



Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Kabuğunda Kullanımı

Usage in Building Envelope of Phase Change Materials

Deniz Saylam Canım¹, Sibel Maçka Kalfa*²¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Trabzon, dsaylam@hotmail.com² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Trabzon, sibelmacka@ktu.edu.tr

MAKALE BİLGİLERİ

Makale geçmişi:

Geliş: 11 Ağustos 2020
Düzeltilme: 17 Eylül 2020
Kabul: 17 Eylül 2020

Anahtar kelimeler:

Faz değiştiren malzeme, bina kabuğu, trombe duvar, parafin, yağ asidi

ÖZET

Günümüzde binalarda, bina kabuğunun ısıl kütlelerini artırarak enerji tasarrufu sağlayan ve enerjiyi ısıl kütlede gizli ısı olarak depolayan faz değiştiren malzemelerin (FDM) kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Ancak bu malzemelerin özellikle bina kabuğunda kullanımı ile ilgili literatürde mevcut olan teorik, uygulama ve deneysel çalışma sayısı yeterli değildir ve bu konu ile ilgili bilgi eksikliği yapılan çalışmaların sonuçlarını etkilemektedir. Bu çalışma ile bina kabuğunda kullanılmaya yeni başlanmış olan faz değiştiren malzemelerin son yıllarda yapılmış olan tez, makale, kitap ve araştırma projeleri üzerinden farklı kategorilerde incelenmesi ve yapılan incelemeler sonucunda FDM ile ilgili literatür özetinin okuyucuya sunulması amacıyla bu konudaki gündeme ışık tutulması hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda son yıllarda yapılmış olan yaklaşık 50 bilimsel çalışma; FDM'nin kullanıldığı bina kabuklarının farklı iklim bölgelerinde kullanımı, FDM'nin kullanıldığı yapı elemanı, kullanılan FDM çeşitleri, FDM ile birleştirme teknikleri, çalışma tipi ve kullanılan simülasyon programı başlıkları altında değerlendirilerek tablolar ve görsellerle ifade edilmiştir. Farklı tipteki FDM'lerin ısıl performans özellikleri, avantaj- dezavantajları ve uygulama yöntemleri karşılaştırılarak gerekli önerilerde bulunulmuş ve bu konuda çalışacak olan araştırmacıların izlemesi gereken süreç bir diyagram üzerinde gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, FDM'ler üzerine yapılmış birçok çalışma olmasına rağmen bu konudaki mühendislik bilgisinin yetersiz olduğu, deneysel çalışma sayısının artırılması gerekliliği saptanmış ve en önemlisi FDM'lerin her iklim koşulunda bina kabuğunda kullanıma uygun, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir malzeme olarak geliştirilmesinin büyük önem arz ettiği belirtilmiştir.

Doi: 10.24012/dumf.779147

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 11 August 2020
Revised: 17 September 2020
Accepted: 17 September 2020

Keywords:

Phase change material, building envelope, trombe wall, parafin, fatty acids

ABSTRACT

Nowadays, the use of phase-changing materials (PCM) which store energy as latent heat in the thermal mass and provide energy saving by increased thermal mass of building envelope is becoming more and more common in buildings. However, in literature, the number of theoretical, practical and experimental study on using in building envelope of these materials is not enough and lack of information in relation to this topic effects results of similar studies. With this study, it is aimed to examine the phase-changing materials that have just started to be used in the building envelope in different categories through thesis, articles, books, and research projects made in recent years and to shed light on the agenda by means of present a summary of the literature on PCM to the reader in result of these examinations. In line with these targets; approximately 50 scientific studies published in recent years; Usage in different climatic regions of building envelopes with PCM, the building element where the PCM is used, the PCM types used, the joining techniques with PCM, the study type and the simulation program used are evaluated and expressed with tables and visuals. By comparing the thermal performance characteristics, advantages-disadvantages and application methods of different types of PCMs, the necessary suggestions were made and the process that should be followed by the researchers who will work on this subject is shown on a diagram. As a result of the study, although there are many studies on PCMs, it was determined that the engineering knowledge on this subject is insufficient, the number of experimental studies should be increased, and most importantly, it is of great importance to develop PCMs as a low-cost and sustainable material suitable for use in building envelopes in all climatic conditions. It has been stated.

* Sorumlu yazar / Correspondence

Sibel Maçka Kalfa
✉ sibelmacka@ktu.edu.tr

Please cite this article in press as D. Saylam Canım, S. Maçka Kalfa, "Faz Değiştiren Malzemelerin Bina Kabuğunda Kullanımı", DUJE, vol. 12, no.2, pp. 355-371, March 2021.

Giriş

Binalar, Avrupa'da toplam enerji kullanımının yaklaşık % 40'ından sorumludur [1]. Isıtma ve soğutma için harcanan enerji bunun önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu enerji kullanımını ve buna bağlı olumsuz çevresel etkileri azaltmak amacıyla, tüm AB / AEA üyesi ülkeler ulusal yapı düzenlemelerini Avrupa direktifine (EPBD-Recast) uygun olarak revize etmiştir. EPBD 2010/31/EU kapsamında, 2020 yılında tüm Avrupa Birliği'nin karbon salınımının 1990 yılındaki seviyelerin % 20 altına düşmesi, tüm enerji tüketiminin % 20 azaltılması, kullanılan enerjinin %20'sinin yenilenebilir kaynaklardan sağlanması ve tüm binaların neredeyse sıfır enerjili olması hedefleri belirlenmiştir [2]. Enerji kaynaklarını sağlama bakımından yüksek oranda dışa bağımlı olan Türkiye için de binalarda enerji performansını artırmak büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla Türkiye Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planını hazırlamış, bu plan kapsamında da 2023 yılına kadar toplam enerji tüketiminin %20 oranında azaltılacağı ve bunda yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasının önemli bir payı olacağı öngörülmüştür [3]. Avrupa'da belirlenen hedeflere ulaşabilmek ve enerji talebini en aza indirmek için daha yüksek ısı yalıtım seviyeleri ve hafif binalar teşvik edilmektedir [2]. Hafif binaların en büyük dezavantajı düşük ısı kütleleri ve ısıtma-soğutma yükleri nedeniyle yüksek sıcaklık dalgalanmalarına meyilli olmalarıdır. Bu dezavantajları asgari düzeye indirebilmek için son yıllarda hafif binaların ısı kütlelerini artırarak enerji tasarrufu sağlayan ve enerjiyi ısıl kütlede gizli ısı olarak depolayan faz değiştiren malzemelerin (FDM) kullanımı büyük ilgi görmektedir. Gizli ısı depolama ısı enerjisini depolamanın en etkili yollarından biridir [4]. Su/buz yaklaşık 330 kJ/kg'lık gizli ısı 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 [5]. Gonzales-Espada (2001)'ya göre dış ortam sıcaklığının -45 °C olduğu en sert kış aylarında bile igloların iç ortam sıcaklığı 9°C-15°C arasında değişim göstermektedir [6]. İglolardan yola çıkarak

araştırmaların hız kazandığı FDM'ler ilk kez 1948 yılında Massachusetts Enstitüsündeki Araştırmacı Dr. Maria Telkes tarafından Amerika'nın Massachusetts şehrinde bulunan bir konut binasında kullanılmıştır. Bu çalışma büyük öneme sahiptir. Çünkü teorik olarak FDM'lerden oluşturulmuş duvar konstrüksiyonlarının uygulandığı bina kabuğunun enerji tüketimini azaltacağı biliniyor olmasına rağmen gerçek koşullarda FDM kullanılmış yapı elemanına sahip bina kabuğunun inşa edilmesi ile yapılan deneysel çalışmaların sayısının artması önemlidir [7]. Özellikle ülkemizde bu kapsamda FDM üzerine yapılan çalışma sayısı azdır. Bina kabuklarında kullanılan FDM'lerde iki farklı ısı kaynağı kullanılır. Bunların birincisi doğal ısıtma ve soğutma kaynaklarıdır. Örnek olarak ısıtma için güneş enerjisinin, soğutma için ise gece soğuyan havanın kullanılması verilebilir. İkincisi ise yapay ısıtma veya soğutma kaynaklarıdır. Bina kabuğu uygulamalarında soğutma amaçlı olarak faz değişim sıcaklığı 22-24 °C arası olan FDM'lerin kullanılması uygundur [8]. Doğrudan güneş ışınımı ile ısıtmada, günlük ısı depolama için en uygun FDM faz değişim sıcaklığının ortalama oda sıcaklığının 1-3°C üzerinde olması gerekmektedir [9,10]. FDM'ler ile ilgili bilgiler yeterli değildir ve bundan kaynaklı bu konu öncelikli çalışma konuları arasındadır.

