



PHASE CHANGE MATERIAL APPLICATIONS ON BUILDINGS USING WHOLE-BUILDING ENERGY SIMULATION TOOLS

Necla Seval Bayram^{*1,2}, Ahmet Vefa Orhon²

¹Department of Civil Engineering, Munzur University, Tunceli, Turkey

²Department of Architecture, Dokuz Eylül University, İzmir, Turkey

Abstract

Review paper

In this paper, building energy simulation tools that analyze the applicability of phase change materials used in passive air conditioning applications in different building components and in different climatic conditions and studies using these tools will be discussed. Within the scope of the study, the concepts of phase change materials and energy simulation tools will be examined and selected examples based on the scanning model will be examined according to different environmental conditions and application details. The study is a review that emphasizes the need to match the experimental researches conducted in recent years with energy simulation tools.

Keywords: Latent heat storage, Phase change materials, Simulation tools

ENERJİ SİMÜLASYON ARAÇLARI İLE BİNALARDA FAZ DEĞİŞTİREN MALZEME UYGULAMALARI

Özet

Derleme makale

Bu çalışmada, pasif iklimlendirme uygulamalarında kullanılan faz değiştiren malzemelerin farklı yapı bileşenlerinde ve farklı iklim koşullarında uygulanabilirliğini analiz eden bina enerji simülasyon araçları ve bu araçların kullanıldığı çalışmalar ele alınacaktır. Çalışma kapsamında faz değiştiren malzeme ve enerji simülasyon araçları kavramları incelenerek tarama modeline dayalı olarak seçilen örnekler farklı çevresel koşullara ve uygulama detaylarına göre irdelenecektir. Çalışma son yıllarda yapılan deneysel araştırmaların enerji simülasyon araçlarıyla eşleştirilmesi gereğini vurgulayan bir derleme çalışmasıdır.

Anahtar Kelimeler: Gizli ısı depolama, Faz değiştiren malzemeler, Simülasyon araçları

1 Giriş

İnşaat sektörü dünya genelinde yaşanan enerji tüketiminin % 30-40'ndan, bu oranın da % 80-85'inin ısıtma soğutma uygulamalarında kullanmasından sorumludur [1,2]. Bu tüketim oranını azaltmak, pasif sistemler adı verilen iklimlendirme uygulamaları, alternatif malzemeler ve enerji depolama yöntemleriyle mümkündür. Günümüzde iklimlendirme uygulamalarında verimliliği artırmak ve iç mekânda konfor koşullarını sağlamak amacıyla termal enerji depolama sistemlerine yönelim artmıştır. Termal enerji depolama, enerjiyi uygun şekilde kazanıp istenen enerji şekline dönüştürerek ısıtma ve soğutma sistemlerinde tasarruf sağlamanın en iyi yoludur. Duyulur, termokimyasal ve gizli ısı depolama şeklinde uygulanan termal enerji depolama yöntemleri arasında gizli ısı depolama, sabit sıcaklıklarda birim kütle/hacim başına düşen yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle çok dikkat çekmiştir. Duyulur ısı depolama büyük oranda ısı depolayabilmesi ve geri kazanma çevriminin gerçekleşmesi sebebiyle tercih edilen bir yöntem olsa da, ihtiyaç duyulan depo hacminin çok büyük

olması sistemin en büyük dezavantajıdır [3]. Bu sistemde malzemenin yeterli bir duyulur ısı depolama kapasitesine ulaşması, daha büyük kütle ve daha büyük sıcaklık değişimiyle mümkündür [4]. Bu sebeple geleneksel mimaride kullanılan malzemelerle aynı oranda enerjinin daha büyük kütlelerle karşılanabilmesi, sistemin uygulanabilirliği açısından sorun yaratmaktadır. Gizli ısı depolama yöntemlerinde ise durum biraz daha farklıdır. Uygun sıcaklık aralığında maddenin hal değişimiyle sistemin sıcaklığı sabit kalmakta ve faz geçiş sürecinde ortaya çıkan bu ısı depolanmaktadır [5]. Bu da gerekli depo hacminin, duyulur ısıya göre çok daha küçük, depolama kapasitesinin ise çok daha büyük olduğu anlamına gelmektedir. Bu bağlamda talep edilen enerji ihtiyacını daha küçük kütlelerde karşılamak ve gizli ısı depolama yöntemini yapı uygulamalarında hayata geçirmek amacıyla tasarımcılar alternatif malzeme arayışına girmiştir. Faz değiştiren malzemeler de (FDM) gizli ısı depolama özelliği ile bina iklimlendirmelerinde verimliliği artıran yeni nesil malzemelerden biri olarak yapı uygulamalarında yerini almıştır.

* Corresponding author.

E-mail address: nsevalerdem@gmail.com (N. S. Bayram) | ORCID Number : 0000-0002-9522-0270

Received 7 October 2020; Received in revised form 23 November 2020; Accepted 30 November 2020

FDM'lerin gizli ısı depolama özelliği sayesinde, yapıların ısıtma ve soğutma uygulamalarında enerji talebinin azalması ve iç mekân konfor koşullarında verimliliğinin artırılması mümkündür. FDM'ler kendi iç sıcaklıklarını artırmadan ısıyı absorbe etmek ve salmak amacıyla faz geçişi olgusunu kullanan malzemelerdir. Büyük miktarlarda termal enerjiyi gizli formda saklayabilmeleri sayesinde, yapısal bileşenlerin sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak ve istenen sıcaklık seviyeleri içinde tutarak bir binanın termal performansını ve termal konforunu artırabilmektedirler. FDM'nin çalışma prensibi; ortam sıcaklığı erime noktasını aştığında, bu sıcaklığın FDM tarafından kullanılarak erimesine, sıcaklık azaldığında ise tekrar donarak depoladığı ısıyı açığa çıkarmasına dayanmaktadır. Bu döngüyle iç mekân sıcaklığı konfor aralığında sabitlenmektedir [6]. FDM'nin işleyebilmesi, ortalama sıcaklığın FDM'nin erime noktasının üzerinde olması ve faz değişimini başlatmasıyla mümkündür. Organik, inorganik ve ötektik karışımlar olmak üzere 3'e ayrılan FDM'lerden insan konfor sıcaklığı arasında (18-26°C) erime noktasına sahip olanların yapı uygulamalarında kullanılması daha uygundur.

