entegreli dış duvarların analizi
- PCM'nin kalınlığı ve erime sıcaklığının bina enerji performansına etkisinin araştırılması
- PCM entegre dış duvar için enerji tasarrufu ve CO₂ emisyonlarının azaltılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.12.2022

Kabul: 15.05.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1218950

Anahtar Kelimeler:

Bina enerji performansı,
binalarda ısı enerji
depolama,
faz değıştiren malzeme,
CO₂ emisyon azalımı

ÖZ

Bu çalışmada, bina dış duvara entegre faz değıştiren malzemenin çeşidi, kalınlığı, erime sıcaklığına bağlı olarak bina enerji performansı üzerine etkisi İzmir ili için incelenmiştir. Bir villa konut projesi DesignBuilder arayüzü kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiş ve duvar içerisinde faz değıştiren malzemelerin, konumu, kalınlığı ve erime sıcaklığı değıştirilerek iki farklı dış duvar tipi tasarlanmıştır. Faz değıştiren malzemelerin binanın ısıtma sisteminin yakıt çeşidine göre sağlayacağı CO₂ emisyon azalım miktarları hesaplanmıştır. Dış duvarda faz değıştiren malzemelerin kullanılması sadece yüksek oranda ısıtma ve soğutma enerjisi tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sıcaklık dalgalanmalarını da azaltarak iç ortamların termal konforunu da artırır. Hem soğutma hemde ısıtma enerjisi ihtiyacını düşürmede FDM'nin 23°C erime sıcaklığı diğer sıcaklıklara göre oldukça iyi performans göstermektedir. FDM'nin katman sayısının üç kat artmasıyla ısıtma enerjisi ihtiyacında % 18,81, soğutma enerjisi ihtiyacında %22,85 oranında tasarruf sağlanabilir. Dış duvar tipi, faz değıştiren malzeme cinsi, farklı FDM kalınlıkları ve erime sıcaklıklarına bağlı olarak faz değıştiren malzemenin yıllık toplam enerji tasarrufu 10.349,50-83.345,98 kJ/m².yıl arasında bulunmuş ve yakıt tiplerine göre yıllık CO₂ emisyon azalımı ise 0,672-14,284 kgCO₂/m².yıl olarak hesaplanmıştır.

Effect of thickness and melting temperature of phase change material integrated into exterior wall on building energy performance and CO₂ emission reduction

H I G H L I G H T S

- Analysis of PCM-integrated exterior wall in buildings
- Investigation of the effect of thickness and melting temperature of PCM on building energy performance
- Energy savings and reduction of CO₂ emissions for PCM-integrated exterior wall

Article Info

Research Article

Received: 14.12.2022

Accepted: 15.05.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1218950

Keywords:

Building energy
performance,
thermal energy storage in
buildings,
phase change material,
reduction of CO₂ emission

ABSTRACT

In the study, the effect of phase change materials integrated into the building's external wall has been investigated in terms of material type, thickness, and melting temperature of phase change material on the building energy performance for İzmir Province. A villa residential project has been modelled in 3D using DesignBuilder energy simulation software and two different external wall configurations have been designed by changing the position, thickness and melting temperature of the PCMs into the wall. The amount of CO₂ emission reductions that PCMs will provide according to the fuel type of the building's heating system has been calculated. Using PCMs in the external wall not only provides high heating and cooling energy savings but also increases thermal comfort indoors by reducing temperature fluctuations. The PCM melting temperature of 23°C performs quite well compared to other temperatures in both cooling energy and heating energy demand reduction. By increasing the triple thickness of the PCM, 18.81% in heating energy and 22.85% in cooling energy savings can be achieved. Depending on the external wall and phase change material types, different thicknesses and melting temperatures of PCM, annual total energy saving of the phase-change material is calculated between 10,349.50-83,345.98 kJ/m².year and the annual CO₂ emission reduction according to fuel types has been found as 0.672-14.284 kgCO₂/m².year.

1. Giriş (Introduction)

Ülkemizde toplam enerji tüketiminin %33 gibi önemli bir payını oluşturan konut sektöründe, enerjinin daha verimli kullanımına yönelik teknolojilerin geliştirilmesi önemlidir [1]. Enerji verimliliği, binalarda yaşam standardı ve hizmet kalitesinin düşüşüne neden olmadan enerji tüketiminin azaltılması olup enerji tüketiminin gelişmişlik seviyesiyle paralel olması nedeniyle ekonomiyi doğrudan etkilemektedir [2, 3]. TÜİK'in (Türkiye İstatistik Kurumu) 2000 yılı bina sayımına göre, konut, ticari ve kamu binalarının alanı 913 milyon m² olup, bunun yaklaşık 400 milyon m²'si ısıtılmaktadır. Bina dış cephesinde gerçekleşen toplam ısı kaybının ortalama % 25-40'ı bina dış duvar yüzeyinden kaynaklanmaktadır [1].

Binalardaki enerji kullanımıyla ilgili sistemlerin verimli bir şekilde kurulması için pasif tasarım stratejilerine ihtiyaç duyulmakta ve bu alandaki gelişmeler hızla ilerlemektedir. Binalarda depolama ortamı belirlenirken birim hacimde depolama kapasitesi yüksek olan malzemelerin seçimi, aynı hacimde daha çok ısıyı depolayabilmek açısından önemlidir. Bina cephesi gün boyunca ısıyı emer, bünyesinde depolar, dış iklim şartlarının etkilerini minimize ederek ısı dalgalarını azaltır. FDM, depoladığı ısıyı iç mekâna aktarır ve böylece iç ortam konfor koşullarını iyileştirir ve binanın ısıtma ve soğutma enerjisinin düşmesine katkı sağlar [4, 5].

Taşıdıkları yüksek enerji yoğunluğu, geniş sıcaklık aralıklarına sahip olmaları ve düşük maliyetli olmaları gibi sayısız benzersiz avantajları nedeniyle, FDM'ler genellikle inşaat malzemeleri, elektronik cihazlar, lityum iyon pilleri ve su tanklarının ısı depolaması için güneş enerjisi sistemlerinin kullanım verimliliğini artırmak için ilgi çekici olmaktadır [6, 7]. Yüksek miktarda enerjiyi depolayıp serbest bırakabilen, dar bir faz değişim sıcaklık aralığına sahip yüksek bir gizli ısı değerine sahip olduklarından FDM'ler özellikle tercih edilir. FDM'ler birçok farklı uygulamada yaygın olarak kullanılır. Bunlar arasında, akıllı termal mikro şebekelerin geliştirilmesi, taşınabilir termal piller, iç mekân ısı yönetim sistemleri, ısıyı düzenlenebilen tekstil ürünleri, güneş enerjisiyle çalışan ocaklar, güneş enerjisiyle ısıtma sistemleri, buzdolapları, binalarda termal konforun artırılması, yapı malzemelerinin termal performansının artırılması, enerji tasarrufu sağlayan ekipmanların imalatı ve sağlık sektörü sayılabilir [8, 9].

FDM'ler teorik olarak, kaya ve su gibi geleneksel ısı depolama malzemelerine göre birim hacim başına 5-14 kat daha fazla termal enerji depolayabilirler [10]. Yüksek depolama yoğunlukları, izotermal koşullar altında çalışan kompakt bir enerji depolama sisteminin elde edilmesini sağlar [11]. Son zamanlarda, fosil yakıt tüketim hacmini azaltmak için mevcut en pratik çözüm olarak kabul edildiğinden, FDM'ler bina enerji koruma sistemlerinde ve güneş enerjisiyle ısıtma enerji verimliliğini artırmak için kullanılmakta ve geliştirilmektedir [12, 13]. Binalarda FDM teknolojisinin kullanılması, bina cephesinden aktarılan ısıyı azaltarak ısıtma ve soğutma yüklerini azaltır. Böylece sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak iç ortam sıcaklığını bina sakinlerinin termal konforu aralığında tutar. Sonuç olarak, binanın toplam enerji tüketimi önemli ölçüde azalır. FDM, tavanların, duvarların ve zeminlerin termal depolama kapasitesini artırmak için genellikle alçıpan, alçı, beton veya diğer malzemelere entegre edilir. Bazı FDM imalatçıları, yapılar içine katmanlar olarak dâhil edilebilen saf FDM ceplerinden matlar da sağlamaktadırlar [14].

Binalarda enerji tüketimi, iş ve konut faaliyetlerinden gelen talebe göre gündüz ve gece önemli ölçüde değişmektedir. Büyük termal kapasiteleri nedeniyle, faz değiştiren malzemeler bina kabuğu ile entegre edilerek ideal termal depolama malzemeleri olarak kullanılır

[15]. FDM'lerle entegre edilmiş bina kabuğu, iç mekânın termal özelliklerinin daha kararlı olmasına katkıda bulunur.

Literatürde, binalarda faz değiştiren malzemelerle ilgili birçok numerik ve deneysel çalışma mevcuttur. Numerik çalışmalarda genellikle Ecotect v5.50, DesignBuilder, EnergyPlus ve Carrier HAP simülasyon yazılımları kullanılmıştır [16-20]. Alam vd. [21], Avustralya'nın sekiz farklı şehrinde, beş farklı faz değiştirme sıcaklık aralığı bulunan FDM'lerin etkinliklerini Energy Plus programı kullanarak karşılaştırmışlardır. Çalışmada, incelenen farklı FDM'nin yılın farklı zamanlarında etkili olduğu bulunmuştur. FDM'nin etkinliğinin büyük ölçüde dış hava koşullarına, sıcaklık aralığına, FDM katman kalınlığına ve yüzey alanına bağlı olduğu belirtilmiştir. FDM'nin entegrasyonu ile Darwin gibi sıcak ve nemli şehirlerde bulunan binalarda yıllık %17-23 oranında enerji tasarrufu sağlayabileceği bildirilmiştir. Sajjadian vd. [22], Londra'daki konutlarda 2020, 2050 ve 2080 yıllarının yaz ayları için çeşitli FDM'lerin termal konfor ve enerji tüketimi üzerindeki etkisini değerlendirmek için DesignBuilder enerji simülasyon yazılımı kullanmışlardır. 23°C, 25°C ve 27°C erime sıcaklığındaki ve 12, 24, 36, 48 ve 60 mm kalınlığındaki FDM'ler duvar önünde kullanılarak iki katlı ve üç odalı müstakil bir ev modeli için simülasyonlar yapılmıştır. Çalışmada, 48 mm'lik kalınlıktaki 25°C erime sıcaklığına sahip FDM uygulaması soğutma enerjisi yüklerini azaltması açısından konut binaları için önemli avantajlara sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Shen ve Liu [23] yaptıkları çalışmada sıcak iklim bölgesinde (Güney Texas, A.B.D.) bir prototip müstakil ev duvar konstrüksiyonuna kolayca yerleştirilebilen piyasada bulunan beş FDM katmanının termal enerji performanslarını EnergyPlus programı kullanılarak araştırmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre, FDM katmanlarının kullanılmasıyla ısıtma yükündeki azalmanın %7,9'dan %54,34'ye, soğutma yükündeki azalmanın ise %1,2'den %7,2'ye kadar değişebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Lei vd. [24], tropikal iklime sahip Singapur'da soğutma yükünün azaltılması için FDM'ler ile entegre edilmiş bina cephesinin enerji performansını 3x3x2.8 m kübik bir modelde EnergyPlus enerji simülasyon yazılımıyla incelemişlerdir. Çalışmada, duvarların dış yüzeylerine uygulanan FDM'ler daha iyi performans göstermiştir ve optimum faz değişim sıcaklığının, tüm FDM katmanının tam erime-katılma döngüsüne izin veren en düşük sıcaklık olduğu belirtilmiştir. Daha geniş bir faz değişimi sıcaklık aralığı, FDM'lerin sıcaklık değişimlerine uyarlabilirliğini iyileştirdiği, ancak FDM'lerin kullanımıyla sağlanacak maksimum enerji tasarrufunu tehlikeye atabileceği belirtilmiştir. Daha kalın FDM katmanı bina kabuğu yoluyla ısı kazanımlarını azaltırken, daha ince FDM katmanının daha yüksek verimlilik ve maliyet avantajları sağladığı vurgulanmıştır. Mi vd. [25] faz değiştiren malzemelerin Çin'in farklı iklim bölgelerini temsil eden beş farklı şehirde (Shenyang, Zhengzhou, Changsha, Kunming ve Hong Kong) bulunan tipik çok katlı ofis binasının enerji tüketimi üzerindeki etkisini EnergyPlus enerji simülasyon programı kullanarak incelemişlerdir. FDM uygulamasından kaynaklanan enerji tasarrufunun, Shenyang ve Zhengzhou gibi soğuk bölgelerde bulunan ofis binalarının yanı sıra, sıcak yaz ve soğuk kış aylarına sahip Changsha bölgesinde daha belirgin olduğu gösterilmiştir. Saffari vd. [16], dünyanın farklı bölgelerinden 19 iklim koşuluna karşılık gelen 57 farklı şehir için FDM erime sıcaklığının binaların enerji performansı üzerindeki etkilerini EnergyPlus yazılımı yardımıyla incelemişlerdir. Çalışmada 20°C ve 26°C'lik optimum FDM erime sıcaklığının sırasıyla ısıtma ve soğutma yüklerinin azalmasına katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır. Soğutmanın baskın olduğu bir iklimde, FDM'nin yıllık enerji talebini azaltmak için optimum erime sıcaklığının 26°C'ye yakın olduğunu; buna karşın, ısıtmanın baskın olduğu iklimlerde, yaklaşık 20°C'lik erime sıcaklığına sahip FDM'nin daha yüksek yıllık enerji kazancı sağlayacağını bildirmişlerdir. Aketouane vd. [26], Fas'taki altı farklı iklim bölgesinde FDM dolgu tuğlaların enerji tasarrufu potansiyeli üzerindeki etkisini sayısal

