

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİNALARDA TERMAL ENERJİ DEPOLAMAK AMACIYLA FAZ DEĞİŞTİREN
MADDELERİN ODUN KOMPOZİTLERİNDE KULLANIMI**

DOKTORA TEZİ

Güliz ÖZTÜRK

**ARALIK 2024
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BİNALARDA TERMAL ENERJİ DEPOLAMAK AMACIYLA FAZ DEĞİŞTİREN
MADDELERİN ODUN KOMPOZİTLERİNDE KULLANIMI**

Güliz ÖZTÜRK

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (ORMAN ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 / 11 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 16 / 12 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali TEMİZ
ORCID : - - -

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Binalarda Termal Enerji Depolamak Amacıyla Faz Değiştiren Maddelerin Odun Kompozitlerinde Kullanımı” adlı bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Doktora danışmanlığımı üstlenerek bana rehberlik eden, değerli bilgilerini benimle paylaşan, her ihtiyaç duyduğumda sabırla yol gösteren ve her türlü akademik ve kişisel sorunlarımda desteğini esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Ali TEMİZ’e sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım. Kendisinden öğrendiğim bilgiler ve edindiğim tecrübeler, mesleki hayatımda yoluma ışık tutacak ve akademik gelişimimde önemli bir rol oynayacaktır. Gerek bilimsel birikimi gerek insanlığıyla her zaman örnek aldığım hocama, üzerimdeki büyük emeği için sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmalarım süresince bana yol gösteren, her aşamada yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Esat GÜMÜŞKAYA’ya, Doç. Dr. Derya USTAÖMER’e, termal analizlerimde desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Gökhan HEKİMOĞLU’na, Prof. Dr. Ahmet SARI’ya, Prof. Dr. Osman GENCEL’e, proje paydaşlarımızdan Prof. Dr. Nasko TERZIEV ve Dr. Sabrina PALANTI’ye, arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Gaye KÖSE DEMİREL ve Dr. Öğr. Üyesi Süleyman KUŞTAŞ’a ve KTÜ Orman Endüstri Mühendisliği Atölyesi çalışanlarına teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Doktora eğitimimin YÖK 100/2000 öncelikli alan doktora burs projesi, Orman Ürünleri ve Teknolojisi alanında gerçekleştirilmesi amacıyla bursiyer statüsünde desteklenmeme olanak sağlayan Yüksek Öğretim Kurumu’na ve BİDEB 2211-A Yurt İçi Genel Doktora Burs Programı kapsamında bursiyer olarak tamamlamama destek sağlayan TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin yürütülmesinde vermiş olduğu maddi destekten dolayı TÜBİTAK (Ufuk 2020, 120N500 nolu proje)’ a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında bana destek olan, beni bugünlere getiren, her kararımda bana güven veren, sevgileri ve emekleriyle yanımda olan kıymetli aileme, akademik bilgi ve tecrübeleriyle her aşamada yanımda olan değerli eşim Dr. Öğr. Üyesi Murat ÖZTÜRK’e, bana hayatın en güzel anlamını veren, sevgisi ve neşesiyle her günümü aydınlatan canımdan çok sevdiğim sevgili oğlum Eren ÖZTÜRK’e teşekkür eder, sonsuz minnet duygularımı ifade etmek isterim.

Tezimi, öncelikle sevgili aileme, eşime, oğluma ve Sayın Necmettin ŞAHİNLER’e ithaf ediyorum.

Güliz ÖZTÜRK

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Binalarda Termal Enerji Depolamak Amacıyla Faz Değiştiren Maddelerin Odun Kompozitlerinde Kullanımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Ali TEMİZ’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 16/12/2024

Güliz ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Termal Enerji Depolama Yöntemleri	4
1.2.1. Duyulur Isı Depolama	5
1.2.2. Gizli Isı Depolama	7
1.2.3. Termokimyasal Isı Depolama	8
1.3. Faz Değiştiren Maddeler (FDM).....	9
1.4. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması	10
1.5. FDM Teknolojisinin Pratik Uygulamalardaki Temel Sorunları ve Potansiyel Çözümleri	15
1.5.1. FDM’ lerde Sızıntı, Paketleme ve Bileşen Uyumu	15
1.5.2. FDM’ lerde Düşük Isıl İletkenlik ve İyileştirme Yöntemleri.....	17
1.5.3. FDM’ lerde Uyumsuz Faz Geçiş ve İyileştirme Yöntemleri	18
1.5.4. FDM’ lerde Aşırı Soğuma ve İyileştirme Yöntemleri	18
1.6. Termal Enerji Depolamada FDM Uygulamaları.....	19
1.6.1. FDM’lerin Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılması	20
1.6.2. FDM’lerin Elektronik Cihazların ve Bataryaların Soğutma Sistemlerinde Kullanılması	21
1.6.3. FDM’lerin Biyomedikal Uygulamaları.....	23
1.6.4. FDM’lerin Termoregülasyonlu Paketlerde Kullanımı	24
1.6.5. FDM’lerin Termal Konforlu Tekstil Ürünlerinde Kullanımı.....	25
1.6.6. FDM’lerin Binalarda Kullanımı.....	26
1.6.7. Makro Kapsülleme Yöntemi	28
1.6.8. Mikro Kapsülleme Yöntemi.....	29

1.6.9.	Şekilce Kararlı Kompozit Yöntemi.....	29
1.6.10.	Formca Kararlı Kompozit Yöntemi	30
1.7.	FDM'lerin Odun ve Odun Esaslı Kompozitlerde Kullanımı	31
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	37
2.1.	Materyal.....	37
2.1.1.	Hammadde	37
2.1.2.	Kimyasal Maddeler	37
2.2.	Yöntem	41
2.2.1.	Liflerin Hazırlanması ve Emprenye Edilmesi	43
2.2.2.	Nişasta Tutkalının Hazırlanması	45
2.2.3.	Liflerin Tutkallanması, Levha Taslağının Preslenmesi ve Pres sonrası İşlemler	46
2.2.4.	Fiziksel Testler	48
2.2.5.	Kimyasal Testler	50
2.2.6.	Mekanik Testler	51
2.2.7.	Termal Testler	53
2.2.8.	Morfolojik Testler	59
2.2.9.	Akustik Testler	60
2.2.10.	Biyolojik Testler.....	62
2.2.11.	İstatistiksel Analiz	65
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	66
3.1.	Fiziksel Testlere Ait Bulgular	66
3.1.1.	Sızdırmazlık Testine Ait Bulgular	66
3.1.2.	Su Alma ve Kalınlık Artışına Ait Bulgular.....	67
3.1.3.	Levhaların Yoğunluk Profiline Ait Bulgular	75
3.2.	Kimyasal Testlere Ait Bulgular.....	78
3.2.1.	FTIR Analizine Ait Bulgular	78
3.3.	Mekanik Testlere Ait Bulgular.....	81
3.3.1.	Levha Yüzeyine Dik Çekme Direnci Testine Ait Bulgular	81
3.3.2.	Basınç Direncine Ait Bulgular	83
3.4.	Termal Testlere Ait Bulgular	85
3.4.1.	Isıl İletkenlik Katsayısına Ait Bulgular.....	85
3.4.2.	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testine Ait Bulgular	88
3.4.3.	Isıl Döngü Testine (IDT) Ait Bulgular.....	92
3.4.4.	Termal Kütle Analizine (TGA) Ait Bulgular	96

3.4.5.	Laboratuvar Ölçekli Termoregülasyon Testine Ait Bulgular	99
3.4.6.	Solar Termoregülasyon Performansına Ait Bulgular.....	107
3.5.	Morfolojik Testlere Ait Bulgular	117
3.5.1.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ait Bulgular	117
3.6.	Akustik Testlere Ait Bulgular	118
3.6.1.	Ses Yutum Katsayısı ve Ses İletim Kaybı Değerlerine Ait Bulgular.....	118
3.7.	Biyolojik Testlere Ait Bulgular	124
3.7.1.	Termit Testine Ait Bulgular	124
3.7.2.	Küf Testine Ait Bulgular.....	126
4.	SONUÇLAR.....	129
5.	ÖNERİLER.....	134
6.	KAYNAKLAR	135
	ÖZGEÇMİŞ.....	157

Doktora Tezi

ÖZET

BİNALARDA TERMAL ENERJİ DEPOLAMAK AMACIYLA FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERİN ODUN KOMPOZİTLERİNDE KULLANIMI

Güliz ÖZTÜRK

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ali TEMİZ
2024, 156 Sayfa

Bu tez çalışmasında, ısı enerjisi depolama ve salınım kabiliyetine sahip faz değiştiren maddeler (FDM) kullanılarak formca kararlı odun kompozitleri (FKK-FDM) üretilmiştir. Üretimde, FDM olarak kaprik asit, lauril alkol ve metil palmitat; gözenekli destek malzemesi olarak odun lifi; bağlayıcı olarak ise nişasta bazlı tutkal kullanılmıştır. Hazırlanan odun kompozitlerin fiziksel özellikleri, sızıntı testi, kalınlık, su alma oranı ve yoğunluk profili ölçümleriyle belirlenmiştir; kimyasal özellikleri FTIR analizi, morfolojik yapıları SEM analizi, termal özellikleri TGA, DSC ve IDT analizleriyle incelenmiştir. Akustik performans empedans tüpü deneyiyle, biyolojik dayanım ise termit ve küf mantarlarına maruz bırakılma ile değerlendirilmiştir. Mekanik özellikler ise levha yüzeyine dik çekme ve basınç direnci testleriyle analiz edilmiştir. Sızıntı testleri sonucunda, %40 FDM yükleme oranının sızıntısız en yüksek FDM oranı olduğu belirlenmiştir. FDM katkılı levhalar, düşük su alma oranı ve minimal kalınlık artışıyla yüksek boyutsal stabilite sergilemiştir. Termal iletkenlik katsayıları 0,0943–0,1384 W/m²K arasında ölçülmüş, metil palmitat katkılı kompozitler ise yüksek gizli ısı depolama kapasiteleriyle öne çıkmıştır. Laboratuvar ve dış ortamda gerçekleştirilen termal regülasyon performans deneyleri, üretilen FKK-FDM odun kompozitlerinin iç ortam sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak termal konfor sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Bu durum, binalarda ısıtma ve soğutma yüklerini düşürerek enerji tasarrufuna önemli bir katkı sunabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Faz Değiştiren Maddeler, Gizli ısı enerjisi depolama, Odun Lifi, Biyo-bazlı tutkal, Odun Kompozit malzemeler, Isıl iletkenlik, Termal Regülasyon Performans, Akustik

PhD. Thesis

SUMMARY

THE USE OF PHASE CHANGE MATERIALS IN WOOD COMPOSITES FOR THERMAL ENERGY STORAGE IN BUILDINGS

Güliz ÖZTÜRK

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Forest Industrial Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ali TEMİZ
2024, 156 Pages

In this thesis study, form-stable wood composites (FSWC-PCMs) were produced using phase change materials (PCMs) with thermal energy storage and release capabilities. In the production process, capric acid, lauryl alcohol, and methyl palmitate were used as PCMs; wood fiber served as the porous supporting material, and a starch-based adhesive was employed as the binder. The physical properties of the prepared wood composites were evaluated through leakage tests, thickness swelling, water absorption, and density profile measurements. Chemical properties were analyzed using FTIR spectroscopy, morphological characteristics were examined by SEM analysis, and thermal properties were assessed using TGA, DSC, and IDT analyses. Acoustic performance was measured using impedance tube tests, and biological resistance was evaluated through termite and mold fungi tests. Mechanical properties were determined by internal bond strength and compression resistance tests. Leakage tests revealed that a PCM loading ratio of 40% by mass was the maximum achievable without leakage. PCM-enhanced panels demonstrated high dimensional stability, with low water absorption and minimal thickness swelling. Thermal conductivity values ranged from 0.0943 to 0.1384 W/m²K, with methyl palmitate-enhanced composites exhibiting superior latent heat storage capacities. Thermal regulation performance tests conducted under laboratory and outdoor conditions indicated that the FSWC-PCMs effectively reduced indoor temperature fluctuations and improved thermal comfort. These results highlight the potential of the developed composites to decrease heating and cooling loads in buildings, thereby contributing to significant energy savings.

