9. Bölüm

Enerji Verimliliğini Artırmak ve Termal Konfor Koşullarını Düzenlemek İçin Binalarda Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanımı

Meryem TERHAN[1]

Özet

Fosil enerji kaynaklarının sınırlı oluşu ve artan dünya nüfusu ve konfor şartlarına bağlı olarak binalarda ısıtma ve soğutma enerjisi ihtiyaçlarının sürekli olarak artması ve bu ihtiyaçları karşılanması için yenilenebilir kaynaklara yönelme zorunluluğunu ortaya çıkarmıştır. Konut sektörü, dünya toplam enerji tüketiminin %40'ını ve karbondioksit emisyonlarının ise %39'unu oluşturmaktadır. Bu yüzden binalarda enerji verimliliği önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Binalarda faz değiştiren malzemelerin kullanımı ile gizli enerji depolama sayesinde önemli miktarda ısıtma ve soğutma enerjisi tasarrufu sağlamak mümkündür. Aynı zamanda FDM, pik sıcaklık değerlerini düşürerek termal konfora da katkı sağlamaktadır. Bu bölümde bina yapı bileşenlerine entegre edilen faz değiştiren malzemelerin bina HVAC sistemine ve mahal termal konforuna yaptığı katkılar, faz değiştiren malzemelerin çeşitleri ile FDM'lerin bina yapı malzemelerine entegre edilmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Enerji verimliliği, gizli enerji depolama, faz değiştiren malzemeler (FDM)

Giriş

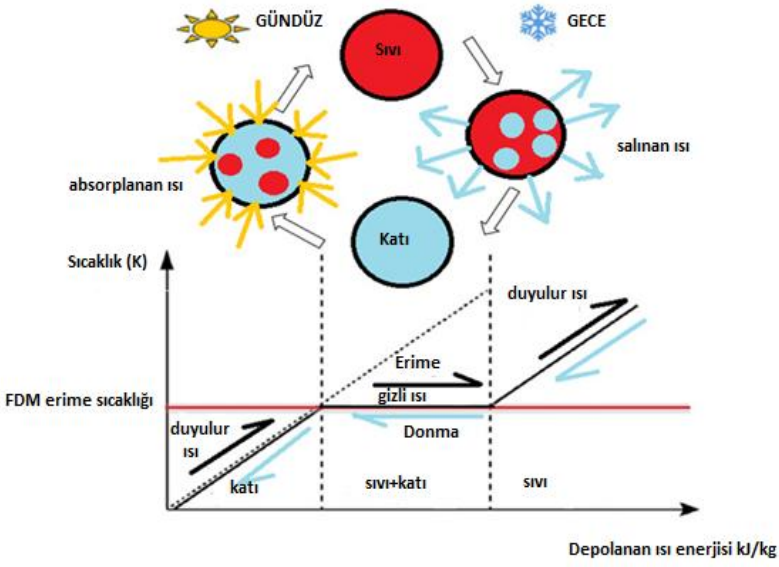
Dünya nüfusunun artışı ve gelişmekte olan ülkelerdeki önemli ekonomik büyüme, enerji tüketimini ve talebini hızlandırmaktadır. Bir yandan enerji kaynaklarının sınırlı olması ve tüketimin artması, diğer yandan ise sera gazı emisyonlarının yükselmesi, enerji ve çevre sorunlarının genişlemesine yol açmaktadır. Geçtiğimiz yüzyıllarda, endüstriyel gelişme ve benzeri görülmemiş

