

**Atıf İçin:** Talu F., Mert M. S. ve Mert H. H. (2023). Gizli Isıl Enerji Depolama Sistemleri: Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanıldığı Aktif ve Pasif Sistem Uygulamaları. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 531-547.

**To Cite:** Talu F., Mert M. S., & Mert H. H. (2023). Latent Thermal Energy Storage Systems: Active and Passive System Applications Using Phase Change Materials. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 531-547.

**Gizli Isıl Enerji Depolama Sistemleri: Faz Değiştiren Malzemelerin Kullanıldığı Aktif ve Pasif Sistem Uygulamaları**

Furkan TALU<sup>1</sup>, Mehmet Selçuk MERT<sup>2\*</sup>, Hatice Hande MERT<sup>3</sup>

**Öne Çıkanlar:**

- Gizli ısı enerjisi depolama sistemlerinin önemi vurgulanmıştır.
- Faz Değiştiren Malzemelerin (FDM'lerin) aktif ve pasif sistem uygulamaları sunulmuştur.
- Değerlendirmelere göre, FDM uygulamaları ile önemli miktarda enerji tasarrufu sağlanabilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:**

- Gizli ısı depolama
- Faz Değiştiren Malzemeler
- İklimlendirme sistemleri
- Pasif sistemler
- Enerji depolama

**ÖZET:**

Enerji verimliliği çalışmaları sonucunda sağlanan tasarruf son derece önemlidir. Nitekim tasarruf edilen enerji; kaynakların etkin kullanımı, insan sağlığı ve çevresel açıdan olmak üzere pek çok yönden katkı sağlar. Bu nedenle, enerji depolama teknolojilerinin enerji verimliliği çalışmalarına sağladığı faydalar önem arz etmektedir. Teknolojinin gelişmesi ve ihtiyaçların değişmesi ile enerjinin depolanarak başka bir yer ve/veya zamanda kullanılması talep görmektedir. Bu sebeple, enerjinin çeşitli formlarda depolanması üzerine araştırmacılar tarafından çalışmalar yürütülmektedir. Enerji depolama teknolojileri içinde ısı enerjisi depolama yöntemi enerji tüketim miktarlarının ve maliyetlerinin azaltılması noktasında son yıllarda ilgi çeken araştırma konularından biri olmuştur. Gizli ısı enerjisinin depolanmasına imkan tanıyan ve Faz Değiştiren Malzeme (FDM) olarak adlandırılan yeni nesil enerji malzemeleri, bu hedefe ulaşmada kullanılabilecek umut vaat eden enerji depolama malzemelerindedir. Bu çalışmada, FDM'lere dayalı aktif ve pasif sistem uygulamaları incelenmiştir. Bu amaçla, bu konu üzerinde literatürde yapılan çalışmalar araştırılarak elde edilen sonuçlar sistematik bir şekilde sunulmuştur. Yapılan incelemeler sonucunda, FDM'lerin görece düşük ısı iletkenliğe sahip olmaları sebebiyle çalışmaların genellikle ısı aktarımı ve performans iyileştirmeleri üzerine yoğunlaştığı görülmüştür.

**Latent Thermal Energy Storage Systems: Active and Passive System Applications Using Phase Change Materials**

**Highlights:**

- The importance of latent thermal energy storage systems was emphasized
- Active and passive system applications of Phase Change Materials (PCMs) were presented.
- From the assessments, significant amounts of energy can be saved with PCM applications.

**Keywords:**

- Latent heat storage
- Phase Change Materials
- Air conditioning systems
- Passive systems
- Energy storage

**ABSTRACT:**

The savings achieved as a result of energy efficiency studies are extremely important. As a matter of fact, the energy saved contributes in many ways, including effective use of resources, human health and environmental aspects. Therefore, the benefits of energy storage technologies to energy efficiency studies are significant. With the development of technology and changed needs, energy is demanded to be stored and used elsewhere and/or at another time. For this reason, studies are carried out by researchers on the storage of energy in various forms. The thermal energy storage method among energy storage technologies has been one of the research topics that have attracted attention in recent years in terms of reducing energy consumption amounts and costs. The new generation energy materials, called Phase Change Material (PCM), which enables the storage of latent thermal energy, are among the promising energy storage materials that can be used to achieve this goal. In this study, active and passive system applications based on PCMs were examined. For this purpose, the results obtained by researching the studies in the literature on this subject are presented in a systematic way. As a result of the examinations, it was seen that the studies generally focused on heat transfer and performance improvements due to the relatively low thermal conductivity of PCMs.

<sup>1</sup>Furkan TALU (Orcid ID: 0000-0002-3815-7957), Yalova Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yalova, Türkiye

<sup>2</sup>Mehmet Selçuk MERT (Orcid ID: 0000-0002-8646-0133), Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Yalova, Türkiye

<sup>3</sup>Hatice Hande MERT (Orcid ID: 0000-0003-0743-1981), Yalova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Yalova

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Mehmet Selçuk MERT, e-mail: msmert@yalova.edu.tr

## GİRİŞ

Nüfus artışına bağlı olarak enerji talebinin artmasıyla gerekli ihtiyacın karşılanması için daha fazla fosil enerji kaynağı kullanılması, enerji maliyetlerini, kaynakların kullanımını ve en nihayetinde sera gazı etkilerini artırmış ve bu durum bilim insanlarını sürdürülebilir temiz enerji teknolojilerine doğru yöneltmiştir. Bu teknolojiler arasında, artan enerji ihtiyacının karşılanması için fosil ve yenilenebilir kökenli teknolojileri de içeren yenilikçi hibrit sistemlerin geliştirilmesi için pek çok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalar kapsamında çeşitli tipteki enerji depolama teknolojileri de çözüme yönelik önemli bir alternatif olarak seçenekler arasında kıymet bulmaktadır (Dinçer ve Rosen, 2010). Günümüz teknolojisinde enerjiiyi farklı biçimlerde depolamak mümkün hale gelmiştir. Bu enerji depolama yöntemlerinden biri de son yıllarda dikkat çeken ısı enerjii depolamadır. Isıl Enerji Depolama (IED), temel olarak; bir malzemeyi ısıtarak, soğutarak, eriterek, dondurarak, buharlaştırarak veya termokimyasal yollarla, ısı formunda depolayarak sağlanabilir (Dinçer ve Rosen, 2010). Isıl enerji, gizli ısı, duyulur ısı ve termokimyasal olarak üç farklı şekilde depolanabilir.

Isıl enerji depolama seçeneklerinden gizli ısı depolamasına olanak tanıyan ve Faz Değiştiren Malzemeler (FDM'ler) olarak adlandırılan enerji malzemeleriyle, malzemenin faz değişimi sırasında belirli bir miktar enerji gizli ısı formunda absorbe edilerek depolanabilir. Uygun koşullar oluştuğunda depolanan enerji yine faz değiştirmek suretiyle ortama salınabilir. FDM'lerin faz geçişleri katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz şeklinde olabilir. Bununla birlikte, FDM'ler faz geçiş süreçleri sırasında hacim değişimi göstermeleri, bulaşma, akma olayları nedeniyle genellikle nano / mikro / makro ölçeklerde kapsüllenecek kullanılırlar. FDM'lerin bir başka özellikleri ise, buldukları ortam sıcaklığına göre dışarıdan herhangi bir müdahale olmaksızın uygun seçilmiş faz geçiş sıcaklıkları sayesinde depolama/salma işlemini kendiliğinden gerçekleştirmeleridir. Bu yönleriyle akıllı malzemeler sınıfına dahil olan FDM'lerin pek çok uygulama alanı bulunmaktadır. Bina-yapı malzemeleri, iklimlendirme sistemleri, sıcak su hazırlama sistemleri, ısı regülasyonlu tekstil ürünleri, elektronik malzemelerin ısı yönetimi FDM'lerin başlıca kullanım alanlarından bazıları olarak sayılabilir. Bu sebeple, FDM'ler ile ilgili çalışmalara farklı alanlardan çeşitli örnekler verilebilir. Hekimoğlu ve Sarı (2022) çalışmalarında, binalarda ısı enerjii depolama uygulamaları için atapulgit/miristik-palmitik asit kullanarak bir kompozit FDM tasarlamışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre kompozitin faz geçiş sıcaklığı 44-45 °C ve enerji depolama kapasitesi 74 J/g olarak bulunmuştur. Mert ve ark. (2022) çalışmalarında, bina uygulamaları için form-stabilize n-hekzadekan/çinko borat kompozit FDM'sini geliştirmişlerdir. Bulgulara göre, nano boyutlu çinko boratın yapıda bulunmasıyla ısı depolama hızı ve stabilitesi artırılmış bir kompozit malzeme üretilmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda, malzemenin nispeten yüksek ısı depolama kapasitesi (123 J/g) ve sızdırmaz özelliği ile binalarda kullanılmaya uygun, gelecek vadeden bir kompozit FDM olduğu bildirilmiştir. Bir başka çalışmada, Gencil ve ark. (2022) form-stabilize cüruf/kaprik asit faz değişim malzemelerini üretmişlerdir. Bunun için, metalurjik bir katı atık olan yüksek fırından alınan cürufu kullanmışlardır. Sonrasında, üretilen kompozitler yapı uygulamalarında kullanılmak üzere çimento harcı ile birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, CBTESM15 numunesi, ısı enerjii depolama özelliğinin yanı sıra basınç dayanımı açısından da aranan (22.51 MPa) standart koşulları karşılayabilmiştir. Chopra ve ark. (2022), evsel güneş enerjili su ısıtma sistemlerinde faz değişim malzemesi kullanılmasını Monte Carlo analitik yaklaşımı ve ekserji analizi kullanarak analiz etmiştir. İlgili çalışmada, tasarlanan sistemin farklı modlar için günlük enerji verimliliği bulanık mantık algoritmasına dayalı geliştirilen bir model ile doğrulanmıştır. Li ve ark. (2020), binalarda FDM içeren cam ünitelerinin optik ve ısı performansını üzerine bir inceleme çalışması yapmışlardır. FDM'nin cam

ünitesine entegre edilmesinin, enerji kullanımı ve bina enerji tasarrufu açısından büyük avantajları olmasına rağmen, uygulama için bazı zorlukların bulunduğu rapor edilmiştir. Bir başka çalışmada, Nizetic ve ark. (2021) fotovoltaik (PVT) sistemlerin ısı regülasyonu için faz değişim malzemesi kullanılmasının kapsamlı bir analizini gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla, farklı tasarım ve farklı iklimlerde yapılan deneysel çalışmalar incelenmiştir. Bulgulara göre, PVT-FDM kollektörünün elektrik performansının, kollektör tasarımına ve kullanılan soğutma sıvısına bağlı olarak genellikle %20'den az olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, ısı performanstaki iyileştirmelerin ise çoğunlukla %40 ila %70 arasında değiştiği bildirilmiştir. Yapılan çalışmanın sonuçlarından biri olarak, yeni ve uygun FDM'lerin araştırılması ve FDM'lerin yüksek birim maliyetleri nedeniyle uygulanabilir ekonomik çözümler bulunması için çalışmaların sürdürülmesi gerektiği ifade edilmiştir. FDM'lerin bir başka uygulama alanı ise güç bataryalardır. Bir güç bataryasının performansının sıcaklıktan büyük ölçüde etkilendiği bilinmektedir. Bunun için bataryanın makul bir sıcaklık aralığında çalışmasını sağlamak için verimli bir ısı yönetim sistemine ihtiyacı vardır. Luo ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, FDM kullanımına dayalı batarya ısı yönetim sistemlerinin sistematik incelemesi yapılmıştır. Pasif bir ısı yönetim yöntemi olarak FDM'lere dayalı ısı yönetimin düşük işletme maliyeti ve iyi sıcaklık homojenliği avantajlarına sahip olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte, mevcut araştırmaların, genellikle soğutmaya yönelik olduğu, Lityum-iyon batarya sistemlerine sahip elektrikli araçlarının yayılmasıyla birlikte soğuk iklimlerde de düşük sıcaklıklarda FDM ısı depolamasına yönelik daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulacağı bildirilmiştir.

