

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN BİNA YAŞAM DÖNGÜSÜ EVRELERİNDEKİ MEVCUT POTANSİYELLERİ VE GELİŞMEYE AÇIK YÖNLERİ

Ebru KILIÇ BAKIRHAN¹

Derleme Makale

Yazar Bilgileri

¹ Karabük Üniversitesi, Başak Cengiz Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, ebrukilic@karabuk.edu.tr
0000-0003-0650-8297
Sorumlu Yazar

Geliş: 30.08.2023

Düzeltilme: 09.10.2023

Kabul: 07.11.2023

Özet

Gelişen teknoloji ile binalarda karkas sistemlere yönelmesi, yığma sisteme göre daha ince kesitli bina cephelerinin inşa edilebilmesine olanak sağlamıştır. Ancak bu durum, masif malzemelerin termal kütle özelliklerinden ödün verilmesi neticesinde ısı konforunda ve akabinde enerji verimliliğinde düşüşe neden olabilmektedir. Faz değiştiren malzemeler (FDM), sabit sıcaklıklarda ve taş, tuğla gibi duşurur ısı depolama ile çalışan malzemelere oranla daha düşük hacimlerde çok daha fazla miktardaki ısıyı bünyesinde depolayabilen malzemelerdir. Yapı kabuğunda bu tür malzemelerden yararlanılması, kullanıcı konforunu artırarak aktif sistemlere olan bağımlılığın düşürülmesini sağlayabilir.

Bu çalışma, FDM'nin bir yapının yaşam döngüsünü oluşturan tedarik, üretim, nakliyat, kullanım, bakım-onarım ve atık evreleri boyunca ekonomik, ekolojik ve sosyal sürdürülebilirlik kavramları çerçevesinde literatürdeki çalışmalar üzerinden incelenmesini amaçlamaktadır. Bu tür malzemelerin her bir aşamada sunduğu avantajlar ve geliştirilmesi gereken yönler karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak FDM, enerji performansının yüksek olması, termal konfora katkı sunması ve atık malzeme kullanımına imkân sağlaması gibi özellikleri ile öne çıkmaktadır. Ancak yatırım maliyetlerinin yüksek olması, toksik özellik gösterebilmeleri ve üzerine çalışılması gereken standardizasyon problemleri ile geri planda kalmakta ve bu nedenle binalarda enerji verimliliğinin sağlanmasında halen yaygın olarak kullanım imkânı bulamamaktadırlar.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzeme, mimari sürdürülebilirlik, bina yaşam döngüsü

CURRENT POTENTIALS AND LIMITATIONS OF PHASE CHANGE MATERIALS IN BUILDING LIFE CYCLE STAGES

Abstract

Development of frame systems in buildings with advancing technology has enabled the construction of building facades with thinner cross-sections than masonry systems. However, this can lead to a decrease in thermal comfort and subsequently energy efficiency as a result of compromising the thermal mass properties of solid materials. Phase change materials (PCM) can store much more heat at constant temperatures and at lower volumes than materials that work with sensible heat storage such as stone and brick. Utilizing such materials in the envelope of buildings can increase user comfort and reduce the dependency on active systems.

This study aims to examine PCM in the context of economic, ecological, and social sustainability concepts throughout the raw material supply, production, transportation, use, maintenance-repair, and waste phases of a building's life cycle. The advantages offered by such materials at each stage and the aspects that need to be improved are examined comparatively. As a result, PCM stands out with its high energy performance, contribution to thermal comfort and the opportunity to use waste materials. However, due to their high investment costs, toxic properties and standardization problems that need to be studied, they remain in the background and therefore they are still not widely used in ensuring energy efficiency in buildings.

Keywords: Phase change materials, architectural sustainability, building life cycle

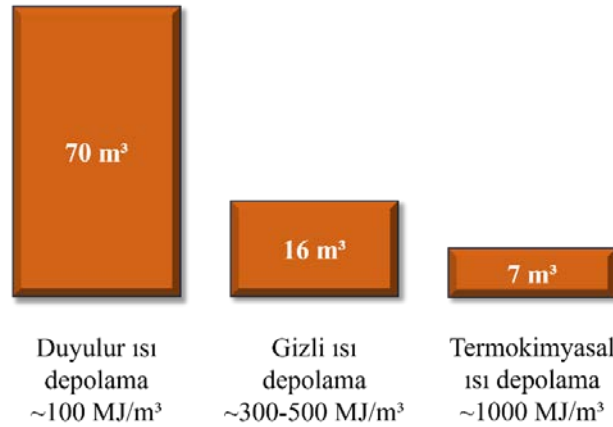
Atf için:

Kılıç Bakırhan, E. (2023). Faz değiştiren malzemelerin bina yaşam döngüsü evrelerindeki mevcut potansiyelleri ve gelişmeye açık yönleri, *Mekansal Araştırmalar Dergisi*, 1(1):109-126.

1. GİRİŞ

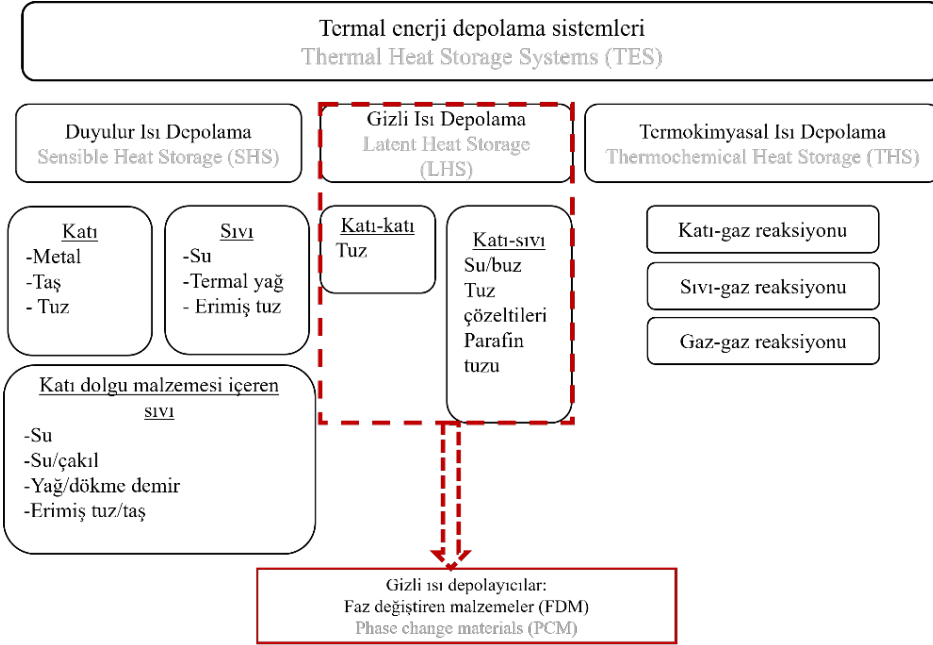
Binalarda ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin neden olduğu enerji kullanımı, toplam enerji tüketiminin %20'sine tekabül eder ve yalnızca ısıtmadan kaynaklanan doğal gaz tüketimi %63'tür (Li vd. 2017). Avrupa Birliği'nde yapı sektörü küresel çaptaki enerji tüketiminin %40'ından sorumlu olup bu oranın üçte ikisi aktif sistemlerden kaynaklanmaktadır (Navarro vd. 2012). Diğer yandan dünya üzerinde enerji tüketiminde büyük pay sahibi olan kömür rezervlerinin 114 yıl, doğal gazın 53 yıl ve petrolün ise 51 yıl içinde tükeneceği öngörülmektedir (URL-1). Bu nedenlerden dolayı, enerjiyi yoğun olarak tüketen aktif sistemlerin kullanım sürelerini azaltabilmek ve yenilenmesi oldukça uzun süre gerektiren doğal kaynakları korumak adına yenilenebilir ve temiz enerji kaynaklarına yönelmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında kendisinden en çok yararlanan güneş enerjisidir. Güneşten faydalanmanın en eski, basit ve ekonomik yolu, güneşe bakan saydam yüzeyler üzerinden doğrudan ısı kazanımıdır (Gupta & Tiwari, 2016). Bu yöntemde iç mekâna sızan ışınlar, malzeme bünyesinde tutularak malzemelerin yüzey sıcaklığını artırır ve ısı enerjisine dönüşür. Isı enerjisi, malzemenin ısı depolama kapasitesine göre kısa veya uzun süre malzeme bünyesinde depolanır. Sonrasında ısı, farklı sıcaklıklara sahip elemanlar arasında aktarılarak iç mekânın ısınması sağlanır. Isının depolanabilmesi, ortamın termal konfor şartlarını da etkiler (Chwieduk, 2014). Doğrudan ısı kazanımı, ısıyı hızlı bir şekilde iç ortama kazandırsa da bazı dezavantajları bulunmaktadır. Güney cephenin saydamlık oranının fazlaca artırılması dışarıdaki sıcaklık değişimlerine bağlı olarak iç mekân sıcaklıklarını keskin bir şekilde etkileyebilir. Bu nedenle ekstrem hava şartlarında termal konforun sağlanması güçleşir (Chwieduk, 2014). Doğrudan ısı kazanımının iç ortamda meydana getirdiği ani sıcaklık dalgalanmalarından kaçınmak için dolaylı ısı kazanım yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar güneş duvarı, su duvarı ve çatı havuzu gibi sistemlerdir (Kılıç Demircan ve Gültekin, 2017). Bunlar arasında binalarda en yaygın kullanılan sistem olan güneş duvarı, şeffaf bir yüzey ve hemen arkasında üzerinde ışığı toplayarak depolayan koyu bir katman bulunan beton, dolu tuğla, kerpiç veya taş gibi masif bir kütleden oluşur (Saadatian vd. 2012).

Isı depolamanın malzemenin sıcaklığının artırılmasına bağlı olarak gerçekleşmesine 'duyulur ısı depolama' adı verilir. Bu yöntemde depolanan ısı (Q), malzemenin özgül ısısı (c), kütlesi (m) ve çevresi ile arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) ile doğrudan ilişkidir ($Q_{duyulur} = m.c.\Delta T$). Bu tür ısı depoları için toprak, taş gibi geleneksel malzemelerin yanında beton gibi çağdaş malzemelerden faydalanılabilir. Diğer yandan, absorbe edilen ısı malzemede hâl değişimine neden olabilmekte, üstelik bu değişim sayesinde malzeme, sabit sıcaklıkta çok daha fazla miktarda ısı enerjisini depolayabilmektedir. Bu yöntem 'gizli ısı depolama'; bu yöntemle ilgili olarak çalışan malzemelere ise faz değiştiren malzemeler (FDM) denir. Parafin, yağ asitleri ve tuz hidratları yaygın olarak bilinen FDM türlerindedir (Durakovic, 2020). Bir maddenin katı-sıvı veya sıvı-gaz arasındaki faz değişimi esnasında depoladığı ısı miktarı (Q) tamamen malzemenin faz değişim entalpisi (ΔH) ile ilişkilidir ($Q_{gizli} = \Delta H$). Duyulur ısı depolama çok eski yıllara dayanan ve yaygın olarak kullanılan bir yöntem olsa da 1940'larda binalarda kullanılmaya başlanan gizli ısı depolama yöntemi birçok yönden daha elverişlidir. Bunun nedeni aynı miktarda ısıyı depolayabilmek için duyulur ısı depolayıcıların gizli ısı depolayıcılarına göre 5-10 kat daha fazla depolama alanına ihtiyacı olmasıdır (Durakovic, 2020) (Şekil 1).