olarak incelenmiştir. Çalışmada, FDM'nin uygun faz geçiş sıcaklığı seçimi ile %40'a varan enerji tasarrufu sağlandığı sonucuna varılmıştır. Özyurt [27], çalışmada faz değiştiren materyallerin enerji performansına etkisini duvar katmanındaki yeri, yönü, ürün türüne göre çeşitli simülasyonlarla DesignBuilder kullanarak değerlendirilmiş ve FDM'lerin dış duvarda kullanımının İzmir ili için özellikle soğutmanın istendiği dönemde büyük katkı sağlayabileceği belirtilmiştir. Al-Yasiri ve Szabo [28], bina cephesine entegre edilerek kullanılan faz değiştiren malzemenin bina enerji performansı ve iç ortam konfor şartlarına etkilerini aşırı sıcak iklim bölgesi olan Irak, Al Amarah şehri için yaz ayları boyunca (1 Mayıs ve 30 Ekim 2021) nümerik olarak incelemek üzere EnergyPlus programı kullanmışlardır. FDM eklenmesi ile binanın ortalama enerji tasarrufunun %66,6-%76,5 oranında ve ortalama sıcaklık dalgalanmalarındaki azalmanın ise 5°C-6°C olduğu sonucuna varılmıştır. Al-Yasiri ve Szabo [29], bina cephesine entegre FDM ve yalıtım malzemesinin bina enerji performansı ve iç ortam konfor şartları üzerindeki etkilerini yaz ayları boyunca EnergyPlus programı kullanarak incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre FDM'nin yalıtım malzemesi (EPS) ile kullanımının daha uygun olduğu ve 1 cm'lik EPS kalınlığının iç ortam ve efektif sıcaklık dalgalanmalarını azaltmada daha iyi performans gösterdiği sonuçlarına varılmıştır. Kharbouch vd. [30] Morocco'nun farklı iklim bölgelerinde bir binanın cephesine faz değiştiren malzemelerin entegre edilerek kullanılmasının enerji ve ekonomik analizini yapmışlardır. Çalışmada EnergyPlus programı kullanılmış olup en yüksek aylık ısıtma tasarrufunun 142,2 MJ ile Agadir şehrinde Haziran ayı boyunca olduğu bildirilmiştir. Khan vd. [31] Pakistan'ın beş farklı şehrinde tek ve iki katlı konut binalarının enerji performansını artırmak için bina cephesine entegre edilen faz değiştiren malzemelerin (15 farklı malzeme) kullanımını araştırmışlardır. Nümerik hesaplamalar için EnergyPlus programı kullanılmıştır. Çalışmada, 24°C erime sıcaklığındaki CrodaTherm24 faz değiştiren malzemenin, 4 cm kalınlığında bina cephesinin iç kısmına yerleştirildiği durum en optimum yerleşim olarak bildirilmiştir. Tek ve iki katlı konut binalarında ortalama aylık enerji tasarrufunun sırasıyla Quetta'da %49,6 ve %13,5, Peshawar'da %35 ve %12,9, Lahore'de %32 ve %15,5, Karachi'de %35 ve %21,4, Islamabad'da ise %44,9 ve %12 oranında olduğu belirtilmiştir. Terhan ve İlgar [32], İstanbul ili için bina dış duvarına entegre edilen faz değiştiren malzemelerin bina ısıtma ve soğutma enerjisi talebine katkısını nümerik olarak incelemek için DesignBuilder yazılımı kullanmışlardır. Çalışmada yalıtımlı ve yalıtımsız olmak üzere dört farklı tuğlalı dış duvar tipi tasarlanmış, faz değiştiren malzemelerin katman sayısı, erime sıcaklıkları, FDM'nin duvar içerisindeki konumu incelenmiştir. Ayrıca faz değiştiren malzemelerin tasarlanan farklı kombinasyon için maksimum enerji tasarrufu sağlayan optimum erime sıcaklıkları belirlenmiş ve FDM'lerin sarj ve deşarj prosesleri incelenmiştir. Çalışmada dış duvar tipi ve FDM çeşidine göre yıllık ortalama optimum erime sıcaklığı'nın 18-19°C arasında bulunmuştur. Tüm dış duvar tipleri arasında en iyi performansı üç katmanlı FDM konfigürasyonları sağlamakla birlikte, enerji tasarruf oranı soğutma sezonunda %24,45 ve ısıtma sezonunda ise %14,76 olduğu bildirilmiştir. Arıcı vd. [33] Kocaeli ili için çift ve tek katmanlı FDM'li duvarın iç kısmı, dış kısmı ve her iki tarafına yerleştirilerek oda sıcaklığının kontrolü, karbondioksit emisyon azalımı ve enerji tasarrufuna etkisini incelemişlerdir. Bunun için yedi farklı senaryo oluşturulmuş ve FDM erime sıcaklığı maksimum enerji tasarrufu elde etmek amacıyla optimize edilmiştir. Çalışmada, iç kısma yerleştirilen FDM için oda sıcaklığı ve dış kısma yerleştirilen FDM için ise dış ortam iklim koşullarına bağlı olarak aylık optimum FDM erime sıcaklıkları belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, FDM tabakasının sayısı, konfigürasyonu ve iklim şartlarına bağlı olarak FDM erime sıcaklıkları 5-30°C aralığında değişmektedir.

Bu çalışmada İzmir ili için 500 m² oturma alanına sahip 13 blok, 17 bölge ve çatıdan oluşan bir villa konut projesi EnergyPlus tabanlı

DesignBuilder yazılımı kullanılarak modellenmiştir. İki farklı dış duvar konfigürasyonu tasarlanmış olup yüksek performans sağlayan dış duvara entegre kullanılabilen iki farklı tip faz değiştiren malzeme üç ayrı kalınlıkta (katman) kombinasyonlar oluşturularak faz değiştiren malzemenin bina enerji performansına etkisi incelenmiştir. Son olarak faz değiştiren malzemeler 23°C, 25°C ve 29°C olmak üzere üç ayrı erime sıcaklığında analiz edilerek faz değiştiren malzemelerin erime sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmanın literatüre katkısı, özgün değeri ve içerdiği yenilikler aşağıda özetlenmiştir:

- Dış duvara entegre kullanılan faz değiştiren malzemelerin bina termal enerji performansına etkisi malzeme tipine, duvar içindeki konumuna, katman sayısına, erime sıcaklıklarına bağlı olarak kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.
- İzmir ili için dış duvarda entegre kullanılacak faz değiştiren malzemelerin sağladığı ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları aylık, yıllık, ısıtma ve soğutma sezonu için ayrı ayrı hesaplanmıştır.
- Analiz edilen faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı binanın ısıtma sisteminin yakıt çeşidine göre sağlayacağı CO₂ emisyon azalım miktarları verilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Enerji simülasyonlarında kullanılan villa konut projesi, bina enerji modelleme programı olan EnergyPlus programının ara yüz yazılımı olan DesignBuilder ile modellenmiştir. Bina tasarımlarının üç boyutlu modellenmesinde kullanılan bu arayüz, bina simülasyon süreçlerini kısaltmaya yarayan fonksiyonları ve dinamik simülasyonları sayesinde enerji modelleme programları arasında önemli bir yere sahiptir. DesignBuilder kullanarak modellenen binaların ısıtma, soğutma, enerji hesaplamaları, konfor ve aydınlatma hesaplamaları, karbon salınımı, nem, sıcaklık, rüzgar hızı, güneş ışınımı, atmosferik basınç verileri gibi dış ortam iklim verilerine kolaylıkla ulaşılabilmektedir. Lokasyon verileri ASHRAE standartlarında son 25 yılın ortalama iklim verilerinden oluşmaktadır.

DesignBuilder iç konveksiyon algoritmalarında TARP, dış konveksiyon algoritmalarında DOE-2 modelleri temel alınmıştır. Simülasyonlarda farklı senaryolar için İletim Transfer Fonksiyonu (Conduction Transfer Function) algoritması ve faz değiştiren malzemelerin sıcaklık etkisinin araştırılması için sonlu farklar algoritması kullanılmıştır. Simülasyonlarda Simple Sky Diffuse Modelling, Sutherland Hodgeman algoritmaları, Average of days in frequency ve Polygon clipping metotları seçilmiştir [34].

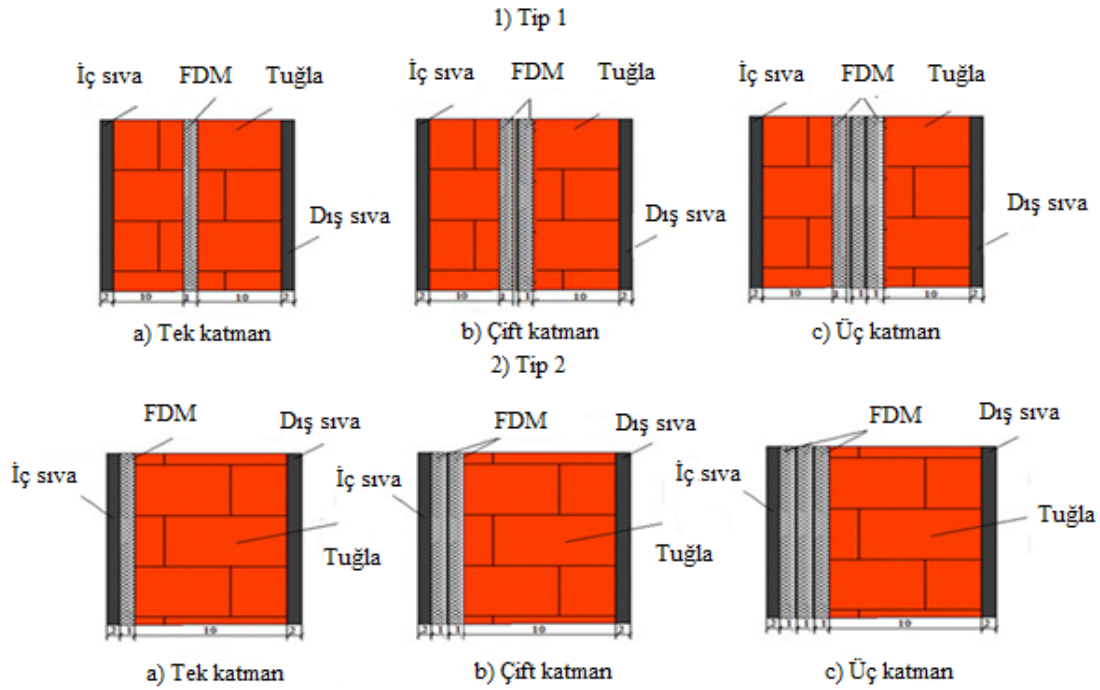
Yapılan analizlerde faz değiştiren malzeme olarak organik ve inorganik içerikli BioPCM27 ve InfiniteRPCM, lokasyon olarak faz değiştiren malzemelerin etkisini ısıtma ve soğutma amaçlı olarak incelemek için İzmir ili seçilmiştir. İki farklı dış duvar tipi oluşturularak FDM'nin yapı bileşenindeki konumunun enerji tasarrufu üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Tasarlanan dış duvar konfigürasyonları Şekil 1'de gösterilmiştir. Tablo 1'de dış duvar tiplerinde kullanılan malzemelerin kalınlıkları ve özellikleri verilmiştir. Her duvar tipi için üç farklı kalınlık (katman) çalışılarak FDM'nin ısıtma ve soğutma yüküne getirdiği tasarruf değerleri aylık ve yıllık olarak hesaplanmıştır. Son olarak faz değiştiren malzemeler 23°C, 25°C ve 29 °C olmak üzere üç ayrı erime sıcaklığında analiz edilmiştir.

2.1. Entegre FDM'li dış duvarın modellenmesi (Modelling of PCM-Integrated External Wall)

İçerisinde faz değiştiren malzeme olan yapı elemanının ısı dengesi tek boyutlu, zamana bağlı ve içerisinde ısı üretimi içermeyen implisit sonlu farklar formülasyonu Eş. 1'de verilmiştir [28-31, 35, 36].