[1] Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ORCID: 0000-0001-7556-9240

nüfus artışı, enerji talebinin yıllık %3,2 oranında artmasına neden olmuştur. Ortalama olarak, fosil yakıtlar enerjinin yaklaşık %80' ini oluşturmaktadır. Fosil yakıtların yakılmasıyla üretilen tüm yakıtlar, yüksek karbondioksit emisyonları nedeniyle en büyük çevre sorunu olan iklim değişikliğine neden olmaktadır. Enerji tüketiminin optimizasyonu kavramı, verimli enerji kullanımı için yöntem ve modellerin seçilmesi, politikaların benimsenmesi ve uygulanmasını içerir ve varlıkların, enerjinin ve yaşamın sürekliliğini sağlamak açısından ulusal ekonomi için arzu edilen bir durumdur. Konut ve ticari binaları içeren inşaat sektörü, dünya toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ını oluşturmaktadır. Binalardaki enerji tüketiminin yaklaşık %54'ünün alan ısıtma ve soğutma için harcandığı tahmin edilmektedir. Bu nedenle, bina enerji tüketimini azaltmak, dünya çapında tüketilen toplam enerjiyi azaltmak açısından önemlidir. Sonuç olarak, dünyanın dört bir yanındaki bilim insanları, yeni yenilenebilir enerji kaynakları geliştirerek ve fosil yakıtların olumsuz çevresel etkilerini azaltarak artan enerji talebine cevap verecek bir alternatifle ilgilenmektedir (Beiranvand ve Mohaghegh, 2021).

Doğal kaynakların giderek tükenmesi ve küresel ısınmanın etkileri nedeniyle enerji tüketimi giderek daha sorunlu hale gelmektedir. İnsanların zamanlarının %90'ını kapalı mekânlarda, genellikle klimalı ortamlarda geçirdikleri yaygın olarak bilinmektedir. Sonuç olarak, binalarda termal konfor, bina sakinlerinin sağlıklı, yüksek kaliteli bir ortamın keyfini çıkarmasını ve iyi çalışma koşullarını sürdürmesini sağlamak için dikkatle yönetilmelidir. Bu bağlamda, binalara HVAC sistemleri kurulur ve mevsimsel gereksinimlere bağlı olarak genellikle günde birçok saat çalışır. HVAC sistemlerinin bina sektöründe önemli miktarda enerji tükettiği ve küresel enerji kullanımının %36'sını oluşturduğu iyi bilinmektedir. Ne yazık ki, bu yüksek tüketim, sera gazı emisyonlarının %39'undan fazlasını oluşturmaktadır. Enerji tasarrufu sağlamak için, çeşitli çalışmalar, binalarda termal konforu iyileştirmek için belirli özelliklere sahip yeni malzemeler tasarlanmasını önermektedir. Örneğin, faz değiştiren malzemeler, özellikleri dinamik olduğu ve çevrelerindeki olası değişikliklere uyum sağlayabildiği için bina tasarımında etkili bir çözüm sunabilir. Ayrıca, ısıl yönetimi mümkün kılan değişken özelliklere sahiptirler, bu da tasarımcıların termal enerji tasarrufu yapmalarını ve yaz ve kış aylarında enerji tüketimi arasında bir denge kurmalarını sağlar. Yaz aylarında bu malzemeler güneş enerjisini kullanarak depolayabilir ve optimum iç ortam sıcaklıklarını koruyabilir veya iç ortam sıcaklıklarını sınırlayabilirken, kış aylarında depoladıkları enerjiyi binaların içinde yayarak kullanabilirler (Imghoure vd., 2022).

Faz değiştiren malzeme (FDM), belirli sıcaklıklarda donarak ve eriyerek ısı enerjisini emen ve serbest bırakan bir maddedir. Başka bir deyişle, FDM, erime ve donma süreçleri sırasında (bir halden diğerine geçerken) termal enerjiyi depolayan ve serbest bırakan bir malzemedir. Bu malzeme, donma sırasında gizli ısı veya kristalizasyon enerjisi şeklinde büyük miktarda ısı enerjisi serbest bırakır. Buna karşılık, malzeme eridiğinde, katı halden sıvı hale geçerken çevredeki ortamdan aynı miktarda ısı enerjisi emilir. Böylece FDM, erirken ısı enerjisini emdiği için bir pil görevi görür. Kristalleşene kadar soğutularak yeniden şarj edilebilir ve depolanan enerjiyi çevreye geri salar. FDM, termal özelliklerini değiştirmeden binlerce kez ısı enerjisi depolayabilir ve serbest bırakabilir. Termal enerji depolama sürecinde FDM, sadece hissedilebilir ısıyı değil, gizli ısıyı da kullanır (Terhan ve Ilgar, 2023). Yukarıda bahsedilen FDM'nin geçiş döngüsü Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Faz değiştiren malzemenin ısı dönüşüm bölgeleri[2]