Ancak FDM'lerin etkinliği büyük ölçüde iklim koşullarına, erime sıcaklığına ve kullanıcıların davranışlarına bağlı olduğundan ve FDM'lerin doğrusal bir davranışı olmadığından her zaman beklenen enerji verimliliği sağlanamamaktadır. Bu bağlamda kurgulanan sistemin etkin termal performans göstermesi simülasyon analizi ile mümkündür. Bu nedenle, pasif FDM sistemlerinin enerji simülasyonu, daha fazla araştırılması gereken ve enerji değerlendirmesi için uygun matematiksel modeller gerektiren bir optimizasyon problemi olarak bulunmuştur. Çoğunlukla duvar, döşeme, tavan, çatı uygulamalarında yer alan FDM'leri uygun şekilde karakterize edebilmek ve yapıya doğru şekilde uygulayabilmek amacıyla malzeme kullanımı sayısal olarak analiz edilmelidir. Tasarım aşamasında kullanılacak olan enerji simülasyon araçları ile FDM'li binaların termal davranışlarını analiz edilmesi ve doğru tasarım kararları alınması mümkündür. Bu nedenle FDM'lerin davranış tahminlerini kapsayan birçok çalışma yapılmıştır. Bu makalede, pasif iklimlendirme uygulamalarında kullanılan FDM'lerin farklı yapı bileşenlerinde ve farklı iklim koşullarında uygulanabilirliğini analiz eden bina enerji simülasyon araçları ve bu araçların kullanıldığı çalışmalar ele alınmıştır. Çalışma kapsamında FDM ve enerji simülasyon araçları kavramları incelenerek tarama modeline dayalı olarak seçilen örnekler farklı çevresel koşullara ve uygulanma detaylarına göre irdelenmiştir. Çalışma son yıllarda yapılan deneysel araştırmaların enerji simülasyon araçlarıyla eşleştirilmesi gereğini vurgulayan bir derleme çalışmasıdır.

2 Faz Değiştiren Malzeme Uygulamalarında Kullanılan Enerji Simülasyon Programları

Bir yapının kullanımı süresince tüketilecek enerji miktarı ve gereksinimleri tasarım aşamasında belirlenmelidir. Bu sebeple FDM'li yapı bileşenlerinin, binanın ömrü boyunca göstereceği termal davranışı öngörmek ve enerji gereksinimlerini en aza indirmek için enerji simülasyon programlarının kullanımı önemli bir adımdır. Günümüzde farklı uygulamalar için birçok enerji

simülasyon programı var olsa da, FDM'li yapıların termal davranışını sayısal olarak analiz eden programlar çok kısıtlıdır. Standart olmayan sınır koşulları, FDM'lerin çok karmaşık geometriler ve doğrusal olmayan faz ön ara yüzleri gibi sorunlar, çoğu durumda analitik olarak verimli bir şekilde çözülemeyen bir soruna neden olmaktadır [7]. Bu bölümde, FDM teknolojisine dayalı pasif iklimlendirme uygulamalarında kullanılan simülasyon araçları gözden geçirilmiştir. Literatür incelemesine göre araştırmacılar tarafından binalarda FDM davranışını incelemek için EnergyPlus, TRNSYS ve PCM Express ve ESP-r kullanılmış ve bu simülasyon araçlarını doğrulamak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [8,9,10,11].

2.1 TRNSYS

TRNSYS modüler bir yapıya sahip olup, kullanıcının enerji sistemini oluşturan bileşenleri seçtiği ve bunları uygun giriş / çıkış bağlantı noktalarını kullanarak birbirine bağladığı, bileşen tabanlı bir simülasyon programıdır. ABD'nin Wisconsin, Madison Üniversitesi'nde Güneş Enerjisi Laboratuvarı tarafından geliştirilen yazılım dünya çapında yenilenebilir enerji mühendisliği, bina enerji simülasyonları, pasif ve aktif güneş tasarımları alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. TRNSYS aynı zamanda FDM'li yapı kabuklarının bina enerji performans analizlerinde kullanılan ilk ticari sayısal modellerden biridir. 1990 yılında Tomlinson ve Heberle, Oak Ridge Ulusal Laboratuvarında TRNSYS kodunu bir FDM duvar kaplaması modeli içerecek şekilde değiştirmiştir [12]. 1975'ten beri piyasada bulunan TRNSYS, modüler bir yapıya sahiptir ve FORTRAN programlama dili kullanılarak geliştirilmiştir [13]. Bina kabukları, ısı pompaları, toprak bağlantılı sistemler ve güneş enerjisi bina uygulamaları gibi çok çeşitli uygulamalar için kullanıcı dostu bir grafik arayüz, bağımsız bileşenler ve matematiksel modüller kullanılmaktadır. TRNSYS kodu, her bina bileşeninin açık tanımına ve çeşitli kontrol stratejilerine izin vermektedir. TRNSYS'deki her sistem bileşeni bir tür olarak tanımlanmakta ve bunu TRNSYS koduna entegre etmek için ilgili tüm matematiksel parametreleri içermektedir. TRNSYS motoru sistem bileşenlerini girdi dosyasına göre çağırarak ve sayısal denklemler sistemi çözümlene kadar her adımda tekrarlamaktadır. TRNSYS alt yapılarının (tiplerinin) her biri simülasyon sırasında veri akışını sağlamak için birbirine bağlanabilmektedir. TRNSYS bina simülasyonlarına hava koşullarını dahil etmek için saatlik değerler üzerinden çalışan tipik bir meteorolojik yıl (TMY) dosyası kullanılmaktadır. TRNSYS kütüphanesi, binaların simülasyonu için özel olarak tasarlanmış çeşitli bileşenlerden, HVAC, aktif ve pasif FDM, aydınlatma, havalandırma, güneş enerjisi, termal enerji depolama ve ayrıca hava durumu verilerinin veya diğer zamana bağlı işlevlerinin ve simülasyon sonuçlarının çıktısının desteklenmesi için bileşen rutinlerinden oluşmaktadır. Buna ek olarak kütüphanede bulunmayan elemanlar sonradan eklenebilmekte veya mevcuttakiler modifiye edilebilmektedir. Örneğin; bileşen rutinleri üzerine ana denklemler, dökümanlar, zaman adımı, başlama ve bitiş zamanı gibi [14]. Ayrıca yazılımda bulunmayan yeni matematiksel modeller de eklenebilmekte ve mevcut bileşenlerle birleştirilebilmektedir [15]. Ancak eklenen bu

bireysel matematiksel modellemelerin doğrulanması gerekmektedir. Program aynı zamanda Excel, CONTAM, COMIS, FLUENT, EES, GenOpt ve MATLAB gibi simülasyon programlarıyla bir arada çalışabilmektedir [14].

2.2 ESP-r

ESP-r, Birleşik Krallık Strathclyde Üniversitesi, Enerji Sistemleri Araştırma Birimi (ESRU) tarafından 1974 yılında geliştirilen açık kaynaklı bir bina performans enerji aracıdır. Bina bileşenlerinin termal analizi ve bina enerji simülasyonları için kullanılan bu yazılım, FDM'leri simüle etmek için yerleşik bir kapasiteye sahiptir. Bu amaçla, ESP-r (erime ve katılma) iki farklı özgül ısı profili kullanmaktadır [12]. Program, iklim koşulları, hava dağılımı, dış gölgeleme, iç enerji kazanımları ve bina mekanik sistemleri gibi çeşitli faktörlerin etkisini entegre edebilmektedir. ESP-r, doğrudan kullanılabilen veya değiştirilebilen önceden tanımlanmış bir malzeme ve inşaat katmanları veritabanına sahiptir. Ayrıca binaların enerji ve çevresel performansını etkileyen bir dizi faktörün ayrıntılı bir şekilde parametrik analizine izin vermektedir. Günümüzde ESP-r, çok sayıda danışmanlık ve öğretim uygulaması için de kullanılmasına rağmen, en iyi araştırma aracı olarak bilinmektedir. 2000 yılından bu yana, eklenen FDM modülü ile ESP-r, özel malzeme konseptini kullanarak faz mekanizmalarını simüle edebilir konuma gelmiştir [16]. Bu modül, malzeme değiştirme yoluyla enerji dengesi denkleminde faz geçişinin girilmesini sağlamaktadır. ESP-r'de, bazı dış faktörlere (yani sıcaklık veya radyasyon) yanıt olarak termal-fiziksel özelliklerini değiştirebilen aktif yapı bileşenlerini modelleme aracı olarak özel malzemeler kullanılmaktadır. ESP-r'de, özel malzeme fonksiyonları çok katmanlı bir yapı içindeki belirli bir düğüme uygulanabilmektedir. Özel bir malzeme olarak tanımlanan herhangi bir düğüm, daha sonra temel termo-fiziksel özelliklerinde bir zaman varyasyonuna tabi tutulmaktadır. ESP-r, FDM katmanı boyunca bir boyutlu ısı transferini varsaymaktadır.