Tablo 1. Dış duvarda kullanılan malzemelerin kalınlıkları ve özellikleri (The thickness and properties of the materials used in the external wall)

Dış Duvar	Duvar yapısı	Kalınlık d (m)	Isıl iletkenliği λ (W/m.K)
Tip 1	Dış sıva	0,02	0,50
	Tuğla	0,10	0,84
	BioPCM27 M27Q23/25/29	0,0112	0,200
	Infinite RPCM 23C/25C/29C	0,0224	0,815
		0,0336	
Tip 2	Tuğla	0,10	0,84
	İç Sıva	0,02	0,50
	Dış sıva	0,02	0,50
	Tuğla	0,10	0,84
	BioPCM27 M27Q23/25/29	0,0112	0,200
Infinite RPCM 23C/25C/29C	0,0224	0,815	
	0,0336		
	İç Sıva	0,02	0,50


Şekil 1. Dış duvar konfigürasyonları (Configurations of the external walls)

$$c_p \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} \right) = k_n \cdot \left(\frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) + k_m \cdot \left(\frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) \quad (1)$$

$$c_p = \frac{(h_i^j - h_i^{j-1})}{(T_i^j - T_i^{j-1})} \quad (4)$$

Eşitlikte yer alan ρ katmanın yoğunluğunu, c_p ise katmanın özgül ısısını, Δx ise katman kalınlığını, Δt zaman aralığını ve T_i düğüm sıcaklığını göstermektedir. i alt indisleri sırasıyla modellenen düğümü, $i+1$ bir sonraki ve $i-1$ ise bir sonraki düğümü ifade etmektedir. Aynı şekilde $j+1$ anlık zaman dilimi, j ise önceki zaman dilimidir. k_n ve k_m ise sırasıyla i düğümü ile $i+1$ düğümünün arayüzeyi için ısı iletkenlik katsayısı ve i düğümü ile $i-1$ düğümünün arayüzeyi için ısı iletkenlik katsayısı olup Eş. 2 ve Eş. 3 yardımıyla hesaplanabilir.

$$k_n = \frac{(k_{i+1}^{j+1} + k_i^{j+1})}{2} \quad (2)$$

$$k_m = \frac{(k_{i-1}^{j+1} + k_i^{j+1})}{2} \quad (3)$$

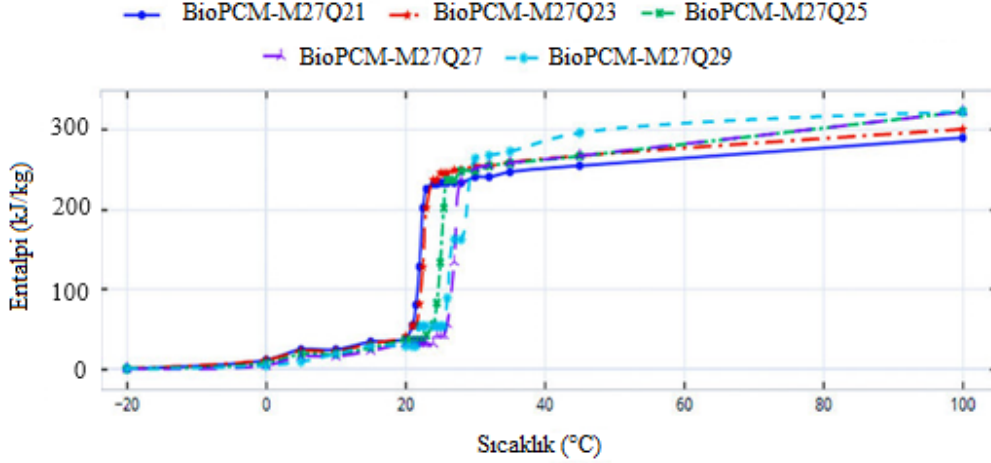
FDM'nin sıcaklığa bağlı özgül ısısı (c_p) Eş. 4 ve entalpi değeri ise entalpi-sıcaklık fonksiyonu (ETF) kullanılarak Eş. 5'te verilmiştir.

$$h_i = ETF(T_i) \quad (5)$$

Designbuilder kütüphanesinden alınan BioPCM27 faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığına bağlı olarak entalpi-sıcaklık grafiği Şekil 2'de gösterilmiştir.

2.2. FDM'nin İç Ortam Konfor Şartlarına Etkisinin Belirlenmesi (Determination Effects of PCM on Indoor Comfort Conditions)

Dış duvara entegre edilerek kullanılan faz değiştiren malzemeler uygulandıkları binanın sadece ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda ısı akısındaki dalgalanmaları azaltarak dış duvardaki maksimum ve minimum pik sıcaklıklarını da düşürür. Ayrıca FDM'ler kullanıldıkları mahal içerisindeki termal konfor şartlarını iyileştirir. Mahal içi termal konfor şartları sırasıyla iç ortam hava sıcaklığı, ortam havasının bağıl nemi, hava akımı, ortalama radyant sıcaklığı ve özellikle de ortamın işletme sıcaklığı ya



Şekil 2. BioPCM27'nin entalpi-sıcaklık eğrisi (Enthalpy-temperature curve of BioPCM27)

da efektif sıcaklığı gibi parametreler ile belirlenmektedir. Efektif sıcaklık, mahalın iç sıcaklığı değil, mahal içerisindeki nem oranı ve hava hızı gibi değişkenlere bağlı olarak insanların hissettiği sıcaklığa denir. Efektif sıcaklığı (T_{ef}), ortalama radyant sıcaklığı (T_R) ile iç ortam hava sıcaklığı (T_a)'nın ortalamasından bulunabilir [15]. Eş. 6'da yer alan T_1 , T_2 ve T_n sıcaklıkları ve A_1 , A_2 ve A_n alanları sırasıyla iç mahali çevreleyen yüzeylerin sıcaklığını ve yüzey alanını göstermektedir.

$$T_R = \frac{T_1 \times A_1 + T_2 \times A_2 + \dots + T_n \times A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (6)$$

$$T_{ef} = \frac{T_R + T_a}{2} \quad (7)$$

2.3. FDM'nin CO₂ Emisyon Azalımı (CO₂ Emission Reduction of PCM)

Bina dış duvarında kullanılacak faz değiştiren malzemeden sağlanacak yakıt tasarrufu karbondioksit emisyonu azalımına sebep olacaktır. Yıllık CO₂ emisyon azalımı Eş. 8'de verilen denklemle hesaplanabilir. $\dot{V}_{yakıt}$ yıllık yakıt tasarrufunu, H_u ısıtma sisteminde kullanılan yakıtın cinsine bağlı olarak alt ısı değeri, EF ise CO₂ emisyon faktörünü göstermektedir [37, 38]. H_u 'nun birimi yakıt cinsine bağlı olarak doğalgaz için kJ/m³, fuel-oil ve kömür için kJ/kg ve elektrik için kJ/kWh olarak alınmalıdır. Tablo 2'de yakıt tiplerinin alt ısı değerleri, ısıtma verimleri ve CO₂ emisyon faktörleri verilmiştir.

$$ES_{CO_2} = \dot{V}_{yakıt} \times H_u \times EF \quad (8)$$

Tablo 2. Yakıt tiplerinin özellikleri (Characteristics of fuel types)

	Doğalgaz	Fuel-oil	Kömür	Elektrik
EF (kg CO ₂ /kWh)	0,234	0,330	0,433	0,617
H_u kJ/m ³ , kJ/kg, kJ/kWh	34.485	40.546	25.080	3.600
Isıtma verimi (%)	93	80	65	99

4. Araştırma Bulguları (Results)

Bu çalışma kapsamında İzmir ilinde, uluslararası standartlar göz önünde bulundurularak 500 m² oturma alanına sahip 13 blok, 17 bölge ve çatıdan oluşan bir villa konut projesi DesignBuilder kullanarak modellenmiştir. Modellenen villa konut projesinin üç boyutlu çizimleri Şekil 3'te gösterilmiştir. Modellenen binanın dış duvarına entegreli iki farklı tipte faz değiştiren malzeme (BioPCM27 ve InfiniteRPCM) kullanılmış olup farklı erime sıcaklıkları (23°C, 25°C ve 29°C) için analizler yapılmıştır.

Bina dış duvarı için iki farklı tip konfigürasyon oluşturulmuş, faz değiştiren malzemesinin katman sayısı artırılarak faz değiştiren malzemenin bina enerji performansına katkısı incelenmiştir. Modellenen villanın DesignBuilder'deki algoritmalar kullanılarak dış duvar kabuğunun HVAC (Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme) koşullarının yıllık, aylık ve saatlik verileri analiz edilmiştir. Binanın mimari bilgileri Tablo 3'te verilmiştir.

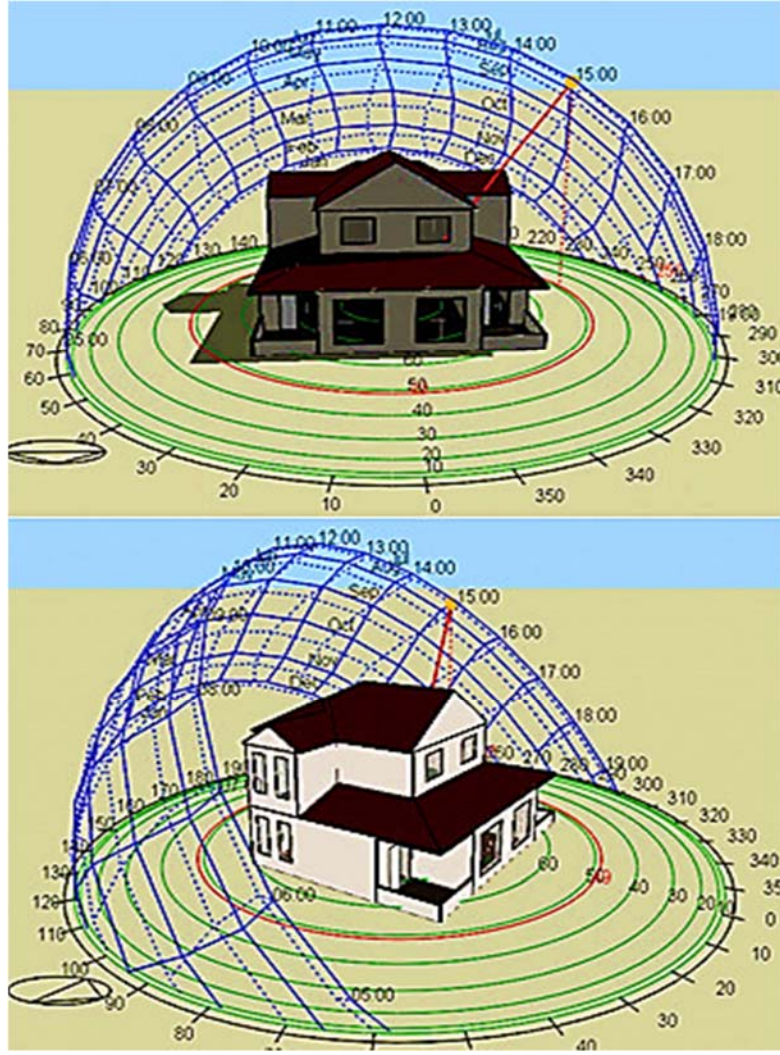
İzmir iline ait aylık kuru ve yaş termometre sıcaklık ile aylık diffüz ve direkt güneş ışınım şiddeti değerlerinin verileri Şekil 4'te, aylık rüzgar hızı verileri ve toprak sıcaklıkları ise Şekil 5'te gösterilmiştir.

Bina dış duvar yapı içerisinde kullanılmak üzere erime sıcaklıklarına ve kalınlıklarına göre iki farklı faz değiştiren malzeme (InfiniteRPCM ve BioPCM27) kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemelerin özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Faz değiştiren malzeme, dış duvar içerisinde yapı bileşeni içerisindeki konumu değiştirilerek iki farklı duvar konfigürasyonu tasarlanmıştır. Ayrıca, tüm duvar tipleri için faz değiştiren malzemeleri üç ayrı katmanda 1,12 cm (tek katman), 2,24 cm (çift katman) ve 3,36 cm (üç katman) kullanılarak analiz derinleştirilmiştir.

İzmir ili için dış duvara entegreli iki farklı faz değiştiren malzeme, iki farklı dış duvar tipi ve üç farklı faz değiştiren malzeme kalınlığı ile 23°C, 25°C ve 29°C erime sıcaklığı için analizler yapılmıştır. Dış duvara entegreli faz değiştiren malzemelerinin etkisi faz değiştiren malzemenin çeşidine, kalınlığına, erime sıcaklığına ve tüm binaya sağlayacağı ısıtma yükü ve soğutma yüküne katkısı açısından yıllık ve aylık bazda incelenmiştir.

4.1. FDM'nin Isıtma ve Soğutma Enerjisi İhtiyacına Etkisinin Yıllık Analizi (Annual Analysis of the Effect of PCM on Heating and Cooling Energy Demands)

Tip 1 dış duvar tipinde iki tuğla arası FDM katmanları kullanılmıştır ve bu yüzden ısıtma ve soğutma yükleri diğer tipe göre daha düşüktür. Tip 2 dış duvar tipinde ise tek tuğla ile dış kısma konulan FDM katmanları tuğla maliyetini düşürürken ısıtma enerjisi ihtiyacı diğer tipe göre daha fazla olmakla birlikte soğutma enerjisi ihtiyacı ise birbirine yakın değerler almaktadır. FDMsiz Tip 1 dış duvar tipi için ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları sırasıyla 44.533,7 kJ/m².yıl ve 57.051,54 kJ/m².yıl olarak hesaplanmıştır. Tip 2 dış duvar tipi için yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacı, Tip 1'e göre yüksek olup yıllık toplam birim alan başına 54.010,59 kJ/m².yıl değerindedir. Tip 2'nin soğutma enerjisi ihtiyacı ise birim alan başına yıllık 59.529,87 kJ/m².yıl olarak



Şekil 3. Modellenen villa konut binası (Modelled villa residential building)

Tablo 3. Simülasyonu yapılan konut binasının bilgileri (Information of the simulated residential building)

	Toplam	Kuzey 315°-45°	Doğu 45°-135°	Güney 135°- 225°	Batı 225°- 315°
Oturum Alanı (m ²)	505,13	-	-	-	-
Toplam Çatı Alanı (m ²)	262,25	-	-	-	-
Net Duvar Alanı (m ²)	405,05	113,16	89,43	113,04	89,43
Pencere Alanı (m ²)	48,92	22,19	7,60	11,52	7,60
Net Pencere-Duvar Oranı (%)	11,99	19,49	8,44	10,13	8,44

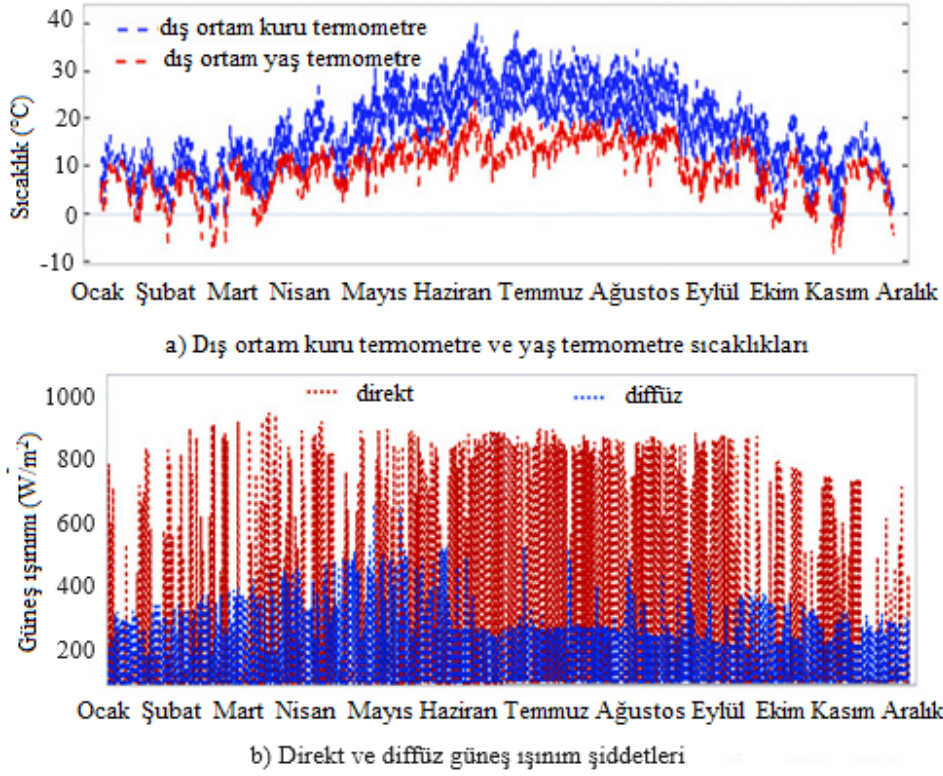
bulunmuştur. Şekil 6'da tüm dış duvar tipleri için binanın toplam birim alan başına yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarının faz değiştiren malzemenin katman sayısına ve erime sıcaklığına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Isıtma enerjisi ihtiyacına etkisi bakımından incelendiğinde InfiniteRPCM malzemesi için 23°C ve 25°C erime sıcaklığında faz değiştiren malzemenin kalınlığındaki artışla beraber ısıtma enerjisi kazancı artmaktadır. Fakat 29°C erime sıcaklığındaki RPCM oldukça kötü performans göstermektedir. Tip 2 dış duvar tipi, üç katmanlı InfiniteRPCM23C'nin ısıtma enerjisi kazancı %13,21 iken Tip 1'de aynı erime sıcaklığı ve aynı katman için bu oran %7,71'e düşmektedir.

