

FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN YANGIN PERFORMANSI VE YAPI UYGULAMALARINDA GÜVENLİ KULLANIM POTANSİYELİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

YAZARLAR:

BİLGEHAN BAKIRHAN
EBRU KILIÇ BAKIRHAN



BİDGE Yayınları

Yazar: Bilgehan Bakırhan ve Ebru Kılıç Bakırhan

ISBN: 978-625-8821-21-5

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.06.2026

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

Giriş.....	4
Faz Değiştiren Malzemeler	7
Üretim Teknikleri.....	8
Termal ve Fiziksel Özellikler.....	10
Mevcut Durum Analizi.....	12
Yöntem.....	14
Yangın Performansı Değerlendirmesi	16
Yangın Performansı Göstergeleri.....	18
Duman Üretimi ve Alev Geciktirme Mekanizmaları	19
Yangın Dayanımı ile İlişkilendirilen Karakteristik Özellikler	22
Termal Özellikler Üzerindeki Etkiler	22
Fiziksel ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkiler	23
Kimyasal Özellikler Üzerindeki Etkiler	23
Yangın Performansı İyileştirilmiş FDM Kompozitlerinin Uygulama Alanları	24
Tartışma.....	25
Sonuç ve Öneriler.....	30
Kaynakça.....	36

Giriş

Faz değıştiren malzemeler (FDM) günümüzde binalarda enerji verimliliği alanında önemli bir yere sahip olup, gizli ısı depolama mekanizmasıyla binanın termal performansına doğrudan katkı sağlamaktadır (Canım & Kalfa, 2020). Bu sistemler, faz değışimi esnasında yüksek miktarda ısıyı absorbe ederek iç mekân sıcaklık dalgalanmalarını düşürür ve özellikle soğutma yüklerini önemli ölçüde azaltır (Coşkun & Temel, 2024; Karadağ vd., 2020).

Binalarda sergilediği davranışların bütüncül olarak incelenmesi için FDM'nin yalnızca termal depolama kapasiteleriyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda yangın tepki sınıfları ve yanma karakteristikleri gibi özelliklerinin literatürdeki deneysel veriler ışığında irdelenmelidir (Bayraktar & Köse, 2024). Çünkü bu tür ileri teknoloji malzemelerin yapıda kullanımları için operasyonel enerji verimliliği kazanımları ile yapısal güvenlik gereklilikleri arasında bir denge kurulması gerekmektedir (Ovadiuc vd., 2024).

Yapısal uygulamalarda karşılaşılan düşük yangın davranışları, FDM'nin yaygın kullanımının önündeki en büyük kısıtlayıcı faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır (Arinaitwe vd., 2024). Bu tür malzemelerin özellikle organik türlerinin yapıları gereği sahip oldukları yüksek yanıcılık potansiyeli, yapı kabuğunda geniş ölçekli kullanımlarında yangın güvenliği açısından kritik riskler teşkil edebilmektedir (Alkan & Barış, 2025). Bu risklerin minimize edilmesi ve malzemenin yangın dayanımının artırılması amacıyla, kapsülleme yöntemlerinin ve alev geciktirici katkı maddelerinin termal kararlılık üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesi bir zorunluluk olarak görülmektedir (Mert vd., 2018; Yang vd., 2025).

Kapsülleme teknikleri FDM üretiminde sıklıkla başvuru alan yöntemler arasındadır. Bu nedenle kapsül ve FDM türü arasındaki uyuma dikkat edilmesi gerekmekte olup, malzemenin termal kararlılığını korumak adına nano, mikro ve makro ölçekteki

kapsülasyon tekniklerinin yangın geciktirici katkı maddeleriyle entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır (Uygunoğlu & Özgüven, 2025). Ayrıca, söz konusu malzemelerin faz değişim aralığının ve döngüsel kararlılığının, yapısal bir yangın anında malzemenin termal bozunma mekanizmalarına nasıl etki ettiğinin deneysel olarak doğrulanması önemlidir. Örneğin, FDM'nin ısıl bozunma esnasında açığa çıkardığı yanıcı gazların kompozit yapı içindeki yayılım kinetiği, malzemenin yangın dayanım süresini belirleyen temel parametrelerden biridir (Canım & Kalfa, 2022; Erdem & Orhon, 2020). Literatürdeki boşluklar göz önüne alındığında, FDM uygulamalarının bina yangın standartlarına uyumunu sağlayacak spesifik yanıcılık oranlarının ve performans kriterlerinin net bir şekilde tanımlanması gerekmektedir (Fokaides vd., 2015).

Yangın dayanımını test etmek için FDM özelinde kullanılan yöntemler, genellikle standart yanıcılık testleri olan koni kalorimetresi veya termogravimetrik analiz aracılığıyla malzemenin ısıl bozunma ve kütle kaybı davranışlarını belirlemeye odaklanmaktadır (Cunha vd., 2015). Bu deneysel süreçlerde, malzemelerin tutuşma kolaylığı, duman yoğunluğu ve zehirli gaz salımı gibi parametrelerin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi, yapı güvenliği açısından kritik veriler sunmaktadır (Aşlar & Harputlugil, 2023).

Literatürde belirtilen alev geciktirici modifikasyon stratejilerinin farklı kompozit yapılar üzerindeki etkinliğinin değerlendirilmesi, yangın güvenliği bariyerlerini aşmada temel bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır (Liu vd., 2024; Yin vd., 2022). Ancak mevcut çalışmaların çoğu malzemenin termofiziksel özelliklerine ve enerji tasarrufu potansiyeline odaklanırken, yangın anındaki davranışları ve zaman içerisindeki kararlılıkları gibi güvenlik odaklı parametreler üzerine yapılan deneysel araştırmaların sayısı hala kısıtlıdır (Canım & Kalfa, 2020; Forzano vd, 2019). Bu çalışmada öncelikle FDM'nin tanımı, türleri, üretim teknikleri ve

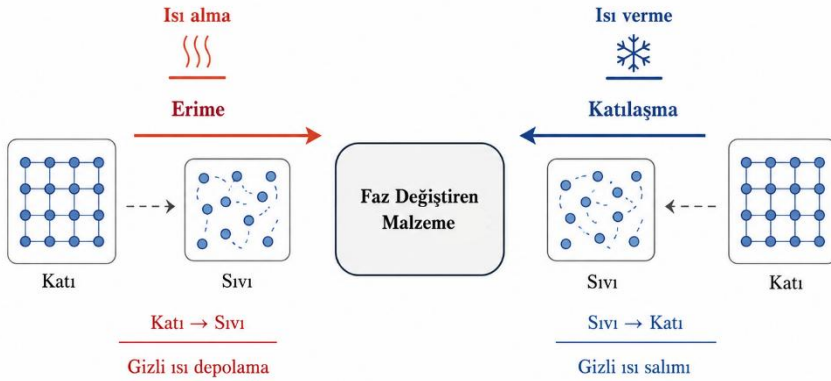
malzeme özellikleri çerçevesinde bir giriş yapılacak olup ardından yangın performansı üzerinden literatür taramasına geçilecektir.

Bu çalışmanın amacı, binalarda enerji verimliliği ve termal regülasyonun sağlanmasında öne çıkan FDM'nin yangın performansı başta olmak üzere karakteristik malzeme özelliklerinin incelenmesi ve bu alandaki teknolojilerin takip edilmesidir. Çalışmanın hedef kitlesini malzeme üreticileri, karar vericiler, mimar ve mühendislerin yanı sıra AR-GE sorumluları ve konuya ilgi duyan akademisyenler oluşturmaktadır.

Faz Değiştiren Malzemeler

Çalışma prensibi olarak gizli ısı depolama süreci, FDM'nin erime sıcaklığı aralığında katı halden sıvı hale veya sıvı halden katı hale faz değişimi esnasında gerçekleşen ısı transferine dayanmaktadır (İlgar & Terhan, 2023) (Şekil 1). Bu süreçte, yüksek gizli ısı depolama kapasiteleri sayesinde FDM, geniş sıcaklık dalgalanmalarını sönümleyerek iç mekanlarda kararlı bir ısıl denge sağlamaktadır (Taş vd., 2025). Gizli ısı depolama, duyulur ısı depolamaya göre çok daha dar bir sıcaklık aralığında, hacimsel olarak daha verimli ısı enerji depolama kapasitesi sunmakta olup, binalarda termal konforu daha üst seviyelere taşımaktadır (Bayram vd., 2022).

Şekil 1 FDM'nin çalışma mekanizması



Malzeme türleri bakımında genelde organik, inorganik ve ötektik karışımlar olmak üzere üç ana başlık altında sınıflandırılmakta olan FDM (Şekil 2), her bir grubun ısıl iletkenlik, yanıcılık ve sızıntı eğilimi gibi karakteristik özellikleri açısından uygulama alanlarına göre ayrışabilmektedir (Li vd., 2025). Organik FDM, çevresel uyumlulukları ve geniş tedarik imkânları nedeniyle tercih edilirken, parafin esaslı türleri termal ve kimyasal kararlılıkları sayesinde pratik uygulamalarda öne çıkmaktadır

(Temel, 2020). Bununla birlikte, stearik ve laurik asit gibi yağ asidi bazlı organik FDM, biyobozunur yapıları ve uygun faz değişim sıcaklıkları sayesinde çevre dostu kompozit malzeme geliştirme amacıyla sıklıkla tercih edilmektedir (Konuklu, 2020). Öte yandan, inorganik malzemeler, yüksek ısıl iletkenlikleri ve doğal yangın dirençleri ile dikkat çekse de aşırı süper soğuma sıcaklıkları ve korozyon gibi dezavantajları nedeniyle uygulama süreçlerinde ek modifikasyonlar gerektirmektedir (Konuklu vd., 2017; Talu vd., 2023).

