



TERMAL ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ İÇİN FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN TROMBE DUVARLARDA KULLANIMI ÜZERİNE BİR İNCELEME

¹Necla Seval BAYRAM , ²Ahmet Vefa ORHON 

^{1,2}Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimalık Bölümü, İzmir, TÜRKİYE
¹Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli, TÜRKİYE
¹nsevalerdem@gmail.com, ²vefa.orhon@deu.edu.tr

(Geliş/Received: 25.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 12.02.2020)

ÖZ: Bu çalışmada faz değiştiren malzemelerin (FDM) ısı depolama sistemlerinden biri olan trombe duvarlarıyla (TD) kullanımının enerji verimliliğine getirdiği katkıların belirlenmesi ve faz değiştiren malzemeli trombe duvar tasarımında göz önüne alınması gereken kriterlerin ortaya konması amaçlanmıştır. Çalışmada, FDM ve TD ile ilgili genel tanımlar verildikten sonra yerli ve yabancı literatür taraması yapılarak günümüze kadar yapılan örnekler incelenip karşılaştırmaları yapılmıştır. İncelenen örneklerde FDTD'nin özellikleri, detayları ve uygulama yöntemleri belirtilerek yapı endüstrisine ve enerji verimliliğine getirdiği katkılar irdelenmiştir. FDTD uygulamasının geleneksel yöntemlerden farklı olarak duvarın masif kütlelerini hafiflettiği ve FDM'nin duvara gizli ısı depolama özelliği kazandırarak ısıtma ve soğutma uygulamalarında verimliliği artırdığı görülmüştür. TD'nin basit uygulama şemaları olmasına karşın tam anlamıyla verim almak konusunda bazı güçlükler söz konusudur. Detaylarına karar verilen bir FDTD'nin yıl boyunca çevresel koşullara karşı ne şekilde cevap vereceğini tahmin etmek zor olabilmektedir. Buna göre FDTD'yi tasarlamadan önce sisteme etki edecek kriterleri göz önüne alarak duvarın karşılaşılabileceği olası sorunları görmek verimliliği artıracaktır. Belirli bir iklim bölgesinde tasarlanması planlanan FDTD sisteminde en verimli sonuca ulaşmak bu kriterlerin optimizasyonu ile mümkündür.

Anahtar Kelimeler: Faz değiştiren malzemeler, trombe duvarlar, gizli ısı depolama

Investigation of Phase Change Materials on the Use of Trombe Walls for Thermal Energy Storage Systems

ABSTRACT: This study is conducted to determine the contribution of phase change materials (PCM) and trombe walls (TW) for energy efficiency and it is aimed to identify the criterias that is required during design process. In this study, after giving general definitions about PCM and TW, domestic and foreign literature is searched and application examples are analyzed and compared. It is observed that phase changing trombe wall (PCTW) application alleviated the heavy mass of the wall unlike the traditional methods and PCM increased the efficiency of heating and cooling applications by providing latent heat storage to the massive wall. Although TW has simple application schemes, there are some difficulties in achieving full efficiency. It can be confusing to predict how a PCTW, whose details are decided, will respond to environmental conditions throughout the whole year. Accordingly, considering the criteria that will affect the system before designing the PCTW, it will increase efficiency to see possible problems that the wall may face. In the PCTW system, which is planned to be designed in a specific climate zone, the most efficient result can be achieved by optimization of these criterias.

Key Words: Phase change materials, trombe walls, latent heat storage

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda dünyada yaşanan enerji krizi nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Dünyadaki enerji tüketiminin %30-40'nun binalarda yapıldığı ve bu oranın % 80-85'inin iklimlendirme uygulamalarında kullanıldığı düşünülmektedir (Yılmazoğlu, 2010, Konuklu ve Paksoy, 2011). Bu büyük miktardaki enerji ihtiyacı, binalarda pasif sistemler adı verilen iklimlendirme ve enerji depolama yöntemleri kullanılarak karşılanabilmekte ve masraflar en aza indirgenebilmektedir (Doğan ve Pırasacı, 2009). Enerji depolama sistemlerinin gelişimi, yeni enerji kaynaklarının gelişimi kadar önemlidir. Enerji depolaması, enerjiyi uygun şekilde geri kazanıp istenen enerji formuna dönüştüren sistemdir. Bu sistem, güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kullanımını artırmanın en iyi yoludur. Termal enerji depolama (TED) teknikleri ısıtma ve soğutma sistemlerinde, enerjinin daha etkin ve verimli kullanımını sağlayarak önemli ölçüde tasarrufu sağlamaktadır. Bu durum fosil yakıtların daha az kullanımı neden olmakta ve çevre ile dost iklimlendirme teknikleri geliştirme olanağını sunmaktadır. Yerel yenilenebilir enerji kaynaklarının, termal enerji depolaması ile birlikte kullanımı sonucunda çok verimli sistemler tasarlanabilir (Dincer ve Rosen, 2002). Binalarda ısıtma amaçlı kullanılan ve 'güneş duvarları' olarak da adlandırılan TD, yenilenebilir enerji kaynağını depolayan pasif sistemlerden biri olarak uzun yıllardır uygulanmaktadır.

Bu bağlamda yapıların iklimlendirme ihtiyaçlarının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu arayışlar sonucunda çevresel değişkenlere cevap veren ve akıllı malzemeler olarak adlandırılan yeni nesil malzemeler ortaya çıkmıştır. Akıllı malzemeler fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkiler gibi dış uyaranlara karşı çevreye akıllı tepkiler vererek değişime uğrayan, nitelik değiştiren veya enerji dönüşümü yapan malzemeler olarak yapı uygulamalarında yerini almıştır (Mohamed, 2017). Akıllı malzemelerin mimarlıkta kullanmaya başlanmasıyla, ahşap ve taş gibi konvansiyonel malzemelerin standart özelliklerini kabul etmek ve getirdiği sınırlamalar çerçevesinde tasarım yapmak yerine, gereksinim duyulan ihtiyaca göre malzeme seçimi gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Böylece malzeme tasarımı değil, tasarım malzemeyi yönetmeye başlamıştır. Bu sayede geleneksel malzemelerin getirdiği masif kütlenin yerini hafif yapı sistemli akıllı binalar almış ve mimarlara spesifik sorunlara spesifik cevaplar veren yeni yapı elemanları tasarlama imkânı sunulmuştur. Standart yapı malzemeleri bina yüklerine dayanacak şekilde statik konumda iken, akıllı malzemeler enerji tüketimine tepki üretmeleri bakımından dinamik yapıdadır. Faz değiştiren malzemeler de (FDM) pasif yapı sistemlerinde tercih edilen akıllı malzemelerden biridir. Genel olarak FDM'lerin gizli ısı depolama özelliği sayesinde, yapıların ısıtma ve soğutma uygulamalarında verimliliğinin artırılması mümkündür. FDM'nin TD ile birlikte kullanımı sayesinde konvansiyonel ağır ısı kütlesi hafifletilebilmektedir. Çoğunlukla duvar, döşeme, tavan, çatı uygulamalarında yer alan FDM çalışmalarında, genel olarak FDM'lerin kapsüllenmesi ve termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi üzerinde odaklanılmıştır. Ancak FDTD sistemleri ve çözümlenmeleri konusundaki çalışmalar zayıf kalmış ve deneysel boyuttan öteye gidememiştir. FDM'lerin TD'ler ile kullanımıyla duvara gizli ısı depolama özelliği kazandırılarak iklimlendirme uygulamalarında verimlilik artırılabilen ve masif duvar kütlesi hafifletilebilmektedir. Ancak bu, TD+FDM detaylarına doğru karar vermekle ve FDTD'nin çevresel koşullara ne şekilde tepki vereceğini öngörmekle mümkündür.

Simgeler ve Kısaltmalar		
FDM	Faz Değiştiren Malzeme	
TD	Trombe duvar	
FDTD	Faz değiştiren malzemeli trombe duvar	
Qd	Duyulur ısı	(kj)
md	Kütle	(kg)
c	Özgül ısı	(kj/kgK)
ΔT	Sıcaklık değişimi	(K)
Qg	Gizli ısı	(kj)
mFDM	FDM kütlesi	(kg)
H	Gizli ısı	(kj/kg)
k	Termal iletkenlik	(W/mk)
ρ	Yoğunluk	(kg/m ³)
Cp	Özgül ısı kapasitesi	(J/kg K)
θ	Sıcaklık	(°C)
Δx	Termal simülasyonlar için düğüm aralığı	(m)
Δt	Termal simülasyonların zaman adımı	(s)
i, i+1	Simülasyon ve bitişik düğüm	
j, j+1	Simüle edilmiş ve ardışık zaman adımı	

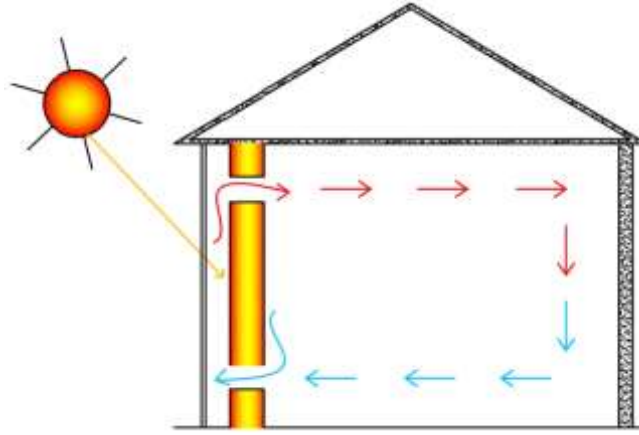
AMAÇ VE YÖNTEM (AIM AND METHOD)

Bu çalışmanın amacı son 20 yılda FDTD alanında yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarının sonuçlarını inceleyerek sürdürülebilir mimarlığa katkısını irdelemek ve FDTD tasarımında göz önüne alınması gereken kriterleri belirlemektir. Buna göre bu çalışma kapsamında ele alınan örnekler, buldukları çevre faktörlerine ve FDM seçimine göre incelenmiş ve tasarımdan önce göz önüne alınması gereken kriterler belirlenmiştir. Buna göre tasarlanacak olan FDM sisteminde en verimli sonuç bu kriterlerin optimizasyonu ile elde edilebilecek ve bu yolla FDTD tasarımının iyileştirilmesi mümkün olabilecektir. FDTD sistemini uygun şekilde karakterize edebilmek için FDM kullanımı sayısal olarak analiz edilmelidir. Tüm bina enerji simülasyon araçları, mühendislerin ve tasarımcıların FDTD'lerin termal davranışlarını analiz etme yeteneğini artırabilir. Bina enerji simülasyonunun kullanımı, FDM'li sistemlerin performansını değerlendirmek ve analiz etmek için önemli bir adımdır. Bu araçlar, FDM'lerle pasif olarak geliştirilmiş binanın dinamik termal davranışını sayısal olarak analiz edebilir. Bugün, farklı uygulamalar için dinamik enerji simülasyonu gerçekleştirebilen birçok onaylanmış bina enerji simülasyon programı vardır ancak FDM'li yapıların enerji performansını ve iç mekan konforunu analiz edebilen onaylanmış az sayıda bina enerji simülasyon programı vardır. TRNSYS, Energy Plus, ESP-r, RADCOOL bu programlardan bazılarıdır (Saffari ve diğ. 2017)

TROMBE DUVARLARI (TROMBE WALLS)

Güneş radyasyonu ile açığa çıkan ısı enerjisinin doğal konveksiyon yoluyla yapı içerisine alınması prensibine dayanarak çalışan TD için en önemli parametre ısı depolama kapasitesidir. Pasif güneş sistemlerinden biri olan TD bir kolektör sistemi olup, koyu renge boyanmış bir duvar ve duvardan belli bir mesafeye yerleştirilmiş cam yüzeyden oluşmaktadır (Karaman, ve diğ. 2016). Duvar güney cepheye

konumlandırılmakta ve kısa dalgalarla camdan geçen ışınlar, absorbe edici olarak çalışan duvar tarafından emilerek depolanmaktadır. Cam ile duvar arasındaki boşlukta ısınan hava genişterek yoğunluğu azalmakta ve yükselerek üst menfezden iç mekâna geçmektedir. İç mekândaki soğuk hava ise alt menfezden kanala çekilmekte, kanalda tekrar ısınarak yükseldikten sonra üst menfezden iç mekâna aktarılmaktadır. Bu şekilde tekrar eden bir hava dolaşımı ile iç mekânda ısıl konfor sağlanmış olmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. TD çalışma şeması

Figure 1. TW working scheme

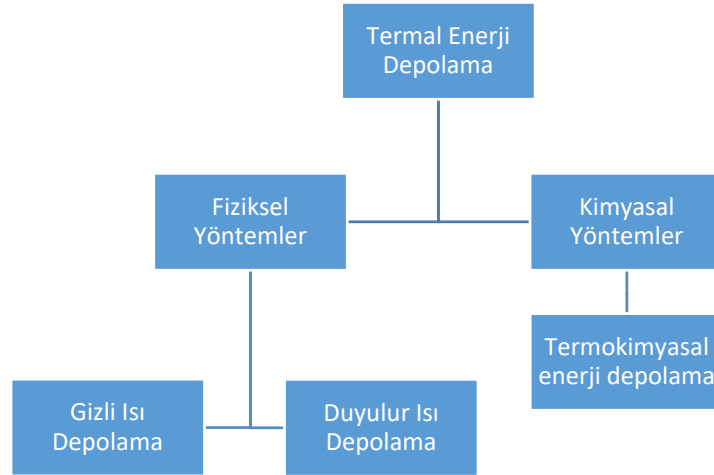
Kış aylarında, gelen ısı gece boyunca duvarda emilmekte ve depolanmaktadır. Menfezlerin doğru kullanımı baca ve iç mekân arasındaki hava değişimlerini daha da artırabilmektedir (Ji, ve diğ., Omrany, ve diğ., 2016). Yaz aylarında, menfezler damperlerle kapatılarak, ısınma etkileri önemli ölçüde etkisizleştirilmektedir. (Krüger ve Matoski, 2013). Duvar ve cam arasındaki boşluk, camdan ısı kaybını önlemek açısından önemli bir işleve sahiptir. Buna ek olarak, baca genişliği konveksiyon sürecini etkileyebileceği için önemli bir ölçüttür. Baca için uygun genişliğin 3 ila 6 cm arasında değiştiği öne sürülmüştür (Anderson, 1985).