Key Words: Phase Change Materials, Latent Thermal Energy Storage, Wood Fiber, Bio-based Adhesive, Wood Composite Materials, Thermal Conductivity, Thermal Regulation Performance , Acoustic

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Termal enerji depolama yöntemleri (Bal vd., 2010).....	5
Şekil 2. Bir D-TED (duyulur ısı-termal enerji depolama) ünitesi döngüsünde depolama ortamının entalpisinin sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Dincer ve Ezan, 2018).....	6
Şekil 3. Duyulur ve gizli ısı karşılaştırması (Togun vd., 2024).....	8
Şekil 4. FDM'lerin erime entalpileri ve erime ısılarına göre sınıflandırılması (Mehling ve Cabeza, 2008).....	11
Şekil 5. FDM'lerin sınıflandırılması (Barbi vd., 2022)	11
Şekil 6. FDM'lerin kullanım alanları (Shen vd., 2023)	19
Şekil 7. Güneş enerjisi depolama sistemlerinde FDM'lerin kullanım örnekleri (Douvi vd., 2021).....	20
Şekil 8. Sıcaklık artışını azaltmak için cep telefonunda FDM uygulaması örneği (Tomizawa vd., 2016).....	22
Şekil 9. Eritrositler (RBC) için geliştirilmiş FDM bazlı kan taşıma kabı (Wang vd., 2023).....	24
Şekil 10. FDM'nin yemek ve içecek paketi olarak kullanımının şematik görünümü (Mehling ve Cabeza, 2008; Ünal vd., 2019)	25
Şekil 11. FDM'lerin bina uygulamalarında kullanımına dair örnekler (Zahir vd., 2023).....	27
Şekil 12. Kaprik asitin kimyasal formülü	38
Şekil 13. Lauril alkolün kimyasal formülü	38
Şekil 14. Metil palmitatın kimyasal formülü	39
Şekil 15. Nişastanın kimyasal yapısı (Deniz, 2012)	39
Şekil 16. FDM odun kompozitlerinin üretimine ait deneysel prosedür şeması.....	43

Şekil 17.	Elek yardımıyla lif topaklarının açılması	44
Şekil 18.	Liflerin FDM ile muamelesi	44
Şekil 19.	Vakumlu etüv.....	45
Şekil 20.	Nişasta tutkalını hazırlama düzeneği	46
Şekil 21.	Levha üretiminde kullanılan sıcak pres	47
Şekil 22.	DPX200-LTE yoğunluk profili ölçüm cihazı	50
Şekil 23.	FTIR spektroskopi cihazı.....	51
Şekil 24.	Imal IB 600 cihazı	52
Şekil 25.	MTS test cihazı.....	53
Şekil 26.	KEM QTM 500 Isıl iletkenlik ölçüm cihazı.....	54
Şekil 27.	Tipik bir DSC termogramında karakteristik değerlerin belirlenmesi	55
Şekil 28.	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı.....	55
Şekil 29.	Isıl Döngü Testi (IDT) cihazı	56
Şekil 30.	Termal Kütle Analizi (TGA) cihazı.....	57
Şekil 31.	Termoregülasyon Performans Testi Düzeneği ve Şematik Gösterimi	58
Şekil 32.	Gerçek hava koşullarında termoregülasyon performansının değerlendirilmesi için deneysel düzenek ve test kabinlerindeki termokupl pozisyonları	59
Şekil 33.	Empedans tüpü test cihazıyla ses yutum katsayılarının ve ses iletim kaybının belirlenmesi.....	61
Şekil 34.	Termit testi örnekleri	63
Şekil 35.	Biyokompozitlerin küfe karşı direncini değerlendirmek için tasarlanmış pleksiglas kutu	64
Şekil 36.	FDM odun kompozitlerinin sızdırmazlık test sonuçları	66

Şekil 37.	FDM esaslı kompozitlerin su alma oranları.....	67
Şekil 38.	FDM esaslı kompozitlerin kalınlık artış oranları.....	71
Şekil 39.	Su alma ve kalınlık artış testinden sonra kompozitlerin boyutsal stabilitesi	75
Şekil 40.	FDM odun kompozitlerin yoğunluk dağılım grafiği	76
Şekil 41.	KA esaslı kompozitlerin FTIR spektrumları	79
Şekil 42.	LA esaslı kompozitlerin FTIR spektrumları.....	80
Şekil 43.	MP esaslı kompozitlerin FTIR spektrumları	80
Şekil 44.	KA esaslı odun kompozitinin DSC termogramları.....	89
Şekil 45.	LA esaslı odun kompozitinin DSC termogramları	89
Şekil 46.	MP esaslı odun kompozitinin DSC termogramları.....	90
Şekil 47.	KA/OK kompozitinin IDT öncesi ve sonrasındaki DSC termogramları.....	93
Şekil 48.	LA/OK kompozitinin IDT öncesi ve sonrasındaki DSC termogramları	93
Şekil 49.	MP/OK kompozitinin IDT öncesi ve sonrasındaki DSC termogramları.....	94
Şekil 50.	KA/OK kompozitinin ısı döngü testi öncesi ve sonrası FTIR spektrumlarının karşılaştırılması	95
Şekil 51.	LA/OK kompozitinin ısı döngü testi öncesi ve sonrası FTIR spektrumlarının karşılaştırılması	95
Şekil 52.	MP/OK kompozitinin ısı döngü testi öncesi ve sonrası FTIR spektrumlarının karşılaştırılması	96
Şekil 53.	FDM esaslı odun kompozitlerin TGA eğrileri	97
Şekil 54.	Referans ve KA/OK panelin ısıtma ve soğutma periyotlarındaki	101
Şekil 55.	Referans ve LA/OK panelin ısıtma ve soğutma periyotlarındaki.....	103
Şekil 56.	Referans ve MP /OK panelin ısıtma ve soğutma periyotlarındaki	105

Şekil 57.	Küresel doğrudan ve difüz güneş radyasyonu verileri (15.11.2023 tarihli)	108
Şekil 58.	Referans ve test odalarındaki alt yüzey sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	110
Şekil 59.	Referans ve test odalarındaki üst yüzey sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	110
Şekil 60.	Referans ve test odalarındaki yakın yüzey sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	111
Şekil 61.	Referans ve test odalarındaki oda merkezi sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	112
Şekil 62.	Referans ve test odalarındaki alt yüzey sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	113
Şekil 63.	Referans ve test odalarındaki üst yüzey sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	114
Şekil 64.	Referans ve test odalarındaki yakın yüzey sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	114
Şekil 65.	Referans ve test odalarındaki oda merkezi sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)	115
Şekil 66.	Referans ve test odalarının termal kamera görüntüleri	116
Şekil 67.	SEM görüntüleri (a) Saf odun lifi (b) KA emprenyeli odun lifi (c) LA emprenyeli odun lifi (d) MP emprenyeli odun lifi	118
Şekil 68.	FDM esaslı odun kompozitlerin ses yutum katsayısı değerleri grafiği	121
Şekil 69.	FDM esaslı odun kompozitlerin ses iletim kaybı değerleri grafiği	123
Şekil 70.	Termit testlerinin sonunda (a) işlenmemiş kontrol örnekleri ve (b) FDM emprenyeli odun kompozit örnekleri	126

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Duyulur ısı depolamada yaygın olarak kullanılan malzemeler	7
Tablo 2. FDM olarak araştırılan bazı parafin örnekleri (Mehling ve Cabeza, 2008).....	13
Tablo 3. FDM olarak araştırılan bazı yağ asitleri (Mehling ve Cabeza, 2008).....	13
Tablo 4. FDM olarak araştırılan PEG örnekleri (Mehling ve Cabeza, 2008).....	14
Tablo 5. Üretilen odun kompozitlerine ait deneysel şablon.....	42
Tablo 6. Prese ait teknik bilgiler	47
Tablo 7. Küf direncini değerlendirmek için derecelendirme	65
Tablo 8. Farklı FDM katkılı odun kompozitlerinin su alma oranlarına ait basit varyans analizi sonuçları.....	68
Tablo 9. FDM katkılı odun kompozitlerinin 2 saat sonunda su alma oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)	69
Tablo 10. FDM katkılı odun kompozitlerinin 24 saat sonunda su alma oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)	70
Tablo 11. Farklı FDM katkılı odun kompozitlerinin kalınlık artışı oranlarına ait basit varyans analizi sonuçları	72
Tablo 12. FDM katkılı odun kompozitlerinin 2 saat sonunda kalınlık artışı oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)	72
Tablo 13. FDM katkılı odun kompozitlerinin 24 saat sonunda kalınlık artışı oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)	73
Tablo 14. Levha yüzeyine dik çekme direnci testine ait veriler	82

Tablo 15.	Farklı FDM katkılı odun kompozitlerinin basınç direncine ait basit varyans analizi sonuçları.....	84
Tablo 16.	FDM katkılı odun kompozitlerinin basınç direncine varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$).....	84
Tablo 17.	FDM esaslı odun kompozit levhalarının termal iletkenlik katsayı değerleri	85
Tablo 18.	Üretilen FDM odun kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin literatür ile karşılaştırılması.....	86
Tablo 19.	Saf FDM'lerin ve hazırlanan FDM/OK'lerin DSC analizleri sonucunda elde edilen ısı özellikleri.....	91
Tablo 20.	FDM odun kompozitlerin gizli ısı depolama özelliklerinin, literatürdeki bazı ahşap bazlı form-stabil FDM'lerle karşılaştırılması.	91
Tablo 21.	FDM esaslı kompozitlere ait ses yutum katsayısı değerleri	121
Tablo 22.	FDM esaslı kompozitlere ait ses iletim kaybı değerleri	123
Tablo 23.	Termit testi sonuçları	125
Tablo 24.	Küf testine ait sonuçlar	127

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

FDM	: Faz Değişiren Madde
BFDM	: Biyo-bazlı Faz değişiren Madde
TED	: Termal Enerji Depolama
TES	: Termal Enerji Depolama Sistemleri
GID	: Gizli Isı Depolama
FKK-FDM	: Formca Kararlı Kompozit FDM
KA	: Kaprik Asit
LA	: Lauril Alkol
MP	: Metil Palmitat
OL	: Odun Lifi
KA/OK	: Kaprik Asit Odun Kompozit
LA/OK	: Lauril Alkol Odun Kompozit
MP/OK	: Metil Palmitat Odun Kompozit
MDF	: Orta Yoğunlukta Liflevha
IDT	: Isıl Döngü Testi
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
TGA	: Termogravimetrik Analiz
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
IB	: İç Yapışma Direnci
TK	: Termokupl
HG	: Homojenlik Grupları

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Küresel nüfus artışı ve teknolojik gelişmeler nedeniyle enerji talebi son yıllarda önemli bir artış göstermiştir. Bununla birlikte, enerji üretiminde fosil kaynakların aşırı kullanımına bağlı çevresel sorunlar da en büyük endişelerden biri olmuştur. Artan enerji taleplerini karşılayabilmek için enerji depolama ve yönetim sistemleri, yeni enerji kaynakları ve teknikleri bulmak kadar önemlidir (Pasupathy vd., 2008). Binalarındaki enerji tüketimi, yönetim ve kontrol gerektiren en büyük enerji talep alanlarından biridir (Tyagi vd., 2011). Son çalışmalara göre, dünya genelinde üretilen enerjinin %40'ından fazlası binalarda tüketilmektedir (Yang vd., 2014; Fabiani vd., 2023). Bu, çevreye salınan yıllık sera gazlarının üçte birine denk gelmektedir. Bu nedenle, binalarındaki enerji tüketiminin yönetilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, iç mekân sıcaklığını istikrarlı tutmak ve sıcaklık dalgalanmalarını kontrol etmek için yeni çözümler bulmaya ihtiyaç vardır. Bu yeni çözümler, çevreye olumsuz etkiyi önlemek için çevre dostu stratejileri içermelidir (Souayfane vd., 2016; Bland vd., 2017).