Yukarıda bahsedilen bilgiler ışığında bu çalışmanın amacı, FDM kullanımı ile bina kabuğunun dinamik özelliklerini ve enerji performansının değerlendirildiği literatürde yer alan çalışmaların kapsamlı bir incelemesini yapmak ve faz değiştiren malzemeleri tanıtmaktır. Bu amaçla çalışmada literatürde yapılmış yaklaşık 50 bilimsel çalışma; FDM'nin uygulandığı bina kabuklarının farklı iklim bölgelerinde kullanımı, FDM'nin kullanıldığı yapı elemanları, kullanılan FDM çeşitleri, FDM ile birleştirme teknikleri, yapılan çalışmaların tipi ve çalışmalarda kullanılan simülasyon programları başlıkları altında değerlendirilmiş, farklı tipteki FDM'lerin ısıl performans çalışmaları, avantaj- dezavantajları ve uygulama yöntemleri gözden geçirilerek bu konuda çalışacak araştırmacıların izlemesi gereken süreç bir diyagram üzerine işlenmiştir.

Yöntem

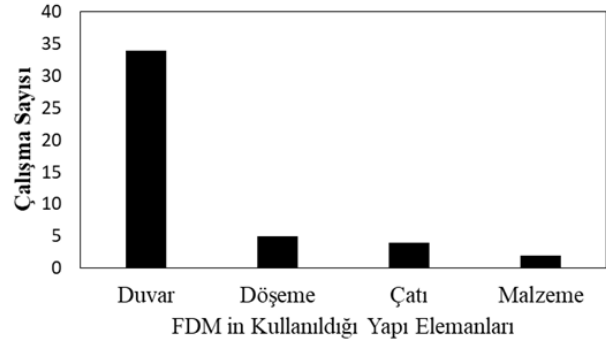
Faz değiştiren malzemeler üzerine yapılmış birçok uluslararası, ulusal makale, tez, kitap ve araştırma projesi Karadeniz Teknik Üniversitesi Kütüphanesi veri tabanları kullanılarak incelenmiştir. İncelenen bilimsel çalışmalar içerisinde bilimsel kalitesi yüksek olan (yayınevinin kuruluş yılı, atıf sayısı, etki faktörleri vb. gibi seçim kriterleri göz önünde bulundurularak) ve özellikle son yıllarda yapılmış olan yaklaşık 50 çalışma incelemeye alınmıştır. FDM üzerine yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler; FDM'nin uygulandığı bina kabuklarının farklı iklim bölgelerinde kullanımı, FDM'nin kullanıldığı yapı bileşeni, kullanılan FDM çeşitleri, FDM ile birleştirme teknikleri, yapılan çalışmaların tipi ve çalışmalarda kullanılan simülasyon programı başlıkları altında değerlendirilmiştir.

FDM'nin Uygulandığı Bina Kabuklarının Farklı İklim Bölgelerinde Kullanımı

İklim bölgelerine göre değerlendirildiğinde, FDM'nin soğuk iklim bölgelerinde 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 iklim bölgelerinde ise FDM'nin bina kabuğunun dışında değil de iç tarafında kullanılmasının iç mekan ısı dalgalanmalarının azaltılması açısından daha uygun olduğu belirtilmiştir [11]. Gece ve gündüz sıcaklık farkının fazla olduğu iklim bölgelerinde ise FDM'nin bina kabuğunun dış tarafında kullanımının etkili olduğu, böylece gündüz FDM tarafından depolanan ısının soğuk gecelerde kullanılarak, bir sonraki gün yeniden iç ortama verilebilmesi sağlanmıştır [12,13]. FDM'lerin soğutma amacı ile kullanıldığı sıcak iklim bölgelerinde gece havalandırması (4ac/h'ye kadar), binalarda FDM'nin etkinliğini en üst düzeye çıkarma yönünde avantajlara sahiptir. Gece havalandırması ile FDM'lerin depoladıkları ısının ortama verilmesi desteklenerek katılışmaları sağlanmakta böylece tam bir çalışma döngüsü elde edilebilmektedir [14].

FDM'nin Kullanıldığı Yapı Elemanları

Bina kabuğunun uzun ömürlü olabilmesi için kullanılan FDM'nin konumu, faz değişim sıcaklık aralığı ve miktarı bakımından oldukça önemlidir. Yapılan literatür incelemesi sonucu faz değiştiren malzemelerin yapının hangi elemanında ne kadar yoğunlukta kullanıldığı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. FDM 'nin kullanıldığı yapı elemanları ve kullanım yoğunluğu.

Figure 1. Building elements using of phase change material and using density

Şekil 1'deki grafikte yapılan çalışmalarda FDM'nin en fazla dış duvar uygulamalarında kullanıldığı görülmektedir [8,10,11,14-41]. Bu durumun dış duvar ısıl kütle yüzey alanının çatı ve döşeme yüzey alanına göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar FDM'nin duvar iç yüzeyine uygulandığında iç mekan ısı dalgalanmalarını azalttığını göstermiştir [10,11,14,20,23,30,35,36,38,39,41-47].

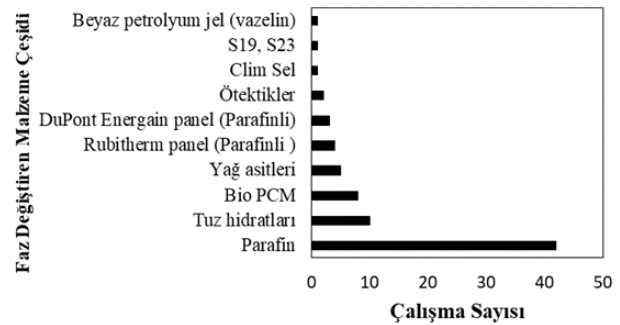
Isı enerjisinin depolandığı pasif bir sistem olan trombe duvarının ağır ısıl kütlelerini hafifletmek ve kullanımını daha pratik hale getirmek için FDM'lerin kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur [8,15,17,18,34,38,48]. FDM ile oluşturulan trombe duvarın ısıl kapasitesini, klasik beton duvar ile karşılaştırıldığında, ortalama %50 artırmak mümkündür [8,17,18]. Faz değiştiren malzeme olarak kullanılan parafinlerin ısıl iletkenliğini arttırmak için metalik dolgular, metal matris yapılar, kanatlı borular ve alüminyum talaşlar kullanılmaktadır. Kullanılan metal arttırıcıların FDM asitleriyle temas halinde aşındırıcı olmamalarına binanın uzun ömürlü olması için dikkat edilmelidir [4,13,48,49]. FDM kullanımı ile ince bir duvarda yoğun ısıl 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 kışın bir avantaj olarak görülse de akşam kullanımı yoğun olan konut ve hastane gibi yapılar için bir dezavantaj olmaktadır. Bina dış duvarlarının iç ve dış yüzeyinde farklı faz değişim sıcaklıklarına sahip FDM kullanımı ile hem soğutmaya katkı amacı ile sıcak mevsimde hem de ısıtmaya katkı amacı ile soğuk mevsimde aktif olması sağlanabilmektedir. Böyle bir sistemin yıllık enerji tasarrufunun ısıtma için ortalama %12, soğutma için ise %1 oranlarında olduğu, ısıtma-soğutma yüklerinin tepe değerini %35 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir [19]. Gizli ısı depolama amacıyla kullanılan FDM'ler ile oluşturulmuş yapı elemanlarına sahip konutların ilk deneysel çalışmalarında umut verici performans artışı gözlenmiştir. FDM'nin çatıda kullanılmasıyla toplam soğutma yükünde aynı ısı direnç ($R\text{-m}^2\text{K/W}$) değerine sahip yalıtım katmanının kullanıldığı geleneksel çatıya oranla %30 verim elde edilmiştir [4]. FDM'ler iç mekan ısı dalgalanmalarını azaltırken bina ataletini de artırdıkları için, kentsel ortamlarda karşılıklı gölgelendirme ve yansımalar ile ortaya çıkabilen binalar arasındaki olumsuz etkileri de en aza indirmeye yardımcı olmaktadır [25]. Teorik olarak çoğu FDM entegre bina kabuğu elemanının günde en az bir kere erime/ katılma 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 ısı 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 katılma süreci tamamlanamaz.

Böylece, FDM ne erimez ne de katılmazsa, yetersiz gizli ısı depolanır [43]. Fakat unutulmamalıdır ki, hidrolik ısıtma ve soğutma sistemi ile entegre bir çok zemin ve tavan FDM uygulamaları 1 günde kolaylıkla 20 kez erime ve katılma sürecine ulaşabilmektedir [4].

