



**Bu bir MMO
yayıdır**

MMO bu yayındaki ifadelerden, fikirlerden, toplantıda çıkan sonuçlardan, teknik bilgi ve basım hatalarından sorumlu değildir.

DÜZ ÇATILARDA GİZLİ ENERJİ DEPOLAMA POTANSİYELİNİN İZMİR ÖRNEĞİ BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

AYÇA TOKUÇ
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

TAHSİN BAŞARAN
İZMİR YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

CENGİZ YESÜGEY
DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ

DÜZ ÇATILARDA GİZLİ ENERJİ DEPOLAMA POTANSİYELİNİN İZMİR ÖRNEĞİ BAĞLAMINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

Ayça TOKUÇ
Tahsin BAŞARAN
Cengiz YESÜGEY

ÖZET

Yapının ısı gereksinimlerini sadece mimari elemanları kullanarak karşılamak günümüzde mümkün değildir. Tamamen pasif yapıların tasarlanabilmesi ve uygulanabilmesi, ancak yapı malzemeleri ve bir araya geliş özellikleri üzerine yapılan araştırmaların artırılması ile olasıdır. Bu noktada, malzeme teknolojilerinde ortaya çıkan yenilikler, yapı elemanlarında gerek kullanılan malzemelerde gerekse elemanların detaylandırılmasında çeşitliliği ve yeni olanakları beraberinde getirmektedir. Bunların arasında yaygın olarak kullanılmamakla birlikte faz değişim malzemeleri (FDM) de bulunmaktadır. FDM, sabit bir sıcaklık aralığında eriyip katılaştır ve faz değiştirdiği sıcaklık aralığında geleneksel yapı malzemelerinden daha fazla ısı kapasiteye sahiptir. Yapı kabuğunda FDM kullanılması sayesinde güneş enerjisinin gizli ısıya çevrimi gerçekleşmekte ve elemanın ısı yalıtım özelliği iyileştirilmektedir. Bu çalışmada, FDM'lerin yapı kabuğu elemanlarında kullanılmasına yönelik bir yöntem geliştirilerek İzmir ilinde düz çatılarda FDM kullanılması ile enerji depolama kapasitesinin artırılmasının yaz döneminde iklimlendirilen bir mekana getireceği potansiyel katkılar deneysel çalışma ve benzetim yöntemiyle araştırılmıştır. Çalışmada, öncelikle kurulan deneysel düzenek yardımıyla ANSYS Fluent modeli doğrulanmış, ardından İzmir ilinde tipik bir düz çatı elemanında farklı kalınlıklarda 27°C faz değişim sıcaklığına sahip FDM eklenmesi modellenmiştir. Sonuçta, değerlendirilen FDM'nin bu kullanım için uygun olmadığı, ancak bu yöntem kullanılarak farklı FDM ve detayların değerlendirilebileceği ortaya konmuş ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Gizli ısı depolama, Isıl enerji depolama, Faz değişim malzemesi, Çatı.

ABSTRACT

Meeting the thermal requirements of buildings just by using architectural elements is not possible today. The design and implementation of completely passive buildings would only be possible with more research on building materials and how they come together. At this point, innovations in materials technologies including new building materials as well as diversity in their detailing bring new opportunities. These include the use of uncommon materials such as phase change materials (PCM). PCM solidifies and melts at a small temperature range thus in its phase change range PCM has a higher thermal capacity than conventional building materials. Through the use of PCM in the building envelope, solar energy can be transformed into latent heat and thermal insulation of the element would be improved. In this study, a method for utilizing PCM in the building envelope was developed and the potential contributions of increasing the energy storage capacity in the flat roof of a conditioned space by using PCM during summer was investigated by experimental and simulation methods. In this study, first ANSYS Fluent model was validated by the experimental setup, later the addition of different thicknesses of PCM with 27 °C phase change temperature was modeled in a typical flat roof element in İzmir. Consequently, the evaluated PCM was found unsuitable for this

usage, however different PCM and detailing can be evaluated using this methodology and suggestions were made for future studies.

Key Words: Latent heat storage; Thermal energy storage, Phase change material, Roof.

1. GİRİŞ

Faz Değişim Malzemeleri (FDM'ler) dar bir sıcaklık aralığında eriyip katılaşılarak, bu aralıkta gizli enerji depolama sayesinde duyulur enerji depolamadan daha fazla enerji depolayabilirler. FDM'lerin yapı elemanlarına eklenmesi ile güneş enerjili sistemlerdeki bu sorunun çözümüne dönük bir alternatif geliştirilebilmektedir. Aynı zamanda binanın ısı kapasitesinin artırılması ile iç ortam sıcaklık dalgalanmalarının azaltılarak insan konforunun da artırılması sağlanacaktır. 1970'lerden beri inşaat sektörü üzerine yapılan çalışmalar ile daha kullanılabilir hale getirilen FDM'ler sahip oldukları potansiyele rağmen, halen yaygın yapı malzemeleri olarak kullanılmamaktadır [1]. Bunun nedenleri arasında teknolojinin gelişmekte olmasıyla beraber uygulamada FDM'nin hatalı seçimi veya detaylandırılması durumlarında FDM'nin kullanım amacına ve potansiyeline ulaşamaması ve dolayısıyla binada arzulan konfor artımı veya ekonomik beklentinin karşılanamaması yer almaktadır.

FDM'nin yapıya eklenmesinin getireceği katkı; iklim, yapının kullanım gereksinimleri, FDM'nin enerji depolama kapasitesi, FDM hal değişim sıcaklığı, FDM kullanılan yapı elemanının tasarımı, FDM kullanılan ortamın güneşe yönelimi vb. değişkenlere bağlıdır. Yapıda FDM kullanımı ile en fazla katkının sağlanabilmesi, sözü edilen bu değişkenlerin en uygun değerlerinin belirlenmesi ile olasıdır. Bu amaçla bazı araştırmacılar tarafından FDM'ler [2-4], FDM-yapı elemanı birleşim şekilleri [5-9], FDM kullanılan yapı kabuklarının özellik, davranış ve başarımlarının değerlendirilmesi [10-15], FDM ile desteklenmiş iklimlendirme sistem uygulamalarının getirileri [16-19] ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır ve pek çoğu da devam etmektedir. Bunların arasında, binaların tasarım aşamasında, FDM'li yapı elemanının yapıya getirebileceği katkının modellenmesi yapı uygulamalarında ve tasarımında önemli bir yol göstericidir [20-25].