Enerji depolama teknolojilerinin ve bunların içinde özellikle FDM'lerin, sürdürülebilir enerji arzının sağlanmasında önemli bir rol alması çok muhtemeldir. Özellikle, yenilenebilir enerji sistemleri kullanılarak elde edilen enerji, depolama teknolojileri vasıtasıyla ihtiyaç duyulduğu zamanda kullanılmak üzere depolanabilir. Bu yaklaşım, Birleşmiş Milletler (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Amaçlarına (SKA) ulaşmak için oldukça yerindedir. BM, "Uygun ve Temiz Enerji" başlıklı SKA7'de herkes için uygun fiyatlı, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişim sağlamayı amaçlar ve uluslararası ve ulusal olarak ihtiyaç duyulan eylemlerin ana hedeflerinden bahseder (United Nations, 2017). Bu bilgi ışığında, enerjinin FDM'ler aracılığıyla depolanması, uygun maliyetli ve temiz enerjiye yönelik BM SKA7 hedefini önemli ölçüde desteklemektedir. FDM uygulamalarının enerji verimliliği çalışmalarına önemli ölçekte katkı sağlama potansiyelleri bulunmakta ve bunun sonucunda da tasarruf imkanları oluşmaktadır. Literatür incelendiğinde, FDM'ler üzerine farklı uygulama alanlarına yönelik pek çok çalışmanın gerçekleştirildiği görülmüştür. Buna ilaveten, FDM'lerin aktif ve pasif sistem uygulamaları üzerine kaleme alınmış sınırlı sayıda derleme çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmada, ısı enerjinin gizli ısı formunda depolanmasına imkan tanıyan FDM'ler hakkında bilgi verilmiş ve özellikle son yıllarda FDM'lerin aktif ve pasif sistem uygulamaları üzerine yapılan çalışmalar derlenmiştir.

### **Faz Değiştiren Malzemelerin Özellikleri**

FDM'ler kendi aralarında organik, inorganik ve ötektik olmak üzere sınıflandırılmakta (Sharma ve ark., 2009) ve sahip oldukları kendilerine özgü fiziksel ve kimyasal özellikleri ile çok çeşitli uygulama alanları bulmaktadır. Organik FDM'ler faz değişimleri esnasında nispeten küçük hacim değişimi göstermeleri ve görece yüksek gizli ısı depolama özelliklerine sahip olmaları sebebiyle başka FDM'lere nazaran sıklıkla tercih edilmektedir (Mert ve ark., 2018). Bu malzemelerin erime sıcaklığının kullanılacak sistemin çalışma sıcaklığı aralığında olması gerekmektedir. Organik FDM sınıfında yer alan parafinler nispeten yüksek gizli ısı depolama kapasitelerine sahip olmaları ve uygun faz geçiş performanslarıyla son yıllarda dikkat çeken malzemelerdir.

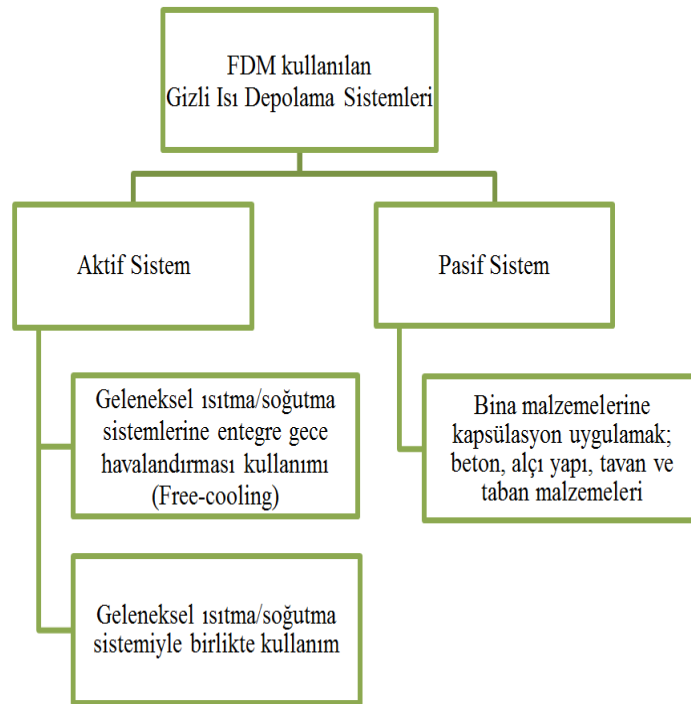
Çizelge 1. Bazı Ticari Faz Değişiren Malzemeler ve Termo-Fiziksel Özellikleri

Bileşim	Organik / İnorganik	Faz Değişim Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (kg m <sup>-3</sup> )	Faz Değişim Entalpisi (kJ kg <sup>-1</sup> )	Özgül Isı Kapasitesi (kJ /kg/K)	Isıl İletkenlik (W /m/K)	Ref.
RT -9 HC	Organik	-9	880	250	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT -4	Organik	-4	880	180	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 0	Organik	0	880	175	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 2 HC	Organik	2	880	200	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 3 HC_1	Organik	3	880	190	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 4	Organik	4	880	175	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 5	Organik	5	880	180	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 5 HC	Organik	5	880	250	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 8	Organik	8	880	175	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 8 HC	Organik	8	880	190	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 10	Organik	10	880	160	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 10 HC	Organik	10	880	200	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 11 HC	Organik	11	880	200	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 12	Organik	12	880	155	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 15	Organik	15	880	155	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 18 HC	Organik	18	880	260	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 21	Organik	21	880	155	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 21 HC	Organik	20-23	880	190	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 24	Organik	21-25	880	150	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 25	Organik	22-26	880	148	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 27	Organik	25-28	880	179	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 31	Organik	31	880	165	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 42	Organik	42	880	165	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 54 HC	Organik	54	850	200	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 70 HC	Organik	70	880	260	2	0.2	RubiTherm GmbH
RT 80 HC	Organik	80	900	220	2	0.14	RubiTherm GmbH
RT 100 HC	Organik	100	1000	180	2	0.2	RubiTherm GmbH
SP -50	İnorganik	-48/-52	1100	190	2	0.6	RubiTherm GmbH
SP -24	İnorganik	-22/-23	1200	250	2	0.6	RubiTherm GmbH
SP -7.2	İnorganik	-7/-5	1100	290	2	0.6	RubiTherm GmbH
SP 9	İnorganik	10/11	1400	155	2	0.6	RubiTherm GmbH
SP 21 EK	İnorganik	21/23	1500	170	2	0.5	RubiTherm GmbH
SP 24E	İnorganik	24/25	1500	180	2	0.5	RubiTherm GmbH
SP 26E	İnorganik	25/27	1500	180	2	0.5	RubiTherm GmbH
SP 29EU	İnorganik	29/31	1550	160	2	0.5	RubiTherm GmbH
SP 50	İnorganik	50/51	1400	220	2	0.6	RubiTherm GmbH
SP 90	İnorganik	88/90	1700	150	2	0.6	RubiTherm GmbH
S8	İnorganik	8	1475	130	1.9	0.44	PlusICE
S13	İnorganik	13	1515	260	1.9	0.43	PlusICE
S18	İnorganik	18	1520	145	1.9	0.43	PlusICE
S21	İnorganik	21	1530	220	2.2	0.54	PlusICE
S23	İnorganik	23	1530	200	2.2	0.54	PlusICE
S25	İnorganik	25	1530	175	2.2	0.54	PlusICE
S34	İnorganik	34	2100	140	2.1	0.52	PlusICE
S58	İnorganik	58	1505	145	2.55	0.69	PlusICE
S83	İnorganik	83	1600	100	2.31	0.62	PlusICE
S117	İnorganik	117	1450	125	2.61	0.7	PlusICE
A2	Organik	2	765	230	2.2	0.2	PlusICE
A5	Organik	5	768	170	2.18	0.22	PlusICE
A10	Organik	10	770	210	2.16	0.22	PlusICE
A15	Organik	15	780	205	2.16	0.18	PlusICE
A19	Organik	19	765	150	2.18	0.22	PlusICE
A21	Organik	21	770	160	2.2	0.22	PlusICE
A24	Organik	24	790	155	2.22	0.18	PlusICE
A28	Organik	28	789	265	2.22	0.21	PlusICE
A36H	Organik	36	776	300	2.3	0.22	PlusICE
A50	Organik	50	810	190	2.15	0.18	PlusICE
A62	Organik	62	910	205	2.2	0.22	PlusICE
A95	Organik	95	900	260	2.2	0.22	PlusICE
A133	Organik	133	880	125	2.2	0.23	PlusICE
A155	Organik	155	900	100	2.2	0.23	PlusICE
A164	Organik	164	1500	305	2.42	0.23	PlusICE
E0	Ötektik	0	1000	395	4.19	0.58	PlusICE
E-2	Ötektik	-2	1070	325	3.8	0.58	PlusICE
E-3	Ötektik	-4	1060	330	3.84	0.6	PlusICE
E-11	Ötektik	-12	1090	300	3.55	0.56	PlusICE
E-15	Ötektik	-15	1060	320	3.87	0.53	PlusICE
E-19	Ötektik	-19	1125	300	3.29	0.58	PlusICE
E-22	Ötektik	-22	1180	305	3.34	0.57	PlusICE