Binalarda enerji tüketimini azaltmanın bir yolu da, binaya faz değiştiren malzemeleri entegre etmektir. FDM'ler binalara pasif olarak veya aktif olarak entegre edilebilir (Gholamibazanjani ve Farid, 2020). Aktif yöntemler, binaların içine yerleştirilen FDM tabanlı enerji depolama kaplarını veya enerji miktarının depolandığı HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemlerini çalıştırmak için elektrik veya mekanik enerji gibi harici kaynaklar gerektirir.

[2] Terhan ve Ilgar, 2023

Aktif yöntemlerden farklı olarak, pasif yöntemlerde FDM'ler, beton, yalıtım, alçı, döşeme altı, sıva ve duvar panoları gibi duvar, zemin ve çatı inşaat malzemeleri aracılığıyla bina kabuğuna gömülebilir. Pasif yöntemler, herhangi bir dış girdi gerektirmedikleri ve az bakım gerektirdikleri için popülerdir (Khan vd., 2022).

HVAC (ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme) sistemleri, konut ve ticari binalarda kullanıcıların termal konforunu sağlamak için önemli ölçüde enerji tüketimine katkıda bulunmaktadır. Binalarda enerji tüketiminin büyük bir kısmını ısıtma ve soğutma enerjisi talebi oluşturmaktadır. Küresel ekonomi ve demografik büyümeyle paralel olarak, 2050 yılına kadar soğutma enerjisi talebinin küresel olarak yaklaşık %150, gelişmekte olan ülkelerde ise %300-%600 oranında keskin bir artış göstereceği tahmin edilmektedir. HVAC enerji talebinin azaltılması, binalardaki enerji tüketimini önemli ölçüde azaltacak ve böylece karbondioksit emisyonlarını düşürecektir. Bu bağlamda, hem ofis hem de konut binalarında iç mekân soğutma yüklerini ortadan kaldırmak ve enerji tüketimini azaltmak için çeşitli pasif soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Pasif soğutma sistemleri, enerji tüketimi olmadan veya minimum enerji tüketimi ile binayı soğutmak için enerji tasarrufu sağlayan teknolojiler veya teknikler kullanır. Bina zarfında gizli enerji depolama teknolojisi olarak kullanılan faz değiştiren malzeme (FDM), binalarda termal regülatör (düzenleyici) olarak uygulanabilen umut verici bir pasif soğutma teknolojisidir. FDM, yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahiptir ve küçük bir sıcaklık farkı için önemli miktarda termal enerji depolayabilir (Parabhakar vd., 2020).

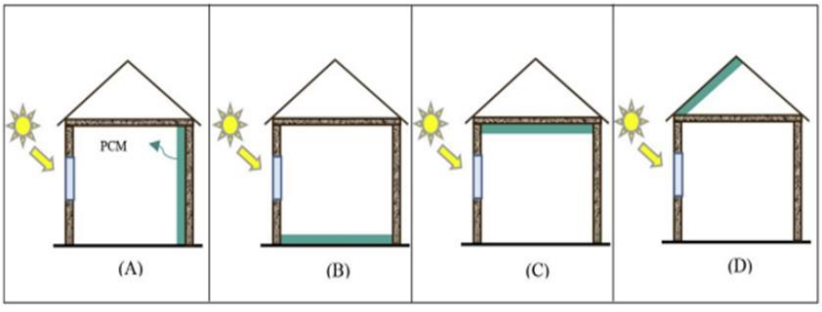
Termal konfor, bir binadaki ısıl ortamdan duyulan memnuniyeti ifade eden bir durumdur. Bu memnuniyet, bina sakinleri arasında farklılık gösterdiğinden, yalnızca sıcaklık veya ısı derecesi ile ölçülemez. Bina sakinlerinin termal konfora duyarlılığı, iç mekân hava sıcaklığı, bağıl nem, ortalama radyant sıcaklık, hava hızı, kişisel giyim ve aktivite düzeyi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Çalışma sıcaklığı olarak bilinen bu kavram, bina kabuğunun iç mekân termal konforu üzerindeki etkisini yansıtır. Çalışma sıcaklığı, bina içindeki kullanıcıların hissettiği sıcaklıktır ve genellikle iç mekân hava sıcaklığı ile ortalama radyant sıcaklığın ortalaması olarak tanımlanır (Al-Yasiri ve Szabo, 2021).

