

Yapı Malzemelerinde PCM Kullanımının Binaların Isıl Özelliklerine Etkisi

Fatih Selim BAYRAKTAR^{1*}, Ramazan KÖSE²

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Simav Teknoloji Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye

Geliş: 01.05.2024, Kabul: 14.06.2024, Yayınlanma: 30.06.2024

ÖZ

Enerji, modern yaşamın temel itici güçlerinden biridir ve insan hayatında hayati bir öneme sahiptir. Gelişmiş toplumlarda, enerjinin etkin ve verimli kullanımı bireylerin konforunu artırırken, özellikle fosil yakıtlara dayalı enerji üretiminin çevresel etkilerini azaltmaktadır. Bu bağlamda, binalarda enerji tasarrufu büyük bir önem taşımaktadır; çünkü yapıların enerji tüketimi toplam enerji kullanımının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Yapı malzemelerinde faz değiştiren malzeme (FDM) kullanımı, binaların termal performansını artırmak için etkili bir yol olarak öne çıkmaktadır. FDM'ler, faz değişimi sırasında ısıyı emer ve/veya salarlar, böylece iç mekân sıcaklığını dengeleyerek klima gibi iklimlendirme sistemlerinin enerji tüketimini azaltmaktadır ve bina içinde daha istikrarlı bir ısıl ortam sağlamaktadır. Bu da hem enerji maliyetlerinde tasarruf sağlamak hem de çevresel etkileri azaltmaktadır, böylece sürdürülebilir bir yaşam alanı oluşturmaktadır. Bu makalede binalarda FDM kullanımı konusunda çalışılarak son 3 yılda gerçekleştirilen FDM katkılanmış duvar harç malzemelerinin binaların ısıl özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar faz değiştiren malzeme kullanımının umut verici çıktılar oluşturduğunu yansıtmakta ve yapıların ısıl özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Binalarda enerji analizi; Faz değiştiren malzeme; Harç; Isıl performans.

The Effect of PCM Utilization on the Thermal Properties of Buildings in Construction Materials

ABSTRACT

Energy stands as one of the fundamental driving forces in modern life, bearing critical significance in human existence. In advanced societies, the efficient and effective utilization of energy enhances individual comfort while notably mitigating the environmental impacts, particularly those stemming from fossil fuel-based energy production. In this context, energy conservation in buildings holds paramount importance, given that the energy consumption of structures constitutes a significant portion of total energy usage. The utilization of phase change materials (PCMs) in building materials emerges as an effective approach to enhance the thermal performance of buildings. PCMs absorb and/or release heat during phase transitions, thereby stabilizing indoor temperatures and reducing the energy consumption of climate control systems such as air conditioning, thus fostering a more stable thermal environment within the building. This not only facilitates savings in energy costs but also mitigates environmental impacts, thereby fostering the creation of sustainable living spaces. This article explores the use of PCMs in buildings, focusing on the investigation of the effects of PCM-enhanced wall mortar materials on the thermal properties of buildings over the past three years. The results reflect promising outcomes of PCM utilization, indicating improvements in the thermal properties of structures.

Keywords: Energy analysis in buildings; Phase change materials; Mortar; Thermal performance.

1. GİRİŞ

Enerjinin insanoğlunun hayatındaki önemi artan hayat standartları ve ekonomik ilerlemelerin etkisiyle özellikle son dönemde oldukça artmıştır. Enerji talebindeki artışın karşılanması konusu ülkelerin çözmesi gereken önemli bir sorundur. Enerji arzının güvenliği ve enerji bağımsızlığı için yerli ve yenilenebilir kaynaklardan enerji temini kadar enerjinin verimli kullanılması ve enerji tasarrufu konuları da önemlidir. Enerji tasarrufu, kullanıcıların hayat kalitesini düşürmeden tükettikleri enerji miktarında düşüş yapılmasıdır. Binalarda enerji tasarrufu yöntemlerinden biri de enerji depolama sistemleridir. Mekanik, kimyasal ve ısııl enerji depolama sistemleri enerji depolama sistemleri içinde en öne çıkan örneklerdir. Isıl enerji depolama sistemleri, gizli ve duyulur ısı depolama olmak üzere iki ana başlıkta toplanmaktadır. Bu çalışmanın da konusu olan gizli ısı depolama sistemleri, belli sıcaklık aralığında faz değiştiren malzemenin ısıyı depoladığı ve daha sonra ihtiyaç halinde kullanıcıların hizmetine verdiği sistemlerdir.