Klasik TD sisteminin en belirgin avantajları uygulama kolaylığı, iç mekânın olağandışı koşullardan korunması, dış ortam sıcaklığından etkilenmemesi ve güneşin zararlı ışınlarından korunmasıdır (Karaman ve diğ. 2016:175). Sistemin başlıca olumsuzlukları ise gece ve uzun süre bulutlu dönemlerde ısıl kütlelerin geç ısınmasıdır. Duvarın iç mekândan daha soğuk olduğu böyle bir durumda, üst havalandırma kanalından alt havalandırma kanalına ters hava dolaşımı olmakta ve oda sıcaklığında aşırı düşüş gözlemlenmektedir. Bu duruma 'ters ısı akısı' denmektedir (Saadatian ve diğ., 2012). Buna ek olarak yeterli bir depolama kapasitesi için ağır bir kütle ve büyük duvar hacmi gerekmekte, bu durum da yapım uygulamaları ve iç mekân kullanımı açısından çeşitli sınırlama ve zorlukları beraberinde getirmektedir (Zalewski ve diğ., 2012, Chaichan ve Abaas, 2015) Yaz dönemlerinde ise ısının denetlenememesi ve güneş yoğunluğunda periyodik değişimler olması sıcaklık dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Bu da iç mekân sıcaklığını konfor aralığında tutmayı zorlaştırmaktadır (Saadatian ve diğ., 2012).

TD gibi pasif sistemlerde güneş enerjisi duyulur veya gizli ısı olarak depolanabilmektedir. Ancak birim kütle başına enerji depolama kapasitesinin yüksek olması sebebiyle ısı enerjisinin gizli ısı olarak depolandığı sistemler çok daha makul bir seçenektir. TD'nin depolama etkinliğini artırmak, gizli ısı depolama özelliğine sahip bir malzemenin kullanılmasına bağlıdır. Bu da mikrokapsülleme veya makrokapsülleme yoluyla birçok yapı elemanına eklenerek ısı enerjisini depolayan faz değiştiren malzemeler ile mümkündür.

ISI DEPOLAMA YÖNTEMLERİ (HEAT STORAGE METHODS)

Termal enerjinin depolanması, enerji tüketimini azaltarak verimliliği sağlayan ve enerji sistemlerinin etkinliğini artıran yöntemlerden biridir. Bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamı ısı enerjisini ortaya çıkarmaktadır. Isı enerjisi bu moleküllerin ve atomların titreşimi sonucu oluşmaktadır. Maddenin iç enerjisindeki bu değişim duyulur ısı, gizli ısı, tepkime ısı veya bu enerjilerin birleşimi şeklinde (Şekil 2) depolanabilmektedir (Yılmazoğlu, 2010).



Şekil 2. Isı Depolama Yöntemleri

Figure 2. Heat Storage Methods

Duyulur Isı Depolama (Sensible Heat Storage)

Ergime veya buharlaşmanın olmadığı zamanlarda, maddenin sıcaklığını değiştirmek için gereken ısı miktarıdır. Maddenin sıcaklığında farklılık yaratmasına karşın, halini değiştirmemektedir (Benli ve Durmuş, 2007). Günümüzde en çok tercih edilen bu depolama yönteminde; beton, seramik, su, hava, kayaç, kum, tuğla ve toprak gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bunun nedenleri; bu malzemelerin kolay elde edilebilirliği ve düşük maliyetleri olarak sıralanabilmektedir (Ceylan ve diğ., 2017). Duyulur ısı depolama yönteminin en büyük avantajı çok sayıda depolama imkânı sağlanabilmesi ve geri kazanma çevriminin gerçekleşmesi, en büyük dezavantajı ise ihtiyaç duyulan depo hacminin çok büyük olmasıdır (Konuklu ve diğ., 2015). Denklemde de görülebileceği gibi malzemenin yeterli bir duyulur ısı depolama kapasitesine ulaşması için büyük bir sıcaklık değişimine veya daha fazla kütleyle sahip olması gerekmektedir (Zalba ve diğ., 2003).

$$Q_d = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

Duyulur ısı depolama yönteminde malzemede aranan en büyük özellikler; düşük maliyet, kolay elde edilebilirlik, yüksek ısı kapasitesi, alev almazlık ve uzun ömürlülük olması ve korozif ve zehirli olmamasıdır. Sıvı sistemlerde su, erimiş tuzlar ve hava, akışkan sistemlerde ise en çok çakıl taşı tercih edilmektedir (Günerhan, 2004).

Termokimyasal Enerji Depolama (TKED) (Thermochemical Energy Storage)

Tersinir bir endotermik kimyasal reaksiyonda kimyasal bileşiklerin ayrışması ve sentezlenmesi sırasında açığa çıkan ısı enerjisinin kimyasal bağlarda depolanması prensibine dayanmaktadır. TKED

sistemleri sabit sıcaklıkta, uzun süreli ve stabil depolamada ve geniş sıcaklık aralıklarında yüksek enerji yoğunluğu avantajına sahiptir (Zeinelabdein ve diğ., 2018).

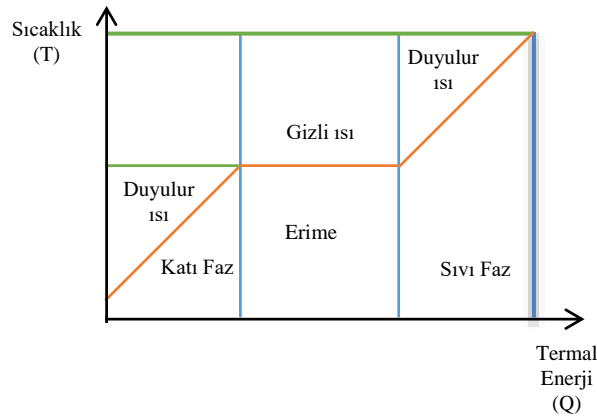
Gizli Isı Depolama (Latent Heat Storage)

Gizli ısı, sabit sıcaklıkta termodinamik bir sistem tarafından serbest bırakılan veya emilen ısıdır. Uygun sıcaklık aralığında maddenin durumunun değişmesiyle sistemin sıcaklığının sabit kaldığı faz geçiş sürecidir. Bu faz değişimi sırasında ortaya çıkan bu ısı depolanabilmektedir. Bir katıyı eritmekle veya bir sıvının dondurulmasıyla ilişkili olan gizli ısı, füzyon ısısı olarak adlandırılır. Bir sıvının veya bir katı veya yoğunlaşan buharın buharlaşmasıyla ilişkili olan gizli ısı, buharlaşma ısısı olarak adlandırılır (Mishra ve diğ., 2015).

Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi, duyulur ısıya göre çok daha küçük, depolama kapasitesi ise çok daha büyüktür. FDM'ler ile daha düşük sıcaklık ve hacim değişimi ile daha fazla ısı depolanabilmekte böylece duyulur ısıya göre daha fazla verim alınabilmektedir (Günerhan, 2004). FDM 'lerin birim kütlelerinin ısı depolama kapasiteleri daha yüksektir ve faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma için uygundur (Zalba ve diğ., 2003).

$$Q_g = m \cdot FDM \cdot H \quad (2)$$

Şekil 3'te duyulur ve gizli ısı karşılaştırılması yapılmıştır. Duyulur ısı depolama ile enerji kaynağı doğrusal sıcaklık artışı göstermektedir. Bununla birlikte, gizli ısı depolama ile enerji kaynağı, FDM'nin erime sıcaklığına ulaşılan kadar bir sıcaklık artışına neden olur. Malzeme tamamen eriyene kadar sıcaklık sabit kalarak faz değişimi gerçekleşir ve bu noktadan sonra sıcaklık tekrar artar (Kunkel ve diğ., 2018).



Şekil 3. Gizli Isı- Duyulur Isı Karşılaştırma

Figure 3. Latent Heat - Sensible Heat Comparison

Gizli ısı depolaması katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz ve katı-katı faz dönüşümleri ile gerçekleştirilebilir, ancak pratikte sadece katı-sıvı ve katı- katı faz dönüşümü kullanılmaktadır. Katı-gaz ve sıvı-gaz geçişi daha yüksek bir gizli füzyon ısısına sahiptir, ancak faz geçişindeki büyük hacim değişiklikleri, kapsülleme problemlerine yol açmakta ve termal depolama sistemlerinde uygulama zorluğu çıkmaktadır (Sharma ve Sagara, 2005).

Katı-sıvı faz geçişinde uygun bir malzeme seçilirse büyük miktarda enerji depolanabilmektedir. Ayrıca katı-gaz ve sıvı-gaz faz dönüşümüne oranla hacim değişimi daha küçüktür. Organik FDM'lerden parafin ve parafin olmayan (yağ asitleri, glikoller ve alkoller) daha geniş sıcaklık çalışma aralığı, daha az süper soğutma ve ayrıştırma etkileri sebebiyle yapı uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir (Sharma ve Sagara, 2005).

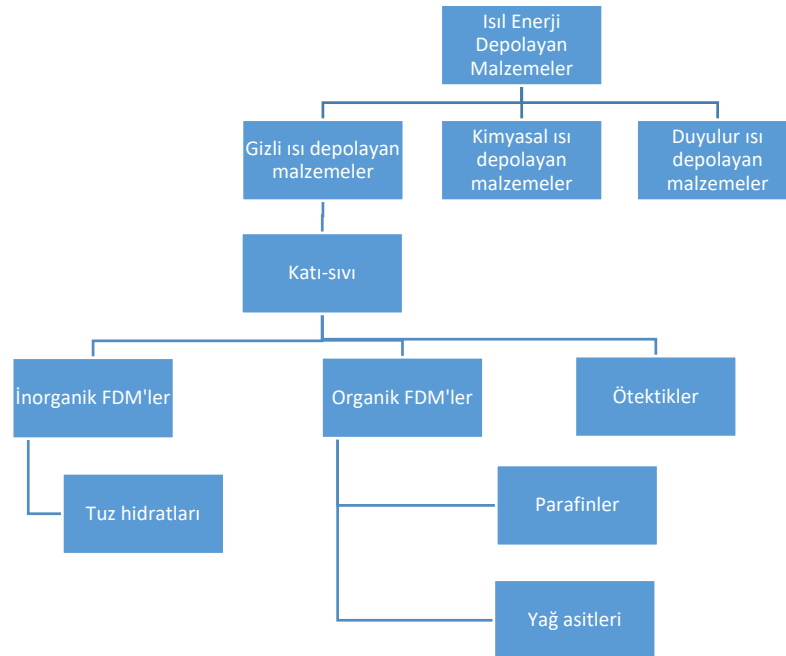
Katı-katı faz geçişinde ise bazı özellikler katı-sıvı faz geçişleriyle aynıdır ancak faz değişim entalpileri daha düşüktür. Bununla birlikte katı-katı geçişlerde malzeme bir kristalden diğerine dönüşürken daha küçük hacim değişikliğine uğramaktadır (Sharma ve Sagara, 2005).

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELER (PHASE CHANGE MATERIALS)

Faz Değiştiren Malzemeler (FDM) faz değişimleri esnasında ısıl enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayarak enerji korunumu sağlayan akıllı malzemelerden biridir. Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi, duyulur ısıya göre çok daha küçüktür (Konuklu ve Paksoy, 2011).