Yapılarda enerji verimliliği, ısıtma, soğutma, aydınlatma ve binalardaki cihazların ve ekipmanların çalıştırılması için gereken enerji miktarını azaltmak amacıyla teknolojilerin, malzemelerin ve tasarım stratejilerinin kullanımını ifade eder (Schiavoni vd., 2016; Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020). Birçok farklı enerji depolama teknolojisi mevcuttur ve depolanan enerjinin türüne göre mekanik, termo-kimyasal, kimyasal, elektriksel ve termal enerji olarak sınıflandırılabilir (Koohi-Fayegh ve Rosen, 2020; Rahman vd., 2020). Depolama teknolojilerinden biri de termal enerji depolama (TES) yöntemlerinin kullanımıdır. TES yöntemleri, enerjiyi termal formda depolar ve daha sonra kullanılmak üzere saklar. Gizli ısı depolaması için kullanılan maddeler, faz değişim maddeleri (FDM) olarak adlandırılır (Akeiber vd., 2016; Zhao vd., 2023).

FDM'ler, belirli bir sıcaklıkta faz değişimi (katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya) yoluyla büyük miktarda termal enerjiyi absorbe etme ve serbest bırakma kapasitesine sahiptir (Jamekhorshid vd., 2014; Pielichowska ve Pielichowski, 2014; Su vd., 2015; Liu vd., 2023; Zhao vd., 2023). Bu enerji depolama ve salma özelliği, FDM'leri bina içinde termal konfor, termal koruma, ısıtma ve soğutma sistemleri ve bina ve inşaat, elektronik ve ulaşım gibi

çeşitli endüstrilerde sıcaklık kontrolü gibi birçok uygulama için ideal kılar (Jamekhorshid vd., 2014; Akeiber vd., 2016). FDM'ler kimyasal bileşiklerine bağlı olarak organik, inorganik bileşikler ve ötektik karışımlar olarak sınıflandırılır (Souayfane vd., 2016). Yüksek enerji depolama kapasitesi ve enerji tüketimini azaltma potansiyelleriyle, FDM'ler son yıllarda enerji verimliliğini artırmak ve CO₂ salınımlarını azaltmak için umut verici bir yol olarak artan bir ilgi görmüştür (Öztürk vd., 2024 ; Rahman vd., 2020).

Geleneksel olarak, FDM'ler inşaat elemanlarında beton ve alçı gibi inorganik malzemelere entegre edilmektedir. Son zamanlarda, doğal, yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevre dostu malzemelere dikkat çekilmiştir. Ahşap ve ahşap bazlı malzemeler, yukarıda belirtilen gereksinimleri karşılamak için güvenilir özellikler sunmaktadır. Ahşap yapılar genellikle yapraklı ve iğne yapraklı ağaç türlerinden üretilir. Yapraklı ağaçlar (örneğin, meşe, kayın) yüksek yoğunluğa ve dayanıklılığa sahipken iğne yapraklı ağaçlar (örneğin, çam, göknaar) hafif ve işlenmesi daha kolay malzemelerdir. Bunun dışında, mühendislik ürünü ahşap malzemeler (örn. lamine ahşap, CLT - çapraz lamine ahşap, LVL - lamine kaplamalı ahşap) hem dayanıklılık hem de esneklik sağlar. Bu tür ahşap malzemeler, büyük ölçekli yapılarda ya da zorlu yük gereksinimlerinde tercih edilir. Çeşitli yapı türlerinde kullanılır ve çevre dostu, sürdürülebilir mimari çözümler sunar. Ahşap yapılar, karkas, çerçeve, panel, kütük ev, CLT gibi farklı türlere ayrılır ve her biri taşıma kapasitesi, yalıtım, hızlı inşa süresi gibi avantajlar sunar. Ahşabın özellikleri, yapısal özelliklerine bağlı olarak değişmekte olup, farklı türlerin ve işleme tekniklerinin kullanılabilmesi sayesinde çok geniş bir uygulama alanı sunmaktadır.

Başlıca ahşap yapı elemanları; kirişler, kolonlar, taşıyıcı duvarlar, döşeme elemanları ve çatı sistemlerinden oluşur. Çapraz destekler, bağlantı elemanları ve iç-dış kaplamalar ise yapının dayanıklılığını artırır, estetik bir görünüm kazandırır ve hava koşullarına karşı koruma sağlar. Bu elemanlar, dayanıklılık ve işlevselliği korurken ahşabın sıcak ve doğal atmosferini sunar. Modern mühendislik teknikleriyle güçlendirilen ahşap yapılar, çok katlı binalarda dahi güvenle kullanılabilir. Bu yapıların yüksek termal performansı, enerji verimliliğini artırırken yangın dayanıklılığı gibi güvenlik unsurlarına da sahiptir (Švajlenka ve Kozlovská, 2021; Abed vd., 2022; Tupenaite vd., 2023).

Yenilenebilirlik ve sürdürülebilirlik, kolay dönüşüm, yüksek mekanik dayanım ve uygun kimyasal özellikler gibi odun ve odun kompozitlerinin bazı benzersiz özellikleri, bunları inşaat uygulamaları için en iyi seçeneklerden biri haline getirmektedir. Buna örnek olarak Norveç'in Brumunddal şehrinde Mart 2019 yılında açılan ve yapımı kısa sürede

tamamlanan 18 katlı ve 85.4 m yüksekliği ile Mjostarnet binası dünyanın en yüksek ahşap binası ünvanını taşımaktadır. Bu çevre dostu ve sürdürülebilir çözüm, aynı zamanda ahşap sanayisi yan ürünlerinin değerlendirilmesine olanak tanıyarak, daha az değerli endüstriyel yan ürünlere katma değer sağlayıp, biyokompozit üretiminde talaş gibi ikincil ürünlerin kullanılmasını teşvik etmektedir. FDM'lerin ahşap ve ahşap malzemelerine entegre edilmesi, inşaat ve binalarda kullanılmak üzere güvenilir malzemelerin üretilmesini sağlayabilir. Ahşap, doğal bir gözenekli malzeme olup FDM'lerle emprenye edilebilir ve bina termal kütlesini artırmak, konut binalarındaki sıcaklık dalgalanmalarını kontrol etmek ve termal konforu artırmak amacıyla iç ve dış bağlantılarda kullanılabilir (Mathis vd., 2018; Mathis vd., 2019; Chen vd., 2012). Odun ve odun esaslı malzemeler, FDM için mükemmel bir taşıyıcı sunma potansiyeline sahiptir, çünkü ahşap doğal olarak gözenekli, ucuz, bol miktarda kaynağa sahip, toksik olmayan ve yüksek kimyasal stabiliteye sahip bir malzemedir (Hanif vd., 2023). FDM için destekleyici malzemeler olarak ahşap yapısının kullanımı giderek artan bir ilgi görmektedir. FDM, masif ahşap, ahşap kompozitler, delignifiye edilmiş ahşap ve şeffaf ahşap gibi çeşitli ahşap türlerine entegre edilebilir (Sulaiman ve Mohamad Amini, 2022; Can vd., 2021).

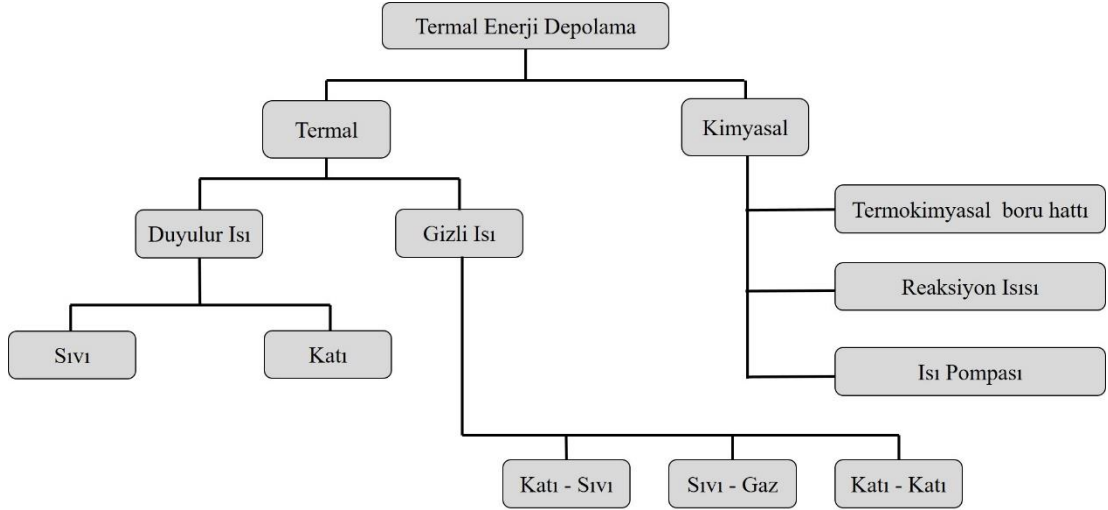
Ancak, FDM içeren yapı malzemelerinin hazırlanmasında bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Bu kısıtlamalar arasında en önemlisi, FDM'lerin doğrudan ilavesiyle karşılaşılan kararsızlık ve sıvı fazdaki FDM'nin yapıdan sızmasıdır. Literatürde, FDM'lerin kararlı bir kompozit forma dönüştürülmesinin bu sızma sorununu etkili bir şekilde ortadan kaldırdığı bildirilmiştir (Sarı vd., 2020; Hekimoğlu vd., 2021; Sharma vd., 2022). Bu yöntem kapsamında, sıvı fazdaki FDM, gözenekli bir destekleyici malzemeye doğrudan veya vakum yardımıyla emdirilmektedir. FDM'ler erime ve katılaşma süreçlerinde termal enerji depolama ve salınım işlevlerini yerine getirirken, destekleyici malzeme ise erimiş FDM'nin sistemden sızmasını önlemekte ve katı formun stabil bir şekilde korunmasını sağlamaktadır.

Bu tezin temel amacı, binalarda enerji verimliliğini artırmak amacıyla FDM'lerin kullanıldığı bir termal enerji depolama sistemi geliştirmektir. Bu kapsamda, çalışmada FDM'leri odun liflerine entegre edebilmek için çeşitli ön denemeler yapılmış ve FDM içeren odun kompoziti yapı malzemelerinin üretimi ile ayrıntılı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışmanın hedeflerinden biri, FDM'lerin genel özellikleri ve uygulama alanları hakkında daha kapsamlı bilgi sunmanın yanı sıra, binalarda kullanılabilecek yeni nesil FDM içeren odun kompozit yapı malzemelerinin fizibilitesini araştırmaktır. Bu tür kompozit yapı malzemelerinin, hem ısıtma hem de soğutma süreçlerinde minimum enerji tüketimi ile bina

içi sıcaklıkların kontrolüne olanak tanıma potansiyeline sahip olacak şekilde üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda odun liflerine FDM emprenye edilmiş ve biyobazlı bağlayıcı kullanarak formca kararlı odun kompozitleri üretilmiştir.