Çalışmalarda FDM katkısının ısııl kapasiteyi artırması ve ısııl iletkenliği azaltması beklenmektedir. Isıl kapasitenin artışı ani ısııl dalgalanmalarını azaltmakta, ısııtma-soğutma yüklerini düşürmekte ve zaman gecikmesine yol açmaktadır. Zaman gecikmesi, elektrik ihtiyacının olması gereken zamandan daha ileriye ötelendiği durumları ifade etmektedir. Üç zamanlı elektrik sistemlerinde elektrik ihtiyacının elektrik fiyatının en yüksek olduğu zaman diliminden daha düşük olan zaman dilimlerine kaydırılması hem pik yük talebini azaltmakta hem de elektrik faturasını düşürmektedir. Isıl iletkenliğin azaltılması ile binanın ısııl kütlesi artmakta ve bunun sonucunda dış ortamın olumsuz ısııl etkileri iç ortam konforuna daha az sirayet edebilmektedir. Isıl kütle, binanın ısııl tutma ve ısııl transferini engelleme özelliğidir. Eski zamanlarda taş binaların yazın daha soğuk, kışın daha sıcak olduğu aktarılmaktadır. Bunun sebebi yapının dış ortam koşullarından daha az etkilenmesi ve sıcaklık dalgalanmalarını tolere edebilmesinden kaynaklanmaktadır. Binalarda faz değiştiren malzemelerin modern anlamda kullanımı ilk olarak 1940'lı yılların sonunda bir binanın güneş enerjisi ile pasif olarak ısııtılması çalışması ile Dr. Maria Telkes ve mimar arkadaşı Eleanor Raymond tarafından gerçekleştirilmiştir (Telkes ve Raymond, 1949). Macar kökenli Telkes 1920'li yıllardan beri güneş enerjisinin bina ısııtımda kullanılabilme ihtimalini incelemekteydi. Massachusetts'te bulunan Dover evi isimli yapıda faz değiştiren malzeme olarak Glauber Tuzunu kullanan araştırmacılar sistemin havanın kapalı olduğu on bir gün boyunca evin sıcaklığını koruduğunu gözlemiştir. Özellikle 1980 ve sonrasında daha da önem kazanan bu konu birçok çalışmada tercih edilmiştir.

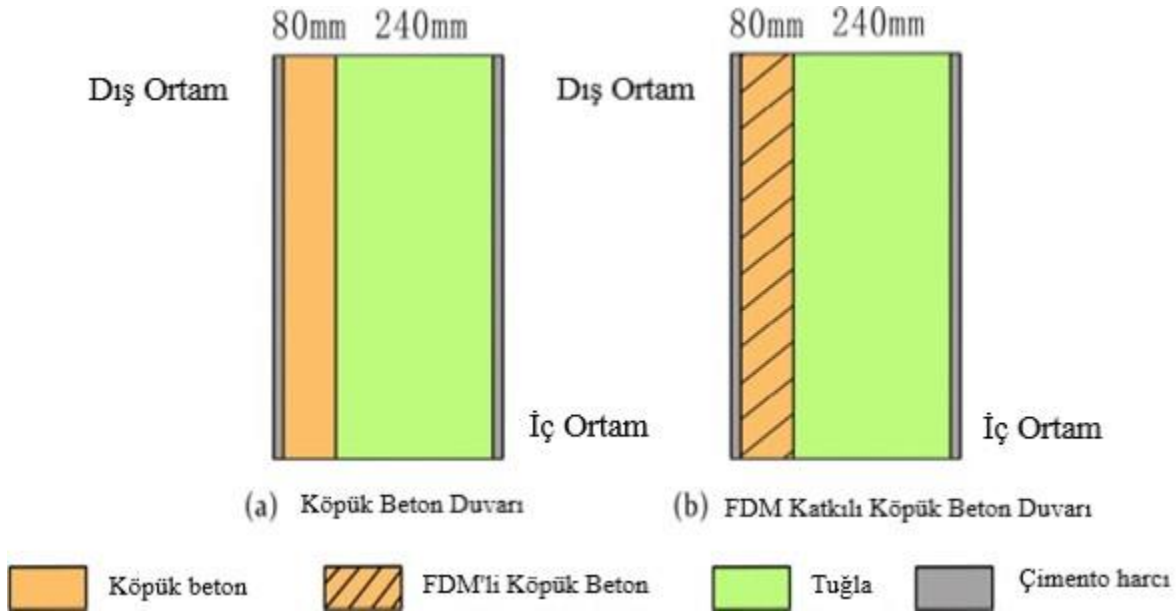
Bu çalışmada en önemli yapı bileşenlerinden biri olan harçta faz değiştiren malzeme kullanımının binaların ısııl özelliklerine etkisi üzerine son üç yılda yapılan araştırmalar incelenmiştir. Prof. Dr. Ali Şimşek'in 2018 yılında yazdığı kitap bölümünde aktardığı derin alan yazın (literatür) taraması modelinde güncel doğrudan kaynaklara önem verilmesi gerekliliği göz önüne alınarak tarama yılları 3 sene ile sınırlandırılmıştır. Faz değiştiren malzemeler bu çalışmada FDM olarak kısaltılacaktır. Literatürde baskın şekilde bulunan İngilizce

kaynakların kullandığı PCM kısaltması ise literatüre uyumluluk düşünülerek başlıkta değiştirilmeden bırakılmıştır.

2. FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN HARÇ KARIŞIMINDA KULLANILMASI ÜZERİNE ÇALIŞMALAR

Bu başlıkta faz değiştiren malzeme içeren harç karışımlarının kullanıldığı ve ısıl özelliklerin araştırıldığı deneysel çalışmalar 2021-2024 yılları arasında alfabetik ve yıllara göre sıralanarak okuyucuya aktarılmıştır. Lakshan vd. çalışmalarında (2021) FDM katkılı harcın kullanıldığı duvar panellerinin ısıl özelliklerini araştırmıştır. Sonuçlara göre FDM eklenmesi sonucu harcın ısıl iletkenliği %8,62 oranında düşürülmüştür. Salgueiro vd. yaptıkları çalışmada (2021) FDM katkılı kilin harç malzemesi olarak kullanımının binalarda iç ortam sıcaklık düzenlemesine etkisi araştırılmıştır. Oluşturulan malzeme FDM katkısı ile ısıl iletkenlikte %24 düşüş, özgül ısı kapasitesinde ise %17 artış sağlamıştır.

Gencil ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmada (2022) cam elyafı ile güçlendirilmiş alçı kompozitine mikrokapsüllenmiş FDM eklenmesi ile üretilen güncel bir ısıl enerji depolama malzemesinin binaların ısıl özelliklerine etkisi incelenmiştir. FDM katkısı ısıl iletkenliği %5 düşürürken binanın ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmada başarılı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 1: Çimento ve PCM katkılı çimento duvarların tasarımları (Li vd., 2022).

Li vd. çalışmalarında (2022) Çin'in 5 farklı iklim bölgesindeki binaların duvarlarında FDM katkılı köpük beton kullanımını ısı ve ekonomik performans açısından araştırmıştır. Şekil 1'de araştırmacıların deneylerde kullandıkları tasarımlar gösterilmiştir. FDM kullanımını tüm iklim bölgelerinde iç ve dış sıcaklık arasındaki farkı dengelemiştir. Enerji tasarrufu maksimum olarak %37,2 değerine ulaşmıştır.

Ryms vd. yaptıkları çalışmada (2022) kullanılmış lastiklerden elde edilen yanma sonucu cürufa faz değiştiren malzeme ekleyerek bir çimento kompoziti oluşturmuş ve ısı performansını analiz etmiştir. Sonuçlar incelendiğinde üretilen FDM'li çimentonun ısı enerji depolama kapasitesi yanma sonu cürufuna göre %11 daha yüksek olmuştur.

Al-Yasiri ve Szabo çalışmalarında (2023) çok sıcak iklim şartlarında enerji tasarrufu ve karbon salımını azaltma amacıyla bina dış yüzeylerinde FDM katkılı malzeme kullanımını deneysel olarak incelemiştir. Maksimum ısı yük %8,71 oranında düşürülmüştür. Ayrıca CO₂ salımında azalma ise 1,35 kg/gün olarak gerçekleşmiştir.

Anter vd. yaptıkları çalışmada (2023) faz değiştiren malzemelerin bina duvarlarında kullanılması ile enerji tasarrufu ve binaların ısı performansı analiz edilmiştir. 6 farklı FDM ve 6 farklı FDM kalınlığının kullanıldığı deneylerde iç ve dış yüzeyde 1,5 cm kalınlığında 35°C erime sıcaklığına sahip FDM en iyi sonuçları vermiş ve toplam enerji kazancında %66 düşüş sağlanmıştır.

Cunha, Castro ve Aguiar'ın gerçekleştirdikleri çalışmada (2023) faz değiştiren malzeme katkılı alçı taşı bazlı harcın binalarda etkisi araştırılmıştır. %0, 5, 10 ve 20 oranında FDM katkılarının incelendiği çalışmada ilkbahar ve yaz aylarında deneyler yapılmıştır. Sonuçlara göre yaz aylarında binanın elektrik tüketimindeki azalış %17 olarak gerçekleşirken ilkbahar döneminde bu oran %59 olmuştur.

Frahat vd. çalışmalarında (2023) binalarda enerji tasarrufu sağlamak adına mikrokapsüllenmiş FDM katkılı sürdürülebilir çimento harcı tasarlamıştır. Sonuçlara göre FDM katkısı arttıkça ısı iletkenlik azalmakta ve bunun sonucunda ısı transferi de %18,3'e varan seviyelerde düşmektedir. Ayrıca yaşanan zaman kayması ile pik zamanlarda elektrik yüklerinde düşüşler sağlanmaktadır.

Izadi ve çalışma arkadaşlarının yaptıkları çalışmada (2023) ticari tuğlaların boşluklarına makrokapsüllenmiş FDM ekleyerek oluşturduğu sığınak duvarının ısı performansını araştırmıştır. 3 farklı FDM'nin kullanıldığı çalışmada farklı tuğla çeşitlerinin kullanımı ile oluşturulan kombinasyonların denenmesi sonucu 22°C erime sıcaklığına sahip FDM'nin kullanıldığı sistemdeki ortalama ısı akısı 24 saatlik süreçte normal tuğlaya göre %66,79 düşürülmüştür.