FDM'ler kendi iç sıcaklıklarını artırmadan ısıyı absorbe etmek ve salmak için faz geçişi olgusunu kullanan malzemelerdir. Bir mekânda sıcaklık FDM'nin erime noktasını aştığında, bu sıcaklık FDM tarafından kullanılır ve malzeme faz değiştirmeye başlar ve erir. Sıcaklık düşmeye başladığında ise FDM faz değiştirerek katı formuna dönüşmeye başlar ve bu esnada depoladığı ısıyı açığa çıkarır. Bu sayede iç mekân sıcaklığı konfor aralığında sabitlenmiş olur (Casini, 2014). FDM'nin fonksiyonel olabilmesi için ortalama sıcaklığın FDM'nin erime noktasının üzerinde olması ve faz değişimini başlatması gerekmektedir. Bu yüzden FDM seçiminde erime noktası ve iklim koşulları göz önüne alınması gereken kriterlerden biridir. Türkiye ölçeğinde konuyu ele alırsak, Antalya gibi yaz aylarının çok sıcak geçtiği iklim bölgelerinde erime noktası çok düşük FDM seçimiyle gece boyunca iç mekân sıcaklığını konfor aralığında tutmak çok zor olacak ve yaz aylarında yetersiz kalacaktır. Veya Erzurum gibi kış aylarının sert geçtiği bölgelerde erime noktası çok yüksek FDM seçimiyle, depolanan sıcaklık miktarı gün boyunca düşecektir. Yapılan çalışmalar çerçevesinde, daha sıcak iklim bölgelerinde yüksek erime sıcaklığına sahip FDM'lerin, daha soğuk iklim bölgelerinde ise düşük erime sıcaklığına sahip FDM'lerin verimli olduğunu görülmektedir.

Organik, inorganik ve ötektik karışımlar olmak üzere 3'e ayrılan FDM'ler arasında yalnızca insan konfor sıcaklığı arasında erime noktasına sahip olanlar yapı uygulamalarında kullanılabilir (Şekil 4). İnsan konfor sıcaklığı, yapılan etkinliğin düzeyine göre değişiklik göstermekle birlikte, normal giysiler içerisinde oturarak çalışan ya da yaşayan insan grubu için hedef alınan sıcaklık aralığıdır. Genel olarak bu değer 20-26°C'dir.



Şekil 4. FDM Çeşitleri

Figure 4. PCM Types

Organik FDM'ler: Parafin ve yağ asitleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Düz zincir formunda olan parafinlerin karbon uzunluğu arttıkça erime sıcaklıkları ve faz değişim entalpileri de artmaktadır. Her bir çeşidi birbirine yakın özellikler gösteren parafinlerin erime noktaları ise -5 ile 60°C arasında

değişmektedir. Yağ asitleri ise her biri farklı özellikler gösteren zengin bir malzeme çeşidine sahiptir (Sharma ve diğ., 2009).

Yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan organik FDM'lerin en büyük avantajları geniş sıcaklık aralığı, faz değişimi esnasında düşük hacimsel değişiklik, yapı elemanlarıyla uyum, geri dönüşüm, aşırı soğuma göstermeme ve yüksek dayanım gibi özellikleridir (Baetens ve diğ., 2010). Katı halde düşük ısı iletkenliği, düşük ısı depolama hacmi, yanıcılık, yüksek maliyet ise bu malzemelerin en önemli dezavantajları arasındadır (Pasupathy ve diğ., 2008)

İnorganik FDM'ler: Tuz hidratları ve klatrat hidratlarını içeren inorganik maddeler, yüksek gizli ısı depolama kabiliyeti ve yüksek ısı iletkenliğe sahip, düşük maliyetli malzemeler olmasına karşın; korozif olması, bozunmaya uğraması ve hidrat kaybı yaşaması gibi dezavantajlara sahiptir (Yılmazoğlu, 2010). En yaygın inorganik FDM'ler $K_2HO_4.6H_2O$, $KF.4H_2O$, $K_2HO_4.4H_2O$, $LiBO_2.8H_2O$, $FeBr_3.6H_2O$, ve $CaCl_2.6H_2O$ 'dir (Abuelnuor ve diğ., 2018).

Ötektik FDM'ler: Homojen bir şekilde eriyen ve donan, 2 veya daha fazla bileşenin bir kombinasyonudur. Ötektik FDM'ler, mümkün olan en düşük erime sıcaklığını sağlayan malzeme bileşenlerinden oluşmaktadır. En yaygın ötektik FDM'ler, Trietiloletan + su + üre, Trietiloletan + üre, $Mg(NO_3) \cdot 3.6H_2O + NH_4NO_3$, $Mg(NO_3) \cdot 3.6H_2O + MgCl_2$ 'dir (Abuelnuor ve diğ., 2018). Ötektik FDM'lerin, tek bir erime ve donma sıcaklığına ve yüksek hacimsel enerji depolama yoğunluğuna sahip olması gibi avantajları vardır. Bu özelliğine rağmen kullanılabilirliği sınırlıdır. (Memon, 2014).

FDM'lerin Kapsüllemesi (PCM Encapsulation)

FDM'ler kendi başına kullanıldıkları gibi mikrokapsülleme, makrokapsülleme, malzemeye doğrudan birleştirme ve daldırma yöntemleriyle de uygulanabilmektedir.

Malzemeye doğrudan birleştirme: Üretim aşamasında, FDM'nin, yapı malzemesinin içerisine direk karıştırıldığı yöntemdir. Uygulama aşamasında fazla donanım ihtiyacı olmaması yöntemin maliyetini düşürmektedir ancak, FDM'nin malzeme içerisinde homojen dağılmaması ve faz değişimi esnasında FDM'nin akma yaparak dışarı sızması gibi dezavantajları vardır.

Daldırma: Yapı malzemesinin ergimemiş FDM'nin içerisine daldırıldığı, FDM'nin kapiler hareketle malzemenin gözeneklerine nüfuz etmesinin sağlandığı yöntemdir. (Khudhair ve Farid, 2004)

Mikrokapsülleme: Bu işlem ile makrokapsülleme arasındaki temel fark, kabuk boyutları ve şekilleridir (Liu ve diğ., 2018, Akeiber ve diğ., 2016, Alam ve diğ., 2015). Büyüklük bazında değerlendirirsek, kabuk çapı 1 mm veya 1 cm'den büyük olanlar makrokapsülleme, küçük olanlar ise mikrokapsülleme olarak nitelendirilmektedir. (Pons ve diğ., 2014, Hawlader ve diğ., 2003). FDM'ler nispeten düşük bir termal iletkenliğe sahiptir ve prensipte bu sorunu çözmenin yolu FDM'nin iletim yoluyla ısı aktarma mesafesinin kısaltılmasıdır. Bu işlem, malzemenin nispeten küçük kapsüller içine sarılmasıyla yapılmaktadır. Bu yöntemde FDM parçacıkları, uygulanacağı malzemeyle uyumlu olması şartıyla, ince ve yüksek moleküler ağırlıklı polimerik filmle kaplanmaktadır (Heinz ve Streicher, 2005). Mikrokapsülleme, FDM'lerin katı veya sıvı olmasından bağımsız olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Mikrokapsüller, parafinik FDM çekirdeğini ayrı ayrı sert bir polimerik kabuk ile saran, çapı 1 mm'den küçük ve çapı 1 um'den büyük olan (genel olarak 5-10 um), katı veya sıvı parçacıklardır (Socaciu, 2012, Chen ve diğ., 2017, Milian ve diğ., 2017). Mikrokapsülleme işleminin en önemli avantajı, FDM'lerin yapı malzemesiyle doğrudan kullanımında, uygulama aşamasında sızıntı yapmasını önlemesidir. Bu işlem, sıvıyı katı formda tutmakta ve faz geçişleri sırasında hacim değişimi sağlamaktadır (Beyhan ve diğ., 2016). Mikrokapsüllemenin avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Şekil ve boyut esnekliği sayesinde uygulamada kolaylık sağlar (Sharma ve diğ., 2015).
- Düşük maliyette daha kolay üretim sürecine sahiptir. (Khudhair ve Farid, 2004, Shi ve diğ., 2014, Regin ve diğ., 2008)
- Mikrokapsül kabukları FDM sistemlerinin mekanik dayanımını artırır (Parameshwaran ve diğ., 2012, Regin ve diğ., 2008, Vicent ve Silva, 2014)
- Makrokapsülleme: FDM'nin tüp, panel, küre, poşet gibi bir malzemeye doldurulduktan sonra yapı malzemesine entegre edildiği yöntemdir. Bu kaplar doğrudan ısı değiştiricileri olarak

kullanılmakta veya yapı elemanlarına eklenebilmektedir. Makrokapsülleme işlemi güvenilir bir uygulamadır ve yapı elemanının ve malzemesinin çalışmasını engellememektedir (Cabeza ve diğ., 2007). Makrokapsüllemenin uygulama aşamasında getirdiği sınırlamalar şu şekilde sıralanabilir:

- Düşük yüzey / hacim oranı nedeniyle ısı transfer verimliliğini düşürür (Chandel ve Agarwal, 2017)
- Kabuk içerisinde FDM dağılımı, katılaşması ve erimesi homojenlik göstermez. (Alam ve diğ., 2015, Pasupathy ve diğ., 2008);
- Uygulama ve kullanım aşamasında hasar görme eğilimi gösterir. (Memon, 2014, Kalnæs ve Jelle, 2015, Lee ve diğ., 2015).

FDM Seçim Kriterleri (PCM Selection Criterias)

FDM'ler kullanıldıkları sistemlerde, yapıların ısıtma ve soğutma yüklerini azaltıp, sıcaklık dalgalanmalarını en aza indirmeleriyle bilinir. Ancak FDM'lerin bu etkinliklerini sürdürmeleri bazı kriterlerin göz önünde bulundurulmasıyla mümkündür.

FDM seçiminde malzeme konsantrasyonu ve iklime uyum en önemli kriterler arasındadır. Yapı uygulamalarında kullanılacak FDM yüksek bir gizli ısı, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek özgül ısı kapasitesi ve küçük hacim değişimine sahip olmalıdır. Bunun yanında aşındırıcı (korozif) ve toksik olmamalı, bozunmaya uğramadan eski haline dönebilmeli ve aşırı soğuma özelliği göstermemelidir (Konuklu ve Paksoy, 2011, Ghoneim ve diğ., 1991).

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELİ TROMBE DUVARI (FDTD) (TROMBE WALL WITH PHASE CHANGE MATERIALS)

Son on yıllar boyunca, TD'nin verimliliğini artırmak ve yaz mevsiminde aşırı ısınma gibi olası sorunları ortadan kaldırmak adına sistemin temel tasarımında çeşitli değişiklikler ve eklemeler yapılmıştır. TD'nin makul ısı depolama kapasitesini sağlamak için sunulan çözümler arasında duvar hacmini artırmak, su bidonları kullanmak (Tyagi ve Buddhi, 2007, Yang ve diğ., 2011), yalıtımlı kompozit duvar inşa etmek (Ji ve diğ., 2010, Marinosci ve diğ., 2011, Zhai ve diğ., 2011), cam katmanında düşük yoğunluklu akışkan kullanmak (Sadineni ve diğ., 2011, Tunç ve Uysal, 1991) ve güneş ışınlarını denetlemek amacıyla duvarları zigzag tasarlamak yer almaktadır. Bu yöntemler Saadatian ve diğ.'nin. (2012) yaptıkları çalışmada detaylı olarak verilmiştir. Ancak bu duvarları oluşturmak, geniş kullanım alanları ve uygulama zorluklarını beraberinde getirmektedir. Bu zorlukları ortadan kaldırmak üzere TD'nin gelişim sürecindeki son adım bu duvarlarda FDM kullanımı olmuştur.

FDTD, birim kütle başına depolanan ısı miktarının etkin biçimde artışının sağlanması, mevcut sistemlerle kolayca bütünleştirilebilmesi, duvar kalınlıklarının azaltılabilmesi ve uygulama alanını diğer kullanımlar için optimize edebilmesi gibi nedenlerle klasik TD'ye karşı ideal bir seçenek olarak görülmektedir. Bu faktörler hem yeni binaların inşasında hem de tadilat uygulamalarında düşük yapım maliyeti ve uygulama kolaylığı sunmaktadır. Gün boyu gelen güneş ışınımı FDM'nin ergimesine neden olmakta ve böylece güneş enerjisi gizli ısı şeklinde FDM içerisinde depolanmaktadır. FDTD'nin çalışması, gece boyunca duvardan ısının çekilerek binaya verilmesi ve FDM'nin yeniden katılaşması prensibine dayanmaktadır. Sonuç olarak FDTD, klasik TD alternatiflerine göre daha hafiftir, daha az hacim işgal eder ve ısıl sığası daha yüksektir. Genel olarak TD'de FDM olarak tuz hidratları ve hidrokarbonlar kullanılmaktadır (Tyagi ve Buddhi, 2007).