Bu çalışmada, üzerinde yürünen bir teras çatı yapı elemanına 27°C faz değişim sıcaklığına sahip bir FDM katmanı eklenerek oluşturulan yapı bileşeninin sayısal ve deneysel analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için 50 cm x 50 cm boyutlarında çatı katmanlarından oluşan bir model laboratuvar koşullarında oluşturulmuş ve deneysel çalışma için kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarının sayısal model ile uyumu araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre İzmir ilinin iklimsel verileri kullanılarak yaz dönemi için zamana bağlı benzetim gerçekleştirilerek ortaya konulan yapı elemanında uygun FDM kalınlıkları araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

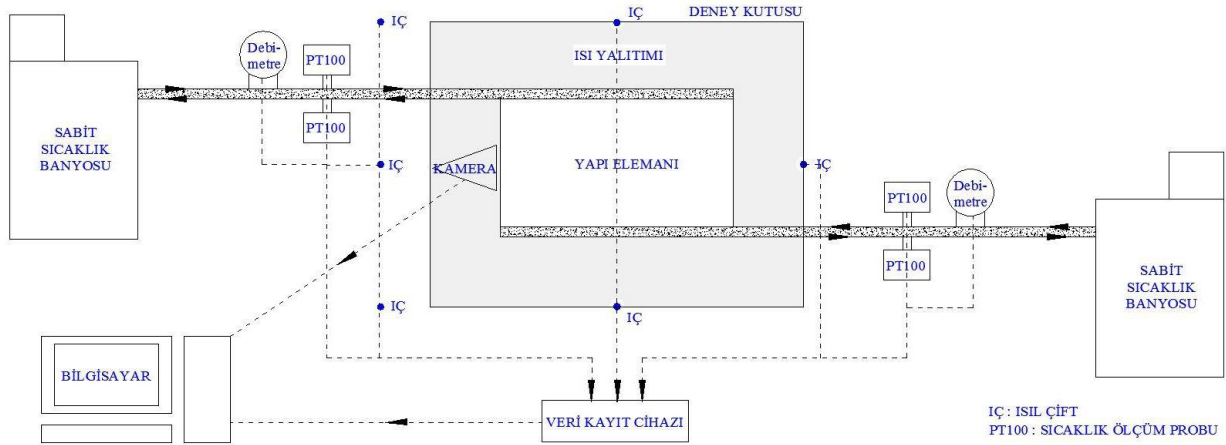
Yapı elemanı özelliklerini yansıtabilmek için, 50 cm x 50 cm boyutlarındaki bir detay üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu detay, ortamdaki yalıtılmış bir kutu içine yerleştirilir ve elemana gerçekte karşılaşılabileceği ısı sınır koşulları deneysel ortamda uygulanır. İki adet sabit sıcaklık banyosunda şartlandırılan su, bakır borular ile yapı elemanına gönderilmektedir. Bu sayede eleman içinde yer alan FDM'nin katılaşması ve erimesi sağlanmaktadır. Sistemin gereken noktalarından sıcaklık (ısı çift ve dirençsel sıcaklık algılayıcıları -PT 100- ile) ve sisteme giren/çıkan suyun hacimsel debi ölçümleri (debimetre ile) yapılır. Gelen veriler veri toplayıcıdan bilgisayara aktarılarak depolanır. Benzer şekilde FDM'yi gözlemleyen kamera verileri de bilgisayara aktarılır. Deneysel düzenek Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir.

Deneyde kullanılan başlıca cihazlar ve özellikleri şu şekildedir:

Sabit Sıcaklık Banyosu_üst; hacim 6 litre, ısıtma kapasitesi 800 W, soğutma kapasitesi 20°C'de 200 W - 0°C'de 140 W, çalışma sıcaklık aralığı -40°C ile 100°C, hacimsel akış 15 l/dk, sıcaklık stabilitesi $\pm 0,05$ °C, okuma doğruluğu $\pm 0,5$ °C.

Sabit Sıcaklık Banyosu_alt; hacim 8 litre, ısıtma kapasitesi 800 W, soğutma kapasitesi 20°C'de 200 W - 0°C'de 140 W, çalışma sıcaklık aralığı -20°C ile 100°C, hacimsel akış 15 l/dk, sıcaklık stabilitesi $\pm 0,05$ °C, okuma doğruluğu $\pm 0,5$ °C.

Sıcaklık Ölçme Sensörü; PT-100, Rodyum platin/Platin (Pt-Rh/Pt), çalışma aralığı -50 ile +150°C, kablo 3 m.



Şekil 1. Deneysel düzeneğin şeması.

Debimetre; Elektromanyetik, Elektrotları CrNi (paslanmaz) çelik 1.4571 ve Hastelloy C276, hassasiyeti 0,5-10 m/s okuma aralığında %0,5, 0,1-0,5 m/s okuma aralığında %1.

Veri Toplayıcı; Markası Agilent 34972, LXI, Yuva sayısı (slot) 3, Dijital Multimetre dahili 6,5-digit DMM (22- bit), hassasiyet $\pm 0,001$ °C, 1 GB LAN veya USB 2.0 ile bilgisayar bağlantısı, grafik web ara yüzü ve veri kayıt yazılımı

Deney sırasında yapı elemanı, 1,8 cm kalınlığında sıkıştırılmış ahşap levhadan üretilmiş ve tüm yüzeyleri çepeçevre 15 cm kalınlığında (5 adet 30 mm) düz yüzeyli ekstrüde polistren (XPS) sert köpük ile yalıtılmış bir kutunun içinde bulunmaktadır. Kutunun ön ve üst parçaları düzeneğin esnekliğini sağlamak amacıyla sökülüp takılabilir üretilmiştir.

Sisteme enerji giriş çıkışı, sabit sıcaklık banyosu ile şartlandırıldıktan sonra, sistemde dolaştırılan akışkanlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Üst yüzeyde dış ortamı temsil eden, alt yüzeyde ise iç ortamı temsil eden sıcaklık koşulları sağlanmaktadır. Şartlandırılan akışkan, incelenen yapı bileşenine ısı iletkenliği yüksek 10 mm iç çapında (et kalınlığı 1,5 mm) bakır borularla taşınmaktadır. Deneylerde ısı transfer akışkanı olarak su kullanılmıştır. Düzeneğe verilen enerjinin yapı elemanı yüzeyine eşit dağılımını sağlamak amacıyla borular, serpantin biçimde bükülerek yerleştirilmiştir.

Deney kutusunun dışında yer alan bakır borular, 1cm et kalınlığına sahip kauçuk esaslı poliüretan boru kaplaması ile yalıtılmıştır. Ayrıca 4 adet PT-100 tipi prob, ısı transfer akışkanının giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Akışkanın sıcaklığı ölçüldükten sonra ısı kayıplarını mümkün olduğunca aza indirmek amacıyla, PT-100'lerle deneysel hücre arasında, bakır boruların etrafına 6 cm kalınlığında taşyünü ısı yalıtımı eklenmiştir.