Jiang vd. gerçekleştirdikleri çalışmada (2023) agrega fırın cürufuna parafin-titanyum katkısı ile hazırlanan harcın hazırlanması ve performans analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre FDM katkısının en yüksek

olduğu durumda ısı iletkenlik %52,5 oranında düşmektedir. Ayrıca ısı enerji depolanması ile iç ortam sıcaklık dalgalanmaları azaltılmakta ve enerji tüketiminde düşüşler sağlanmaktadır.

Lu vd. çalışmalarında (2023) solar hava ısıtıcı ile havalandırılmalı FDM katkılı duvarı bir araya getirerek yeni bir tasarım geliştirmiş ve sistemin ısı performansını araştırmıştır. Sonuçlar incelendiğinde en uygun çalışma şartlarında (35-45°C hava sıcaklığı ve 3-4m/s hava hızı) maksimum ısı enerji depolama verimliliği %87,6'ya ulaşmıştır. Kış şartlarında yapılan deneylerde FDM'li odanın sıcaklığı FDM'siz olana göre 6,3-10°C arasında daha yüksek kalmış ve ısı konfor şartlarına daha uygun değerler sunmuştur.

Ma ve çalışma arkadaşlarının yaptıkları çalışmada (2023) çok soğuk bölgelerde FDM-silika aerjel yapısını kış bahçesinde kullanarak kırsal alandaki bir konutun enerji performansını analiz etmiştir. Referans kış bahçesi ve FDM katkılı duvara sahip kış bahçesinin karşılaştırıldığı çalışma sonucunda ısıtmadaki enerji tüketimi %14 oranında azaltılmıştır.

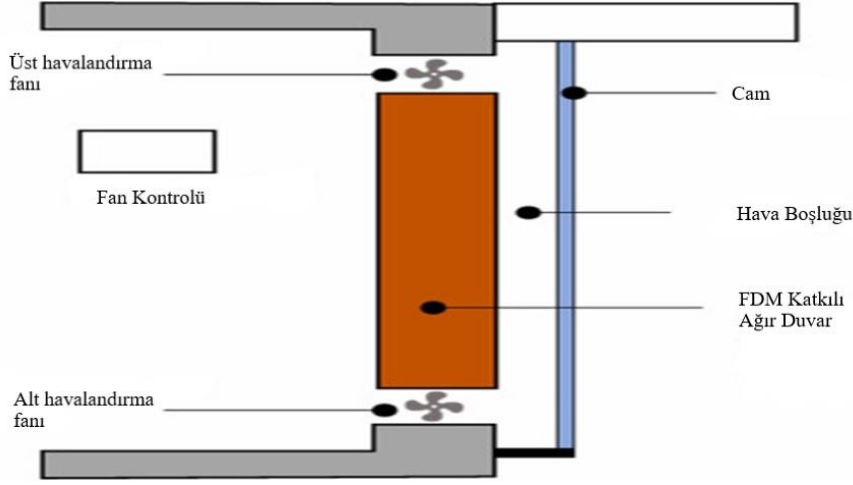
Nandy vd. çalışmalarında (2023) FDM'yi poliüretan köpüğe ekleyerek oluşturdukları paneli kullanarak ısı transferi ve enerji modelleme konusunda araştırma yapmıştır. Deney sonuçları, FDM kullanımının yıllık elektrik tüketimini %15-20 aralığında düşürdüğünü göstermiştir.

Ong vd. gerçekleştirdikleri çalışmada (2023) faz değiştiren malzemelerin ısı yalıtım malzemeleri ile entegre edilmesinin pasif binalar konseptine göre tropik iklimdeki binaların soğutma yüküne etkisini incelemiştir. Yüzey sıcaklığındaki düşüş 3,2°C olarak gerçekleşirken iç ortam sıcaklığındaki düşüş 5-7°C'ler bandında olmuştur.

Sarcinella ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (2023) polietilen glikol bazlı FDM'nin eklendiği harcın binalarda enerji verimliliği için kullanılmasını ısı özellikler açısından araştırmıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde soğutma yükünde düşüş %8 ve ısıtma yükünde düşüş %13 olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca soğutma masrafında yaz aylarında %8, ilkbahar ve sonbahar aylarında ise %12 düşüşler sağlanmıştır.

Tamer vd. çalışmalarında (2023) FDM duvar levhasını gece havalandırması tekniği ile birleştirilerek ofis binalarının aşırı ısınma riski ve enerji verimliliği özelliklerini iklim değişikliği etkilerini de göz önünde bulundurarak incelemiştir. 2020 ve 2050 yılları için hazırlanan senaryolarda PCM19 ve PCM25 isimli iki farklı faz değiştiren malzeme ısıtma ve soğutma yüklerini azaltma amacıyla kullanılmıştır. Sadece FDM'lerin kullanıldığı deneylerde PCM19 2020 yılı için %5-7,4 arasında ısıtma talebini azaltırken 2050 yılı için %7,8-9,2 arasında düşüş hesaplanmıştır. PCM25'in performansı ise 2020 yılında %1,9-4,3 arasında düşüş sağlarken 2050 yılı için %0,7-2,4 arasında olması beklenmektedir. Sadece gece havalandırması yapıldığında soğutma yükü 2020'de %23,2-25,7 arasında azalırken 2050'de %13,9-15,7 arasında düşüş gözlenmiştir. PCM25 ile gece havalandırması bir arada kullanıldığında ise 2020 yılında %29,4-30,6 arasında düşüş sağlanırken 2050 yılı için %16,6-17,5 azalma hesaplanmıştır.