FAZ DEĞİŞTİREN TROMBE DUVARLARINA YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR (STUDIES FOR PHASE CHANGING TROMBE WALLS)

Manz ve diğ.'nin (1997) İsviçre Zürih Havaalanı'nda yaptıkları çalışmada içten dışa doğru cam bölme, şeffaf yalıtım malzemesi, cam bölme, hava boşluğu ve FDM içeren yarı saydam cam kaptan oluşan bir TD sisteminin analizini yapmayı hedeflemiştir. (Şekil 5). Yaz aylarında gündüzleri aşırı

ısınmayı önlemek için, dış yüzeyinde yüksek güneş yansıtıcılığı bir stor perde kullanılmıştır. Kış aylarında ise geceleri, stor perde, ısıtma mevsimindeki ısı kayıpları azaltılacak şekilde kapatılmaktadır. Deneylerde FDM olarak 26.5°C erime noktasına ve 192 kJkg⁻¹ gizli ısı depolama kapasitesine sahip tuz hidrati kullanılmıştır. FDM'lerin doldurulduğu cam blokların, ısı depolamasının yanında, güneş ışığını geçirerek iç mekânda aydınlatma yapması da amaçlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda FDM katı haldeyken, güneş ışığı iç mekânda dağılmakta, sıvı haldeyken ise direk geçiş yapmaktadır. FDM tarafından depolanan güneş enerjisi daha sonra iç mekânı ısıtma amacıyla kullanılmaktadır. Çalışma 4 adımdan oluşmaktadır:

i. Malzemelerin termal ve optik modellemesi: Malzemelerin optik özellikleri dalga boyuna bağlıdır. Bu sebeple çalışmada güneş ışınımı 20 dalga boyuna bölünmüştür. Bu aşamada FDM'nin ve şeffaf yalıtım malzemesinin termal ve optik özelliklerinin kapsamlı analizi yapılmış ve Monte Carlo ile simüle edilmiştir.

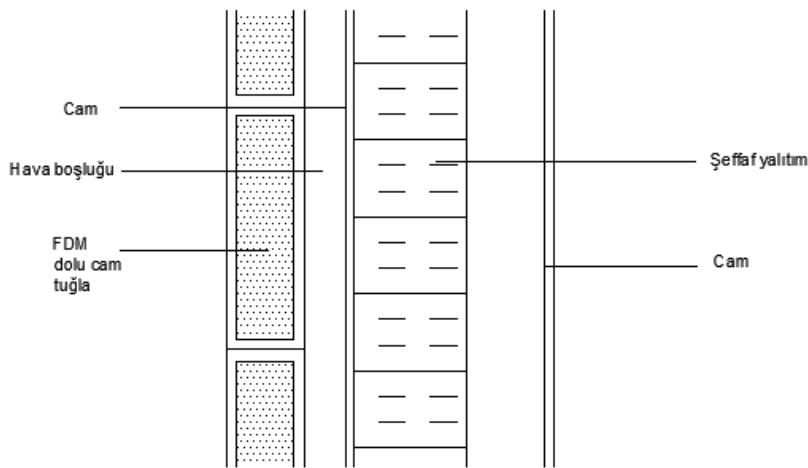
ii. Optik malzeme özelliklerinin deneysel incelenmesi: Spektrometre kullanarak FDM'siz cam kap, FDM'li cam kap ve FDM'nin optik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

iii. Prototipin deneysel incelenmesi: Dış mekâna kurulan prototipin gerçek koşullarda deneysel ölçümleri yapılmıştır.

iv. Sayısal modelleme: Prototipin davranış analizini yapmak için modüler sistem simülasyonu kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen ölçümler simülasyon verileriyle karşılaştırılmıştır.

Elde edilen verilere göre;

- Katı FDM'nin geçirgenliğinin düşük olması güneş radyasyonunu geri saçmakta, bu durum da oda sıcaklığını düşürmektedir.
- Erime sıcaklığı 26.5°C FDM yerine, erime sıcaklığı 21°C olan FDM kullanımıyla duvarın performansı artacaktır.
- Seçilen FDM'nin bir diğer dezavantajı, güneş ışımalarının katı halde FDM'den geri saçılması ve iç mekân aydınlatmasında azalmaya neden olmasıdır.
- Yazarlar genel itibarıyla FDM'nin enerji depolama sistemindeki etkisinin olumlu olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 5. FDTD Sistem Detayı (Manz ve diğ. 1997)

Figure 5. PCTW System Detail

Onishi ve diğ.'nin (2001) Japonya'nın Sapporo kentinde sürdürülen çalışmada 7 farklı TD konfigürasyonunun ısı davranışını analiz etmiştir. FDM olarak 30–31°C, 35–36°C ve 20–21°C erime noktalarına sahip 3 farklı inorganik FDM kullanılmıştır. Çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak (CFD) TD'li bir odanın ısı davranışını incelenmiştir. Güneş enerjisine ek olarak, duvara elektrikli ısıtıcı takılmıştır. Beton duvar, elektrikli ısıtıcılığı ve ısıtıcısız üç farklı FDM katmanı içeren 7 konfigürasyon incelenmiştir:

Durum 1: 50 mm beton duvar (TD)

Durum 2: İnorganik FDM (erime noktası: 30-31°C) + 50 mm duvar

Durum 3: İnorganik FDM (erime noktası: 35-36°C) + 50 mm duvar

Durum 4: İnorganik FDM (erime noktası: 20-21°C) + 50 mm duvar

Durum 5: 50 mm beton duvar (TD) + ısıtıcı

Durum 6: İnorganik FDM (erime noktası: 30-31°C) + 50 mm duvar + ısıtıcı

Durum 7: İnorganik FDM (erime noktası: 35-36°C) + 50 mm duvar + ısıtıcı

Yazarlar tarafından geliştirilen simülasyon 'SCIENCE' CFD koduyla gerçekleştirilmiştir. Örgü boyutu 24x37x16 hesaplanmıştır. Zaman entegrasyonu için tamamen örtülü bir yöntem benimsenmiştir ve hesaplama zaman adımı Δt 15 saniye olarak ayarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre,

- Durum 4'teki FDM'nin etkisi, Durum 2 ve 3'e göre daha iyidir ve gece oda sıcaklığı 28° C'nin üzerinde muhafaza edilmiştir.
- 4 durumun hepsinde de, ısıtıcı kullanılmamasına karşın, iç mekân sıcaklığı, dış ortam sıcaklığından belirgin seviyede yüksek muhafaza edilmiştir.
- Durum 5,6, ve 7'de ortalama oda sıcaklığı tüm gün boyunca 18°C'nin üzerinde seyretmiştir, ancak, sıcak günlerde (25 ve 27 Ocak) oda havası aşırı ısınma gözlenmiştir. Bu artı enerjiyi etkili olarak kullanabilmek için FDM miktarı (ısı depolama duvarının kalınlığı) veya ısıl özellikleri (erime / donma noktası) ayrıntılı olarak incelenmelidir.
- Durum 5 ve 7 karşılaştırıldığında, FDM'li duvar sisteminin daha düşük elektrik maliyetine sahip olduğu ve gün içinde daha az enerji harcadığı görülmüştür.
- Bu yaklaşım düşük enerji ev uygulamaları için faydalıdır.
- Bulutlu günlerde FDM etkin çalışmadığı için her iki sistemde de enerji tüketiminin aynı olduğu gözlemlenmiştir.

Zalewski ve diğ.'nin (2012) Kuzey Fransa'da yaptıkları çalışmada klasik TD'nin ağır kütesini hafifletmeyi amaçlamıştır. FDM olarak 27°C erime sıcaklığına sahip hidratlı tuz kullanılmıştır. Çalışma kapsamında 22 Nisan-5 Mayıs tarihleri arasında küçük ölçekli kompozit duvarın gerçek koşullarda deneysel ölçümleri yapılmıştır. Deney hücrelerini çevreleyen duvarlar 5 cm yalıtım malzemesi ve ahşapla kaplanmıştır. TD ise cam panel, 3 cm havalandırmasız boşluk, FDM duvarı ve yalıtım katmanından oluşmaktadır. FDM buz kasetlerine doldurulup tuğla şeklinde kullanılmıştır. (Şekil 6). FDM ve yalıtım katmanı arasındaki 5 cm'lik boşluk ise alt ve üst 5x50 cm'lik menfezlerle havalandırılmakta ve iç mekân dış mekân arasındaki enerji transferini sağlamaktadır. Deney ölçümlerinde pıranometre, ısıl çift, akı ölçer ve anemometre kullanılmıştır.

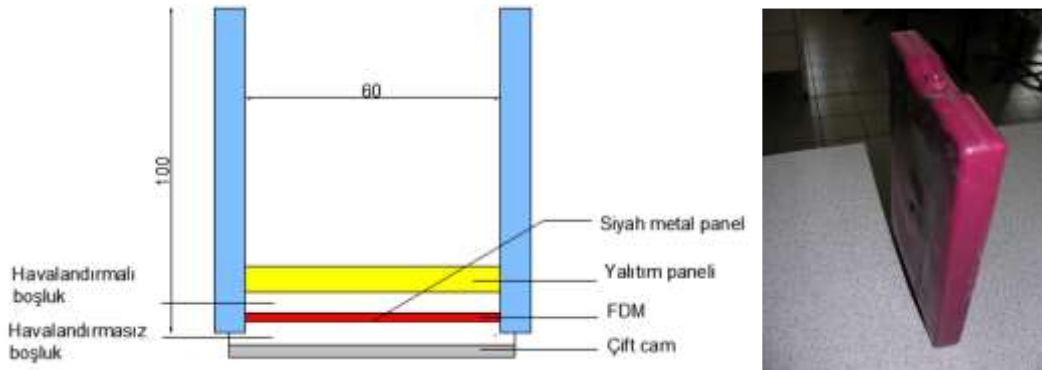
Deney sonuçlarına göre;

- Alt ve üst menfezlerdeki sıcaklık farkları, özellikle güneş ısı akısı arttığında kayda değerdir. Bu nedenle hava hızları 25 cm/s'den düşük olduğunda serbest konveksiyon baskındır.
- FDM aynı hacimdeki betondan daha fazla ısı depolamış ve geceleri bu ısıyı açığa çıkarmıştır.
- Dış hava sıcaklığı gece boyunca sabitken, iç mekân sıcaklığı FDM'nin katılma esnasında açığa çıkardığı ısı sebebiyle düşmüştür.
- FDM duvarı maksimum 50-60°C'ye ve üst menfezdeki maksimum hava sıcaklığı 40°C ye ulaşmıştır.

Yazarlar çapraz korelasyon yöntemiyle emilen ve iletilen akının gecikme süresini tahmin etmişlerdir. Tuz hidrati 40 dakikalık gecikmeyle depoladığı ısıyı ortama bırakmıştır. Bu zaman gecikmesi, kış ayında FDM'li duvarın bir konut yapısı için tasarlanması durumunda negatif bir etki olarak kabul edilmektedir. Ancak toplu kullanımların olduğu alışveriş merkezi, okul, klinikler vs gibi gün içerisinde kullanılan yapılarda böyle bir gecikmenin avantaja dönüşmesi söz konusudur.

- Gece 2'den sonra depolanan ısının 25W/m²'lik bir ısı akısı hızında salınması FDM'nin etkin olduğunu göstermektedir.
- 24 günlük deneyler sonucunda, camdaki toplam güneş ışınımı 78kWh/m²'dir. FDM duvarı bu güneş enerjisinin %49'unu emmiştir.

- FDM duvarındaki enerji salımı 23.5 kWh/m^2 'dir. Bu da emilen enerjinin %68'nin geri kazanıldığı anlamına gelmektedir.