Şekil 2 Türlerine göre FDM sınıflandırması

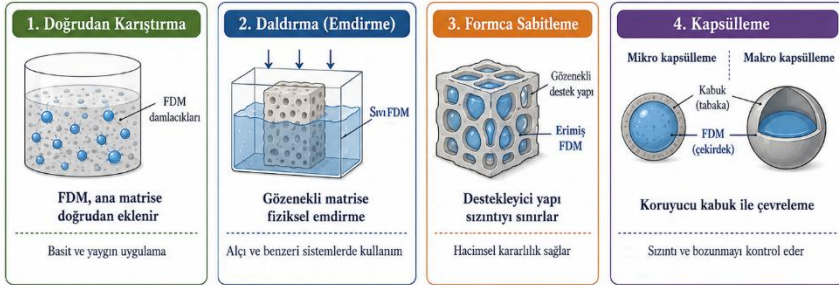
Organik FDM		İnorganik FDM		Ötektik Karışımlar	
 Parafinler ve yağ asidi bazlı malzemeler		 Tuz hidratları ve benzeri inorganik sistemler		 İki veya daha fazla bileşenin özel karışımları	
 Yancılık	Yüksek	 Yancılık	Düşük	 Yancılık	Bileşime bağlı
 Öne çıkan özellikler	Kimyasal kararlılık, uygun faz değişim aralığı	 Öne çıkan özellikler	Yüksek ısıl iletkenlik, doğal yangın direnci	 Öne çıkan özellikler	Uygulamaya göre ayarlanabilir özellikler
 Uygulama eğilimi	İç yüzey kaplamaları, hafif kompozitler, alçı esası sistemler	 Uygulama eğilimi	Çimentolu kompozitler, yüksek ısı depolama gerektiren sistemler	 Uygulama eğilimi	Özel amaçlı kompozitler ve uygulamaya özgü çözümler

Üretim Teknikleri

Temelde FDM üretimi için doğrudan karıştırma, daldırma (emdirme), formca sabitleme ve kapsülleme teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Kılıç Bakırhan & Tuna Kayılı, 2025) (Şekil 3). Bununla birlikte, faz değişimi sırasında ortaya çıkan hacimsel genişleme veya sızıntı gibi mekanik sorunları gidermek adına kullanılan mikro veya makro kapsülleme teknikleri, malzemenin yangın sırasında bozunma kinetiğini doğrudan etkileyen bir bariyer işlevi de görebilmektedir (Koşan & Aktaş, 2018). Bu kapsülleme katmanları, yanma sırasında açığa çıkan uçucu bileşenlerin salımını geciktirebilmekte olup malzemenin yangın dayanımı üzerinde kontrollü bir kalkan oluşturabilmektedir (Kayabaşı & Kaya, 2019).

Doğrudan karıştırma uygulamalarında, FDM ve alev geciktirici katkıları doğrudan ana matrise dahil edilir. Bu yöntemde alev geciktiricinin FDM hacmi içinde homojen dağılımı, yangın performansının sürekliliği için kritiktir (Palacios vd., 2018a). Daldırma yöntemi, FDM'nin genellikle alçı veya beton gibi gözenekli bir yapısal matrise fiziksel olarak emdirilmesi sürecidir. Alçı matrislerde yapılan çalışmalarda, kapsüllenmemiş FDM'nin daldırma yöntemiyle eklenmesinin görünür gözenekliliği azalttığı tespit edilmiştir. Bu durum doğal bir ısı bariyer görevi gören hava boşluklarını azaltacağından yangın performansı açısından olumsuz etki yaratabilir. Buna karşın, mikrokapsüllenmiş FDM eklenmesi gözenekliliği artırıcı bir etki göstermektedir (Serrano vd., 2016). Yapısal uygulamalarda, FDM içeren alçı kompozitlere daldırma yöntemiyle uygulanan 2,5 mm kalınlığındaki saf alçı tabakası, başarılı bir pasif yangın bariyeri oluşturarak alev yayılımını etkili bir şekilde sınırlandırmaktadır (Serrano vd., 2016).

Şekil 3 Üretim tekniklerine göre FDM sınıflandırması



Formca kararlı yapılar, FDM'nin sıvı hale geçtiğinde sızıntı yapmasını önlemek için gözenekli matrisler veya destekleyici yapılar kullanır. Bu teknik, yangın anında malzemenin yakıt kaynağı olarak dışarı sızmasını engelleyen kritik bir güvenlik bariyeridir (İsmail vd., 2024; Mert vd., 2020).

Kapsülleme tekniği, sıvı fazdaki FDM'yi katı bir kabuk içinde tutarak hem sızıntıyı önler hem de malzemeyi olumsuz dış

etkenlerden korur (Kayabaşı & Kaya, 2019). Silika kaplamalı mikro kapsüllerin, kontrol grubuna kıyasla termal bozunmanın başlangıç sıcaklığında 50°C'lik bir gecikme sağladığı tespit edilmiştir (İsmail vd., 2024). Diğer yandan titanyum dioksit nanotüp yüklü yapılar, geniş yüzey alanları sayesinde dumanı adsorbe etmekte ve kütle transferi üzerinde engelleyici bir bariyer oluşturmaktadır. Bu yöntemle maksimum ısı açığa çıkma oranı değerinde %41,3'lük bir iyileşme elde edilmiştir (Zeng vd., 2025). Tablo 1'de üretim tekniklerine göre malzemelerin sergiledikleri yangın performansları özetlenmiştir.

Tablo 1 FDM üretim mekanizmalarının malzemenin yangın davranışı üzerindeki etkisi

Üretim Tekniği	Mekanizma	Yangın Davranışı
Doğrudan karıştırma	Kimyasal Müdahale	Parafin maksimum ısı salım oranı ~600 W/g ¹
Daldırma	Fiziksel Bariyer	2,5 mm alçı katmanı ile tam koruma ²
Formca Kararlı	Karbonlaşma ve Yalıtım	En küçük ısı salım hızı değerleri ³
Mikro kapsülleme	Katalitik Kömürleşme	Toplam ısı yayılımında %34,4 azalma ⁴
	Termal Geciktirme	Bozunma başlangıcında 50°C gecikme ⁵

Kaynak: ¹Palacios vd., 2018a; ²Serrano vd., 2016; ³Zhang vd., 2025; ⁴Li vd., 2025; ⁵İsmail vd., 2024

Termal ve Fiziksel Özellikler

Malzemelerin gizli ısı depolama kapasitesi, özgül ısı kapasitesi ve faz değişim sıcaklığı, sistemin enerji verimliliğini doğrudan belirleyen en temel termodinamik parametrelerdir (Yılmazbilek, 2022). Bununla birlikte, malzemenin termal kararlılığını ve yangın sırasındaki bozunma kinetiğini etkileyen erime entalpisi, döngüsel tekrarlanabilirlik ve hacimsel değişim oranları gibi fiziksel özellikler, uzun vadeli güvenlik açısından kritik

bir role sahiptir (Cunha & Aguiar, 2019). Özellikle parafinlerin katı-sıvı geçişleri boyunca faz ayrımı belirtisi göstermemeleri ve düşük buhar basıncına sahip olmaları, operasyonel süreçlerde yüksek tekrarlanabilirlik sağlasa da bu organik yapıların termal bozunma karakteristiklerinin yangın güvenlik analizlerinde dikkatle değerlendirilmesi gerekir (Arı, 2022). Özellikle, bu tür FDM'nin erime noktasındaki hacimsel genişlemeleri ve sızdırma eğilimleri, sıvı fazda biriktikleri durumlarda yangın esnasında yakıt kaynağı oluşturma riski taşımaktadır (Mert vd., 2020; Kaba vd., 2021).

Organik bazlı FDM'lerin doğasında bulunan düşük ısı iletkenlik, sistemin verimliliğini olumsuz etkilemektedir (Ülker vd., 2020). Bu kısıtlamayı aşmak adına, ısı iletkenliği artırmak için karbon esaslı nanoparçacıklar veya metalik yapılarla modifikasyonlar gerçekleştirilmesi, sistemin termal yanıt sürelerini optimize etmek için kritik bir gereklilik olarak görülebilmektedir (Mert vd., 2018). Ancak, iletkenlik artırıcı bu katkı maddelerinin, malzemenin tutuşma sıcaklığını düşürmesi veya yanma hızını artırması gibi olumsuz etkileri bulunabilmektedir (Genç, 2025).

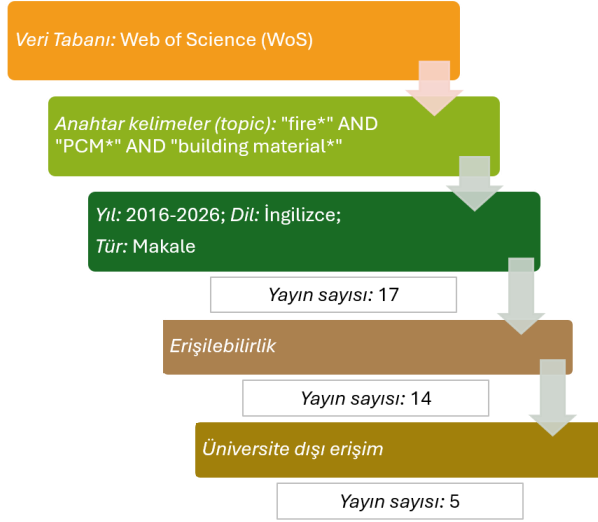
Faz değişimi esnasında depolanan yüksek entalpi değerleri, malzemenin termal konforu korumadaki kapasitesini belirlerken, bu enerjinin verimli yönetimi için gizli ısı depolama performansının korunması kritik bir gerekliliktir (Dash & Mahanwar, 2021). Bu kapsamda, faz değişim sıcaklığının hedeflenen uygulama aralığıyla tam uyum içerisinde seçilmelidir (Huang vd., 2021). Bu bağlamda katkı maddelerinin, alev geciktirici ya da yanma sırasında karbonlaşmış bir koruyucu katman oluşturacak özellikte olması, yangın riskini doğrudan azaltmaktadır (Liang vd., 2025).