FDM Çeşitleri

Dar bir sıcaklık aralığında yüksek miktarda ısı enerjisi 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 ısı kütleye sahip bina kabuğu uygulamalarında kullanıma uygun bir malzeme olarak karşımıza çıkmaktadır [4]. FDM'nin fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikleri, bina kabuğunda kullanıma uygunluğu için önemlidir. Tablo 1'de faz değiştiren malzemelerin fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikleri verilmiştir. Faz değiştiren malzemeler içerisinde Tablo 1'de verilen özelliklerin tümüne sahip bir malzeme henüz bulunamamıştır [13]. Çok çeşitli sıcaklıklarda eriyen ve katılan çok sayıda faz değiştiren malzeme mevcuttur. Fakat bina kabuğu uygulamalarında kullanılan FDM'ler sınırlıdır. Bunun nedeni sadece insan konfor sıcaklığına (20°C - 28°C) yakın sıcaklıklarda faz değişimine sahip FDM'lerin bina kabuğu uygulamalarında kullanılabilmesidir. Literatür incelemesi sonucu bina kabuğu uygulamalarında kullanılan FDM çeşitleri ve kullanım yoğunlukları Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. Bina kabuğu uygulamalarında kullanılan FDM çeşitleri ve kullanım yoğunluğu

Figure 2. PCM types using in building envelope applications and using density

Tablo 1. Faz değiştiren malzemelerin fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikleri [4,13]
 Table 1. Physical, chemical and economic properties of phase change materials [4,13]

Fiziksel Özellikler	Kimyasal Özellikler	Ekonomik özellikler
<ul style="list-style-type: none"> Faz değişim sıcaklığı; Erime-katılaştırma işlemleri için minimum sıcaklık aralığı; Süper soğuma; Yüksek gizli ısı geçişi; Hassas ısı emilimine ek olarak yüksek özgül ısı kapasitesi; Isının kısa sürede depolanması ve serbest bırakılması için iyi ısı iletkenliği; Faz değişiklikleri sırasında hacimde küçük değişiklikler; Kararlı erime ve katılma döngüleri; Yeterli kristalleşme hızı 	<ul style="list-style-type: none"> Birçok erime-katılma döngüsünden sonra bozulmama; Diğer yapı malzemeleriyle iyi uyumluluk; Yeterli mekanik stabilite; Yanmaya karşı dirençlilik 	<ul style="list-style-type: none"> Yaşam döngüsü sonunda tekrar kullanıma uygunluk; Rekabetçi fiyat.

Tablo 2. Organik ve inorganik faz değiştiren malzemelerin karşılaştırılması [4,49,50]
 Table 2. Comparison of organic and inorganic phase change materials[4,49,50]

Organik FDM'ler	Parafinler	Mineral balmumu ve yağa verilen isimdir. En yaygın kullanıma sahip FDM 19-24 °C faz değişimi sıcaklık aralığına sahip Hammaddesi petrol olduğu için pahalı
	Yağ asitleri ve esterleri	Parafine benzer ısı depolama yoğunluğu Faz değişim sıcaklığı parafinler gibi yüksek Asidik yapıları nedeniyle çevre ile reaksiyona girmeye meyilli
	Şeker alkoller	Karbonhidratın D-sorbitol, ve xylitol gibi hidrojene edilmiş formudur. Parafin ve yağ asitlerinden daha yüksek gizli ısıya ve yoğunluğa sahiptirler. 90°C -200 °C arasındaki faz değişim sıcaklıkları nedeni ile bina uygulamaları için uygun değıllerdir
	BioPCM'ler	Parafine alternatif olarak gıda endüstrisi atık ürünlerinin kullanımı ile geliştirilmiş yeni bir FDM çeşididir. Maliyeti daha düşük (hammaddesi petrol değil) Parafin gibi yanıcı değil Çevreci Hayvan yağlarından, soya, kakao ve palm yağı gibi bitkisel yağlardan meydana gelir Bozulmaya uğramadan binlerce kere faz değişimi geçirebilen zehirli olmayan bir malzeme Sürdürülebilir
İnorganik FDM'ler	Tuz hidratlar Metalikleri	Binalarda en yaygın kullanılan inorganik FDM Çok yüksek faz değişim sıcaklığına sahip olduğu için binalarda kullanıma uygun değil

Tablo 2'nin devamı
Continue of Table 2

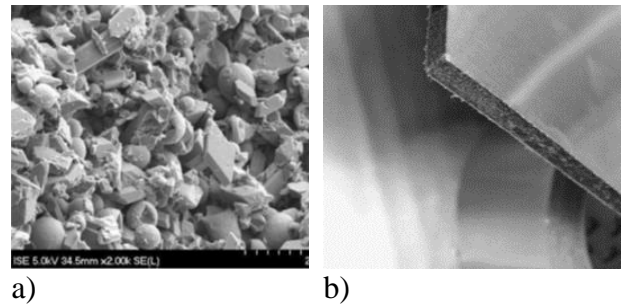
	Organik FDM	İnorganik FDM
Avantaj	<ul style="list-style-type: none"> • Aşındırıcı değil • Kimyasal dayanımı iyi • Süper soğuma az • Yapı malzemeleri ile kullanıma uygun • Düşük buhar basıncı • Yüksek gizli ısıya sahip 	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek gizli ısıya sahip • Yüksek ısı iletkenlik • Ekonomik • Yanıcı değil
Dezavantaj	<ul style="list-style-type: none"> • Düşük ısı iletkenlik • Faz değişimi esnasında oluşan hacimsel değişim • Yanıcılık 	<ul style="list-style-type: none"> • Metallerle birlikte kullanıldığında aşındırıcı • Ayrışabilir • Süper soğumaya sahip
Faz değişim sıcaklık aralığı	19 - 28 °C	25 - 35 °C
Füzyon ısısı	120 - 280 kJ/kg	120 - 280 kJ/kg
Yoğunluk aralığı	700 - 900 kg/m ³	1300 - 1800 kg/m ³

Literatürde yapılan çalışmalardan Şekil 2'de de görüldüğü gibi bina kabuğu uygulamalarında organik bazlı Parafin malzemenin en yaygın kullanılan FDM olduğu görülmüştür. Kullanımı yaygın olan diğer malzemeler sırasıyla inorganik bileşiklerden tuz hidratları ve parafine alternatif olarak son yıllarda geliştirilmiş yeni bir FDM çeşidi olan BioPCM'lerdir. Faz değiştiren malzemeler organik ve inorganik bileşikler olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Tablo 2'de organik ve inorganik FDM'lerin karşılaştırılması yapılmıştır.

FDM ile Birleştirme Teknikleri

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 [41,43]. Kapsülleme tekniği 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. Mikro kapsülleme ve makro kapsülleme olmak üzere iki tip kapsülleme tekniği vardır. Mikro

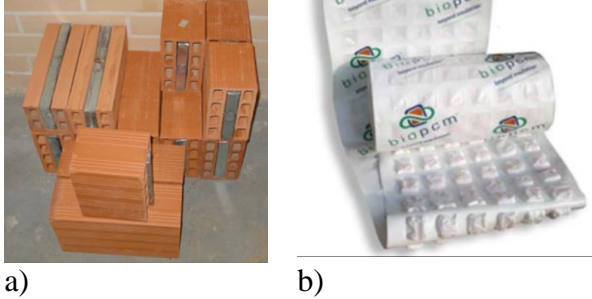
kapsülleme, mikrometre ile milimetre aralığında üretilen kapsüller ile katı veya sıvı madde damlacıklarının tek tek kaplandığı işlem olarak tanımlanmaktadır. Şekil 3'te mikro kapsülleme tekniği ile uygulanmış parafinden oluşturulmuş kompozit bir duvar panosu görülmektedir. Şekil 3a.'da alçı sıvaya katılmış mikro kapsül FDM'lerin mikroskopik kamera (SEM) ile görünüşü verilmiştir. Şekil 3b.'de %60 oranında mikro kapsüllemiş parafinden oluşan FDM kompozit duvar panosu görülmektedir.



Şekil 3. (a) Alçı sıva içerisindeki mikro kapsüllerin SEM görünüşü [50], (b) %60 oranında mikro kapsüllemiş parafinden oluşan FDM kompozit duvar panosu [43].

Figure 3. (a) SEM appearance of microcapsules in plaster [50], (b) PCM composite wall panel with paraffin - ratio of %60 microcapsulated [43].

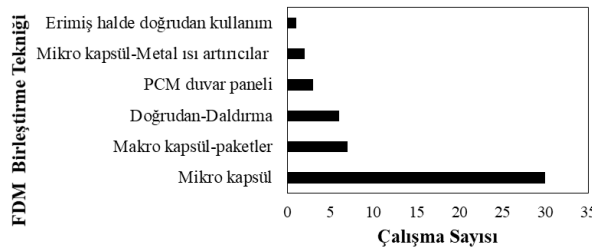
Şekil 4a’da tuğla içerisine makro kapsül şeklinde paketlenmiş parafin uygulaması [43] ve Şekil 4b’de makro kapsüllerde BioPCM görülmektedir.