Soğutma enerjisi ihtiyacına etkisi bakımından incelendiğinde InfiniteRPCM23C için kalınlıkla soğutma enerjisi kazancı artarken

InfiniteRPCM25C'de kalınlık ya da katman sayısı ile değişimin çok az miktarda olduğu görülmektedir. Hem soğutma enerjisi hemde ısıtma enerjisi performansı bakımından 23°C erime sıcaklığı diğer sıcaklıklara göre oldukça iyi performans göstermiştir.

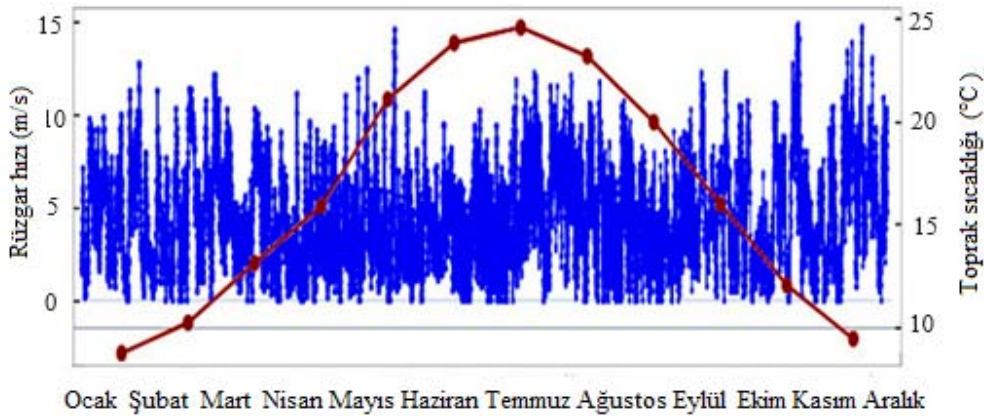
Şekil 7'de faz değiştiren malzemeli tüm dış duvar konfigürasyonları için ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacı kazanç oranları gösterilmiştir. InfiniteRPCM malzemesi ve tek katman, 23°C erime sıcaklığı için ısıtma enerjisi yıllık kazanç oranları %0,10-4,94 oranında, 25°C erime sıcaklığında %0,98 ile %0,81 ve 29°C erime sıcaklığında ise %-3,44 ile %-2,27 arasında değişmektedir. BioPCM27 malzemesi ve tek katman, 23°C erime sıcaklığı için ısıtma enerjisi yıllık kazanç oranları %1,68 ile %5,37 arasında 25°C erime sıcaklığında %1,62 ile %5,01 ve 29°C erime sıcaklığında ise %-3,44 ile %-2,27 arasındadır. İki katman için InfiniteRPCM malzemesi 23°C erime sıcaklığı için yıllık



Şekil 4. İzmir ili dış hava sıcaklık ve güneş ışınım verileri (Outdoor air temperature and solar radiations values for Izmir Province)

Tablo 4. Faz değıştiren malzemelerin özellikleri (Properties of phase change materials)

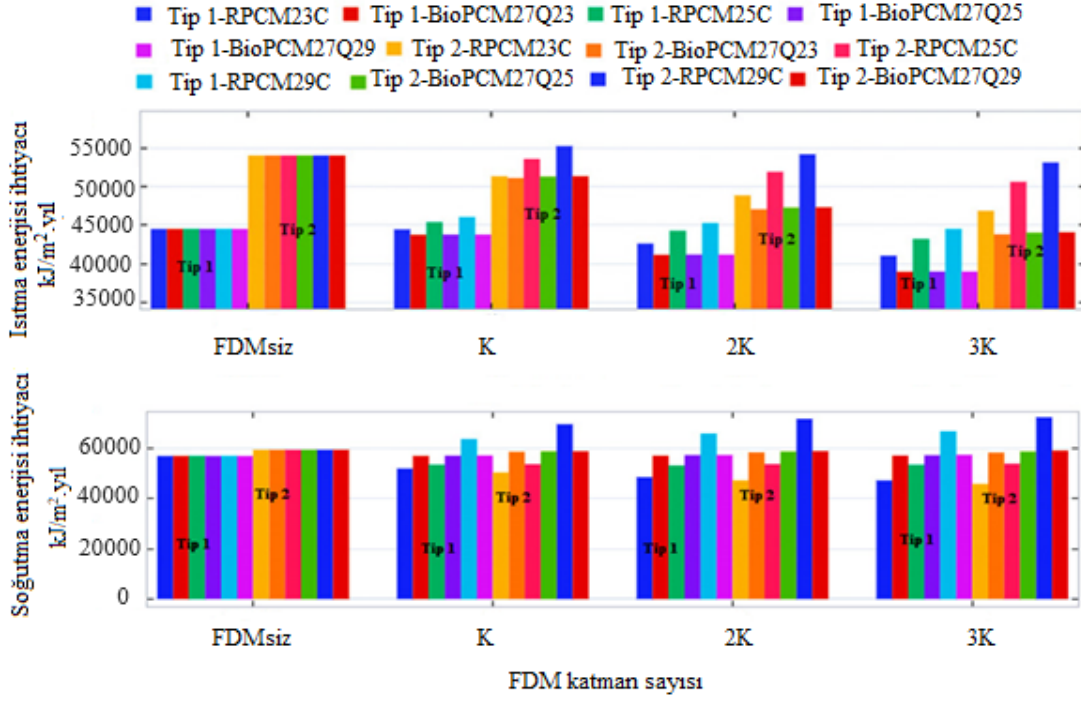
	Yoğunluk (Sıvı/Katı) (kg/m ³)	Isıl iletkenlik (Sıvı/Katı) (W/m.K)	Erime ve katılaşma entalpisi (kJ/kg)	Özgül ısı (Sıvı/Katı) (J/kg.K)	Erime sıcaklığı (°C)	Kimyasal bileşimi
InfiniteRPCM	1540/1540	0.54/1.09	200	3140/3140	18-21-23-25-29	İnorganik
BioPCM27	2200/2300	1.50/1.80	225	2000/2000	21-23-25-27-29	Organik



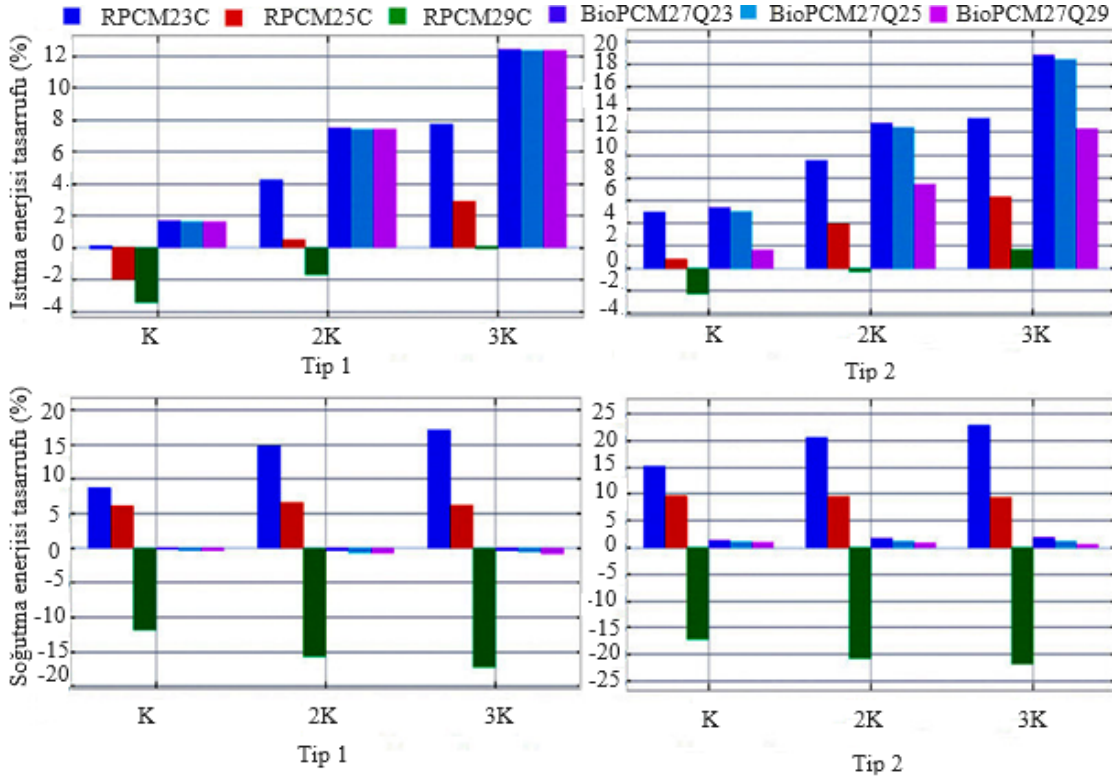
Şekil 5. İzmir ili aylık rüzgâr hızı ve toprak sıcaklıkları (Monthly wind speed and soil temperatures for Izmir Province)

ısıtma enerjisi tasarrufu %4,24-9,51 oranında, 25°C erime sıcaklığı için %0,50-3,89 ve 29°C erime sıcaklığında ise %1,69 ile %0,31 arasında farklılık göstermektedir. Yine iki katman için BioPCM27 malzemesinin 23°C erime sıcaklığındaki yıllık ısıtma enerjisi tasarrufu %7,49 ile %12,82 arasında, 25°C için %7,40 ile %12,45 ve 29°C için %7,41-12,36 arasındadır.

Üç katman için faz değıştiren malzeme kullanılması durumunda InfiniteRPCM ve 23°C erime sıcaklığında yıllık ısıtma enerjisi tasarruf oranları %7,71-13,21, 25°C erime sıcaklığında %2,88-6,28, 29°C erime sıcaklığında ise %0,025 ile %1,66 arasında değışmektedir. BioPCM27 ve 23°C erime sıcaklığındaki faz değıştiren malzemenin dış duvar içerisine eklenmesiyle elde edilen yıllık ısıtma enerjisi



Şekil 6. Tüm dış duvar tipleri için binanın ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarına FDM katman sayısı ve erime sıcaklığının etkisi (Effect on building's heating and cooling energy demands of melting temperature and number of layers of PCM for all external wall types)



Şekil 7. Faz değiştiren malzemelerin sağladığı yıllık ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları (Heating and cooling energy savings rates provided by phase change materials)

tasarruf oranı %12,40 ile %18,81, 25°C erime sıcaklığında %12,33 ile %18,45 ve 29°C erime sıcaklığı için %12,33 ile %18,34 arasında hesaplanmıştır. BioPCM27 faz değiştiren malzeme için ısıtma enerjisine etkisi bakımından değerlendirirsek Tip 2 dış duvar tipli

konfigurasyon daha yüksek performans gösterirken kalınlığın artmasıyla ısıtma enerjisi ihtiyacı kazanç oranı bir hayli artmaktadır. Aynı malzemeyi erime sıcaklığına göre değerlendirdiğimizde ise her üç sıcaklıkta da ısıtma enerjisi ihtiyacı kazancının Tip 1 durumu için

hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür. BioPCM27'nin soğutma enerjisi ihtiyacına etkisine bakarsak Tip 1 dış duvar konfigürasyonları hem farklı kalınlık hemde erime sıcaklıkları bakımından oldukça kötü performans göstermektedir ve hatta soğutma enerjisi ihtiyacını artırmaktadır. Tip 2'de ise soğutma enerjisi ihtiyacı kalınlıkla bir miktar artsa da maliyet açısından düşünüldüğünde faz değiştiren malzemenin duvar içerisinde tek katman kullanılması uygun olacaktır. Erime sıcaklıklarının artması da soğutma enerjisi kazancını bir miktar düşürmektedir. BioPCM27Q23 malzemesi için ısıtma enerjisi kazanç oranı % 18.81'e ulaşırken, soğutma enerjisi kazanç oranı %1.88'dir.