Bununla beraber, parafinlerin faz değişim sırasında gösterdikleri hacim değişimi ve sızıntı problemlerinin önüne geçmek için farklı ölçeklerde kapsüllemeleri gerekmektedir (Mert ve ark., 2020). Emülsiyon polimerizasyon tekniği faz değiştiren malzemelerin mikro ölçekte kapsülasyonu için kullanılan yöntemlerden biri olup araştırmacılar bu yolla üretilen mikrokapsüllerin binalarda ısı konfor şartlarının sağlanması için gerçekleştirilecek enerji depolama uygulamalarında kullanılabilmesini bildirmişlerdir (Mert ve ark., 2019; Mert ve ark., 2020). Uygulamalarda kullanılacak olan faz değiştiren malzemelerde sıklıkla aranan özellikler; yüksek füzyon ısısı, küçük hacim değişimi, düşük buhar basıncı, yüksek ısıl iletkenlik, birim hacim başına yüksek özgül ısı, kimyasal kararlılık, aşındırıcı olmama, zehirli olmama, yanıcı ve parlayıcı olmama, üretilebilir ve ulaşılabilir olma ve ekonomik olma şeklinde ifade edilebilir (Shukla ve ark., 2020; Akeiber ve ark., 2016). Bunlara ilaveten, iklimlendirme uygulamalarında kullanılabilen FDM'lerin ortam ısı konfor koşullarını sağlaması gerekmektedir. Isıl konfor, insan zihninin kapalı ortamdaki ısıl durumdan memnuniyetini ifade eden bir durum olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık, ısıl konforu tek başına etkileyen bir parametre olarak düşünülse de sıcaklığın yanı sıra; izafi nem, hava akış hızı, ortalama yüzey sıcaklığı, havanın özelliği, metabolizma hızı ve giyim, konfor şartlarını etkileyen diğer parametrelerdir (ASHRAE Standard 55-2004). Isıl konfor şartları kış mevsimi için 20-24 °C sıcaklık, %30-70 bağıl nem; yaz mevsimi için 23-26 °C sıcaklık, %30-70 bağıl nem aralıklarında sağlanabilmektedir. Çizelge 1'de ise iklimlendirme uygulamalarında kullanılabilen bazı ticari faz değiştiren malzemeler ve özellikleri sunulmuştur.

#### FDM'lerin kullanıldığı gizli ısı depolama sistemleri

Faz değiştiren maddelerin kullanıldığı gizli ısı depolama sistemleri Şekil 1'de olduğu gibi temel olarak aktif ve pasif sistem olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 1. Gizli ısı depolamada aktif ve pasif sistemler (Iten ve Liu, 2016)

Pasif sistemlere yönelik; binaların duvarlarında, pencerelerinde, çatılarında ve tabanlarında kapsüle edilmiş faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı, mahal ısıtma ve soğutma konusunda birçok çalışma yapılmıştır.



Çizelge 2. FDM Kullanılan Pasif Gizli Isı Depolama Uygulamaları

Uygulama Alanı	Yöntem	Bulgular	Ref.
Duvar	Bir evin duvarına %20 ve %10 oranında FDM emdirilmiş duvar karoları kullanılmıştır. Kullanılan karonun enerji depolama kapasitesinin 400 kJ/m <sup>2</sup> olduğu belirtilmiştir.	i. Maksimum enerji depolama miktarı FDM'nin erime sıcaklığı ile oda sıcaklığının birbirine yakın olması durumunda elde edilmiştir. ii. Duvar karosu daha yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip olsa bile, pratikte ısı enerji depolamanın 300-400 kJ m <sup>-2</sup> ile sınırlı kalacağı öngörülmüştür.	(Neeper, 2000)
Duvar	Kuzey Çin bölgesinde sıradan bir odanın kuzey cephesinin iç yüzeyine FDM uygulaması yapılmıştır. Kullanılan FDM'nin erime sıcaklığı 23 °C, uygulama kalınlığı 30 mm, faz değişim entalpis 60 kJ/kg'dır.	i. Faz değişim entalpis ve FDM kalınlığı arttıkça enerji tasarruf oranı da artmıştır. ii. Yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalar sonucu mevsimsel ısıtmada %17 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır.	(Chen ve ark., 2008)
Duvar	Duvar uygulamaları için optimum FDM karo kalınlıkları incelenmiştir. Optimum kalınlık belirlenirken CODYMUR programı kullanılmıştır. Kullanılan FDM %60 oranında mikro kapsüllemiş parafin içermektedir. Erime sıcaklığı 22 °C, yoğunluğu ise 1019 kg/m <sup>3</sup> tür. Bu karolar hafif yapılarda, örn. Karavanlar, sıcaklık dalgalanmalarını önlemek amacıyla kullanılmaktadır.	i. 24 saatlik test süresi sonunda optimum kalınlık 1 cm olarak bulunmuştur. Bu kalınlıkta 287.6 Wh m <sup>-2</sup> enerji depolanabildiği gözlemlenmiştir. ii. FDM kullanımı sonucunda sıcaklık dalgalanmalarının önüne geçilmiştir.	(Kuznik ve ark., 2008)
Duvar	Fanger ısı konfor modeli ele alınarak bina duvarları ve çatılarına farklı erime sıcaklıklarına (23 °C, 25 °C, 27 °C) ve kalınlıklara (5 mm, 10 mm) sahip RT(organik) tabanlı FDM yerleştirilmiştir. Duvara ve çatıya yerleştirilen FDM'nin iklimlendirme sisteminin enerji tüketimine ve ısı konfor şartlarına etkisini incelemek amaçlanmıştır.	i. 24 saatlik çalışma ve analiz sonucunda erime sıcaklığı 27 °C olan FDM'nin en yüksek enerji tasarrufu (%10-15) sağladığı gözlemlenmiştir. ii. 23 °C ve 25 °C erime sıcaklığına sahip FDM'lerin enerji tasarruf oranı sırasıyla %8-10 ve %10-13 arasında kalmıştır.	(Saffari ve ark.,2016)
Duvar	Akdeniz iklim koşullarında 7 farklı senaryo altında 5°- 30 °C arasında erime sıcaklığına sahip FDM kullanımının enerji tasarrufuna ve CO <sub>2</sub> salımına etkisi numerik olarak incelenmiştir.	i. Optimum erime sıcaklığı dış ortam iklim koşullarına bağlı olarak 5-30 °C arasında değişiklik göstermiştir. ii. Enerji tasarruf oranları sadece ısıtma modunda %3.8, sadece soğutma modunda %6.8 olarak hesaplanmıştır. iii. En yüksek enerji tasarrufu (%17.2), duvarın hem iç hem de dış yüzeyine FDM uygulanması durumunda elde edilmiştir.	(Arıcı ve ark., 2022)
Duvar	FDM emdirilmiş tuğla kullanımının soğutma yüküne etkisi deneysel olarak incelenmiştir. 40 °C üzerindeki yaz sıcaklıklarında farklı kalınlık (1-1.3 cm) ve katmanlarda çalışma gerçekleştirilmiştir.	i. İç ortam sıcaklığında 4-9.5 °C arasında değişkenlik gösteren azalmalar meydana gelmiştir. ii. Çevreden, iç ortama olan ısı transferi miktarı %40-60 arasında azalma göstermiştir.	(Saxena ve ark, 2020)
Taban	Tabana yerleştirilen şekilce kararlı FDM'nin gündüz vaktinde güneş radyasyonunu emerek gece saatlerinde bu enerjiyi salması üzerine incelemeler yapılmıştır.	i. Uygulama yapılacak FDM'nin füzyon ısısının 120 kJ/kg'dan büyük, ısı iletkenliğinin 0,5 W /m/K olması ve kalınlığının 20 mm'yi geçmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır.	(Xu ve ark., 2005)
Taban	İç silindirik şekilde oyulmuş beton tablaların içine %85 oranında parafin içerikli FDM yerleştirilmiştir. Faz değişim entalpisinin 110 kJ/kg, erime sıcaklığının 27 °C olduğu belirtilmiştir.	i. Tabandaki tablaların ısı direnci artmıştır. ii. Tablalar içi boş iken 0.8 saat, içi FDM ile dolu iken 3.7 saat ortam ısısını korumuştur. iii. FDM'nin toplam şarj süresi 8 saattir. 6 saat sonra bile enerjisinin %60'ını korumuştur. iv. FDM-polimer kompozit malzeme ile sıvı fazda meydana gelen kaçakların önüne geçilmiştir.	(Karim ve ark., 2014)
Taban	Çin'in kırsal kesimlerinde çift borulu yerden ısıtma sistemi üzerine 4 farklı tasarım seçeneği ile 26 günlük bir çalışma yapılmıştır. <i>tasarım 1</i> : kısmi güçle çalıştırma, <i>tasarım 2</i> : gündüz enerji depolama, <i>tasarım 3</i> : gece-gündüz enerji depolama, <i>tasarım 4</i> : faz değişimi ile enerji depolama olarak belirtilmiştir. FDM olarak erime sıcaklığı 35 °C olan bir parafin türü kullanılmıştır.	i. Ortamdaki sıcaklık dalgalanmaları 1.8-3 °C aralığında kontrol edilmiştir. ii. Zemindeki boruların belirli aralıklarla ısıtılması ile iç ortam konfor şartlarının sağlanabileceği belirtilmiştir.	(Lu ve ark.,2020)
Çatı	Soğutma yükünü azaltmak amacıyla çatıya konik şekilde farklı FDM yerleştirilmiş ve analizler yapılmıştır. İncelenen FDM'ler n-oktadekan, n-eikosan ve P116'dır.	i. n-eikosan maddesi en iyi performansı göstermiştir. ii. Çatıdan eve sıcak hava sızıntısı %39 oranında azalmıştır.	(Alawadhi ve ark., 2011)
Çatı	İstanbul ilinde bulunan binaların çatıları için farklı FDM kalınlıklarının (1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm ve 5 cm) ısı performansına olan etkisi hem deneysel hem de CFD ile analiz edilmiştir. Deneyler yaz iklim koşulları temel alınarak yapılmıştır.	i. Deneysel ve sayısal çalışmalar birbiriyle örtüşmüştür. ii. Mayıs ayında çatıdan geçen ısı akısı (1-5 cm) kalınlık sırasıyla %17.8, %36.1, %43.2, %49.7, %56.6 oranında azalmıştır. iii. En uygun FDM kalınlığı 2 cm olarak belirlenmiştir. iv. RT 27 Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında sürekli sıvı fazda kalarak duyulur ısı depolama şeklinde etki göstermiştir.	(Tokuç ve ark., 2015)
Çatı	Akdeniz ve Abu Dhabi gibi iki farklı iklim koşullarında, iki farklı çatı kaplama malzemesi (poliüretan bazlı soğuk membran ve geleneksel siyah bitümlü membran) ile çalışmalar yapılmıştır. Çatı kaplama membranlarını faz değiştiren malzeme (erime sıcaklığı 25 °C, 31 °C, 44 °C) içeren ve içermeyen olarak iki farklı çalışma koşulunda incelemişlerdir.	i. FDM içeren Poliüretan bazlı membran yaz ve kış aylarında daha düşük yüzey sıcaklığı ve ısı kazanımı göstermiştir. ii. Soğuk membranın yüksek yansıtıcı özelliği bulunmaktadır. Uygun erime sıcaklığındaki FDM ile beraber kullanılması durumunda pasif soğutma sistemlerinde etkili olduğu belirtilmiştir.	(Piselli ve ark., 2019)