Xiao ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2023) Şekil 2’de de görüldüğü üzere FDM katkıli Trombe duvarı sisteminin Çin’de sıcak yaz ve soğuk kış iklimine sahip bir binada kullanımının enerji verimliliğini optimize etme potansiyelini incelemiştir. FDM eklenmesinin ısıtma sezonunda enerji talebini %71,53 oranında azalttığı ve ısıl konforu arttırdığı ölçülmüştür.



Şekil 2: FDM katkıli Trombe duvar sistemi tasarımı (Xiao vd., 2023).

Cesari vd. gerçekleştirdikleri çalışmada (2024) alttan ısıtma sisteminde dama tahtası deseninde iki farklı FDM kullanarak ısıtma ve soğutma uygulamalarının etkilerini gerçek boyutlarda bir sistemde gözlemlemiştir. Kış aylarında ısıtma enerjisi talebinde %13 azalma sağlanırken elektrikli iklimlendirme cihazlarının günlük kullanım süreleri %70 düşürülmüştür.



Şekil 3: FDM katkıli tuğlaların üretimi aşaması (Li vd., 2024).

Li, Xu ve Zhang yaptıkları çalışmada (2024) Şekil 3'te gösterildiği gibi FDM'yi çimento cürufuna ekleyerek alttan ısıtma sistemi için %0 ile 15 arasında çeşitli oranlarda harçlar oluşturmuş, bu harçların ısı ve mekanik özelliklerini deneysel olarak analiz edilmiştir. Sonuçlara göre her %1'lik FDM eklenmesinde ısı iletkenlik %9 düşmektedir.

Pirasaci ve Sunol yaptıkları çalışmada (2024) FDM-kompozit agrega uygulamasının Türkiye'de bina ısı performansını açısından incelenmesini gerçekleştirmiştir. Sonuçlara göre FDM katkılı harcın Erzurum'da ısıtma yükünü %0,22 azalttığı, İzmir'de ise soğutma yükünü %1,7 azalttığı hesaplanmıştır. Böylece FDM katkılı agrega harcın Türkiye'de farklı iklim koşullarında enerji tasarrufu sağlayabildiği anlaşılmıştır.

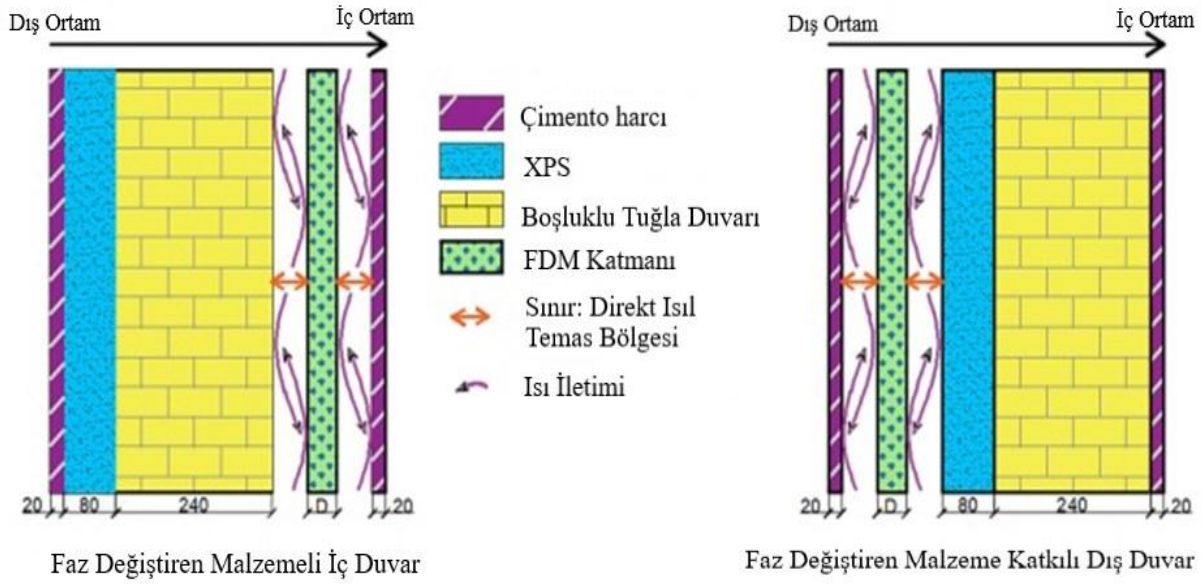
Sarı ve çalışma arkadaşları çalışmalarında (2024) enerji etkin binalarda kullanılmak üzere doğal zeolite dodesil alkol katkılayarak şekil stabileli kompozit FDM oluşturarak yeni bir çimento harcı meydana geliştirmiştir. Pik iç ortam sıcaklığında %10'a varan düşüşler sağlanırken 3 saatlik bir zaman gecikmesi de yaşanmıştır.