Faz değiştiren malzemelerin binalara entegrasyonu, termal enerjiyi yönetme ve enerji tasarrufu sağlama kabiliyeti nedeniyle inşaat sektöründe hızla büyüyen ve gelecek vaat eden bir teknolojidir. Faz değiştiren malzemeler, termal yükleri azaltma ve kaydırma, soğutma/ısıtma yüklerini azaltma, termal konforu iyileştirme, yapı malzemesi sıcaklıklarını kontrol etme, bina dayanıklılığını artırma ve enerji tasarrufu sağlayarak enerji verimliliğini artırma gibi çeşitli

amaçlarla binalarda kullanılmaktadır (Al-Yasiri ve Szabo, 2021; Gholamibazanjani ve Farid, 2020).

Son yıllarda, yenilenebilir enerji teknolojilerine olan ilginin artmasıyla birlikte binalarda termal enerji depolama uygulamaları da önemli ölçüde artmıştır. Termal enerji üç şekilde depolanabilir: hissedilebilir ısı, gizli ısı ve kimyasal enerji. Faz değiştiren malzemeleri (FDM'ler) kullanılarak yapılan ısı depolama, neredeyse izotermal bir sıcaklıkta veya çok dar bir sıcaklık aralığında büyük miktarda enerjiyi emebilmesi (veya serbest bırakabilmesi) nedeniyle diğer enerji depolama yöntemlerine göre tercih edilmektedir. FDM'lerin istenen özellikleri, yüksek termal depolama kapasitesi, uygun erime sıcaklığı, kimyasal kararlılık, düşük maliyet, katılaşma sırasında küçük hacim değişimi ve yanıcılık, toksisite, bozulma veya kristalleşme sorunları olmadan kullanılabilme özelliğidir. FDM'ler genellikle fotovoltaik paneller, buz bankası uygulamaları, sıcak su depolama tankları, tarım endüstrisi, elektronik cihazların termal koruması ve dış duvarlar, çatılar, zeminler ve cam üniteleri gibi bina bileşenlerinde kullanılabilir. Günümüzde, FDM'lerin bina duvarlarına entegrasyonu, iç mekân sıcaklık dalgalanmalarını azaltmak, şebekeden gelen enerji talebini düzenlemek ve sonuç olarak enerji tasarrufunu artırmak için yaygın bir yöntem haline gelmiştir (Arıcı vd., 2020).

Çatı, pencere, duvar ve zemin gibi binanın çeşitli kısımlarında faz değiştiren malzemelerin kullanılması, iç sıcaklıktaki hızlı değişiklikleri önlemek ve böylece bina kabuğunun ısıtma ve soğutma enerjisini azaltmak için araştırmacılar tarafından önerilen stratejilerden biridir. FDM'lerin bina termal performansını ve iç mekan termal konforunu iyileştirme ve ısıtma ve soğutma yüklerini azaltma üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmaktadır (Anter vd., 2023). Şekil 2, binalarda duvarlara, zeminlere, tavanlara ve çatılara entegre edilmiş faz değiştiren malzemelerin kullanımını göstermektedir.