Mevcut Durum Analizi

Bilimsel alanda her gün yeni teknolojiler keşfedilmekte ve güncel sorunlara dair çözüm önerileri getirilmektedir. Derleme çalışmalar bu tür çözüm önerilerinin ve keşiflerin bir arada sunulması ve tartışılması bakımından değerlidir. Bu çalışmada, FDM'nin yangın performansına dayanan deneysel çalışmalar incelenmiş olup, konuya dair güncel yaklaşımlar ve geliştirilen yöntemler malzeme özellikleri kapsamında ele alınmıştır. Bunun için literatürde yangın-FDM ikilisine yönelik çalışmaların mevcut durumu analiz edilmiştir.

Deneysel çalışmalar WoS veri tabanında “fire*” AND “PCM*” AND “building material*” anahtar kelimeleri kullanılarak taranmıştır. Güncel literatüre hâkim olabilmek için 2016-2026 aralığında yayınlanan ve İngilizce dilinde yazılan makaleler tercih edilmiştir. Belirlenen bu kriterler doğrultusunda 17 çalışmaya erişilebilmiştir. Bunlardan 14'ü araştırmacıların bağlı oldukları kurum olan Karabük Üniversitesi bünyesinde yapılan anlaşmalar neticesinde erişilebilir durumdadır. Ancak “açık erişim” adı altında tekrar tarama yapıldığında çalışma sayısı 5'e düşmektedir. Bu durum konu ile ilgili yapılan çalışmaların son dönem çalışmalarının kısıtlı sayıda olduğuna işaret etmektedir (Şekil 4).

Şekil 4 Deneysel çalışmaların veri tabanında taranma süreci



Araştırmacılar tarafından erişilebilir durumdaki 14 çalışma, FDM ve yapı malzemesi türlerine göre Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2 Yangın performansı çalışılan FDM’ye ait WoS veri tabanında bulunan deneysel çalışmalar

Kaynak	Erişilebilirlik	FDM/Malzeme Türü
Haurie vd. (2016)	Açık erişim	Mikrokapsüllenmiş parafin FDM içeren harçlar
Zhao vd. (2022)	Kurumsal erişim	Oktadesilamin bazlı FDM
Zeng vd. (2025)	Kurumsal erişim	Titanyum dioksit nanotüpler ile enkapsüle edilmiş organik FDM
Serrano vd. (2016)	Açık erişim	Mikrokapsüllenmiş, emdirilmiş ve süspansiyonlu yöntemlerle hazırlanmış %10 parafin FDM içeren alçı
Gnanachelvam vd. (2022)	Kurumsal erişim	Alçı panel, FDM içeren alçı panel, magnezyum sülfat levhası, fiber çimento levha, selüloz yalıtım, vakumlu yalıtım paneli, mikrokapsüllü parafin FDM, biyo-bazlı FDM
Palacios vd. (2018a)	Açık erişim	Parafin ve yağ asitleri

Liang vd. (2025)	Kapalı erişim	Polietilen glikol (PEG)
Yin vd. (2022)	Açık erişim	Polietilen glikol (PEG)
Zhang vd. (2025)	Kurumsal erişim	Kompozit aerogel destekli ve n-oktadekan FDM
Duan vd. (2025)	Kapalı erişim	Nanoyapılı lignoselüloz köpük tabanlı FDM
Li vd. (2025)	Kurumsal erişim	Kapsüllenmiş n-oktadekan FDM içeren sert poliüretan köpük
Alkhazaleh, (2021)	Kapalı erişim	İzopropil palmitat FDM içerikli alçıpanel
Ismail vd. (2024)	Açık erişim	Mikrokapsüllü FDM eklenmiş çimento esaslı harç
Mohaine vd. (2016)	Kurumsal erişim	Mikrokapsüllü FDM içeren beton kompozitler

Yöntem

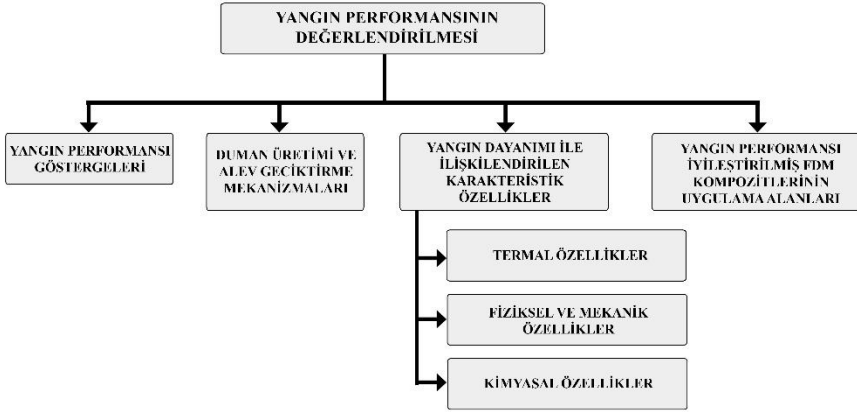
Bu çalışma, FDM'nin yapı malzemeleri bağlamındaki yangın performansını ve bu performansla ilişkili karakteristik malzeme özelliklerini değerlendirmeye yönelik nitel bir literatür incelemesi olarak tasarlanmıştır. Araştırmada, FDM'nin yalnızca enerji verimliliği ve ısı depolama kapasitesi üzerinden değil; yanıcılık, ısı salımı, duman üretimi, termal kararlılık, sızıntı davranışı ve alev geciktirici katkılarla gösterdiği performans değişimleri üzerinden bütüncül biçimde ele alınması amaçlanmıştır. İncelemeye dâhil edilen çalışmalar, FDM içeren yapı malzemelerinin yangın davranışını deneysel olarak ele alması, malzeme üretim veya modifikasyon sürecine ilişkin veri sunması ve yangın performansını ölçülebilir göstergeler üzerinden değerlendirmesi bakımından seçilmiştir. Bu kapsamda yalnızca genel enerji performansına odaklanan, yangın davranışına ilişkin doğrudan deneysel bulgu içermeyen veya yapı malzemesi ölçeğiyle ilişkilendirilemeyen çalışmalar değerlendirme dışında bırakılmıştır.

Elde edilen yayınlar öncelikle FDM türü, üretim tekniği, taşıyıcı matris, katkı veya kapsülleme stratejisi ve önerilen yapı uygulaması açısından sınıflandırılmıştır. Ardından yangın

performansına ilişkin bulgular; tutuşma davranışı, ısı açığa çıkma oranı, maksimum ısı açığa çıkma oranı, toplam ısı salımı, limitli oksijen indeksi, duman üretimi ve termal bozunma eğilimi gibi göstergeler üzerinden karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Böylece farklı FDM kompozitlerinin yangın anındaki davranışları yalnızca tekil deney sonuçları üzerinden değil, malzeme bileşimi ve üretim yöntemiyle ilişkili olarak yorumlanmıştır. Analiz sürecinde ayrıca yangın güvenliğini artırmaya yönelik stratejilerin malzemenin temel termofiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda alev geciktirici katkıların erime entalpisi, ısı iletkenlik, kristalinite, mekanik dayanım, kimyasal uyum ve döngüsel kararlılık üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiştir. Böylece yangın performansındaki iyileşmenin, FDM'nin enerji depolama işlevini zayıflatıp zayıflatmadığı veya yapı malzemesi olarak kullanım potansiyelini nasıl etkilediği tartışılmıştır.

Son aşamada, incelenen çalışmaların bulguları yapı malzemesi ve bina bileşeni ölçeğinde yorumlanmıştır. Bu kapsamda FDM içeren kompozitlerin çimentolu sistemler, alçı esaslı levhalar, yalıtım malzemeleri, kaplamalar ve çok katmanlı yapı bileşenlerinde kullanım olanakları değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler, FDM'nin yapı sektöründe güvenli biçimde kullanılabilmesi için yangın performansı ile termal verimlilik arasında kurulması gereken dengeyi ortaya koyacak şekilde sentezlenmiştir (Şekil 5).

Şekil 5. Yönteme ait akış şeması



Yangın Performansı Değerlendirmesi

Yapı malzemesine FDM katılması, malzemenin yanıcılık özelliklerini düşürebilmektedir. Haurie vd., (2016) tarafından yürütülen bir çalışmada, mikro kapsüllenmiş parafin içeren çimento harçların FDM oranlarının %10 olduğu durumda, malzemenin yanma esnasında ısı kaynağından uzaklaştığında kendiliğinden söndüğü ancak FDM oranı %20'yi bulduğunda alevlerin yayılma hızının ciddi oranda arttığı tespit edilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Schiff bazı içeren FDM katkısı ile kısa süreli yangınlarda kompozit ahşap plastik esaslı yapı malzemesinin yangın dayanımının iyileştirilebildiği tespit edilmiştir (Zhao vd., 2022) (Şekil 6). Yanıcılık özelliklerinin yüksek olması sadece yangın güvenliği açısından değerlendirilmemelidir, nitekim FDM'nin termal performansı da bu durumdan doğrudan etkilenebilmektedir.

başvurulan polimetil metakrilat (PMMA) yerine melamin-formaldehit kullanımının FDM'nin yangın direncini iyileştirdiği belirtilmiştir (Mohaine vd., 2016).

Yangın Performansı Göstergeleri

Tutuşma gecikmesi, ısı akısı miktarı ve pik ısı açığa çıkma oranı, malzemenin yangın performansını karakterize eden en temel parametreler arasında yer almaktadır. FDM'nin yangın davranışı; ısı yayılım hızı (HRR), tepe ısı yayılım hızı (pHRR), toplam ısı salımı (THR) ve limitli oksijen indeksi (LOI) gibi göstergeler üzerinden analiz edilmektedir. LOI'nin düşük olması malzemenin zor tutuştuğunun ve yangın direncinin yüksek olduğunun bir göstergesi olup ortamdaki minimum oksijen cinsini % cinsinden ifade eder. Saf organik FDM, yüksek yanıcılıkları nedeniyle ciddi riskler taşımaktadır. Örneğin, parafin bazlı FDM'nin pHRR değerleri 600 W/g civarındayken, yağ asidi ötektik karışımlarının 466-583 W/g olduğu rapor edilmiştir (Palacios vd., 2018a).