2.3 EnergyPlus v8.6.0

EnergyPlus, ABD Enerji Bakanlığı tarafından geliştirilen açık kaynaklı ve çok platformlu bir bina enerji performans modellemesidir. Başlangıçta daha önce geliştirilen BLAST veya DOE-2 gibi bina enerji araçlarının en popüler özelliklerine ve yeteneklerine dayanırken, EnergyPlus bir saatten az zaman adımları, modüler sistemler ve ısı ile entegre tesisler gibi birçok yenilikçi simülasyon özelliklerini içermektedir [17]. Yazılıma ısıtma, soğutma, havalandırma, sıcak su, iç ve dış aydınlatma, yerinde elektrik üretimi ve gölgeleme cihazları, pencere, aktüatörler ve çift cephe elemanları gibi mekanize sistemler entegre edilebilmektedir [18]. Bu yazılıma güç veren diğer özellikler, gelişmiş fenestrasyon analizinin yanı sıra genel kabuk hesaplamaları (dış ve iç konveksiyon algoritmaları), gelişmiş sızma, havalandırma, oda havası ve çok bölgeli hava akışı hesaplamaları, çevresel emisyonlar, yaşam döngüsü maliyetleri ve enerji maliyetleri gibi değerlendirmelerdir. Buna ek olarak, diğer simülasyon araçlarına kıyasla EnergyPlus, kullanıcının termal konforunu ve iç mekan hava kalitesi ölçümlerini

analiz etmek için çeşitli gelişmiş termal konfor algoritmaları içermektedir. Ayrıca, EnergyPlus'in öğrenciler, araştırmacılar, mimarlar ve mühendisler gibi farklı kullanıcı türleri tarafından kullanımını basitleştirmesi için çeşitli grafik arayüzleri bulunmaktadır [19,20]. EnergyPlus modelleri, temel ısı dengesi prensiplerini hemen hemen her açıdan takip etmektedir. Bununla birlikte, bina yüzeyi konstrüksiyonlarının simülasyonu, BLAST'tan miras alınan bir iletim transfer fonksiyonu (CTF) yöntemine dayanmaktadır. Günümüzde bina kabuklarında değiştirilebilir malzemeler, FDM'ler veya değişken termal iletkenliğe sahip yalıtımlar gibi dinamik bileşenler kullanmaya başlandığından, termal ve enerji analizlerinde daha gelişmiş sayısal yöntemler kullanmak da gerekli hale gelmiştir. Bu sebeple, bir iletim sonlu fark (CondFD) yöntemi EnergyPlus'a dahil edilmiştir.

2.4 PCM Express

PCM Express, FDM'li binalar için geliştirilen bir bina enerji simülasyon aracıdır. PCM Express Valentin Energie software GmbH, tarafından "Binalarda Aktif FDM Depolama Sistemleri" nin analizi için kullanıcı dostu bir simülasyon programının geliştirilmesine odaklanan araştırma projesi ile bağlantılı olarak geliştirilmiştir. Bu proje Alman İş ve Teknoloji Bakanlığı tarafından desteklenmiş ve Freiburg, Almanya'daki Fraunhofer ISE ve diğer endüstriyel ortaklarla işbirliği içinde gerçekleştirilmiştir [21]. Bu geliştirme programının temel amacı, FDM'li bina uygulamalarının pazarda benimsenmesini hızlandırmak amacıyla, bina tasarımcılarına güvenilir bir karar verme aracı sağlamaktır.

PCM Express'te FDM; zeminin, tavanın veya duvar yapısının bir parçası olabilmektedir. FDM'li materyallerdeki faz geçişi etkisini tanımlamak için FDM'nin şarj ve deşarjını doğru bir şekilde simüle etmek gerekmektedir. FDM dışındaki malzemeler sabit bir ısı kapasitesi ile, FDM'ler ise sıcaklığa bağlı entalpi eğrisinin kullanımı ile tanımlanmaktadır [12]. PCM Express programındaki matematiksel modeller ve sayısal algoritmalar Fraunhofer ISE tarafından geliştirilmiştir. PCM Express'te, bina kabuğu bileşeninin tüm katmanları, matematiksel düğüm modelinde bir düğüm olarak simüle edilmektedir. Düğümler arasındaki ısı akışı, termal iletkenliğin bir fonksiyonu olarak hesaplanmakta ve iki katmanı birleştiren hayali bir kenar ile temsil edilmektedir. Dış katman bir kenar üzerinden dış ortama bağlanmaktadır. Pencerelerden gelen ışınlar, yapı kabuğunun iç hava düğümlerine ve iç katmanına dağıtılmaktadır. Tüm hava düğümleri ısıtma, soğutma ve havalandırma gibi alan koşullandırma sistemleriyle bağlantılıdır.

3 Yapılan Çalışmalar

3.1 TRNSYS Uygulamaları

Schranzhofer ve ark., yaptıkları çalışmada FDM enerji depoları ve FDM'li duvar elemanları için TRNSYS simülasyon modelinin doğrulamasını yapmıştır. Çalışmada mikro-kapsüllenmiş FDM'lerin yanı sıra çeşitli şekillerde makrokapsüllenmiş (silindirler, küreler, plakalar) FDM malzeme modülleri de işleme alınmıştır.

Buna ek olarak TRNSYS 16'nın çok bölgeli bina tipi 56 ile birleştirilebilen bir FDM duvar modeli analiz edilmiştir. Her iki FDM depolama modeli (Tip 240) ve FDM duvar katmanı modeli (Tip 241) için birkaç farklı deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak bazı örnek simülasyon sonuçları sunulmuştur. Buna göre yapılan simülasyon ve ölçümler arasındaki karşılaştırma çok iyi bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Sonuçlar modelin güvenilir olduğunu ve yaklaşımların depolama birimlerindeki gerçek koşulları tatmin edici bir şekilde tanımladığını göstermiştir. Karmaşık TRNSYS simülasyonlarında güvenilirlik ve kullanım ile ilgili daha fazla test ve geliştirme planlanmıştır [22].