Yıllık bazda analizler incelendiğinde 29°C erime sıcaklığına sahip faz değiştiren malzemelerin genel olarak hem ısıtma hem de soğutma performansı açısından kötü olduğu sonucuna varılmaktadır. BioPCM27 faz değiştiren malzeme ısıtma enerjisi ihtiyacını oldukça azaltırken soğutma enerjisi ihtiyacını Tip 1 duvar tipinde bir miktar arttırmakta, Tip 2'de ise düşürmektedir. Yine bu tip malzemede katman sayısının artışı ısıtma enerjisi ihtiyacını oldukça düşürürken, tek katman soğutma enerjisi ihtiyacının düşmesinde daha etkilidir. BioPCM27 malzemesi ısıtma enerjisi performansı InfiniteRPCM'ye göre daha yüksektir. 23°C erime sıcaklığına sahip InfiniteRPCM malzemesinin hem ısıtma hem de soğutma performansı bakımından diğer erime sıcaklıklarına göre daha iyi performans gösterdiği şekilden de anlaşılmaktadır. Soğutma enerjisi kazancı açısından bakıldığında InfiniteRPCM malzemesinin diğerine göre oldukça verimli olduğu görülmektedir.

Tip 1 için yıllık ısıtma enerjisi ihtiyacını düşürmede en verimli konfigürasyonun üç katmanlı BioPCM27Q23 (%12.40) olduğu görülmektedir. Ayrıca bu konfigürasyonda yıllık tasarruf oranı, erime sıcaklıklarına bağlı olarak hemen hemen değişmemektedir. Tip 1 için yıllık soğutma enerjisi ihtiyacını düşürmede en verimli konfigürasyon, üç katmanlı InfiniteRPCM23C (%17.09) malzemesi olup katman sayısının artmasıyla tasarruf oranı artarken erime sıcaklıklarının artmasıyla tasarruf oranı neredeyse yarıya düşmektedir. 29 °C erime sıcaklığında ise tasarruf oranı negatife düşmektedir. Tip 2 için ısıtma enerjisi ihtiyacını düşürmede en verimli konfigürasyon üç katmanlı BioPCM27Q23 (%18,81) olup yine bu malzeme için katman sayısının azalmasıyla tasarruf oranı düşmekte, 23 ve 25°C erime sıcaklıkları birbirine yakın sonuçlar gösterse de 29°C erime sıcaklığı en düşük tasarruf oranlarına sahiptir. Tip 2 için soğutma enerjisi ihtiyacını düşürmede en verimli konfigürasyon ise üç katmanlı InfiniteRPCM23C (%22,84)'tür. Tip 2 dış duvar tipi, diğerine göre hem ısıtma hem de soğutma enerjisi performansı bakımından daha iyi sonuçlar göstermiştir.

InfiniteRPCM malzemesi ve tek katman, 23°C erime sıcaklığı için soğutma enerjisi yıllık kazanç oranları %8,75-15,21 oranında, 25°C

erime sıcaklığında %6,11-9,62 ve 29°C erime sıcaklığında ise %17,14 ile %11,87 arasında değişmektedir. BioPCM27 malzemesi ve tek katman, 23°C erime sıcaklığı için soğutma enerjisi yıllık kazanç oranları %0,028 ile %1,33 arasında, 25°C erime sıcaklığında %0,23 ile %1,08 ve 29°C erime sıcaklığında ise %0,36 ile %0,98 arasındadır.

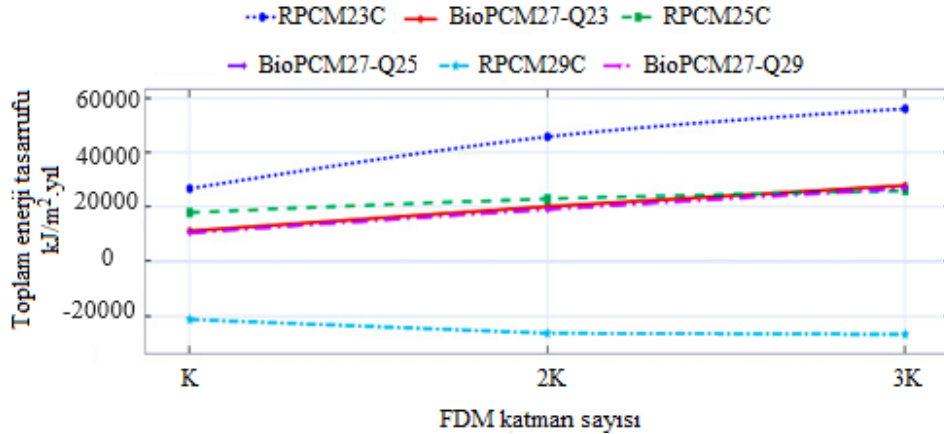
İki katman için InfiniteRPCM malzemesi 23°C erime sıcaklığı için yıllık soğutma enerjisi tasarrufu %14,78-20,51 oranında, 25°C erime sıcaklığı için %6,60-9,55 ve 29°C erime sıcaklığında ise %20,75 ile %15,70 arasında farklılık göstermektedir. Yine iki katman için BioPCM27 malzemesinin 23°C erime sıcaklığındaki yıllık soğutma enerjisi tasarrufu %0,17 ile %1,74 arasında, 25°C için %0,64 ile %1,21 ve 29°C için %0,67-0,82 arasındadır.

Üç katman için faz değiştiren malzeme kullanılması durumunda InfiniteRPCM ve 23°C erime sıcaklığında yıllık soğutma enerjisi tasarruf oranları %17,09-22,85, 25°C erime sıcaklığında %6,19-9,33, 29°C erime sıcaklığında ise %21,79 ile %17,23 arasında değişmektedir. BioPCM27 ve 23°C erime sıcaklığındaki faz değiştiren malzemenin dış duvar içerisine eklenmesiyle elde edilen yıllık soğutma enerji tasarruf oranı %0,29 ile %1,88, 25°C erime sıcaklığında %0,54 ile %1,21 ve 29°C erime sıcaklığı için %0,81 ile %0,54 arasında hesaplanmıştır.

Yıllık toplam enerji tasarrufunun birim dış duvar alanı başına değerleri incelendiğinde, BioPCM27 faz değiştiren malzemede faz değiştiren malzemenin katman sayısının artışı ve erime sıcaklığına bağlı olarak değişimi oldukça düşükken InfiniteRPCM malzemesinde katman sayısının artışı 23°C erime sıcaklığı için oldukça etkili olmak olup 25°C ve 29°C'de ise hemen hemen etkisizdir. Şekil 8'de Tip 1 için faz değiştiren malzemelerin sağladığı yıllık toplam enerji tasarrufunun FDM katman sayısına ve erime sıcaklığına bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. InfiniteRPCM29C haricinde diğer konfigürasyonlar toplam enerji tasarrufunu düşüren yönde etki sağlamaktadır. Tek katmanda yıllık toplam enerji tasarrufu 10.349,50-50.980,20 kJ/m².yıl, iki katmanda 18.995,46-71.189,17 kJ/m².yıl, üç katmanda ise 25.824,66-83.345,98 kJ/m².yıl arasında değişmektedir. Bu miktarlarda InfiniteRPCM29C'nin negatif enerji tasarruf değerleri hariç tutulmuştur.

4.2. FDM'nin Isıtma ve Soğutma Enerjisi İhtiyacına Etkisinin Aylık Analizi (Monthly Analysis of the Effect of PCM on Heating and Cooling Energy Demands):

Tüm bir yılı kapsayan analizler yapılmakla birlikte iklimsel şartlara göre bölgenin ihtiyaçları da gözönünde bulundurularak ısıtma sezonu ve soğutma sezonuna bağlı olarak dönemsel analizlerin de ayrıca



Şekil 8. Tip 1 için faz değiştiren malzemelerin sağladığı yıllık toplam enerji tasarrufunun FDM katman sayısına bağlı olarak değişimi (Change of total annual energy savings provided by phase change materials depending on the number of PCM's layers for Type 1)

değerlendirilmesi gerekmektedir. Aylık bazda analizler incelendiğinde bina dış duvarında herhangi bir faz değiştiren malzeme kullanılmadığı durumda tüm duvar tipleri için aylık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları hesaplanmıştır. Şekil 9'da FDM'siz dış duvar tipleri için toplam birim alan başına aylık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları gösterilmektedir.

Aylık analizde, ısıtma sezonu (Ocak, Şubat, Mart, Nisan, Kasım, Aralık) ve soğutma sezonunda (Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos, Eylül) FDM'lerin karakteristik davranışlarının nasıl etkilendiği, FDM'nin erimesi sırasında ortamdan çektiği ısı ve katlaşması sonrasında ortama saldırdığı gizli ısı ile ısıtma yükünü ve soğutma yükünü nasıl etkilediğine dair incelemeler yapılmıştır. Şekil 10 ve Şekil 11'de Tip 1 ve Tip 2 dış duvar tiplerinde kullanılan faz değiştiren malzemenin katmanına ve erime sıcaklıklarına bağlı olarak yüzde ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf değerlerinin aylık değişimi gösterilmiştir.

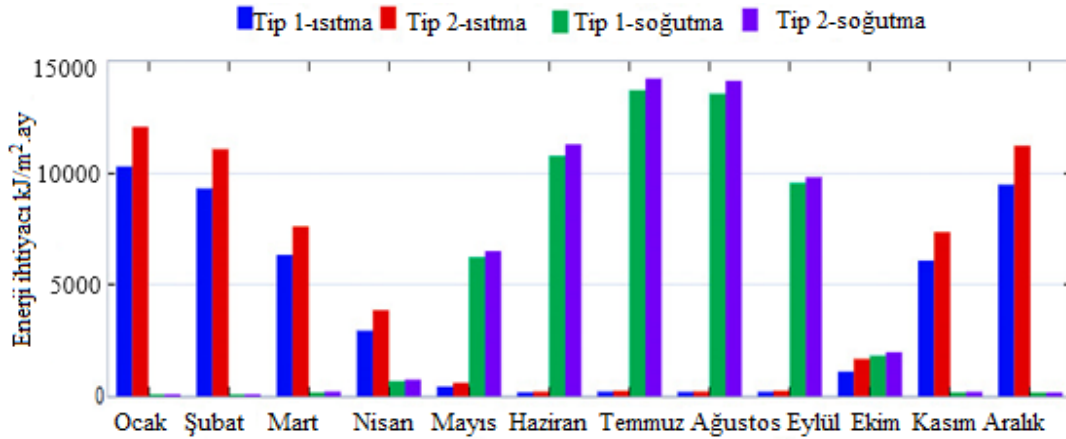
Aylık ısıtma ve soğutma enerjisi kayıp/kazanç oranlarının yanında tam olarak doğru sonuçların elde edilebilmesi için ısıtma ve soğutma sezonu ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf değerlerinin hesaplanması uygun olacaktır. Özellikle Nisan, Mayıs, Ekim ve Kasım aylarında ısıtma enerjisi kazanç oranları tüm duvar konfigürasyonları için maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Tablo 5'te faz değiştiren malzemelerin sağladığı ısıtma ve soğutma sezonu için elde edilen enerji tasarruf oranları verilmiştir. Hem InfiniteRPCM malzemesi hem de BioPCM27 malzemesinde aylık ısıtma enerjisi kazanç oranları katman sayısına bağlı olarak artış göstermektedir. Fakat BioPCM27'de katman sayısı ile artan kazanç oranı erime sıcaklığının artmasından etkilenmemektedir. InfiniteRPCM malzemesi için en yüksek kazanç oranlarına üç katmanlı ve 23°C erime sıcaklığında ulaşılmaktadır. Her iki duvar tipi içinde aylık negatif ısı kazanç oranı değeri mevcut değildir. Aylık soğutma enerjisi kazanç kayıp oranlarına bakarsak InfiniteRPCM malzemesinde Mart, Nisan, Ekim ve Kasım aylarında maksimum negatif kayıp oranlarına ulaşılırken, soğutma sezonunda sağlanan verim BioPCM27 malzemesine göre oldukça yüksektir. Fakat aynı malzeme için 29°C erime sıcaklığı oldukça kötü performans göstermektedir. BioPCM27 için erime sıcaklığına göre soğutma enerjisindeki değişim yine çok az olmaktadır.

Isıtma sezonunda InfiniteRPCM malzemesi için 23°C erime sıcaklığı için enerji tasarrufu oranları 25°C erime sıcaklığında yarıya ve 29°C değerinde ise yaklaşık üçte birine kadar düşmektedir. InfiniteRPCM23C ile BioPCM27Q23/Q25/Q29 malzemesinin ısıtma sezonundaki enerji tasarruf oranları birbirine yakın değerler