Şekil 1. Bir pasif evin yıllık enerji ihtiyacını (~ 6480 MJ) karşılamak için gerekli hacim miktarları (Durakovic (2020)'den uyarlanmıştır).

Bir diğer ısı depolama çeşidi olan ‘termokimyasal ısı depolama’ yönteminde ise tersinir kimyasal reaksiyonlar sürecinde enerjinin reaksiyon ısısı şeklinde depolanması veya salınımı gerçekleşir. Bu tür ısı depolamada çok az ısı kaybı olduğundan termal ısı depolama sistemleri arasında en yüksek verimliliğe sahip yöntemdir. Ancak bu alandaki çalışmaların yeni olması, bina ölçeğinde henüz uygulanamıyor olması ve yüksek maliyet gerektirmesi gibi nedenlerden ötürü binalarda ısı depolama amacıyla henüz kullanılmamaktadır (Durakovic, 2020). Termal enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Termal enerji depolama sistemlerinin sınıflandırılması (Pfleger vd. 2015’den uyarlanmıştır).

Literatürde faz değişimine uğrayarak enerji verimliliği ve termal konfora katkı sunan malzemeler üzerine gerçekleştirilen çalışmalar mevcuttur (Struhala & Ostry, 2022; Faraj vd. 2020; Talu vd. 2023; Canım & Kalfa, 2021). Bunlar arasında yer alan ve Kyriaki vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FDM’nin bina kabuğundaki uygulamalarının çevresel ve ekonomik açılarından performansı incelenmiş ve ilk aşamada çoğu geleneksel yapı malzemesine göre daha fazla çevresel etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ancak bu malzemelerin tüm yaşam döngüsü göz önünde bulundurulduğunda enerji tüketimi ve karbon salınımlarının düşürülebildiği tespit edilmiştir. Ekonomik açıdan FDM’nin yüksek maliyetlere sahip olması nedeniyle henüz geniş çapta uygulanabilir olmadığı sonucuna varılmıştır (Kyriaki vd. 2017). Hafif konstrüksiyonlu binalarda FDM’nin yaşam döngüsünün sayısal modelleme yöntemiyle ele alındığı bir başka çalışmada, FDM’nin uygulandığı binanın üretim ve kullanım evrelerinde elektrikten kaynaklı enerji tüketiminin referans yapıya oranla düşük olduğu tespit edilmiştir (Vega vd. 2022). Struhala & Ostry (2022) ise enerji, maliyet ve çevresel etkiler kapsamında FDM’nin yaşam döngüsüne değinen literatür çalışmalarını ele almışlardır. Sonuç olarak FDM’nin yüksek gömülü enerji değerlerine sahip olduğuna ve çevresel etkilerine yönelik çalışmaların yetersiz olduğuna değinmişlerdir. FDM’nin yaşam boyu maliyetleri ve termal konfora olan etkilerini bir binanın tasarım optimizasyonu üzerinden inceleyen Lin vd. (2021), güneş duvarı, fotovoltaiik panel ve FDM’den oluşan 34 farklı tasarım alternatifi üzerine çalışmıştır. Neticede optimum alternatifin referans yapıya göre toplam maliyetlerde %45,5 oranında düşüş; termal konfor düzeyinde ise %43,8 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür. Canım & Kalfa (2021), FDM’yi farklı iklim bölgeleri, yapı bileşenleri, FDM çeşitleri, uygulama yöntemleri, çalışma türleri ve çalışmalarda başvurulan programlar özelinde incelemiştir. Buna göre, özellikle ülkemizde, deneysel alanda yapılan çalışmaların az olduğu vurgulanmış, düşük maliyetli, yüksek performanslı ve her iklim türüne uygun FDM’nin geliştirilmesinin gerekliliğine değinilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmanın amacı, FDM’nin çalışma prensiplerinin, özelliklerinin, potansiyel ve gelişmeye açık yönlerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD)’nde yer alan evreler özelinde incelenmesidir. Bu inceleme literatürdeki çalışmalar baz alınarak gerçekleştirilmiştir. YDD, bir ürün veya sistemin çevresel etkilerinin ve kaynak kullanımının değerlendirilebilmesi için onun tüm yaşam sürecinin dikkate alınmasına dayanan bir metottür. Bu yaklaşım, iklim değişikliğine neden olan sera gazı

salınıminin kontrol altına alınması açısından önemlidir. FDM türlerinin yapıda kullanılmadan önceki, kullanım esnasındaki ve sonrasındaki enerji ve karbon performanslarının incelenerek genel çerçevesinin çizilebilmesi açısından YDD metodu benimsenmiştir. Bu metot ile FDM'nin yaşam döngüsüne ait her bir evredeki avantaj ve dezavantajların tespit edilerek mevcut potansiyellerin ve olası önerilerin sunulması mümkün olacaktır. Çalışmanın hedef kitlesini malzeme üreticileri, malzeme seçiminde görev alan mimar, mühendis ve müteahhitler ile AR-GE merkezleri oluşturmaktadır.

Faz değiştiren malzemeler (FDM): Katı-sıvı veya sıvı-gaz fazları arasında geçiş yaparken aldığı ısıyı depolayabilen ve geri verebilen malzemelere FDM denir. Gizli ısı depolayıcılar da olarak bilinen FDM, geleneksel ısı depolayan malzemelere göre hacim başına 5 ila 14 kat daha fazla oranda ısı enerjisi depolama kapasitesine sahiptir (Sahu vd. 2017). FDM'in yapıda kullanım alanları duvarlar, döşemeler ve çatı gibi yapı bileşenleri; alçı, beton, çimento, ahşap, ısı yalıtımı gibi yapı malzemeleri ve iklimlendirme üniteleridir (Canım ve Kalfa, 2021; Aditya vd. 2017). Yapı malzemelerinde kullanılmaları durumunda kullanıcı konforunun sağlanabilmesi için 22-28°C erime sıcaklığına sahip türlerinin kullanılması uygundur (Lagou vd. 2019). FDM'nin binanın iç ve dış yüzeyleri arasındaki ısı transferini azaltabilmesi için faz değişim sıcaklığının kullanıcı konfor sıcaklığına veya iç mekân için ayarlanan termostat sıcaklığına olabildiğince yakın olması, düşük ısıl iletkenliğe ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olması gerekir (Aditya vd. 2017; Li vd. 2019). Ancak ısı yalıtımı yerine ısı emici olarak görev alacak FDM'nin yüksek ısıl iletkenliğe sahip olması beklenir (Lin vd. 2018).

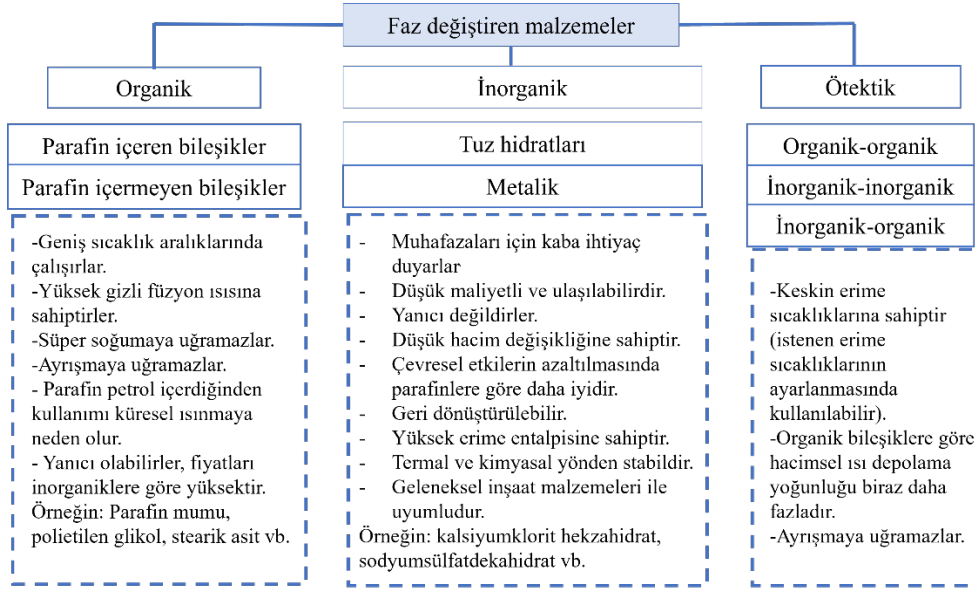
FDM'nin yapı kabuğundaki konumu, ısının depolanma sürecinin verimli bir şekilde gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Kış aylarında FDM'nin iç katmana yakın bir konumda yer alması ve arkasında bir yalıtım katmanı ile desteklenmesi, ısıtılan iç mekânın ısısının FDM tarafından depolanmasına ve ihtiyaç anında ısıyı iç ortama geri verebilmesine olanak sağlar. Ancak yaz ayları için FDM'nin dış katmana yakın olması fazla ısı kazanımının engellenmesine katkıda bulunur. Bir binada yazın ve kışın aynı malzeme sıralaması kullanılacağından binanın yıllık enerji tüketimi göz önünde bulundurularak uygun tercihin yapılması gerekir (Izquierdo-Barrientos vd. 2012).

FDM'nin yapıda ilk kullanımı 1940'lara tekabül etmektedir. İlk defa Boston'a yakın bir bölgede Dover Güneş Evi'nde FDM destekli ısıtma sisteminde sodyum sülfat dekahidrat (SSD) kullanılmış, ancak seçilen FDM içine konduğu kaptaki korozyona, çatlaklara ve sızıntıya neden olmuştur (Barber, 2016).

Bir yapıda kullanılacak FDM'nin seçimindeki temel kriterler aşağıdaki gibidir:

- Yüksek özgül ısı kapasitesi,
- Hacimde minimum değişim,
- Yüksek termal iletkenlik,
- Erime-katılaşma döngülerinin kararlılığı,
- Faz değişim süreçlerinde bozulmama,
- Yapı malzemeleri ile uyumlu çalışabilme,
- Mekanik stabilite yeterliliği,
- Yanma direncinin yüksek olması,
- Zehirli olmaması,
- Erişilebilir ve bol olması,
- Maliyetinin uygun olması,
- Düşük çevresel etki değerlerine sahip olması,
- Diğer malzemelerden ayrışma kolaylığı sağlaması,
- Geri dönüşüm potansiyelinin olması (Barzin vd. 2015; Rathore ve Shukla, 2020; Navarro vd. 2015).