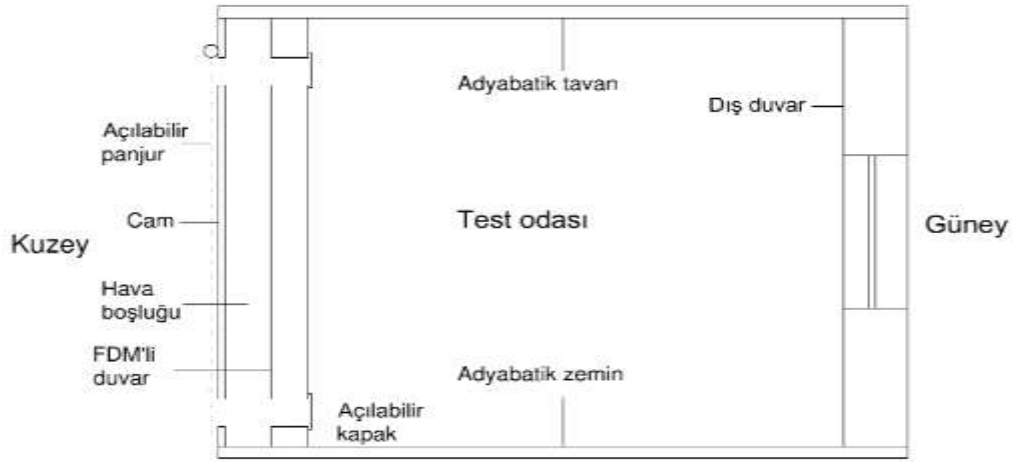
Şekil 6. FDTD Sistem Detayı ve FDM Dolu Buz Kasedi (Zalevski ve diğ., 2012)

Figure 6. PCTW System Detail and PCM Filled Ice Tray

Kara ve Kurnuç'un (2012) Erzurum koşullarında yaptığı çalışmada üçlü camlı, FDTD sistemini test etmiştir. FDM olarak 45°C erime noktasına sahip GR41 ve 35°C erime sıcaklığına sahip GR35 mikrokapsüllenmiş parafin kullanılmıştır. Çalışmada FDM duvar sıvasının içine dahil edilmiştir. 3'lü cam ünitesi kışın güneş ışığının çoğunu geçiren ve yaz aylarında yansıtan Primasolar camdan oluşmaktadır. Yazarlar bu çalışmada TD sistemini iyileştirmeyi ve iki önemli dezavantajını ortadan kaldırmayı amaçlamıştır. Bunlar: (i) Duyulur ısı depolamak için gereken kalın duvar hacmi ve (ii) normal cam ile kullanıldığında yaz ayında aşırı ısınma. Deney odası birbirinden bağımsız iki bölme halinde tasarlanmış ve farklı ergime sıcaklığına sahip iki ayrı FDM denenmiştir. Kullanılan TD sisteminin alt ve üst bölümlerinde menfezler vardır. Üst menfezde yer alan havalandırma fanı FDM tarafından depolanan ısıyı iç mekâna aktarmaktadır. Deney aşamasında iç mekân sıcaklığı dijital termostatlı bir ısıtıcıyla $20\text{-}23^\circ\text{C}$ arasında sabitlenmiştir. Her iki test odasında ölçümler sıcaklık sensörleri, piranometre, yüzey sıcaklık problemleri, güneş sıcaklık sensörü, anemometre ve ısı akı ölçer ile gerçekleştirilmiştir. Dijital kontrol cihazı, ortam sıcaklığı FDM'lerin maksimum erime sıcaklığına ulaştığında fanları harekete geçirir. Açık hava şartlarında bir yıl boyunca süren testler sonucunda;

- GR35'li duvar, GR41'li duvara göre daha verimli sonuç vermiştir. Ekim başından Şubat'ın sonuna kadar, GR35'li duvarın günlük toplam veriminin % 22-% 37 arasında, GR41'li duvarın ise % 20 ila % 33 arasında değiştiği görülmüştür.
- İç mekân sıcaklığı kış sezonu boyunca konfor aralığının dışına çıkmıştır.
- Odada iç mekânın havasını kontrol edecek bir sistemin kullanılması gerekmektedir. Böylece, FDM'li duvarın sıcaklığına göre ayarlanabilir fan ile depolanan enerji kademe kademe içeri sokulur ve oda sıcaklığı artırılabilir.
- Kış mevsiminde aşırı ısınmayı önlemek için bir diğer çözüm, tavanda veya hücre duvarlarında uygulanan $22\text{-}24^\circ\text{C}$ aralığında FDM'li alçı levhaların kullanılmasıdır. Fanların da kontrolü ile bu olası çözüm, FDM'nin gün boyunca aşan enerjiyi toplamasına ve gece boyunca depolanan enerjiyi serbest bırakmasını sağlar.
- FDM duvarı, test odasının yıllık ısı yükünün % 14'ünü sağlamıştır.
- FDM duvarlarının genel toplam verimliliği % 20 ila % 36 arasında değişmiştir.
- Üçlü cam, FDM duvarındaki enerji depolamasını azaltmıştır. Güneş enerjisi kazancı Nisan ve Mayıs aylarında sıfıra düşmüştür. Şekilde FDM duvarının katkısını göstermektedir.
- Ekim ve Kasım aylarında FDM duvarı tarafından sağlanan ısı yükü %70 ve %41'dir.
- Güneş geçirgenliği: kışın 0,45'den 0,55'e, yaz boyunca ise 0,2'den 0,25'e kadar değişmiştir.

Fiorito'nun (2012) Avustralya'da yaptığı çalışmada, hafif yapılarda TD'nin ısı performansını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Avustralya'da 5 farklı iklim bölgesi seçilmiştir. Her iklim bölgesine uygun teknolojiyi tanımlamak için FDM'nin duvar detayındaki yeri ve erime noktası gibi faktörler dikkate alınmıştır. Farklı erime noktalarına sahip 4 farklı FDM olarak (18-23 °C RT21, 25-28 °C RT27, 27-31 °C RT 31 ve 38-43°C RT42) Parafin wax kullanılmıştır. FDM'ler alüminyum modüllerde depolanarak sistem detayının 2. Ve 4. katmanlarında kullanılmıştır. Test hücresinin güney duvarı çift camlı bir pencere ile yalıtılmış hafif bir duvar olarak modellenmiştir. (Şekil 7). Kuzey cephesinde ise 6 mm'lik tek cam ünitesi ve 100 mm havalandırma kanalından oluşan bir TD modellenmiştir. Havalandırma kanalında kontrol edilebilir alt ve üst menfezler yer almaktadır. Yaz aylarında aşırı ısınmayı önlemek için ise harici bir stor perde kullanılmıştır.



Şekil 7. FDTD Detayı (Fiorito, 2012)

Figure 7. PCWT Detail

5X5 m boyutlarında inşa edilen 2 adet test odası Energy Plus TM ile simüle edilmiştir. EnergyPlus TM'ye dahil edilmiş sonlu fark (CondFD) algoritması kullanılmış ve Adams-Moulton çözüm yaklaşımına dayanan bir şema kullanılmıştır. Ana denklem aşağıdaki gibidir.

$$C_p \rho \Delta X \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = k_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_w \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x'} \quad (3)$$

Çalışmada termal iletkenlik değerleri (k_w ve k_E) değerleri şu şekilde hesaplanır:

$$k_w \frac{k_{i+1}^{j+1} - k_i^{j+1}}{2} \quad (4)$$

$$k_E \frac{k_{i-1}^{j+1} - k_i^{j+1}}{2} \quad (5)$$

Simulasyon sonuçlarına göre ;

- Hafif soğuk ve ılık iklimlerde; TD'nin dış yüzeyine yerleştirilen FDM, iç sıcaklık dalgalanmasını optimum düzeyde azaltmıştır. Bu durumda en verimli sonuç için, dış yüzey sıcaklığının ortalama değerinde erime noktasına sahip bir FDM seçimi gerekmektedir.
- Hafif sıcak ve subtropikal iklimlerde; TD'nin orta bölümünün iç yüzeyine yerleştirilen FDM, yüzey sıcaklığının değişkenliğini azaltmıştır. Bu durumda, erime aralığı ile yüzeysel sıcaklıkların ortalama değerleri arasında bir malzeme seçimi en verimli sonucu verecektir.
- Sıcak ve kuru iklimlerde; Yüksek günlük sıcaklık aralığında, orta bölmenin dış yüzeyinde veya iç yüzeyinde FDM'lerin entegrasyonu, yüzeysel sıcaklık değişkenliğini büyük ölçüde azaltmıştır.

Ayrıca FDM'lerin iç yüzeye yerleştirilmesi, yüksek güneş kazanımlarının neden olduğu aşırı ısınmayı önlemiştir.

- En verimli sonuç FDM'nin konum ve erime sıcaklığının iklim koşullarına göre optimizasyonu ile mümkündür.

Berthou ve diğ.'nin (2015) Fransa'da yapılan çalışmada eş zamanlı olarak süper izolasyon, ısı depolama ve doğal aydınlatma sağlayan TD sistemi önermiştir. Yapılan deneyde FDM olarak 21.3°C'de erime noktasına sahip yağ asiti ötektik karışımı kullanılmıştır. Duvar katmanı FDM dolu 19x19x5 cm cam tuğla, 4 cm silika aerogel ve 0,8 cm saydam camdan oluşmaktadır. Sistemin davranışını analiz etmek için farklı ölçeklerde deneyler yapılmıştır. Bunun için ilk olarak silis aerogel ve FDM'nin termal ve optik özelliklerine ayrı ayrı bakılmıştır. Buna göre;

- Diferansiyel Taramalı Kalorimetre ile yapılan ölçümlerde FDM'nin faz değişim entalpisi 152 kJ kg⁻¹ bulunmuştur.

Çalışmanın 2. aşamasında küçük ölçekte (1m²) FDTD prototipi inşa edilerek laboratuvar ortamında sistemin termal ve optik özellikleri incelenmiştir. Prototip, iki dikey ve paralel izotermal yassı plakadan oluşan bir ısı eşanjörü test ekipmanına yerleştirilmiş ve her iki yüzeye de sıcaklık yükleri uygulanmıştır. Buna göre;

- Prototipin ısı direnç değeri, FDM katı halde iken, 1.57 ila 1.68 m²KW⁻¹, sıvı halde iken 1.39 m²KW⁻¹ olmuştur.
- Prototipin U değeri, FDM sıvı ve katı halde iken, sırasıyla 0.59 ve 0.72 W m⁻¹ K⁻¹'dir.
- FDM sıvı haldeyken prototipin emiliminin yüksek olduğu anlaşılmıştır. Bu durum yaz aylarında fazla ısı depolanacağı için duvarın sıcaklığını artırarak olumsuz bir etkiye neden olacaktır.
- FDM katı haldeyken ışık emilimi daha düşüktür, yani güneş ışınlarının bir kısmı depolanmaktadır. Bu durum, Güney Fransa gibi sıcak Akdeniz iklimlerinde uygulandığında, duvarın verimliliğini azaltmamaktadır.

Çalışmanın son aşamasında, Güney Fransa'daki Sophia Antipolis'te çift bölmeli bir test hücresi üzerinde birebir ölçekte, gerçek koşullarda deneyler yapılmıştır. Duvarların iç ve dış yüzey sıcaklık ölçümleri için PT100 sıcaklık sensörleri kullanılmıştır. Yatay plandaki toplam radyasyon, ±% 4'lük hassasiyette bir piranometre (Pulsonik, 400–1100 nm) ile dikey plandaki toplam radyasyon ise değerinin % ± 7'lik hassasiyette ikinci bir piranometre (Littoclimate 13S374, 320-1060 nm) ile ölçülmüştür. Rüzgâr yönü ve hızı ölçümü için ise rüzgârgülü ve anemometre kullanılmıştır. Çalışmada FDM'li duvar ve standart duvar karşılaştırılması yapılmış ve kullanılan malzemelerin ısı ve optik özellikleri karakterize edilmiştir. Çalışmanın sonucunda;

- FDM'nin faz değişim entalpisi 152 kJ kg⁻¹ 'dir.
- Isı kayıplarının çok düşük olduğu, ısı ve ışık kazanımlarının yüksek olduğu ölçülmüştür.
- Duvarın U değeri (ısı geçirgenlik katsayısı) FDM'nin katı-sıvı durumuna göre 0.59 W m⁻¹ K⁻¹ ve 0.72 W m⁻¹ K⁻¹ ölçülmüştür. Bu da FDM'nin katı haldeyken sıvı durumuna göre, ısı kayıplarını nispeten azalttığını göstermektedir.
- Kış ayında iç-dış mekân sıcaklık farkı 9°C'dir.

Chaichan ve Abaas (2015) Irak'ın Bağdat kentinde yaptığı çalışmada yerel ve uygun maliyetli malzemeler kullanarak FDTM üretmeyi amaçlamıştır. Kasım 2014-Ocak 2015 döneminde yapılan deneylerde sistemin kış ayında Bağdat evleri için uygunluğu test edilmiştir. FDM olarak 45°C erime noktasına sahip parafin mumu kullanılmıştır. Bu malzeme, Irak piyasalarında uygun maliyeti nedeniyle seçilmiştir. FDTM kışın kurulup yazın sökülebilen, içi parafin mumu dolu alüminyum borulardan oluşmaktadır. Her bir boru 400 gram parafin mumu ile doldurulmuştur. Kullanılan toplam parafin wax 7.2 kg'dır. 1 m²'lik ahşap kutu şeklinde kurulan FDTM 1 cm kalınlığında cam yünü ile yalıtılmıştır. Soğuk hava girişi için sol alta, sıcak hava çıkışı için ise sağ üste 1 cm çapında 10'ar adet menfez açılmıştır. Duvarın iç yüzeyine 3 mm kalınlığında siyah bir bakır plaka yerleştirilmiştir. Alüminyum folyo ile kaplı plaka, yüzeye çarpan güneş ışınlarını borulara yansıtmaktadır. TD 3 mm kalınlığında şeffaf camla kaplıdır ve gün batımından sonra ahşap bir kapakla kapatılmaktadır. Üstteki menfezlerin yanında sıcak havayı dışarı atmak için bir fan yerleştirilmiştir. Çalışmada 11 adet ısı çifti kullanılmıştır.