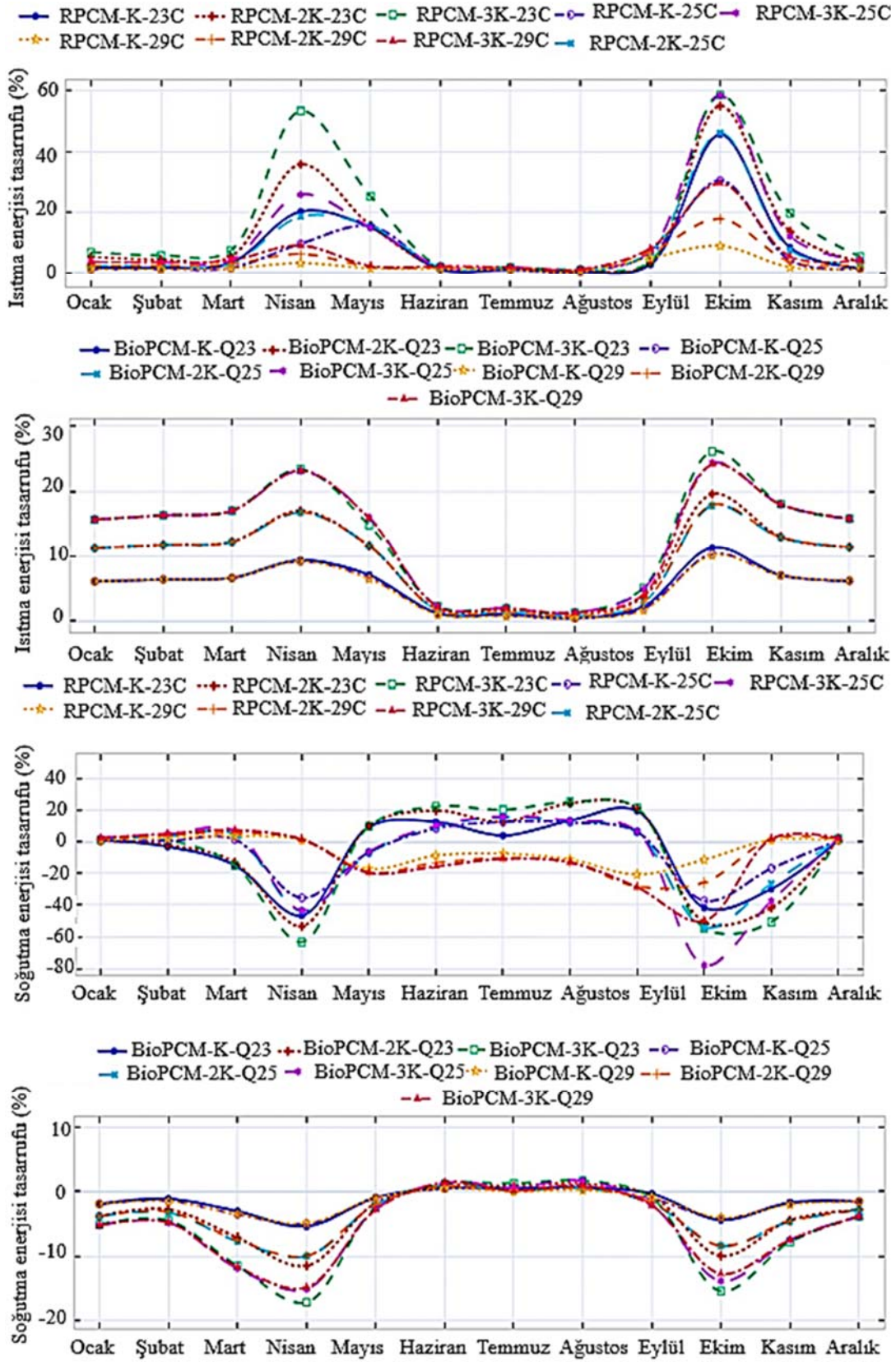
almaktadır. Tip 1 için tek katman için % 6,22-6,98 arasındaki ısıtma sezonu enerji tasarrufu, iki katmanda %11,43-12,79'a kadar artarken, üç katmanda %16,44-17,71 değerine ulaşmaktadır. Tip 2 dış duvarda enerji tasarruf oranları daha da yüksek olup tek katmanda ısıtma sezonu enerji oranı % 9,27-10,15'a, iki katmanda bu oran %16,23-16,88'e, üç katmanda ise %21,41-22,79'a kadar artmaktadır. Isıtma sezonunda sağlanan en yüksek enerji tasarrufu Tip 1 dış duvarda % 17,71 ve Tip 2 dış duvarda % 22,79 olup her ikisi de üç katmanlı BioPCM27 malzemesine aittir. Hem ısıtma hem de soğutma sezonu için en iyi sonuçlara Tip 2 dış duvar tipinde ulaşılmaktadır. Tablo 5'te faz değiştiren malzemelerin sağladığı ısıtma ve soğutma sezonu için elde edilen enerji tasarruf oranları verilmiştir. Soğutma sezonunda BioPCM27 malzemesinin enerji tasarruf oranı Tip 1 için sadece 23°C erime sıcaklığında pozitif sonuçlara ancak ulaşılabilirken, Tip 2'de her üç erime sıcaklığında da pozitif enerji tasarruf oranlarına ulaşılsa bile bu oran %0,79-1,39 arasında olup oldukça düşüktür. InfiniteRPCM malzemesinde 29°C erime sıcaklığı hariç oldukça yüksek enerji tasarruf değerlerine ulaşılmıştır. Tip 1'de tek katman için soğutma sezonu enerji tasarruf oranları %6,45-11,72 arasında, iki katman için bu oran %7,45-17,54 arasında, üç katman için ise %7,83-19,78 arasında değişmektedir. Tip 2 dış duvarda enerji tasarruf oranı tek katmanda %10,17-18,09'a, iki katmanda %10,76-23,17'ye, üç katmanda ise bu oran daha da artarak %11,01-25,38 değerlerine ulaşmaktadır. Özellikle soğutma sezonu için InfiniteRPCM23C haricinde 25°C ve 29°C erime sıcaklıklarında katman sayısının artışı ile birlikte tasarruf oranlarının çok az değiştiği görülmektedir. Soğutma sezonunda ise sağlanan en yüksek enerji tasarrufu Tip 1 dış duvarda % 19,78 ve Tip 2 dış duvarda % 25,38 olup, bu performansı üç katmanlı InfiniteRPCM23C malzemesi sağlamaktadır.

Tip 2 dış duvar için tüm erime sıcaklıklarında BioPCM27 ve InfiniteRPCM malzemesinin sağladığı birim dış duvar alanı başına aylık toplam enerji tasarruf değerleri Şekil 12'de gösterilmektedir. Isıtma sezonunda BioPCM27 malzemesi, soğutma sezonunda 29 °C erime sıcaklığı hariç InfiniteRPCM malzemesi yüksek enerji tasarrufuna sahiptir.

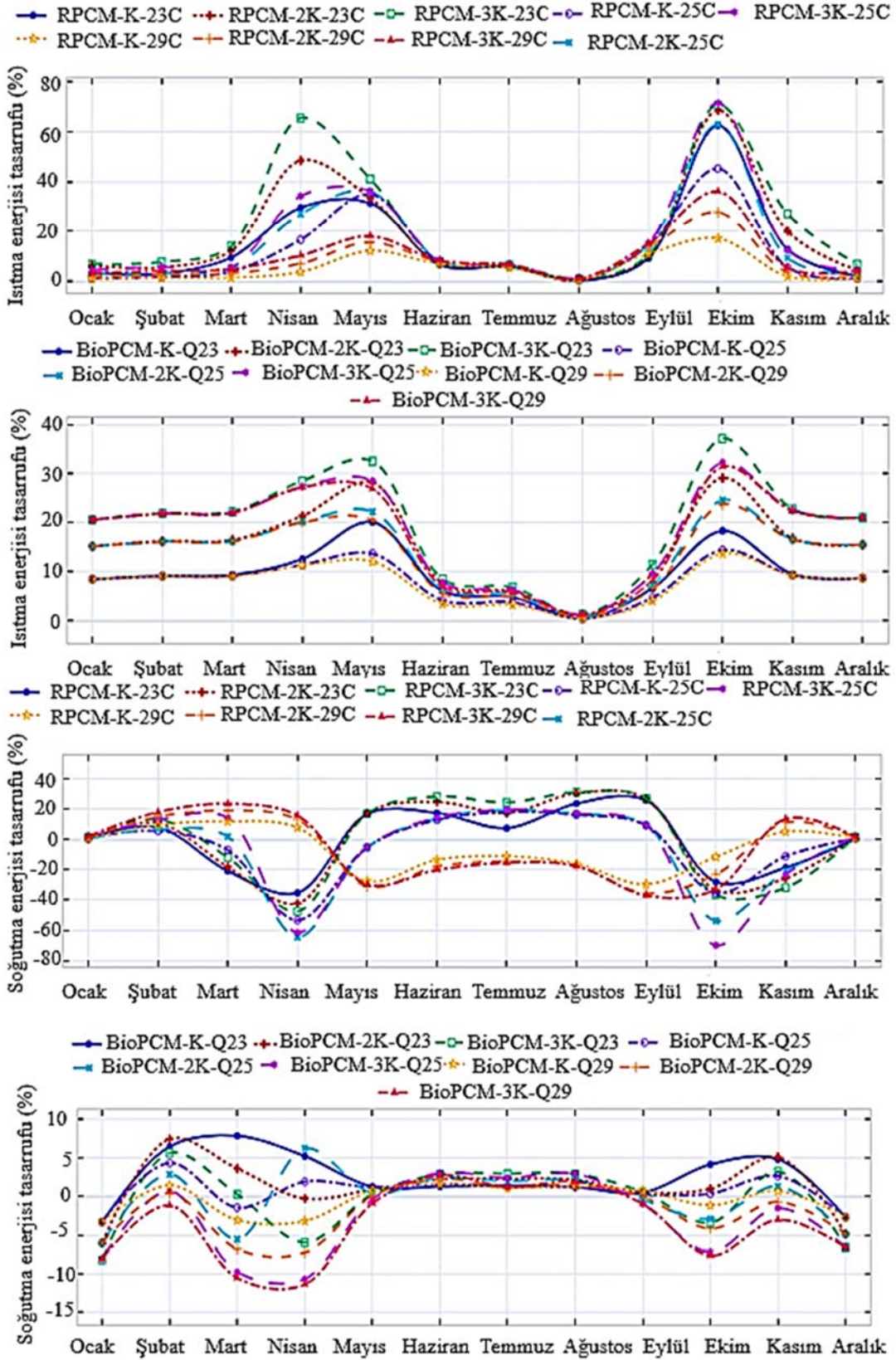
Tip 1 dış duvarda BioPCM27 malzemesi için birim dış duvar alanı başına yıllık toplam enerji tasarrufu 10349,50 kJ/m².yıl ile 27759,44 kJ/m².yıl arasında, Tip 2'de aynı malzeme için 20522,0 kJ/m².yıl ile 83345,98 kJ/m².yıl arasında değişmektedir. InfiniteRPCM malzemesini incelersek birim dış duvar alanı başına yıllık toplam enerji tasarruf değerleri Tip 1 dış duvarda 17850,97 kJ/m².yıl ile 55890,72 kJ/m².yıl arasında, Tip 2 dış duvarda ise 30994,13 kJ/m².yıl ile 83345,98 kJ/m².yıl arasında değerler almaktadır. Genel olarak InfiniteRPCM29C konfigürasyonu haricinde pozitif sonuçlara ulaşılmaktadır. Bu da erime sıcaklığının önemini vurgulamaktadır.



Şekil 9. Dış duvar içerisinde FDM olmadığı durum için aylık ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçları (Monthly heating and cooling energy demands for the case of without PCM into the external wall)



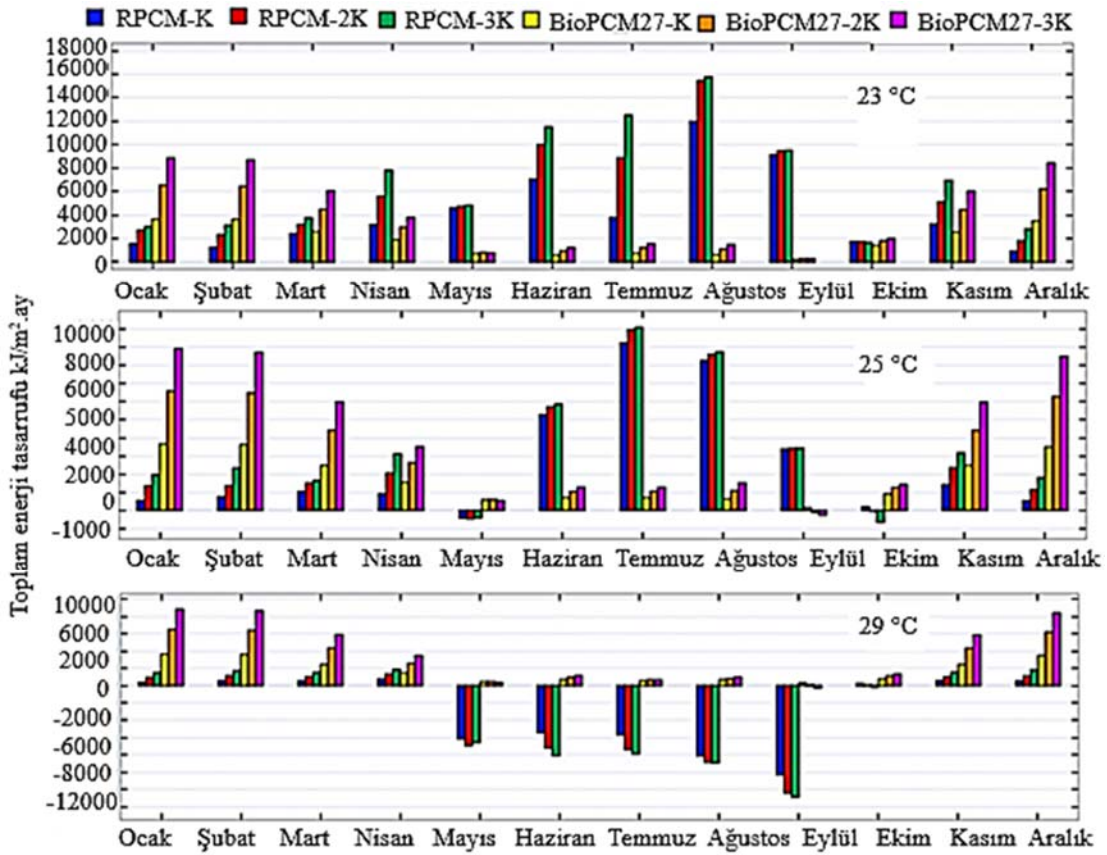
Şekil 10. FDM entegreli Tip 1 dış duvar tipi için aylık ısıtma ve soğutma enerji tasarruf oranları (Monthly heating and cooling energy savings rates for PCM-integrated external wall of Type 1)



Şekil 11. FDM entegreli Tip 2 dış duvar tipi için aylık ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları (Monthly heating and cooling energy savings rates for PCM-integrated external wall of Type 2)

Tablo 5. Faz değiştiren malzemelerin sağladığı ısıtma ve soğutma sezonu için enerji tasarruf oranları
(Heating and cooling season energy savings rates provided by phase change materials)