FDM türleri organik, inorganik ve ötektik olmak üzere 3 ana kategoride sınıflandırılmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. FDM türleri (Yazar tarafından üretilmiştir).

Yapılarda en çok tercih edilen FDM türü, geniş sıcaklık aralıklarında çalışabiliyor olması, süper soğumaya uğramaması ve yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olması nedeniyle parafinlerdir (Cunha vd. 2020; Hasan vd. 2018; Wi vd. 2020; Evitasari vd. 2022; Silva vd. 2016). FDM yapılarda dört farklı metot çerçevesinde uygulanabilmektedir. Bunlar; doğrudan birleştirme, daldırma, nano/mikro/makro kapsülleme ve form sabitlemedir (Zhang vd. 2006; Xiong vd. 2022). Doğrudan birleştirmede FDM, çimento, harç ve alçı gibi malzemelerle doğrudan karıştırılırken daldırma yönteminde yapı malzemesi sıvı halde bulunan FDM'nin içine konur. Faz değişimi esnasındaki sızıntıları önlemek ve FDM'yi olumsuz dış ortam şartlarından korumak için FDM, 1-100 mikrometre çapındaki sentetik veya doğal polimer içerikli kapsüllerin (mikro kapsül) veya 1 mm'den daha büyük kapların (makro kapsül) içine yerleştirilir. Form sabitleme yönteminde ise FDM, HDPE gibi destekleyicilerle karıştırılarak katı hale gelene kadar soğutulur ve kompozit hale getirilir. Bu metotta form sabitleyici, eriyik FDM yapısına sinterleme, daldırma veya kapsülleme gibi yöntemlerle katılabilir.

Bir yapıda FDM kullanılmasının avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Termal konforun sağlanması,
- Yapının termal ataletinin iyileştirilmesi,
- İç ortamdaki sıcaklık dalgalanmalarının azaltılması,
- Tepe sıcaklık değerlerinin düşürülmesi,
- Yapıda aktif soğutma için gerçekleşen elektrik tüketiminin düşürülmesi,
- Yenilenebilir enerji kaynağı olan güneş enerjisinden beslenmesi (Durakovic, 2020; Canım & Kalfa, 2021; Cardenas-Ramirez vd. 2020).

Binalarda FDM uygulanmasına dair sıralanan başlıca sorunlar ise şu şekildedir:

- Doğrudan karıştırma veya emdirme gibi metotların uygulanması sonucunda sızıntılara sebep olabilmesi,
- Mikro kapsülleme uygulamalarının yüksek maliyetli olması,
- Parafin esaslı türlerinin yenilenebilir olmayan kaynaklardan üretilmesi,
- Organik türlerinin yanıcı olması,
- Tuz hidratları gibi bazı türlerinin metal içerikli kapsül malzemesiyle tepkimeye girerek korozyona neden olması,
- Tuz çözeltilerinin zaman içinde susuz kalarak kurumaması,
- Hizmet süresinin kısıtlı olması,
- Döngüsel kararlılığın yüksek oranda sağlanamaması,
- Tuz hidratlarının sedimentasyona ve süper soğumaya uğraması,
- Termal iletkenliklerinin düşük olması (Durakovic, 2020; Canım & Kalfa, 2021; Cardenas-Ramirez vd. 2020).

Piyasada makro kapsüllemiş halde bulunan FDM çeşitlerinden bazıları aşağıda gösterilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Piyasada bulunan makro kapsüllemiş FDM türleri: (a) BioPCM (URL-2), (b) Infinite RPCM (URL-3), (c,d) Rubitherm (URL-4)

Piyasada parafinden elde edilmiş alüminyum panel (DuPont Energain®) ve alçı panel (Knauf Comfortboard®) FDM ürünleri bulunmaktadır. Bu ürünlerin iç mekân sıcaklıklarını 7°C'ye kadar düşürdükleri (URL-5), 30 yılı aşkın bir süre boyunca panel verimliliğinde düşüş gözlemlenmeden kullanılabilir oldukları ve 10 cm kalınlığındaki beton bir duvar ile aynı termal kapasiteye sahip oldukları (URL-6) bilinmektedir. Türkiye'de üretim tesisi Kocaeli'de yer alan bir FDM üreticisi (URL-7) bulunmakla beraber başlıca üretici firmalar Fransa, Avustralya, Almanya, İngiltere, ABD, İsveç ve Japonya'da yer almaktadır (Aydın, 2010). Maliyet açısından ele alındığında İran ve Fas gibi FDM ürünlerini ithal eden ülkelerdeki uygulamalar, ekonomik açıdan uygulanabilir bulunmamaktadır (Baniassadi vd. 2016; Kharbouch vd. 2018). Bu durumun bir nedeni de bahsi geçen çalışmalarda FDM'nin yapı malzemesine katılarak pasif ısıtma ve/veya soğutmada görev almasıdır. Ancak FDM'yi aktif sistemlere entegre eden çalışmalarda, FDM ithal edilse dahi ürün maliyetinin amorti edilme süresi 1,8 ila 3,3 yıl gibi kısa sürelerde gerçekleşebilmektedir (Nie vd. 2019). FDM'nin maddi açıdan uygulanabilirliğinin sorgulanmasında, ülkelerin ekonomik durumları ve uygulanan sistemlerin verimliliği kadar iklim türüne de dikkat edilmelidir. İklim grupları sıcak-nemli, sıcak-kurak, ılıman-kurak, ılıman-nemli ve soğuk olarak sınıflandırıldığında, en çok enerji kazanımının sıcak ve kurak iklim tiplerinde görüldüğü, nemli bölgelerde ise FDM veriminin düştüğü gözlemlenmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. FDM uygulamalarının iklim türlerine göre enerji tüketimi, ısıl konfor ve ekonomik açılarından incelenmesi (Yazar tarafından üretilmiştir).

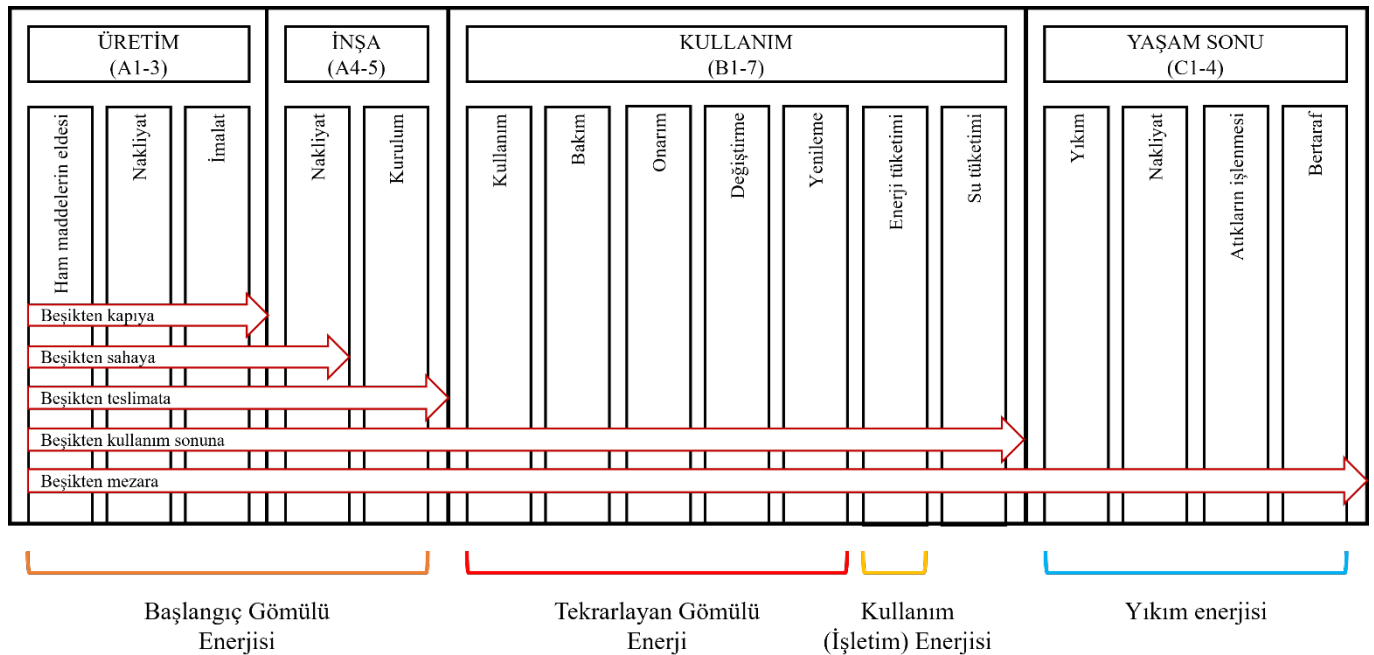
FDM Türü ve Uygulama Metodu	İklim Türü	Sonuç	Kaynak
Tuz hidrati •Dış cephede betonun içine makro kapsülleme metodu ile uygulanmıştır.	Sıcak-nemli	Soğutma yükünde %38,7 azalma ve 1 ila 2 saat aralığında zaman gecikmesi sağlanmıştır.	Rathore & Shukla, 2020
Parafin •Duvar ve tavanların iç kısımlarına makro kapsülleme metodu ile uygulanmıştır.	Sıcak-kurak	Soğutma yükünde %20,9; iç ortam sıcaklıklarında 2,18°C azalma sağlanmıştır.	Hasan vd. 2018
Yağ asitleri •Dış duvara uygulanmıştır.	Ilıman-kurak	Soğutma yükünde %4,5- 5,5 azalma sağlanmıştır. Maliyetin karşılanma süresi 70 yıldır.	Markarian & Fazelpour, 2019
Parafin •İklimlendirme sisteminde makro kapsülleme metodu ile kullanılmıştır.	Ilıman-nemli	Soğutma yükünde %17,8 azalma sağlanmıştır. Maliyetin karşılanma süresi 1,8 ila 3,3 yıldır.	Nie vd. 2019
Parafin •Dış duvarlar ve çatıda boşluklu kil tuğlası içine makro kapsüllemeye uygulanmıştır.	Sıcak-nemli	Soğutma yükünde %9,5 azalma sağlanmıştır.	Bagazi vd. 2021

Tablo 1. FDM uygulamalarının iklim türlerine göre enerji tüketimi, ısı konfor ve ekonomik açılardan incelenmesi (devamı)