Çizelge 2’de pasif sistem uygulamaları hakkında yapılmış bazı çalışmalar yer almaktadır. Pasif sistemlerin uygulamalarında görüldüğü üzere sahip olduğu avantajlara rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir:

- Yangın önleyici malzeme katkısı yapılmamış FDM’lerin yüksek yanıcılık özelliğinin bulunması
- FDM içeren duvar panoları ve hava arasındaki ısı transferi oranının, düşük ısı iletim katsayısı nedeniyle sınırlanması (Kenisarın ve Mahkamov, 2007)
- Gündüz vaktinde dış ortam sıcaklığının düşük olduğu zamanlarda FDM’lerin enerji tasarrufuna katkısının olmaması

Aktif sistemler kendi aralarında konvansiyonel bir iklimlendirme sistemiyle birlikte veya iklimlendirme sistemine entegre kullanım üzere ikiye ayrılmaktadırlar. İklimlendirme sistemine entegre kullanım esnasında FDM’nin şarj işlemi, herhangi bir elektrik enerjisi tüketen ekipmana bağlı olmadan gece ve gündüz arasındaki sıcaklık farkından yararlanılarak gerçekleşir. Düşük gece sıcaklığı değerlerinde dış ortam havası FDM üzerinden geçirilir ve FDM şarj işlemi gerçekleştirilir. Gündüz vaktinde ise dış ortam havası gece boyu şarj olmuş FDM üzerinden geçirilerek mahalın soğutma işlemi yapılabilmektedir. Bu yöntem literatürde serbest soğutma, gece havalandırması (free-cooling) olarak adlandırılmaktadır. Gece sıcaklığının FDM’yi şarj edecek uygun sıcaklık aralığında olmadığı durumlarda ise gizli ısı depolama teknolojisinin iklimlendirme sistemiyle birlikte kullanımı enerji giderlerini azaltan bir diğer yöntemdir. Elektrik enerji talebinin nispeten az ve enerji birim fiyatının ucuz olduğu gece vakitlerinde iklimlendirme sistemi çalıştırılarak FDM’nin şarj işlemi gerçekleştirilir. Gece vaktinde depolanan ısı enerji sayesinde, gündüz vaktinde çalıştırılan iklimlendirme sisteminin yükü ve enerji giderleri belirli ölçüde azalmaktadır. Bu yöntemdeki asıl amaç, FDM şarj işleminin elektrik enerji fiyatının ucuz olduğu gece vakitlerinde yapılması prensibine dayanmaktadır. Çizelge 3’te aktif sistemler alanında yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

**Çizelge 3. FDM Kullanılan Aktif Gizli Isı Depolama Sistemleri**

Uygulama Alanı	Yöntem	Bulgular	Ref.
Gece havalandırması (Free – cooling)	İran çevresinde birden çok FDM kullanılarak gece havalandırması yöntemi incelenmiştir. Çalışmada sayısal inceleme metodu kullanılmıştır. Dikdörtgen şeklinde konumlandırılan FDM’ler arasında hava geçişi sağlanmıştır.	<i>i.</i> Etkin ısı kapasitesi metodu kullanılarak erime ve katlaşma probleminin çözüldüğü belirtilmiştir. <i>ii.</i> Performans katsayısını (COP) 7 yapmak için RT-25 katkılanmış $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ kullanılmıştır. Optimum kanal kalınlığı 3.2 mm, uzunluğu 1.3 m ve FDM kalınlığı 10 mm olarak belirtilmiştir.	(Mosaffa ve ark., 2013)
Gece havalandırması (Free – cooling)	Auckland Üniversitesi kampüsünde iki farklı deney kulübesi hazırlanmıştır. Gece havalandırma sistemi olmayan bir klima ve gece havalandırma sistemi olan klima sistemi kıyaslanmıştır.	<i>i.</i> Gece havalandırması olmayan klima kullanılması durumunda elektrik enerjisinden çok az miktarda tasarruf edilmiştir. <i>ii.</i> Gece havalandırması kullanılması halinde 1 haftalık periyotta %73’lük elektrik enerjisi tasarrufu sağlanmıştır.	(Barzin ve ark., 2015)
Doğal Konveksiyon – Isı değiştirici tasarımı	Isı borularının elektronik ekipmanların soğutulması durumundaki performansı incelenmiştir. Trikosan (FDM), su ve içi boş ısı borusu (geleneksel ısı borusu) farklı hacimler altında analiz edilmiştir.	<i>i.</i> FDM – hava ısı değiştiricisi tasarlanmıştır. <i>ii.</i> En iyi performans gösteren malzeme trikosan olmuştur. <i>iii.</i> Fan güç tüketiminde %46’ya varan bir azalma olmuştur.	(Weng ve ark., 2011)
Gece havalandırması (Free – cooling)	Çalışmada, araştırmacılar tarafından üretilen yağ asidi benzeri bir FDM kullanılmıştır. Bu malzemenin gece havalandırması esnasında ısı davranış karakteristiklerini belirlemek üzere deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. 2000 adet kapsül içeren ve toplam ağırlığı 150 kg olan FDM kullanılmıştır.	<i>i.</i> Hava ve FDM’nin doğrudan teması ile ısı transferi sonucunda taşınım ısı transfer katsayısı 12-19 W m <sup>-2</sup> °C arasında bulunmuştur.	(Yanbing ve Yimping, 2003)
Gece havalandırması (Free – cooling)	Japonya’da 8 farklı bölge için gece havalandırmasının soğutma performansına etkisi hem deneysel olarak hem de simülasyon yapılarak incelenmiştir. GR 25 FDM’si yer altına konumlandırılmış ve hava ile doğrudan temas ettirilerek ısı transferi gerçekleştirilmiştir.	<i>i.</i> Diğer şehirlere göre daha düşük ortalama hava sıcaklığına sahip Kyoto şehrinde soğutma yükünün % 62.8 azaldığı gözlemlenmiştir.	(Takeda ve ark.,2004)

## Çizelge 3'ün devamı

<b>Gece havalandırması (Free – cooling)</b>	Faz değişim sıcaklığı 20 °C ve füzyon entalpisi 201 kJ /kgolan ve n-hekzadekan ( $C_{16}H_{34}$ ) ve n-oktadekan ( $C_{18}H_{38}$ ) karışımından oluşan FDM ile yeni tip tabandan soğutma sistemi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Yüze alanını artırmak için FDM granül halinde tabana serilmiştir.	<i>i.</i> Hava ile FDM direkt temas halinde olmuştur. <i>ii.</i> Günlük soğutma yükünün %89'unun her gece depolanabildiği gözlemlenmiştir. <i>iii.</i> Her gece depolanan 1.79 MJ m <sup>-2</sup> 'lik enerji klimanın gündüz vaktinde 3 saat gibi kısa bir süre çalışmasına olanak sağlamıştır.	(Nagano ve ark., 2006)
<b>Gece havalandırması (Free – cooling)</b>	Tavanda ve tabanda bulunan RT-20 parafin FDM'si ile gece havalandırması metodu incelenmiştir. Farklı hava akış hızları ve iç sıcaklık değerleriyle ilgili kıyaslamalar ortaya koyulmuştur.	<i>i.</i> Çalışmada karşılaşılan en büyük sorunun FDM'lerin yüksek hacme sahip olması olduğu vurgulanmıştır. <i>ii.</i> 200 dakika sonra iç ve dış ortam sıcaklıkları eşitlenmiştir. <i>iii.</i> İç ve dış ortam sıcaklıkları arasındaki fark ne kadar büyükse soğutma için gereken zamanın da o kadar kısa olduğu belirtilmiştir.	(Butala ve Stirith, 2009)
<b>Gece havalandırması (Free – cooling)</b>	Güney Asya bölgesinde yaz geceleri oluşan düşük sıcaklıktan yararlanılarak gündüz vakti ortamı soğutmayı hedefleyen bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 10 kg SP 29 FDM kullanılmıştır. Farklı hava debilerinde FDM performansı incelenmiştir.	<i>i.</i> Şarj işlemi sırasında hava debisi 20 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> olduğunda FDM katılma oranında artış gözlemlenmiştir. Fakat bu debi sistem performansını düşürmüştür. <i>ii.</i> En yüksek sistem performansı 10 m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> hava debisinde elde edilmiştir. <i>iii.</i> Yaz mevsiminde gece süresinin kısa olması nedeniyle şarj süresindeki hava debisinin, deşarj sırasındaki hava debisinden yüksek olması gerektiği vurgulanmıştır.	(Waqas ve Kumar, 2011)
<b>Güneş Enerjisi ile Gizli Isı Depolama</b>	Lleida Üniversitesi'nde PCM davranışını gerçek koşullarda test etmek için güneş sistemiyle sürekli çalışabilen veya elektrikli ısıtıcıyla da çalışabilen bir güneş pilot tesisi kurulmuştur. 31.5 cm yüksekliğinde, 8.8 cm genişliğinde ve 60 °C erime sıcaklığına sahip FDM-grafit kompozit malzeme kullanılarak bir tank inşa edilmiştir. FDM-grafit kompozit malzemesinin hacimce %90'ını sodyum asetat, %10'u grafitten oluşmaktadır.	<i>i.</i> 2.1 kg FDM kullanılması durumunda enerji yoğunluğunda, 1 K sıcaklık farkında, %40 artış meydana gelirken, <i>ii.</i> 4.2 kg FDM kullanıldığında enerji yoğunluğu %57.2 oranında, <i>iii.</i> 6.3 kg FDM kullanılması halinde de enerji yoğunluğu %66.7 oranında artmıştır.	(Cabeza ve ark., 2006)
<b>Gece havalandırması (Free – cooling)</b>	Küresel şekildeki RT-20 FDM'si bir mekanik havalandırma sistemine entegre (free cooling) edilmiştir. 20-22 °C aralığında erime sıcaklığına sahip olan faz değiştiren malzemelerin kullanımının etkili bir soğutma tekniği olduğu belirtilmiştir. TRNSYS programında sayısal analizler yapılmıştır.	<i>i.</i> Konfor şartlarını sağlamak için 1 m <sup>2</sup> 'lik alan için 6.4 kg FDM kullanılmıştır. <i>ii.</i> Gizli ısı depolama sisteminde kullanılan kürelerin optimum çapı 25 mm olarak bulunmuştur.	(Arkar ve Medved, 2007)
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Tayland iklimi koşullarında iklimlendirme cihazının soğutma verimliliğini iyileştirmek için mevcut cihazda düzenlemeler yapılmıştır. Kullanılan FDM, 22 °C erime sıcaklığında, 160-180 kJ /kgfüzyon ısısına sahiptir. FDM'ler küresel şekilde, dikdörtgen bir matris yatak yapının içine yerleştirilmiştir. Bu yatak yapısının farklı kalınlık değerleri (20 cm, 30 cm ve 40 cm) için sistem performansı incelenmiştir.	<i>i.</i> Enerji tüketiminde 3.09 kWh gün <sup>-1</sup> azalma meydana gelmiştir. <i>ii.</i> Maliyetin geri dönüş süresi 4.15 yıl olarak belirtilmiştir. <i>iii.</i> Günlük enerji tasarrufunun 0.56 USD olduğu hesaplanmıştır. <i>iv.</i> Kalınlık arttıkça şarj ve deşarj süresi uzamıştır.	(Chaiyat ve Kiatsirirot, 2014)
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Soğutma sistemine entegre edilmiş gizli ısı depolama ünitesi ile hem gece soğutması hem de gerekli durumda soğutma çevriminden yararlanılarak ortamın soğutulması amaçlanmıştır. Çalışmada 3 farklı FDM enerji, ekserji ve ekonomik yönden değerlendirilmiştir.	<i>i.</i> SP 25 kullanılan sistem en yüksek performans katsayısını (COP) göstermiştir. <i>ii.</i> RT 27 kullanılan sistem en yüksek ekserji verimini vermiştir. <i>iii.</i> S 27 ise en düşük maliyete sahip olmuştur.	(Mosaffa ve Farshi, 2016)
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Geleneksel iklimlendirme kanallarına entegre edilmiş buz ve RT-3HC ile enerji depolama sistemleri kıyaslanmıştır.	<i>i.</i> Sistemde kullanılan buz ve FDM ile birlikte güç tüketiminde sırasıyla %4.59 ve %7.58 oranında azalma meydana gelmiştir. <i>ii.</i> Sistemin ekserji verimliliği değerleri ise buz ve RT-3 HC için sırasıyla %46.93 ve %53.44 olarak bulunmuştur	(Rahdar ve ark., 2016)
<b>Çiller Soğutma Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Çiller-hava soğutma tabanlı ısı enerji depolama sisteminin alan iklimlendirmesinde uygulanabilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada ihtiyaç kontrollü havalandırma (DCV) ve ekonomizer döngü havalandırması (ECV) modları sisteme entegre edilmiştir.	<i>i.</i> DCV ve DCV-ECV modlar ile geleneksel çiller sistemine göre sırasıyla günlük ortalama %28 ve %47 oranında enerji tasarrufu sağlanmıştır. <i>ii.</i> DCV ve DCV-ECV modların kullanımıyla birlikte sistemin soğutma ve havalandırma yükü azalmış ve yaz ve kış mevsimi için performans katsayısı (COP) sırasıyla 3.9 ve 4.3 olmuştur.	(Parameshwaran ve ark., 2010)
<b>Güneş Fırınlarıyla Birlikte Kullanım</b>	Güneş enerjisinin faz değiştiren malzeme ile depolanarak güneş fırınlarında kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmalar Bursa ilinde yaz mevsiminde gerçekleştirilmiştir. FDM olarak erime sıcaklığı 56-58.5 °C ve füzyon ısısı 189 kJ /kgolan parafin mumu kullanılmıştır.	<i>i.</i> Gün içinde maksimum yüzey sıcaklığı 111 °C iken ertesi gün sabaha kadar ısısını 52 °C'de muhafaza etmiştir. <i>ii.</i> Bu tip güneş fırınlarının 24 saat boyunca başka bir enerji girdisine ihtiyaç duymadan ısınma-pişirme işlemini gerçekleştirebileceği sonucuna varılmıştır.	(Yüksel ve Avcı, 2013)
<b>Güneş Enerjisi ile Gizli Isı Depolama</b>	Gandhinagar bölgesi Nisan ayı iklim koşullarında güneş enerjisinin, erime sıcaklığı 55-60 °C arasında olan FDM üzerinde depolanması ve termal performansı incelenmiştir.	<i>i.</i> Solar ısıtıcı hava sıcaklığı 42-52 °C arasında değişiklik göstermiştir. <i>iii.</i> Solar ısıtıcının maksimum enerji verimliliği 62%, ekserji verimliliği ise 9.5% olarak bulunmuştur.	(Patel ve ark., 2022)