1.2. Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Termal enerji depolama (TES) sistemleri, ısının veya soğğun ilerleyen bir zamanda ihtiyaç halinde kullanımı için depolanmasını mümkün kılar. TES'in başlıca uygulama alanları, enerji üretimi ile tüketimi arasındaki uyumsuzlukların yaşandığı tüm senaryolarda ortaya çıkar. Bu durum, doğası gereği kesintili olan ve hava koşulları tarafından daha da sınırlanan yenilenebilir enerji kaynakları için geçerlidir. Örneğin, güneş enerjisi yalnızca gündüz saatlerinde erişilebilir olduğundan, güneşli dönemlerde elde edilen fazla ısının gece saatlerinde kullanımı için etkili bir şekilde depolanması gerekmektedir. Benzer problemler, atık ısının mevcudiyeti ile kullanım sürelerinin örtüşmediği ısı geri kazanım sistemleri ve endüstriyel süreçlerde de ortaya çıkmaktadır; bu durum, termal enerji depolama gereksinimini doğurmaktadır. Elektrik enerjisi tüketimi gündüz ve gece arasında önemli değişiklikler gösterir, özellikle çok soğuk veya sıcak iklimlerde, bu değişimin büyük bir kısmı konut ısıtması ve klima kullanımından kaynaklanır. Bu değişiklikler genellikle gece yarısından sabah erken saatlere kadar olan dönemde düşük talep yaşanmasına neden olur. Bu sebeple, elektrik santralleri zirve yükleri karşılayacak şekilde yeterli kapasitede tasarlanmalıdır. Aksi halde, enerji dağıtımında yüksek verimlilik sağlanması gerekir. Enerji depolama yöntemleri, zirve yükünün bir kısmını düşük talep dönemlerine kaydırma imkânı sunduğundan, daha etkili bir enerji üretim yönetimi sağlanabilir. Bu nedenle, yük kaydırma uygulamasının başarısı, büyük ölçüde kullanılan enerji depolama yöntemlerine bağlıdır (Farid vd., 2004); bunlar duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal enerji depolama yöntemleri olarak sınıflandırılabilir (Dincer ve Rosen, 2002; Alva vd., 2018; Rashid vd., 2023). Yaygın olarak kullanılan termal enerji depolama yöntemleri Şekil 1' de verilmiştir.



Şekil 1. Termal enerji depolama yöntemleri (Bal vd., 2010)

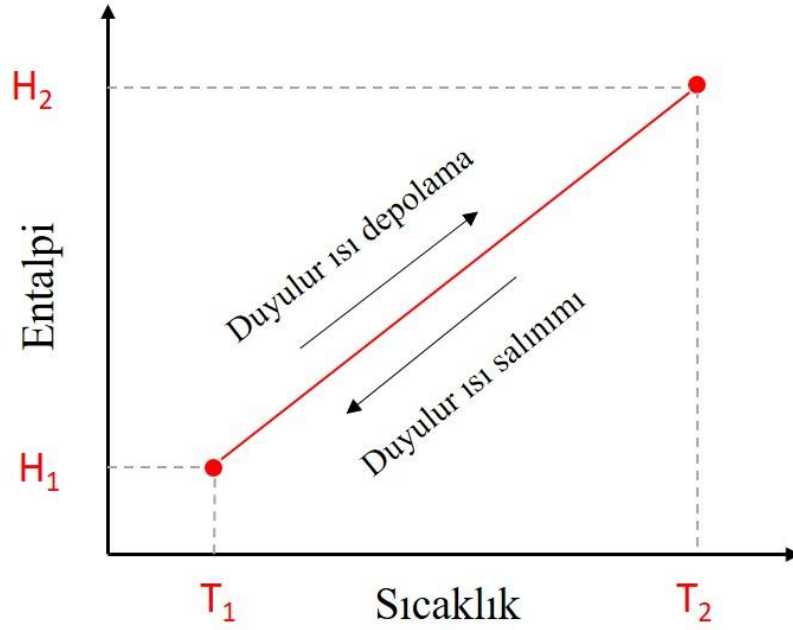
1.2.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama sistemlerinde termal enerji, bir katı veya sıvı ortamın sıcaklığını artırarak depolanır. Duyulur ısı depolama, ısıyı saklamanın en yaygın kullanılan yöntemidir; örneğin, sıcak su depolama, ev içi ısınma ve sıcak su sağlama amacıyla geniş çapta kullanılmaktadır. Duyulur ısı depolama sistemlerinin depolayabileceği ısı miktarı, başlangıç ve son sıcaklık koşulları arasındaki fark, depolama ortamının kütlesi ve ısı kapasitesine bağlıdır (Hasanuzzaman, 2019). Bu ilişki aşağıdaki şekilde matematiksel olarak ifade edilebilir:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Burada m , depolama malzemesinin kütlesini; c_p , malzemenin özgül ısısını; ve ΔT , başlangıç ve son sıcaklık koşulları arasındaki sıcaklık farkını temsil eder.

Formül incelendiğinde, bir depolama ortamının etkinliği ve toplam değiştirilen enerji, mevcut kütle ve hacme bağlı olarak belirlenir (Hasanuzzaman, 2019). Ayrıca, kütle başına depolanan enerji miktarı, özgül ısı kapasitesinin artışıyla yükselir (Şekil 2).



Şekil 2. Bir D-TED (duyulur ısı-thermal enerji depolama) ünitesi döngüsünde depolama ortamının entalpisinin sıcaklığına bağlı olarak değişimi (Dincer ve Ezan, 2018)

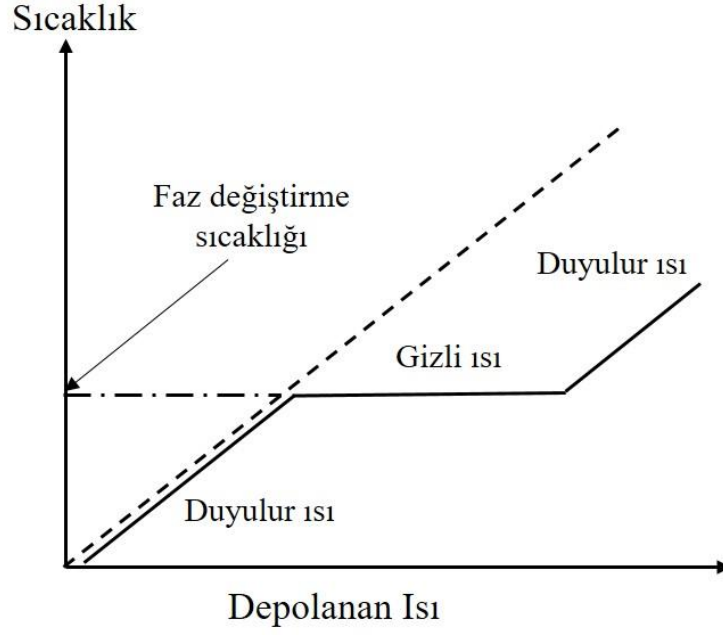
Depolama malzemeleri, belirli sıcaklık aralıklarında mevcut çeşitli seçenekler arasından genellikle ısı kapasitesi ve depolama alanı gibi kriterlere göre seçilir. Depolama ortamının toksik olmaması, maliyetinin düşük olması ve uzun süreli termal döngüler boyunca stabilitesini koruması gereken özelliklerdir. Gazlar, düşük hacimsel ısı kapasitesi nedeniyle duyulur ısı veya soğuk depolama sistemlerinde kullanılmamaktadır (Mehling ve Cabeza, 2008). Su, ekonomikliği ve yüksek özgül ısı ile hacimsel termal kapasitesi nedeniyle en uygun sıvı duyulur ısı depolama malzemesi olarak değerlendirilir. Ancak, 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklar için suyun yüksek basınç altında tutulması gerektiğinden, bu sıcaklık aralığında yağlar, eritilmiş tuzlar ve sıvı metaller gibi alternatif malzemeler tercih edilmektedir (Hasnain, 1998; Sharma vd., 2009). Duyulur ısı depolamada yaygın olarak kullanılan malzemeler aşağıda Tablo 1'de verilmiştir (Mehling ve Cabeza, 2008 ; Mabrouk vd., 2022; Chekifi ve Boukraa, 2023).

Tablo 1. Duyulur ısı depolamada yaygın olarak kullanılan malzemeler

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Spesifik Sıcaklık (J/kg K)	Hacimsel Termal Kapasite (MJ/m ³ K)
Kil	1458	879	1.28
Tuğla	1800	837	1.51
Kumtaşı	2200	712	1.57
Odun	700	2390	1.67
Beton	2000	880	1.76
Cam	2710	837	2.27
Alüminyum	2710	896	2.43
Demir	7900	452	3.57
Çelik	7840	465	3.68
Manyetit	5177	752	3.89
Su	988	4182	4.17

1.2.2. Gizli Isı Depolama

Gizli ısı depolama, bir depolama malzemesi faz değişimine uğradığında ısının emilmesi ve serbest bırakılması prensibine dayanır. Gizli ısı depolaması için kullanılan malzemeler, genellikle faz değişim malzemeleri (FDM) olarak adlandırılır. FDM'ler, su, taş veya kaya gibi duyulur ısı depolama malzemelerine kıyasla birim hacim başına 5–14 kat daha fazla ısı depolama kapasitesine sahiptir (Khan vd., 2016). Faz değişimi, katı–katı, katı–sıvı, katı–gaz ve sıvı–gaz gibi çeşitli biçimlerde gerçekleşebilir. Katı–sıvı geçişleri, termal enerji depolama sistemlerinde ekonomik olarak cazip bir seçenek olarak değerlendirilir; zira bu dönüşümler, sıvı–gaz geçişlerine göre daha düşük gizli ısıya sahip olup, hacimde yalnızca küçük bir değişiklik meydana getirir (Wu, 2010; Harmen vd., 2021). Diğer tekniklerle karşılaştırıldığında, gizli termal enerji depolama sistemleri, yüksek enerji depolama yoğunluğu sağlama ve faz geçiş sıcaklığına karşılık gelen sabit bir sıcaklıkta ısı depolama yetenekleri nedeniyle daha avantajlıdır (Bose ve Amirtham, 2016) (Şekil 3).



Şekil 3. Duyulur ve gizli ısı karşılaştırması (Togun vd., 2024)

Birçok FDM, çeşitli sıcaklık aralıklarında ergime ısısına sahip olabilir. Ancak, bu malzemelerin etkili bir şekilde kullanılabilmesi için belirli termodinamik, kinetik ve kimyasal özelliklere sahip olmaları gerekmektedir (Mahlia vd., 2014; Ben Romdhane vd., 2020; Mabrouk vd., 2022).

1.2.3. Termokimyasal Isı Depolama

Termokimyasal enerji depolama sistemleri, kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla enerji depolama yöntemlerini kullanır. Bu sistemlerde, enerji, geri dönüşümlü bir kimyasal reaksiyon sırasında emilir; bu süreç genellikle endotermik bir reaksiyondur (Cot-Gores vd., 2012). Termokimyasal malzemeler, faz değişim maddeleri (FDM) ve akılcı ısı depolama ortamlarına kıyasla daha yüksek enerji yoğunluklarına sahiptir (Cabeza vd., 2015). Bu yüksek enerji yoğunluğu, termokimyasal enerji depolama sistemlerinin, gizli ısı ve duyulur ısı depolama sistemlerine göre daha kompakt bir enerji depolama kapasitesi sunmasını sağlar. Bu özellik, özellikle sınırlı depolama alanlarının bulunduğu durumlarda büyük avantaj sağlar. Ancak, bu sistemlerin dezavantajları arasında karmaşıklık ve yüksek maliyet yer almaktadır (Abedin ve Rosen, 2011) .

1.3. Faz Değiştiren Maddeler (FDM)

Faz değiştiren maddeler (FDM) sabit sıcaklıkta faz değişimine uğrayarak bulunduğu ortamdan ısı almak veya ortama ısı vermek yoluyla ısıl konforun sürekliliğini sağlayan akıllı malzemelerdir. Yani bir fazdan diğer bir faza geçiş esnasında, faz değiştirme prosesi süresince ısı soğurabilen ve bu ısıyı depolayabilen, tam tersi faz değişimi durumunda ise depoladığı bu ısıyı yayabilen malzemelerdir (Kuznik vd., 2011; Choure vd., 2023; Togun vd., 2024).