Tuz hidratları •Dış duvarlar ve döşemeye makro kapsülenerak uygulanmıştır.	Sıcak-kurak	Soğutma yükünde %45,4 ila %60,3 azalma sağlanmıştır. Maliyetin karşılanma süresi: 9,6 ila 3,3 yıldır.	Bohorquez-Ordnes vd. 2021
Yağ asitleri •Dış duvarlarda betonun içine mikro kapsülleme yöntemiyle uygulanmıştır.	Sıcak-nemli	Toplam enerji tüketiminde %13 azalma sağlanmıştır.	Cellat vd. 2020
Parafin •Dış duvarlarda gözenekli bir malzeme içine vakumlu form sabitleme yöntemi ile uygulanmıştır.	Sıcak-nemli	Toplam enerji tüketiminde %5; iç ortam sıcaklıklarında 4,1°C azalma sağlanmıştır.	Wi vd. 2020
Yağ asitleri •Tavana uygulanmıştır.	Sıcak-nemli	Toplam enerji tüketiminde ihmal edilebilir düzeyde azalma görülmüştür.	Alam vd. 2014
Yağ asitleri •Dış duvarlar ve çatıya uygulanmıştır.	Ilıman-nemli	Toplam enerji tüketiminde %8,9-20 azalma sağlanmıştır.	Kabdrakhmanova vd. 2021
Parafin •Dış duvarda çimento harcının içine doğrudan karıştırılarak uygulanmıştır.	Ilıman-nemli	İç ortam sıcaklıklarında kışın 2°C artış, yazın 5°C azalma sağlanmıştır.	Cunha vd. 2020
Parafin ve yağ asitleri •Renkli ve yansıtıcı cam sistemlere uygulanmıştır.	Sıcak-nemli	İç ortam sıcaklıklarında 1,84°C azalma sağlanmıştır.	Evitasari vd. 2022
Parafin •Dış duvarlarda selülozik yalıtım malzemesinin içine doğrudan karıştırma metodu ile uygulanmıştır.	Ilıman-nemli	1,5 saat zaman gecikmesi sağlanmıştır.	Lee vd. 2018

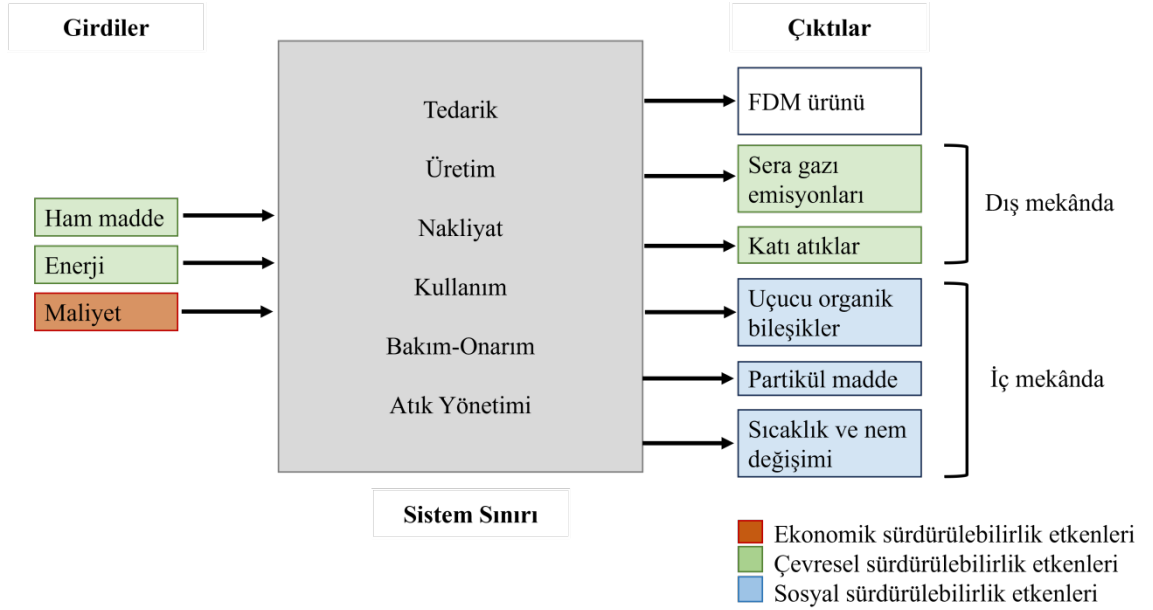
2. YÖNTEM

Ham madde kaynaklarının sınırlı oluşunun yanı sıra yapı malzemelerinin yaşam döngüleri süresince çevreye, insan sağlığına ve kaynaklara verdikleri hasarlar 1960'lı yıllarda Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi (YDD) metodunun ortaya çıkmasına neden olmuştur (Bjorn vd. 2018). YDD çalışmaları, yapı malzemesinin üretildiği aşamayı konu alan beşikten kapıya, ham maddenin elde edilmesinden itibaren üretilen malzemenin toprağa geri dönmesi sürecini kapsayan beşikten mezara veya tüm bu süreçlere ek olarak atık ürünün yeniden sisteme kazandırılmasını kapsayan (yeniden kullanım, geri dönüşüm vb.) beşikten beşiğe yaklaşımlarını çalışma kapsamına dahil edebilmektedir (EPA, 2006) (Şekil 5).



Şekil 5. Bir yapıya ait yaşam döngüsü aşamaları (Malmqvist vd. 2018'den uyarlanmıştır).

Bu çalışmada, literatürde FDM'nin yapılardaki uygulamalarının ele alındığı çalışmalar, bu malzeme türünün neden olduğu enerji ve ham madde gibi kaynak tüketimleri, emisyonları (çevresel etkiler), maliyetleri (ekonomik etkiler) ve kullanıcı konforu üzerindeki etkileri (sosyal etkiler) açısından Şekil 6'da belirtilen YDD evreleri üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışmada deneysel, sayısal modelleme veya araştırmaya dayalı metotlar içeren, son on yıla ait toplamda 33 farklı makale, kitap, bildiri ve ürün envanteri incelenmiştir. Yaşam döngüsü süresince yapı malzemelerinin ele alınacağı evreler tedarik, üretim, nakliyat, kullanım, bakım-onarım ve atık yönetimi şeklindedir. Böylece ekolojik, ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik üzerinden FDM uygulamalarının mevcut potansiyellerinin açığa çıkarılması ve gelişmeye açık yönlerinin vurgulanması amaçlanmaktadır.



Şekil 6. Çalışmada izlenecek YDD evreleri ve sistem sınırları (Yazar tarafından üretilmiştir.)

3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

3.1. Bulgular

3.1.1. Tedarik Evresi

Yapı malzemelerini oluşturan ham maddeler doğada işlenmemiş halde bulunmakta olup taş ocağı, orman ve toprak gibi doğal kaynaklardan tedarik edilmektedirler. İnşaat sektörü, küresel ölçekte gerçekleşen doğal kaynak tüketiminin %24'ünden sorumlu olduğundan (Bribian vd.2010) bu aşamada kaynak verimliliğini sağlayacak önlemlerin alınması gerekmektedir.

Standardizasyon: Çevresel ürün beyannameleri (EPD) sayesinde ilgili ürünün çevresel etkileri, enerji ihtiyaçları ve atık miktarları tespit edilebilmektedir. Piyasada FDM ürünlerinin ham maddesini oluşturan parafin mumu gibi saf ürünlerin çevresel etkilerine dair veriler yer alsa (CEPSA, 2022) da uluslararası platformda FDM üreticilerine ait herhangi bir Çevresel Ürün Beyannamesi'ne rastlanmamıştır. Ayrıca küresel çapta termal enerji depolayan ürünlerin standardizasyonuna yönelik bir çalışma bulunmamaktadır (Kyriaki vd. 2017).

Doğal kaynakların korunumu: Yenilenemeyen kaynakların sürdürülebilirliği kadar bu tür kaynakların tüketiminin çevreye verdiği hasar da göz önünde bulundurulmalıdır. Parafin içeren FDM birçok araştırma kapsamında enerji tasarrufu ve termal konforun sağlanması açısından etkili olarak değerlendirilmiştir (Leang vd. 2017; Wu vd. 2022). Ancak piyasadaki FDM tedarikçilerinin petrol tabanlı olan ürünleri, doğal kaynakların tüketimi ve çevresel etkiler açısından araştırılmaya değerdir. Öte yandan, FDM olarak yemek yağı, palmiye çekirdeği kabuğu gibi atıklar alternatif malzemeler kategorisindedir (Nicholas vd. 2018). Yüksek fırın atığı olan cüruf ve termik santral atığı olan uçucu kül gibi malzemelerin form stabilizasyonu için FDM üretiminde kullanılabileceğini ve böylelikle ısı depolama kapasitesi ve basınç dayanımı açısından standartları karşılayan bir

kompozit malzeme üretilebileceğini gösteren çalışmalar bulunmaktadır (Gencel vd. 2022; Liu vd. 2019; Yousefi vd. 2021). Bu tür atıkların kullanımı sayesinde ham madde ihtiyacı azaltılabilmektedir.

3.1.2. Üretim Evresi

İnşaat endüstrisi, yapı malzemelerinin üretilmesi ve işlenmesi aşamalarında arazi, ekosistem ve insan sağlığına yönelik verdiği zararların yanı sıra toprağın, suyun ve havanın kirlenmesine neden olmaktadır (Blankendaal vd. 2014). Malzemelerin nakliyatı, üretimi, işlenmesi ve yapının kurulum aşamaları dikkate alındığında üretim aşaması, tüm bu aşamalarda gerçekleşen toplam sera gazı salınımının %86'sından sorumludur (Yan vd. 2010).