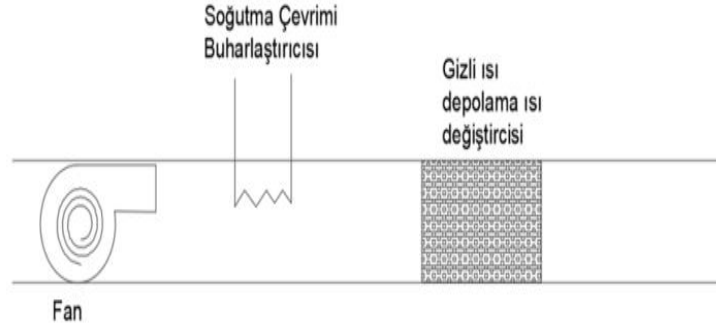


## Çizelge 3'ün devamı

<b>Güneş Enerjisi ile Gizli Isı Depolama</b>	Faz değiştiren malzemelerin bir ofisin ısıtma ve soğutma yüküne etkisi incelenmiştir. Çalışmada RT-22HC parafin ile plaka tipli ısı değiştirici kullanılmışlardır. Toplam plaka sayısı 30'dur. Yaz mevsiminde gece havalandırması ile "soğuk enerji", kış mevsiminde ise güneş radyasyonu ile "ısı" depolanması yöntemleri çalışılmıştır.	<p><i>i.</i> Yıllık enerji tüketimi 142 kWh azalmıştır.</p> <p><i>ii.</i> Mart ayında yüksek miktarda en yüksek tasarruf oranına ulaşılmıştır.</p> <p><i>iii.</i> "Soğuk enerji" en yüksek Temmuz ve Ağustos aylarında aktarılmıştır.</p>	(Osterman ve ark., 2015)
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Geleneksel klimalar ile FDM kullanan bir klima arasında bağıl nem, COP, enerji tasarrufu gibi parametreler için kıyaslama çalışması yapılmıştır.	<p>FDM kullanılan sistemde;</p> <p><i>i.</i> Sıcaklık dalgalanmaları azalmıştır.</p> <p><i>ii.</i> COP %19.05 artmıştır.</p> <p><i>iii.</i> Acil soğutma ihtiyacını karşılama süresi 9 saate kadar uzatılmıştır.</p> <p><i>iv.</i> Elektrik enerjisi tüketimi %17.82 azalmış ve geri ödeme süresi 1.83 – 3.3 yıl olarak hesaplanmıştır.</p>	(Nie ve ark., 2019)
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Alan iklimlendirme sistemlerinde faz değiştiren malzemelerin kullanımının etkisini incelemek için Pekin'de bulunan bir ofis ele alınmıştır. Bir ısı transfer modeli ve klima performans eğrisinden oluşan hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Farklı erime sıcaklığına sahip (19 °C, 20 °C, 21 °C, 22 °C, 23 °C ve 24 °C) olan FDM'ler kullanılarak her bir sıcaklık aralığında sistemin enerji depolama kapasitesi karşılaştırılmıştır.	<p><i>i.</i> FDM erime sıcaklığı ne kadar büyükse, gece vakti iç ortam sıcaklığı o kadar hızlı azalmaktadır.</p> <p><i>ii.</i> İç ortamda ayarlanan sıcaklık ne kadar yüksekse, FDM'lerin potansiyel soğutma katkıları o kadar fazladır.</p> <p><i>iii.</i> Ayar sıcaklığının 24 °C'den 28 °C'ye değiştirilmesiyle mevsimsel elektrik enerjisi tasarrufu %16.9'dan %50.8'e yükselmiştir.</p> <p><i>iv.</i> Geleneksel gece havalandırması sistemine kıyasla elektrik enerjisi tasarruf oranı %9.2'den %33.6'ya yükselmiştir.</p>	(Chen ve ark., 2019)
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Yaz mevsiminde şebekede iklimlendirme sistemleri yüzünden oluşan pik yüklerini azaltmak için FDM ile bir enerji depolama tankı tasarlanmıştır. Tankın enerji depolama kapasitesi 5 kWh olarak belirlenmiştir. Tankın FDM doluluk oranı %60 olarak belirlenmiştir.	<p><i>i.</i> Soğutma yükü ortalama 40 kW olan küçük bir ofisin elektrik enerjisi kullanımının %13-16 arasında azaltılabileceği rapor edilmiştir.</p> <p><i>ii.</i> Tankın toplam şarj süresi 54 dakika olarak hesaplanmıştır.</p> <p><i>iii.</i> FDM doluluk oranı %60 ve depolanan enerji miktarı 5 kWh iken, doluluk oranı %75 olduğunda depolanabilen enerji miktarı 6.2 kWh olarak hesaplanmıştır.</p>	(Falco ve ark., 2016)
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Her biri elektrikli ve solar ısıtıcılarla (kış modu) ve klima (yaz modu) ile donatılmış 2 farklı kulübede 9.5 kg RT-25 HC FDM'si kullanılarak, FDM kullanımının ısıtma ve soğutma enerji giderlerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Kış mevsiminde solar enerji, yaz mevsiminde gece havalandırması yapılarak FDM üzerinde enerji depolanmıştır.	<p><i>i.</i> Kulübede gün içinde oluşan sıcaklık dalgalanmalarının önüne geçilmiştir.</p> <p><i>ii.</i> FDM kullanılan kulübede, FDM kullanılmayan kulübede kıyasla ısı konfor şartları %54 daha uzun süre için sağlanmıştır.</p> <p><i>iii.</i> Mart ve Nisan aylarında günlük enerji tasarrufu miktarı %10-60 arasında değişiklik göstermiştir.</p>	Gholamibozanjani ve Farid
<b>İklimlendirme Sistemiyle Birlikte Kullanım</b>	Çalışmada geri dönüş havalı iklimlendirme sistemlerinde enerji ve ekserji analizi üzerinde durulmuştur.	<p><i>i.</i> Şartlandırılan hava sıcaklığı ile dış ortam sıcaklığı arasındaki fark ne kadar yüksekse ekserji değerinin o kadar yüksek olduğu rapor edilmiştir.</p> <p><i>ii.</i> Düşük kaliteli enerjiyle dış ortam sıcaklığına yakın değerlerde ısıtma yapılabildiği belirtilmiştir. Sistemlerde sadece enerji geçişi üzerine değil de enerjinin ne denli etkin kullanıldığının da dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.</p>	(Güngör ve ark., 2017)