Al-Saadi ve Zhai, FDM ile geliştirilmiş duvarların simülasyonu için yeni bir TRNSYS türü geliştirmiş ve doğrulamıştır. Çalışmada TRNSYS tercih edilme sebebi; saha çalışmalarından farklı olarak, hesaplamalı modellemenin daha ucuz olması ve bina uygulamalarında FDM'lerin tasarımlarını analiz ve optimize etmek için bu yazılımın etkili bir araç olmasıdır. Ayrıca TRNSYS'e "Simulation studio" ve MATLAB, FLUENT gibi harici programlar dahil olmak üzere birçok özellik tanıtılması ve FDM modellemesi için tescilli "TYPES" paketinin yer alması diğer tercih sebepleridir [13]. Çalışmada termal performansı değerlendirmek ve optimum özellikleri tanımlamak için ABD iklim koşulları altında FDM'nin termal özellikleri simüle edilmiştir. Buna göre simülasyonda doğrulanmış modül kullanılarak, en iyi konfigürasyonun, FDM'nin kontrollü iç mekan ile doğrudan temas halinde olduğu konfigürasyon olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, iklime bağlı olarak yıllık soğutma yükünde maksimum % 0.8-15.8 oranında tasarruf sağlandığını göstermektedir. Soğuk iklimler için, yıllık ısıtma yükünden edinilen tasarruf % 4'ten azdır. Pik yüklerdeki tasarrufun, bazı iklimler için yıllık yüklerden daha fazla potansiyel gösterdiği bulunmuştur. Pik soğutma yükünde maksimum tasarruf % 6.8 ile 13.3 arasında değişirken, pik ısıtma yükünde tasarruf % 7 ile 10.5 arasındadır [23].

Plytaria ve ark., ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmak için bina duvarlarında FDM'lerin kullanımını incelemiştir. Bu çalışmanın yeniliği, FDM tabakasının güney ve kuzey duvarlarındaki konumu ile ilgili farklı senaryoların araştırılmasına dayanmaktadır. Daha spesifik olarak, bu çalışma Atina (Yunanistan) 'da bir ofis binasının güney ve kuzey duvarlarında farklı pozisyonlarda ısıtma, soğutma yüklerini ve sıcaklık dağılımını, FDM'li ve FDM'siz olarak karşılaştırmasını yapmıştır. Simülasyon, TRNSYS bileşeni ticari tip TRNSYS 17 ile gerçekleştirilmiştir: Tip 1270 (PCM Wall). TRNSYS'nin kullanıcının "sürükle ve bırak" prosedürüyle seçtiği bileşenlerle çalışan bir yazılım olması, varsayılandan farklı koşullar olduğunda uygun ayrıntıların kullanıcı tarafından belirlenmesi çalışmada bu yazılımın tercih edilme sebebidir. Çalışmada bina kabuğu, Tip 56 düzenleme modunda uygun katmanlar seçilerek belirlenmiş, son olarak, 10 dakikalık zaman adımını seçmek için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Modelin doğruluğunu test etmek için daha önceden yapılan deneysel sonuçlar simüle edilmiş ve yazılımın güvenilirliği doğrulanmıştır. Sonuçlar, yılda maksimum enerji tasarrufunun, kuzey ve güney duvarlarındaki yalıtım ve FDM tabakası kombinasyonu ile elde edildiğini

kanıtlamıştır. Isıtma ve soğutma yüklerindeki azalmalar sırasıyla % 1.54 ve % 5.90 olarak bulunmuştur [24].

Borderon ve ark. yaptıkları çalışmada Fransa'nın farklı iklimlerdeki 4 farklı şehrinde, FDM'li bir konut yapısının davranışını analiz etmek için farklı konfigürasyonlarda simülasyonlar yapmıştır. Bu iklimlere göre, FDM kullanımının verimliliğini artırmak için gerekli koşullar analiz edilmiştir. Çalışmada TRNSYS yazılımı, FDM / havalandırma sistemi modeli için Matlab ile birlikte kullanılmıştır. Böyle bir sistemin birim sayısı değiştirilebilmekte ve farklı iklimlere uyarlanabilmektedir. Karşılaştırmalar FDM'siz klasik sistemlerle yapılmıştır. İncelenen vakaların çoğunda, geceleri FDM'de kısmi katılaşma görülmüştür. Bu durum, FDM sisteminin optimal olmayan bir kullanımına yol açmaktadır. Bu soruna, sistemdeki hava akış oranlarını kontrol etmek ve gece sıcaklığı düştüğünde bunu artırmak çözüm olarak düşünülmüştür. Sonuçlara göre havalandırmaya bağlanan FDM sistemi ile evdeki termal konfor, 4 iklimde de önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Lyon ve Trappes'te yazın aşırı ısınmanın görüldüğü saat dilimlerinde düşüş görülmüştür. Bu sonuçlara ulaşmak için havalandırma sisteminde 700 kg FDM kullanılmıştır. [25]

3.2 Energy Plus Uygulamaları

Ascione ve ark. dinamik bileşenlerin Akdeniz iklimlerinde bina soğutma talebinin azaltılmasına katkıda bulunup bulunamayacağını araştırmıştır. Çalışmada Energy Plus kullanılmıştır. Bir ofis binası, tüm soğutma sezonu boyunca (1 Mayıs - 30 Eylül arasında), bina kullanımı, iç kazanımlar, kullanıcı yoğunluğu, soğutma sistemlerinin aktivasyonu dikkate alınarak analiz edilmiştir. Ofis binası, iç duvarları FDM + sıvalı, iyi izole edilmiş büyük bir yapı olarak kurgulanmış ve saatlik ölçümler alınarak soğutma enerjisi tasarrufu analiz edilmiştir. Analizlerde beş Akdeniz iklimi dikkate alınmıştır: Ankara (Türkiye), Atina (Yunanistan), Napoli (İtalya), Marsilya (Fransa), Sevilla (İspanya). Ölçümler faz değişim sıcaklığı, FDM duvar kaplamasının kalınlığı ve FDM tabakasının konumunun etkileri çerçevesinde yapılmıştır. Soğutma için birincil enerji taleplerinin mutlak tasarruflarının değerlendirilmesinin ötesinde, sırasıyla iklimli bir bina ve doğal havalandırılmalı bir bina dikkate alınarak enerji tasarruf oranı ve aşırı ısınma süresi hesaplanmıştır. Elde edilen verilere göre bu çalışma, bina uygulamalarında FDM'lerin uygun tasarımı ve seçimi için yol gösterici bilgiler önermektedir. Simülasyon sonuçlarına göre her iklim koşuluna referans olarak, en yüksek soğutma enerjisi tasarrufu, bina duvarına 3 cm FDM'li sıva uygulanmasıyla elde edilmiştir. Genel olarak, enerji talebi FDM kalınlığının artmasıyla azalmıştır. Ayrıca kullanılan FDM, tüm soğutma mevsimi boyunca, tüm Akdeniz ülkeleri için aynı verimi göstermemiştir. Erime sıcaklığı 29°C FDM ile Ankara'da soğutma enerjisi talebi % 7.2 civarında azalırken, Sevilla ve Napoli'de ulaşılabilir fayda % 3.0'dan daha düşüktür [26].