Şekil 4. (a) Tuğla içerisine makro kapsül şeklinde paketlenmiş parafin uygulaması [43], (b) makro kapsüllerde BioPCM.

Figure 4. (a) Application of paraffin macrocapsulated into brick [43], (b) BioPCM in macro capsules.

Yapılan literatür çalışmalarından çıkarılan sonuç; Şekil 5’te de görüldüğü gibi bina uygulamalarında mikro kapsül tekniğinin en yaygın kullanılan teknik olduğunu göstermiştir.



Şekil 5. Bina kabuğu uygulamalarında kullanılan FDM birleştirme teknikleri ve kullanılma yoğunluğu.

Figure 5. PCM joining techniques and using density using in building envelope practices.

Tablo 3’de FDM birleştirme tekniklerinin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması verilmiştir.

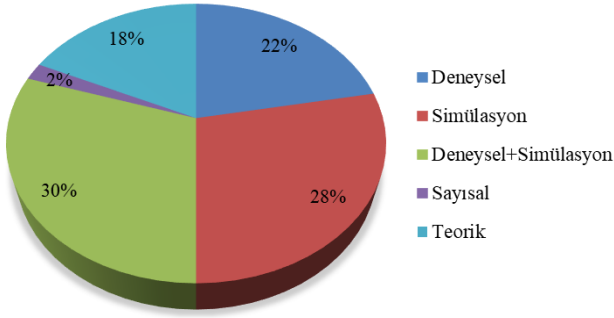
Tablo 3. FDM birleştirme tekniklerinin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması[4,49,50]

Table 3. Compared advantages and disadvantages of PCM joining techniques

Birleştirme Tekniği	Avantaj	Dezavantaj
Doğrudan Birleştirme	Basit Ekonomik	Ekipman ihtiyacı yok Sızıntı
Daldırma	Avantaj	Yapı malzemelerine uyumsuzluk
Mikro kapsülleme	Avantaj	Sızıntı Yapı malzemelerini uyumsuzluk Sızıntı yok Isı transfer yüzey alanı fazla Hacimsel değişim kontrolü Kullanım kolaylığı Yapısal dayanıklılık Duvar panosu üretimine imkan sağlama FDM' lerin dış çevreye karşı reaktivitesini azaltmak Yanıcılığı azaltma
Makro kapsülleme	Avantaj	Sızıntı yok Isı transfer yüzey alanı fazla Hacimsel değişim kontrolü Kullanım kolaylığı Yapısal dayanıklılık Mikro kapsüle göre daha ekonomik ve kullanımı yaygın Makro paketlerde alüminyum folyo kullanımı Duvar, tavan, çatı ve çatı arasında kullanıma uygun FDM' lerin dış çevreye karşı reaktivitesini azaltmak Yanıcılığı azaltma
	Dezavantaj	Zayıf termal iletkenlik Kenarlarda katılma eğilimi

Çalışma Tipleri ve Kullanılan Simülasyon Programları

İncelenen bilimsel çalışmalarda çalışma tipi olarak Şekil 6’da görüldüğü gibi deney ve simülasyon yöntemlerinin birlikte kullanıldığı çalışmalar öne çıkmaktadır. Sadece simülasyon yönteminin tercih edildiği çalışmalar ikinci sırada yer alırken sadece deneysel çalışma tiplerinin az sayıda olması dikkat çekicidir.



Şekil 6. Çalışma tipleri ve kullanım yoğunlukları

Figure 6. Study type and using density

Yapılan çalışmaların yaklaşık olarak %60'ında simülasyon programı kullanımının tercih edilmesi doğru program seçiminin ne kadar önemli olduğunun göstergesidir. Bina kabuğu uygulamalarında saf FDM'ler çok nadir kullanılır. Onun yerine Şekil 3'te görüldüğü gibi karmaşık ısıl karakteristiklere sahip daha fazla girdi gerektiren FDM'ler mikro veya makro kapsüllenmiş olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerden oluşan yapı elemanlarına ilişkin ısı transferi tek boyutlu olmamakta, ısı köprüleri de dikkate alındığında hesaplanması oldukça karmaşık üç boyutlu ısı transferleri meydana gelmektedir. Bu ısı transferlerinin hesaplanması oldukça karmaşıktır ve zaman gerektirir. Hesaplamaların doğruluğu kullanılan entalpi (enerji değişimi) verisinin güvenilirliği ile ilişkilidir. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ortaya çıkan entalpi yoğunlukla saf FDM'ler için diferansiyel ısıl analiz (DTA) yöntemi ölçümlerinden elde edilir.

Bina bütününe veya bina kabuğu elemanının ısıl ve enerji performans analizi için kullanılan DOE-2, EnergyPlus, BLAST, TRNSYS, ESP-r, MATLAB, RADCOOL, CLIM 2000, WUFI gibi farklı ticari programlar bulunmaktadır. Fakat sadece birkaçı kapsamlı bir şekilde faz değişim sürecini ve tüm binayı simüle edebilme özelliğine sahiptir. FDM entegre binaların tüm bina ölçeğinde simülasyonunu yapabilen en yaygın kullanılan simülasyon programları Tablo 4'te verilmiştir.

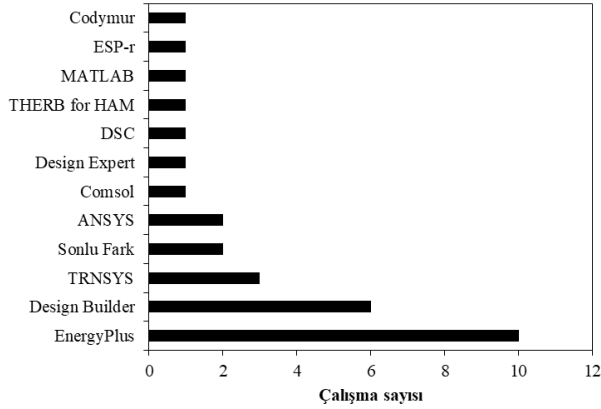
Tablo 4. FDM'lerin kullanıldığı bina kabuğunun enerji analizleri için bilinen en iyi simülasyon programları [4]

Table 4. The best known that energy simulation softwares for energy analysis of building envelopes using PCM's

Simülasyon Programı (Bina ölçeğinde)	Hesap Yöntemi	Ayrık Form	Isı kap. hesaplamaları
ESP-r	Etkin ısı kap.	Sonlu Hacim	Açık (Explicit)
TRNSYS Tip 204- Tip 56	Etkin ısı kap.	Sonlu Eleman	Crank- Nicholson
TRNSYS Tip 222- Tip 56	Dolaylı Hesap.	—	—
TRNSYS Tip 241- Tip 56	Entalpi metodu	Sonlu Farklar	—
TRNSYS Tip 260- Tip 56	Etkin ısı kap.	Sonlu Farklar	Açık (Explicit)
TRNSYS Tip 399- Tip 56	Isı kap. göre iki farklı metod	Sonlu Eleman	Crank- Nichol.
MATLAB	Entalpi metodu	Sonlu Hacim	Crank- Nichol.
EnergyPlus	Entalpi metodu	Sonlu Farklar	Kapalı (İmplicit)

Yapılan literatür çalışmaları Şekil 7'de de görüldüğü gibi FDM'lerin kullanıldığı bina kabuklarının enerji analizleri için EnergyPlus'ın en fazla kullanılan simülasyon programı olduğunu göstermiştir. İkinci sırada ise yine

EnergyPlus tabanlı bir yazılım aracı olan Design Builder programı yer almıştır.



Şekil 7. Simülasyon programları ve kullanım yoğunluğu

Figure 7. Simulation softwares and their using density

EnergyPlus bina ısıtma, soğutma, aydınlatma, havalandırma ve diğer enerji akışlarını modellemek için Amerikan Enerji Bakanlığı tarafından geliştirilmiş ve sürekli geliştirilmekte olan kapsamlı bir bina enerji simülasyon programıdır. Binalardaki ısı transferinin modellenmesine olanak sağlarken aynı zamanda çok çeşitli HVAC ekipmanlarının da dikkate alınmasına imkan sağlar. Kapsamlı bina tasarım seçenekleri sayesinde bina enerji çalışmaları için güçlü ve ideal bir programdır. Çeşitli sistemlerden oluşan binaların ısıtılması ve soğutulması için gerekli enerji hesaplamalarını gerçekleştirmek için birlikte çalışan birçok program modülünün toplamından oluşmaktadır. Temelde BLAST ve DOE-2 gibi en popüler erken dönem bina enerji simülasyon araçlarının bir benzeri olmasının yanı sıra bir saatten daha az zaman dilimleri için hesaplama yapabilme özelliğine sahiptir. EnergyPlus ile modüler sistemler, ısıl denge amacı ile kullanılan yeşil kabuk sistemler, fotovoltaik sistemler ve su bulunduran sistemler gibi birçok yeni sistemlerin simülasyonları yapılabilmektedir. Design Builder ise yapı tasarımlarının enerji, karbon, aydınlatma ve konfor açılarından performansını ölçmek ve kontrol etmek için geliştirilmiş EnergyPlus simülasyon motorunu kullanan bir yazılım aracıdır [51].