Kullanılan tüm ısı çiftler T tipidir (bakır-konstantina). Isıtma ve/veya soğutma sırasında, hücre içinde simetriyi ölçmek amacıyla, yapı elemanı içindeki ısı çiftler (İÇ) hücrenin ortasından geçen bir düzleme göre simetrik olarak yerleştirilmiştir. Kullanılan toplam 31 adet ısı çiftin üçer adeti deney düzeneğinin bulunduğu ortam sıcaklığını ve deney düzeneğinin dış yüzey sıcaklıklarını ısı kayıplarının bulunması için ölçmekte; diğer ısı çiftler ise Tablo 1'de verilen yapı elemanları ara yüzeylerini ölçmekte

kullanılmaktadır. Buna karşılık faz değişim malzemesinin ısıl davranışının gözlenmesi için 11 adet ısıl çift, 5'er mm aralıklı olarak yerleştirilmiştir.

Sıcaklık algılayıcılarının milivolt cinsinden çıktıları veri toplama sistemi tarafından kaydedilmektedir. Bu birim, milivolt girdilerini $\pm 0,001^\circ\text{C}$ hassasiyetle santigrat derece cinsine çevirir. Sıcaklık algılayıcılarının kalibrasyonu, kullanılan veri toplayıcı ile beraber TMMOB Makina Mühendisleri Odası Ege Kalibrasyon Laboratuvarı ve Metroloji Eğitim Merkezi laboratuvarında yapılmıştır. Ayrıca katı-sıvı ara yüzeyin davranışını gözlemek için bir web kamerası yardımıyla deney süresince fotoğraf çekilmiştir.

Deneyde kullanılan yapı elemanı klasik bir düz teras çatıdır. Katmanlar ve özellikleri Tablo 1'de, deneyde kullanılan yapı elemanının fotoğrafı ise Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Yapı elemanının malzeme özellikleri.

Malzeme veya bileşenin çeşidi	Malzeme Kalınlığı [cm]	Birim hacim kütlesi [kg/m^3]	Isıl iletim katsayısı [W/mK]	Su buharı difüzyon direnç faktörü [μ]
Seramik	0,9	1.750	1,3	40/50
Yapıştırma harcı	0,9	2.000	1,6	13/35
Donatısız beton	5	2.200	1,65	70 / 120
Su yalıtımı	1	1.200	0,19	1400
XPS levha	6	(≥ 25)	0,035	80-250
FDM	5		0,2	
Donatılı beton	10	2.400	2,50	80 - 130



Şekil 2. Deneyde kullanılan yapı elemanı.

Deneysel çalışmalara başlamadan önce sistemden 25°C 'de koşullandırılmış akışkan geçirilmiş ve tüm sistemin 25°C sıcaklıkta dengeye gelmesi beklenmiştir. Tüm deneyler sırasında laboratuvar ortam sıcaklığı da 25°C ye set edilmiştir, böylece sistemden ısı kayıpları azaltılmıştır. Düzenek öncelikle, seçilen standart yapı elemanı (FDM olmayan) detayı için çalıştırılmış, sıcaklık ölçümleri ve hesaplarla sistemde enerji dengesinin sağlandığı gözlenmiştir. Bununla beraber detayın duyulur ısı kapasitesi ve sistem kayıpları hesaplanmıştır. Sonra düzeneğe FDM yerleştirilmiştir. Detayda iç yüzey sıcaklığı

25°C, dış yüzey sıcaklığının 40 °C olması sağlanarak ölçümler yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri ile beraber gözlemlene ve fotoğraflama ile irdelenen yapı elemanının ısı davranışı, hesaplar ve grafikler yardımıyla elde edilmiştir. Ayrıca elemanın gizli ısı depolama kapasitesi gözlenmiştir. Tekrarlanan deney ile örtüştürülmesi sonucunda, iki deney arasında % 2,45 enerji farkı hesaplanmıştır. Dış yüzey sıcaklığı farklı sıcaklıklar alınarak çalışma 50 °C ve 60 °C üst yüzey sıcaklıkları için tekrarlanmıştır.

3. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu çalışmada sonlu hacim yöntemi ile hesap yapan ANSYS Fluent yazılımı kullanılmıştır [26]. Bu yöntemde tanımlanan geometri, kontrol hacimlerine bölünerek her bir kontrol hacmini temsil eden denklemler çözülür. Burada sırasıyla ağ içerisine akışı tanımlayan eşitlikler entegre edilir, integral eşitlikler ayrıştırılarak cebirsel eşitliklere dönüştürülür ve cebirsel eşitlikler iteratif yöntemlerle çözülür. Çözülen temel denklemler kütle, enerji ve momentum korunumunu kapsar [27].

Fluent analizi, bir yüzeyde koşullandırılan, diğer yüzeyde ise ortam koşulları etkisi altında kalan bir levha eleman özelinde gerçekleştirilmektedir. Analizi basitleştirmek amacıyla, yapı elemanındaki ısı aktarımının tek boyutlu olduğu, kullanılan malzemelerin termofiziksel özelliklerinin sabit olduğu, sadece PCM'nin faz değişimi sırasında özgül ısı değerinin değişkenlik gösterdiği kabulleri yapılmış ve erime sürecinde PCM'deki doğal taşınım ve donma sürecinde süper soğuma etkileri ihmal edilmiştir.

Öncelikle akıllı geometri ve ağ yapım araç kiti (GAMBIT) yardımıyla geometri ve ağ oluşturulur, bölgeler katı ve sıvı olarak tanımlanır, sınır koşulları duvar olarak belirtilir ve Fluent'in okuyabileceği iki boyutlu ağ geometrisi cinsine çevrilir. Hesapların hızlı yapılabilmesi için yatayda 10 cm genişliğinde Yapı kesiti geometrisi oluşturulmuştur. Ağın kalitesi çözümlerin de kalitesini etkilediğinden ağ boyutlarına karar vermeden üç farklı ağ boyutuyla çalışılmıştır. Sonuçta FDM dışındaki malzemelerde 0,5 cm x 0,5 cm, FDM'de ise 0,5 cm x 0,2 cm'e karar verilmiştir.

Malzeme özellikleri Tablo 2'deki gibi tanımlanmıştır. FDM, geometride 5 cm kalınlığında tanımlanmıştır. Bu durumda kütlede değişiklik olmaması için hem katı hem de sıvı durum için üretici firma tarafından sıvı için verilen birim hacim kütle değeri kullanılmıştır. Erime ve donma döngülerinde FDM'nin farklı davranış göstermektedir ve faz değişim sıcaklıkları da bundan etkilenmektedir. FDM tanımlanırken faz değişiminin 25,72 °C ile 26,22 °C arasındaki 0,5 °C'lik küçük bir aralıkta gerçekleştiği ve gizli ısının sadece bu sıcaklık aralığında etkisi olduğu varsayılmıştır. Alınan gizli ısı değeri 139000 J/kg'dır, duyulur ısı değeri ise 2400 J/kgK'dir. Bu durumda faz değişiminin meydana geldiği 25,72 °C ile 26,22 °C arasında, FDM'ye hem duyulur hem de gizli ısı etki etmektedir. Kullanılan gizli ısı değeri, ticari olarak verilen 184 kJ/kg'dan yaklaşık 45 kJ/kg daha düşüktür, ancak deney ölçümleri ile uyum göstermektedir ve Sheth Karathia [28] tarafından da diferansiyel taramalı kalorimetre ile ölçülmüştür.