Şekil 2. Binalarda faz değiştiren malzemelerin kullanım yerleri1[3]

[3] Gholamibazanjani ve Farid,2020

Bina dış kabuğunun ısıl performansı, enerji verimliliği standartlarına uygun olarak iyileştirilmiş ve bu da binalarda ısı yalıtım malzemelerinin yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır. Isı yalıtım malzemelerinin kullanılmasıyla, özellikle sıcak ve tropikal bölgelerdeki binalarda dış cephelerin ısıl direnci önemli ölçüde artırılmış ve bina dış cepheleri eskisinden daha ince hale getirilmiştir. Dış ortam sıcaklık dalgalanmalarının etkisi altında, yüksek ısı direncine ancak düşük ısı kapasitesi değerlerine sahip bina dış cephe kaplamaları, iç yüzeylerinde genellikle büyük sıcaklık ve ısı akısı dalgalanmalarına neden olur ve bu da, ortalama sıcaklık ve ısı akısı değerlerinin düşük olmasına rağmen, iç mekân ısı konforunun azalmasına yol açar. Sonuç olarak, yüksek düzeyde iç mekân ısı konforunu korumak için genellikle ek klima veya ısıtma ekipmanı kullanılması gerekir ve bu da binanın enerji verimliliğini olumsuz etkiler. Bu nedenle, düşük ısı kapasitesi seviyeleri, yaygın olarak yalıtılmış bina zarflarının bir dezavantajı haline gelir. Ağır malzemeler kullanan bina zarfları için, yalıtım malzemelerinin kullanımıyla ilişkili bu sınırlama, ağır malzemelerin yüksek termal kapasite değerleri nedeniyle kısmen aşılabilir. Bununla birlikte, sabit fiziksel özelliklere sahip sıradan yapı malzemeleri için, ağır malzemelerin ısı kapasitesindeki artış, hafif malzemelere kıyasla sınırlıdır. Aynı zamanda, bina temeli daha büyük yapısal yüklere maruz kalır. Bu nedenle, bu, ısı kapasitesini artırmak için tatmin edici, etkili veya ekonomik bir yol değildir (Zhang vd., 2023).

Bina elemanlarına entegre FDM'nin çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir. Yazın gündüz saatlerinde, güneş radyasyonu ve yüksek sıcaklıklar, bina kabuğuna nüfuz eden bir ısı dalgası oluşturur. Bina kabuğuna entegre edilen FDM, faz geçiş işlemi sırasında fazla ısıyı emerek bina yapısı içindeki ısı dalgasının tepe noktasını geciktirir ve hatta düşürür. Bu nedenle, oda sıcaklığı günün büyük bölümünde rahat kalır ve soğutma sistemi daha az enerji kullanır. Geceleri sıcaklık düştüğünde, FDM depolanan ısıyı binanın içine ve dışına iletir, bu da rahat bir oda sıcaklığı sağlar ve FDM katılaştırma ile döngü sürecini tamamlar (Suresh vd., 2022).

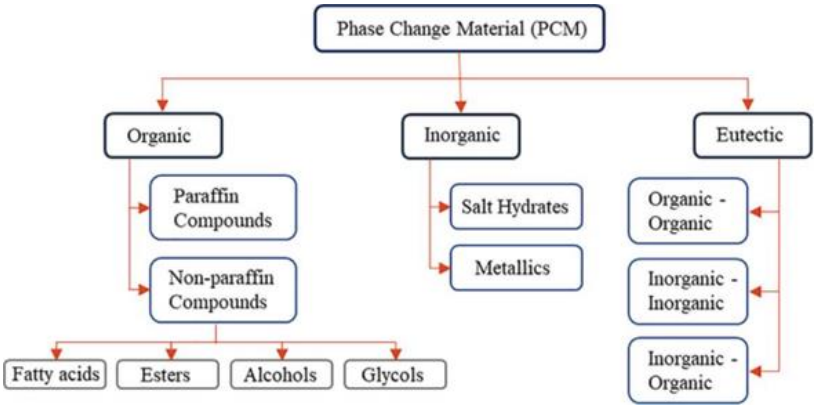
FDMentegre bina zarfının performansı, faz değiştiren malzeme özellikleri, iklim koşulları, FDM katman kalınlığı, göreceli konum gibi birçok faktöre bağlıdır. İklim koşullarında FDM erime sıcaklığının seçimi, binaların enerji tasarrufu performansını iyileştirmek için kilit faktördür (Huang vd., 2023).