Alev geciktirici stratejiler, bu tür yangın indekslerinde şu iyileşmeleri sağlamaktadır:

- Amonyum Polifosfat (APP) Uygulamaları: %30 oranında şişen alev geciktirici APP yüklemesi, pHRR değerini %88,6 oranında düşürmekte ve LOI değerini %32,8 seviyesine yükseltmektedir. Buna karşın, %15 APP yüklemesi ile LOI değeri %21,6'dan %28,7'ye çıkarılabilmekte, pHRR ise %36 düşürebilmektedir (Yin vd., 2022).
- Nanotüp Uygulamaları: Nanotüp bazlı epoksi kaplamalar, pHRR değerini %41,3 oranında iyileştirebilmekte ve THR değerini %21,4 oranında azaltabilmektedir (Zeng vd., 2025).
- Metal Çerçevesiz Mikro Kapsüller: Sert poliüretan köpük matrisine %7 oranında Prusya Mavisi Analogları (PBA)

eklenmesi; pHRR deęerini yaklaşık %31; THR deęerini ise %42,8 dūřürmüřtür. Bu uygulamalarda LOI deęeri %26,5'e ulaşmaktadır (Li vd., 2025). Bu deęer malzemenin kolayca tutuřmayan, dūřük yanıcılık deęere sahip olduęunu göstermektedir.

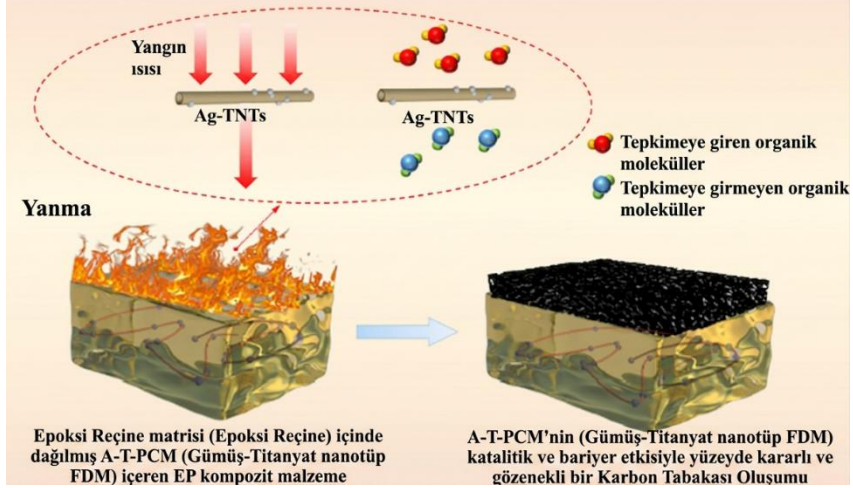
Duman Üretimi ve Alev Geciktirme Mekanizmaları

Malzemelerin yangın performansını iyileştirmek için kullanılan alev geciktirici sistemler, etki mekanizmalarına göre genel olarak gaz fazı ve yoğun faz olmak üzere iki temel kategoriye ayrılmaktadır. Alev geciktiriciler, yanma sürecine fiziksel veya kimyasal süreçlerle müdahale ederek süreci yavaşlatır veya tamamen durdurur (Palacios vd., 2018a). FDM'nin yangın güvenliğini iyileştirmek için geliştirilen stratejiler, malzemenin matris içindeki yerleşiminden yüzey koruma tekniklerine kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Yapısal uygulamalarda pasif koruma sağlayan çok katmanlı sistemler etkili bir stratejidir. Bu stratejiler şu şekilde tanımlanabilir:

- Mikro kapsülleme: Epoksi matrisli yapılarda mikro kapsüllü FDM kullanımı 23,83 m² toplam duman üretimi değerine neden olurken, nanotüp katkısı bu değer %33,3 oranında azalmaktadır (Zeng vd., 2025). Benzer şekilde, %5 melamin-formaldehit kabuğunun PBA ile kaplanmasıyla oluşturulan FDM kullanımı, toplam duman üretimi (TSP) değerini saf poliüretan köpüğe kıyasla %46,7 oranında azaltmakta ve toplam karbonmonoksit üretimini dūřürmektedir (Li vd., 2025). Ayrıca, 500 saniye süren sürekli ısıtma testlerinde numunelerin merkez sıcaklığının katkısız örneklere kıyasla 20°C daha dūřük kaldığı saptanmıştır (Li vd., 2025).
- Titanyum dioksit ve gümüş destekli nanotüpler: Geniş yüzey alanları ve tübüler yapıları sayesinde dumanı adsorbe ederek

bir bariyer görevi görmektedir (Zeng vd., 2025). Nano-parçacıkların entegrasyonu, karbonlaşma sürecini katalize ederek (Li vd., 2025; Zeng vd., 2025) daha stabil ve yoğun bir kömür tabakası oluşturur (Şekil 7).

Şekil 7. A-T-FDM'nin alev geciktirme mekanizması

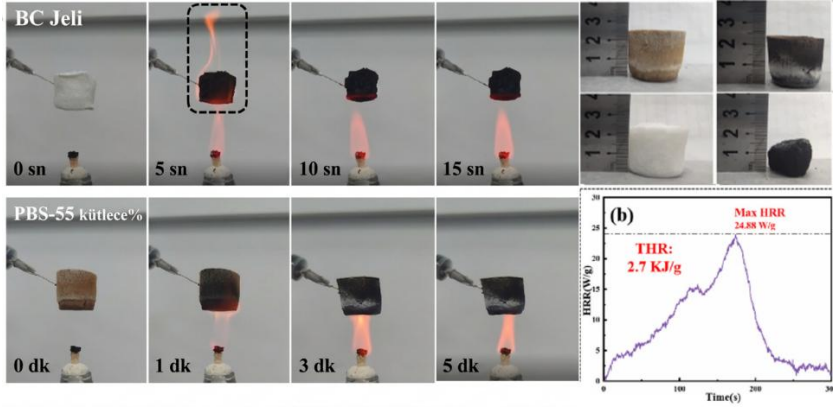


Kaynak: Zeng vd., 2025'ten uyarlanmıştır

- Metal hidroksitler: Magnezyum hidroksit ve alüminyum hidroksit gibi metal hidroksitler, özellikle yağ asidi bazlı FDM karışımlarında yangın performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Faraj vd., 2020). Bu maddeler, yanma sırasında su açığa çıkararak hem soğutucu hem de seyreltici bir etki gösterir (Palacios vd., 2018a). Metal oksitler, karbon matrisi içerisinde katalitik bileşenler olarak görev yaparak ısı yalıtımı güçlendirir ve duman salımını baskılar (Li vd., 2025). Bu tür endotermik alev geciktiriciler, yanma sıcaklık aralığında endotermik ayrışmaya uğrayarak ortamdan ısı çekerler (Palacios vd., 2018a). Bu süreçte açığa çıkan su buharı veya CO₂, seyreltme etkisi yaratarak yanmayı engeller.

- Amonyak ve azot gazları: Halojenli alev geciktiriciler gibi maddeler, yanma sırasında açığa çıkan serbest radikallerle etkileşime girerek serbest radikal zincirleme reaksiyonlarını bozar (Palacios vd., 2018a). Melamin bazlı kapsül yapılarının ayrışmasıyla açığa çıkan amonyak ve azot gazları, ortamdaki yanıcı gazları seyrelterek alev sıcaklığını düşürür (Li vd., 2025). Amonyaktan türetilen NH_2 radikalleri, H ve OH gibi reaktif ara ürünleri temizleyerek yanma zincirleme reaksiyonlarını bozabilmektedir (Li vd., 2025).
- Karbonlaşma: Silika aerjel tabanlı kompozitler, yanma sırasında yüzeyde bütünleşik bir karbon tabakası oluşturarak alevin iç katmanlara yayılımını ve hacimsel küçülmeyi engeller (Zhang vd., 2025) (Şekil 8). Bunun yanı sıra PBA gibi katkılar, metal oksit içeren katalitik bir karbon matrisi oluşturarak ısı yalıtımı güçlendirirken (Li vd., 2025); nanotüpler ve gümüş nanoparçacıklar ise epoksi reçinelerin dehidrasyonunu hızlandırarak daha kararlı bir kömür tabakası oluşturur (Zeng vd., 2025). APP, özellikle karbonlaşmayı teşvik edici özelliğiyle öne çıkan bir alev geciktiricidir (Palacios vd., 2018a). Şişen sistemler; bir karbon kaynağı, bir asit kaynağı ve bir köpürtücü ajanın sinerjik kombinasyonundan oluşur (Palacios vd., 2018a). Bu sistemler, yanma anında genişlerken yalıtkan bir karbon tabakası oluşturur ve bu tabaka ısı ve oksijen transferini fiziksel bir bariyerle engeller (Palacios vd., 2018a; Yin vd., 2022).

Şekil 8. Polimid, bakteriyel selüloz nanofiber ve silisyum dioksit (SiO₂)'ten oluşan PBS'nin alev geciktirme performansı



Kaynak: Zhang vd., 2025'ten uyarlanmıştır

Yangın Dayanımı ile İlişkilendirilen Karakteristik Özellikler

Yangın dayanımı ve alev geciktirici özelliklerin kazandırılması amacıyla kullanılan katkı maddeleri, malzemenin fiziksel, termal, kimyasal ve mekanik özelliklerinde çeşitli değişimlere yol açabilmektedir. Bu nedenle tüm bu özelliklerin bütüncül olarak ele alınması gerekmektedir. Alev geciktirici katkı maddelerinin entegrasyonu, FDM'nin yangın güvenliğini artırırken aynı zamanda temel termodinamik ve yapısal parametrelerinde de belirgin değişimlere yol açmaktadır.