Bunlardan 3'ü parafin mumunun sıcaklık değişimini gözlemlemek için farklı borulara yerleştirilmiştir. 3 ısı çift duvara, 3 ısı çift yere sabitlenmiş, 1 ısı çift soğuk havayı, 1 ısı çift ise sıcak havayı ölçmektedir. Duvarın çalışma prensibi sera etkisinin kullanılmasına bağlıdır. Duvara yansıyan güneş ışınımı camdan borulara geçmektedir. Radyasyonun bir kısmı alüminyum yansıtıcıdan yansyarak borulara vurmakta, diğer dağınık ışınlar ise camdan yansımaktadır. Böylece duvarın içindeki ısı artmaktadır.

Çalışmanın sonucunda;

- Bu malzemenin Irak kış koşulları için uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Parafin mumunun kolay bulunabilirliği ve düşük fiyatı uygun kullanım olanağı sağlamaktadır.

Sun ve Wang (2016) muson ikliminin etkin olduğu Jilin-Çin'de yaptıkları çalışmada kışın ısıtma ve yaz aylarında havalandırma / soğutma problemini çözmek amaçlanmıştır. Çalışmada 5000x1600x2200 mm ölçülerindeki deney odası 240 mm levha ile bölünerek FDM'li oda ve referans oda karşılaştırması yapılmıştır. Yazarların önceki çalışmalarında (Sun ve diğ., 2013) hazırlanan 19,45°C erime noktasına sahip parafin / genişletilmiş perlit / grafit FDM, enerji depolamak için toplayıcı harç katmanına ve iç harç katmanına eklenmiştir. Güney tarafa konumlandırılan FDTM, dıştan içe doğru 6 mm güneş ışığı panosu, 15 mm toplayıcı harç tabakası, 40 mm ekstrüzyon levha, 390 mm x 190 mm x 190 mm beton blok ve 15 mm FDM harcı tabakasından oluşmaktadır. Güneş ışığı panosu ile toplayıcı harç tabakası arasındaki hava boşluğu 100 mm'dir. Duvarın alt ve üstünde 200 mmx200 mm 4 adet menfez bulunmaktadır. Menfezlerin açılma zamanı 10:00-16:00'dür. Deneyde, 4°C'den daha büyük ve FDM'lerin faz değişim sıcaklığından daha düşük iç mekân sıcaklığını uygun koşullarda tutmak için yardımcı bir ısı kaynağı kullanılmıştır. Sistemde güneş enerjisinin bir bölümü hava kanallarından iç mekâna aktarılır, bir bölümü FDM içerisinde depolanır, kalanı ise konveksiyon ve radyasyon yoluyla iç mekâna iletilir. FDTM'nin en önemli avantajı gün boyunca güneşten gelen fazla ısıyı depolaması ve gece boyunca açığa çıkarmasıdır.

FDTM'nin transfer süreci çok karmaşıktır. Süreci teorik olarak incelemek için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Uzun dalga radyasyonu ihmal edilebilir düzeydedir.
- Güneş ışığı panelinin kalınlığı ve ısı kapasitesi ihmal edilebilir.
- Güneş ışığı panosu ve harç tabakasının yansımaları ihmal edilebilir.
- FDTM'nin (güneş ışığı panosu, kanaldaki hava, toplayıcı harç tabakası ve duvarın iç yüzeyi de dahil) ısı transfer işlemi, enerji dengesi denklemleriyle ifade edilir. Duvarın ısı performansını daha iyi analiz etmek için deneyler kış ayında gerçekleştirilmiştir. Deney odasının yapılan teorik ve deneysel ölçümlerine göre;
- Duvarın tabana yakın bölgesinde sıcaklık daha düşükken, üst bölgelerde daha yüksek ölçülmüştür. Bu durum "baca etkisi" ile açıklanabilir.
- FDM'li duvarın iç mekânda ısı sirkülasyonu sağladığı ve ısı dalgalanmalarını azalttığı görülmüştür.
- Depolama duvarı, kanallardaki havayı ısıtmak için güneş radyasyonunu emmektedir. Isınan hava yükselerek üst menfezlerden iç mekâna geçmektedir. İç mekândaki soğuk hava ise alt menfezlerden tekrar kanala geçmektedir. Bu durum FDTM'nin iç mekân sıcaklığını iyileştirmek için odanın termal hava dolaşımını teşvik edebileceğini göstermektedir.
- FDTM'nin iç mekân sıcaklığı, referans odadan daha yüksektir. 16:00-9:00 saatleri arasında, güneş etkisi azaldığında, her iki odada da iç mekan sıcaklıkları kademe kademe düşmektedir. FDTM'nin iç mekân sıcaklığı erime noktasından düşük olduğunda FDM'de faz değişimi gözlenmemiştir.
- Sabah 6.00'da iki oda arasındaki sıcaklık farkı 1,13°C'dir.
- 9:00-14:00 arasında FDM'li odanın sıcaklığında referans odaya göre daha hızlı yükseliş görülmektedir. Sıcaklık farkı 5,38°C'dir.
- 14:00-16:00 arasında güneş ışınımı düşüşüyle sıcaklıkta azalma görülür. FDTM'de bu düşüş 30 dk'lık gecikmeyle olmuştur.

- Veriler FDM'nin iç mekân termal konforunu iyileştirmeye katkı sağladığı sonucunu göstermektedir.

Liu ve diğ.'nin (2018) yaptıkları çalışmada FDTD ve referans odayı simüle ederek termal performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Çift FDM'li duvar panelleri bina cephesine yerleştirilmiştir. Dıştaki panel gece boyunca soğutma enerjisini depolamakta, içteki panel ise radyant soğuma sağlamaktadır. Gündüz aşırı ısınmayı önlemek için dış panele yüksek yansıtıcı perde yapılmıştır. FDTD sistemi, cam kapak, hava kanalı, dış FDM duvar paneli, EPS yalıtım katmanı, tuğla ve soğutma suyu borularıyla donatılmış iç duvar panelinden oluşur. FDM olarak erime sıcaklığı 22°C ve 24°C olan tuz hidratları tercih edilmiş ve paslanmaz çelik kap içerisine makrokapsüllenmiştir. Changsha'daki tipik yaz hava koşullarında sistemin ısı tepkisini analiz etmek için, için 1 Ağustos - 7 Ağustos tarihleri arası tercih edilmiştir. FDTD sisteminde dış ortam koşullarına göre 3 çalışma modu uygulanmıştır:

- Soğutma enerjisi depolama: gece 2 ve 3 nolu kapaklar açılarak, dışardaki soğuk hava kanala girer, dıştaki FDM'yi katılaştırır ve fanlarla iç mekâna aktarılır.
- Soğutma enerjisi salınımı: gece 2 ve 4 nolu kapaklar açılarak, içerdeki hava kanala girer. FDM tarafından soğutulan hava tekrar fanlarla iç mekâna aktarılır.
- Gündüz doğal havalandırma: Aşırı ısınmayı önlemek için 1 ve 3 nolu kapaklar açılır ve yüksek yansıtıcı perde güneş ışığını yansıtmak için indirilir.

Çalışmada önerilen FDTD sisteminin farklı iklim bölgelerinde uzun süre boyunca ısı performansını tahmin etmek amacıyla sayısal bir model geliştirilmiştir. Modelde iç mekân hava ısı transferi, ısı transfer denklemleri, uzun dalga radyasyonu, kanal ve dış duvar ısı transferi, duvar ısı iletimi ve güneş radyasyonu dikkate alınmıştır. Kabul edilen varsayımlar ise şu şekildedir:

- FDM homojen ve izotropiktir. FDM'deki konvektif ısı transferi ihmal edilmiştir.
- Erime ve donma sürecinde FDM'nin özgül ısı kapasitesi hariç, malzemelerin termofiziksel özellikleri sabittir.
- Farklı katmanlar arasında sadece tek boyutlu ısı transferi söz konusudur.
- Çalışmayı doğrulamak için Meng ve diğ. (2013) çalışması referans alınarak benzer konfigürasyon kurgulanmıştır.

Deney odasının yapılan simülasyon ölçümlerine göre;

- Farklı erime noktasına sahip FDM'ler denendiğinde Changsha iklim koşulları için 22 °C erime noktası ve 176 kJ/kg gizli ısıya sahip FDM'nin uygun olduğu ve soğutma enerjisi salınımı için önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. Böylece soğutma enerjisi salınımındaki maksimum ortalama değer, FDM'nin erime sıcaklığı 22 ° C iken % 39,4 artarken 43.5 W / m²'ye ulaşmıştır.
- Klasik TD sistemi ile karşılaştırıldığında, FDTD sisteminde iç mekân 22°C iken, yıllık soğutma enerjisi tüketimi % 20,8 oranında azalarak 438 kWh'e düşmüştür. İç mekan 24 ° C iken ise, % 18,6 azalarak 425 kWh' düşmüştür.
- Geleneksel TD sistemiyle karşılaştırıldığında, iç mekân sıcaklığı 22-24°C arasında sabit iken, yıllık soğutma enerjisi tüketimi %20,8 ve %18,6 oranında azalmıştır.
- Çalışma FDTD'nin bina enerji tüketimini azaltma ve iç mekân ısı konforunu iyileştirmede, doğal soğutma enerjisinden yararlanarak, yaz koşullarında aşırı ısınmayı engelleyerek ve yüksek sıcaklıkta soğuk kaynakları kullanarak, potansiyelleri için bilimsel kanıtlar sağlamıştır.

TARTIŞMA (DISCUSSION)

Bu makalede, TD'de FDM uygulamalarının ve FDM'nin verimliliğini etkileyen faktörlerin gözden geçirilmesi amaçlanmıştır. Araştırmada FDTM'nin binaların ısı performansını üzerindeki etkisini gösteren birçok deneysel ve simülasyon çalışması sunulmuştur. Çalışmaların sonuçlarına bakıldığında FDM, enerji ve elektrik tüketimini, soğutma yükünü ve sıcaklık dalgalanmalarını azaltmaktadır. FDM, geleneksel iklimlendirme sistemleri içerisinde etkili bir alternatiftir. Gizli ısı depolama konseptinin pratik bir uygulaması olan FDM, iç mekân sıcaklığını kontrol etmek için akıllı bir malzeme olarak işlev görmektedir. FDM TD'ye entegre edildiğinde etkinliğini daha iyi şekilde göstermekte; bununla birlikte,

önemli miktarda enerji depolama yoğunluğu ile gün içinde yüksek sıcaklık değişimlerini önceden tahmin etmekte ve uygun konfor aralığındaki sıcaklıkları dengeleyebilmektedir.

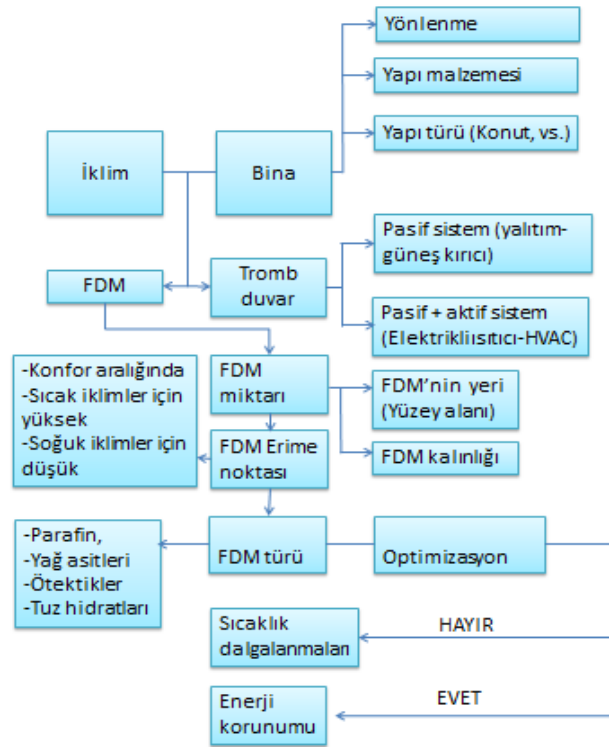
Literatürde yapılmış çalışmalardan elde edilen sonuçlara dönük değerlendirme aşağıda çizelge halinde verilmiştir.