Gömülü enerji: Bir yapı yaşam süresi boyunca enerjiye gereksinim duyar. Gömülü enerji, bir yapının üretim, kurulum, nakliyat, bakım-onarım ve yıkım aşamalarında kullanılan enerji türü iken kullanım (işletim) enerjisi yapı ekipmanlarının iklimlendirme, ısıtma-soğutma, havalandırma ve aydınlatma için harcadıkları enerji türüdür. Her iki enerji türü için kazanımların sağlanmasında yapı malzemelerinin payı büyüktür. FDM içeren ve içermeyen iki test kabınının kıyaslandığı bir çalışmada, gömülü enerjide parafin ve tuz hidratlarının kullanımından kaynaklı olarak %25 ila %28 oranlarında artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak üretim aşamasındaki yüksek etkilerin kullanım aşamasındaki kazanımlarla (%15-17) birlikte ele alındığı durumda 80 yıl ömre sahip bir bina için kayıp-kazançların dengelendiği görülmüştür (Rincón vd. 2013). Güneş enerjili damıtıcının FDM içeren ve içermeyen sistemler üzerinden kıyaslandığı Mısır'daki bir başka çalışmada, parafin mumu içeren düzeneğin maliyetinin karşılama süresi (1,6 yıl), parafin içermeyene göre (1,3 yıl) daha fazla bulunmuştur. Bunun nedeni, FDM'ye ait yüksek gömülü enerji değeridir (Yousef & Hassan, 2020). Fotovoltaik panellere parafin içeren saf FDM eklenmesi durumunda ise gömülü enerjide %31,4, alüminyum köpük içeren kompozit FDM eklenmesi durumunda ise %36 artış saptanmıştır (Yousef vd. 2022). Ayrıca atık malzemelerden yararlanılması, ham maddelerin işleme safhalarını elimine edeceğinden gömülü enerjinin düşmesine katkı sağlayacaktır. Genleştirilmiş cam agregasının ve uçucu külün FDM destekli çimento harç yapısına katıldığı bir çalışmada, normal çimento harcına nazaran enerji tüketiminde %35 düşüş sağlanmıştır (Yousefi vd. 2021). Tüm bu çalışmalar, FDM'nin yüksek oluşum enerjisine karşın kullanım aşamasındaki enerji kazanımlarının mutlaka birlikte ele alınmasının ve atık malzeme içeriğinin göz önünde bulundurulmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Gömülü karbon: Bir malzemenin yaşam döngüsü aşamalarında neden olduğu karbon salınımları o malzemenin gömülü karbon değerini oluşturur. İran'da gerçekleştirilen bir çalışmada organik bazlı FDM'nin gömülü karbonda %0,1-%27,5 artışa neden olduğu ancak malzemenin 50 yıllık kullanım sürecindeki karbon emisyonunda ise %2,5-5,4 oranında düşüş sağlandığı gözlenmiştir (Markarian & Fazelpour, 2019). Akdeniz'de bulunan bir eğitim binasının soğutmadan kaynaklı enerji sarfiyatının düşürülmesi ve iç mekân konforunun sağlanması için yeşil çatı, soğuk çatı, cephe yalıtımı, FDM duvar paneli ve havalandırılmış cephe alternatifleri kıyaslanmıştır. Buna göre binanın ilk durumuna göre yıllık karbon emisyonundaki en fazla düşüşün FDM alternatifinde (%6,1) sağlandığı görülmüştür. Yatırım maliyetleri açısından ise en az maliyetli seçenek soğuk çatı olurken ikinci sırada FDM gelmektedir (Ascione vd. 2019).

FDM'nin kaynak tüketimlerinin ve karbon salınımlarının diğer yapı malzemeleri ile kıyaslanabilmesi amacıyla bir yapının kabuğunda kullanılan malzemelerin gömülü su, karbon ve enerji değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Tabloda yer alan saf parafin mumu ve toz halinde bulunan sodyum sülfat, birçok FDM uygulamasında kullanılan ham maddelerdir.

Tablo 2. Yapı malzemeleri ve FDM ham maddelerinin kaynak kullanım ve salınım değerleri (Crawford vd. 2019; CEPISA, 2022; Grupo Industrial Crimidesa, 2022)

	Beton blok	Kil tuğla	Kesme taş	Ç. Lamine Ahşap (CLT)	Gaz beton (AAC)	Alçı levha	Lamine cam	Parafin mumu	Sodyum sülfat (toz)
Gömülü su (L/kg)	3,7	1,8	16,5	14,3	8,4	6,5	59,7	1,73	-
Gömülü enerji (MJ/kg)	2,6	3,5	16,3	16,01	8,5	6,5	36,4	65,6	5,2
Gömülü karbon (kgCO_{2e})	0,24	0,32	1,3	1,07	0,71	0,44	2,8	1,35	0,29

(Sistem sınırı: beşikten kapıya)

Yatırım ve işletim maliyetleri: Yeni nesil teknoloji ürünleri genelde yüksek ilk yatırım maliyetleri ile bilinmekle birlikte hizmet süreleri boyunca sağladıkları enerji kazanımları dolayısıyla bu zararı zamanla kazanca dönüştürebilmektedirler. Bu nedenle maliyet analizi tüm yaşam döngüsünü içine alacak şekilde yapılmalıdır. Örneğin, tarım ürünlerinin kök bölgeleri için kullanılan ısıtma sistemlerinin gaz, petrol, biyokütle ve FDM (parafin, 250 KJ/kg) alternatifleri olmak üzere 4 farklı senaryo kapsamında kıyaslandığı bir çalışmada, FDM'nin diğerlerine nazaran 4 kat fazla ilk yatırım maliyetine ve düşük yoğunluklu polietilen çantaların 10 yıl sonra değiştirilmesinden kaynaklı olarak 2 kat fazla bakım masrafına sahip olduğu görülmüştür. Ancak işletim maliyetleri ve yıllık ortalama maliyetler açısından bakıldığında FDM'nin geleneksel senaryolara göre çok daha düşük oranlara (2 kat daha az) sahip olduğu görülmüştür (Llorach-Massana vd. 2016).

3.1.3. Nakliyat Evresi

Yapı malzemelerinin inşaat alanına götürülmesi aşamasında yapının toplam gömülü enerjisinin %7 ila %10'u arasında bir enerji kaybı yaşanmaktadır (Vukotic vd. 2010). Ham maddelerin fabrikalara götürülmesi, üretilen yapı malzemelerinin şantiye alanına ulaştırılması ve atık malzemelerin uzaklaştırılması gibi aşamalarda taşıtların kullandığı yakıt türüne, yükün ağırlığına ve kaynak-fabrika-şantiye-atık imha alanı arasındaki mesafelere göre değişen oranlarda karbon salınımları gerçekleşmektedir.

Yerel malzeme: Çevreye zarar veren sentetik malzemeler yerine hizmet süresi sonunda doğada çözünebilir; uzak destinasyonlardan getirilerek ulaşımdan kaynaklı emisyonların artmasına neden olan ithal malzemeler yerine yakın çevrede kolaylıkla bulunabilen, düşük maliyetli, yüksek performans özelliklerine sahip malzemelerin kullanımı mimari sürdürülebilirliğe katkı sunar (Girijappa vd. 2019). FDM türlerinden tuz hidratları, parafinlere göre çok daha kolay ulaşılabilir ve ekonomiktir (Dixit vd. 2022). Ancak, yerli FDM ürünlerinin bulunamaması durumunda bu ürünlerin yurt dışından ithal edilmesi, özellikle nakliyat evresindeki gömülü karbon değerlerinin artmasına neden olacaktır.

3.1.4. Kullanım Evresi

Geleneksel yapıların kullanım evresinde tükettikleri işletim enerjisinin miktarı %80-94 civarlarında iken bu oran yapının enerji performansı arttıkça düşürülebilmektedir. Nitekim net sıfır enerjili binaların kullanım enerjisi %0-26 aralığındadır (Koç vd. 2022). Bu nedenle binalara uygulanacak teknolojilerin ve yeni nesil malzeme uygulamalarının kullanım evresindeki etkileri enerji verimliliği açısından büyük öneme sahiptir.

Sistemlere entegre olabilmek: FDM doğrudan ısı kazanımını sağlayan camlar, dolaylı ısı kazanımında görev alan güneş duvarları, kış odaları ve termosifonlar ile çalışarak bu sistemlerin verimliliğin artırılmasında görev alabilmektedir (Durakovic, 2020). Yağ asitlerinin FDM olarak kullanılarak güneş duvarına (trombe duvar) entegre edildiği deneysel bir çalışmada, iç mekân sıcaklıklarında 3,2°C'ye kadar artış sağlanabildiği görülmüştür (Duan vd. 2021).

Enerji verimliliği: FDM'nin yüksek gömülü enerji değerleri, yapının kullanım aşamasındaki enerji kazançları ile telafi edilebilmektedir. Çin'de FDM'den kaynaklı elektrik kazancı, ılımlı bölgelerde %34,8; yazın sıcak kışın soğuk bölgelerde %11,9; sert soğuk iklimde %8,5; soğuk iklimde %8,2 ve yazın sıcak, kışın ılık olan iklim bölgelerinde ise %4,7'dir (Qu vd. 2021).

Termal konfor: İyi bir yapı çevre enerji tüketimine ek olarak kullanıcı konforunun sağlanması elzemdir (Thapa & Panda, 2015). Nitekim, termal konforun sağlanmasındaki yetersizlik doğrudan enerji tüketimine etki edecektir. Yapılarda FDM kullanımı, ısıtma ve soğutmadan kaynaklı enerji tüketimi üzerinde pozitif etkilere sahip olduğu gibi termal konfor üzerinde de etkilidir. Yapılan çalışmalar, bina kabuğundaki FDM uygulamaları sayesinde iç mekandaki sıcaklık dalgalanmalarının stabilize edilebileceğini (Yao vd. 2018), zaman gecikmesinin sağlanabileceğini (Lee vd. 2018; Wang vd. 2018), ısı akışının azaltılabileceğini (Kharbouch vd. 2017) ve dış mekândaki termal çevre etkilerinin minimize edilebileceğini (Ning vd. 2017) göstermektedir. Erime sıcaklıkları 17°C-29,6°C arasında olan organik FDM türleri, 18,8°C-30°C olan inorganik tuz çözeltileri ve 21°C-30°C aralığındaki inorganik ötektikler, ASHRAE Standardı (2017)'nda belirtilen 19,4-27,8°C aralığındaki termal konfor sıcaklığını sağlayabilmektedirler (Amoatey vd. 2022).

Çevresel etkiler: FDM'nin çoğu geleneksel yapı malzemesine göre kullanım aşamasındaki çevresel etkiler açısından daha iyi performans sergilemektedir. Ancak etki düzeyi, kullanılan FDM türüne göre değişiklik

göstermektedir. Sulu tuz çözeltileri, neden olduğu çevresel etkileri 25 yılda, alkanlar ise 61 yıldan fazla sürede giderebilmektedirler (Kyriaki vd. 2017).

İç mekân hava kalitesi ve kullanıcı sağlığı: FDM'nin neden olduğu iç mekân kirleticileri özelinde yapılan çalışmalar sınırlıdır. Bununla birlikte mikro kapsüllenen parafin bazlı FDM'nin uçucu organik bileşikler içerdiği ve 45°C-65°C sıcaklık aralığında salınım yaptığı tespit edilmiştir (Giro-Paloma vd. 2016). Ayrıca kapsüllenmiş inorganik FDM grubunda yer alan ve ince parçacıklar halinde toz olarak alçı paneller üzerinde bulunan tuz hidratları sızıntı, çatlama veya yıpranmaya bağlı olarak ince partiküllerin artışı ile iç mekân hava kalitesinin düşmesine neden olabilmektedirler (Amoatey vd. 2022). İç mekânda salınımı gerçekleşen kirleticiler astım, solunum yolu hastalıkları ve kanser gibi rahatsızlıkları tetikleyebilmektedir. Diğer yandan yeşil kimya alanında yapılan çalışmalar mısır, ayçiçeği ve soya fasulyesi (Rasta vd. 2016) gibi bitkilerin yağlarının binalarda soğutma amacıyla FDM olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Organik bu ürünlerin yapıda kullanımları sayesinde FDM'nin toksik özellikleri ortadan kaldırılabilir (Okogeri & Stathopoulos, 2021).