Çalışmalarda Kullanılan Laboratuvar Ölçeğindeki Isıl Test Metotları

FDM kullanımının önündeki en önemli engel maliyetinin yüksek olmasıdır. Bina kabuğu uygulamalarında FDM kullanımının maliyetini azaltmak için en etkili yöntem FDM'nin optimum konumu ve miktarının belirlenmesidir. Bu da FDM'nin ısı performans özelliklerinin çok iyi bilinmesi ve anlaşılması ile mümkündür. Bu nedenle FDM bazlı ürün ve sistemlerin ana termal karakterlerinin belirlenmesi için kısmen ucuz ve kullanımı kolay test yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler;

- Diferansiyel ısı tarama kalorimetresi (DSC) yöntemi
- T-History yöntemi
- Dinamik Hot-Box yöntemleridir.

Yukarıdaki yöntemlerin özellikleri ve karşılaştırması ise Tablo 5'te verilmiştir.

Faz Değiştiren Malzemelerle İlgili Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi ve Tartışma

Bu bölümde faz değiştiren malzemeler ile ilgili yapılmış ve bu çalışmanın temelini oluşturan 50 bilimsel yayın içerik olarak değerlendirilerek sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bir çok çalışmada FDM'lerin Trombe duvarlarda kullanıldığı görülmüştür [8,15,17,18,34,38,48]. Çırakman [15] bir test odası inşa ederek güney duvarında mikrokapsül yöntemi ile duvar konstrüksiyonuna eklediği parafinin binanın enerji yüklerine etkisini deneysel olarak test etmiştir. Aylık ölçüm sonuçlarına göre ısıtma enerjisine farklı aylarda %4.3-%70.4 aralığında katkı sağladığı gözlenmiştir. Benzer bir başka çalışmada [16] aynı FDM malzemesinin soğutma enerjisine %5-%10; ısıtma enerjisine ise % 10-%20 aralığında iyileştirme yaptığı sonucuna varılmıştır. Zalewski vd. [17], tuz hidratları makropaketler halinde birleştirerek FDM'li 2,5 cm kalınlığında bir trombe duvar oluşturmuşlardır. Yeni duvarın 15 cm kalınlığındaki beton duvara eşdeğer ısı depolama performansı gösterdiği ve depolanan enerjiyi iki kat daha hızlı bir şekilde mekana ilettiği sonucuna varmışlardır. Leang vd. [8], parafinin mikro paketler halinde kullanıldığı FDM'li bir kompozit Trombe duvar tasarlamış ve üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır.”

Tablo 5. FDM entegre ürün ve sistemlerin ana termal karakterlerinin belirlenmesi için kullanılan test yöntemlerinin karşılaştırılması [4]

Table 5. Compared test methods using to determined of main thermal characters of product and systems entegrated PCM

Yöntemler				Ekipman
Diferansiyel termal analiz (DTA) yöntemi				
Ölçek	Malzeme ölçeği			
Girdi	Küçük ve standart malzeme örnekleri			
Çıktı	FDM gizli ısısı Cam geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı, faz değişim sıcaklığı katılaşma ve yoğunlaşma özelliği			
Diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) yöntemi				
Ölçek	Malzeme ölçeği			
Girdi	Küçük ve standart malzeme örnekleri			
Çıktı	FDM gizli ısısı Cam geçiş sıcaklığı, kristalleşme sıcaklığı, faz değişim sıcaklığı, yoğunlaşma özelliği Oksidasyon ve termal kararlılık özellikleri Enerji ölçümü Isıl iletkenlik ve ısı kapasitesi			
T-History yöntemi				
Ölçek	Malzeme ölçeği			
Girdi	Daha büyük ve heterojen FDM entegre bina bileşeni örnekleri			
Çıktı	FDM kompozit ve FDM harmanlarının ısı özelliklerini ölçer			
Dinamik Hot-Box yöntemi				
Ölçek	Sistem ölçeğinde			
Girdi	Yapı elemanı örnekleri			
Çıktı	Duvar, zemin, çatı ve pencere gibi opak ve saydam bina kabuk bileşenlerinin ısı performansları Isı geçirgenlik (U-değeri) ölçümü			
Güvenilirlik	DTA	DSC	T-History	Dinamik Hot-Box
	*	**	***	****

Küçük hacimde büyük miktarda ısı depolama kapasitesi elde etmek amacı ile yapılan deneysel çalışmada FDM ile bir yalıtım paneli birlikte kullanılarak bir pasif güneş bileşeni tasarlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen trombe duvar bileşeninin kış gecelerinde ısı konfor sağlamak için çok uygun olduğu görülmüştür. Kompozit güneş duvarı ısıyı 4 saatlik bir gecikme süresiyle serbest bırakmış ve iç mekanda istenmeyen aşırı ısınmayı enerji katkılarını kontrol ederek önlemiştir. Ayrıca, FDM'li ısı depolama duvarının beton ısı depolama duvarından %58 daha fazla ısıyı geri kazandığı tespit edilmiştir.

Farklı iklimler için FDM'nin mevcut bina kabuklarının iç duvarlarında kullanılmasının sağlayacağı enerji tasarrufu potansiyeli yapılan çalışmalarla değerlendirilmiştir [10, 11, 14, 20, 23, 30, 35, 36, 38, 39, 41-47]. Concordia Üniversitesi Güneş Simülatörü ve Çevre Odası araştırma tesisinde (SSEC, Montreal, Kanada) gerçekleştirilen bir deneysel çalışmada FDM levha, iklim odasına yerleştirilmiş 2.80m x 1.30m x 2.44m iç ölçülere sahip bir test odasının arka duvarına yerleştirilmiştir. Ön cepheye sahip 2,2 x 2,2 cm'lik 1,1 W / m²K ısı geçirgenlik katsayısına (U) sahip bir pencere yerleştirilmiştir. Test odası, 8.9 m x 7.3 m x 4.7 m boyutlarında geniş iklim odasının içine yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda Montreal'de, güneş ışınımının sınırlı olmasından dolayı FDM kullanımının en soğuk aylarda çok etkili olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte çözüm, tüm yıl boyunca değerlendirildiğinde yaklaşık olarak % 20 enerji tasarrufu sağlamıştır [20].

Başka bir çalışmada [21] Kıbrıs'ta Akdeniz iklim koşullarındaki tipik bir konutun kabuğunda makro kapsüllenmiş FDM uygulaması deneysel olarak değerlendirilmiştir. Enerji oranı kontrol testi ve sıcaklık seviyesi kontrol testi simülasyonları, Geçici Sistemler Simülasyon yazılımı (TRNSYS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. FDM'ler;

- Çift tuğla duvarın ortasına (bu yalnızca yeni bir konutta uygulanabilir),
- Duvarın iç tarafındaki tuğla ve sıva katmanı arasına (bu hem yeni hem de mevcut konutlarda uygulanabilir),

- Duvarın dış tarafındaki tuğla ve sıva katmanı arasına (bu hem yeni hem de mevcut konutlarda uygulanabilir)