Çizelge 1. FDTD Kullanımına Yönelik Çalışmaların Temel Nitelikleri ve Sonuç Değerlendirmesi

Table 1. Basic Characteristics and Results Evaluation of the Studies Towards PCTW Use

Referans	Bölge	FDM özellikleri	Sistem	Sonuç
Manz ve diğ., 1997	İsviçre Zürih	Tuz hidratı - 26.5 ° C	Şeffaf yalıtım malzemesi ve FDM içeren yarı saydam camdan	Katı FDM'nin geçirgenliğinin düşük olması nedeniyle güneş radyasyonu geri saçılımı ve oda sıcaklığında düşüş. Öneri: Erime sıcaklığının 26,5 °C'den 21 ° C'ye düşürülmesiyle duvarın performansında artış.
Onishi ve diğ.,(2001)	Sapporo-Japonya	3 farklı İnorganik FDM 1:(30–31°C), 2:(35–36°C), 3:(20–21°C)	7 konfigürasyon: beton duvar, elektrikli ısıtıcı ve elektriksiz +3 farklı FDM katmanı	Düşük enerji ev uygulamaları için faydalı. İyi hava koşullarında daha az enerji tüketimi. Bulutlu günlerde FDM etkin çalışmadığı için her iki sistemde eşit enerji tüketimi.
Zalewski ve diğ., (2012)	K. Fransa	Hidratlı tuz / 27oC	FDM'li buz kasetleri	FDM ısı depolama kapasitesi >beton. Dış hava sıcaklığı: gece sabit, iç mekân sıcaklığı:FDM katlaşırken açığa çıkan ısı sebebiyle beklenenden düşük.
Kara ve Kurnuç, (2012)	Erzurum	Kapsüllenmiş parafin 13 -41 ° C ve 13-51 ° C	3'lü cam+ FDM'li duvar sıvası	Yıllık ısı yükü: %14. FDM duvar toplam verimlilik: % 20 ila % 36. 3'lü cam etkisi: yaz aylarında FDM duvarında daha az enerji depolanması. Güneş geçirgenliği: kışın 0,45'den 0,55'e, yaz boyunca ise 0,2'den 0,25'e kadar değişim.
Fiorito, (2012)	Avustralya – 5 farklı iklim bölgesi	Parafin wax-18-23 ° C RT 21, 25-28 ° C RT 2727-31°CRT 31 ve 38-43°C RT 42)	Alçıpanel, FDM, Ahşap panel	Isı dalgalanmalarında azalma. Hafif yapıların termal ataletinde artış. En verimli sonuç için öneri: Optimizasyon
Berthou ve diğ., (2015)	G. Fransa	Yağ asiti ötektik karışımı - 21.3oC	Aerojel + FDM dolu cam tuğla	Isı ve ışık kazanımı yüksek, U Duvar: 0.59 W ⁻¹ K-1 ve 0.72 W m ⁻¹ K ⁻¹ , Kış ayı iç-dış sıcaklık farkı 9°C
Chaichan ve Abaas, (2015)	Irak, Bağdat	Parafin wax - 45°C	FDM dolu alüminyum boru + cam yünü ısı yalıtım	Irak kış koşulları için uygun. Parafin wax'ın kolay bulunabilirliği ve düşük fiyatı ile uygun kullanım olanağı
Sun ve Wang, (2016)	Jilin- Çin-	Parafin- 19.45°C	Polikarbonat levha ve FDM'li sıva	İç mekânda ısı sirkülasyonu ve ısı dalgalanmalarında azalma.
Liu ve diğ., (2018)	Changsha	Tuz hidratı- 22°C	FDM dolu paslanmaz çelik kap	Soğutma enerjisi salınımında 44.2 W/m ² lik katkı. Yıllık soğutma enerjisi tüketiminde %20,8 ve %18,6 oranında azalma.

FDTD'nin enerji verimliliği açısından getirilerini, yapılan çalışmaların karşılaştırıldığı Çizelge 1'den görmek mümkündür. FDM sayesinde sıcaklık dalgalanmaları azalmakta, iç mekân konforu sağlanmakta ve enerji tüketimi azalmaktadır. Binaların TD uygulamalarında FDM kullanımını özetleyen genel bir tipoloji diyagramı Şekil 8'de verilmiştir. İlgili diyagram Souayfane ve diğ. (2016)'nın çalışmasından FDTD sistemine uyarlanmıştır.



Şekil 8. Bina Trombe Duvarı Uygulamalarında FDM'nin Tipoloji Diyagramı

Figure 8. Typology Diagram of PCM in Building Trombe Wall Applications

Yapı tasarımının etkin olabilmesi için, özellikle enerji performansını etkileyen en önemli kararlar (oryantasyon, bina cephesi, pencere / duvar oranı, form ve malzeme özellikleri gibi) ön tasarım ve tasarım aşamalarında alınmalıdır. Bu bağlamda FDTD'nin verimli olabilmesi için tasarım öncesi ve tasarım sırasında ele alınması gereken aşağıdaki kriterler oldukça önemlidir (Şekil 8): (1) İklim koşulları, (2) FDM erime noktası, (3) FDM kalınlığı ve duvar detayındaki yeri, (4) Pasif sistem (5) Pasif+aktif sistem. Bu kriterlerin yanı sıra FDM'nin türü, mikrokapsülleme- makrokapsülleme yöntemi ve miktarı gibi verimliliğe etki eden diğer kriterler de diyagramda ayrıca verilmiştir.

(1) İklim Koşulları: FDM'lerin kullanım prensipleri çok basittir; bununla birlikte, gizli ısının tüm binanın enerji performansının artırılması için etkin katkısının değerlendirilmesi zordur. FDM'lerin TD sistemlerine entegre edilmesinin optimizasyonu ve bu elemanların binaya optimum entegrasyonu da karmaşıktır. Bu, ana tasarım parametrelerini, yani FDM'nin faz değişim sıcaklığını, termal kütle miktarını ve TD sistemi içindeki konumunu içerir. Ayrıca, bu tür parametrelerin belirli iç ortam yüklerine ve özellikle belirli iklim koşullarına göre belirlenmesi gerekir. Kurgulanan sistemin amacı yaz aylarında soğutma enerjisi talebini veya kış aylarında ısıtma enerjisi talebini azaltmak için optimize edilecekse FDM seçim yaklaşımı da farklı olmalıdır. Bu nedenle, FDTD tasarımında sistemin maksimum verimliliğini sağlamak için farklı iklim koşullarına ve uygulama amacına uygun erime noktası aralığına sahip FDM seçimi yapılmalıdır. Böylece FDM iç ortam sıcaklıklarını stabilize edecek ve termal konfor etkisi sağlanacaktır.

(2) Erime Noktası: FDM seçiminde en önemli parametredir. Belirli bir iklim bölgesine göre uygun erime noktasına sahip FDM seçimi çok önemlidir. Örneğin erime noktası çok düşük FDM seçimiyle gece boyunca iç mekân sıcaklığını konfor aralığında tutmak çok zor olacak ve yaz aylarında yetersiz kalacaktır. Erime noktası çok yüksek FDM seçiminde ise, depolanan sıcaklık miktarı gün boyunca düşecektir. Yapılan çalışmalar çerçevesinde, bazı yazarlar, daha sıcak iklim bölgelerinde yüksek erime sıcaklığına sahip FDM'lerin, daha soğuk iklim bölgelerinde ise düşük erime sıcaklığına sahip FDM'lerin verimli olduğunu savunmaktadır. Diğerleri ise konfor aralığında erime noktasına sahip FDM seçiminin önemini vurgulamaktadır. Genel olarak binalarda seçilen FDM erime aralığı 18-28°C olmakla birlikte, yine en verimli sonuca deney ve optimizasyonla ulaşılabılır (Souayfane ve diğ., 2016).

(3) FDM Paketleme, FDM Kalınlığı ve Detaydaki Yeri: FDTD sistemlerinde kullanılan FDM'ler faz geçişleri sırasında ısı depolayarak verimliliği artırır. Bu sebeple FDM'deki potansiyel hacim kaybının bütün sistemin performansını ekleyebileceği gerçeği göz önüne alınması gereken önemli bir kriterdir. Doğrudan yapı malzemesine entegre edilen FDM'ler, faz değişim esnasında akma yapabilir, veya yapı malzemesine zarar verebilir. Bu sebeple FDM eğer doğrudan kullanılacaksa mikrokapsüllenmesi, aksi takdirde küre, boru, cam, buz kaseti vs gibi elemanlara doldurma yöntemleri kullanılarak makrokapsüllenmesi gerekmektedir. Böylece FDM'nin sızarak hacim kaybetmesi, yapı malzemesinin yüzeyini bozarak korozyonuna neden olması engellenecektir. Ayrıca FDM'nin yapı sistemiyle entegrasyon yöntemi gibi, FDM miktarı ve sistem hacmi içindeki yeri de kritik kararlardan biridir. Örneğin kış ayında FDM tabakasının kalın olması FDM'nin tam olarak faz değiştirmesini engelleyecektir (Souayfane ve diğ., 2016). Bu sebeple verimliliği artırmak açısından FDM miktarı ve sistem detayındaki yerinin iklim koşulları baz alınarak tespit edilmesi de önem arz etmektedir.

(4) Pasif Sistem: Genel olarak klasik TD kış sıcaklığı 15°C 'nin altında olan iklimler için uygundur ve yaz ayları için en temel sorun sistemin aşırı ısınmasıdır. Sıcaklık kontrolünü sağlamak, iç mekân sıcaklığının konfor aralığında kalması için önemlidir. Bu da sisteme güneş kırıcı veya ısı yalıtımı eklenmiş kompozit bir duvar gibi pasif sistemler ile mümkündür (Hu ve diğ., 2017). Pasif sistemler ek enerji gerektirmeyen ve kurulumu kolay olan yapı elemanlarıdır. Tamamen dış ortam sıcaklığına ve değişken hava koşullarına bağlı olarak sisteme entegre edilen bu yapı elemanları, iklimlendirme kontrolü sağlayarak FDM'nin düzgün bir şekilde çalışmasına katkı sağlayacaktır. Örneğin, gece sıcaklıkları FDM faz değişim sıcaklığının önemli ölçüde altına düşmezse, FDM tamamen katılaşmayacak ve bu da çalışmasını takip etmeyi engelleyecektir.

(5) Aktif sistem: Sisteme eklenecek olan elektrikli ısıtıcı ve HVAC gibi elemanlar da sistemin verimliliğini artırmaktadır. FDTD sistemlerinde doğal havalandırma menfezleri, dışarıdan hava dolaşımı sağlasa da bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle aktif bir sistem olarak kabul edilen mekanik havalandırma daha iyi bir ısı transfer katsayısı sağlayarak FDTD sisteminin verimini artırabilir. Ayrıca bulutlu günlerde hem FDM hem de TD etkin çalışamayacağından, FDM'yi faz değişim sıcaklık aralığında tutabilmek için elektrikli ısıtıcılar ile sisteme termal enerji depolama kazandırılabilir.

SONUÇ (CONCLUSION)

Makale son 20 yılda uygulanan FDTD sistemleri alanında yapılan deneysel ve simülasyon çalışmalarının derlendiği mevcut durum inceleme çalışmasıdır. Çalışmanın amacı, FDM ile bütünleştirilmiş TD'lerin çalışma sonuçlarını inceleyerek sürdürülebilir mimarlığa katkı sunmaktır. FDM'ler ile ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde FDM'lerin duvar, tavan, döşeme, çatı uygulamaları, FDM'lerin kapsüllenmesi ve termofiziksel özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine odaklandığı görülmektedir. Ancak pasif sistemlerden FDTD uygulamaları henüz deneysel boyuttan öteye gidememiştir. FDM'lerin gizli ısı depolama özelliği sayesinde, TD'nin ısıtma ve soğutma uygulamalarında verimliliğinin artırılması ve duvarın konvansiyonel ağır ısı kütlesinin hafifletilmesi mümkündür. Ancak TD'nin basit uygulama şemaları olmasına karşın tam bir verimlilik sağlamak konusunda bazı güçlükleri vardır. Detaylarına karar verilen bir FDTD'nin yıl içerisinde dış ortam koşullarına karşı ne şekilde cevap vereceğini öngörmek zordur. Buna göre FDTD'yi tasarlamadan önce sisteme etki edecek kriterleri göz önüne alarak duvarın karşılaşılabileceği olası sorunları görmek verimliliği artıracaktır. Belirli bir bölgede yapılacak olan FDTD sisteminde en verimli sonucu almak tüm bu kriterlerin optimizasyonu ile mümkün olacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