Chan tarafından yapılan çalışmada, oturma odası ve yatak odasında inşa edilen dış duvara FDM entegreli tipik bir konut dairesi modellenerek termal / enerji performansı araştırılmış ve duvar oryantasyonunun etkisi de değerlendirilmiştir. Karşılaştırma için geleneksel bina cephesine sahip bir konut dairesi alınmış ve EnergyPlus

programı kullanılmıştır. EnergyPlus'a dahil edilen bir iletim sonlu fark algoritması, FDM'nin termal performansını simüle edilmesini sağlamaktadır. Algoritma, faz değişim enerjisini hesaba katmak için bir entalpi sıcaklık fonksiyonu ile birleştirilmiş örtülü sonlu fark şeması uygulamaktadır. Buna göre yapılan simülasyonda batıya bakan konutun oturma odasının daha iyi performans gösterebileceği bulunmuştur. İç yüzey sıcaklığında maksimum % 4.14'e kadar nispeten daha yüksek bir azalma sağlamıştır. Ayrıca, iklimlendirme sisteminde yıllık % 2.9 enerji tasarrufu sağlanmıştır. Ancak 91 yıllık geri ödeme süresi açısından, FDM'li konut dairesinin bina cephesinde uygulanması, esas olarak FDM'nin pahalı sermaye maliyeti nedeniyle Hong Kong'da kullanımını ekonomik olarak olanaksız kılmaktadır. Öte yandan, bu bina durumu için enerji geri ödeme süresi 23.4 yıl olarak tahmin edilmiş, bu da enerji tasarrufunun FDM duvar kaplamasının somut enerjisini aşabileceğini ve sera gazı emisyonunu azaltabileceğini göstermiştir [27].

Lei ve ark. tropikal iklimde soğutma yükünün azaltılması için FDM'li bina kabuğunun enerji performansına etkisini simüle ederek kıyaslamıştır. İdeal bir HVAC sistemine sahip beton bir yapının düşey duvarlarının dış yüzeylerine 28°C faz değişim sıcaklığına sahip 3mm'den 20 mm'ye bir FDM katmanı ilave ederek karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada, simülasyon programı olarak faz değişim enerjisini hesaba katmak için tamamen örtülü bir sonlu fark şeması ile çözülen CondFD algoritmalı EnergyPlus'ın bir versiyonu, entalpi sıcaklık fonksiyonu ile birlikte kullanılmıştır. Singapur'da kurgulanan çalışmada soğutma yükünün azaltılması için FDM lavesinin performansını yöneten faktörleri ortaya koymak amaçlanmıştır. Sonuçlar, FDM'nin tüm yıl boyunca, ısı kazanımlarını % 21-32 aralığında etkili bir şekilde azaltabildiğini ve FDM'lerin tropik bölgelerde sadece belirli mevsimlerde etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca duvarların dış yüzeylerine uygulanan FDM'ler daha iyi performans göstermiştir [28].

Nghana ve Tariku tarafından yapılan çalışmada FDM'lerin potansiyelini incelemek için sayısal ve deneysel analizler yapılmıştır. Deneysel çalışmalar, aynı iç ve dış ortam koşullarına maruz kalan yan yana eş binalar kullanılarak yürütülmüş ve sayısal çalışmalar için EnergyPlus kullanılmıştır. Sayısal çalışmada, bina yönü ve pencere-duvar oranı gibi farklı tasarım parametrelerinin etkilerine özellikle vurgu yapılarak mevcut bir apartman dairesi kullanılmıştır. Deneysel veriler, FDM'lerin ısı akış yönünü tersine çevirerek iç ortam havasını stabilize etmede etkili olduğunu göstermektedir. İç mekân ve duvar sıcaklığı dalgalanmaları sırasıyla 1.4°C ve 2.7°C azalmıştır. Ayrıca, sayısal veriler, FDM'lerin yaz ayları için önemli bir termal konfor iyileştirmesi getirmediğini ancak kış koşullarında ısıtma enerjisi talebini % 57'ye kadar düşürdüğünü göstermiştir [29].

3.3 ESP-r Uygulamaları

Almedia ve ark. birden fazla FDM katmanının kullanılmasına karşı tek bir katman kullanılmasının etkisini araştırmıştır. Genel olarak FDM uygulamasının binanın termal performansını önemli ölçüde etkileyebileceği bulunmuştur. Ayrıca çok katmanlı FDM'nin bazı durumlarda tek katmanlı FDM'den daha

gerçekçi termal fayda sağladığı görülmüştür. Çalışmada simülasyon programı olarak ESP-r kullanılmıştır. ESP-r'in tercih edilme sebebi; doğrudan kullanılabilen veya değiştirilebilen, önceden tanımlanmış bir malzeme ve inşaat katmanları veritabanına sahip olması ve FDM'de depolanan etkin spesifik ısı, termal iletkenlik ve faz değişikliği etkilerini göstermek için yerleşik bir kapasiteye sahip olmasıdır. Kurgulanan sistemde HVAC ve havalandırma kullanılmamış, simülasyon süresi Toronto iklim verileri kullanılarak 1-14 Haziran arasında tutulmuştur. Çok katmanlı FDM'lerin etkisini göstermek için basit bir tek odalı ev modellenmiştir. Mermer, beton, çakıl ve topraktan olmak üzere dört katmandan oluşan standart bir zemin yapısı kullanılmıştır. FDM, dört duvarın ve tavanın iç yüzeyine yerleştirilmiştir. Duvarlar; FDM, hava boşluğu, beton, yün ve tuğladan oluşan beş katmandan oluşmaktadır. Tavan ise dört kat FDM, bir hava boşluğu, beton ve çatı keçesinden oluşan standart bir veritabanı malzemesine dayanmaktadır. Bunlar tek katmanlı FDM modelini oluşturmaktadır. Bununla birlikte, çok katmanlı FDM modeli için, tek katmanlı FDM, toplam kalınlık aynı kalacak şekilde dört FDM katmanı ile değiştirilmiştir. Simülasyon altı farklı durum için dikkate alınarak yapılmıştır: FDM ile ve FDM olmadan, 8 mm'ye karşı 40 mm FDM, tek katmana karşı dört FDM katmanı. Simülasyon sonuçlarına göre FDM varlığının oda sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olabileceği bulunmuştur. Ayrıca, yapılan karşılaştırmalarda 8 mm FDM katmanı için, tek katmanlı ve dört katmanlı modeller arasında çok az fark vardır veya hiç fark yoktur. 40 mm FDM katmanı için, hem oda hem de yüzey sıcaklıklarında tek katmanlı ve dört katmanlı modeller arasında önemli bir fark bulunmuştur [30].