Termal Özellikler Üzerindeki Etkiler

Katkı maddelerinin malzeme matrisine eklenmesi, genellikle aktif faz değiştiren madde miktarını azalttığı için erime entalpisinde düşüşe neden olmaktadır. Örneğin, %15 oranında APP yüklemesi yapılan bir FDM kompozitinde gizli ısı miktarının azaldığı, ancak malzemenin hala 70 J/g üzerinde erime entalpisine sahip olduğu rapor edilmiştir (Yin vd., 2022). Diğer yandan, katkının türüne göre

ısı iletkenlik farklı yönlerde değişebilir. Grafit gibi karbon esaslı nanoparçacıklar (Palacios vd., 2018b) veya bir boyutlu nanotüplerin kullanımı, malzeme içinde sürekli ısı iletim yolları oluşturarak ısı iletkenliği önemli ölçüde artırır (Zeng vd., 2025). Zeng vd., (2025) tarafından yapılan çalışmada, nanotüp katkısının ısı iletkenliği saf parafine kıyasla 5 kata kadar saptanmıştır. Öte yandan, polimerik kabuklarla yapılan mikro kapsülleme, polimerin düşük iletim özelliği nedeniyle kompozitin genel ısı iletkenliğini düşürebilmektedir (Serrano vd., 2016). Ayrıca alev geciktirici mekanizmalar, malzemenin termal bozunma başlangıcını geciktirerek termal kararlılığı artırabilmektedir (Ismail vd., 2024).

Fiziksel ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkiler

Yangın dayanımını artırmaya yönelik eklenen katkı maddeleri, FDM moleküllerinin düzenli dizilimini etkileyerek kristalinite oranlarını düşürebilir. Yin vd., (2022) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmaya göre, APP yüklemesi yapılmamış bir FDM'de %65 civarında olan kristalinite oranı, %15 APP ilavesiyle %60 seviyesine gerilemektedir. Ayrıca, silika kaplı mikro kapsüller çimentolu sistemlerde kalsiyum silikat hidrat jeli oluşumunu teşvik ederek mekanik mukavemeti artırır (Ismail vd., 2024). Yapılan testlerde silika kaplamanın, mikro kapsül eklenmiş harçların mukavemetini %11 ile %28,3 oranlarında iyileştirdiği gözlemlenmiştir (Ismail vd., 2024).

Kimyasal Özellikler Üzerindeki Etkiler

Malzemenin uzun süreli performansı, alev geciktirici katkıların FDM ve ana matris ile arasındaki kimyasal uyuma bağlıdır. Alev geciktirici katkıların FDM hacmi içinde homojen bir şekilde dağılması ve dispersiyon kalitesi hem yangın performansı hem de termofiziksel özelliklerin korunması açısından kritiktir (Palacios vd., 2018a). Ayrıca, mikro kapsüllerin yüzeylerinin PBA

gibi maddelerle modifiye edilmesi, katkı maddesinin polimer matris içindeki dağılımını ve arayüzey etkileşimlerini iyileştirir (Li vd., 2025).

Yangın Performansı İyileştirilmiş FDM Kompozitlerinin Uygulama Alanları

Yangın direnci çeşitli yöntemlerle iyileştirilen FDM'nin yapıda kullanımlarının yaygınlaştırılabilmesi için hangi malzeme ve bileşenlerde kullanılabileceğinin iyi irdelenmesi gerekir. Bu bölümde taranan makalelerde üretilen kompozit FDM'lerin yapısal özelliklerine, bünyesine katıldıkları yapı malzemesinin türüne ve sergiledikleri performansa göre yapılarda kullanım alanları değerlendirilmiştir.

Silika kaplama, mikro kapsüllerin çimento matrisi içindeki sızıntısını önlerken kalsiyum silikat hidrat jeli oluşumunu teşvik etmekte olup, bu sayede %30'a varan hacimsel değişimlerde dahi yapısal bütünlüğü koruyarak betonarme elemanlarda kullanımına imkân tanır (Ismail vd., 2024). Diğer yandan, alçı levhalarda FDM kullanımı, yangın riskini artırsa da 2,5 mm kalınlığında saf alçıdan oluşan bir yangın bariyeri kaplaması, malzemenin iç kaplama olarak güvenle kullanılmasına olanak sağlayabilmektedir (Serrano vd., 2016). Katkı maddeleri arasında bahsi geçen PBA modifikasyonu, köpük matrisinin yanma sırasında katalitik olarak kömürleşmesini sağladığından, yalıtım levhalarında kullanıldığında yangın anındaki duman ve ısı salımını önemli ölçüde düşürür (Li vd., 2025). Aerojel yapılar, organik FDM'yi paketleyerek alevin iç katmanlara yayılımını fiziksel olarak engeller ve yeşil bina inşaatlarında ısı yönetimi sağlar (Zhang vd., 2025). Nanotüp katkısı, epoksi matrisin termal iletkenliğini artırarak ısının mikro kapsüllere daha hızlı iletilmesini sağlar ve yüzey kaplaması olarak kullanıldığında binanın ısıl konforunu artırır (Zeng vd., 2025). Literatürde yer alan ve yangın performansı çeşitli stratejilerle iyileştirilmiş FDM'nin entegre

edildiği matrisler ve bu kompozitlerin önerilen uygulama alanları Tablo 3'te detaylandırılmıştır.

Tablo 3. Yangın direnci artırılan FDM'nin yapıda önerilen kullanım alanları

FDM Teknolojisi ve Katkı Stratejisi	Yapı Malzemesi	Önerilen Bina Bileşeni ve Uygulama Alanı
Melamin-formaldehit kabuğunun üzerinin PBA ile kaplanması	Sert Poliüretan Köpük	Isı Yalıtım Levhaları: Enerji verimli ve yangın emniyetli bina ısı yalıtım malzemeleri ¹
Biyo-ilhamlı silika kaplamaya sahip inorganik kabuklu kapsüller	Çimentolu Kompozitler ve Harçlar	Yapısal Elemanlar ve Yüzeyler: Beton, harç, sıva, çatı ve yer karoları, akustik duvarlar ve alçıpanlar ²
FDM içeren çekirdek üzerine uygulanan ince koruyucu tabaka	Alçı Matrisli Levhalar	İç Yüzey Kaplamaları: Bina kabuğunun iç yüzeylerinde kullanılan ısı depolama özellikli alçı paneller veya sıvalar ³
Gümüş destekli titanyum dioksit yüklü tübüler yapılar	Epoksi Reçine	Kaplamalar: Bina malzemelerinin yüzeylerine uygulanan, sıcaklık düzenleyici ve anti-mikrobiyal fonksiyonlu koruyucu kaplamalar ⁴
Silika aerojel tabanlı yapılar	Kompozit Matris	Yüksek Performanslı Yalıtım: Yeşil ve enerji tasarruflu binalarda kullanılan, basınç dayanımı yüksek ısı yalıtım ve yangın koruma bileşenleri ⁵

Kaynak: ¹ Li vd., 2025; ² Ismail vd., 2024; ³ Serrano vd., 2016; ⁴ Zeng vd., 2025; ⁵ Zhang vd., 2025

Tartışma

FDM'nin yapı malzemesi olarak kullanımı, enerji verimliliği ile yangın güvenliği arasında çok katmanlı bir değerlendirme alanı oluşturmaktadır. Literatürde FDM çoğunlukla gizli ısı depolama kapasitesi, faz değişim sıcaklığı ve termal konfor üzerindeki katkıları bakımından ele alınmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında incelenen bulgular, yapı uygulamaları açısından asıl meselenin yalnızca ısı performans artışı olmadığını göstermektedir. FDM'nin yapı malzemesine entegrasyonu, aynı zamanda yangıcılık, duman üretimi, sızıntı, termal bozunma, mekanik dayanım ve uzun

sürekli kararlılık gibi güvenlik odaklı parametreleri de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle FDM uygulamalarında enerji kazancı ile yangın riski arasında doğrusal ve tek yönlü bir ilişki kurulması yeterli değildir.

Özellikle organik esaslı FDM bu tartışmanın merkezinde yer almaktadır. Parafinler ve yağ asidi bazlı malzemeler gibi organik FDM türleri; uygun faz değişim sıcaklığı, yüksek gizli ısı kapasitesi ve kimyasal kararlılık gibi nedenlerle yapı sektöründe cazip seçeneklerdir. Buna karşın bu malzemelerin yüksek yanıcılık potansiyeli, yapı bileşenleri içinde ek yakıt yükü oluşturabilmektedir. Bu durum, FDM'nin enerji verimliliği sağlayan pasif bir malzeme olarak değil, yangın anında aktif risk üretebilen bir bileşen olarak da değerlendirilmesini gerektirmektedir. Dolayısıyla organik FDM'lerin yapı uygulamalarındaki potansiyeli, ancak yangın güvenliğiyle birlikte ele alındığında gerçekçi biçimde yorumlanabilir.

Bu noktada yangın performansı göstergelerinin yorumlanması kritik önem taşımaktadır. HRR, pHRR, THR, LOI, duman üretimi, kütle kaybı ve termal bozunma sıcaklığı gibi parametreler, FDM içeren malzemelerin yangın sırasındaki davranışını farklı yönleriyle açıklamaktadır. Ancak bu göstergelerin her biri tek başına yeterli değildir. Örneğin pHRR değerindeki düşüş, yangın büyüme hızının sınırlandığını gösterebilir; ancak aynı malzemenin duman üretimi, toksik gaz salımı veya mekanik bütünlüğü hakkında doğrudan bilgi vermez. Bu nedenle FDM kompozitlerinde yangın performansının çok ölçütlü biçimde incelenmesi gerekmektedir.

İncelenen çalışmalar, alev geciktirici stratejilerin FDM'nin yangın performansını iyileştirme açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. APP gibi şişen alev geciktiriciler, metal hidroksitler, PBA katkıları, melamin-formaldehit kabuklar, nanotüp destekli sistemler, silika aerojel yapılar ve mikro/makro kapsülleme

teknikleri farklı mekanizmalar üzerinden yangın davranışına müdahale etmektedir. Bu stratejiler genel olarak şu etkiler üzerinden değerlendirilebilir:

Yanıcı gazların salımını geciktirme veya seyreltme,
Isı ve oksijen transferini sınırlandırma,
Malzeme yüzeyinde koruyucu karbon tabakası oluşturma,
Duman üretimini azaltma,
FDM'nin sıvı fazda dışarı sızmasını engelleme,
Termal bozunma başlangıcını geciktirme.