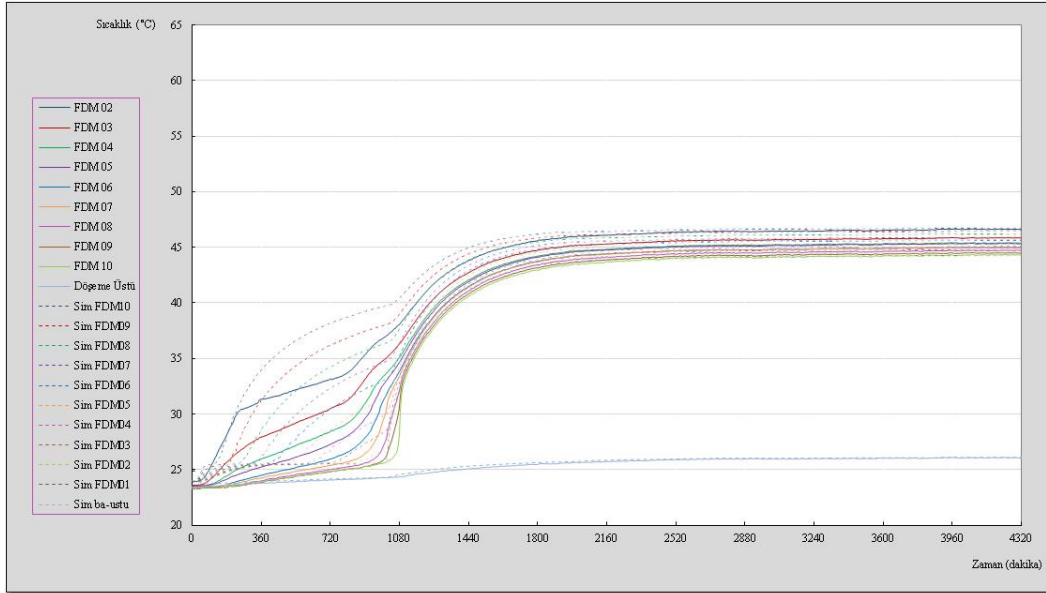
Tablo 2. Fluent'e girilen malzeme özellikleri.

Malzeme veya bileşenin çeşidi	Birim hacim kütlesi [kg/m ³]	Isıl iletim katsayısı W/mK]	Özgül Isı [J/kgK]	Dinamik viskozite [kg/ms]
Seramik (ve yapıştırma harcı)	1.750	1,45	879	
Donatısız beton	2.200	1,1	850	
Su yalıtımı (3 kat)	1.200	0,19	920	
PCM (katı ve sıvı) PCM (faz değişiminde)	760	0,2	2.400 141.400	0,02
XPS levha (2 kat)	25	0,035	1.213	
Donatılı beton	2.400	1,2	920	

Hücre bölge koşulları katı veya sıvı olarak Gambit'te PCM için sıvı, diğer malzemeleri için ise katı olarak belirtilmiştir. Sınır koşulları Gambit'te duvar olarak verilmiştir. Deney düzeneğinin yan yüzeyleri izole edilmiştir. Alt ve üst yüzeylerde ise deneylerde ölçülen sıcaklık değerleri kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak zamana bağlı tanımlanmıştır [29].

Fluent açılırken iki boyutlu, çift hassasiyetli çözücü seçilmiştir. Ağ programa okutulmuştur. Enerji modülü açılmıştır. Çözüm yöntemlerinden enerji için "QUICK" ayrıştırma şeması ve zamana bağlı formüller "first order implicit" olarak seçilmiştir. Yakınsama ölçütü seçiminde dört durum karşılaştırılmıştır ve enerji değerlerindeki 10-10 yakınsama seçilmiştir. Bu işlemlerden sonra çözüm başlatılmıştır. Çözüm sırasında zaman adımı, 300 saniye, sabit kullanılmıştır. Zaman adımı belirlenirken üç değer için benzetim gerçekleştirilmiştir.

50°C Deney sonuçları ile benzetim sonuçları arasında 72 saat için %5,30 fark hesaplanmıştır. Faz değişiminin gerçekleştiği ilk 24 saat için hesaplanan fark ise %5,46'tır. Sonuçlar Şekil 3'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca katmanların ölçülen ve benzetim sonucu hesaplanan sıcaklıklarına bakıldığında en iyi uyuma Betonarme döşeme ile XPS arasında görülmektedir. Burada daha çok duyulur ısının baskın olduğundan kaynaklanmaktadır. Diğer katmanlar ise FDM ile doğrudan temas halindedir ve bu katmanlarda sıcaklık eğrileri benzerlik göstermekle beraber tam örtüşmemektedir.



Şekil 3. Deneyde ölçülen ve benzetimde elde edilen sıcaklık verileri.

Sayısal analiz sonuçları, önerilen Fluent ile modelleme yönteminin doğruluğunu onaylamıştır. Sayısal çalışmada FDM'lerin ulaştıkları son sıcaklıklar ile deneysel ölçümlerde ulaşılan son sıcaklık değerleri arasındaki kısmi farklılıkların olası nedenleri aşağıda sıralanmıştır; Metal kutu ve hava boşluğunun ısı iletim değerlerinin modelde FDM ısı iletim değerine eklenmesinin tercih edilmesi, Analizin tek boyutlu yapılması, FDM sıvı haldeyken FDM'deki doğal taşınım etkisinin ihmal edilmesi, Malzemelerin termofiziksel özelliklerinden kaynaklanan farklılıklar, Seçilen ağ boyutundan kaynaklanan fark, Uzun hesap sürelerinden kaynaklanan sayısal hatalar, FDM'nin katı ve sıvı halleri arasında meydana gelen hacim değişiminin ihmal edilmesi ve Deney düzeneğinde alınan yalıtım önlemlerine rağmen oluşan olası sistem kayıplarının -çok az olmasına rağmen- modelde ihmal edilmesi sayılır. Ancak bu çalışmanın amacı için yeterli uyum sağlanmaktadır.