Faz değiştiren malzemelerin erime sıcaklık aralıkları mevsime göre değişebileceğinden, termal önlemler alınırken yaz ve kış mevsimlerinin koşulları dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda, günlük sıcaklık dalgalanmalarının düşük olduğu koşullarda yüksek erime sıcaklığına sahip faz değişim malzemelerinin kullanılması önerilmez. Bu durumda, FDM sıcaklığı hiçbir

zaman dönüşüm sıcaklığına ulaşmayacak ve FDM malzemesi katı bir ısı yalıtım tabakası gibi davranacaktır. Benzer şekilde, günlük sıcaklık dalgalanmalarının büyük olduğu durumlarda düşük erime sıcaklığına sahip birFDM seçmek olumlu bir etki yaratmayacaktır. Sonuç olarak, FDM hızla sıvıya dönüşecek ve sıvı bir ısı yalıtım tabakası gibi davranacaktır (Imghoure vd., 2022).

1. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması

Genel olarak, FDM'ler faz geçiş süreçlerine göre dört türe ayrılır: katıdan katıya, katıdan sıvıya, gazdan katıya ve sıvıdan gaza. Katıdan sıvıya geçiş türü, erime sırasında hacim değişikliğinin az olması, daha az malzeme ile daha fazla enerji depolamaya imkân vermesi ve sabit sıcaklığı nedeniyle bina kaplamalarında en yaygın olarak kullanılan ve pratik olarak uygulanabilir olan türdür. Piyasada çok çeşitli faz geçiş sıcaklıklarına sahip birkaç FDM türü mevcuttur. Şekil 3'te gösterildiği gibi faz değiştiren malzemeler bileşenlerine göre üç gruba ayrılır: organik FDM'ler, inorganik FDM'ler ve ötektik FDM'ler (Suresh vd., 2022).



Şekil 3. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması[4]

Organik FDM'ler parafinler, bitkisel yağlar ve yağ asitlerini içerir. Kimyasal ve termal olarak kararlı geri dönüştürülebilirler, faz ayrışması veya aşırı soğuma geçirmezler ve daha büyük miktarlarda mevcutturlar. Ancak, yanıcılık, zayıf termal iletkenlik ve erime sırasında yüksek hacim değişimi (%10-%20) gibi eksiklikleri vardır. Parafinler, istenen çalışma sıcaklığı aralığında faz değişimi, kimyasal kararlılık, döngüsel kararlılık ve yüksek entalpi ısısı sergilerler. Tuz hidratları çoğu metal için aşındırıcıdır ve bu nedenle ambalajlama ve bakım için yüksek maliyetler gerektirir. Ayrıca, inorganik tuzların faz ayrışması ve aşırı

[4] Nishad ve Krupa,2022

soğuması, uzun vadeli uygulamalar için faz değişim özelliklerini etkiler. Tuz hidratları ve metaller dâhil olmak üzere inorganik FDM'ler, yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Çoğu inorganik FDM, daha keskin faz geçişleri, yüksek entalpi ısısı, enerji yoğunluğu, yanmazlık, yüksek termal iletkenlik gösterir ve daha ucuzdur. Ötektik FDM'ler, iki veya daha fazla faz değiştiren malzemenin birleşimidir. Ortaya çıkan kompozitler inorganik-inorganik, organik-organik veya organik-inorganik olabilir. Kompozitin katılaşması, aynı elementlerden elde edilen diğer kombinasyonlara göre daha düşük bir sıcaklıkta gerçekleşir. Ötektik FDM'ler keskin bir erime noktası, yüksek enerji yoğunluğu ve homojen erime sergilese de, uzun ve maliyetli sentez ve karakterizasyon teknikleri nedeniyle yeterli test verisi mevcut değildir (Nishad ve Krupa, 2022).