Bununla birlikte, bu stratejilerin başarisı kullanılan katkının türüne, oranına, FDM'nin kimyasal yapısına, kapsül kabuğunun özelliklerine ve taşıyıcı matrisle kurduğu ilişkiye bağlıdır. Bu nedenle bir çalışmada olumlu sonuç veren alev geciktirici yaklaşımın farklı bir yapı malzemesine doğrudan aktarılabilceğı varsayılmamalıdır. Örneğın epoksi kaplama içinde etkili olan nanotüp katkısı, alçı levha veya poliüretan köpük içinde aynı düzeyde performans göstermeyebilir. Benzer biçimde çimentolu kompozitlerde sızıntıyı ve mekanik kaybı sınırlayan bir kapsülleme sistemi, polimer esaslı bir yalıtım malzemesinde farklı yangın davranışları doğurabilir.

Kapsülleme teknikleri yangın davranışı açısından önemli bir örnek oluşturmaktadır. Mikro ve makro kapsülleme, FDM'nin faz değişimi sırasında ortaya çıkan sızıntı ve hacimsel değişim problemlerini azaltırken, aynı zamanda yangın sırasında uçucu bileşenlerin salımını geciktiren bir bariyer etkisi de sağlayabilmektedir. Ancak kapsülleme sistemlerinin kendisi de eleştirel biçimde değerlendirilmelidir. Kapsül kabuğunun kimyasal yapısı, yüksek sıcaklık altındaki dayanımı, matrisle uyumu ve tekrarlı faz değişim döngülerindeki kararlılığı malzemenin toplam performansını belirlemektedir. Yanıcı bir kabuk malzemesiyle oluşturulan kapsülleme, sızıntıyı azaltmasına rağmen yangın performansı açısından yeni bir zayıflık oluşturabilir. Bu nedenle

kapsülleme yalnızca mekanik bir çözüm olarak değil, yangın güvenliği tasarımının parçası olarak ele alınmalıdır.

Çalışmada ele alınan yapı malzemeleri, FDM'nin yangın performansının uygulama alanına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Alçı esaslı levhalar, çimentolu harçlar, poliüretan köpükler, epoksi kaplamalar ve aerjel tabanlı kompozitler aynı yangın güvenliği düzeyinde değerlendirilemez. Her bir matrisin yangın karşısındaki davranışı, FDM'nin etkisini farklılaştırmaktadır. Alçı esaslı sistemlerde koruyucu tabaka ve pasif bariyer etkisi belirleyici olurken, poliüretan köpüklerde matrisin kendi yanıcılığı nedeniyle daha güçlü alev geciktirici sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çimentolu kompozitlerde inorganik yapı yangın güvenliği açısından avantaj sağlasa da kapsül dayanımı, mekanik mukavemet ve hacimsel kararlılık ayrıca incelenmelidir. Aerjel tabanlı sistemler ise ısı yalıtımı ve yangın koruma açısından umut verici olmakla birlikte, maliyet, üretilebilirlik ve uzun dönemli dayanım açısından daha fazla doğrulamaya ihtiyaç duymaktadır.

Bu noktada mevcut literatürün bazı sınırlılıkları da dikkate alınmalıdır. Çalışma kapsamında ulaşılan yayın sayısının sınırlı olması, FDM'nin yangın performansına yönelik araştırmaların henüz gelişmekte olan bir alan olduğunu göstermektedir. Ayrıca çalışmaların önemli bir kısmı malzeme ölçeğinde gerçekleştirilmiş deneylere dayanmaktadır. Bu deneyler, FDM kompozitlerinin temel yanma davranışını anlamak açısından değerli olsa da gerçek yapı bileşeni ölçeğindeki yangın senaryolarını tümüyle temsil etmeyebilir. Bir yapı malzemesinin laboratuvar ortamında düşük pHRR veya düşük THR değeri göstermesi, aynı malzemenin çok katmanlı yapı kabuğu, iç kaplama veya yalıtım sistemi içinde aynı güvenlik düzeyini sağlayacağı anlamına gelmemektedir.

Bu nedenle FDM içeren yapı malzemeleri değerlendirilirken şu soruların daha fazla öne çıkarılması gerekmektedir:

Malzeme yalnızca laboratuvar numunesi olarak mı, yoksa gerçek yapı bileşeni olarak mı test edilmiştir?

Malzemenin yangın performansı, termal döngü ve yaşlanma sonrasında da korunmakta mıdır?

Alev geciktirici katkı, FDM'nin gizli ısı depolama kapasitesini ne ölçüde etkilemektedir?

Kapsül kabuğu yüksek sıcaklıkta bütünlüğünü koruyabilmekte midir?

Duman üretimi ve gaz salımı, kullanıcı güvenliği açısından kabul edilebilir düzeyde midir?

Bu sorular, FDM araştırmalarının yalnızca malzeme geliştirme ekseninde değil, yapı güvenliği ve performans tasarımı ekseninde de ilerlemesi gerektiğini göstermektedir. Özellikle yapı uygulamalarında FDM'nin konumu, miktarı, kapsülleme türü, taşıyıcı matrisin yanıcılığı, çevresindeki malzemeler ve yangına maruz kalma biçimi birlikte değerlendirilmelidir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, FDM'nin yapı sektöründeki geleceği yalnızca daha yüksek ısı depolama kapasitesine sahip malzemelerin geliştirilmesine bağlı değildir. Asıl ihtiyaç, enerji performansı, yangın güvenliği, duman kontrolü, sızıntı dayanımı, mekanik kararlılık ve uzun dönemli kullanım performansını birlikte ele alan bütüncül bir değerlendirme yaklaşımıdır. Bu nedenle gelecek çalışmaların malzeme ölçeğinden yapı bileşeni ölçeğine ilerlemesi; farklı FDM türleri, farklı matrisler ve farklı yangın senaryoları için karşılaştırılabilir deneysel veriler üretmesi önem taşımaktadır.

Sonuç ve Öneriler

Faz değişimi sırasında önemli miktarda ısıyı depolayarak bina iç ortam sıcaklığının dengelenmesine katkı sağlayan FDM, bu yönüyle sürdürülebilir yapı malzemeleri arasında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Ancak özellikle saf organik FDM'nin yüksek yanıcılık eğilimi, yapı malzemesi olarak kullanımlarında yangın güvenliği açısından dikkatli bir değerlendirme yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Parafin, yağ asidi esaslı ötektik karışımlar ve PEG gibi organik FDM türleri; uygun faz değişim sıcaklığı, yüksek gizli ısı kapasitesi ve kimyasal kararlılık gibi avantajlara sahiptir. Buna karşın kolay tutuşma, yüksek ısı açığa çıkarma, alev yayılımını destekleme ve duman oluşumuna katkı sağlama gibi özellikler, bu malzemelerin yangın güvenliği açısından riskli bir grupta değerlendirilmesine neden olmaktadır. Bu nedenle organik FDM'nin yapı uygulamalarında doğrudan kullanımının sınırlı olduğu görülmektedir. Yapı bileşenlerinde kullanılan FDM, yalnızca enerji verimliliği kazancı üzerinden değil, yangın anında oluşturabileceği ek yakıt yükü üzerinden de değerlendirilmelidir.

Bu çalışma, FDM'nin yapı sektöründeki kullanımının yalnızca enerji verimliliği, ısıl konfor ve gizli ısı depolama kapasitesi üzerinden değerlendirilemeyeceğini; yangın performansı, malzeme kararlılığı ve özellikleri ile malzeme ve bina bileşeni özelinde kullanılabilecek uygulama alanları da hesaba katılarak irdelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Çalışmada ulaşılan temel sonuçlardan biri, FDM'nin yangın davranışının tek bir parametreyle açıklanamayacağıdır. Tutuşma gecikmesi, ısı akısı miktarı, ısı yayılım hızı, tepe ısı yayılım hızı, toplam ısı salımı, limit oksijen indeksi, duman üretimi ve termal bozunma davranışı birlikte değerlendirildiğinde malzemenin yangın anındaki gerçek performansı daha doğru biçimde yorumlanabilmektedir. Bu nedenle FDM içeren yapı malzemelerinde yalnızca malzemenin tutuşup tutuşmadığına değil,

yangın sürecine ne ölçüde katkı verdiğine de bakılması gerekmektedir. Bu bağlamda yangın performansı değerlendirilirken özellikle şu göstergeler belirleyici olmaktadır:

Tutuşma gecikmesi, malzemenin ısı kaynağına maruz kaldığında yanmaya başlama süresini göstermektedir.

HRR ve pHRR değerleri, yangının büyüme potansiyelini ve malzemenin yangına sağladığı enerji katkısını ortaya koymaktadır.

THR değeri, yangın boyunca açığa çıkan toplam ısı miktarını ifade etmektedir.

LOI değeri, malzemenin yanmayı sürdürebilmesi için ihtiyaç duyduğu minimum oksijen oranını işaret etmektedir.

Duman üretimi ve gaz salımı, yalnızca malzeme performansı açısından değil, kullanıcı güvenliği ve tahliye koşulları açısından da kritik öneme sahiptir.

Termal bozunma ve kütle kaybı, malzemenin yüksek sıcaklık altında yapısal ve kimyasal kararlılığını değerlendirmeye olanak sağlamaktadır.

Çalışmada incelenen literatür, FDM'nin yangın performansını iyileştirmek için farklı alev geciktirici stratejilerin geliştirildiğini göstermektedir. Bu stratejiler, genel olarak yanma sürecine gaz fazında veya yoğun fazda müdahale etmektedir. Gaz fazındaki müdahalelerde yanıcı gazların seyreltilmesi veya serbest radikal zincir reaksiyonlarının baskılanması hedeflenirken; yoğun fazdaki müdahalelerde malzeme yüzeyinde koruyucu bir karbon tabakası, mineral bariyer veya yalıtıcı kabuk oluşturulmaktadır. Bu durum, FDM içeren kompozitlerde yangın güvenliğinin yalnızca katkı maddesi eklenmesiyle değil, katkının hangi mekanizma üzerinden çalıştığının anlaşılmasıyla mümkün olduğunu göstermektedir. Yangın performansını iyileştirmeye yönelik başlıca stratejiler şu şekilde değerlendirilebilir:

Mikro ve makro kapsülleme, FDM'nin sıvı fazda dışarı sızmasını önleyerek yangın sırasında ek yakıt kaynağı oluşturma riskini azaltmaktadır.