olmak üzere üç farklı kabuk kesiti ile uygulanmıştır. BioPCM mat' lardan 29 °C erime noktasına sahip M91 ürünü uygulamada kullanılan FDM olarak seçilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçları Kıbrıs ikliminde FDM katmanının bir dış duvar konstrüksiyonuna uygulandığında optimum konumunun, tuğla gövde malzemesi ile dış sıva katmanı arasında olduğunu göstermiştir. Bu durum FDM' nin bu konumda güneş ışınımı ve sıcaklık gibi dış iklimsel ortam koşullarına daha fazla maruz kalması ve aktif hale gelmesi ile ilişkilendirilmiştir. Bu durumda % 28,6 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır. Optimum FDM konumu daha sonra bir ısı yalıtımı ile birleştirilmiş (ısı yalıtım sıvası) ve sonuçlar deneysel olarak incelenmiştir. Isı yalıtım sıvası ve FDM' in birlikte kullanıldığı seçenek % 67,6'lık bir enerji tasarrufu sağlanabileceğini göstermiştir. Sadece yalıtımlı durum ile kombine durum arasındaki fark ise % 2,7 ile 6,6 arasında değişmiştir [21]. Yapılan bir diğer çalışmada Laaouatni vd.[22], sıvı halde mekanik olarak kararlı bir FDM ile doldurulmuş dikey havalandırma boruları içeren bir “beton blok” geliştirmişlerdir. Bu çözüm, beton bloğun ısı davranışını incelemek ve bina içindeki sıcaklığın kontrolünü sağlamak için hem deneysel hem de sayısal olarak ele alınmıştır. Kullanılan beton blok 50 cm x 20 cm x 9.5 cm boyutlarında ticari içi boş bir bloktur. Geometrik olarak uzunluğu, genişliği ve yüksekliği sırasıyla 13 cm, 5 cm ve 17 cm olan 3 dikdörtgen boşluktan oluşmuştur. Havalandırma tüpleri olarak 2 cm çapında ve 1 mm kalınlığında PVC borular kullanılmıştır. Altı boruyu yerleştirmek için bloktaki üç boşluğun tabanında ikişer delik açılmıştır. Beton blok boşluklarında FDM doğrudan erimiş halde koyulmuştur. Kullanılan FDM, parafin ve stiren tipi polimer karışımıdır. Bu karışım, sızıntı sorunlarını önlemek için önemli olan yüksek bir mekanik stabiliteye sahiptir. Kullanılan parafin, 28°C'lik bir faz değişim sıcaklığına ve 245 kJ / kg'lık bir gizli ısıya sahip ticari bir üründür. Yapılan çalışmanın amacı, dışarıdan dayatılan ısı gerilmeleri emmek için duvarların ısı ataletini arttırmaktır. Önerilen metod ile FDM'in faz değişim yüzeyi havalandırma tüpleri aracılığı ile artırılmış, gündüz FDM'lerde depolanan ısı gece tüplerdeki hava aracılığıyla binadan

uzaklaştırılmıştır. Sonuçlar, parafinin tüplerle yerleştirilmesinin, faz değişim sıcaklığı etrafında bir sıcaklık seviyesine sahip olmasını ve dolayısıyla uygulanan termal gerilmelerin sönmelenmesini mümkün kıldığını doğrulamıştır. 3D sayısal simülasyonlar, COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak yapılmış, simülasyonlar ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada [30], FDM entegre edilmiş bina kabuklarının klimanın sürekli ve aralıklı olarak çalıştırılması ile termal performans iyileştirmelerini incelemek için Sichuan Üniversitesi'nde, dinamik bir test deney binası inşa edilmiştir. Bina 3.5m x 3,0m x 2,2m boyutlarında ayrı iki odadan oluşmaktadır. Test sonuçlarının daha karşılaştırılabilir hale getirilebilmesi için 60cm x 60cm x 26cm boyutlarındaki iki duvar ünitesinin aynı iç ve dış ortamda konumlanmalarına özen gösterilmiştir. Çelik çerçevelerle desteklenen bu iki duvar ünitesi, birimler arasındaki ısı transferini azaltmak ve her birinin merkezi alanında bir boyutlu ısı transferini sağlamak için 8cm EPS ısı yalıtım katmanı ile çevrilmiştir. Kullanılan FDM'nin faz değişim sıcaklık aralığı 18 °C ila 26 °C'dir. Gizli ısı ise 178.5kJ / kg' dır. Test duvar ünitelerinin yüzey sıcaklıklarını ölçmek için yerden 1,50 m yükseklikte iç ve dış yüzeylerin ortasına ve FDM iç ve dış yüzeyine ısı sensörleri yerleştirilmiştir. İç yüzeylerin ortasına ayrıca ısı akış ölçerler monte edilmiştir. Sıcaklık ve ısı akışını ölçmek için % 2 hassasiyetle ölçüm yapan T tipi termokuplar ve % 5 hassasiyetle ölçüm yapan JTC08A model ısı debimetreler kullanılmıştır. Tüm ölçüm verileri bir JTRG-II bina termal sıcaklık otomatik test cihazı tarafından kaydedilmiştir. Farklı klima koşullarında sıcaklık ve ısı akışı değişikliklerinin ölçümleri Haziran 2015 - Ağustos 2015 tarihleri arasında dakikada bir gerçekleştirilmiştir. Soğutma termostatı ayarı, FDM' lerin faz değişimini sağlamak için 16 °C'ye ayarlanmıştır. Aralıklı iklimlendirme sırasında, iç yüzeye aktarılan soğukun bir kısmı duvar tarafından depolanırken, diğeri duvar boyunca dış ortama kaybedilmiştir. FDM duvarına gelince, azalan sıcaklıkla FDM'ler sıvıdan katıya değişmiş ve soğuk depolanmış, klima durduktan sonra artan sıcaklık ile FDM'ler katıdan sıvıya değişmiş ve soğuk ortama geri bırakılmıştır. Sonuçlar FDM'lerin iç yüzey sıcaklığını 1 ° C azaltabildiğini ve FDM duvarının soğuk bırakma

süresinin referans duvardan 2 saat daha uzun olduğunu göstermiştir. İç yüzey ısı akışı sürekli klima ve aralıklı klima çalışma programının her ikisinde de yaklaşık % 40 azaltılabilmektedir. Aralıklı iklimlendirme ile, FDM duvar bünyesinde depolanan soğukun soğutma durduktan sonra iç ortama bırakıldığı görülmüştür. Bu nedenle, iklimlendirme işleminin makul bir şekilde kontrol edilmesi ile iklimlendirme süresi azaltılarak soğutma enerji tüketiminde belirli bir miktar verim elde edilebileceği gösterilmiştir [30].

Yapılan bir diğer çalışmada [32], farklı iklim koşulları altında FDM' in iç mekanda kullanımının termal konfor açısından sağlayacağı etki karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda farklı iklim bölgelerine ait beş tipik şehir için EnergyPlus programı kullanılarak oluşturulan referans Model ve FDM Modelin simülasyonları yapılarak yıllık iç mekan ısı ortamları incelenmiştir. Daha sonra oluşturulan modelleri doğrulamak için, Sichuan Üniversitesi'nde iki hafif bina modeli (referans Model ve FDM Model) inşa edilmiştir. Model binaların büyüklüğü 800mm × 1000mm × 1300 mm'dir. Çalışmada kullanılan FDM'nin faz değişimi sıcaklık aralığı 18 °C ila 26 °C, gizli ısı ise 178.5kJ / kg'dir [32]. Çalışmanın sonuçları, özellikle ılıman bölgelerde FDM' nin iç mekan tepe sıcaklığını düşürebildiğini ve iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını etkili bir şekilde azaltabildiğini göstermiştir. Ayrıca gece ve gündüz arasındaki dış hava sıcaklık farkının fazla olduğu iklimlerde, FDM' in faz değişim döngüsü tamamlanabildiği için daha fazla verim elde edilebileceği ortaya koyulmuştur.

Faz değiştiren malzemeler ile ilgili yukarıda detaylıca aktarılan çalışmalardan edinilen bilgiler ışığında bu malzemelerin çoğunlukla mikro veya makro paketler halinde bina elemanı konstrüksiyonuna katıldığı, malzeme kullanımında daha çok parafinin seçildiği ancak yağ asidi ve tuz hidratlarında kullanıldığı gözlenmiştir. FDM'nin faz değişim sıcaklığının bina uygulamalarına uygunluğunun dikkate alındığı tüm çalışmalarda 18 °C - 26 °C sıcaklık aralıklarında değişime uğrayan malzemelerin tercih edildiği görülmüştür. Gündüz ve gece sıcaklık farklarının az olduğu ılıman iklimlerde bile FDM ile ilgili yapılan çalışmalarda iyi bir performans elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Bu noktadan hareketle FDM'nin binalarda nerede kullanılacağı ve performans artışının ne oranda olacağı bilgisinin elde edilebilmesi için bu konuda yapılan deneysel çalışmaların hız kazanması gerekliliği üzerinde durulmalıdır. Literatürden elde edilen bilgiler ışığında faz değiştiren malzemelerle ilgili çalışmaya yeni başlayacak olan araştırmacılara izlemesi gerekli olan süreçler bir iş akış diyagramı üzerinde Şekil 8'de gösterilmiştir. Bu diyagram sayesinde çalışma öncesinde alınması gerekli kararlar, izlenecek süreç özetlenmiş ve araştırmacılara yol gösterilmiştir.

Sonuçlar

Çalışma sonucunda incelenen bilimsel yayınlardan faz değiştiren malzemelerle ilgili olarak en fazla tercih edilen kullanım yeri, çeşidi, birleştirme tekniği, çalışma tipi ve simülasyon programı Tablo 6'da verilmiştir.