Taj ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmada (2024) kil tuğlaya ötektik FDM eklenmesinin binaların dış yüzeylerinde ısı performans yönetimine etkisini deneysel çalışma ile incelemiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde iç sıcaklıkta 4-5,5°C düşüş sağlanmasını müteakip sıcaklık dalgalanmalarının yaklaşık %32 azaldığı ölçülmüştür. Ayrıca toplam ısı akısındaki düşüş %25-30 bandında gerçekleşmiştir.

Topçu vd. çalışmalarında (2024) sepiolit bazlı şekil stabileli FDM katkılı yenilikçi bir çimento harcı geliştirerek binaların ısı kontrolünü sağlamayı hedeflemiştir. Gerçek zamanlı ısı deneylerinin sonuçlarına göre FDM katkılı harç faz değiştiren malzemenin ısı soğurma ve depolama kapasitesini kullanarak iç ortam sıcaklığını dengelemeyi başarabilmiştir. İç yüzeye yakın bölge ile odanın merkezi arasındaki sıcaklık farkı normal sistemden 1,93°C daha düşük gerçekleşirken maksimum sıcaklık farkı 3,34°C olmuştur.

Vargas vd. yaptıkları çalışmada (2024) ağırlıkça %10-20 oranda mikrokapsüllenmiş parafin bazlı FDM'li çimento harcının enerji depolamasına etkisini deneysel olarak araştırmıştır. Sonuçlara göre FDM oranı arttıkça ısıtma ve soğutma yükleri azalmaktadır. Ayrıca çevre sıcaklığına maruz kalan ile maruz kalmayan duvarlar arasındaki sıcaklık farkları artmaktadır. Faz değişim sıcaklığına yakın sıcaklıklarda FDM'ler daha verimli çalışmaktadır. Faz değişim sıcaklığından 5°C farklı aralıklarda çalışan FDM'ler çimento harcının toplam enerji depolanmasını %238-330 arasında artırırken 15°C farklı aralıklarda bu oranlar %70-88 arasında artmaktadır.

Wang vd. çalışmalarında (2024a) Çin'in soğuk bir bölgesinde ofis binalarında kullanılmak üzere üretilen FDM katkılı harcın pasif tasarım ve iklim etkileri açısından analizini gerçekleştirmiştir. Araştırmacıların tasarımları Şekil 4'te aktarılmıştır. Sonuçlara göre enerji tasarrufu herhangi bir ek CO₂ salımı gerçekleştirilmeden %13'ten fazla olmuştur.



Şekil 4: Faz değıştiren malzeme katkılı duvarın yapısal şeması (Wang vd., 2024a).

Wang ve çalışma arkadaşlarının 2024 yılında gerçekleştirdikleri bir diğer çalışmada perlit bazlı çimento harcına FDM olarak kaprik-stearik asit karışımı eklenerek ısıl enerji depolama özelliğine sahip yeni bir yapı malzemesi üretilmiştir. Üretilen malzemenin özgül ısıl kapasitesi normal harca göre %142,68 artarken ısıl iletkenliği %62,35 azalmıştır.

Wang vd. yaptıkları çalışmada (2024c) uçucu küle parafin bazlı FDM ekleyerek alttan ısıtma sistemlerinde enerji depolamayı hedeflemiştir. Üretilen harç ile ısıl iletkenlikte %15,8 düşüş, özgül ısıl kapasitesinde ise %53,5 artış sağlanmıştır. Ayrıca sıcaklık dalgalanmaları düşürülürken konforlu sıcaklık süresi de artırılabilmiştir.

3. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Literatür araması sonucu konuyla ilgili 28 çalışma tespit edilerek okuyuculara aktarılmıştır. Söz konusu çalışmalardan alınan sonuçlar derlendiğinde;

- 3 farklı çalışmanın ortalamasına göre (Salgueiro vd., 2021; Wang vd., 2024b ve Wang vd., 2024c) FDM'nin özgül ısıl kapasitesini %71,1 artırdığı,
- 7 çalışmanın ortalamasına göre (Lakshan vd., 2021; Salgueiro vd., 2021; Gencel vd., 2022; Jiang vd., 2023; Li vd., 2024; Wang vd., 2024b ve Wang vd., 2024c) ısıl iletkenliği %25,3 azalttığı,
- 3 farklı çalışmanın sonuçlarına göre (Ryms vd., 2022; Al-Yasiri vd., 2023 ve Vargas vd., 2024) ısıl kapasiteyi % 105,1 artırdığı,

- 7 çalışmanın sonuçlarına göre (Anter vd., 2023; Frahat vd., 2023; Izadi vd., 2023; Sarcinella vd., 2023; Tamer vd., 2023; Pırasacı vd., 2024 ve Taj vd., 2024) ısı kazancını ortalama olarak %25,7 azalttığı ve
- 8 farklı çalışmaya göre (Li vd., 2022; Cunha vd., 2023; Ma vd., 2023; Nandy vd., 2023; Tamer vd., 2023; Xiao vd., 2023; Cesari vd., 2024 ve Wang vd., 2024a) %25,2 enerji tasarrufu sağladığı hesaplanmıştır.