2. FDM'lerin Bina Yapı Bileşenlerine Entegre Edilmesi

Faz değiştiren malzemelerin yapı malzemelerine entegre edilmesi beş temel yöntemle gerçekleştirilebilir. Bunlar doğrudan emprenye (veya doğrudan karıştırma), malzemelerin gözenekli yapısı yoluyla daldırma, şekil stabilizasyonu, mikrokapsüllüme ve makrokapsülleme olarak sınıflandırılabilir. Doğrudan emprenye veya karıştırma, en basit ve en uygun maliyetli yöntem olmakla birlikte, hidrasyon ürünlerini etkileyebilir ve yapı malzemesinin mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını etkileyebilir. Gözenekli malzemelerin sıvı FDM'lere daldırılmasını içeren daldırma tekniği, sızıntı riski, uyumsuzluk ve beton bileşenlerdeki takviye çeliğinin potansiyel korozyonu gibi sınırlamalara sahiptir. Bu faktörler, yapı malzemesinin genel dayanıklılığını ve hizmet ömrünü önemli ölçüde tehlikeye atabilir. Uzun vadeli uygulamalar için, FDM sızıntısını önleme ve termal iletkenliği artırma özellikleri nedeniyle şekil stabilizasyonu, makro ve mikro kapsülleme gibi yöntemler tercih edilmektedir (Bayram vd., 2024).

Şekil stabilizeli FDM, karıştırma, adsorpsiyon ve emprenye gibi fiziksel yöntemlerle veya graft kopolimerizasyon ve sol-jel yöntemleri gibi kimyasal yöntemlerle elde edilebilir. Şekil stabilizeli FDM'lerin üretiminde kullanılan malzeme destekleri arasında yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), stiren ve butadien gibi polimerlere dayalı organik malzemeler ile inorganik gözenekli malzemeler bulunur. Şekil stabilize FDM kompozitler, karbon bazlı nanoyapıların eklenmesiyle gelişmiş termal iletkenlik gösterir. Örnekler arasında genişletilmiş grafit, sıkıştırılmış genişletilmiş doğal grafit, nanografit, nanopaletler, grafen, nitrojen katkılı grafen ve grafen oksit bulunur. Faz değiştiren malzemenin 1 nm ila 1 mm boyutlarında polimerik bir filmle kaplayarak mikroskobik bir kapsül içine hapsetme işlemi, mikrokapsülleme olarak tanımlanır. Mikrokapsülleme, katı faz değiştiren malzemenin faz geçişi

sırasında kapsül içinde hacim değişikliklerine uğramasını sağlayarak, sıvı yapısal malzeme olarak kullanılmasını mümkün kılar. Faz değiştiren malzemesinin 1 mm'den büyük bir tüp, panel veya küre gibi bir kapsül içine yerleştirerek yapı malzemelerine entegre etme işlemi, makrokapsülleme olarak adlandırılır. Binalarda FDM kullanımı için, sıva uygulamalarında mikrokapsülleme ürünler daha yaygın olarak tercih edilirken, makrokapsülleme için mat FDM sıklıkla kullanılır. Mat FDM, uygulama kolaylığı nedeniyle zemin, duvar, asma tavan ve çatılarda kullanılabilir (Ilgar, 2022).

Sonuçlar

Fosil enerji kaynaklarının sınırlı oluşu ve yaşam konforundaki artışın yarattığı enerji talebi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi artırmış olup mevcut enerji kaynaklarının da daha verimli kullanımını zorunlu hale getirmiştir. Dünyada enerji tüketiminin %40'ı gibi büyük bir paya sahip olan konut sektöründe enerji tasarrufu elde etmek birçok ülkenin hedefleri arasında yer almaktadır. Güneş gibi yenilenebilir enerji kaynağından yararlanarak binalarda gizli enerji depolamak için faz değiştiren malzemelerin kullanımı son zamanların öncelikli çalışma konuları arasında yer almaktadır.