		InfiniteRPCM			BioPCM27			
		23°C	25°C	29°C	23°C	25°C	29°C	
Isıtma sezonu (%)	Tip 1	K	6,22	3,31	1,82	6,98	6,93	6,93
		2K	11,43	6,25	3,52	12,79	12,72	12,74
		3K	16,44	9,01	5,10	17,71	17,65	17,67
	Tip 2	K	10,15	5,11	1,83	9,57	9,31	9,27
		2K	16,23	8,55	3,62	16,88	16,60	16,55
		3K	21,41	11,19	5,50	22,79	22,49	22,45
Soğutma sezonu (%)	Tip 1	K	11,72	6,45	-13,12	0,065	-0,18	-0,28
		2K	17,54	7,45	-16,78	0,067	-0,47	-0,49
		3K	19,78	7,83	-17,61	0,127	-0,23	-0,52
	Tip 2	K	18,09	10,17	-19,51	1,12	1,13	1,09
		2K	23,17	10,76	-23,24	1,64	1,30	1,01
		3K	25,38	11,01	-23,92	1,91	1,39	0,79

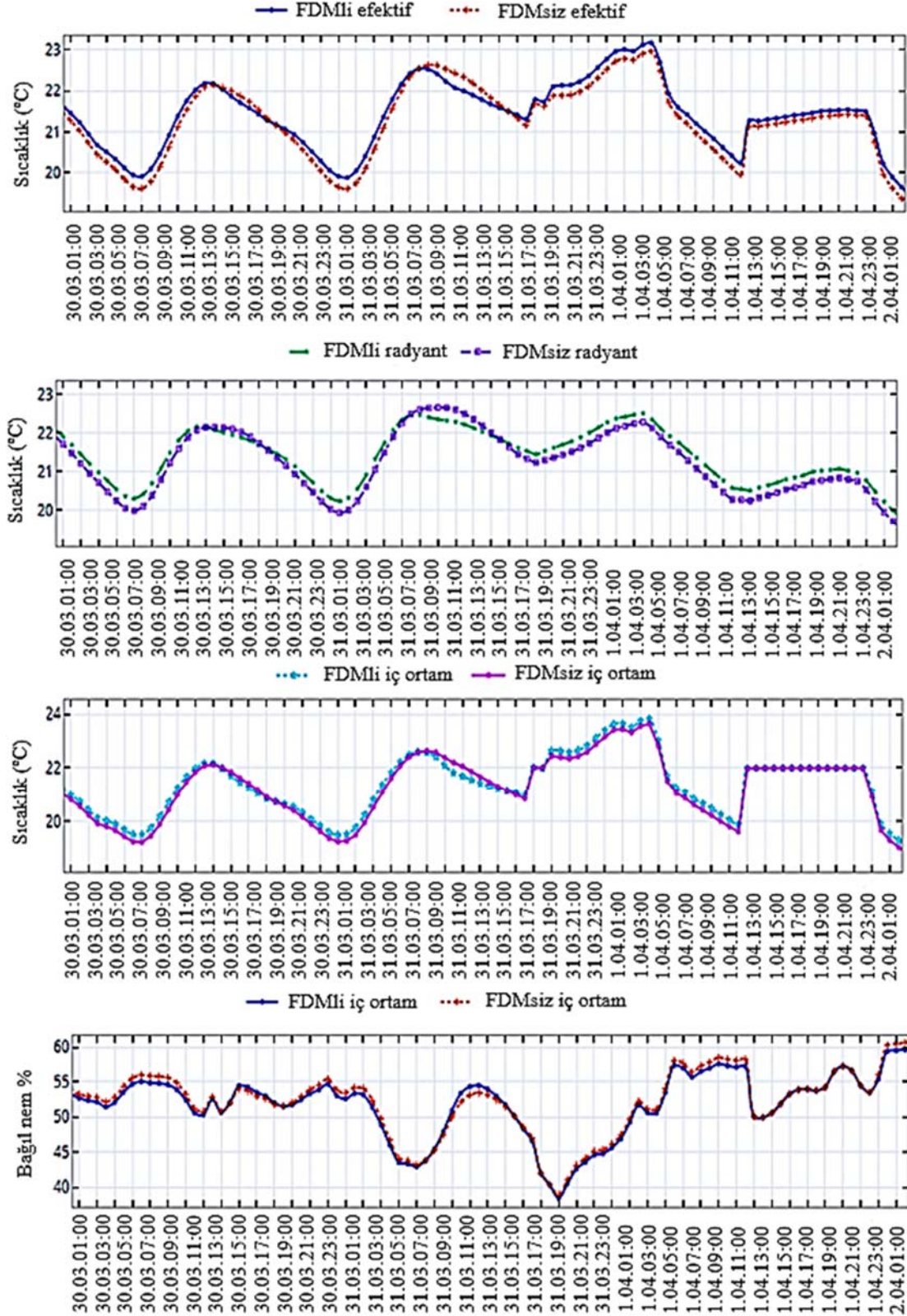
**Şekil 12.** FDM entegreli Tip 2 dış duvar tipi için toplam enerji tasarrufunun aylık değişimi
(Monthly variation of total energy savings for PCM-integrated external wall of Type 2)

4.3. FDM'lerin İç Ortam Konfor Şartlarına Etkisi (Effects of PCMs on Indoor Comfort Conditions)

Binalarda yapı bileşeni içerisine eklenen faz değiştiren malzemeler, gün içerisinde sabah saatlerinden başlayarak oğlen saatlerinde güneş işiniminin etkisiyle sarj olurken ortamdan çektiği ısıyı bünyesinde depolamaktadır. Bu aşamalarda oğlen maksimum hava sıcaklığında erime işlemi genellikle tamamlanmaktadır.

Daha sonra hava sıcaklığının ve güneş işinim Őiddetinin azalmasıyla deşarj işlemine başlamaktadır. Bu işlem sabah saatlerine kadar devam etmektedir. FDM, sarj esnasında bünyesinde depoladığı ısıyı deşarj işlemi boyunca aşama aşama ortama vermektedir.

Dış ortam sıcaklığına bağlı olarak ve kullanılan faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığın uygun olarak seçilmesi durumunda genellikle sarj ve deşarj işlemleri günde birer kez olmaktadır. Faz değiştiren malzemeler, kapsüllenmiş halde kullanıldıklarından donma ve erime işlemleri sırasında herhangi bir sızıntı veya kayıp meydana gelmemekte ve böylece defalarca sarj ve deşarj çevrimleri devam etmektedir. Faz değiştiren malzemelerin ısıtmaya daha az ihtiyaç duyulan zamanlarda ortamdaki fazla ısıyı çekerek bünyesine hapsedmesi hava sıcaklığının soğumaya başladığı zamanda donarak bünyesinde hapsedtiği gizli ısıyı ortama vermesi sadece ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacının düşmesine neden olmaz. Aynı zamanda aşırı ısınma ve aşırı soğunma gibi iç ortam konforuna zarar veren durumları da dengeler. Şekil 13'de bir mahalın güneye bakan dış



Şekil 13. FDM'li ve FDM'siz dış duvarlı mahalın bağıl nemi, efektif, radyant ve iç ortam sıcaklıklarının saatlik değişimi (Hourly variation of relative humidity, effective, radiant and indoor temperatures of the zone with integrated PCM and nonPCM external wall)

duvarında (Tip 1) FDMsiz durum ile dış duvarında tek katman 23°C erime sıcaklıklı BioPCM27 faz değiştiren malzemeli durum için iç

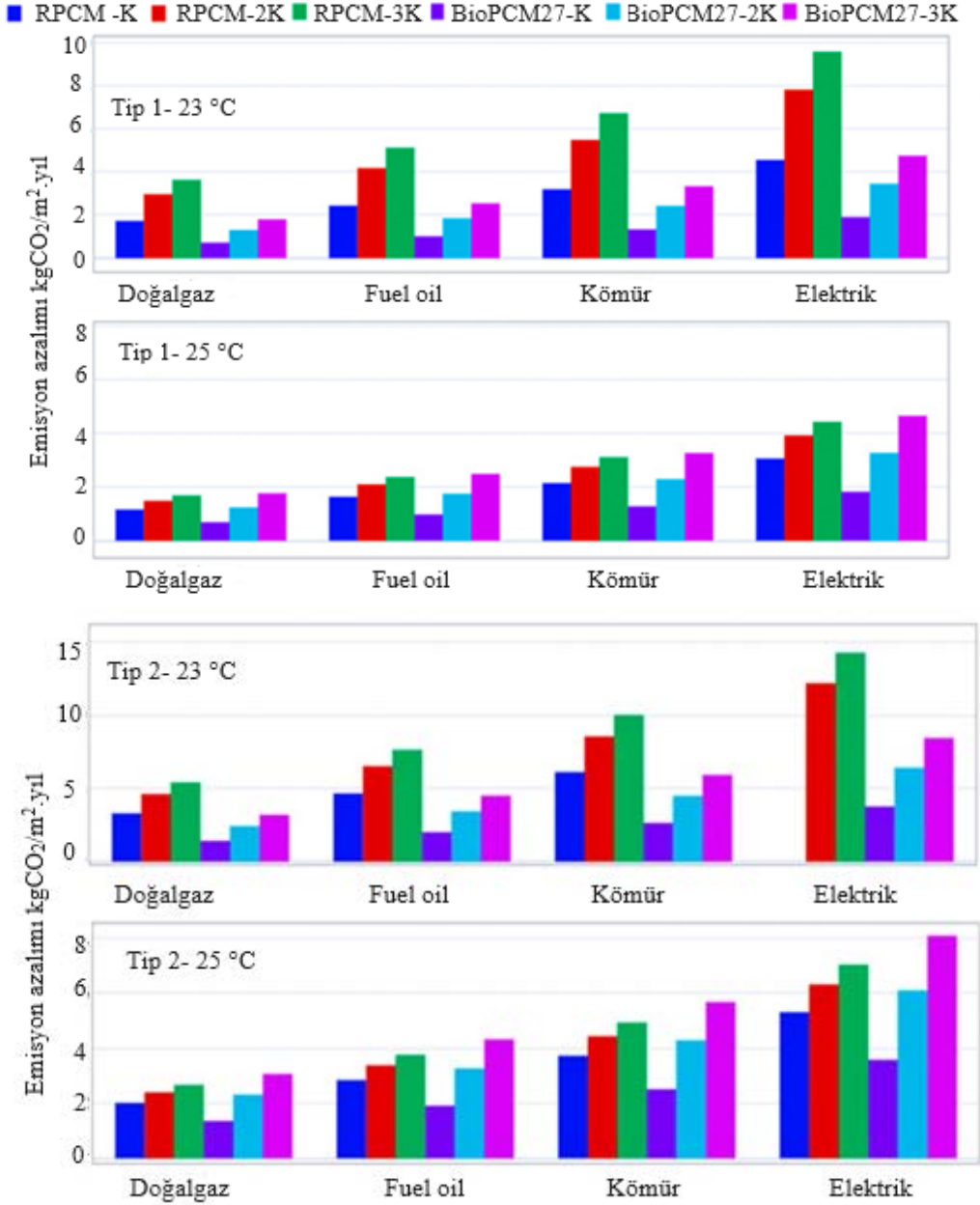
ortam hava sıcaklığı, efektif ve radyant sıcaklıkları ve ortamın bağıl neminin değişimi verilmiştir. Şekilde FDM'li duvarlı mahalde efektif,

Radyant ve iç ortam sıcaklıklarının deşarj süresi boyunca arttığı, sıcaklık ve nem dalgalanmalarının azaldığı açıkça görülmektedir.

4.4. FDM'lerin CO₂ Emisyonlarına Etkisi (Effect of PCMs on CO₂ Emissions)

Bina dış duvarına entegre olarak kullanılabilen farklı katman ve erime sıcaklıklarındaki faz değiştiren malzemeler yüksek oranlarda sağladıkları yakıt tasarrufu nedeniyle karbon emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır. Şekil 14'te kömür, doğalgaz, fuel-oil ve elektrik için faz değiştiren malzemelerin farklı katman ve erime sıcaklıklarındaki birim dış duvar alanı başına yıllık CO₂ emisyon azalımı değerleri verilmiştir. Şekle yerleştirilen RPCM23C-K, BioPCM27Q25-2K gibi ifadelerde yer alan K, 2K ve 3K ile FDM katman sayısı kastedilmektedir. Tüm yakıt tiplerinde

InfinitRPCM29C'de elde edilen negatif kazanımlar haricinde diğer kombinasyonlar için doğalgaz yakıtta birim dış duvar alanı başına yıllık CO₂ emisyon azalımı Tip 1 için 0,672-3,633 kgCO₂/m².yıl arasında, Tip 2 için 1,334-5,417 kgCO₂/m².yıl arasında değişmektedir. Kömür yakıtta yıllık CO₂ emisyon azalımı Tip 1 için 1,245-6,722 kgCO₂/m².yıl arasında, Tip 2 için 2,468-10,025 kgCO₂/m².yıl arasında farklı FDM katman sayısı ve erime sıcaklığına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Fuel-oil yakıtlı bir sistemden elde edilebilecek yıllık CO₂ emisyon azalımı ise yine Tip 1 için 0,949-5,123 kgCO₂/m².yıl ve Tip 2 için 1,881-7,640 kgCO₂/m².yıl'dır. Yakıt olarak elektrik tüketen bir sistemde ise birim dış duvar alanı başına yıllık CO₂ emisyon azalımı ise diğer yakıt tiplerine göre daha yüksek olup Tip 1 için 1,774-9,579 kgCO₂/m².yıl ve Tip 2 için 3,517-14,284 kgCO₂/m².yıl arasında katman sayısı ve erime sıcaklıklarına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 14. Dış duvara entegre FDM'lerin sağladığı yıllık CO₂ emisyon azalımı değerleri
(The values of annual CO₂ emission reduction provided by PCM-integrated external wall)