## FDM kullanılan ısı değiştiricili sistemler

Gizli ısı depolamanın en eski şekli göllerden ve nehirlerden buzun toplanması ve yıl boyunca gıda saklama, içecekleri soğutma ve iklimlendirme de dahil olmak üzere pek çok uygulama için iyi yalıtılmış depolarda saklanmasıdır. Budapeşte'deki Macar parlamento binası klimalıdır ve kışın Balaton Gölü'nden buz hasadı yapılarak binanın iklimlendirmesi sağlanmaktadır (Dinçer ve Rosen, 2010). Bir başka deyişle en ilkel olarak kullanılan faz değiştiren malzeme sudur. Faz değiştiren malzemeler ile ısı enerjinin depolanması mümkün olmaktadır ve kullanılacağı yerin özelliklerine göre FDM seçimi yapılmaktadır. Gizli ısı depolama sistemlerinde, faz değiştiren malzemenin enerjiyi hem absorbe etmesi hem de salması için etkin bir ısı değiştiricisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ısı değiştirici tasarımının sistem performansına pozitif bir etkisi olacağı bilinmektedir. Bu tasarım yapılırken ısı değiştiricideki iş akışkanının formu, tasarımın ilk adımı olarak söylenebilir. Örneğin, hava veya su iş akışkanı olursa tasarım buna göre ilerlemelidir. Mosaffa ve Farshi (2016) tarafından oluşturulan deney düzeneğinin basitleştirilmiş hali Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. İklimlendirme sistemiyle birlikte kullanıma ait bir ısı değiştirici ünitesi (Mosaffa ve Farshi, 2016)

Bu sistemdeki ortalama ısı transferi ve FDM üzerinde depolanabilecek olan enerji miktarı aşağıdaki gibi bulunabilir. Gizli ısı depolama ısı değiştiricisindeki ortalama ısı transferi:

$$\bar{Q}_{LHTS} = \frac{Q_{LHTS}}{t_{deşarj}} = \frac{1}{t_{deşarj}} \int_0^{t_{deşarj}} Q_{LHTS}(t) dt \quad (1)$$

Burada;  $\bar{Q}_{LHTS}$  zamana bağlı ısı enerjisi aktarımı hızını (kW),  $Q_{LHTS}$  LHTS ünitesinde biriken toplam ısı miktarını (kJ),  $t_{deşarj}$  sistemin deşarj olma süresini (saniye) göstermektedir. Sistemin toplam güç tüketimi  $W_{toplam}$ , çevrim çalışması sırasındaki güç tüketiminin (şarj ve deşarj işlemleri) toplamıdır:

$$W_{toplam} = [W_{fan} \times t]_{deşarj} + [(W_{fan1} + W_{fan2} + W_{kompresör}) \times t]_{şarj} \quad (2)$$

Dolayısıyla sistemin performans katsayısı (COP) şöyle yazılır:

$$COP = \frac{Q_{LHTS}}{W_{toplam}} \quad (3)$$

Faz değiştiren malzemenin depolama kapasitesi ise şu şekilde hesaplanır:

$$Q = m[a_m h + C_{sp}(T_m - T_i) + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (4)$$

Burada,  $Q$  depolanan enerji miktarını (kJ),  $m$  faz değişim malzemesinin kütesini (kg),  $a_m$  erime yüzdesini,  $h$  füzyon ısısını (J /kg),  $c_{sp}$  başlangıç ve erime sıcaklığı arasındaki ortalama özgül ısıyı (kJ /kg/K),  $c_{lp}$  erime ve son sıcaklık arasındaki ortalama özgül ısıyı (kJ /kg/K),  $T_i$ ,  $T_m$  ve  $T_f$  ise sırasıyla başlangıç, erime ve son sıcaklıkları (°C) ifade etmektedir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, ısı enerji depolama sistemlerinde kullanılan ısı değiştirici çeşitlerinin çoğunlukla spiral, sarmal, çift borulu, plaka, kompakt ve gövde – borulu tip olduğu görülmüştür. Erek ve ark. (2005), kanatlı boru kullanarak ısı enerji depolama sistemleri üzerine deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Çalışma sonucunda, gövde – borulu ısı değiştiricisi yapısının gizli ısı depolama sistemleri için en uygun tip olduğunu belirtmişlerdir. Bu tip ısı değiştiricilerde FDM, gövde kısmındaki boşluğu ve içerisindeki kanatlı borunun etrafını saracak şekilde yerleştirilmektedir. Boru kısmından ise ısı transfer akışkanı geçmektedir.

Faz değiştiren malzemenin üzerinden geçirilen akışkan, akışkan sıcaklığına bağlı olarak ya FDM'yi eritmekte ya da katılaştırmaktadır. Burada, ısı transferi doğal veya şartlandırılmış dış taşınım yoluyla gerçekleşmektedir. Isı transferi sırasında; etkili ısı kapasitesinin, faz değişimi sırasında kazanılan ve salınan enerji ile doğru orantılı, fakat erime ve katılma sıcaklığıyla ters orantılı olduğunu belirtilmiştir. Bu yüzden faz dönüşüm sürecinin ısı transfer özelliklerinin iyi anlaşılması sistemin tasarımı, değerlendirilmesi ve optimizasyonu için önem arz etmektedir (İbrahim ve ark., 2017).

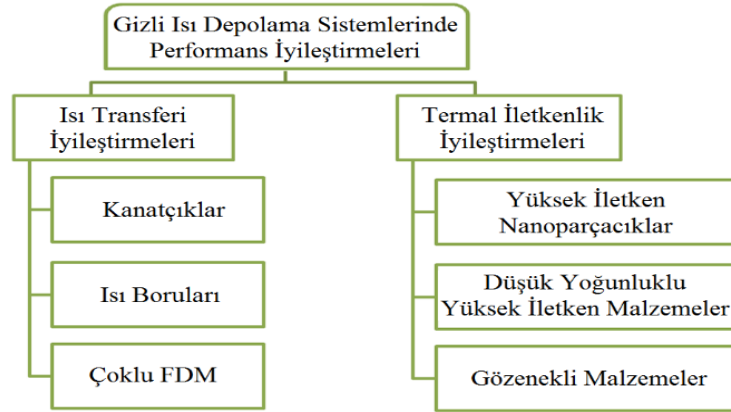
Isı değiştiricilerin kullanıldığı bir başka çalışmada, Yüksel ve Avcı (2006) FDM'lerin özgül ısı değerlerinin ortalamasını kullanarak gizli ısı depolama ısı değiştiricisindeki şarj / deşarj işlemleri sırasında zaman ve sıcaklığı tahmin eden bir teorik yaklaşım sunmuşlardır. Regin ve ark. (2007), düz

plakalı, iç akışlı gövde-borulu, paralel akışlı gövde-borulu, karşıt akışlı gövde-borulu ve küre yataklı olmak üzere gizli ısı depolamada kullanılan ısı değiştiriciler için birçok tasarım öne sürmüştür. Iten ve Liu (2014) ise, faz değiştiren malzeme seçimi ve ısı değiştirici tasarımı hakkında bir metot geliştirmişlerdir. Sistemin ısı enerji performansını analiz etmek ve IED sisteminin optimum tasarımını elde etmek için deneysel ve sayısal çalışma yöntemleri ve modelleme yazılım araçları gibi metodolojiler sunmuşlardır.

İncelenen çalışmalarda karşılaşılan en büyük sorunun faz değiştiren malzemelerin düşük ısı iletkenliği olduğu görülmektedir. Bu düşük ısı iletkenlik sebebiyle ısı transfer miktarı da düşmektedir. Çizelge 4'te ısı değiştiricilerde yapılan performans iyileştirme çalışmalarından örnekler sunulmuştur. Bilindiği üzere metal içerikli FDM'ler haricindeki diğer FDM'ler çok düşük ısı iletkenliğe sahiptir. İnorganik sınıfta yer alan FDM'ler organik esaslı olanlardan nispeten daha yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Düşük ısı iletkenlik, akışkan ve FDM arasında olan ısı transfer miktarını olumsuz yönde etkilemektedir (Teggar ve ark., 2021). İbrahim ve ark. (2017) gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan ısı değiştiricilerde yapılabilecek iyileştirmeler üzerine bir çalışma yapmıştır. Isı transferi iyileştirmelerinin kanatlı yapılarla, ısı borularıyla ve çoklu FDM kullanımıyla artırılabilirliğini Şekil 3'te belirtmiştir.

#### Çizelge 4. Isı Değiştiricilerde Yapılan Performans İyileştirme Çalışmaları

Yapılan çalışma	Bulgular	Ref.
Isıl enerji depolama sistemi için gövde – borulu ısı değiştirici tasarım yöntemi sunulmuştur.	Yüksek akış hızlarında, FDM'den ısı transfer akışkanına enerji transferi azalmıştır.	(Lecomte ve Mayer, 1985)
Gövde – borulu ısı değiştiricilerde paralel ve karşıt akışın etkisi incelenmiştir.	FDM olarak; %85 LiF ve %19,5 CaF Isı transfer akışkanı olarak He / Xe karşımı kullanılmış, Paralel akışlıda %5 daha fazla şarj / deşarj sağlanmıştır.	(Gong ve Mujumdar, 1997)
Düz plakalı emici yüzey, çift borulu tip ile değiştirilmiştir.	Bu değişikliklerle beraber ısı transfer yüzey alanı ve katsayısı artırılmıştır.	(Fath, 1998)
İç ve sınır noktalarının sıcaklık değişimini ve erime sürecindeki doğal konveksiyon göz önüne alınarak önceki araştırmalar geliştirilmiştir.	FDM'nin erime sıcaklığı, giriş ve çıkış hava sıcaklığı aralığı ve hava akış hızı gibi parametrelerin bir tasarımda önemli olduğunu belirtilmiştir.	(Halawa ve ark., 2005)
Gerçek ölçekli hava-FDM ısı değiştiricilerini test etmek için iki farklı prototip geliştirilmiştir.	Isı değiştiricisinde daha yüksek soğutma gücü elde etmek için düşük ısı iletkenliğe ve enerji depolama kapasitesine sahip FDM kullanılmasının uygun olduğunu öne sürmüşlerdir. Serbest soğutma uygulamaları için FDM ısı iletkenliğini artırmak yerine, ısı değiştiricilerin tasarımında çaba sarf edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.	(Lazaro ve ark., 2009)
Isı değiştirici modifikasyonu	Hava akış hızının, levha pürüzlülüğünün, FDM sistem uzunluğunun artırılması; buna karşın FDM levha kalınlığının ve aradaki boşluğun azaltılması ile daha yüksek ısı transfer hızlarına ve daha kısa katılma/erime sürelerine ulaşılabileceği rapor edilmiştir.	(Dolado ve ark., 2011)
Isıl iletkenliği artırmak için gizli ısı depolama tankı içinde bulunan ısı transfer borusu karbon giysi ile kaplanmıştır.	Yüksek ısı iletkenliğe sahip karbon giysi ile kaplama sonucunda ısı transfer oranı artış göstermiştir.	(Nakaso ve ark., 2008)
İklimlendirme sistemlerinde hava – FDM arasındaki ısı transfer oranını iyileştirmek amaçlanmıştır.	FDM ve hava tarafına kanatçık ekleme ve ısı iletken parçacık ekleme yöntemleri kıyaslanmıştır. • Kanatların, ısı iletken parçacık eklenmesine karşı daha yüksek performans gösterdiği, • Kanatçıkların hava geçiş tarafına eklenmesinin performansı daha iyi oranda iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.	(Nie ve ark., 2020)
Laurik asit ve parafin tabanlı FDM'lerde hacimce %0.1 oranında nano $Al_2O_3$ ve $CuO$ eklenerek termal performans değerleri incelenmiştir.	Nano parçacık ile FDM birbirine bu hacim oranında homojen şekilde karışmıştır. Nano $Al_2O_3$ katkılanmış FDM'in şarj süresi %39 oranında azalmıştır.	(Yaday ve Sahoo, 2022)



Şekil 3. Gizli ısı depolama sistemlerinde performans iyileştirmeleri

Çizelge 5'te ısı değiştiricilerde ısı transfer miktarını artırmak için yapılmış çalışmalar kullanılan matris yapısının çeşidine göre sınıflandırma yapılarak özetlenmiştir.