Faz değişim maddelerine (FDM) dayalı termal enerji depolama sistemleri, duyulur ısı depolama sistemlerine kıyasla daha etkili bir alternatif olarak değerlendirilir. Bu sistemler, duyulur ısı depolama sistemlerine oranla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. FDM'ler, katı-katı, katı-sıvı, katı-gaz ve sıvı-gaz faz değişimleri olmak üzere dört ana kategoriye ayrılabilir (Farid vd., 2004; Tyagi vd., 2011 ; Pielichowska ve Pielichowski, 2014).

Katı-katı faz geçişlerinde, bir kristal yapının diğer bir kristal yapıya dönüşmesi sırasında ısı depolanır. Bu geçişler genellikle düşük gizli ısı ve küçük hacim değişiklikleri gösterir, dolayısıyla katı-katı FDM'ler, daha az kaplama gereksinimi ve daha yüksek tasarım esnekliği sunar. Katı-gaz ve sıvı-gaz geçişleri, genellikle daha yüksek gizli ısıya sahip olmasına rağmen, büyük hacim değişiklikleri gösterir; bu durum, kaplama problemlerine yol açarak bu tür FDM'lerin termal enerji depolama sistemlerinde kullanılabilirliğini sınırlar. Katı-sıvı geçişleri, sıvı-gaz geçişlerine kıyasla daha düşük gizli ısıya sahiptir ancak hacim değişimi yalnızca küçük bir oranda gerçekleşir. Bu özellikler, katı-sıvı geçişini termal enerji depolama sistemlerinde en cazip ve ekonomik seçenek haline getirir.

Piyasada mevcut çeşitli FDM'ler bulunmakla birlikte gizli ısı depolama ortamı olarak kullanılabilecek yeni malzemelerin araştırılması sürekli olarak devam etmektedir. Bu bağlamda, bir FDM'nin belirli bir uygulama için en uygun seçenek haline gelmesini sağlayan temel malzeme özelliklerinin tanımlanması kritik öneme sahiptir. Termal enerji depolama sistemlerinin tasarımında kullanılacak FDM'lerin, bazı termofiziksel, kinetik, kimyasal ve ekonomik özelliklere sahip olması gerekmektedir (Mehling ve Cabeza, 2008; Sharma vd., 2009). Termal enerji depolama sistemlerinde kullanılacak FDM'lerin genel özellikleri aşağıda verilmiş olup, genellikle bir malzemenin tüm bu kriterleri aynı anda karşılaması oldukça zordur (Tyagi ve Buddhi, 2007; Osterman vd., 2012).

a) Fiziksel Gereksinimler

- Depolama kabının boyutunu minimize etmek için yüksek yoğunluk.
- Kaplama sorunlarını azaltmak için küçük hacim değişimi.
- Kaplama sorunlarını azaltmak için düşük buhar basıncı.
- Depolama kapasitesinin döngüler boyunca istikrarını sağlamak için uygun faz dengesi.

b) Kinetik Gereksinimler

- Erime ve donmanın doğru sıcaklık geçiş aralığında gerçekleşmesini sağlamak için aşırı soğuma olmamalıdır.
- Yeterli bir kristalleşme hızına sahip olmalıdır.

c) Isıl Gereksinimler

- Her uygulama için ısı depolama ve serbest bırakma işlemlerinin doğru sıcaklıkta gerçekleşmesini sağlamak için uygun faz geçiş sıcaklığı.
- Depolama hacmini minimize etmek amacıyla yüksek latent ısı, bu sayede büyük bir enerji depolama yoğunluğu elde edilmelidir.
- Şarj ve deşarj işlemleri sırasında latent ısının kısa sürede depolanması ve serbest bırakılması için yüksek termal iletkenlik.

d) Kimyasal Gereksinimler

- Birçok döngüden sonra bozulmayı önlemek için kimyasal stabilite.
- Kaplama ile korozyon problemlerini önlemek için diğer malzemelerle uyumluluk.
- Güvenlik ve çevresel etki için toksik, yanıcı ve patlayıcı olmayan özellikler.

e) Ekonomik Gereksinimler

- Diğer termal depolama teknolojileri ile rekabetçi olabilmek için düşük maliyet.
- Çevresel ve ekonomik nedenlerle yenilenebilir olma.
- Bol ve kolay erişilebilir olma.(Akgün, 2023; Kaygusuz, 2024)

1.4. Faz Değiştiren Malzemelerin Sınıflandırılması

FDM'lerin sayısı son yıllarda önemli derecede artmış ve artmaya devam etmektedir. Genel olarak FDM'ler erime sıcaklığı aralığına göre üç alt kategoriye ayrılır: düşük sıcaklık FDM'leri, orta sıcaklık FDM'leri ve yüksek sıcaklık FDM'leri (Şekil 4).

Organik FDM'ler, 0-100 °C sıcaklık aralığında en yaygın kullanılan faz değişim malzemeleridir ve binaların yanı sıra elektronik cihazların termal yönetiminde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu malzemeler genellikle düşük maliyetli ve kullanım açısından pratiktir; yüksek enerji yoğunluğu sunar ve geniş bir moleküler ağırlık aralığına sahip oligomer ve polimer sınıflarından oluşurlar, böylece farklı çalışma sıcaklıkları için çeşitli seçenekler sunarlar. Ayrıca, organik FDM'ler toksik değildir, uçucu maddeler salmaz ve erime noktasında tekdüze davranış sergilerken, önemsiz derecede süper soğuma gösterirler (Pielichowska ve Pielichowski, 2014). İnorganik faz değişim malzemelerine kıyasla, organik faz değişim malzemeleri daha az aşırı soğuma ve faz ayrışması gösterir ve çeşitli yapı malzemelerine emilim açısından daha uygundur (Sharma vd., 2009; Baetens vd., 2010; Sarier ve Önder, 2012; Kalnæs ve Jelle, 2015; Souayfane vd., 2016).

Bununla birlikte, organik FDM'lerin termal iletkenliği genellikle düşüktür. Bu problem, ısı transfer alanını artırarak, yüksek termal iletkenliğe sahip kaplar kullanarak veya metalik ve karbon bazlı mikro/nano dolgular ekleyerek aşılabılır (Pielichowska ve Pielichowski, 2014). Bir diğer dezavantajı ise hidrokarbon yapısından kaynaklanan yanıcılıktır; ancak, bu malzemelerin ateşleme noktaları yaklaşık 200 °C civarındadır, bu da çalışma sıcaklık aralığının oldukça üstündedir.

Organik FDM'ler iki ana gruba ayrılır, bunlar parafinler ve parafin olmayanlardır (Gulfam vd., 2019). Parafin mumları, organik faz değişim malzemeleri arasında en yaygın olarak kullanılan türdür ve genel olarak C_nH_{2n+2} genel formülü ile ifade edilen doymuş hidrokarbonlardır. Genel olarak, hidrokarbon zincirinin ortalama uzunluğundaki artış, erime gizli ısısını ve erime sıcaklığını artırmaktadır. Parafinler, güvenilir, düşük maliyetli ve korozyona karşı dayanıklı olmalarıyla bilinir; ayrıca kimyasal stabilite, ayrışma ve süper soğuma eksikliği, iyi çekirdeklenme özellikleri ve sabit termofiziksel özellikler gibi avantajlara sahiptirler. Bununla birlikte, bu malzemenin bazı dezavantajları da bulunmaktadır: düşük termal iletkenlik, geniş sıcaklık geçiş aralığı, plastik kaplarla uyumsuzluk, katı-sıvı geçişi sırasında yüksek hacim değişimi ve sıklıkla yanıcılık (Lane ve Shamsundar, 1983; Pielichowska ve Pielichowski, 2014; Sharma vd., 2015; Kahwaji vd., 2018; Gulfam vd., 2019). Yaygın olarak kullanılan parafin FDM örneklerini Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. FDM olarak araştırılan bazı parafin örnekleri (Mehling ve Cabeza, 2008)

FDM	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime entalpisi (J/g)
n-Tetradekan (C ₁₄ H ₃₀)	6	230
n-Pentadekan (C ₁₅ H ₃₂)	10	212
n-heksadekan (C ₁₆ H ₃₄)	18	210-238
n-Heptadekan (C ₁₇ H ₃₆)	19	240
n-oktadekan (C ₁₈ H ₃₈)	28	200-245
n-Eikozan (C ₂₀ H ₄₂)	38	283
n- Triakontan C ₃₀ H ₆₂	66	-
n- Tetrakontan C ₄₀ H ₈₂	82	-

Parafin olmayan malzemeler; yağ asitleri, esterler, glikoller ve alkollerdir. Bunlar organik FDM'lerin en büyük kategorisini temsil ederler. Bu malzemeler yanıcı özellikte olup, aşırı yüksek sıcaklık, alev veya oksitleyici ajanlara maruz bırakılmamalıdır. Bu sınıfta yer alan yağ asitleri, kimyasal formülü $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ ile temsil edilir ve ikinci en popüler organik katı-sıvı FDM' lerdir. Yağ asitleri, laurik, miristik, kaprik, kaprilik, palmitik ve stearik olmak üzere altı sınıfa ayrılır. Yüksek erime entalpisi değerlerine (45-210 J/g) ve geniş bir erime sıcaklığı aralığına (-5 ila 70 °C) sahip olmalarına rağmen, parafinlerden üç kat daha pahalıdır. Bitkisel veya hayvansal biyolojik kaynaklardan üretilmediği ve biyolojik olarak parçalanabildiği için, düşük/orta sıcaklık uygulamaları, örneğin güneş enerjisi depolama ve iç mekân termal yönetimi gibi alanlarda parafinlerin yerini alabilecek alternatifler olarak kapsamlı çalışmalar yapılmıştır (Kuznik vd., 2011; Sharma vd., 2015; Nazari vd., 2020; Sulaiman ve Mohamad Amini, 2022). Yaygın olarak kullanılan yağ asidi FDM örneklerini Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. FDM olarak araştırılan bazı yağ asitleri (Mehling ve Cabeza, 2008)

FDM	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime entalpisi (J/g)
Kaprilik asit $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{COOH}$	16	149
Kaprik asit $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$	32	153
Laurik asit $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	42-44	178
Miristik asit $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	85	186.204
Palmitik asit $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	61.64	185.203

Poli(etilen glikol)ler (PEG'ler), dimetil eter zincirlerinden oluşan bir yapı içerir: $\text{HO-CH}_2\text{-(CH}_2\text{-O-CH}_2\text{)-}_n\text{-CH}_2\text{-OH}$. Bu polimerler, hem hidrokarbon dizilerini hem de -OH gibi polar grupları içeren amfipatik bir doğaya sahiptir, bu nedenle hem su hem de bazı organik çözücülerde çözünebilmektedir (Sarier ve Önder, 2012). PEG'ler, aynı zamanda polietilen oksit ya da polietilen oksit olarak bilinir, dimetil eter zincirinden türetilmiştir ve biyolojik bazlı olmamakla birlikte organik bir bileşiktir. Suda ve organik çözücülerde çözünebilir. Kimyasal ve termal kararlılığı, yanmaz, toksik olmaması ve korozyona karşı dirençli olması nedeniyle FDM olarak kullanımı yaygındır. PEG'in ergime sıcaklığı 4–70°C arasında değişir ve molekül ağırlığı arttıkça ergime sıcaklığı ve füzyon ısısı da artar. Füzyon ısısı 117 ile 174 kJ/kg arasında değişiklik gösterir (Sharma vd., 2015). PEG'lerin erime sıcaklığı ve erime entalpisi, moleküler ağırlık ile birlikte artış gösterir; örneğin, PEG600, 18.5 °C'de erir ve 121.1 J/g erime entalpisi sağlar; PEG2000 ise 61.2 °C'de erir ve 176.2 J/g erime entalpisine sahiptir. Diğer organik FDM'ler gibi, PEG'lerin düşük termal iletkenliği, uygulama alanlarında dikkate alınması gereken bir sınırlamadır (Sundararajan vd., 2017). PEG'ler, biyo-bozunur ve biyo-uyumlu özelliklere sahip olup, ilaç taşıma sistemlerinde de kullanılmaktadır. Bu özellik, PEG'lerin bir FDM olarak kullanımını genişletmiş ve insan vücudu içindeki uygulamalarda, örneğin akrilik kemik çimentolarının yerinde polimerizasyonu sırasında ısıyı uzaklaştırarak çevredeki biyolojik dokuların aşırı ısınmasını ve zarar görmesini önlemede kullanımlarını teşvik etmiştir (Król vd., 2016). Yaygın olarak kullanılan bazı PEG örneklerini Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. FDM olarak araştırılan PEG örnekleri (Mehling ve Cabeza, 2008)