İnorganik kabuk sistemleri, FDM çekirdeğini yüksek sıcaklık etkisinden koruyarak termal bozunmayı geciktirebilmektedir.

Melamin-formaldehit gibi kabuk malzemeleri, PMMA gibi daha yanıcı kabuklara kıyasla yangın direncini artırma potansiyeli sunmaktadır.

PBA gibi metal esaslı katkıları, karbonlaşmayı destekleyerek poliüretan köpük gibi yanıcı matrislerde ısı ve duman salımını azaltabilmektedir.

Metal hidroksitler, endotermik ayrışma yoluyla ortamdan ısı çekmekte ve açığa çıkardıkları su buharı sayesinde yanma ortamını seyreltmektedir.

APP gibi şişen alev geciktiriciler, yangın anında genişerek yalıtıcı bir karbon tabakası oluşturmakta ve ısı–oksijen transferini sınırlandırmaktadır.

Titanyum dioksit nanotüpler, gümüş destekli yapılar ve metal oksitler, duman adsorpsiyonu, kütle transferinin sınırlandırılması ve daha kararlı kömür tabakası oluşumu açısından etkili olabilmektedir.

Silika aerogel ve benzeri gözenekli inorganik sistemler, ısı geçişini azaltarak hem termal yalıtım hem de yangın koruma işlevi sağlayabilmektedir.

Bununla birlikte, alev geciktirici stratejilerin etkileri her zaman tek yönlü değildir. Yangın performansını artırmak amacıyla kullanılan katkıları veya kapsülleme sistemleri, FDM'nin temel termofiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirebilmektedir. Örneğin katkı oranının artması, aktif faz değiştiren madde miktarını azaltarak erime entalpisinde düşüşe yol açabilir. Benzer şekilde bazı polimerik kapsül kabukları ısı iletkenliği sınırlarken, karbon esaslı katkıları veya nanotüp sistemleri ısı iletim yolları oluşturarak ısı iletkenliği artırılabilir. Bu nedenle FDM kompozitlerinin başarısı, yalnızca

yangın performansındaki iyileşmeyle değil, aynı zamanda enerji depolama işlevinin korunmasıyla ölçülmelidir.

Termal özellikler açısından değerlendirildiğinde, FDM içeren kompozitlerde erime sıcaklığı, gizli ısı kapasitesi, ısı iletkenlik ve termal kararlılık temel belirleyiciler arasında yer almaktadır. Yangın dayanımını artırmak amacıyla yapılan her müdahale, bu parametreler üzerinde doğrudan veya dolaylı etki oluşturabilmektedir. Bu nedenle geliştirilecek FDM kompozitlerinde yangın güvenliği sağlanırken malzemenin ısı depolama kapasitesinin kabul edilebilir düzeyde korunması gerekmektedir. Aksi durumda yangın performansı iyileşmiş olsa bile malzemenin FDM olarak kullanılma amacı zayıflayabilir.

Fiziksel ve mekanik özellikler bakımından ise sızıntı davranışı, hacimsel kararlılık, gözeneklilik ve basınç dayanımı ön plana çıkmaktadır. Özellikle sıvı faza geçen organik FDM'nin yapı bileşeni içinde kontrolsüz biçimde hareket etmesi, yangın sırasında ek yakıt kaynağı oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle formca kararlı yapıların, kapsüllenmiş sistemlerin ve inorganik destekli matrislerin geliştirilmesi, yalnızca malzeme bütünlüğü açısından değil, yangın güvenliği açısından da önemlidir. Çimentolu kompozitlerde silika kaplama gibi stratejiler hem sızıntının sınırlandırılması hem de mekanik dayanımın korunması açısından dikkate değer bir yaklaşım sunmaktadır.

Kimyasal özellikler bakımından FDM, kapsül kabuğu, alev geciktirici katkı ve taşıyıcı matris arasındaki uyum belirleyici bir faktördür. Katkı maddesinin matris içinde homojen dağılmaması, yangın performansında yerel zayıflıklara neden olabilir. Benzer şekilde kimyasal uyumsuzluk, döngüsel kullanım sırasında faz ayrımı, performans kaybı veya kapsül bozulması gibi sorunlar oluşturabilir. Bu nedenle FDM içeren yapı malzemelerinde yalnızca ilk üretim performansı değil, uzun dönemli kararlılık ve tekrar eden

faz değişim döngüleri sonrasındaki yangın davranışı da değerlendirilmelidir.

Çalışmada ele alınan malzemeler ve yapı bileşenleri, FDM'nin yangın performansının uygulama alanına bağlı olarak değiştiiğini göstermektedir. Aynı FDM türü, alçı esaslı levha, çimentolu harç, poliüretan köpük, epoksi kaplama veya aerojel tabanlı yalıtım sistemi içinde farklı davranışlar sergileyebilmektedir. Bu durum, FDM'nin yapı sektöründe kullanılabilirliğinin yalnızca malzeme türüne göre değil, malzemenin entegre edildiği matris ve bina bileşeni üzerinden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu kapsamda uygulama alanı bakımından şu değerlendirmeler öne çıkmaktadır:

Alçı esaslı levhalarda FDM kullanımı iç yüzeylerde ısı konfor sağlayabilir; ancak yangın güvenliği için koruyucu alçı tabakaları veya bariyer sistemleriyle desteklenmelidir.

Çimentolu kompozitler ve harçlar, inorganik yapıları nedeniyle FDM'nin daha güvenli biçimde taşınabileceği matrisler sunabilir; ancak kapsül dayanımı ve mekanik performans birlikte değerlendirilmelidir.

Poliüretan köpükler, yüksek yanıcılıkları nedeniyle FDM ile birlikte kullanıldığında güçlü alev geciktirici sistemlere ihtiyaç duymaktadır.

Epoksi kaplamalar, yüzey koruma ve sıcaklık düzenleme açısından potansiyel taşımakla birlikte, katkı türüne bağlı olarak duman ve ısı salımı açısından test edilmelidir.

Silika aerojel tabanlı kompozitler hem ısı yalıtımı hem de yangın koruma performansı açısından umut vericidir.

Çok katmanlı yapı kabuğu uygulamalarında FDM'nin konumu, yangına maruz kalma senaryosu ve çevresindeki malzemeler birlikte değerlendirilmelidir.

Malzemenin gerçek yapı bileşeni içinde, farklı yangın senaryoları altında ve uzun süreli kullanım koşulları dikkate alınarak

test edilmesi gerekmektedir. Özellikle alçı panel, yalıtım levhası, kaplama, harç ve çok katmanlı cephe bileşenleri gibi uygulamalarda yangın davranışı, yalnızca FDM'nin özelliklerine değil, tüm sistemin yangına verdiği tepkiye bağlıdır.

Sonuç olarak bu çalışma, FDM'nin enerji verimliliği açısından önemli bir potansiyel taşıdığını; ancak yangın güvenliği bakımından kontrolsüz ve doğrudan kullanımının riskli olabileceğini ortaya koymaktadır. Yangın performansı iyileştirilmiş FDM kompozitleri, doğru kapsülleme tekniği, uygun alev geciktirici katkı, taşıyıcı matrisle kimyasal uyum, yeterli mekanik dayanım ve uygulama alanına özgü testlerle yapı sektöründe daha güvenli biçimde kullanılabilir. Bu nedenle FDM teknolojilerinin gelecekteki gelişimi, yalnızca daha yüksek ısı depolama kapasitesine ulaşmayı değil, yangın güvenliği ile termal performans arasında dengeli ve doğrulanabilir bir malzeme tasarımı oluşturmayı hedeflemelidir.

Gelecek araştırmalarda FDM'nin yangın dayanımı, duman üretimi, kütle kaybı, termal bozunma ve sızıntı davranışı, mekanik dayanım ve döngüsel kararlılıkları aynı deneysel çerçevede ele alınmalıdır. Böylece FDM kompozitlerinin yalnızca enerji performansı yüksek malzemeler olarak değil, yangın güvenliği gereklilikleriyle uyumlu yapı bileşenleri olarak değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Kaynakça

Alkan, B., & Ekiz Barış, K. (2025). Yapı kabuğunda kullanılan faz değıştiren malzemelerin yangına karşı dayanıklılığı. 5. Bilsel International Aspendos Scientific Researches Congress içinde (ss. 834–841). Antalya, Turkey.

Arı, A. C. (2022). Nanoteknolojik yöntemle üretilen yapı malzemelerinin inşaat sektöründe kullanımının incelenmesi. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 5(1), 14–27. <https://izlik.org/JA69DB96PZ>

Arinaitwe, E., McNamee, M., & Försth, M. (2024). Is the fire performance of phase change materials a significant barrier to implementation in building applications? *Journal of Energy Storage*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112421>

Aşlar, E. E., & Harputlugil, G. U. (2023). Çift katmanlı cephelerin yangın güvenliği açısından incelemesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(2), 1083–1098. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1157018>

Bayraktar, F. S., & Köse, R. (2024). Yapı malzemelerinde PCM kullanımının binaların ısı özelliklerine etkisi. *Kırklareli University Journal of Engineering and Science*, 10(1), 66–76. <https://doi.org/10.34186/klujes.1476480>

Bayram, S., Mert, H. H., & Mert, M. S. (2022). Modifiye edilmiş kaolinit kil katkılı poli(stiren-ko-divinil benzen) matrise sahip n-nonadekan içeren şekilce kararlı kompozit faz değıştiren maddelerin hazırlanması ve özelliklerinin belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 435–450. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.970716>

Canım, D. S., & Kalfa, S. M. (2020). Faz değıştiren malzemelerin bina kabuğunda kullanımı. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 12(2), 355–371. <https://doi.org/10.24012/dumf.779147>

Coşkun, B., & Temel, Ü. N. (2024). Farklı piroliz maksimum sıcaklıklarında üretilen biyokömür/faz değıştiren malzeme

kompozitlerinin enerji depolama kapasitelerinin karşılaştırılması. *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 2(2), 228–235. <https://doi.org/10.66248/cumfad.1598630>