Çizelge 5. Isı Değiştiricilerde Isı Transferini Artırmak İçin Uygulanan Geometriler

Geometri	Açıklama
<b>Alüminyum matris yapı</b>	Bu yapılarda FDM, matris yapının içine yerleştirilir ve ısı transfer akışkanının bu yapının içinden akması sağlanır. De Jong ve ark. (1980) ve Bugaje (1997) katılma süresini azaltmak için bu yapıyı kullanmışlardır.
<b>Grafit matris yapı</b>	Marin ve ark. (2005), grafit matris yapı ile fanların enerji tüketiminin %50 oranda azaldığını belirtmiştir.
<b>Bal peteği yapı</b>	Abhat (1976) bal peteği yapısına sahip bir tasarım yapmıştır. Bu tasarımı sayesinde katılma süresini azaltmış ve ısıl iletkenliğin arttığını gözlemlemiştir.
<b>Kanatlı yapı</b>	Kanatlı yapı kullanımı ısı transferi yüzey alanını artıracağından ısı transfer oranını da artıracaktır. Liu ve ark. (2012), kanat yapısında kullanılan malzemelerin kıyaslamasını yapmışlardır. Grafit folyo düşük yoğunluk avantajı ile öne çıkarken alüminyumun orta derece yoğunluğu ve yüksek ısıl iletkenliğiyle en avantajlı malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Stritih (Stirith, 2004), kanatlı ve kanatsız yapıları kıyaslamış ve kanatlı yapıya sahip FDM'lerde katılma süresinin %40 azaldığını gözlemlemiştir.
<b>Isı borusu</b>	Isı boruları kullanımı, ısı transferi akışkanı ve FDM arasında bir ısıl taşıyıcı görevi görmektedir. Gizli ısı depolama sistemlerinde ısı borularının kullanımı, FDM şarj ve deşarj işlem süresini önemli ölçüde hızlandırmaktadır (İbrahim ve ark., 2017). Robak ve ark. (2011), çalışmalarında ısı boruları kullanımıyla FDM'nin erime oranlarında %60'lık bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Bunlara ek olarak ise katılma sırasında, ısı transfer akışkanı ve FDM arasındaki enerji akışının 2 katına çıktığını vurgulamışlardır.

## SONUÇ

Bu çalışmada, Dünya'da enerjinin önemli bir kısmının kullanıldığı binalarda, iklimlendirme ve ısıl konforun sağlanması için gerçekleştirilen uygulamalarda FDM'ler kullanılarak gizli ısının depolanmasını sağlayan aktif ve pasif sistemlerin bir incelemesi sunulmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında, farklı uygulamalarda kullanılacak potansiyel faz değiştiren malzemelere, bu malzemelerin termo-fiziksel özelliklerine, aktif ve pasif gizli ısı depolama sistemlerindeki çeşitli uygulamalarına, gizli ısı depolamada kullanılan ısı değiştirici tiplerine ve bu ısı değiştiricilerdeki performans iyileştirmeleri hakkında literatürde mevcut araştırma sonuçlarına değinilmiştir. Ayrıca, FDM'lerin iklimlendirme sistemlerinde kullanımı temel alınarak ısı transferi konusunda farklı yöntemlerle yapılan iyileştirmeler kıyaslanmıştır.

Yapılan incelemeler sonucunda, organik sınıfına ait parafin esaslı FDM'lerin yüksek ısı depolama kapasitesine sahip olmaları nedeniyle en çok kullanılan ve tercih edilen malzemeler olduğu görülmüştür. Parafinlerin faz değişimi sırasında meydana gelen büyük hacim değişimi ve sızdırmaları sebebiyle mikro ve makro boyutta kapsüllemelerine yönelik araştırmaların yoğun olduğu belirlenmiştir. FDM'lerin çoğunun düşük ısıl iletkenliğe sahip olması, depolama ünitesindeki şarj ve deşarj işleminin uzun sürmesine neden olmaktadır. Ayrıca, kapsülleme işlemi de ısıl iletkenliği



olumsuz yönde etkilemektedir. FDM'lerin düşük ısı iletkenliği sebebiyle, araştırmaların çoğu FDM'ler ile enerji depolamada ısı transferinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca, ısı değiştirici tasarımı üzerine önemli sayıda çalışma yapıldığı görülmüştür. İncelenen çalışmalardan görüldüğü üzere, iklimlendirme sistemlerinde kullanılan FDM'ler ile enerji sarfiyatı önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Ayrıca, gizli ısı formunda ısı enerji depolama üniteli iklimlendirme sistemleri tasarımlarının işletme maliyetlerini ve sistem hacmini düşürmesi beklenmektedir. Pasif sistem uygulamalarında daha çok iç ortam sıcaklık dalgalanmalarının önüne geçmek ya da dış ortamdan kaynaklanan ısı akısını azaltmak amaç olmuştur. Aktif sistemlerde özellikle gece havalandırması yöntemiyle ciddi miktarda enerji tasarrufu yapıldığı görülmüştür. FDM'lerin düşük ısı iletkenliği sebebiyle farklı ısı değiştirici geometrileri ve iletken parçacıklar kullanılarak ısı transferinde iyileştirmelerin meydana geldiği ve farklı ısı değiştirici tasarımı sayesinde FDM'lerin katılma süresinde ciddi miktarda azalmalar meydana geldiği görülmüştür.

Gizli ısı enerji depolamasına sahip uygulamaların yakın gelecekte geliştirilmeye açık yönleri de bulunmaktadır. Bu temelde:

- FDM'lerin özelliklerinin geliştirilmesine ve maliyetlerin azaltılmasına katkı sağlayacak çalışmalar yapılabilir.
- Değişken koşullar altında performans incelemesine yönelik deneysel çalışmalar planlanabilir.
- FDM'lerin kullanım ömürlerini ve en fazla şarj/deşarj işlemi sayılarının belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Sistem benzetimi, modellenmesi, ölçeklendirmesine ve ekonomik açıdan değerlendirilmesine yönelik çalışmalar hayata geçirilebilir.

Sonuç olarak, aktif ve pasif sistemlerde ısı depolama ortamı olarak FDM'lerin kullanılmasının, birim fiyatları ve iklimlendirme sistemi boyutlarını azaltmak için önemli bir alternatif olması beklenmektedir. Ayrıca, iklimlendirme sistemleri dışında FDM'ler solar enerji depolamada, off-peak saatlerde soğutmada ve ısıtmada, bilgisayar ve elektronik devrelerde, soğuk hava zinciri taşımacılığında, medikal alanda ilaç ve kan taşımacılığında, elektrikli ve içten yanmalı motorların soğutulmasında, araç içi iklimlendirmesinde ve uzay araçlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Ülkemizde henüz ticari boyutta FDM kullanımı pek yaygın olmasa da enerji ihtiyacının artmasıyla önümüzdeki yıllarda kullanımının yaygınlaşması ve tüm sektörlerde enerji tasarrufu noktasında olumlu katkı sağlaması beklenmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde proje desteği sağlayan Yalova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (Proje Numarası: 2020/YL/0022) teşekkür ederiz.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Abhat, A. (1976). Experimental investigation and analysis of a honeycomb-packed phase change material device. In: 11th AIAA thermophysics conference, 14-16 July, San Diego, CA, USA.
- Akeiber, H., Nejat P., Majid M.Z.A., Wahid, M.A., Jomehzadeh F., Famileh I.Z., Calautit J.K., Hughes B.R., Zaki S.A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470-1497.

- Alawadhi, E.M., Alqallaf, H.J. (2011). Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study. *Energy Conversion and Management*, 52(8–9), 2958-2964.
- Arıcı, M., Bilgin, F., Krajčák, M., Nižetić, S., Karabay, H. (2022). Energy saving and CO2 reduction potential of external building walls containing two layers of phase change material, *Energy*, Volume 252.
- Arkar, C., Medved, S. (2007). Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, 81(9), 1078-1087.
- ASHRAE Standard 55. (2004). Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, Atlanta, U.S.A.
- Barzin, R., Chen, J.J.J., Young, B.R., Farid, M.M. (2015). Application of PCM energy storage in combination with night ventilation for space cooling. *Applied Energy*, 158, 412-421.
- Bugaje, I.M. (1997). Enhancing the thermal response of latent heat storage system. *Energy Res*, 21(9), 759–66.
- Butala, V., Stritih U., 2009. Experimental investigation of PCM cold storage. *Energy and Buildings*, 41(3), 354-359.
- Cabeza, L.F., Ibanez, M., Sole, C., Roca, J., Nogues, M. (2006). Experimentation with a water tank including a PCM module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(9), 1273–1282.
- Chaiyat, N., Kiatsiriroat, T. (2014). Energy reduction of building air-conditioner with phase change material in Thailand. *Case Studies in Thermal Engineering*, 4, 175-186.
- Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H., Wang, C. (2008). A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. *Energy and Buildings*, 40(5), 882-890.
- Chen, X., Zhang, Q.Z., Zhai, J., Ma, X. (2019). Potential of ventilation systems with thermal energy storage using PCMs applied to air conditioned buildings. *Renewable Energy*, 138, 39-53.
- Chopra, K., Tyagi, V.V., Pandey, A.K., Popli, S., Singh G., Sharma R.K., Sari A. (2022). Effect of simultaneous & consecutive melting/solidification of phase change material on domestic solar water heating system, *Renewable Energy*, 188, 329-348.
- De Jong, A., Hoogendoorn, C. (1980). Improved of heat transport in paraffin for latent heat storage systems. In: Proceedings of TNO Symposium on Thermal Storage of Solar Energy (s. 99–110). Amsterdam, Holland.
- Dinçer, İ., Rosen, M.A. (2010). “Thermal Energy Storage Methods” in *Thermal Energy Storage Systems and Applications Second Edition* (s. 83-190) içinde, Wiley, West Sussex, U. K.
- Dolado P., Lazaro, A., Marin, J.M., Zalba, B. (2011). Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1890-1907.
- Erek, A., İlken, Z., Acar, M.A. (2005). Experimental and numerical investigation of thermal energy storage with a finned tube. *International Journal of Energy Research*, 29, 283-301.
- Falco, M.D., Capocelli, M., Giannattasio, A. (2016). Performance analysis of an innovative PCM-based device for cold storage in the civil air conditioning. *Energy and Buildings*, 122, 1-10.
- Fath, H.E.S. (1998). Technical assessment of solar thermal energy storage technologies. *Renewable Energy*, 14(1-4), 35-40.
- Gencel, O., Yaras, A., Hekimoğlu, G., Ustaoglu A., Erdogmus, E., Sutcu M., Sarı, A. (2022). Cement based-thermal energy storage mortar including blast furnace slag/capric acid shape-stabilized phase change material: Physical, mechanical, thermal properties and solar thermoregulation performance. *Energy and Buildings*, 258, 111849
- Gholamibozanjani, G., Farid, M. (2020). Application of an active PCM storage system into a building for heating/cooling load reduction, *Energy*, 210(1), 118572.
- Gong, Z., Mujumdar, A.S. (1997). Finite-element analysis of cyclic heat transfer in a Shell and tube latent heat energy storage exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 17(4), 583–591.
- Güngör, A., Karaçaylı, İ., Şimşek, E., Canlı, Y. (2017). Geri dönüş havalı iklimlendirme sistemlerinde enerji ve ekserji analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 19-29.
- Halawa, E., Bruno, F., Saman, W. (2005). Numerical analysis of a PCM thermal storage system with varying wall temperature. *Energy Conversion and Management*, 46(15–16), 2592-2604.