FDM	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime entalpisi (J/g)
PEG 400	8	100
PEG 600	17-22	127
PEG 1000	35-40	160
PEG 3000	52-56	150-200
PEG 6000	57	176-200
PEG 10000	55-60	179

İnorganik FDM'ler genellikle organik FDM'lerden daha yüksek yoğunluklara sahiptir. Bu durum, birim kütle başına benzer entalpi değerlerine sahip olmalarına rağmen, hacim başına entalpi değerlerinin önemli ölçüde daha yüksek olmasını sağlar ve böylece daha

kompakt enerji depolama sistemlerinin üretilmesine olanak tanır. İnorganik FDM'ler, tuzlar, tuz hidratları ve metal alaşımları gibi çeşitli malzeme sınıflarını içerir (Muthukumar ve Niyas, 2020).

Ötektik FDM'ler, organik veya inorganik bileşenlerin karışımlarından oluşur ve bu karışımlar, uyumlu bir şekilde erir ve donar. Ötektik FDM'ler, belirgin bir erime noktası ve yüksek faz değişim entalpisi sunar. Ayrıca, özellikleri belirli uygulama gereksinimlerini karşılayacak şekilde özelleştirilebilir. Sıvı durumda tamamen çözünürler ve donduklarında kristallerin homojen bir karışımını oluştururlar (Sharma vd., 2009; Cabeza vd., 2011). Bu da ayrılma olmadan bir faz geçişini sağlar. Genellikle, hedef uygulama için özel olarak tasarlandıklarından, diğer FDM türlerine kıyasla genellikle daha yüksek maliyetlidirler.

1.5. FDM Teknolojisinin Pratik Uygulamalardaki Temel Sorunları ve Potansiyel Çözümleri

Faz değişim malzemesinin seçim kriterlerinin ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmesi, malzemenin tüm gereksinimleri karşılayacağı anlamına gelmeyebilir. FDM'lerin uygulanmasında genellikle karşılaşılan sorunlar arasında sıvı fazda sızıntı, düşük ısı iletkenlik, faz ayrımı ve aşırı soğuma yer almaktadır (Li vd., 2023). Ancak, bu sorunlar, geliştirilmiş tekniklerin uygulanmasıyla çözülebilir veya önenebilir. Aşağıda, bu problemler ve potansiyel çözüm stratejileri özetlenmiştir.

1.5.1. FDM' lerde Sızıntı, Paketleme ve Bileşen Uyumu

FDM'lerin pratik uygulamalarda kullanımındaki başlıca dezavantajlardan biri, sızıntıyı önlemek amacıyla uygun bir şekilde paketleme gerekliliğidir (Huang vd., 2023). FDM'lerin enerji depolama sistemlerine entegre edilirken sıvı fazda akma, bozulma veya sistemle temas etme sorunlarını önlemek amacıyla, bu malzemelerin genellikle paketlenmesi, kapsüllenmesi ya da gözenekli destek malzemelerine veya metal köpüklere emprenye edilmesi gerekmektedir. Bu yöntemler, FDM'lerin sıvı fazda sistem içinde tutulmasını sağlar ve FDM'nin çevre ile temasını engeller. Böylece çevresel zararlardan veya bileşen değişikliklerinden kaçınılmasını mümkün kılar. Paketleme teknikleri, temel olarak kapsülleme yöntemleri ve şekil-stabilizasyon yöntemleri olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

Şekil-stabilizasyonu terimi bazen "paketleme" ile eşanlamı olarak kullanılmakta ve mikroenkapsülasyon tekniklerini de kapsayabilmektedir (Umair vd., 2019). Bununla birlikte, literatürün büyük bir kısmı "şekil-stabilizasyonu" terimini, FDM sızıntısını önleyen ancak enkapsülasyonun dışında kalan tüm yöntemleri tanımlamak için kullanmaktadır. Şekil-stabilizasyon teknikleri, FDM'leri erimiş halde bile sızdırma veya dışarı çıkma olmaksızın yapısal olarak stabil kalmasını sağlamak amacıyla katmanlı veya gözenekli malzemeler, inorganik nanodolgular veya polimer matrislerin eklenmesiyle kompozit bir FDM oluşturulmasını içerir. Bu yöntemler, genellikle mikroenkapsülasyon tekniklerine kıyasla daha düşük maliyetli olup daha yüksek termal iletkenlik sunmaktadır; ancak, FDM tamamen dış ortamdan izole edilemediğinden, termal çevrimler sırasında bir miktar sızıntı gözlemlenebilir.

Kapsülleme yöntemlerinde, FDM'yi çevresel etkilerden fiziksel olarak izole eden, tüm çalışma sıcaklık aralığında stabil kalan ve faz geçişi ile ilişkili hacim değişimini karşılayabilen kaplar kullanır. Bu kaplar, makro, mikro veya nano boyutlarda ve çeşitli şekil ve malzemelerden olabilir (Huang vd., 2023).

Makroenkapsülasyon, FDM'yi sistem içerisinde tutmanın en basit yöntemidir. Bu yöntem, termal iletkenliği yüksek (örneğin alüminyum veya paslanmaz çelik gibi) ve FDM ile kimyasal olarak uyumlu malzemelerden yapılmış bir kutu veya tank kullanımını içerir. Kap, düşük viskoziteli FDM'lerin bile sızdırılmasını önlemek için uygun şekilde kapatılmalı ve tasarım, faz değişimi sırasında meydana gelen hacim genişlemesi ve daralmasını dikkate almalıdır (Huang vd., 2023). Güç gereksinimleri yüksek değilse, hacim değişimini karşılayabilen ve boşluk alanı gerektirmeyen ince esnek plastik torbalar da kullanılabilir.

Mikroenkapsülasyon, 1 µm ile 1000 µm çapında katı veya sıvı parçacıkların katı bir kabuk ile çevrenmesini ifade eder (Memon, 2014; Huang vd., 2023). FDM'ler, bir polimer veya inorganik kabukla mikro düzeyde kapsüllenebilir ya da bir jel içinde hapsedilerek polimer yapılar içinde sisteme entegre edilebilir. Mikron ölçekli kapsüllerle gerçekleştirilen bu kapsülleme tekniği, iki temel avantaj sağlar. Birincisi mikroenkapsülasyon edilmiş FDM'ler beton gibi diğer malzemelere basit karıştırma yöntemleriyle entegre edilebilir ve ayrıca FDM içeren ısı transfer sıvıları üretmek için sıvılara eklenebilir. İkinci olarak, arttırılmış özel yüzey alanı, ısı transfer yüzeyini genişleterek genel termal değişimi iyileştirir. Kapsül kabukları, birçok erime ve katılaşma döngüsü boyunca stabil kalmalı ve FDM ile kimyasal etkileşime girmemelidir.

Özetle, FDM'lerin sıvı fazda akma eğilimini ve dış ortam ile doğrudan temasını önlemek amacıyla uygun kapsülleme yöntemi seçilirken, kullanılan FDM türünün uygunluğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu seçim sürecinde, FDM'nin depolandığı sistem üzerindeki potansiyel etkileri veya depolama sisteminin FDM üzerinde yaratabileceği olumsuz etkileri dikkate alınmalıdır. Bu etkiler, FDM ile depolama malzemesi arasında kimyasal reaksiyonlar, korozyon veya FDM'nin sıvı fazda sızması şeklinde ortaya çıkabilir. Örneğin, inorganik FDM'lerin metalik depolama kaplarına karşı korozif olduğu ve organik FDM'lerin organik kapları yumuşattığı bilinmektedir. Bu nedenlerle, depolama ortamının seçimi, bu kriterler dikkate alınarak yapılmalıdır (Huang vd., 2023).

1.5.2. FDM' lerde Düşük Isıl İletkenlik ve İyileştirme Yöntemleri

Metalik kökenli FDM'ler hariç, diğer tüm FDM türleri düşük termal iletkenlik özellikleri sergilemektedir. Özellikle organik FDM'ler, en düşük termal iletkenliğe sahip olup, inorganik FDM'lerin termal iletkenliği ise organik FDM'lere kıyasla biraz daha yüksektir (İbrahim vd., 2017). Organik FDM'lerin en önemli dezavantajlarından biri, düşük termal iletkenlikleri nedeniyle enerjiyi depolama ve serbest bırakma hızlarının azalmasıdır. Bu durum, hızlı ısıtma veya soğutma uygulamalarında faz değişim sürecinin tamamlanmasını engelleyebilir ve dolayısıyla enerji depolama sistemlerinin tam kapasiteyle kullanılmasını sınırlayabilir (Qureshi vd., 2018).

Bu sorunu çözmek ve ısı transfer hızını artırmak amacıyla, ısı değişim yüzeyinin genişletilmesi ve/veya yüksek termal iletkenliğe sahip dolgu maddeleri, kaplar ve stabilize edici malzemelerin kullanılması gibi çeşitli stratejiler geliştirilmiş ve uygulanmaktadır (Liu vd., 2016; Lin vd., 2018).

Karbon bazlı dolgu maddeleri, yüksek termal iletkenlik, önemli termal stabilite ve düşük yoğunluk gibi özellikleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilen dolgu maddelerindendir. Bu dolgu maddeleri, karbon fiberleri ve nanofiberler, karbon nanotüpler ve grafen oksit, genişletilmiş grafit gibi çeşitli morfolojilerde bulunabilir. Son yıllarda, grafit, yüksek termal iletkenliği, düşük yoğunluğu ve kimyasal direnç özellikleri nedeniyle faz değişim maddesi (FDM) depolama sistemlerinde ısı transferini artırıcı bir bileşen olarak geniş çapta araştırılmıştır (Mehling ve Cabeza, 2008; Pincemin vd., 2008 ; Azarifar vd., 2017 ; Wen vd., 2017; Huang, vd., 2017; Gu, vd., 2019 ; Rathore ve Shukla, 2021). FDM-grafit kompozitleri, grafitin gözenekli yapısına FDM'in sızdırılması/empreye edilmesi, grafitin

mekanik olarak FDM içinde dağılması veya önceden karıştırılmış grafit ve FDM'in sıkıştırılması yöntemleriyle elde edilebilir (Nomura vd., 2010). Ticari olarak çeşitli grafit türleri mevcut olup, bunlar arasında doğal grafit pul parçacıkları, genişletilmiş doğal grafit ve öğütülmüş genişletilmiş doğal grafit yer almaktadır. Örneğin, yapılan çalışmalarda NaNO_3 'ün ısı transferi performansını artırmak amacıyla metal köpük ve genişletilmiş grafit kullanma potansiyelini deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırma sonuçları, bu yöntemlerin hem şarj hem de serbest bırakma aşamalarında ısı transfer hızını artırdığını ortaya koymuştur (Wu ve Zhao, 2011; Zhao ve Wu, 2011).