4. BENZETİM ÇALIŞMASI

DeneySEL olarak ölçülen yapı elemanı ısı davranışı, İzmir ili iklim verilerine göre, 3. Kısımda anlatılan Fluent modeli ile benzetim yöntemiyle yaz durumu için incelenmiştir.

4.1. Benzetim Sınır Koşulları ve Hesap Yöntemi

Benzetimin belirli bir soruna uygulanmasında, sayısal modele verilecek sınır koşulları doğru tanımlanmalıdır. Bu sorunda, dış ortamda, elemanın içindeki iletme ek olarak iklim koşulları için taşınım ve ışınım etkileri de göz önüne alınmıştır. İç ortamda ise, mekan iklimlendirildiği için sabit sıcaklık olduğu var sayılmakta ve taşınım etkisi tanımlanmakta, ışınım etkisi ise ihmal edilmektedir. Buna göre dış yüzey sınır koşulları, iklim koşulları ve yüzey özelliklerini göz önünde bulunduran ve Eşitlik 1'de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$k_i \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \alpha I + \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{gök}^4) + h_{dış} (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Bu eşitlikte,

α : ısı yutma katsayısı [-],

I : yüzeye gelen güneş ışınımı [W/m^2],

σ : Stefan-Boltzmann sabiti [$5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 K^4$],

ε : yayma oranı [-],

$T_{gök}$: gökyüzü sıcaklığı [K], ve

$h_{dış}$: taşınım katsayısı [$W/m^2 K$]’dir.

Burada, α ve ε değerleri kaplama yüzeyi karakteristikleridir. Yüzey sıcaklığı hesaplamasında çatı kaplama malzemesinin emicilik katsayısı için Prado ve Ferreira’nın ölçüm sonuçları [30] kullanılmıştır. I , $T_{gök}$ ve T_∞ iklim koşullarına göre zamana bağlı değişkenlerdir. $T_{gök}$, T_∞ ve çiy noktası sıcaklığına (T_y , K) bağlı olarak, Davies’te verilen Eşitlik 2 ile hesaplanır [31]:

$$T_{gök} = T_\infty \cdot \left(0,8 + \frac{T_y - 273}{250} \right)^{0,25} \quad (2)$$

İklim verileri benzetime, zamana bağlı kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak girilmektedir. $h_{dış}$ ve h_i için, TS-825’ten düz çatı için verilen sabit değer alınmış ve benzetime sınır koşulu olarak girilmiştir [32].

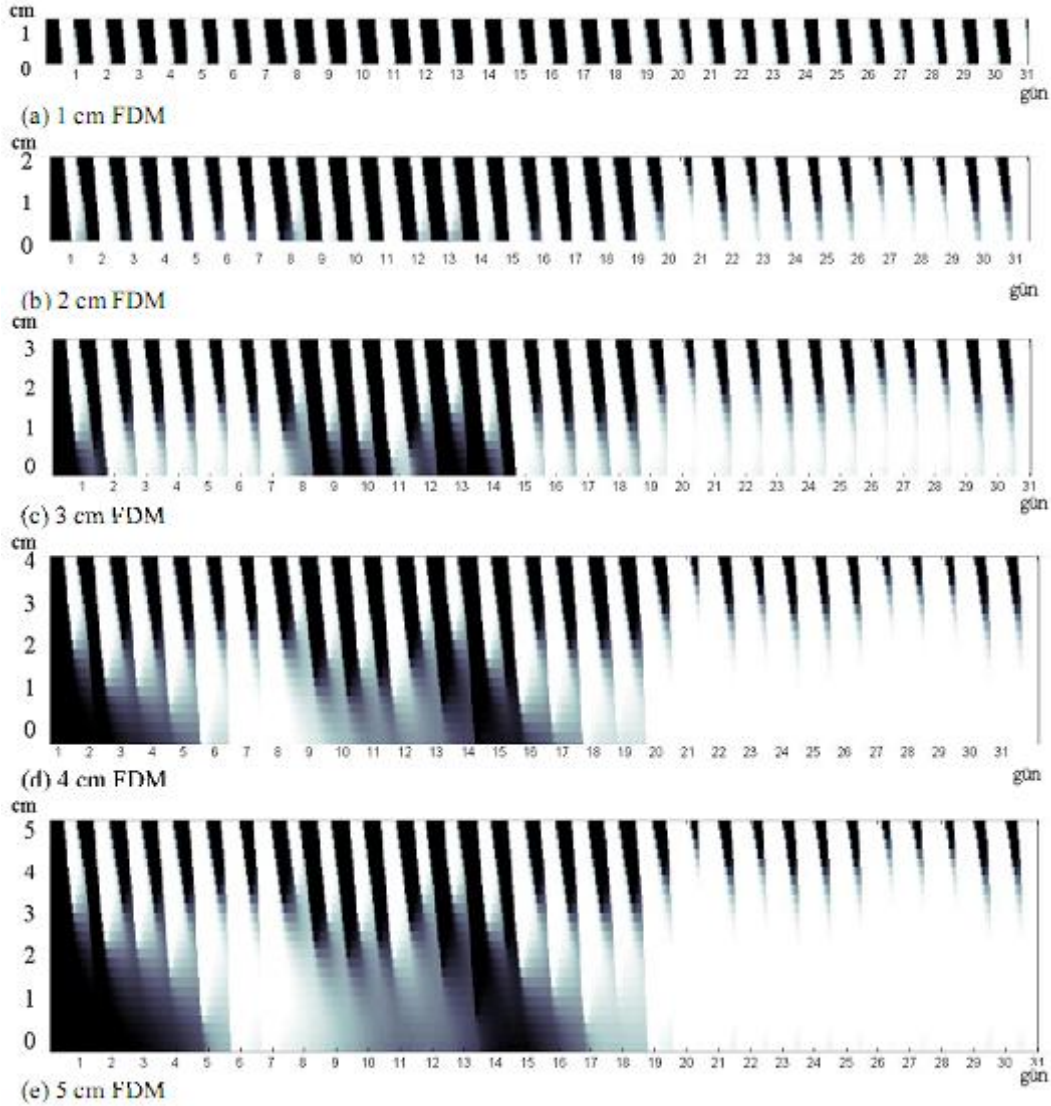
Çatının soğutma yüküne olan etkisinin irdelenmesinde, soğutmanın baskın olduğu Mayıs-Eylül ayları arasındaki 5 ayın benzetimi gerçekleştirilmiştir. Çatının başlangıçtaki sıcaklık koşulları Nisan ayının son 3 gününün çalıştırılması sonucu elde edilmiştir. Benzetimler FDM’siz ve FDM’nin 1, 2, 3, 4 ve 5 cm kalınlığında kullanıldığı detaylar için gerçekleştirilmiştir. Gözlemlenen ana çıktılar ise FDM erime ara yüzü ve çatı elemanının alt yüzeyindeki ısı akısıdır. FDM ara yüzü grafikleri FDM’nin etkinlik gösterdiği zamanı ve kalınlığı, ısı akısı hesapları ise dış ortamdan iç mekana çatıdan giren enerjiyi göstermektedir. Isı enerjisi, birim alandan giren enerji [Wh/m^2] cinsinden verilmektedir.