- Hekimoğlu, G., Sarı, A. (2022). Shape stabilized attapulgite/myristic-palmitic acid composite PCM for thermal energy storage implementations in buildings. *Materials Today: Proceedings*, 58, 1350-1353.
- Ibrahim, N.I., Al-Sulaiman, F.A., Rahman, S., Yilbas, B.S., Sahin, A.Z. (2017). Heat transfer enhancement of phase change materials for thermal energy storage applications: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 26-50.
- Iten, M., Liu, S. (2014). A work procedure of utilising PCMs as thermal storage systems based on air-TES systems. *Energy Conversion and Management*, 77, 608-627.
- Iten, M., Liu, S., Shukla, A. (2016). A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 175-186.
- Karim, L., Barbeon, F., Gegout, P., Bontemps, A., Royon, L. (2014). New phase-change material components for thermal management of the light weight envelope of buildings. *Energy and Buildings*, 68: 703-706.
- Kenisarin, M., Mahkamov K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913-1965.
- Kuznik, F., Virgone, J., Noel J. (2008). Optimization of a phase change material wallboard for building use. *Applied Thermal Engineering*, 28(11-12), 1291-1298.
- Lazaro, A., Dolado, P., Marín, J.M., Zalba B. (2009). PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Experimental results of two real-scale prototypes. *Energy Conversion and Management*, 50(3), 439-443.
- Lecomte, D., Mayer, D. (1985). Design method for sizing a latent heat store/heat exchanger in a thermal system. *Applied Energy*, 21, 55-78.
- Li, D., Wu, Y., Wang, B., Liu, C., Arıcı, M. (2020). Optical and thermal performance of glazing units containing PCM in buildings: A review. *Construction and Building Materials*, 233, 117327.
- Liu, M., Saman, W., Bruno, F. (2012). Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2118-2132.
- Lu, S., Xu, B., Tang, X. (2020). Experimental study on double pipe PCM floor heating system under different operation strategies. *Renewable Energy*, 145, 1280-1291.
- Luo, J, Zou, D, Wang, Y, Wang, S, Huang L. (2022). Battery thermal management systems (BTMs) based on phase change material (PCM): A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 430, 132741.
- Marín, J.M., Zalba, B., Cabeza, L.F., Mehling, H. (2005). Improvement of a thermal energy storage using plates with paraffin-graphite composite. *Heat Mass Transfer*, 48(12), 2561-70.
- Mert, H.H., Mert, M.S. (2020). Faz Değiştiren Madde Olarak n-Hekzadekan Esaslı Mikrokapsüllerin Hazırlanması, Karakterizasyonu ve Isıl Performansının T-Kayıt Yöntemiyle Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 148-161.
- Mert, H.H., Mert, M.S., Mert, E.H. (2020). N-Hekzadekan/Montmorillonit Kompozit Faz Değiştiren Maddelerin Hazırlanması ve Özelliklerinin Belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 229-239.
- Mert, H.H., Okay, H., Mert, M.S. (2022). Form-stable n-hexadecane/zinc borate composite phase change material for thermal energy storage applications in buildings. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101836.
- Mert, M.S., Mert, H.H., Sert, M. (2019). Investigation of Thermal Energy Storage Properties of a Microencapsulated Phase Change Material Using Response Surface Experimental Design Methodology. *Applied Thermal Engineering*, 149, 401-413.
- Mert, M.S., Sert, M., Mert, H.H. (2018). Isıl enerji depolama sistemleri için organik faz değiştiren maddelerin mevcut durumu üzerine bir inceleme. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 161-174.
- Mosaffa, A.H., Farshi, L.G. (2016). Exergoeconomic and environmental analyses of an air conditioning system using thermal energy storage. *Applied Energy*, 162, 515-526.
- Mosaffa, A.H., Ferreira, C.A.I., Talati, F., Rosen, M.A., (2013). Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling. *Energy Conversion and Management*, 67, 1-7.

- Nagano, K., Takeda, S., Mochida, T., Shimakura, K., Nakamura, T. (2006). Study of a floor supply air conditioning system using granular phase change material to augment building mass thermal storage—Heat response in small scale experiments. *Energy and Buildings*, 38(5), 436-446.
- Nakaso, K., Teshima, H., Yoshimura, A., Nogami, S., Hamada, Y., Fukai, J. (2008). Extension of heat transfer area using carbon fiber cloths in latent heat thermal energy storage tanks. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 47(5), 879-885.
- Neeper, D.A. (2000). Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. *Solar Energy*, 68 (5): 393-403.
- Ni, B., Du, Z., Zou, B., Li, Y., Ding, Y. (2020). Performance enhancement of a phase-change-material based thermal energy storage device for air-conditioning applications. *Energy and Buildings*, 214, 109895.
- Nie, B., She, X., Du, Z., Xie C., Li, Y., He, Z., Ding, Y. (2019). System performance and economic assessment of a thermal energy storage based air-conditioning unit for transport applications. *Applied Energy*, 251, 113254.
- Nižetić, S., Jurčević, M., Čoko, D., Arıcı, M., Hoang A.T. (2021). Implementation of phase change materials for thermal regulation of photovoltaic thermal systems: Comprehensive analysis of design approaches, *Energy*, 228, 120546.
- Osterman, E., Butala, V., Stritih, U. (2015). PCM thermal storage system for ‘free’ heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, 106, 125-133.
- Parameshwaran, R., Harikrishnan, S., Kalaiselvam, S. (2010). Energy efficient PCM-based variable air air conditioning system for modern buildings. *Energy and Buildings*, 42(8), 1353-1360.
- Patel, J., Shukla, D., Raval, H., Mudgal, A., (2022). Experimental evaluation of the performance of latent heat storage unit integrated with solar air heater. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 197-205.
- Piselli, C., Castaldo V.L., Pisello, A.L. (2019). How to enhance thermal energy storage effect of PCM in roofs with varying solar reflectance: Experimental and numerical assessment of a new roof system for passive cooling in different climate conditions. *Solar Energy*, 192, 106-119.
- PlusICE PCM, 13.02.2021, 20:13, [Çevrimiçi] Erişim adresi: <https://www.pcmproducts.net/>
- Rahdar, M.H., Emamzadeh, A., Ataei, A. (2016). A comparative study on PCM and ice thermal energy storage tank for air-conditioning systems in office buildings. *Applied Thermal Engineering*, 96, 391-399.
- Regin, A. F., Solanki, S. C., Saini, J. S. (2006). Latent heat thermal energy storage using cylindrical capsule: Numerical and experimental investigations. *Renewable Energy*, 31(13), 2025-2041.
- Robak, C., Bergmand, T., Faghri, A., (2011). Enhancement of latent heat energy using embedded heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(15-16), 3476–84.
- RubiTherm GmbH, 13.02.2021, 19:50 [Çevrimiçi] Erişim adresi: <https://www.rubitherm.eu/>
- Saffari M., Gracia, A., Ushak, S., Cabeza, L.F. (2016). Economic impact of integrating PCM as passive system in buildings using Fanger comfort model. *Energy and Buildings*, 112, 159-172.
- Saxena, R., Rakshit, D., Kuashnik, S.C. (2020). Experimental assessment of Phase Change Material (PCM) embedded bricks for passive conditioning in buildings, *Renewable Energy*, 149, 587-599.
- Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2), 318-345.
- Shukla, A., Sharma, A., Biwolé, P.H., (Eds.). (2020). Latent Heat-Based Thermal Energy Storage Systems: Materials, Applications, and the Energy Market, 1st ed., Apple Academic Press, Canada.
- Stritih, U., 2004. An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM thermal storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12-13), 2841–2847.
- Takeda, S., Nagano, K., Mochida, T., Shimakura, K. (2004). Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material. *Solar Energy*, 77(3), 329-338.
- Teggar, M., Ajarostaghi, S.S.M., Yıldız, Ç., Arıcı, M., Ismail, K.A.R., Niyas, H., Lino, F.A.M., Mert, M.S., Khalid, M. (2021). Performance enhancement of latent heat storage systems by using extended surfaces and porous materials: A state-of-the-art review. *Journal of Energy Storage*, 44, 103340.



- Tokuç, A., Bařaran, T., Yesügey, S.C. (2015). An experimental and numerical investigation on the use of phase change materials in building elements: The case of a flat roof in Istanbul. *Energy and Buildings*, 102, 91-104.
- United Nations (2017). UN, 71/313, Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development, Tech. rep., A/RES/71/313. New York, USA: United Nations. Erişim adresi: <https://digitallibrary.un.org/record/1291226>
- Waęas, A., Kumar, S. (2011). Utilization of latent heat storage unit for comfort ventilation in buildings in hot and dry climates. *International Journal of Green Energy*, 8(1), 1-24.
- Weng, Y.C., Cho, H.P., Chang, C.C., Chen, S.L. (2011). Heat pipe with PCM for electronic cooling. *Applied Energy*, 88 (5), 1825-1833.
- Xu, X., Zhang, Y., Lin, K., Di, H., Yang, R. (2005). Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings. *Energy and Buildings*, 37(10), 1084-1091.
- Yadav, C., Sahoo, R.R., 2022. Thermal analysis comparison of nano-additive PCM-based engine waste heat recovery thermal storage systems: an experimental study. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147, 2785–2802.
- Yanbing, K., Yi, J., Yinping, Z. (2003). Modeling and experimental study on an innovative passive cooling system—NVP system. *Energy and Buildings*, 35(4), 417-425.
- Yuksel, N., Avcı, A., Kilic M. (2006). A model for latent heat energy storage systems. *International Journal of Energy Research*, 30(14), 1146–1157.
- Yüksel, N., Avcı A. (2013). Gizli ısı depolamalı kutu tipi iki güneş fırınının deneysel olarak karşılaştırılması. *Uludaę Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(1), 81-92