1.5.3. FDM' lerde Uyumsuz Faz Geçişi ve İyileştirme Yöntemleri

Faz ayrımı bir diğer ifadeyle uyumsuz faz geçişi terimleri malzeme ölçeğinde araştırılan konulardan biridir (Mehling ve Cabeza, 2008). Uyumsuz erime, her erime ve katılaşma döngüsünde, orijinal bileşimden farklı bileşimlere sahip yeni katı ve sıvı fazların çökmesi olarak tanımlanır. Şiddetli durumlarda, bu yeni bileşimler orijinal karışımdan farklı erime ve katılaşma aralıklarına sahip olabilir. Bu sıcaklık aralıkları, şarj ve boşaltma işlemleri için belirlenen uygulama sıcaklıklarının dışında olduğunda, malzeme bir sonraki erime ve katılaşma döngülerine katılmayacaktır. Sonuç olarak, sıcaklık aralığı ayarlanmadıkça ve başlangıç bileşimi geri getirilmedikçe depolama kapasitesinde bir azalma gözlemlenir. Bu durum, malzemeyi tamamen sıvı hale getirip sıvı fazı karıştırarak düzeltilebilir. Uyumsuz erimenin etkilerini önlemek için FDM'in başlangıç bileşimini uyumsuz erime bölgesinden kaçınacak şekilde ayarlamak gereklidir (Rathod ve Banerjee, 2013; Kong vd., 2019). Bu bağlamda faz diyagramları oldukça faydalıdır (Gunasekara vd., 2017). Önceki çalışmalar genellikle faz ayrımının etkilerini incelemek amacıyla DSC ölçümlerini kullanmıştır (Kong vd., 2019).

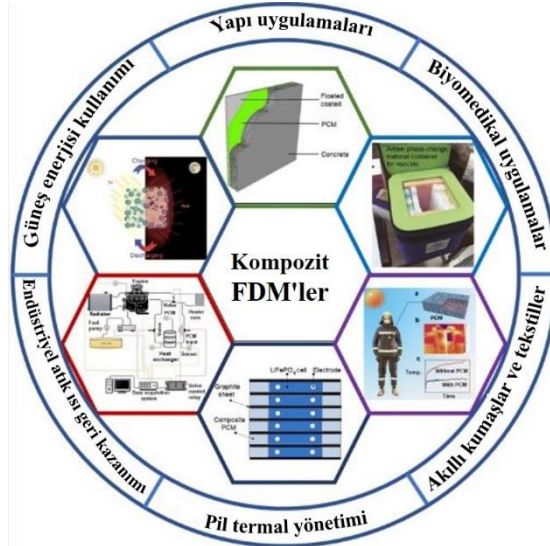
1.5.4. FDM' lerde Aşırı Soğuma ve İyileştirme Yöntemleri

Aşırı soğuma, sıvı fazdaki bir FDM'nin teorik katılaşma/erime sıcaklığının altına soğuması ve bu sıcaklıkta katılaşma başlamadan önce sıvı halde kalması durumudur. Bu depolama tasarımında önemli bir risk oluşturur; çünkü sıvı FDM, soğuk depolama uygulamalarında şarj sıcaklığının altına soğuduğunda, katılaşma gerçekleşmez ve gizli ısı depolanamaz. Bu sorun genellikle organik FDM'lerde görülmemekle birlikte inorganik FDM'lerde daha sık görülen bir sorundur.

Aşırı soğuma sorunu, özellikle depolama ortamında mevcut bir FDM katı fazı veya faz dönüşüm hızlandırıcı varsa, daha büyük ölçeklerde azalır. Bu nedenle, aşırı soğuma etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla genellikle faz dönüşüm hızlandırıcıların kullanılması tavsiye edilmektedir (da Cunha ve de Aguiar, 2020).

1.6. Termal Enerji Depolamada FDM Uygulamaları

Enerji krizinin ve çevresel kirlilikteki artış, yenilenebilir enerji kaynakları ile düşük karbonlu ekolojik şehirlerin geliştirilmesine olan ilgiyi son yıllarda önemli ölçüde artırmıştır. Bu çerçevede, araştırmacılar yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesine büyük önem atfetmekte ve termal enerji depolamanın enerjinin depolanması ve salınması açısından kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır (Zalba vd., 2003; Zhu vd., 2017). FDM'lerin temel avantajı, enerjiyi faz değişimi sırasında depolama ve serbest bırakma yetenekleridir. Bu özellikleri sayesinde, FDM'ler enerji verimliliğini artırmak ve enerji kullanımını optimize etmek için kullanılabilir. FDM'ler, yüksek enerji depolama yoğunluğu ve üstün termal stabilite özellikleri sayesinde, enerji depolama sistemlerinde önemli bir rol oynar ve bu malzemeler güneş enerjisi, bina, elektronik cihazların soğutulması, tekstil, PV/T sistemleri ve termal enerji depolama sistemleri gibi geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir (Şekil 6).



Şekil 6. FDM'lerin kullanım alanları (Shen vd., 2023)

1.6.1. FDM'lerin Güneş Enerjisi Sistemlerinde Kullanılması

Güneş enerjisi, bol ve ücretsiz bir kaynak olup çevresel açıdan temiz bir alternatif enerji seçeneği olarak öne çıkmaktadır. Ancak, güneş enerjisinin doğası gereği kesintili olması, gece saatlerinde güneş ışığının mevcut olmaması gibi sınırlamalar içerir. Ayrıca, güneş enerjisinin erişilebilirliği, bölgenin meteorolojik koşullarına ve iklimsel faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir. Güneş enerjisinin güvenilirliğini artırmak için, enerji ihtiyacını aştığı dönemlerde depolanabilir ve ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilir. Güneş enerjisi, termal, elektriksel, kimyasal ve mekanik yöntemlerle depolanabilir (Hasnain, 1998; Zalba vd., 2003; Mahlia vd., 2014). Bu bağlamda, FDM'ler, güneş enerjisi sistemlerinde gizli ısı enerjisi depolamak için potansiyel bir enerji depolama malzemesi olarak değerlendirilebilir; örneğin, güneş enerjili su ısıtma sistemleri (Kee vd., 2018) ve güneş panelleri (Tian ve Zhao, 2013) gibi uygulamalarda kullanılabilir.

Güneş enerjisi toplama sistemleri arasında, güneş enerjili su ısıtıcıları, nispeten düşük maliyetleri ve basit üretim ile bakım süreçleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Güneş enerjisi, literatürde belirtildiği üzere, FDM kullanılarak gizli ısı biçiminde depolanmaktadır (Oró vd., 2012; Cheng vd., 2017). Güneş enerjili su ısıtıcısının çalışma prensibi şu şekildedir: Sistemde sıcak su çekildiğinde, yerine geçen soğuk su FDM'den enerji alır. Bu enerji transferi, FDM'nin sıvı halden katı hale geçişiyle sonuçlanan bir faz değişimi sağlar. Örneğin Prakash vd. (1985), tabanında FDM tabakası bulunan yenilikçi bir güneş enerjili su ısıtıcısının termal performansını incelemiş ve sonuç olarak güneş ışığı olmayan saatlerdeki sıcak su ihtiyaçlarını karşılamak için bu sistemin etkin olduğunu ortaya koymuşlardır. Güneş kolektörleri, güneş radyasyonunu emerek sıcak su üretir ve çıkış suyu sıcaklığına bağlı olarak düz plaka, vakumlu tüp ve yoğunlaştırılmış tipte olabilir (Şekil 7).



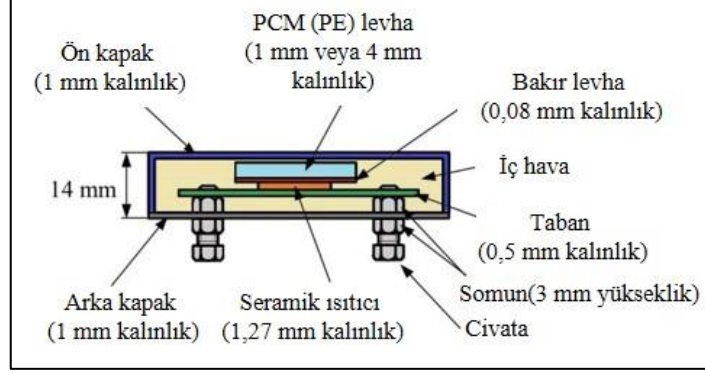
Şekil 7. Güneş enerjisi depolama sistemlerinde FDM'lerin kullanım örnekleri (Douvi vd., 2021)

Yoğunlaştırılmış Güneş Enerjisi (YGES), geleneksel termal santrallerdeki kazan yerine, güneş ışınlarını yoğunlaştırarak buhar üreten optik cihazlar kullanılan bir sistemdir. Doğrudan güneş radyasyonu yetersiz olduğunda veya gece boyunca, çeşitli yakıtlarla çalışan bir kazan devreye girebilir. Alternatif olarak, güneş alanının kapasitesi artırılarak fazla ısı depolanabilir ve bu ısı daha az güneşli zamanlarda kullanılabilir. Bu yaklaşım, güç bloğunun sabit termal güçle beslenmesini sağlayarak verimliliği artırır ve bakım gereksinimlerini azaltır (Py vd., 2013). Gelecekteki, YGES süreçlerinin muhtemelen doğrudan buhar üretimi üzerine kurulması gerektiği düşünüldüğünde, duyulur ısıya dayalı TED (Termal Enerji Depolama) sistemleri termodinamik sınırlamalar gösterebilir. Bu nedenle, FDM veya termokimyasal kavramlar gibi termodinamik sıcaklık kontrolü sağlayan diğer TED teknolojilerinde kapsamlı araştırmalara ihtiyaç vardır. Örneğin; yapılan bir çalışmada bir güneş termik santraline entegre edilen FDM depolama sisteminin performansı incelenmiştir. Sonuçlar, FDM eklenmeden önce sistemin enerji veriminin %30, enerji veriminin %10 olduğunu; FDM'nin yüksek gizli ısı depolama kapasitesi sayesinde enerji veriminin %30'a yükseldiğini ortaya koymuştur (Mahfuz vd., 2014).

1.6.2. FDM'lerin Elektronik Cihazların ve Bataryaların Soğutma Sistemlerinde Kullanılması

Elektronik cihazlar, performans ve ömürlerinin belirli bir sıcaklık aralığında tutulmasına bağlı olduğu için sıcaklığa karşı hassastır ve aşırı ısınmadan kaçınılmalıdır. Boyutları küçülen ve giderek daha karmaşık hale gelen elektronik bileşenlerde aşırı ısınma riski artmaktadır. Aşırı ısınma, elektronik bileşenlerin arızalanmasının yaygın nedenlerinden biridir ve yaklaşık %55 oranında arızanın yüksek sıcaklık veya yetersiz termal yönetimle ilişkili olduğu belirtilmiştir. Sıcaklıktaki 1 °C'lık bir azalma, arıza oranını %4 oranında azaltabilirken, 10-20 °C'lık bir artış arıza olasılığını iki katına çıkarabilir. Termal yönetim sistemlerinin, taşınabilir ve giyilebilir elektronik cihazlar gibi kullanımda olan bileşenlerin ağırlık ve boyut sınırlamalarıyla uyumlu olması gerekmektedir. FDM'ler (Faz Değişim Maddeleri), elektronik cihazların ısı yönetimi için cazip bir alternatif sunar; çünkü cihazlar genellikle uzun süreli sürekli çalışmaz. FDM'ler, cihaz ısı zirveye ulaştığında fazla ısıyı emerek aşırı sıcaklık artışını önler ve sıcaklık düştüğünde ısıyı çevreye geri salar. Etkili FDM'ler yüksek enerji yoğunluğu, faz değişim sıcaklığı ve yüksek termal iletkenlik özelliklerine sahip olmalıdır. (Tan ve Tso, 2004) tarafından yapılan deneysel çalışmalar, n-eicosane bazlı bir FDM'nin küçük el bilgisayarlarında etkin bir pasif soğutma sağladığını

göstermiştir. (Tomizawa vd., 2016) ise, 32°C erime sıcaklığına sahip mikroenkapsüle parafin içeren bir FDM'nin mobil telefonlarda sıcaklık artışını yavaşlatmada etkili olduğunu belirtmiştir (Şekil 8).