3.1.5. Bakım-Onarım Evreleri

Yinelenen gömülü enerji, yapıların onarım, malzeme değiştirme ve iyileştirme süreçlerinde harcanır. Bu enerjinin miktarı yapının servis ömrü ile doğru orantılı olup yinelenen gömülü enerjinin yapının toplam gömülü enerjisi ile çok güçlü ve pozitif yönde bir ilişkisi bulunmaktadır (Dixit, 2019).

Kullanım süresi: Mimari tasarım aşamasında yapıda kullanılacak olan malzemelerin kullanım süreleri, yapının tüm yaşam süresi boyunca ne kadar malzemeye ihtiyaç duyulacağını bir göstergesidir. Uzun servis ömrüne sahip malzemelerin tercih edilmesi yinelenen gömülü enerjinin ve dolayısıyla yaşam boyu gömülü enerjisinin düşürülmesini sağlar (Dixit vd. 2014). Yapıların ve yapıda termal enerji deposu görevi gören FDM'nin servis ömrü ne kadar uzun olursa çevresel etkileri de o kadar düşük olacaktır (Kyriaki vd. 2017). Yılda ortalama 300 faz değişim döngüsü üzerinden yapılan hesaplamalarda bazı FDM türlerine ait veriler aşağıdaki gibidir (Tablo 3). Buna göre parafin en az 5 yıllık servis ömrüne sahipken tuz hidratlarından sodyum sülfat çözeltisi yalnızca 1 yıl ömre sahiptir. Ancak farklı tuzların birlikte kullanıldığı durumlarda termal döngü sürelerinde 18 kat iyileşme gözlemlenebilmektedir.

Tablo 3. Organik, inorganik ve ötektik FDM'in termal döngülerinin karşılaştırılması (Durakovic, 2020)

FDM türü	Erime Sıcaklığı (°C)	Gizli erime ısı, ΔH (kJ/kg)	Termal döngü süresi
Parafin mumu	53	184	5 yıl (1500 döngü)
Parafin (%70)+polipropilen (%30)	44,7	136,16	10 yıl (3000 döngü)
Palmitik asit	61,2	196,1	<1 yıl (120 döngü)
Palmitik asit (%80)+genleştirilmiş grafit (%20)	60,8	148,3	10 yıl (3000 döngü)
Glauber tuzu (Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O)	32,4	238	1 yıl (320 döngü)
Na ₂ SO ₄ ·1/2NaCl·10H ₂ O	20	-	18,8 yıl (5650 döngü)
Kaprik asit (%73,5)+miristik asit (%26,5)	21,4	152	16,6 yıl (5000 döngü)

3.1.6. Atık Evresi

Malzemelerin sürekli bir akış sağlanarak sistemde tutulması ile yeni ham madde ihtiyacının önüne geçilebilir. Kaynak kullanımını etkileyen endüstriyel gelişmeler, insan ve çevre sağlığı gibi faktörler ve düşük karbonlu kalkınma stratejilerini içine alan döngüsel ekonomi kavramı; yeniden kullanım, azaltım, geri dönüşüm, yeniden tasarım ve iyileştirme aşamalarını konu alır (Winans vd. 2017).

Doğada çözünebilirlik ve geri dönüşüm: Çoğu organik FDM servis ömürleri tükendiğinde doğada çözünebilirlikte veya geri dönüştürülebilmektedirler. Ancak parafinin içinde benzen ve toluen gibi yüksek derecede toksik maddeler bulunduğu tespit edilmiştir. Bu maddelerin doğada çözünmemesi ve geri dönüştürülebilmesi çevresel açıdan bir sorun teşkil etmektedir (Chandel & Agarwal, 2017). İnorganik türdeki saf malzemeler çevreye zarar vermezler (Kyriaki vd. 2017). Geri dönüştürülen malzemelerin FDM bünyesine form sabitleyici, kapsül, kalınlaştırıcı veya termal iletkenliği artırıcı malzeme olarak katılabilmeleri, ham maddenin tedarik edilmesi ve yapı malzemelerinin üretilmesi gibi aşamaların atlanmasına neden olacağından ekonomik ve ekolojik sürdürülebilirliğe katkı sunar.

3.2. Değerlendirme

Son yıllarda gizli ısı depolama özellikleri sayesinde dar sıcaklık aralıklarında fazla miktarda ısıyı depolayabilen FDM üzerine yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Bu çalışmada, FDM ürünleri sistem sınırını oluşturan her bir YDD evresi özelinde sahip olduğu potansiyeller ve gelişmeye açık olan yönleri açısından incelenmiştir.

Neticede FDM'nin her bir YDD evresi için geliştirilebilir özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Doğal kaynakların korunumu, düşük işletim maliyetleri, diğer ısı kazanım sistemleriyle birlikte çalışabilmesi, enerji verimliliğine, termal konfora, kullanım aşamasındaki karbon emisyonlarının düşürülmesine olan katkıları açısından FDM'nin büyük potansiyellere sahip olduğu ortadadır. Diğer yandan, standardizasyon sorunu, gömülü enerji, gömülü karbon ve ilk yatırım maliyetlerinin yüksek olması, yerel malzeme kullanımından çok uluslararası piyasada satılan ürünlerin tercih edilmesi, insan sağlığına yönelik içerdiği tehditler, kullanım süresinin kısa olması durumunda maliyetlerin ve çevresel etkilerin artması, bazı türlerinin doğada çözünebilir olmaması gibi dezavantajları mevcuttur. Bu nedenle FDM'nin geliştirilerek binalarda enerji verimliliği ve termal konforun sağlanması amacıyla yaygın olarak kullanımının önünün açılması gerekmektedir (Tablo 4).

Tablo 4. FDM'nin mevcut potansiyelleri ve gelişmeye açık yönleri (Yazar tarafından üretilmiştir).

Evreler	Potansiyeller	Gelişmeye açık yönler
Tedarik	- Standardizasyon	- Kaynak kullanımı, enerji tüketimi ve atık üretimine dair verilerin belirtildiği standardize edilmiş belge formatları oluşturulmalıdır.
	-Doğal kaynakların korunumu	- Atık malzemelerden faydalanılarak ham madde tüketiminin ve atık oluşumunun önüne geçilmelidir.
Üretim	- Gömülü enerji	- Oluşum enerjinin düşürülmesinde farklı sektöre ait atıkların uygulanabilirliği irdelenmelidir. Bina yaşam döngüsü boyunca gerçekleşen toplam enerji tüketimi incelenmelidir.
	- Gömülü karbon	- Karbon emisyonu, binanın tüm yaşam sürecini kapsayacak şekilde bütüncül olarak ele alınmalıdır.
	- İlk yatırım maliyetleri	- Düşük maliyetli FDM uygulamalarının geliştirilmesine yoğunlaşılmalıdır.
	- İşletim maliyetleri	- Tüm maliyetler birlikte ele alınmalı, net kazanç ve kayıplar önceden belirlenmelidir.
Nakliyat	- Yerel malzeme	- Yerel ürünler kullanılarak FDM üretimine gidilmelidir.
Kullanım	- Isı kazanım sistemleri ile çalışabilme	- Farklı sistemlerin bir arada çalışması durumunda FDM'nin sunduğu performans ve katkı durumu irdelenmelidir.
	- Enerji verimliliği	- İklim'e göre değişkenlik gösterir. Her bir iklim özelinde iyileştirmeye gidilmelidir.
	- Termal konfor	- İklim'e göre değişkenlik gösterir. Her bir iklim özelinde iyileştirmeye gidilmelidir.
	- Çevresel etkiler	- Seçilen FDM türüne göre yaşam döngüsü senaryoları tasarlanmalıdır.
	- İç mekân hava kalitesi ve insan sağlığı	- İç mekân kullanıcılarının sağlığını tehdit eden uygulamalara karşı önlemler alınmalıdır. Atık kullanımı durumunda havaya ve suya yapılan salınımlar analiz edilmelidir.
Bakım-Onarım	- Kullanım süresi	- Maliyetler ve kaynak verimliliği açısından termal döngü süreleri uzatılmalıdır.
	- Bakım-onarım maliyetleri	- Tüm maliyetler birlikte ele alınmalı, net kazanç ve kayıplar önceden belirlenmelidir.
Atık Yönetimi	- Doğada çözünebilirlik ve geri dönüşüm	- Yaşamı sonunda çevreye minimum hasar verecek, mümkünse doğada çözünebilir ve sonrasında geri dönüştürülebilir uygulamalara gidilmelidir.

4. SONUÇ

Yığma yapıdan karkas sistemlere geçilmesi ile daha ince kesitli dış cidarların üretimi mümkün kılınmıştır. Ancak bu durum termal kütleden ödün verilmesi neticesinde malzemenin termal konfora etki eden ısı depolama özelliklerinin kaybedilmesi ile sonuçlanmıştır. Konfor sıcaklığını istenen aralığa getirebilmek için ısıtma, soğutma ve havalandırma gibi aktif sistemlerin yoğun olarak kullanımı, enerji kaynaklarının tüketiminin ve çevreye yayılan sera gazlarının artmasına neden olmaktadır.

FDM'ler sabit sıcaklıklarda ve düşük hacimlerde yüksek enerji depolama özellikleri ile bilinmektedirler. Günümüz yapılarında düşük ısı iletkenliğe sahip malzemeler kullanılsa ve yalıtımla desteklenmiş bina kabuğu tasarımı mümkün olsa da malzemelerin ısıyı depolama ve gerektiğinde yayma durumunun termal konfora olan etkisi göz ardı edilmemelidir. Bu açıdan FDM, sera gazı salınımlarının azaltılması, enerji verimliliğinin iyileştirilmesi ve ısı konforunun sağlanması ile çevresel, ekonomik ve sosyal açılardan mimari sürdürülebilirliğe katkı sunabilecek potansiyeldedir. Bu çalışmayla alanında ilerleme kaydedebilmesi ve kullanım sahasının yaygınlaştırılabilmesi için FDM'nin mevcut potansiyellerinin ve gelişmeye açık yönlerinin öne çıkarılması amaçlanmıştır. Bu kriterlerin titizlikle belirlenebilmesi için bir binanın yaşam döngüsünü oluşturan evreler FDM özelinde teker teker ele alınmıştır. Çalışmanın yürütülmesi aşamasında toplam 33 farklı güncel kaynaktan yararlanılmıştır.