Cunha, S., & Aguiar, J. L. B. de. (2019). Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. *Journal of Energy Storage*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101083>

Cunha, S., Aguiar, J. L. B. de, & Pacheco-Torgal, F. (2015). Effect of temperature on mortars with incorporation of phase change materials. *Construction and Building Materials*, 98, 89–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077>

Dash, L., & Mahanwar, P. A. (2021). A review on organic phase change materials and their applications. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(9), 232–239. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2021.v05i09.045>

Demirbağ Genç, S. (2025). N-tetradekanol/arapzamlı/bakır(II) oksit kompozit mikrokapsül uygulaması ile fototermal özellikte pamuklu kumaş tasarımı. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 13(3), 921–931. <https://izlik.org/JA47UN65RU>

Erdem, N. S., & Orhon, A. V. (2020). Termal enerji depolama sistemleri için faz değiştiren malzemelerin trombe duvarlarda kullanımı üzerine bir inceleme. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 529–551. <https://doi.org/10.36306/konjes.624505>

Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., & Castelain, C. (2020). A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications. *Journal of Energy Storage*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101913>

Fokaides, P. A., Kylili, A., & Kalogirou, S. A. (2015). Phase change materials (PCMs) integrated into transparent building elements: A review. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 4(2). <https://doi.org/10.1007/s40243-015-0047-8>

Forzano, C., Baggio, P., Buonomano, A., & Palombo, A. (2019). Building integrating phase change materials: A dynamic hygrothermal simulation model for system analysis. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 7(2), 325–342. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0255>

Haurie, L., Serrano, S., Bosch, M., Fernandez, A. I., & Cabeza, L. F. (2016). Single layer mortars with microencapsulated PCM: Study of physical and thermal properties, and fire behaviour. *Energy and Buildings*, 131, 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.028>

Huang, J., Luo, Y., Weng, M., Yu, J., Sun, L., Zeng, H., Liu, Y., Zeng, W., Min, Y., & Guo, Z. (2021). Advances and applications of phase change materials (PCMs) and PCMs-based technologies. *ES Materials & Manufacturing*, 13, 23–39. <https://doi.org/10.30919/esmm5f458>

Ismail, A., Bahmani, M., Wang, X., Aday, A. N., Odukomaiya, A., & Wang, J. (2024). Enabling thermal energy storage in structural cementitious composites with a novel phase change material microcapsule featuring an inorganic shell and a bio-inspired silica coating. *Journal of Energy Storage*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110677>

İlgar, G., & Terhan, M. (2023). Dış duvara entegre edilen faz değiştiren malzemenin kalınlığı ve erime sıcaklığının bina enerji performansı ve CO2 emisyon azalımına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39(2), 959–976. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1218950>

Kaba, M. Y., Kalkan, O., & Çelen, A. (2021). Elektrikli araçlarda kullanılan bataryalar ve termal yönetim sistemlerinin incelenmesi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(4), 1119–1136. <https://doi.org/10.36306/konjes.945819>

Karadağ, R., Bozkurt, İ., Genç, Z., Genc, M., & Sogukpinar, H. (2020). Faz değiştirici maddelerin Adıyaman iklim koşullarında

yalıtım amaçlı kullanımının incelenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(13), 148–156. <https://izlik.org/JA46UB25JB>

Kayabaşı, R., & Kaya, M. (2019). Fotovoltaik modüllerin atık ısılarından termoelektrik jeneratör ile elektrik üretimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 16, 310–324. <https://doi.org/10.31590/ejosat.562859>

Kılıç Bakırhan, E., & Tuna Kayılı, M. (2025). The effects of waste-based and thermal energy-storing building materials on sustainable architecture: A review. *Engineering Reports*, 7(3). <https://doi.org/10.1002/eng2.70034>

Konuklu, Y. (2020). Isıl enerji depolama uygulamaları için biyobozunur esaslı faz değiştiren madde/çam kozalağı kompozitlerinin üretilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 696–704. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.605134>

Konuklu, Y., Ersoy, O., Paksoy, H., Evcimen, S., Çelik, S., & Toraman, Ö. Y. (2017). Termal enerji depolama materyali olarak diyatomit/faz değiştiren madde kompozitlerinin üretilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(1), 238–243. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.298173>

Koşan, M., & Aktaş, M. (2018). Faz değiştiren malzemelerle termal enerji depolayan bir ısı değiştiricisinin sayısal analizi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 403–409. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389594>

Li, G., Zhao, Z., Sun, J., Chen, G., Chen, X., Jiao, C., Li, H., & Yan, S. (2025). Microencapsulated phase change materials functionalized with PBA for enhancing the flame retardancy of thermally regulated rigid polyurethane foam. *Polymer Degradation and Stability*, 242, <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111702>

Liang, S., Yao, Z., Li, M., Li, Z., Yang, X., & Weng, J. (2025). Enhanced thermal safety and efficiency of battery modules using functional phase change composites. *Nano Energy*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2025.111671>

Liu, M., Qiao, J., Zhang, X., Guo, Z., Liu, X., Lin, F., Yang, M., Fan, J., Wu, X., & Huang, Z. (2024). Flame retardant strategies and applications of organic phase change materials: A review. *Advanced Functional Materials*, 35(2). <https://doi.org/10.1002/adfm.202412492>

Mert, H. H., & Mert, M. S. (2020). Faz değiştiren madde olarak n-hekzadekan esaslı mikrokapsüllerin hazırlanması, karakterizasyonu ve ısıl performansının t-kayıt yöntemiyle belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 18, 148–161. <https://doi.org/10.31590/ejosat.674613>

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. <https://doi.org/10.21923/jesd.519408>

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. <https://doi.org/10.21923/jesd.331998>

Mohaine, S., Feliu, J., Grondin, F., Karkri, M., & Loukili, A. (2016). Multiscale modelling for the thermal creep analysis of PCM concrete. *Energy and Buildings*, 131, 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.013>

Ovadiuc, E.-P., Calotă, R., Năstase, I., & Bode, F. (2024). Integration of phase-change materials in ventilated façades: A review regarding fire safety and future challenges. *Fire*, 7(7), Makale 244. <https://doi.org/10.3390/fire7070244>

Palacios, A., Gracia, Á. de, Cabeza, L. F., Julia, E., Fernández, A. I., & Barreneche, C. (2018b). New formulation and characterization of enhanced bulk-organic phase change materials. *Energy and Buildings*, 167, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.069>

Palacios, A., Gracia, Á. de, Haurie, L., Cabeza, L. F., Fernández, A. I., & Barreneche, C. (2018a). Study of the thermal properties and the fire performance of flame retardant-organic pcm in bulk form. *Materials*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/ma11010117>

Saylam Canım, D., & Macka Kalfa, S. (2022). Havalandırmalı duvar konstrüksiyonlarında faz değıştiren malzeme kullanımının konut binalarının enerji yüklerine etkisinin incelenmesi. *Duzce University Journal of Science and Technology*, 10(2), 522–536. <https://doi.org/10.29130/dubited.870517>

Serrano, S., Barreneche, C., Navarro, A., Haurie, L., Fernández, A. I., & Cabeza, L. F. (2016). Use of multi-layered PCM gypsums to improve fire response: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, 127, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.056>

Talu, F., Mert, M. S., & Mert, H. H. (2023). Gizli ısııl enerji depolama sistemleri: Faz değıştiren malzemelerin kullanıldığı aktif ve pasif sistem uygulamaları. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 531–547. <https://doi.org/10.21597/jist.1190593>

Taş, R., Döğüşcü, D. K., & Taş, N. A. (2025). *Polimer/faz değışim malzemesi (FDM) hibrit sistemleri: Termal enerji depolamada yenilikçi yaklaşımlar*. Özgür Yayınları eBooks. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub991.c4045>

Temel, Ü. N. (2020). Termal olarak iyileştirilmiş farklı erime sıcaklıklarına sahip faz değışken malzemelerin ısııl cevaplarının araştırılması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 403–411. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.605135>

Uygunoğlu, T., & Özgüven, S. B. (2025). Çimento esaslı harçlarda faz değıştiren malzeme tipinin harcın reolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(5), 2057–2078. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1622050>

Ülker, N., Bulut, H., Demirtaş, Y., & Demircan, G. (2020). Parafine eklenen farklı nanopartiküllerin ısı performans üzerine etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5(2), 134–145. <https://doi.org/10.46578/humder.739344>

Yang, X., Shi, T., Wang, X., Liu, H., Wang, D., & Yin, G. (2025). Typical applications and flame-retardant strategies for organic phase-change materials. *Carbon Energy*, 7(11). <https://doi.org/10.1002/cey2.70079>

Yılmazbilek, E. (2022). Plastik atıkların pirolizinden elde edilen sıvı ürünün ticari vaks yerine kullanılması. *Ulusal Çevre Bilimleri Araştırma Dergisi*, 5(1), 18–32. <https://izlik.org/JA38NY89CT>

Yin, G., Yang, X., Hobson, J., López, A. M., & Wang, D. (2022). Bio-based poly (glycerol-itaconic acid)/PEG/APP as form stable and flame-retardant phase change materials. *Composites Communications*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101057>

Zeng, J., Wang, Y., Li, S., Cheng, J., Gao, Z., Tang, C., Wang, Y., & Yang, X. (2025). A novel nanoparticle-loaded tube embedded phase-change microcapsules coatings for temperature regulation performance and fire safety of buildings. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109240>

Zhang, J., Zhang, H., Xu, F., Sun, L., Liang, C., Lin, X., Ma, L., Peng, H., Li, B., & Yan, E. (2025). Hierarchical porous PI/BC/SiO₂ aerogel-based composite phase change material with

superior compression resistance and heat resistance. *Journal of Energy Storage*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116286>

Zhao, P., Deng, C., Zhao, Z.-Y., Li, X., Chen, H., & Wang, Y. (2022). Benzaldehyde decorated octadecylamine for tailor-made molecular firefighting and efficient thermal energy management. *Chemical Engineering Journal*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133480>