4.2. İzmir İklim Verileri

İzmir ili $38^\circ 43'$ enleminde, $27^\circ 17'$ boylamında ve deniz seviyesinden 25 metre yükseklikte bulunmaktadır. Genelde Akdeniz iklimi özelliği gösteren İzmir’de kışları ılık ve bol yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak geçer. Yıl boyunca nem oranı fazladır [33]. Ayrıca gündüz ve gece sıcaklık farkı çok fazla değildir [34]. İzmir körfez havzasında yaz aylarında kuzey rüzgarları hakimdir.

4.3. Benzetim Sonuçları

Bu iklim verilerini girdi olarak kullanarak Mayıs-Eylül ayları arasında benzetim gerçekleştirilmiştir. Farklı FDM kalınlıkları için FDM'nin erime katılaşma döngüsü, İzmir'de Mayıs ayı boyunca yapılan benzetim sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Burada 1 cm kalınlıkta FDM'de her gün erime-katılaşma tamamen gerçekleşirken, 3 cm FDM'de ayın ilk yarısından sonra tam katılaşmanın neredeyse gerçekleşmediği görülmektedir. 5 cm FDM kullanılan durumda ise, ayın 18'inden sonra FDM'nin yaklaşık üst 2 cm'lik kısmında erime-donma gerçekleşmekte, kalan kısmı ise sürekli sıvı halde kalmaktadır. Şekil 4'den bir aydaki FDM davranışını yorumlamak için 5 cm FDM'li grafiğin tek başına yeterli olduğu görülmüştür. Mayıs-Eylül ayları arasında 5 cm'lik FDM sonuçları Şekil 5'de verilmiştir.

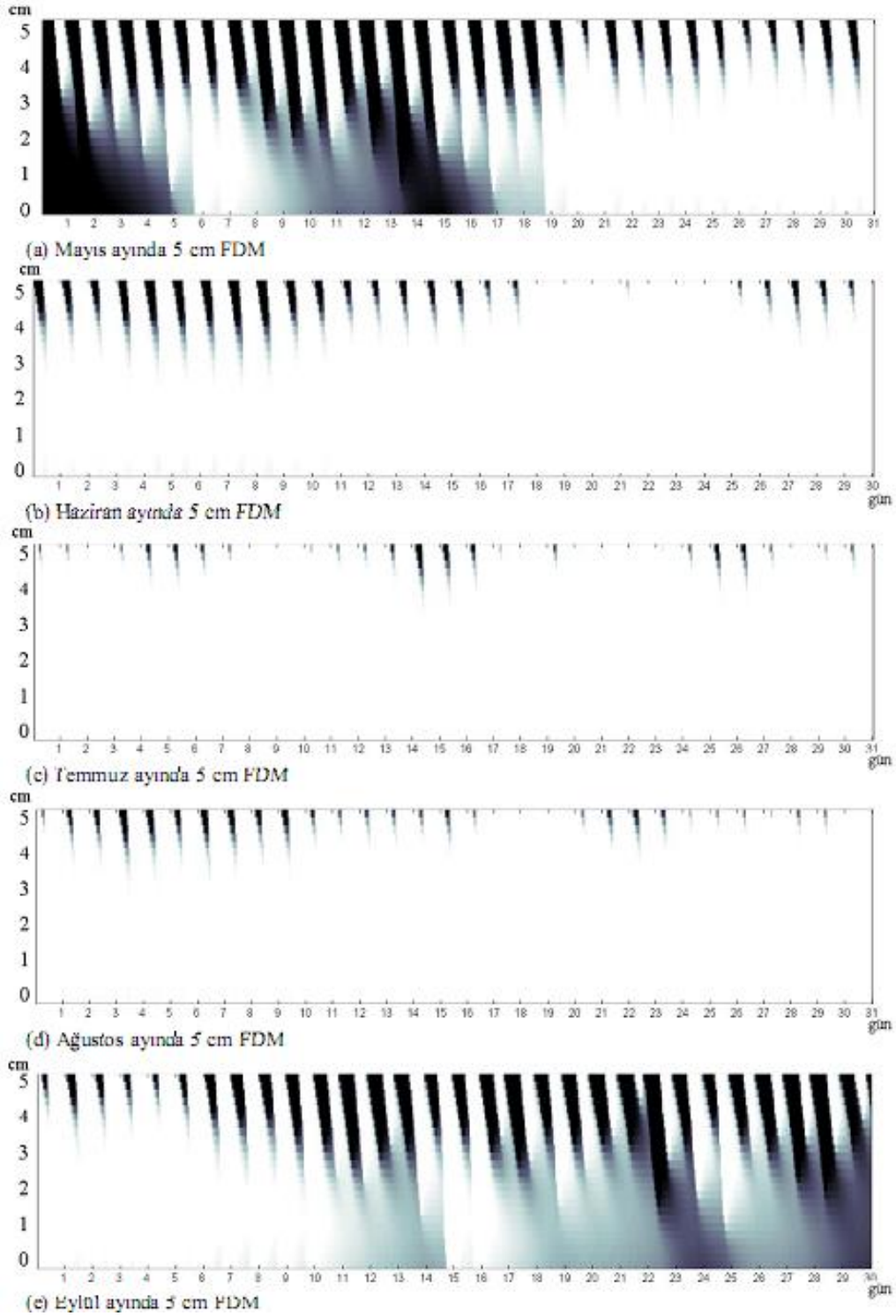


Şekil 4. İzmir'de Mayıs ayında FDM'nin katı (siyah)-sıvı (beyaz) durumu

FDM'nin ısı enerjisi depolama için toplam kapasitesi, mevcut FDM miktarına olmakla birlikte FDM'nin ısı depolama kapasitesinden tümüyle yararlanmak için, tüm FDM'nin faz değiştirmesi gerekmektedir. Yaz koşullarında, bir kaç sıcak yaz günü sonrasında, sıvı FDM'de depolanan gizli ısı dış ortama verilmemekte ve tüm FDM'de katılaşma sıvılaşma döngüsü gerçekleşmemektedir. Bu nedenle, Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında görülen iyileşme daha çok duyulur ısı kapasitesinden kaynaklanmaktadır (Şekil 5b,5c,5d). Ancak güneş enerjisinin etkin olarak saklandığı mevsimsel geçiş dönemlerinde, yani Mayıs ve Eylül aylarında daha fazla etki görülmektedir (Şekil 5a,5e).