Özetle faz değiştiren malzemeler, binaların ısı özelliklerini iyileştirerek enerji talebini azaltmakta ve elektrik sarfiyatını düşürerek olumlu çıktılar üretmektedir.

Faz değiştiren malzemelerin yapı malzemelerinden harçta kullanılması sonucu elde edilen pozitif veriler gelecek çalışmalar için teşvik edici niteliktedir. Araştırmacıların sonraki çalışmalarda harç dışındaki diğer yapı malzemelerinde faz değiştiren malzeme kullanılmasının ısı özelliklerine etkilerini incelemeleri ile literatürü geliştirmek adına önemli adımlar atılmış olacaktır. Ayrıca FDM katkılı yapı malzemelerinin farklı yapı bileşenlerinde etkisinin araştırılması ve bu etkilerin karşılaştırılması da binalarda FDM'lerin etkisi konusunda diğer araştırmacılara ışık tutacaktır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

YAZARLARIN KATKILARI

F.S.B.: Kavramsallaştırma, yöntem, araştırma, kaynaklar, yazı yazma - orijinal taslak hazırlama.

R.K.: Yöntem, doğrulama, kaynaklar, gözden geçirme ve düzenleme.

KAYNAKLAR

- Al-Yasiri, Q. & Szabo, M. (2023). Experimental study of PCM-enhanced building envelope towards energy-saving and decarbonisation in a severe hot climate. *Energy & Buildings*, 279, 112680. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112680>
- Anter, A. G., Sultan, A. A., Hegazi, A. A. & El Bouz, M. A. (2023). Thermal performance and energy saving using phase change materials (PCM) integrated in building walls. *Journal of Energy Storage*, 67, 107568. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107568>
- Cesari, S., Baccaga, E., Emmi, G. & Bottarelli, M. (2024). Enhancement of a radiant floor with a checkerboard pattern of two PCMs for heating and cooling: Results of a real-scale monitoring campaign. *Applied Thermal Engineering*, 246, 122887. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122887>
- Cunha, S., Castro, J. & Aguiar, J. B. (2023). Impact of gypsum mortars functionalized with phase change materials in buildings. *Journal of Energy Storage*, 72, 108608. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108608>
- Frahat, N. B., Amin, M., Heniegall, A. M. & Ibrahim, O. M. O. (2023). Optimizing microencapsulated PCM ratios of sustainable cement mortar for energy savings in buildings. *Construction and Building Materials*, 391, 11844. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131844>
- Gencil, O., Hekimoglu, G., Sarı, A., Ustaoglu, A., Subasi, S., Marasli, M., Erdogmus, E. & Memon, S. A. (2022). Glass fiber reinforced gypsum composites with microencapsulated PCM as novel building thermal energy