Kosny ve ark. sıcak ve karma iklimlerde soğutma enerjisi tüketimini en aza indirmek için konut tavanlarının termal tasarımını iyileştirmenin potansiyel yollarını araştırmıştır. Çalışmada kalın çatı katı yalıtımlarının ve FDM'li yalıtımların dinamik termal özellikleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Buna göre potansiyel enerji tasarruflarını analiz etmek ve FDM'nin çatı izolasyonu içindeki yerini optimize etmek için tek katlı bir çiftlik evinde bina ve malzeme ölçeğinde bir dizi sayısal simülasyonu yapılmıştır. Yazılım olarak ESP-r kullanılmıştır. Çalışmada ESP-r tercih edilmesinin sebebi, yazılımın iki farklı özgül ısı profilini (erime ve katılaşma) modellemek için yerleşik bir kapasiteye sahip olmasıdır. ESP-r enerji simülasyon sonuçları (60 dakikalık zaman adımı için) Phoenix iklimi dikkate alınarak simüle edilmiştir. Sonuçlar yoğunlaştırılmış FDM'li konfigürasyon 2-A'nın dağınık FDM'li konfigürasyon 1-A'dan daha düşük bir soğutma yüküne sahip olduğunu göstermiştir. Soğutma mevsimi boyunca, 1-A, 2-A için % 3.1'e karşılık % 5.6 soğutma yükü tasarrufu sağlamıştır (her iki konfigürasyon da FDM'siz temel durumla karşılaştırılmıştır). Tüm yıl boyunca % 6.2 tasarrufla 2-A'nın, % 3.6 tasarrufla 1-A'dan daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Yıllık tasarruflar, hem ısıtma hem de soğutma yükleri için yapılan tasarrufları içermektedir. Tavan arası üretilen yükler, simüle edilmiş tek katlı çiftlikte, tüm bina yüklerinin yaklaşık % 14'ünü temsil ettiğinden, yıllık tavan arası üretilen yük tasarrufu, 1-A ve 2-A uygulamaları için sırasıyla yaklaşık % 26 ve % 44'e ulaşabilmektedir [31].

Heim ve Clarke, yaptıkları çalışmada FDM'lerin davranış modellemesini özel malzeme tesisine dahil ederek ESP-r sistemini geliştirmeyi amaçlamıştır. Faz geçişinin etkisi, etkili ısı kapasitesi yöntemine göre, gizli bir ısı üretim terimi olarak enerji dengesi denkleminde eklenmiştir. Çok bölgeli, çok camlı ve doğal havalandırılmalı bir pasif güneş enerjisi binası için sayısal simülasyonlar yapılmıştır. İç oda astarı olarak FDM emdirilmiş alçıpan kullanılmıştır. Hava ve yüzey sıcaklıkları FDM'siz örnek ile karşılaştırılmış ve günlük gizli ısı depolama etkisi analiz edilmiştir. Bu etki günlük sıcaklık dalgalanmasında önemli bir azalmaya neden olmamakla birlikte, FDM'ler geçiş dönemlerinde güneş enerjisini etkili bir şekilde depolamıştır. Ayrıca, ısıtma mevsiminin başlangıcında ve sonunda enerji gereksinimi tahmin edilmiş ve sıradan alçı duvar kaplamasıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, FDM alçı panellerinde depolanan güneş enerjisinin kış mevsiminde ısıtma enerjisi ihtiyacını % 90'a kadar azaltabildiğini göstermektedir [32].

Almeida ve ark. çalışmalarında, FDM'li bir binayı simüle etmek için mevcut sayısal yöntemleri gözden geçirmiş ve modelleme şemasının iki formunu ayrıntılı olarak incelemiştir. Çalışmada FDM'li, penceresiz, tek odalı bir binanın termal davranışını analiz etmek için iki farklı yöntemin karşılaştırması yapılmıştır. Birinci yöntem, yaygın olarak kullanılan görünür ısı kapasitesi yöntemidir. Diğer yöntem ise yinelemeli düzeltme şemasıdır. Düzeltme şeması yöntemi için Matlab programı kullanılmış ve bir ESP-r simülasyonu ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada FDM dört katmana ayrılarak çok katmanlı bir yaklaşımla bir karşılaştırma yapılmıştır. Oda sıcaklığı FDM sıcaklık aralığının (yani hissedilebilir ısı) dışında olduğunda, hem düzeltici şema hem de ESP-r modeli benzer sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte, faz değişim sıcaklık aralığı içinde, Fourier ve Biot numarasına bağlı olarak farklılıklar görülmüştür [33].

3.4 PCM Express Uygulamaları

Rodriguez-Ubinas ve ark. yaptıkları çalışmada farklı İspanya iklim koşullarında kurgulanan bir yapıda FDM'lerin iç sıcaklık stabilizatörleri olarak etkinliğini ölçmüşlerdir. Çalışmanın amacı FDM uygulamasının ne zaman ve nerede kullanılmasının daha uygun olduğunu belirlemektir. Daha spesifik olarak, FDM'li uygulamada pencere boyutlarının ve gölgeleme faktörünün etkisini tanımlamak ve en uygun kombinasyonları bulmaktır. Her durumda yıllık iç sıcaklık davranışını tahmin etmek için FDM'li ve FDM'siz bir test odası PCM Express yazılımı ile simüle edilerek karşılaştırmalı bir çalışma yapılmıştır. Test odalarının termal performansı, farklı cephe camlama oranları ve gölgeleme kombinasyonları çerçevesinde ve farklı İspanya iklim bölgelerinde saatlik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yapı bileşenlerine FDM eklenmesinin, iç termal konforun korunmasına yardımcı olduğunu ve incelenen tüm İspanya iklimlerinde yüksek ve

düşük sıcaklık piklerini azalttığını göstermektedir. FDM termal stabilizasyon kapasitesi yaz aylarında daha belirgindir. [34].

4 Sonuç

Bu çalışma, FDM ile geliştirilmiş binaların iklimlendirme potansiyellerini analiz etmek için bina enerji simülasyon araçları tarafından sağlanan sayısal yöntemleri incelemektedir. Tablo 1'de de görüleceği gibi, incelenen literatür çalışmaları FDM'lerin bir çok kullanım alanına sahip olduğunu göstermektedir. FDM'nin binalarda kullanımında genel olarak FDM'nin pasif olarak şarj edildiği ve güneş enerjisi / harici sıcaklık veya dahili bir ısı kaynağı ile deşarj edildiği pasif sistemlere (iç kontrol sistemleri) odaklanılmıştır. İklimlendirme çalışmalarında alçıpan duvar, düşey duvar, zemin ve çatı katı gibi birçok yapı elemanına dahil edilen FDM'ler mikrokapsüllü veya makrokapsüllü olarak kullanılabilir. Özellikle FDM'lerin duvar panellerinin uygulanması, uygulama kolaylığı ve yüksek verimlilik sağlaması sebebiyle araştırmacılar arasında popüler bir uygulamadır. FDM tabakasının kalınlığının ve erime noktasının tasarruf sağlamada belirleyici bir etken olduğu görülmektedir. Birçok çalışmada maliyetin göz ardı edildiği görülmüştür. Maliyetin hesaba katıldığı çalışmalarda ise FDM'nin uzun süreli kullanımda ekonomik olmadığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca iklim koşullarına uygun erime noktasına sahip FDM seçimi, verimliliği önemli ölçüde etkilemiştir.