Elde edilen verilere göre, FDM'nin ham maddelerinin tedarik evresindeki çevresel etkilerinin düşürülebilmesi için daha şeffaf verilere ihtiyaç duyulmaktadır. Bir malzemenin ham madde ihtiyacını ve üretimi aşamasındaki enerji tüketimini belirten verilerin eksikliği ve standardizasyon sorunu FDM'nin ham madde tedarikçisinin önündeki engellerdendir. Ayrıca en sık kullanılan FDM türü olan parafinlerin petrol tabanlı olması doğal kaynakların korunumu açısından irdelenmelidir. Endüstri ve tarım başta olmak üzere pek çok sektörden elde edilerek FDM'nin içeriğine katılabilen atık oranının artırılabilmesi döngüsel ekonomi açısından önemli faydalar sağlayabilir. Atık malzemelerden faydalanılması, daha az ham madde ihtiyacına neden olacağından karbon salınımlarının ve gömülü enerji sarfiyatının da önüne geçecektir. Üretim aşamasında FDM'nin gömülü enerji ve karbon değerlerinin yanı sıra yatırım maliyetlerinin yüksek olduğu ancak binanın tüm yaşam süresi göz önünde bulundurulduğunda bu etkilerin hafifletilebildiği ve maliyetlerin bölgeden bölgeye değişmekle birlikte kısa süre zarflarında karşılanmasının mümkün olduğu görülmüştür. Kolay ulaşılabilir ve yerel FDM ürünlerinin tercih edilmesi nakliyat sürecindeki olumsuz etkileri düşüreceklerdir.

FDM, cam sistemlere ve güneş duvarlarına uygulanabilme özelliğine sahiptir. Bu nedenle hem doğrudan hem de dolaylı ısı kazanım sistemlerinin verimini artırabilmektedir. Kullanım evresinde FDM, enerji verimliliği, termal konfor, çevresel etkiler açısından geleneksel malzemelere göre daha iyi performans sergilemektedir. Ancak iç mekân hava kalitesi açısından özellikle partikül durumundaki uygulamaların güvenliği kontrol altına alınmalıdır. Kullanım süresi çeşitli katkılar ve ötektik karışımlarla uzatılabilen FDM, atık evresinde doğada çözünebilir ve geri dönüştürülebilir.

Sonuç olarak yüksek oluşum enerjisi ve ilk yatırım maliyetleri nedeniyle FDM'nin uygulanabilirliği halen tartışma konusudur. Ürünün tedarik edileceği kurumun bulunduğu ülkenin kurundaki dalgalanmalar yoğun olarak ithalat yapan ülkeleri yatırım maliyetleri hususunda zor duruma düşürmektedir. Bunun için olabildiğince yerel kaynak ve yeşil malzeme kullanımı ile yüksek performanslı ve maliyet-etkin termal depolayıcıların üretilmesi gerekmektedir. Henüz ürünün tasarım aşamasında iken kullanılacak ana malzemelerin tedarik edileceği kaynaklar, üretim esnasında gerekli olacak ham madde, enerji ve ortaya çıkan ürünün taşınması aşamalarında karşılaşılabilecek sorunlar, kullanım evresindeki enerji ve karbon kazanımları, insan sağlığı ve iç ortam çevre kalitesi üzerindeki etkiler, bakım-onarım aşamalarının sıklığı ve yaşam sonunda ortaya çıkabilecek atıklar bütüncül olarak ele alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Aditya, L., & Mahlia, T.M.I., & Rismanchi, B., & Ng, H.M., & Hasan, M.H., & Metselaar, H.S.C., & Muraza, O., & Aditya, H.B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1352-1365.
- Alam, M., & Jamil, H., & Sanjayan, J., & Wilson, J. (2014). Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities, *Energy and Buildings*, 78, 192-201.

- Amoatey, P., & Al-Jabri, K., & Al-Saadi, S. (2022). Influence of phase change materials on thermal comfort, greenhouse gas emissions, and potential indoor air quality issues across different climatic regions: A critical review, *Int J Energy Res.*, 46(15), 22386-22420.
- Ascione, F., & Bianco, N., & Masi, R.F., & Mastellone, M., & Vanoli, G.P. (2019). Phase change materials for reducing cooling energy demand and improving indoor comfort: a step-by-step retrofit of a Mediterranean educational building, *Energies*, 12.
- Aydın, A.A. (2010). Faz Değişim Malzemeleri ve Isı Enerjisinin Depolanması (Doktora Tezi), *İstanbul Sanayi Odası*, 29.
- Bagazi, M.S., & Melaibari, A.A., & Khoshaim, A.B., & Abu-Hamdeh, N.H., & Alsaiari, A.O., & Abulhair, H. (2021). Using phase change materials (PCMs) in a hot and humid climate to reduce heat gain and energy consumption, *Sustainability*, 13(19), 10965. <https://doi.org/10.3390/su131910965>
- Baniassadi, A., & Sajadi, B., & Amidpour, M., & Noori, N. (2016). Economic optimization of PCM and insulation layer thickness in residential buildings, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 14:92-99.
- Barber, D. (2016). *A House in The Sun: Modern Architecture and Solar Energy in The Cold War*, Oxford University Press.
- Barzin, R., & Chen, J.J.J., & Young, B.R., & Farid, M.M. (2015). Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling, *Applied Energy*, 412-421.
- Bjorn, A., & Owsianiak, M., & Molin, C., & Hauschild, M.Z. (2018). *LCA History*, Springer International Publishing.
- Blankendaal, T., & Schuur, P., & Voordijk, H. (2014). Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach, *Journal of Cleaner Production*, 66, 27-36.
- Bohorquez-Ordenes, J., & Tapia-Calderon, A., & Vasco, D.A., & Estuardo-Flores, O., & Haddad, A.N. (2021). Methodology to reduce cooling energy consumption by incorporating PCM envelopes: A case study of a dwelling in Chile, *Building and Environment*, 206, 108373. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108373>
- Bribian, I.Z., & Capilla, A.V., & Uson, A.A. (2010). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco efficiency improvement potential, *Building and Environment*, 46, 1133-1140.
- Canım, D.S., & Kalfa, S.M. (2021). Faz değiştiren malzemelerin bina kabuğunda kullanımı, *Dicle University Journal of Engineering*, 12(2), 355-371.
- Cardenas-Ramirez, C., & Jaramillo, F., & Botero, M.A.G., (2020). Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials, *The Journal of Energy Storage*, 30, 101495. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101495>
- Cellat, K., & Beyhan, B., & Konuklu, Y., & DüNDAR, C., & Karahan, O., & Güngör, C., & Paksoy, H. (2020). 2 years of monitoring results from passive solar energy storage in test cabins with phase change materials, *Solar Energy*, 200, 29-36.
- CEPSA (2022). EPD dosyası, <https://www.metsims.com/> adresinden 22.05.2023'te alınmıştır.
- Chandel, S.S., & Agarwal, T. (2017). Review of current state of research on energy storage, toxicity, health hazards and commercialization of phase changing materials, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 581-596.
- Chwieduk, D. (2014). *Solar Energy in Buildings: thermal balance for efficient heating and cooling*, Academic Press, Amsterdam.
- Crawford, R.H., & Stephan, A., & Prideaux, F. (2019). Environmental Performance in Construction (EPiC) Database, *The University of Melbourne*, Melbourne.
- Cunha, S., & Leite, P., & Aguiar, J., (2020). Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials, *Journal of Energy Storage*, 30, 101439. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101439>

- Dixit, M.K. (2019). Life cycle recurrent embodied energy calculation of buildings: A review, *Journal of Cleaner Production*, 209, 731-754.
- Dixit, M.K., & Culp, C.H., & Lavy, S., & Fernandez-Solis, J. (2014). Recurrent embodied energy and its relationship with service life and life cycle energy: A review paper, *Facilities*, 32(3/4), 160-181.
- Dixit, P., & Reddy, V.J., & Parvate, S., & Balwani, A., & Singh, J., & Maiti, T.K., & Dasari, A., & Chattopadhyay, S. (2022). Salt hydrate phase change materials: Current state of art and the road ahead, *Journal of Energy Storage*, 51, 104360. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104360>
- Duan, S., & Wang, L., & Zhao, Z., & Zhang, C. (2021). Experimental study on thermal performance of an integrated PCM Trombe wall, *Renewable Energy*, 163, 1932-1941.
- Durakovic, B. (2020). *PCM-based building envelope systems: Innovative design solutions for passive design*, Springer.
- EPA (2006). Life cycle assessment: principles and practice, Scientific Applications International Corporation (SAIC), U.S.
- Evitasari, L., & Defiana, I., & Teddy, F.X., & Samodra, B. (2022). Application of PCM in Glass Facade of High-rise Apartment for Thermal Performance Improvement, *Budapest International Research in Exact Sciences Journal*, 4(3), 245-255.
- Faraj, K., & Khaled, M., & Faraj, J., & Hachem, F., & Castelain, C. (2020). Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109579. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109579>
- Gencel, O., & Yaras, A., & Hekimoğlu, G., & Ustaoglu A., & Erdogmus, E., & Sutcu M., & Sarı, A. (2022). Cement based-thermal energy storage mortar including blast furnace slag/capric acid shape-stabilized phase change material: Physical, mechanical, thermal properties and solar thermoregulation performance, *Energy and Buildings*, 258, 111849. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111849>
- Girijappa, Y.G.T., & Rangappa, S.M., & Parameswaranpillai, J.P., & Siengchin, S. (2019). Natural fibers as sustainable and renewable resources for development of eco-friendly composites: a comprehensive review, *Frontiers in Materials*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00226>
- Giro-Paloma, J., & Al-Shannaq, R., & Fernandez, A.I., & Farid, M.M. (2016). Preparation and characterization of microencapsulated phase change materials for use in building applications, *Materials*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/ma9010011>
- Grupo Industrial Crimidesa, (2022). EPD dosyası, <https://www.metsims.com/> adresinden 22.05.2023'te alınmıştır.
- Gupta, N., & Tiwari, G.N. (2016). Review of passive heating/cooling systems of buildings, *Energy Science & Engineering*, 4(5), 305-333.
- Hasan, M.I., & Basher, H.O., & Shdhan, A.O. (2018). Experimental investigation of phase change materials for insulation of residential buildings, *Sustainable Cities and Society*, 36, 42-58. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.009>
- Izquierdo-Barrientos, M.A., & Belmonte, J.F., & Rodriguez-Sanchez, D., & Molina, A.E., & Almendros-Ibanez, J.A. (2012). A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM), *Applied Thermal Engineering*, 47, 73-85.
- Kabdrakhmanova, M., & Memon, S.A., & Saurbayeva, A. (2021). Implementation of the panel data regression analysis in PCM integrated buildings located in a humid subtropical climate, *Energy*, 237, 121651. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121651>
- Kharbouch, Y., & Mimet, A., & Ganaoui, M. (2017). Thermal impact study of a bio-based wall coupled with an inner PCM layer, *Energy Procedia*, 139, 10-15.
- Kharbouch, Y., & Mimet, A., & Ganaoui, M., & Ouhsaine, L. (2018). 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. <https://doi.org/10.1080/14786451.2017.1365076>