SONUÇ

Bu çalışma, FDM'lerin ve dolayısıyla gizli ısı depolama malzemelerinin yapıya entegrasyonu konusundaki çalışmalara bir katkı koymaktadır. Çalışmada, FDM eklenen bir düz çatı elemanının ısı davranışı deneysel olarak ölçülmüş, bu verilere dayanarak bir benzetim modeli doğrulanmış ve model İzmir ilinde 5 aylık soğutma dönemindeki olası FDM davranışını tahmin etmek için kullanılmıştır.



Şekil 5. İzmir’de Haziran-Eylül aylarında FDM’nin katı (siyah)-sıvı (beyaz) durumu.

Birbirini doğrulamak için FDM'siz ve FDM'li deneyler yapılarak eleman katmanlarındaki sıcaklık değişimleri, enerji girdi, çıktı ve kayıpları karşılaştırılmıştır. Zamana bağlı yüzeylerdeki sıcaklık değişimi grafikleri ve FDM erime fotoğrafları ile FDM davranışı hakkında yorumda bulunulmuştur. Yapı elemanının ısı davranışı sayısal olarak, sonlu hacim yöntemi ile hesap yapan ANSYS Fluent bilgisayar yazılımı ile modellenmiştir. Model ve deneyler arasında yeterli uyum gözlenmiştir. Bunun sonrasında model İzmir'de Mayıs-Eylül ayları arasında farklı kalınlıklarda FDM davranışı modellenmiştir.

FDM'nin ısı enerjisi depolama kapasitesi, mevcut FDM miktarına bağlıdır, ancak FDM'nin tümü faz değiştirdiğinde, depolama kapasitesi doyum noktasına ulaşmaktadır. Model sonuçları, şu anda incelenen problem ve detayda seçilen FDM'nin erime-donma döngüsünü sürekli gerçekleştirmediğini göstermektedir. Yaz koşullarında, dışarıdan yardım almadan sıvı FDM'de depolanan gizli ısı dış ortama verilememekte, yani Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında FDM daha çok sıvı halde bulunmaktadır (Şekil 5b,5c,5d). Bu nedenle, belirtilen zaman aralığında sistemin gizli ısı etkisi istenildiği gibi kullanılamamakta, daha çok duyulur ısıdan kaynaklanan etki görülmektedir.

Yaz-kış arasındaki geçişin gerçekleştiği Mayıs ve Eylül aylarında ise erime-katılaşma döngüsü daha yüksek kalınlıklarda gerçekleşebilmektedir (Şekil 4, Şekil 5e). Buradan hareketle FDM'nin geçiş aylarında daha başarılı olduğu söylenebilir. Çalışmada modellenmeyen kış aylarında ise 25 °C'nin altındaki dış ortam sıcaklıkları, FDM'nin çoğu zaman katı halde olmasını sağlayacaktır. Bu nedenle seçilen malzemenin yeterli başarıyı göstermediği söylenebilir. Böylece FDM seçimi öncesinde yapının yer aldığı iklim bölgesi ile yapı yerinin mikro iklimsel ölçekteki ay ve mevsimlere bağlı ortam özelliklerinin önceden çok iyi irdelenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Dört mevsimi olan bir iklimde, bir FDM'nin her hava koşulu altında başarı göstermesi mümkün değildir. Bu yüzden; yaz, kış ve bahar dönemleri için farklı iki veya üç FDM kullanılmasının potansiyeli değerlendirilebilir.

Çalışmada getirilen model, ileride farklı iklim koşullarında yapı kabuğundaki pek çok değişkenin etkisini inceleme amaçlı çalışmalarda kullanılacak esnek bir modeldir. Yapılabilecek çalışmaların içinde; çeşitli yapı detaylandırmaları, daha ucuz ve kolay bulunan FDM'lerin incelenmesi, farklı FDM miktarı, kaplama malzemesi özellikleri, güneşe yönelme, gölgelenme, farklı mekan sıcaklıkları, çeşitli iklimsel özellikler ve gece havalandırması uygulamaları sayılabilir. Buna ek olarak, ilerideki çalışmalarda, bu çalışmanın kapsamı dışında olan; detayın uygulanma sorunları ve yaşam boyu maliyet analizi gibi konuları araştırmak olasıdır. Her ne kadar şu anda ekonomik olmasa da FDM gibi yeni malzemeler ve yapıda kullanımlarıyla ilgili detaylar geliştirildikçe performanslarının artacağı ve gitgide daha ekonomik olacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] HARLAND, A., MACKAY, C., VALE, B. "Phase Change Materials in Architecture", Proceedings: SB10 Wellington - Innovation and Transformation, Mayıs 2010. Wellington, Yeni Zelanda, 2010.
- [2] ZHANG, H.L., BAEYENS, J., DEGREVE, J., CACERES, G., SEGAL, R., PITIE, F., "Latent heat storage with tubular-encapsulated phase change materials (PCMs)", Energy, Cilt 76, Kasım 2014, pp. 66-72, 2014.
- [3] LIU, S.Y., YANG, H.M., "Stearic acid hybridizing coal-series kaolin composite phase change material for thermal energy storage", Applied Clay Science, Cilt 101, Kasım 2014, pp. 277-281, 2014.
- [4] FANG, G.Y., TANG, F., CAO, L., "Preparation, thermal properties and applications of shape-stabilized thermal energy storage materials", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Cilt 40, Aralık 2014, pp. 237-259, 2014.
- [5] KHUDHAİR, A.M., ve FARID, M.M., "A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials", Energy Conversion and Management, Cilt 45, Sayı 2, pp. 263-275, 2004.
- [6] JIN, X., [MEDINA](#), M.A., [ZHANG](#) X., "On the importance of the location of PCMs in building walls for enhanced thermal performance", [Applied Energy](#), Cilt 106, Haziran 2013, pp. 72-78, 2013.