FDM'li sistemlerin temel amacı, binanın enerji talebini azaltmak ve termal konforu iyileştirmektir. Bununla birlikte, bu sistemler, uygun bir performans elde etmek için çok özel tasarımlar gerektirdiklerinden, tasarım süreçlerinde ve FDM seçiminde zorluklar çıkarmaktadır. FDM'lerin yapı içerisinde fonksiyonel olması ve iklimlendirme çalışmalarında verim sağlaması için göz önüne alınması gereken birçok ölçüt vardır. İklim koşullarına uygun erime noktasına sahip FDM seçimi, FDM'nin uygulanacağı yapı detayı içerisindeki konumu, miktarı, kapsülleme yöntemi gibi detaylar, yapının kullanım sürecindeki verimliliğini etkileyen önemli kararlardır. Bu kararların doğru alınması tasarım aşamasında atılacak doğru adımlarla mümkündür. Öngörülen farklı çalışma koşulları için (hava koşulları, binanın kullanımı ve kullanıcı sayısı, vb.), FDM'nin davranışı değişebilmekte ve faz değişim sıcaklığı artık uygun olmayarak faydalarını azaltabilmekte ve hatta ortadan kaldırabilmektedir. Bu sebeple pasif iklimlendirme uygulamalarında FDM'lerin fonksiyonel olması ve tasarımda doğru kararlar alınması için enerji simülasyon araçları gerekmektedir.

Bu sayede yapıları gerçek koşullarda uzun süreçte denemektense, bu kararları simüle ederek seçenekleri önceden görmek mümkündür.

Tablo 1. Karşılaştırma Tablosu

Bina Tipi	FDM	Gizli Isı kJ/kg	Erime noktası °C.	Uygulama detayı	Simülasyon programı	Sonuç	Referans
Test odası	Mikrokapsüllü ve makrokapsüllü	Mevcut değil	23-26	FDM enerji depoları ve FDM'li duvar elemanları	TRNSYS (Tip 240-241)	Simülasyon ve ölçümler arasındaki karşılaştırma çok iyi bir korelasyon göstermiştir.	[22]
Konut yapısı	Makrokapsüllü	200	20-27	İç duvarlar, dış duvar	TRNSYS	Yıllık soğutma yükünde maksimum % 0.8-15.8 oranında tasarruf sağlanmıştır.	[23]
Ofis yapısı	Mikrokapsüllü	175	25	Duvar elemanı	TRNSYS 17	Isıtma ve soğutma yüklerindeki azalmalar sırasıyla % 1.54 ve % 5.90'dır.	[24]
Konut yapısı	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	21-25	Havalandırma	TRNSYS ve MATLAB	Havalandırmaya bağlanan FDM sistemi ile evdeki termal konfor, 4 iklimde de önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Lyon ve Trappes'te yazın aşırı ısınmanın görüldüğü saat dilimlerinde düşüş görülmüştür. Bu sonuçlara ulaşmak için havalandırma sisteminde 700 kg FDM kullanılmıştır.	[25]
Tarihi bina	Belirtilmemiş	175	26-29	İç duvarlar	Energy Plus	Enerji talebi FDM kalınlığının artmasıyla azalmıştır. FDM, tüm soğutma mevsimi boyunca, tüm Akdeniz ülkeleri için aynı verimi göstermemiştir.	[26]
Konut binası	Mikrokapsüllü	70	21.7	Farklı FDM konumları için parametrik analiz	Energy Plus	FDM kullanılarak ısı kazançlarında % 21-32 azalma sağlanmıştır.	[27]
Kübik model	Belirtilmemiş	223	28	Dış duvar	Energy Plus	FDM tüm yıl boyunca % 21-32 aralığında ısı kazanımlarını etkili bir şekilde azaltmıştır.	[28]
Konut binası	BioPCM ve Parafin	200 ve 107.5	23	İç duvar	Energy Plus	İç mekan ve duvar sıcaklığı dalgalanmaları sırasıyla 1.4°C ve 2.7°C azalmıştır. Kış koşullarında ısıtma enerjisi talebi % 57'ye kadar düşmüştür.	[29]
Konut binası	Belirtilmemiş	80	20-22	Dört duvar ve tavanın iç yüzeyi	ESP-r	FDM varlığının oda sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi vardır.	[30]
Konut binası	Mikrokapsüllü	119	26.5	Çatı katı yalıtımı	ESP-r	2-A, 1-A'dan daha düşük bir soğutma yüküne sahiptir. 1-A, % 3.1, 2-A % 5.6 soğutma yükü tasarrufu sağlamıştır.	[31]
Pasif güneş enerjisi binası	Belirtilmemiş	45	21, 24, 27 ve 30	Alçıpan duvar	ESP-r	FDM alçı panellerinde depolanan güneş enerjisinin ısıtma enerjisi ihtiyacını % 90'a kadar azaltmıştır.	[32]
Tek hücreli bina	DalHSM	80	19-20	Belirtilmemiş	ESP-r ve MATLAB	Oda sıcaklığı FDM sıcaklık aralığının dışında olduğunda, hem düzeltici şema hem de ESP-r modeli benzer sonuçlar vermiştir. Faz değişim sıcaklık aralığı içinde, Fourier ve Biot numaralarına bağlı olarak farklılıklar görülmüştür.	[33]
Test odası	Mikrokapsüllü (Micronal PCM)	330	26	Alçıpan duvar	PCM Express	FDM, iç sıcaklığı önemli ölçüde korumuş ve enerji tasarrufu sağlamıştır. Ancak kullanımı tüm durumlar için uygun maliyetli bir çözüm değildir.	[34]

Simülasyon araçlarının kullanılmasının deneysel çalışmalara göre birçok avantajı vardır.

- Simülasyonlar çok büyük ölçeklerde deney yapılması ihtiyacını ortadan kaldırarak, yüksek maliyetler açısından tasarruf sağlamaktadır.
- Gerçek koşullarda yapılan deneyler çok uzun süreceğinden simülasyonla yapılan analizlerde zamandan tasarruf sağlanarak kısa sürede veri almak mümkündür.
- Deneysel çalışmalarda güneş radyasyonu, hava sıcaklığı, rüzgâr hızı gibi iklimsel faktörleri kontrol etmek zor olabilmekte, bu da sonuçları etkileyebilmektedir.
- Deneylerde ayrıca doğru cihazların kullanılması önemli bir konudur. Kalibrasyonu doğru yapılmayan cihazlar yanlış sonuçlara sebep olabilmektedir. Bu da profesyonel bir ekip gerektirmektedir.
- Ayrıca FDM'lerin çok karmaşık geometriler ve doğrusal olmayan ara yüzleri gibi sorunlar, çoğu durumda analitik olarak verimli bir şekilde çözülemeyen sorunlara neden olmaktadır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde bir çok araştırmacının en iyi FDM çözümünü bulmak için enerji simülasyon araçlarından yararlandığı görülmektedir. Genel olarak yapılan çalışmalarda simülasyon sonuçlarının doğruluğu kanıtlanmış ve yazılımların güvenilir olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak, FDM simülasyonundaki histeresiz, aşırı soğutma, doğal konveksiyon ve yaşlanma gibi diğer önemli sorunlar çözülmeyi beklemektedir. Bu sorunların simülasyon programlarına doğru bir şekilde dahil edilmesi gerekmektedir. Yazılım araçlarının en yeni sürümlerinde yenilikler yapılmış ve ilerlemeler kaydedilmiş olsa da hala eksiklikler mevcuttur.