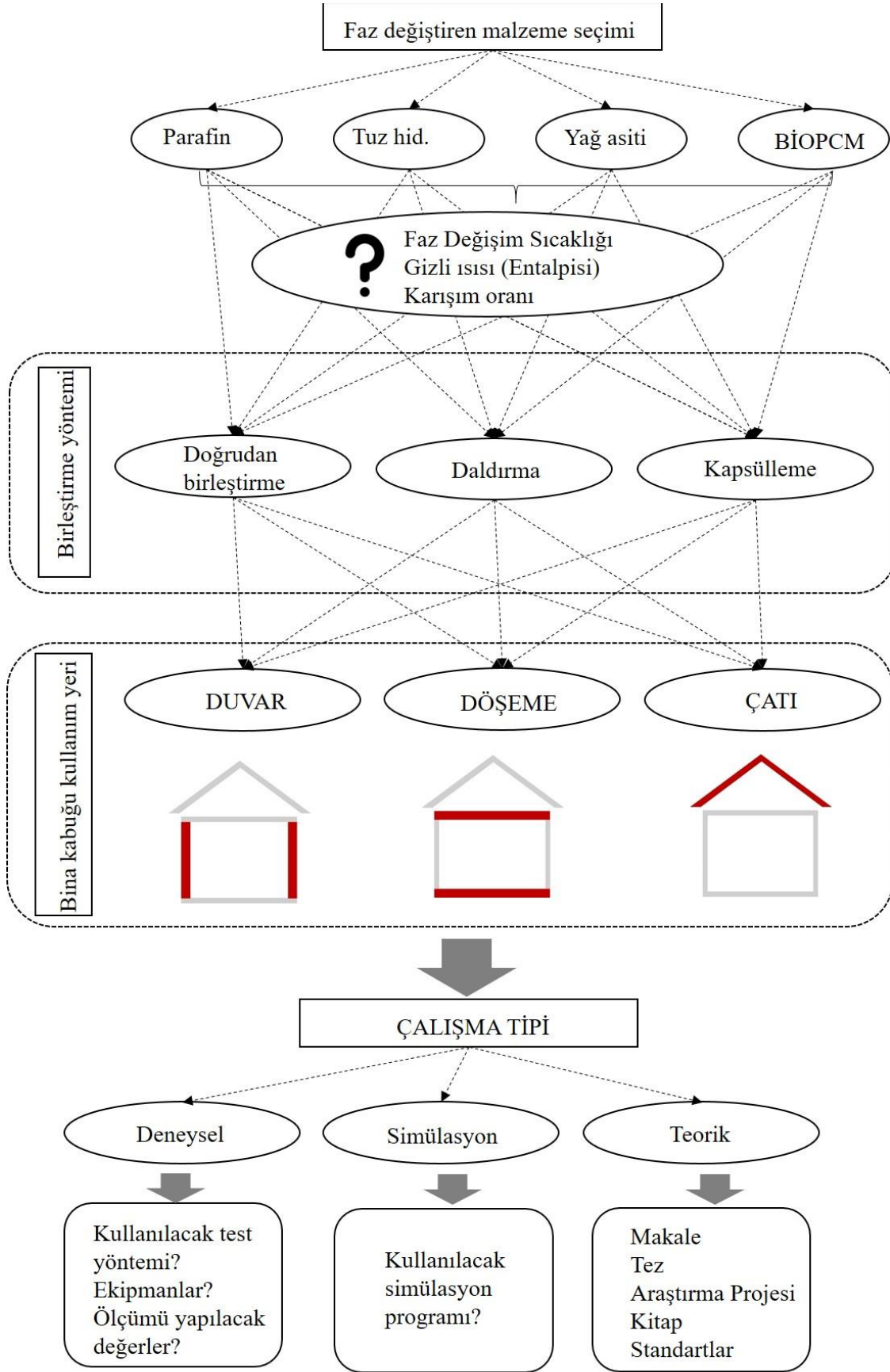
Tablo 6. İncelenen bilimsel yayınlardan elde edilen çıkarımlar

Table 6. Findings obtained from investigated scientific studies

Kullanım yeri	Duvarlar
FDM çeşidi	Parafin
Birleştirme tekniği	Mikrokapsülleme
Çalışma tipi	Deneysel ve simülasyon
Kullanılan program	EnergyPlus

Tablo 6'da görüldüğü gibi incelenen bilimsel çalışmalarda bina kabuğunun ısı kütlesini artırmak amacı ile faz değiştiren malzemeler en çok duvar bileşeninde kullanılmıştır. Parafinin en fazla tercih edilen ve üzerinde çalışmalar yapılan faz değiştiren malzeme çeşidi olduğu görülmüştür. Faz değiştiren malzemeleri bina bileşeni ile birleştirme tekniği olarak ise çoğunlukla mikro kapsülleme tekniği tercih edilmiştir. Ayrıca yapılan incelemelerde deneysel çalışma ve simülasyonun birlikte kullanıldığı çalışma tipinin en fazla tercih edilen çalışma tipi olduğu görülmüştür. Simülasyon programı olarak ise EnergyPlus, çalışmalarda en fazla kullanılan programdır.

Bilimsel çalışmalar binalarda enerji tasarrufu için FDM'li yapı elemanlarının nispeten iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Günümüzde FDM hakkında yayınlanmış birçok araştırma olmasına rağmen bu konudaki mühendislik literatürünün yetersiz olduğunu belirtmek gerekir. Gerçek koşullarda yapılmış daha fazla deneysel araştırma gerekliliği neredeyse bütün çalışmalarda vurgulanmıştır. FDM'nin her koşulda yapıda kullanıma uygun, düşük maliyetli ve sürdürülebilir bir malzeme olarak geliştirilmesi önem arz etmektedir. Temel FDM ürünleri için uzun dönem dayanıklılık kriterleri bugün oldukça iyi tanımlanmıştır. Ancak uzun dönem performans özellikleri FDM'li geliştirilmiş bina kabuğu için henüz tam olarak anlaşılammıştır ve ilgili performans düzenlemeleri geliştirilmeyi beklemektedir. Ayrıca FDM'li geliştirilmiş bina bileşeninin kullanım ömrünün en az harmanlandığı malzemenin kullanım ömrü kadar olması gereklidir. Aksi durumda bina kullanım döneminde bakım ve onarım anlamında sorunlar yaşanması ihtimaldir. Tüm bu nedenlerden ötürü faz değiştiren malzemelerin binalarda kullanımıyla ilgili özellikle deneysel çalışmaların hız kazanması ve avantaj-dezavantajlarının açık ve net olarak ortaya konulması gerekmektedir.



Şekil 8. FDM ile ilgili yapılacak çalışmalarda izlenmesi gereken süreç
Figure 8. Following process in studies on PCM