- [7] O'CONNOR, W.E., WARZOHA, R., WEIGAND, R., FLEISCHER, A.S., WERNHOFF, A.P., "Thermal property prediction and measurement of organic phase change materials in the liquid phase near the melting point", *Applied Energy*, Cilt 132, Kasım 2014, pp. 496-506, 2014.
- [8] [KHERADMAND, M.](#), [AZENHA, M.](#), [DE AGUIAR, J.L.B.](#), [KRAKOWIAK, K.J.](#), "Thermal behavior of cement based plastering mortar containing hybrid microencapsulated phase change materials", *Energy and Buildings*, Cilt 84, Aralık 2014, pp. 526-536, 2014.
- [9] SINGH, S.P., BHAT, V., "Applications of organic phase change materials for thermal comfort in buildings", *Reviews in Chemical Engineering*, Cilt 30, Sayı: 5, Ekim 2014, pp. 521-538, 2014.
- [10] TYAGI, V.V., BUDDHI, D., "PCM thermal storage in buildings: a state of the art", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt 11, Sayı 6, pp. 1146-1166, 2007.
- [11] ZHANG, Y., ZHOU, G., LIN, K., ZHANG, Q., DI, H., "Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and Outlook", *Building and Environment*, Cilt 42, pp. 2197-2209, 2007.
- [12] POMIANOWSKI, M., HEISELBERG, P., ZHANG, Y., "Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings", [Energy and Buildings](#), Cilt 67, Aralık 2013, pp. 56-69, 2013.
- [13] CASTELL, A., FARID, M.M., "Experimental validation of a methodology to assess PCM effectiveness in cooling building envelopes passively", *Energy and Buildings*, Cilt 81, Ekim 2014, pp. 59-71, 2014.
- [14] JIN, X., ZHANG, S., XU, X.D., ZHANG, X.S., "Effects of PCM state on its phase change performance and the thermal performance of building walls", *Building and Environment*, Cilt 81, Kasım 2014, pp. 334-339, 2014.
- [15] MADHUMATHI, A., SUNDARRAJA, M.C., "Energy Efficiency in Buildings in Hot Humid Climatic Regions Using Phase Change Materials as Thermal Mass in Building Envelope", *Energy and Environment*, Cilt:25, Sayı 8, Aralık 2014, pp. 1405-1421, 2014.
- [16] DIACONU, B.M., CRUCERU, M., "Novel concept of composite phase change material wall system for year-round thermal energy savings", [Energy and Buildings](#), Cilt 42, Sayı 10, Ekim 2010, pp. 1759-1772, 2010.
- [17] MORENO, P., SOLE, C., CASTELL, A., CABEZA, L.F., "The use of phase change materials in domestic heat pump and air-conditioning systems for short term storage: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt:39, Kasım 2014, pp. 1-13, 2014.
- [18] ZHAO, D.L., TAN, G., "Numerical analysis of a shell-and-tube latent heat storage unit with fins for air-conditioning application", *Applied Energy*, Cilt 138, Ocak 2015, pp. 381-392, 2015.
- [19] ZHOU, G.B., HE, J., "Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes", *Applied Energy*, Cilt 138, Ocak 2015, pp. 648-660, 2015.
- [20] [HEIM, D.](#), [CLARKE, J.A.](#), "Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r", [Energy and Buildings](#), Cilt 36, Sayı 8, Ağustos 2004, pp. 795-805, 2004.
- [21] KUZNIK, F., VIRGONE, J., JOHANNES, K., "Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM", *Energy and Buildings*, Cilt 42, pp. 1004-1009, 2010.
- [22] MAZO, J., DELGADO, M., MARIN, J.M., ZALBA, B., "Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump", *Energy and Buildings*, Cilt 47, Nisan 2012.
- [23] AL-SAADİ, S.N., ZHAI, Z., "Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review", [Renewable and Sustainable Energy Reviews](#), Cilt 21, Mayıs 2013.
- [24] KONG, X.F., LU, S.L., LI, Y.R., HUANG, J.Y., LIU, S.B., "Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application", *Energy and Buildings*, Cilt 81, Ekim 2014, pp. 404-415, 2014.
- [25] LU, S.L., LIU, S.B., HUANG, J.Y., KONG, X.F., "Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio", *Energy and Buildings*, Cilt 84, Aralık 2014, pp. 287-298, 2014.
- [26] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2009.
- [27] BAŞYAZICI, İ.U., İki fazlı akışlara sayısal yöntemlerin uygulanması. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [28] SHETH KARATHIA, F., Analysis of thermal properties of phase change materials (PCM) using differential scanning calorimeter (DSC). Yayımlanmamış Tez. Lleida: Lleida Üniversitesi, 2011.
- [29] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT 12.0 UDF Manual, 2009.



- [30] PRADO, R.T.A., FERREIRA, F.L., Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37, 4, Nisan, 295–300, 2005.
- [31] DAVIES, M.G., “Building Heat Transfer”. John Wiley & Sons. Chippendarn, 2004.
- [32] Türk Standartları Enstitüsü, TS 825 Binalarda ısı yalıtım yönetmeliği, 2008.
- [33] DEMİRBİLEK, N., ERYILDIZ D.I., “Architecture in Turkey”, State of the Art. Proceeding of ISES, Haziran 1999. Göteborg, İsveç, 1999.
- [34] Meteorolog Veritabanı, İzmir ili iklim verileri, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Ayça TOKUÇ

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mimarlık bölümünden 2001 yılında mezun olmuştur. Dokuz Eylül Üniversitesinden 2005 yılında yüksek mimar, 2013 yılında doktor unvanını almıştır. 2001-2013 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak çalışmış, 2013 yılından itibaren aynı bölümde yardımcı doçent olarak çalışmalarına devam etmektedir. Binalarda enerji etkinlik, ısı enerji depolama, ısı konfor, mimaride sürdürülebilirlik ve karbon konularında çalışmaktadır.

Tahsin BAŞARAN

Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur ve aynı üniversiteden 1995 yılında yüksek mühendis, 2002 yılında da doktor unvanını almıştır. 1993-2010 yılları arasında aynı üniversitede araştırma görevlisi ve yardımcı doçent olarak çalışmış, ardından da 2010 itibarıyla İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mimarlık Bölümü'nde yardımcı doçent olarak çalışmalarına devam etmiştir. 2012 yılından itibaren doçent olarak aynı bölümde görevine devam etmektedir. Çalışma konuları, binalarda ısı transferi ve akış, bina enerji performansı, ısı enerji depolama ve ısı konfor üzerinedir.

Cengiz YESÜGEY

1951 yılında Ankara'da doğdu. 1976 yılında, Ege Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Mimarlık Bölümünü bitirdi. Üniversite dışında çalışma hayatını sürdürürken, 1980 yılında E.Ü. G.S.F. Mimarlık Bölümünde Yapım Bilgisi üzerine Yüksek Lisansını ve 1993 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık, Yapı Anabilim Dalında Doktora çalışmasını tamamladı. Bu tarihten itibaren bir taraftan serbest meslekte çalışmalarını sürdürürken, diğer taraftan D.E.Ü. Mim. Fak. Mim. Böl. Yapı ABD'da part-time öğretim görevlisi olarak akademik hayatını sürdürdü. 1999 yılında aynı Fakültede kadrolu Öğretim Görevlisi, 2000 yılında Yardımcı Doçent ve 2011 yılında Doçent oldu. Halen aynı bölümde, yapım bilgisi ve malzemesi, gelişmiş strüktür sistemleri, endüstrileşmiş yapım, deprem ve deprem yönetimi konularında da Lisans ve Lisansüstü derecelerde çalışmalarını sürdürmektedir.