- storage material. *Construction and Building Materials*, 340, 127788. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127788>
- Izadi, M., Taghavi, S. F., Safavi, S. H. N., Afsharpanah, F. & Yaici, W. (2023). Thermal management of shelter building walls by PCM macro-encapsulation in commercial hollow bricks. *Case Studies in Thermal Engineering*, 47, 103081. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103081>
- Jiang, J., Lei, L., Jin, C., Liu, T., Huang, J., Wu, Y., Lv, S., Lu, Z., Zheng, L. & Li, J. (2023). Preparation, microstructure, performance and mortar application of paraffin/titanium-bearing blast furnace slag phase change aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02262. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02262>
- Lakshan, R. R., Rosini, A. M., Sathiyam, K., Gangadharan, D., Sathyan, D. & Mini, K. M. (2021). Study on thermal insulating properties of PCM incorporated wall panels. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5118-5122. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.501>
- Li, Q., Ju, Z., Wang, Z., Ma, L., Jiang, W., Li, D. & Jia, J. (2022). Thermal performance and economy of PCM foamed cement walls for buildings in different climate zones. *Energy & Buildings*, 277, 112470. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112470>
- Li, G., Xu, G. & Zhang, J. (2024). Experimental investigation of thermal and mechanical characteristics of slag cement mortars with PCM for radiant floors. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02958. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02958>
- Lu, S., Zheng, J., Wang, R. & Zhu, J. (2023). Thermal performance research on a novel coupled heating system combined solar air heater with ventilation PCM wall. *Solar Energy*, 265, 112100. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112100>
- Ma, L., Luo, D., Hu, H., Li, Q., Yang, R., Zhang, S. & Li, D. (2023). Energy performance of a rural residential building with PCM-silica aerogel sunspace in severe cold regions. *Energy & Buildings*, 280, 112719. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112719>
- Nandy, A., Houl, Y., Zhao, W. & D'Souza, N. A. (2023). Thermal heat transfer and energy modeling through incorporation of phase change materials (PCMs) into polyurethane foam. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113410. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113410>
- Ong, P. J., Lum, Y. Y., Soo, X. Y. D., Wang, S., Wang, P., Chi, D., Liu, H., Kai, D., Lee, C. L. K., Yan, Q., Xu, J., Loh, X. J. & Zhu, Q. (2023). Integration of phase change material and thermal insulation material as a passive strategy for building cooling in the tropics. *Construction and Building Materials*, 386, 131583. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131583>
- Pirasaci, T. & Sunol, A. (2024). Potential of phase change materials (PCM) for building thermal performance enhancement: PCM-composite aggregate application throughout Turkey. *Energy*, 292, 130589. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130589>
- Ryms, M., Januszewicz, K., Haustein, E., Kazimierski, P. & Lewandowski, W. M. (2022). Thermal properties of a cement composite containing phase change materials (PCMs) with post-pyrolytic char obtained from spent tyres as a carrier. *Energy*, 239, 121936. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121936>
- Salgueiro, T., Samagaio, A., Gonçalves, M., Figueiredo, A., Labrincha, J. & Silva, L. (2021). Incorporation of phase change materials in an expanded clay containing mortar for indoor thermal regulation of buildings. *Journal of Energy Storage*, 36, 102385. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102385>
- Sarcinella, A., de Aguiar, J. L. B., Jesus, C. & Frigione, M. (2023). Thermal properties of PEG-based form-stable Phase Change Materials (PCMs) incorporated in mortars for energy efficiency of buildings. *Journal of Energy Storage*, 67, 107545. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107545>
- Sarı, A., Nas, M., Yeşilata, B., Ustaoglu, A., Erdoğmuş, E., Torlaklı, H., Hekimoğlu, G. & Gencel, O. (2024). A novel cement mortar comprising natural zeolite/dodecyl alcohol shape stable composite phase change material for energy effective buildings. *Journal of Energy Storage*, 87, 111266. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111266>
- Şimşek, A. (2018). Alanyazın taraması. Ali ŞİMŞEK (Ed.), *Sosyal Bilimlerde Araştırma Yöntemleri* (s. 52-79) Eskişehir: T.C. Anadolu Üniversitesi Yayınevi.
- Taj, S. A., Khalid, W., Nazir, H., Khan, A., Sajid, M., Waqas, A., Hussain, A., Ali, M. & Zaki, S. A. (2024). Experimental investigation of eutectic PCM incorporated clay brick for thermal management of building envelope. *Journal of Energy Storage*, 84, 110838. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110838>
- Tamer, T., Dino, I. G., Baker, D. K. & Akgül, C. M. (2023). Coupling PCM wallboard utilization with night Ventilation: Energy efficiency and overheating risk in office buildings under climate change impact. *Energy & Buildings*, 298, 113482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113482>
- Telkes, M. & Raymond, E. (1949). Storing solar heat in chemicals – a report on the Dover house. *Heating and*

- Ventilating*, 49, 80-86. <https://www.osti.gov/biblio/5118227>
- Topçu, İ. B., Bayram, M., Ustaoglu, A., Hekimoğlu, G., Erdoğan, E., Sarı, A., Gencil, O. & Ozbakkaloglu, T. (2024). Innovative cementitious mortar incorporated with sepiolite based shape-stable phase change material for thermal controlling of buildings. *Construction and Building Materials*, 426, 136124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136124>
- Vargas, V. Z., Claros-Marfil, L. J., Sandoval, G. F. B., Rojas, B. H., Santos, A. G. & Gonzalez, F. J. N. (2024). Experimental assessment of energy storage in microcapsulated paraffin PCM Cement mortars. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02959. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02959>
- Wang, G., Li, X., Chang, C. & Ju, H. (2024a). Multi-objective passive design and climate effects for office buildings integrating phase change material (PCM) in a cold region of China. *Journal of Energy Storage*, 82, 110502. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110502>
- Wang, M., Liu, S., Han, J., Bai, R., Gao, W. & Zhou, M. (2024b). A novel capric-stearic acid/expanded perlite-based cementitious mortar for thermal energy storage. *Solar Energy*, 273, 112501. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112501>
- Wang, F., Qiao, Z., Zheng, W., Li, Y., Gou, Y., Qi, Y. & Li, H. (2024c). Preparing gypsum-based self-levelling energy storage mortar via fly ash cenospheres/paraffin used for floor radiant heating. *Construction and Building Materials*, 423, 135865. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135865>
- Xiao, Y., Zhang, T., Liu, Z., Fei, F. & Fukuda, H. (2023). Optimizing energy efficiency in HSCW buildings in China through temperature-controlled PCM Trombe wall system. *Energy*, 278, 128015. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128015>