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada İzmir ili için 500 m² oturma alanına sahip bir villa konut projesi modellenmiş ve bina dış duvarına entegre faz değiştiren malzemelerin etkisi EnergyPlus tabanlı DesignBuilder arayüzü kullanılarak analiz edilmiştir. İki farklı dış duvar konfigürasyonu tasarlanmış olup dış duvara entegre kullanılabilen iki farklı tip faz değiştiren malzeme kullanılmıştır. Bu faz değiştiren malzemeler dış duvara entegre olarak kullanılabilen biri organik kökenli BioPCM27 ve diğeri ise inorganik bileşimli InfiniteRPCM'dir. Tasarlanan duvar tiplerinde kullanılan faz değiştiren malzemelerin duvar içindeki katman sayıları artırılarak faz değiştiren malzemenin kalınlığının bina enerji performansına etkisi incelenmiştir. Ayrıca faz değiştiren malzemeler 23°C, 25°C ve 29°C olmak üzere üç ayrı erime sıcaklığında analiz edilerek faz değiştiren malzemelerin erime sıcaklığının ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyacına katkısı araştırılmıştır. Dış duvarda entegre kullanılacak faz değiştiren malzemelerin sağladığı ısıtma ve soğutma enerjisi tasarruf oranları aylık, yıllık, ısıtma ve soğutma sezonu için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Faz değiştiren malzemelerin kullanılmasıyla elde edilen CO₂ emisyon azalım miktarları ısıtma sisteminde kullanılan kömür, doğalgaz, fuel oil ve elektrik gibi yakıt tipleri için hesaplanmıştır. Çalışmada ulaşılan sonuçların literatürde verilen birçok çalışma, örneğin Al-Yasiri ve Szabo [15, 39], Arıcı vd. [33] ve Özyurt [27] ile uyumlu olduğu görülmüştür. Çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- BioPCM27 faz değiştiren malzeme için ısıtma enerjisine etkisi bakımından değerlendirildiğinde Tip 2 dış duvar tipli konfigürasyon daha yüksek performans gösterirken kalınlığın artmasıyla ısıtma enerjisi ihtiyacı kazanç oranı bir hayli artmaktadır. Aynı malzemeyi erime sıcaklığına göre değerlendirdiğimizde ise her üç sıcaklıkta da ısıtma enerjisi ihtiyacı kazancının hemen hemen aynı kaldığı görülmüştür. BioPCM27'nin soğutma enerjisi ihtiyacına etkisine bakıldığında Tip 1 dış duvar konfigürasyonları hem farklı kalınlık hemde erime sıcaklıkları bakımından oldukça kötü performans göstermektedir ve hatta soğutma enerjisi ihtiyacını artırmaktadır.
- InfiniteRPCM malzemesi ısıtma enerjisi ihtiyacına etkisi bakımından incelendiğinde 23°C ve 25°C erime sıcaklığında faz değiştiren malzemenin kalınlığındaki artışla beraber ısıtma enerjisi kazancı artmaktadır. Fakat 29°C erime sıcaklığındaki RPCM oldukça kötü performans göstermektedir. Soğutma enerjisi ihtiyacına etkisi bakımından incelendiğinde ise InfiniteRPCM23C için kalınlıkla soğutma enerjisi kazancı artarken InfiniteRPCM25C'de kalınlık ya da katman sayısı ile değişimin çok az miktarda olduğu görülmektedir. Hem soğutma enerjisi hemde ısıtma enerjisi performansı bakımından 23°C erime sıcaklığı diğer sıcaklıklara göre oldukça iyi performans göstermiştir.
- Isıtma sezonunda InfiniteRPCM malzemesi 23°C erime sıcaklığı için enerji tasarrufu oranları 25°C erime sıcaklığında yarıya ve 29°C değerinde ise yaklaşık üçte birine kadar düşmektedir. InfiniteRPCM23C ile BioPCM27Q23/Q25/Q29 malzemesinin ısıtma sezonundaki enerji tasarruf oranları birbirine yakın değerler almaktadır. Isıtma sezonunda sağlanan en yüksek enerji tasarrufu Tip 1 dış duvarda % 17,71 ve Tip 2 dış duvarda % 22,79 olup her ikisi de üç katmanlı BioPCM27 malzemesine aittir. Hem ısıtma hem de soğutma sezonu için en iyi sonuçlara Tip 2 dış duvar tipinde ulaşılmaktadır.
- Soğutma sezonunda BioPCM27 malzemesinin enerji tasarruf oranı Tip 1 için sadece 23°C erime sıcaklığında pozitif sonuçlara ancak ulaşılabılırken Tip 2'de her üç erime sıcaklığında da pozitif enerji tasarruf oranlarına ulaşılsa bile bu oran %0,79-1,39 arasında olup oldukça düşüktür. InfiniteRPCM malzemesinde 29°C erime sıcaklığı hariç oldukça yüksek enerji tasarruf değerlerine ulaşılmıştır. Soğutma sezonunda ise sağlanan en yüksek enerji tasarrufu Tip 1 dış duvarda % 19,78 ve Tip 2 dış duvarda % 25,38

olup bu performansı üç katmanlı InfiniteRPCM23C malzemesi sağlamaktadır.

- InfiniteRPCM malzemesinin, BioPCM27 malzemesine göre yüksek ısıletkenlik değerine sahip olmasının özellikle bina soğutma yükünün azalmasında oldukça etkili olduğu görülmüştür.
- Duvar tipi, faz değiştiren malzeme cinsi, farklı FDM kalınlıkları ve erime sıcaklıklarına bağlı olarak faz değiştiren malzemenin yıllık toplam enerji tasarrufu 10.349,50-83.345,98 kJ/m².yıl ve yakıt tiplerine göre yıllık CO₂ emisyon azalımı 0,672-14,284 kgCO₂/m².yıl arasında değişmektedir.
- Dış duvara entegre edilerek kullanılan faz değiştiren malzemeler uygulandıkları binanın sadece ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak kullanıldıkları mahal içerisindeki termal konfor şartlarını iyileştirmektedir.

Simgeler (Symbols)

A	: Yüzey alanı (m ²)
C _p	: Özgül ısı (kJ/kg.K)
EF	: CO ₂ emisyon faktörü (kgCO ₂ /kWh)
FDM	: Faz değiştiren malzeme
h	: Entalpi (kJ/kg)
H _u	: Yakıtın alt ısı değeri (kcal/m ³)
k	: Isıl iletkenlik katsayısı (W/m.K)
L	: Uzunluk (m)
V	: Yıllık yakıt tasarrufu (m ³ /yıl)
t	: Zaman (s)
T	: Sıcaklık (°C)
T _a	: İç ortam hava sıcaklığı (°C)
T _{ef}	: Efektif sıcaklığı (°C)
T _e	: Erime sıcaklığı (°C)
T _o	: Çevre sıcaklığı (°C)
T _R	: Radyant sıcaklığı (°C)
x	: Kalınlık (m)

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışmaya finansal katkılarından dolayı Gümüşhane Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederiz (Proje No: 21.E0117.07.01).

Kaynaklar (References)

1. Terhan M., Determination of optimum insulation thickness of building external wall for Gumushane province based on life cycle cost analysis, Open Journal of Nano, 6 (1), 36-46, 2021.
2. Terhan M., Özgağdaş E., Omar M.A., Energy and economic assessments of waste heat recovery by designs of economizer, condensing economizer and air preheater, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (4), 2521-2536, 2023.
3. Othan O., Omar M. A., Thermo-economic study of two different combined heat-power system for a hospital, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (3), 1467-1480, 2023.
4. Sivanathan A., Dou Q., Wang Y., Li Y., Corker J., Zhou Y., Fan M., Phase change materials for building construction: An overview of nano-micro-encapsulation, Nanotechnology Reviews, 9 (1), 896-921, 2020.
5. Kee S. Y., Munusamy Y., Ong K. S., Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage, Applied Thermal Engineering, 131, 455-471, 2018.
6. Yang J., Qi G. Q., Liu Y., Bao R. Y., Liu Z. Y., Yang W., Hybrid graphene aerogels/phase change material composites: thermal conductivity, shape-stabilization and light-to-thermal energy storage, Carbon, 100, 693-702, 2016.
7. Abdelsalam M. Y., Teamah H. M., Lightstone M. F., Cotton J. S., Hybrid thermal energy storage with phase change materials for solar domestic hot water applications: direct versus indirect heat exchange systems, Renewable Energy, 147, 77-88, 2020.

8. Ng D. Q., Tseng Y. L., Shih Y. F., Lian H. Y., Yu Y. H., Synthesis of novel phase change material microcapsule and its application, *Polymer*, 133, 250-262, 2017.
9. Umair M. M., Zhang Y., Iqbal K., Zhang S., Tang B., Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage – a review, *Energy*, 235, 846-873, 2019.
10. Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D., Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345, 2009.
11. Pomianowski M., Heiselberg P., Zhang Y., Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings, *Energy Buildings*, 67, 56-69, 2013.
12. Saafi K., Daouas N., Energy and cost efficiency of phase change materials integrated in building envelopes under Tunisia Mediterranean climate, *Energy*, 187, 115987, 2019.
13. Fabiani C., Piselli C., Pisello A. L., Thermo-optic durability of cool roof membranes: effect of shape stabilized phase change material inclusion on building energy efficiency, *Energy and Buildings*, 207, 109592, 2020.
14. Khan Z., Khan Z., Ghafoor A., A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility, *Energy Conversion and Management*, 115, 132-158, 2016.
15. Al-Yasiri Q., Szabó M., Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis, *Journal of Building Engineering*, 36, 102122, 2021.
16. Saffari M., Gracia A., Fernández C., Cabeza L. F., Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings, *Applied Energy*, 202, 420-434, 2017.
17. Cabeza L. F., Miró L., Oró E., Gracia A., Martín V., Krönauer A., Fernández A. I., CO₂ mitigation accounting for thermal energy storage (TES) case studies, *Applied Energy*, 155, 365-377, 2015.
18. Piselli C., Saffari M., Gracia A., Pisello A. L., Cotana F., Cabeza L. F., Optimization of roof solar reflectance under different climate conditions, occupancy, building configuration and energy systems, *Energy and Buildings*, 151, 81-97, 2017.
19. Chel A., Kaushik G., Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building, *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 655-669, 2018.
20. Tunçbilek E., Arıcı M., Bouadila S., Wonorahardjo S., Seasonal and annual performance analysis of PCM-integrated building brick under the climatic conditions of Marmara region, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 141 (1), 613-624, 2020.
21. Alam M., Jamil H., Sanjayan J., Wilson J., Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities, *Energy and Buildings*, 78, 192–201, 2014.
22. Sajjadian S. M., Lewis J., Sharples S., The potential of phase change materials to reduce domestic cooling energy loads for current and future UK climates, *Energy and Buildings*, 93, 83-89, 2015.
23. Shen H., Liu X., Energy savings potential of phase change material integrated building envelope in South Texas, 4th International High Performance Buildings Conference, Purdue-Indiana, 3644 (1-8), 11-14 July, 2016.
24. Lei J., Yang J., Yang E. H., Energy performance of building envelopes integrated with phase change materials for cooling load reduction in tropical Singapore, *Applied Energy*, 162, 207-217, 2016.
25. Mi X., Liu R., Cui H., Memon S. A., Xing F., Lo Y., Energy and economic analysis of building integrated with PCM in different cities of China, *Applied Energy*, 175, 324-336, 2016.
26. Aketouane Z., Malha M., Bruneau D., Bah A., Michel B., Asbik M., Ansari O., Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks: The case of Moroccan buildings, *Building Simulation*, 11, 1109-1122, 2018.
27. Ozyurt E. E., The evaluation of solar radiation contribution on the use of phase change materials in the external walls regarding building energy efficiency: example of Izmir, Master's Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Tur826key, 2019.
28. Al-Yasiri Q., Szabó M., Numerical analysis of thin building envelope-integrated phase change material towards energy-efficient buildings in severe hot location, *Sustainable Cities and Society*, 89, 104365, 2023.
29. Al-Yasiri Q., Szabó M., Building envelope-combined phase change material and thermal insulation for energy-effective buildings during harsh summer: Simulation-based analysis, *Energy for Sustainable Development*, 72, 326-339, 2023.
30. Kharbouch Y., Mimet A., El Ganaoui M., Ouhaine L., Thermal energy and economic analysis of a PCM-enhanced household envelope considering different climate zones in Morocco, *International Journal of Sustainable Energy*, 37 (6), 515-532, 2018.
31. Khan M., Khan M.M., Irfan M., Ahmad N., Haq M.A., Khan I., Mousa M., Energy performance enhancement of residential buildings in Pakistan by integrating phase change materials in building envelopes, *Energy Reports*, 8, 9290-9307, 2022.
32. Terhan M., İlgar G., Investigation of used PCM-integrated into building exterior walls for energy savings and optimization of PCM melting temperatures, *Construction and Building Materials*, 369, 130601, 2023.
33. Arıcı M., Bilgin F., Krajcik M., Nizetic S., Karabay H., Energy saving and CO₂ reduction potential of external buildings walls containing two layers of phase change material, *Energy*, 252, 124010, 2022.
34. Crawley D.B., Lawrie L.K., Winkelmann F.C., Buhl W.F., Huang Y.J., Pedersen C.O., Strand R.K., Liesen R.J., Fisher D.E., Witte M.J., Glazer J., Energyplus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, 33, 319-331, 2001.
35. Tabares-Velasco P.C., Christensen C., Bianchi M., Verification and validation of energyplus phase change material model for opaque wall assemblies, *Building and Environment*, 54, 186-196, 2012.
36. Feng F., Fu Y., Yang Z., O'Neill Z., Enhancement of phase change material hysteresis model: a case study of modeling building envelope in energyplus, *Energy&Buildings*, 276, 112511, 2022.
37. Terhan M., Optimization insulation thickness and reduction of CO₂ emissions for pipes in all generation district heating networks, *Science Progress*, 105 (3), 1-29, 2022.
38. Energy Performance Regulations in Buildings, Ankara, Turkey, 2011.
39. Al-Yasiri Q., Szabó M., Numerical analysis of thin building envelope-integrated phase change material towards energy-efficient buildings in severe hot location, *Sustainable Cities and Society*, 89, 104365, 2023.