Bilgilendirme

Bu makale 15-16 Ocak 2020 tarihinde İzmir'de gerçekleştirilen "Uluslararası Ege İnovasyon Teknolojileri ve Mühendislik Bilimleri Sempozyumu" adlı kongrede sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

Bu çalışma derleme bir makale olup, Etik Kurul Onay Belgesi gerekmemektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Dokuz Eylül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2019.KB.FEN.020 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Yılmazoğlu, M. Z., Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması, *Politeknik Dergisi*, 13,1, 33-42, 2010.
- [2] Konuklu, Y., Paksoy, H., Faz Değiştiren Maddeler ile Binalarda Enerji Verimliliği, 10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 919-930, 2011.
- [3] Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H.O., Charvat, P., Review on Using Microencapsulated Phase Change Materials (PCM) in Building Applications, *Energy Build.*, 106, 134–155, 2015.
- [4] Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Ve Mehling, H., Review on Thermal Energy Storage With Phase Change Materials, *Heat Transfer Analysis and Applications, Applied Thermal Engineering*, Vol.23, 251-283, 2003.

- [5] Mishra, A., Shukla, A., Sharma, A., Latent Heat Storage Through Phase Change Materials, *Resonance*, 532-541, 2015.
- [6] Casini, M., Smart Materials and Nanotechnology for Energy Retrofit of Historic Buildings, *Journal of Advances in Civil, Structural and Construction Engineering, Csce*, 1, 3, 88-97, 2014.
- [7] Hesaraki, A., Holmberg, S., Haghghat, F., Seasonal Thermal Energy Storage with Heat Pumps and Low Temperatures in Building Projects—A Comparative Review., *Renew Sustain Energy Rev*; 43:1199–213, 2015.
- [8] De Gracia, A., Cabeza, L.F., Phase Change Materials and Thermal Energy Storage for Buildings. *Energy Build.*, 2015.
- [9] Salunkhe, P. B., Shembekar, P. S., A Review on Effect Of Phase Change Material Encapsulation on the Thermal Performance of a System Renew. *Sustain. Energy Rev*; 16, 5603–16, 2012.
- [10] Mahlia T.M.I, Saktisahdan T.J, Jannifar A.,Hasan M.H, Matseelar H.S C., A Review of Available Methods and Development on Energy Storage; *Technology Update. Renew Sustain Energy Rev*; 33:532–45, 2014.
- [11] Cabeza, L.F, Barreneche, C., Martorell, I., Miró, L., Sari-Bey, S., Fois, M., Unconventional Experimental Technologies Available for Phase Change Materials (PCM) Characterization. Part 1. Thermophysical Properties. *Renew Sustain Energy Rev*, 2014.
- [12]Kos'ny, J., PCM-Enhanced Building Components - An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [13] Klein, S.A., TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, 2011. (<http://www.trnsys.com/>)
- [14] Tokuç A., Bina Enerji Benzetim Araçları Ve Seçim Ölçütleri, *Dokuz Eylül Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5,3, 2009.
- [15] Li, G., Energy and Exergy Performance Assessments for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems. *Renew Sustain Energy Rev*; 51, 926–54, 2015.
- [16] Kelly N.J., Towards A Design Environment for Building-Integrated Energy Systems: The Integration of Electrical Power Flow Modelling with Building Simulation, Phd Thesis, Glasgow: University of Strathclyde, UK, 1998.
- [17] Orhon, A. V., Altın, M., Mimari Sürdürülebilirlik için Bir Değerlendirme Aracı Olarak Benzetim, *Tesisat Mühendisliği*, 158, 5-13, 2017.
- [18] Ellis, P.G., Torcellini, P.A., Crawley, D.B., Simulation of Energy Management Systems in Energyplus. *Build Simul* 2007,1346–53, 2007.
- [19] Crawley, B.D.B., Lawrie, L.K., Energyplus: Energy Simulation Program. *ASHRAE*, 42,49–56, 2000.
- [20] Crawley, D.B., Hand, J.W., Kummert, M., Griffith, B.T., Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs. *Build. Environ.* 43,661–73, 2008.
- [21] Zöller, A., Jung, M., Schmidt, M., Brenner, T., Gatzka, B., Schossig, P., Haussmann, T. Abschlussbericht Zum Verbundforschungsvorhaben, Aktive Latentspeichersysteme Für Gebäude. Fraunhofer ISE, Gemeinsamer Bericht Aller Projektteilnehmer In Den Teilprojekten 0327370G-K, 0327370S, 2008.
- [22] Schranzhofer, H., Puschnig, P., Heinz, A., Streicher, W., Validation of a TRNSYS Simulation Model for PCM Energy Storages and PCM Wall Construction Elements. In: *Proceedings of ECOSTOCK 2006—10th International Conference on Thermal Energy Storage*. Pomona, NJ, 2006.
- [23] Al-Saadi, S.N., Zhai, Z., Modeling Phase Change Materials Embedded in Building Enclosure: A Review. *Renew Sustain Energy Rev*, 21, 659–73, 2013.

- [24] Plytaria, M. T., Tzivanidis, C., Bellos, E., Alexopoulos, I., and Antonopoulos, K. A., Thermal Behavior of a Building with Incorporated Phase Change Materials in the South and The North Wall, *Computation*, 7,2, 2019.
- [25] Borderon, J., Virgone, J., and Cantin, R. (2015). Modeling and Simulation of a Phase Change Material System for Improving Summer Comfort in Domestic Residence. *Applied Energy*, 140, 288–296.
- [26] Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R.F., De' Rossi, F., Vanoli, G.P., Energy Refurbishment of Existing Buildings Through the Use of Phase Change Materials: Energy Savings and Indoor Comfort in The Cooling Season. *Appl Energy*, 113,990–1007,2014.
- [27] Chan, A.L.S., Energy and Environmental Performance of Building Facades Integrated with Phase Change Material in Subtropical Hong Kong. *Energy Build.*, 43,2947-55, 2011.
- [28] Lei, J., Yang, J., Yang, E-H., Energy Performance of Building Envelopes Integrated with Phase Change Materials for Cooling Load Reduction in Tropical Singapore. *Appl. Energy*;162,207-17, 2016.
- [29] Nghaana, B., Tariku, F., Phase Change Material's (PCM) Impacts on the Energy Performance and Thermal Comfort of Buildings in a Mild Climate. *Building and Environment*, 2016
- [30] Almeida, F., Zhang, D., Fung, A.S., Leong W. H., Investigation of Multilayered Phase-Change-Material Modeling in ESP-R, International High Performance Buildings Conference, 2010.
- [31] Košny, J., Fallahi, A., Shukla, N., Kossecka, E., Ahbari, R., Thermal Load Mitigation and Passive Cooling in Residential Attics Containing PCM-Enhanced Insulations. *Sol Energy* 108,164-177, 2014.
- [32] Heim, D., Clarke, J.A., Numerical Modeling and Thermal Simulation of PCM–Gypsum Composites with ESP-R. *Energy Build* 36,795-805, 2004.
- [33] Almeida, F., Zhang, D., Fung, A.S., Leong W. H., Comparison of Corrective Phase Change Material Algorithm With Esp-R Simulation, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November, 2011.
- [34] Rodríguez -Ubiñas, E., Cronemberger, J., Vega Sánchez, S. and García-Santos, A. Performance of Passive Application of Pcm in Spain, *Researchgate*, 2010.