Kaynaklar

- [1] BP Energy Outlook 2019 Edition, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019.pdf>, 13.06.2020.
- [2] Directive 2010/31/EU, Energy performance of buildings, European Parliament and of the Council.
- [3] Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023, T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Mart 2018, Ankara.
- [4] Kosny, J., PCM- Enhanced Building Components, Springer, Switzerland, 2015.
- [5] <http://www.dspace.library.cornell.edu/bitstream/1813/125/2/Igloo.pdf>.
- [6] Gonzales-Espada, W.J., Bryan, L.A., Kang N-H., (2001). The intriguing physics inside an Igloo, *Physics Education*, **36**,4, 290-298.
- [7] Telkes, M., (1978). Trombe wall with phase change storage material. In: Proceedings of the 2nd national passive solar conference, Philadelphia.
- [8] Leang,P.T., Zalewski, L., Enghok, S.L., (2017). Numerical Study Of A Composite Trombe Solar Wall Integrating Microencapsulated (PCM), *Energy Procedia*, **122**, 1009-1014.
- [9] Graciaa, A.D., Cabeza, L.F., (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings, *Energy and Buildings*, **103**, 15, 414-419.
- [10] Kuznik, F., Virgone, J., Noel, J., (2008). Optimization of a phase change material wallboard for building use, *Applied Thermal Engineering*, **28**,11–12, 1291–1298.
- [11] Kuznik,F., Virgone, J., Roux, J.-J. (2008). Energetic efficiency of room wall containing fdm wallboard: a full-scale experimental investigation, *Energy and Buildings*, **40** ,2, 148–156.
- [12] Tokuç, A.,(2013). Faz değişim malzemelerinin ısı enerji depolama amacıyla yapı elemanlarında kullanılması, Dokuz Eylül Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Mimarlık Bölümü / Yapı Bilgisi Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- [13] Kancane,L., Vanaga,R., Blumberga, A., (2016). Modeling of building envelope’s thermal properties by applying phase change materials, *Energy Procedia*, **95** ,175 – 180.
- [14] Evola, G., Marletta, L., Sicurella, F., (2013). A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings, *Building Environment*, **59**, 517–527.
- [15] Çırakman, A.K.,(2010). Faz değiştiren madde içeren bina güney duvarının deneysel olarak incelenmesi, Atatürk Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Makine Mühendisliği, Doktora Tezi.
- [16] Konuklu, Y., (2008). Mikrokapsüllenmiş Faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu, Çukurova Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Kimya Anabilim Dalı, Doktora Tezi.
- [17] Zalewski,L., Joulin, A., Lassue, S., Dutil,Y., Rouse, D.,(2012). Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material.
- [18] Fiorito, F., (2012). Trombe walls for lightweight buildings in temperate and hotclimates. exploring the use of phase change materials for performances improvement, *Energy Procedia*, **30**, 1110 – 1119.
- [19] Diaconu, B.M., Cruceru, M., (2010). Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings, *Energy and Buildings*, **42**, 10, 1759-1772.
- [20] Guarino, F., Dermardiros, V., Chen,Y., Rao, J., Athienitis,A., Cellura, M., Mistretta, M., (2015). PCM thermal energy storage in buildings: experimental study and applications, *Energy Procedia*, **70**, 219 – 228.
- [21] Panayiotou, G.P.,Kalogirou, S.A., Tassou, S.A., (2016), Evaluation of the application of phase change materials (PCM) on the envelope of a typical dwelling in the mediterranean region, *Renewable Energy*, **97**,24-32.
- [22] Laaouatni, A., Martaj, N., Bennacer, R., Mohamed Mohammed, E.O., Ganaoui, E., (2017). Phase change materials for improving the building thermal inertia, *Energy Procedia*, **139**, 744–749.
- [23] Wu, Z., Chen, M.Q.Z., (2017). Phase change humidity control material and its application in buildings, *Procedia Engineering*, **205**, 1011–1018.
- [24] Ramakrishnan, S., Wang, X., Sanjayan, J., Wilson, J., (2016). Experimental and numerical study on energy performance of buildings integrated with phase change materials, *Energy Procedia*, **105**, 2214 – 2219.
- [25] Han, Y., Taylor, J.E., (2015). Simulating the impact of phase change material embedded building envelopes on the inter-building effect in non-tropical cities, *Procedia Engineering*, **118**, 760 – 765.
- [26] Nazi,W.I.W.M., Wang,Y., Chen,H., Zhang,X., Roskilly,A.P., (2017). Passive cooling using phase change material and insulation for high-rise office building in tropical climate, *Energy Procedia*, **142**, 2295–2302.
- [27] Li, Y., Darkw, J., Su, W., (2019). Investigation on thermal performance of an integrated phase change material blind system for double skin façade buildings, *Energy Procedia*, **158**, 5116–5123.

- [28] Auzeby, M., Wei, S., Underwood, C., Chen, C., Ling, H., Pan, S., Ng, B., Tindall, J., Buswell, R., (2017). Using phase change materials to reduce overheating issues in UK residential buildings, *Energy Procedia*, **105**, 4072 – 4077.
- [29] Mols, T., Dzene, K.P., Vanaga, R., Freimanis, R., Blumberga, A., (2018). Experimental study of small-scale passive solar wall module with phase change material and fresnel lens, *Energy Procedia*, **147**, 467–473.
- [30] Li, Y., Liang, W., Zhou, J., Long, E., (2017). Experimental Study On Thermal performance improvement of building envelopes integrated with phase change materials in an air-conditioned room, *Procedia Engineering*, **205**, 190–197.
- [31] Guarino, F., Cellura, S.L.M., Mistretta, M., La Rocca, V., (2015). Phase change materials applications to optimize cooling performance of buildings in the mediterranean area: a parametric analysis, *Energy Procedia*, **78**, 1708 – 1713.
- [32] Li, Y., Wang, Y., Meng, X., Wang, M., Long, E., (2015). Research on indoor thermal environment improvement of lightweight building integrated with phase change material under different climate conditions, *Procedia Engineering*, **121**, 1628 – 1634.
- [33] Bejan, A.S., Catalina, T., (2016). The implementation of phase changing materials in energy efficient buildings. case study: efdn project, *Energy Procedia*, **85**, 52 – 59.
- [34] Ma, Q., Fukuda, H., Wei, X., Hariyadi, A., (2018). Optimizing energy performance of a ventilated composite trombe wall in an office building, *Renewable Energy*, **134**, 1285-1294.
- [35] Meng, E., Yu, H., Zhou, B., (2017). Study of the thermal behavior of the composite phase change material (fdm) room in summer and winter, *Applied Thermal Engineering*, **126**, 212–225.
- [36] Soudian, S., Berardi, U., (2017). Experimental investigation of latent thermal energy storage in highrise residential buildings in toronto, *Energy Procedia*, **132**, 249–254.
- [37] Xie, J., Wang, W., Liu, J., Pan, S., (2018). Thermal performance analysis of fdm wallboards for building application based on numerical simulation, *Solar Energy*, **162**, 533–540.
- [38] Li, S., Zhu, N., Hu, P., Lei, F., Deng, R., (2019). Numerical Study On Thermal Performance Of PCM Trombe Wall, *Energy Procedia*, **158**, 2441–2447.
- [39] Sajjadian, S.M., Lewis, J., Sharples, S., (2015). The potential of phase change materials to reduce domestic cooling energy loads for current and future UK climates, *Energy and Buildings*, **93**, 83–89.
- [40] Principi, P., Di Perna, C., Borrelli, G., Carbonari, A., (2005). Experimental energetic evaluation of changeable thermal inertia fdm containing walls, 482th International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, Santorini, Greece.
- [41] Schossig, P., Henning, H.-M., Gschwander, S., Hausmann, T., (2005). Microencapsulated phase-change materials integrated into construction materials, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **89** (2–3), 297–306.
- [42] Zhou, D., Zhao, C.Y., Tian, Y., (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, **92**, 593–605.
- [43] Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., Santos, P., (2013). Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency, *Energy and Buildings*, **59**, 82-103.
- [44] Karaoulis, A., (2017). 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*, **38**, 796 – 803.
- [45] Köse, E., Manioğlu, G., (2018). Evaluation of the performance of phase change materials in relation to balanced distribution of heating energy cost in residential buildings, 13th International HVAC+R Technology Symposium.
- [46] Mays, A.I., Ammar, R., Hawa, M., Farouk, M.A.A., (2017). Using phase change material in under floor heating, *Energy Procedia*, **119**, 806–811.
- [47] Alama, M., Sanjayan, J., Patrick, X.W., Ramakrishnan, Z.S., Wilson, J., (2016). 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*, **180**, 993 – 1002.
- [48] Knowles, T., (1983). Proportioning composites for efficient thermal storage walls, *Solar Energy*, **31**, 3, 319-326.
- [49] Farid, M.M., Khudhai, A.M., Ali, S., Razack, K., (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, **45**, 1597–1615.
- [50] Cui, Y., Xie, J., Liu, J., Pan, S., (2015). Review of phase change materials integrated in building walls for energy saving, *Procedia Engineering*, **121**, 763 – 770.
- [51] <https://www.altensis.com/hizmetler/designbuilder-software/>
- [52] Cellat, K., (2017). Binalarda enerji tasarrufu için güneş enerjisini faz değiştiren maddede pasif depolayan yeni beton karışımların geliştirilmesi ve uygulanması, Çukurova Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Kimya Anabilim Dalı Doktora Tezi.

- [53] Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K., Al-Hallaj, S., (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, **45**, 1597–1615.
- [54] Velraj, R., Pasupathy, A., Phase change material based thermal storage for energy conservation in building architecture, <https://www.researchgate.net/publication/228823294>, 2006.
- [55] Madessa, H.B., (2014). A review of the performance of buildings integrated with phase change material: opportunities for application in cold climate, *Energy Procedia*, **62**, 318 – 328.
- [56] Navarro, L., Garcia, A.D., Solé, C., , Castell, A., Cabeza, L.F., (2012). Thermal loads inside buildings with phase change materials: experimental results, *Energy Procedia*, **30**, 342 – 349.
- [57] Hanchi, N., Hamza, H., Lahjomri, J., Oubarra, A., (2017). Thermal behavior in dynamic regime of a multilayer roof provided with two phase change materials in the case of a local conditioned, *Energy Procedia*, **139**, 92–97.
- [58] Cao, V.D., Pilehvar, S., Salas-Bringas, C., Szczotok, A.M., Rodriguez, J.F., Carmona, M., Al-Manasir, N., Kjøniksen, A.L., (2017).). Microencapsulated Phase Change Materials For Enhancing The thermal performance of portland cement concrete and geopolymer concrete for passive building applications, *Energy Conversion and Management*, **133**, 56–66.
- [59] Pisello, A.L., Castaldo, V.L., Cotana, F., (2015). Dynamic thermal-energy performance analysis of a prototype building with integrated phase change materials, *Energy Procedia*, **81**, 82 – 88.