- Kılıç Demircan, R., & Gültekin, A.B. (2017). Binalarda pasif ve aktif güneş sistemlerinin incelenmesi, *TÜBAV Bilim*, 10(1), 36-51.
- Koç, İ., & Duru, M.O., & Dinçer, S.G. (2022). Yapılarda gömülü ve kullanım enerjisi kavramlarının yaşam döngüsü değerlendirmesi (YDD) metodolojisiyle irdelenmesi, *bab Journal of FSMVU Faculty of Architecture and Design*, 3(1), 55-69.
- Kyriaki, E., & Konstantinidou, C., & Giama, E., & Papadopoulos, A.M. (2017). Life cycle analysis (LCA) and life cycle cost analysis (LCCA) of phase change materials (PCM) for thermal applications: A review, *International Journal of Energy Research*, 42(9), 3068-3077.
- Lagou, A., & Kylii, A., & Sadauskiene, J., & Fokaidis, P.A. (2019). Numerical investigation of phase change materials (PCM) optimal melting properties and position in building elements under diverse conditions, *Construction and Building Materials*, 225, 452-464.
- Leang, E., & Tittlein, P., Zalewski, L., Laussue, S. (2017). Numerical study of a composite trombe solar wall integrating microencapsulated PCM, CISBAT 2017 International Conference – Future Buildings & Districts Energy Efficiency from Nano to Urban Scale, Lausanne, İsviçre, *Energy Procedia*, 122, 1009-1014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.467>
- Lee, K.O., & Medina, M.A., & Sun, X. & Jin, X. (2018). Thermal performance of phase change materials (PCM)-enhanced cellulose insulation in passive solar residential building walls, *Solar Energy*, 163, 113–121.
- Li, X., & Shen, C., & Yu, C.W.F., (2017). Building energy efficiency: Passive technology or active technology?, *Indoor and Built Environment*, 26(6), 729-732.
- Li, Z.X., & Al-Rashed, A.A.A.A., & Rostamzadeh, M., & Kalnasi, R., & Shahsavari, A., & Afrand, M. (2019). Heat transfer reduction in buildings by embedding phase change material in multi-layer walls: Effects of repositioning, thermophysical properties and thickness of PCM, *Energy Conversion and Management*, 195, 43-56.
- Lin, Y., & Jia, Y., & Alva, G., & Fang, G. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2730-2742.
- Lin, Y., & Zhong, S., & Yang, W., & Hao, X., & Li, C. (2021). Multi-objective design optimization on building integrated photovoltaic with Trombe wall and phase change material based on life cycle cost and thermal comfort, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101277. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101277>
- Liu, L., & Peng, B., & Yue, C., & Guo, M., & Zhang, M. (2019). Low-cost, shape-stabilized fly ash composite phase change material synthesized by using a facile process for building energy efficiency, *Materials Chemistry and Physics*, 222, 87-95. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.09.072>
- Llorach-Massana, P., & Pena, J., & Rieradevall, J., & Montero, J.I. (2016). LCA & LCCA of a PCM application to control root zone temperatures of hydroponic crops in comparison with conventional root zone heating systems, *Renewable Energy*, 85, 1079-1089.
- Malmqvist, T., & Nehasilova, M., & Moncaster, A., & Birgisdottir, H., & Nygaard Rasmussen, F., & Houlihan Wiberg, A., & Potting, J. (2018). Design and construction strategies for reducing embodied impacts from buildings – Case study analysis. *Energy and Buildings*, 166, 35–47.
- Markarian, E., & Fazelpour, F. (2019). Multi-objective optimization of energy performance of a building considering different configurations and types of PCM, *Solar Energy*, 191, 481-496.
- Navarro, L., & Garcia, A., & Sole, C., & Castell, A., & Cabeza, L.F. (2012). Thermal loads inside buildings with phase change materials: Experimental results, *Energy Procedia*, 30, 342-349.
- Navarro, L., & Gracia, A., & Castell, A., & Álvarez, S., & Cabeza, L.F. (2015). PCM incorporation in a concrete core slab as a thermal storage and supply system: Proof of concept, *Energy and Buildings*, 103, 70–82.
- Nicholas, A.F., & Hussein, M.Z., & Zainal, Z., & Khadiran, T. (2018). Palm Kernel Shell Activated Carbon as an Inorganic Framework for Shape-Stabilized Phase Change Material, *Nanomaterials*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/nano8090689>

- Nie, B., & She, X., & Du, Z., & Xie C., & Li, Y., & He, Z., & Ding, Y. (2019). System performance and economic assessment of a thermal energy storage based air-conditioning unit for transport applications, *Applied Energy*, 251, 113254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.057>
- Ning, M., & Jingyu, H., & Dongmei, P., & Shengchun, L., & Mengjie, S. (2017). Investigations on thermal environment in residential buildings with PCM embedded in external wall, *9th International Conference on Applied Energy, ICAE2017*, 21-24 August 2017, Cardiff, UK, Energy Procedia, 142, 1888-1895.
- Okogeri, O., & Stathopoulos, V.N. (2021). What about greener phase change materials? A review on biobased phase change materials for thermal energy storage applications, *Int. Journal of Termofluids*, 10.
- Pfleger, N., & Bauer, T., & Martin, C., & Eck, M., & Wörner, A. (2015). Thermal energy storage – overview and specific insight into nitrate salts for sensible and latent heat storage, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6, 1487-1497.
- Qu, Y., & Zhou, D., & Xue, F., & Cui, L. (2021). Multi-factor analysis on thermal comfort and energy saving potential for PCM-integrated buildings in summer, *Energy & Buildings*, 241, 110966. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110966>
- Rasta, I.M., & Wardana, I.N.G., & Hamidi, N., & Sasongko, M.N. (2016). The Role of Soya Oil Ester in Water-Based PCM for Low Temperature Cool Energy Storage, *Journal of Thermodynamics*, 2016, 5384640. <https://doi.org/10.1155/2016/5384640>
- Rathore, P.K.S., & Shukla, S.K. (2020). An experimental evaluation of thermal behavior of the building envelope using macroencapsulated PCM for energy savings, *Renewable Energy*, 149, 1300–1313.
- Rincón, L., & Castell, A., & Pérez, G., & Solé, C., & Boer, D., & Cabeza, L.F. (2013). Evaluation of the environmental impact of experimental buildings with different constructive systems using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment, *Applied Energy*, 109, 544-552.
- Saadatian, O., & Sopian, K., & Lim, C.H., & Asim, N., & Sulaiman, M.Y. (2012). Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6340-6351.
- Sahu L.K., & Mondloe, D., & Garhewal, A. (2017). A review on thermal and mechanical properties of concrete containing phase change material, *Int. Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5), 1-12.
- Silva, T., & Vicente, R., & Amaral, C., & Figueiredo, A. (2016). Thermal performance of a window shutter containing PCM: Numerical validation and experimental analysis, *Applied Energy*, 179, 64-84.
- Struhala, K., & Ostry, M. (2022). Life-Cycle Assessment of phase-change materials in buildings: A review, *Journal of Cleaner Production*, 336, 130359. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130359>
- Talu, F., & Mert, M.S., & Mert, H.H. (2023). Gizli Isıl Enerji Depolama Sistemleri: Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanıldığı Aktif ve Pasif Sistem Uygulamaları, *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 531-547.
- Thapa, S., & Panda, G.K. (2015). Energy conservation in buildings – a review, *International Journal of Energy Engineering*, 5(4), 95-112.
- URL-1. <https://group.met.com/> adresinden 01.05.2023'te alınmıştır.
- URL-2. <https://phasechange.com/biopcm/> adresinden 19.05.2023'te alınmıştır.
- URL-3. <https://infiniterpem.com/the-product> adresinden 19.05.2023'te alınmıştır.
- URL-4. <https://www.rubitherm.eu/en/productcategory/> adresinden 19.05.2023'te alınmıştır.
- URL-5. <http://www.edsl.myzen.co.uk/downloads/misc/DuPont%20ENERGAIN%28r%29%20PCM%20Guidebook%20December%202010.pdf> adresinden 08.06.2023'te alınmıştır.
- URL-6. <https://www.architectureanddesign.com.au/projects/2016/green-building-project/knauf-comfortboard-by-knauf> adresinden 08.06.2023'te alınmıştır.
- URL-7. <https://www.coralinnovative.com/pcm-detay> adresinden 20.10.2023'te alınmıştır.

- Vega, M., & Llantoy, N., & Chafer, M., & Ushak, S., & Cabeza, L. (2022). Life cycle assessment of the inclusion of phase change materials in lightweight buildings, *Journal of Energy Storage*, 56, 105903. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105903>
- Vukotic, L., & Fenner, R., & Symons, K. (2010). Assessing embodied energy of building structural elements, *Engineering Sustainability*, 163(3), 147-158.
- Wang, S., & Matiasovsky, P., & Mihalka, P., & Lai, C. (2018). Experimental investigation of the daily thermal performance of a mPCM honeycomb wallboard, *Energy and Buildings*, 159, 419-425.
- Wi, S., & Chang, S.J., & Kim, S. (2020). Improvement of thermal inertia effect in buildings using shape stabilized PCM wallboard based on the enthalpy-temperature function, *Sustainable Cities and Society*, 56, 102067. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102067>
- Winans, K., & Kendall, A., & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy, concept, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 825-833.
- Wu, D., & Rahim, M., & El Ganaoui, M., & Bennacer, R., & Djedjig, R., & Liu, B. (2022). Dynamic hygrothermal behavior and energy performance analysis of a novel multilayer building envelope based on PCM and hemp concrete, *Materials*, 341, 127739. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127739>
- Xiong, Q., & Alshehri, H.M., & Monfaredi, R., & Tayebi, T., & Majdoub, F., & Hajjar, A., & Delpisheh, M., Izadi, M. (2022). Application of phase change material in improving trombe wall efficiency: An up-to-date and comprehensive overview, *Energy & Buildings*, 258, 111824. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111824>
- Yan, H., & Shen, Q., & Fan, L.C.H., & Wang, Y., & Zhang, L., (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of one Peking in Hong Kong, *Building and Environment*, 45, 949-955.
- Yao, C., & Kong, X., & Li, Y., & Du, Y., & Qi, C. (2018). Numerical and experimental research of cold storage for a novel expanded perlite-based shape-stabilized phase change material wallboard used in building, *Energy Conversion and Management*, 155, 20-31.
- Yousef, M.S., & Hassan, H. (2020). Energy payback time, exergoeconomic and enviroeconomic analyses of using thermal energy storage system with a solar desalination system: An experimental study, *Journal of Cleaner Production*, 270, 122082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122082>
- Yousef, M.S., & Sharaf, M., & Huzayyin, A.S. (2022). Energy, exergy, economic, and enviroeconomic assessment of a photovoltaic module incorporated with a paraffin-metal foam composite: An experimental study, *Energy*, 238, 121807. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121807>
- Yousefi, A., & Tang, W., & Khavarian, M., & Fang, C. (2021). Development of novel form-stable phase change material (PCM) composite using recycled expanded glass for thermal energy storage in cementitious composite, *Renewable Energy*, 175, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.123>
- Zhang, Y., & Lin, K.P., & Yang, R., & Di, H.F., & Jiang, Y. (2006). Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings, *Energy and Buildings*, 38(10), 1262-1269.