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

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Abuelnuor, A., Omara, A., Saqr, Km., Elhag, H., 2018. "Improving Indoor Thermal Comfort By Using Phase Change Materials: A Review", *Int J Energy Res.*, Vol. 42, No.6, pp. 2084- 2103.
- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M.Z.D., Wahid, M.A., Jomehzadeh, F., Famileh, I.Z., Calautit, J.K., Hughes, B.R. A., 2016, "Review On Phase Change Material (PCM) For Sustainable Passive Cooling in Building Envelopes", *Renew Sustain Energy Rev*, Vol.60, pp. 1470-1497.
- Alam, T.E., Dhau, J.S., Goswami, D.Y., Stefanakos, E., 2015, "Macroencapsulation and Characterization of Phase Change Materials for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems", *Appl. Energy* Vol.154, pp. 92-101.
- Anderson, Rkf., 1985, "Natural Convection in Active and Passive Solar Thermal Systems", *Advn Heat Transfer*, vol.8, pp. 1-86.
- Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A., 2010, "Phase Change Materials For Building Applications: A State-Of-The Art Review", *Energy Build*, vol.42, pp.1361-1368
- Benli, H., Durmuş, A., 2007, "Havalı Güneş Kolektörleri ve Gizli Isı Depolama Yöntemi Kullanılarak Sera Isıtılması". *Mühendis Ve Makine*, cilt.48 no.569, ss.16-25
- Berthou, Y., Biwole, P., Achard, P., Sallée, H., Tantot-Neirac, M., Jay, F., 2015, "Full Scale Experimentation on a New Translucent Passive Solar Wall Combining Silica Aerogels and Phase Change Materials", *Solar Energy*, vol.115, pp. 733-742.
- Beyhan, B., Cellat, K., Konuklu, Y., Gungor, C., Karahan, O., Dundar, C., Paksoy, H., 2016, "Robust Microencapsulated Phase Change Materials in Concrete Mixes for Sustainable Buildings", *Int. J. Energy Res.*, vol.41, no.1, pp.113-126
- Cabeza, L. F., Castellón, C., Nogués, M., Medrano, M., Leppers, R., Ve Zubillaga, O., 2007, "Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Savings", *Energy and Buildings*, vol.39, pp. 113-119.
- Casini, M., 2014, "Smart Materials and Nanotechnology for Energy Retrofit of Historic Buildings", *Journal Of Advances In Civil, Structural And Construction Engineering*, Csce, vol.1, no.3, pp. 88-97
- Ceylan, İ., Zuhur, S., Gürel A. E., 2017, "Isı Depolama Yöntemleri ve Uygulamaları", *TTMD Dergisi*, ss.38-47
- Chaichan, M.T., Abaas, K.I., 2015, "Performance Amelioration of a Trombe Wall by Using Phase Change Material (PCM)", *International Advanced Research Journal ,n Science, Engineering and Technology*, vol. 2, no.4, pp.1-6
- Chandel, S.S., Agarwal, T., 2017, "Review of Current State of Research on Energy Storage, Toxicity, Health Hazards and Commercialization of Phase Changing Materials", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.67, pp.581-596.
- Chen, Y., Zhao, L., Shi, Y., 2017, "Preparation of Polyvinyl Chloride Capsules for Encapsulation of Paraffin by Coating Multiple Organic/Inorganic Layers", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* vol.77, pp.177-186.
- Doğan, A., Pirasaci, T., 2009, "Bina Cephelelerinde Yalıtım Yerine Trombe Duvar Kullanımının İncelenmesi", *Tesisat Mühendisliği*, cilt.112, ss.41-51.
- Fiorito, F., 2012, "Trombe Walls For Lightweight Buildings in Temperate and Hot Climates. Exploring The Use Of Phase-Change Materials For Performances Improvement", *Energy Procedia*, vol.30, pp.1110-1119.
- Ghoneim, A.A., Klein, S.A., Duffie, J.A., 1991, "Analysis Of Collector-Storage Building Walls Using Phase-Change Materials", *Solar Energy*, vol.47, pp.237-242.
- Günerhan, H., 2004, "Duyulur Isı Depolama Ve Bazalt Taşı", *Mühendis ve Makina - Cilt: 45 Sayı: 530*.
- Hawladar, M.N.A., Uddin, M.S., Khin, M.M., 2003, "Microencapsulated PCM Thermal-Energy Storage System", *Appl. Energy*, vol.74 no. pp.195-202.

- Heinz, A., Streicher, W., "Experimental Testing of a Storage Tank Filled with Microencapsulated PCM Slurries, Phase Change Material and Slurry", Scientific Conference and Business Forum, Yverdon Les Bains, Schweiz, Pp. 67-76, 15-17 June 2005.
- Hu, Z., He, W., Jia, J., & Zhang, S., 2017, "A Review on the Application of Trombe Wall System in Buildings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.70, pp.976-987.
- Ji, J., Luo, C., Chow, T.T., Sun, W., He, W., 2010, "Thermal Characteristics of a Building- Integrated Dual-Function Solar Collector in Water Heating Mode with Natural Circulation", *Energy*, vol.36, pp.566-574
- Kalnæs, S.E., Jelle, B.P., 2015, "Phase Change Materials and Products for Building Applications:A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities", *Energy Build.* Vol.94, pp.150-176.
- Kara, Y., & Kurnuç, A., 2012, "Performance of Coupled Novel Triple Glass Unit and PCM Wall", *Applied Thermal Engineering*, vol.35, pp.243-246.
- Karaman, S., Örüng, İ., Şirin, Ü., 2016, "Trombe Duvar ile Ek Isı Kazanımı Sonucu Hayvan Barınaklarında Havalandırma Etkinliğinin Artırılması". *U. Ü. Ziraat Fakültesi Dergisi*, cilt.30, ss.169-178
- Khudhair, A. M., Farid, M. M., 2004, "A Review on Energy Conservation in Building Applications with Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials", *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no.2, pp.263-275.
- Konuklu, Y., Ostry, M., Paksoy, H.O., Charvat, P., 2015, "Review on Using Microencapsulated Phase Change Materials (PCM) in Building Applications", *Energy Build.* Vol.106, pp.134-155.
- Konuklu, Y., Paksoy, H., "Faz Değiştiren Maddeler İle Binalarda Enerji Verimliliği", 10. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, 919-930, 13-16 Nisan 2011, İzmir.
- Krüger E., Matoski A., 2013, "Evaluation of a Trombe Wall System in a Subtropical Location", *Energy Build;* vol.66, pp.364-372.
- Kunkel, S., Teumer, T., Dornhofer, P., Schlachter, K., Weldeslasie, Y., Kuhr, M., Radle, M., Repk, J., 2018, "Determination of Heat Transfer Coefficients in Direct Contact Latent Heat Storage Systems", *Appl Therm Eng*, vol.145, pp. 71-79.
- Lee, K.O., Medina, M.A., Raith, E., Sun, X., 2015, "Assessing The Integration of a Thin Phase Change Material (PCM) Layer in a Residential Building Wall for Heat Transfer Reduction and Management", *Appl. Energy*, vol.137, pp.699-706.
- Liu, Z., Yu, Z., Yang, T., Qin, D., Li, S., Zhang, G., Haghighat, F., Joybari M.M., 2018, "A Review on Macro-Encapsulated Phase Change Material for Building Envelope Applications", *Building and Environment*, vol.144, pp. 281-294
- Manz, H., Egolf, P., Suter, P., Goetzberger, A., 1997, "TIM-PCM Externalwall System for Solar Space Heating and Daylighting", *Solar Energy*, vol. 61, no.6, pp.369-379.
- Marinosci C., Strachan, P. A., Semprini, G., Morini, G.L., 2011, "Empirical Validation And Modelling of a Naturally Ventilated Rainscreen Facade Building", *Energy and Buildings*, vol.43, pp.853-863.
- Memon, S. A., 2014, "Phase Change Materials Integrated in Building Walls: A State Of The Art Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.31, pp. 870-906.
- Meng, E., Yu, H., Zhan, G., He, Y., 2013, "Experimental and Numerical Study of the Thermal Performance of a New Type of Phase Change Material Room", *Energy Conversion And Management*, vol.74, pp. 386-394.
- Milián, Y.E., Gutiérrez, A., Grágeda, M., Ushak, S., 2017, "A Review on Encapsulation Techniques for Inorganic Phase Change Materials and the Influence on Their Thermophysical Properties", *Renew. Sustain. Energy Rev.* vol.73, pp.983-999.
- Mishra, A., Shukla, A., Sharma, A., 2015, "Latent Heat Storage Through Phase Change Materials", *Resonance*, pp:532-541
- Mohamed, A.S.Y., 2017. "Smart Materials Innovative Technologies in Architecture; Towards Innovative design paradigm", *Energy Procedia* vol. 115, pp.139-154

- Omrany, H., Ghaffarianhoseini, A., Raahemifar, K., Tookey J., 2016, "Application of Passive Wall Systems for Improving the Energy Efficiency in Buildings: A Comprehensive Review", *Renew Sust Energy Rev*, vol.62, pp.1252-1269
- Onishi, J., Soed, H., Mizuno, M., 2001, "Numerical Study on a Low Energy Architecture Based Upon Distributed Heat Storage System", *Renewable Energy*, vol.22. no.1-3, pp.61-66.
- Parameshwaran, R., Kalaiselvam, S., Harikrishnan, S., Elayaperumal, A., 2012, "Sustainable Thermal Energy Storage Technologies for Buildings: A Review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no.5, pp. 2394–2433.
- Pasupathy, A., Velraj, R., Seeniraj, R., 2008, "Phase Change Material-Based Building Architecture for Thermal Management in Residential and Commercial Establishments", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.12, pp.39–64.
- Pons, O., Aguado, A., Fernández, A.I., Cabeza, L.F., Chimenos, J.M., 2014, "Review of The Use of Phase Change Materials (PCM's) in Buildings with Reinforced Concrete Structures", *Mater. Construcción*, vol.64 no.315, pp.1-11
- Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S., 2008, "Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: A Review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.12, no.9, pp.2438–2458.
- Saadatian, O., Sopian, K., K., S., Lim, C. Asim, N., 2012, "Trombe Walls:A Review of Opportunities and Challenges in Research", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 6340-6351.
- Sadineni, S.B., Madala, S., Boehm, R.F., 2011, "Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.15, pp.3617–3631.
- Saffari, M., Gracia, A., Ushak, S., , Cabeza, F.L., 2017, "Passive Cooling of Buildings with Phase Change Materials Using Whole Building Energy Simulation Tools: A Review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. pp. 1239-1255
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen C. R., And Buddhi, D., 2009, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.13, pp.318–345
- Sharma, R.K., Ganesan, P., Tyagi, V.V., Metselaar, H.S.C., Sandaran, S.C., 2015, "Developments in Organic Solid–Liquid Phase Change Materials and Their Applications in Thermal Energy Storage", *Energy Convers. Manag.* Vol.95, pp.193–228.
- Sharma, S.D., Sagara, K., 2005, "Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review", *Int. J. Green Energy*, vol. 2, pp.1–56.
- Shi, X. Memon, S.A. Tang, W. Cui, H. Xing, F., 2014, "Experimental Assessment of Position of Macro Encapsulated Phase Change Material in Concrete Walls on Indoor Temperatures and Humidity Levels", *Energy Build.*, vol.71, pp.80–87.
- Socaciu, L.G., 2012, "Thermal Energy Storage with Phase Change Material", *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, vol. 20, pp.75-98
- Souayfane, F., Fardoun, F., Biwole, P., 2016, "Phase Change Materials (PCM) for Cooling Applications in Buildings: A Review", *Energy And Buildings*, vol.129, pp.396-431.
- Sun, D., Wang, L. J., Li, C.M., 2013, "Preparation and Thermal Properties of Paraffin/Expanded Perlite Composite as Form-Stable Phase Change Material, *Mater. Lett.*, vol.108, pp.247–249.
- Sun, D., Wang, L. 2016, "Research on Heat Transfer Performance of Passive Solar Collector-Storage Wall System with Phase Change Materials", *Energy and Buildings*, vol.119, pp.183-188.
- Tunc, M., Uysal, M., 1991, " Passive Solar Heating of Buildings Using a Fluidized Bed Plus Tromb Wall System", *Applied Energy*, vol.38, pp.199–213.
- Tyagi, V., Buddhi, D., 2007, "PCM thermal storage in buildings: A state of art", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.11, no.6, pp.1146–1166.
- Yang, Q., Zhu, L.H., He, J.J., Yan, Z.F., Ren. R., 2011, "Integrating Passive Cooling and Solar Techniques into the Existing Building in South China", *Advanced Materials Research*, vol.37, pp.368–373.

- Yilmazođlu, M. Z., 2010, "Isı Enerjisi Depolama Yöntemleri ve Binalarda Uygulanması", Politeknik Dergisi, cilt,13, sayı.1, ss.33-42.
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., Ve Mehling, H. 2003, "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials, Heat Transfer Analysis and Applications", Applied Thermal Engineering, vol.23, pp.251-283.
- Zalewski, L., Joulin, A., Lassue, S., Dutil, Y., Rouse, D., 2012, "Experimental Study of Small-Scale Solar Wall", Solar Energy, vol.86. no.1, pp.208-219.
- Zeinelabdein, R., Omer, S., Gan, G., 2018, "Critical Review of Latent Heat Storage Systems for Free Cooling in Buildings", Renew. Sustain. Energy Rev., vol.82, pp. 2843-2868
- Zhai, X.Q., Song, Z.P., Wang. R.Z., 2011, "A Review for the Applications of Solar Chimneys in Buildings", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.15, pp.3757-3767.