Faz değiştiren malzemeler, binalarda dış duvar, çatı, zemin gibi bina zarfına entegre edilerek ısıtma ve soğutma enerji talebini düşürerek enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca, oluşan pik sıcaklık değerlerinin düşmesine ve termal konforun artmasına etki ederler. Bunun için binalarda uygun FDM seçimi yapılmalı, faz değiştiren malzemenin erime sıcaklığı, yapı bileşeni içerisindeki konumu, kalınlığı, dış iklim şartlarına göre değerlendirilmelidir.

Faz değiştiren malzemenin sarj ve deşarj periyotları takip edilmeli, erime ve donma gibi faz değiştirme süreçlerinde yapı bileşeni içerisinde sızıntı ve korozyon riski oluşmaması için uygun kapsülleme işlemleri yapılmalıdır.

Kaynaklar

1. Al-Yasiri, Q., ve Szabo, M. (2021). Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis. *Journal of Building Engineering,* 36, 102122.
2. Anter, A. G., Sultan, A. A., Hegazi, A.A, ve 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.
3. Arıcı, M., Bilgin,F., Nižetić, S., ve Hasan, K. (2020). PCM integrated to external building walls: An optimization study on maximum activation of latent heat. *Applied Thermal Engineering*, 165, 114560.
4. Bayram, M., Ustaoglu, A., Kursuncu,B., Hekimoglu, G., Sari,A., Latif O. U., Subasi,S., Gencel, O., ve Ozbakkaloglu,T. (2024). 3D-printed polylactic acid-microencapsulated phase change material composites for building thermal management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 191, 114150.
5. Beiranvand, M., ve Mohaghegh M. R. (2021). Energy analysis and simulation of PCM-enhanced building envelopes in commercial buildings: A case study. *Energy Storage*, 3(4).
6. Gholamibazanjani,G., ve Farid, M. (2020). A comparison between passive and active PCM systems applied to buildings. *Renewable Energy,* 162, 112-123.
7. Huang, Y., Yang, S., ve Aadmi, M. (2023).Numerical analysis on phase change progress and thermal performance of different roofs integrated with phase change material (PCM) in Moroccan semi-arid and Mediterranean climates. *Building Simulation,* 16 , 69–85.
8. Imghoure, O., Belouaggadia,N., Ezzine,M., Lbibb,R., ve Younsi Z. (2022). Evaluation of phase change material and thermochromic layers in a “smart wall” in different climates for improving thermal comfort in a building. *Journal of Building Engineering*, 56, 104755.
9. Ilgar, G. (2022). Binalarda ısıl enerji depolama için faz değişim malzemelerinin kullanımının enerji verimliliği açısından araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane.
10. Khan, M., Khan, M. M., Irfan,M., Ahmad, N., M. A. Haq, M. A., Khan, I., ve Mousa,M. (2022). Energy performance enhancement of residential buildings in Pakistan by integrating phase change materials in building envelopes. *Energy Reports*, 8, 9290-9307.

11. Nishad, S., ve Krupa, I. (2022). Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments,* 52(C), 102241.
12. Prabhakar, M., Saffari, M., Gracia, A., ve Luisa F. C. (2020). Improving the energy efficiency of passive PCM system using controlled natural ventilation. *Energy and Buildings*, 228, 110483.
13. Suresh, C., Hotta, T. P., ve Saha, S. K. (2022). Phase change material incorporation techniques in building envelopes for enhancing the building thermal comfort-A review. *Energy &Buildings*, 268, 112225.
14. Terhan, M., ve Ilgar, G. (2023). Investigation of used PCM-integrated into building exterior walls for energy savings and optimization of PCM melting temperatures. *Construction and Building Materials*, 369, 130601.
15. Zhang,Y., Jiang, W., Song, J., Xu, L., Li, S., ve Hu, L. (2023). A parametric model on thermal evaluation of building envelopes containing phase change material. *Applied Energy*, 331,120471.