Şekil 8. Sıcaklık artışını azaltmak için cep telefonunda FDM uygulaması örneği (Tomizawa vd., 2016)

FDM'ler (Faz Değişim Maddeleri), elektrikli araç bataryalarının termal yönetimi için sıvı/hava dolaşımına dayalı geleneksel soğutma sistemlerini desteklemek veya yerine geçmek amacıyla kullanılabilir (Din vd., 2016; Ianniciello vd., 2018). FDM'lerin otomotiv alanındaki ilk entegrasyon denemeleri, 2000'lerin başında yapılmış olup, her Li-ion hücresinin 30-60 °C erime sıcaklığına sahip bir FDM ile kaplandığı bir batarya paketi önerilmiştir. FDM kullanımı, toplam sıcaklık dalgalanmasını belirgin şekilde azaltmıştır (Hallaj ve Selman, 2000).

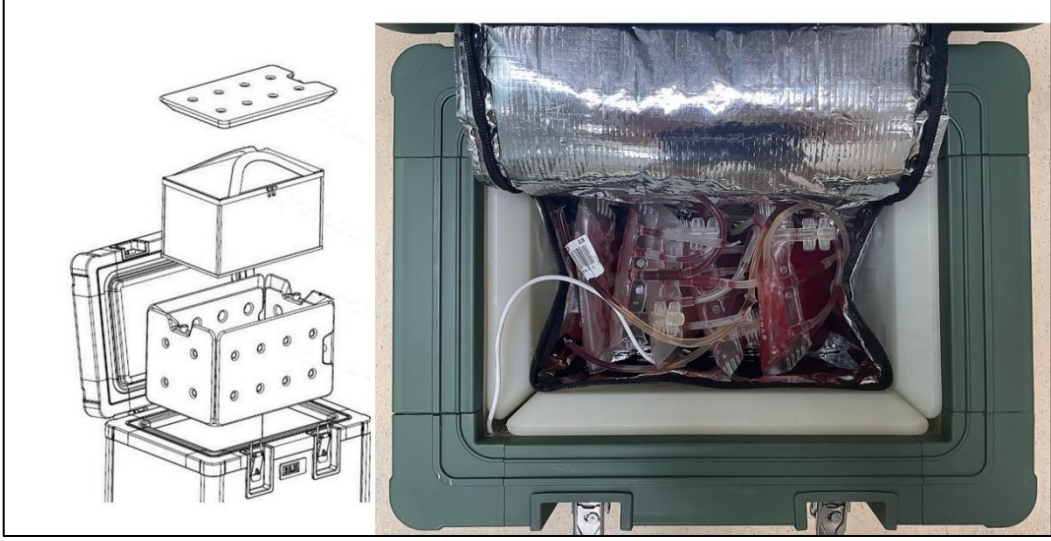
Sonraki çalışmalar, FDM'lerin düşük termal iletkenliğini ve batarya paketindeki termal homojenliği artırma gereksinimini ele almıştır. Metal veya grafit köpükleri gibi malzemelerle termal iletkenlik artırıcı çözümler geliştirilmiştir. Goli vd. (2014) parafin mum ve exfolie grafen içeren kompozit FDM'ler hazırlamış ve bu kompozitlerin yüksek termal iletkenlik sağladığını, batarya paketindeki ısıtma hızını ve maksimum sıcaklığı önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Zou vd. (2019), karbon bazlı nanofiller içeren parafin mumlarının maksimum sıcaklık ve sıcaklık dalgalanmalarını azalttığını bulmuştur.

Diğer yaklaşımlar, aktif ve pasif soğutmayı birleştiren hibrit sistemleri incelemektedir. Örneğin, Al-Hallaj vd. (2005) silindirik Li-ion hücreleri içeren batarya modüllerinde FDM kullanılarak gerçekleştirilen termal yönetim sisteminin, FDM kullanılmayan sistemlere kıyasla batarya ömrünü uzattığını göstermiştir. Ayrıca, FDM kullanımıyla batarya paketinin nominal kapasitesinin yaklaşık %90'ına erişilebildiği belirtilmiştir.

1.6.3. FDM'lerin Biyomedikal Uygulamaları

FDM'ler sabit bir sıcaklıkta fazla ısıyı depolama kapasiteleri nedeniyle biyomedikal uygulamalarda termal koruma sağlamak için çekici hale gelmektedir. Akıllı termoregülasyonlu biyouyumlu kumaşlar, ısı/soğuk terapi ve yanık yara pansumanları gibi uygulamalarda cildin belirli bir sıcaklık aralığında tutulmasını sağlayabilir. Ayrıca, FDM'ler aşırı sıcaklık veya soğuktan koruma amacıyla da kullanılabilir. Örneğin, Król vd. (2016), tarafından yapılan çalışmada, PMMA bazlı kemik çimentosuna şekil stabilizasyonlu PEG eklenmiş ve bu ekleme, pik polimerizasyon sıcaklığını 70.2 °C'den 58.3 °C'ye düşürmüştür, böylece çevre dokuların aşırı ısınmasını önlemiştir. PEG eklemesi ayrıca, kemik çimentosunda mikrometrik gözeneklerin oluşumuna neden olmuş, bu da kompresyon dayanımını azaltmış ancak hücre proliferasyonunu ve osteointegrasyonu artırmıştır. FDM'ler ayrıca, Lv vd. (2011) tarafından önerilen bir yöntemde tümör karyocerrahisi sırasında da kullanılabilir; FDM'ler tümör çevresine enjekte edildiğinde, kristalleşme sırasında salınan ısı, sağlıklı dokuların aşırı soğumasını önleyerek zarar ve nekrozu azaltabilir. Teorik çalışmalar, FDM eklemenin tümör hücrelerinin nekrozunu artırabileceğini ve çevredeki dokulara verilen zararı minimize edebileceğini göstermiştir.

Ayrıca medikal ürünlerin depolanması ve taşınmasında FDM'ler, yüksek maliyetli ve sıcaklık hassasiyeti bulunan bu ürünlerin özelliklerini koruması açısından uygun bir çözüm sunmaktadır. Bu ürünlerin taşıma sıcaklıkları, ürün türüne bağlı olarak 20 °C ile 24 °C, 2 °C ile 6 °C, veya -30 °C ile -26 °C arasında değişiklik göstermektedir. FDM'ler, taşıma sistemlerinde bu sıcaklık aralıklarını korumak için kullanılır. Örneğin, eritrositler geliştirilen bir kan taşıma kabı ile kabın iç sıcaklığı, güç kaynağı olmadan uzun bir süre 2–10 °C aralığında korunabilmiştir. Bu kan taşıma kabı FDM'ler ile oluşturulmuş kompozit soğutma plakalarından oluşmakta ve bir ısı yalıtım kutusuna yerleştirilmiştir (Şekil 9) (Wang vd., 2023). Ayrıca, iyi yalıtılmış taşıma kaplarında FDM'lerin termal düzenleme özellikleri daha verimli sonuçlar vermektedir. Bu uygulamaların başarılı örneklerinden biri, İsveçli AB Aircontainer A.C. şirketi tarafından sunulmuştur. Örneğin, İsveç'ten Kanada'ya taşınan bir tıbbi ürün, sıcaklığının +2 °C ile +8 °C arasında tutulması gereken bir nakliye kutusunda, 105 saat sonunda +5.6 °C olarak ölçülmüştür (Mehling ve Cabeza, 2008).

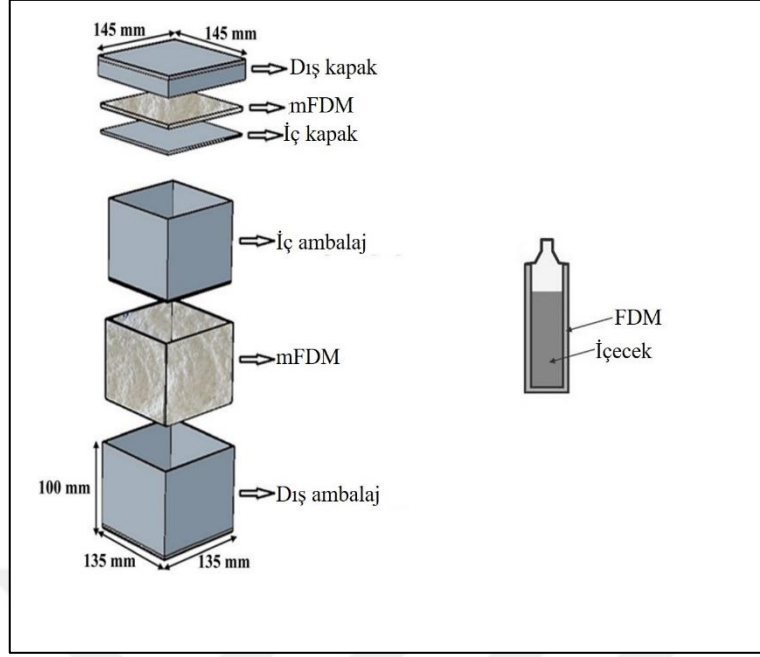


Şekil 9. Eritrositler (RBC) için geliştirilmiş FDM bazlı kan taşıma kabı (Wang vd., 2023)

1.6.4. FDM'lerin Termoregülasyonlu Paketlerde Kullanımı

Bozulabilir ürünlerin taşınması ve depolanmasında sıcaklık kontrolü büyük önem taşımaktadır. Geleneksel yalıtım yöntemleri bu sorunu çözmekte yetersiz kalabilir, bu nedenle ısı yönetimi özelliklerine sahip akıllı ambalajların geliştirilmesi önem kazanmıştır. Özellikle, -5°C ile 10°C arasındaki erime sıcaklığına sahip organik FDM'ler, aktif soğutma ihtiyacını azaltarak ürünlerin korunmasına katkı sağlar. Çeşitli araştırmalar, FDM destekli ambalajların, içerideki sıcaklığı uzun süre sabit tutarak termal tamponlama sağladığını göstermektedir. Örneğin, Ünal vd. (2019), tarafından geliştirilen FDM'li karton kutular, ürünleri 8,8 saat boyunca koruyabilmiştir (Şekil 10).

FDM'ler, yiyeceklerde olduğu gibi içeceklerin muhafazası için de kullanılabilir. Örneğin, izotermal şişe olarak bilinen çift duvarlı bir şişede, FDM'ler şişenin duvarları arasındaki boşluğu doldurur. Bu tür bir şişe, içindeki FDM'yi katılaştırmak amacıyla önceden soğutulmalı ve sonrasında içeceği 25°C ortam sıcaklığında yaklaşık 3 saat boyunca 13°C 'de soğuk tutabilmektedir (Mehling ve Cabeza, 2008). Ayrıca, FDM içeren ticari olarak temin edilebilir ürünler de yiyecek ve içeceklerin sıcak veya soğuk muhafazası için kullanılmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. FDM'nin yemek ve içecek paketi olarak kullanımının şematik görünümü
(Mehling ve Cabeza, 2008; Ünal vd., 2019)

1.6.5. FDM'lerin Termal Konforlu Tekstil Ürünlerinde Kullanımı

FDM'lerin tekstillere entegre edilmesi, aşırı sıcaklık koşullarında vücut sıcaklığını düzenleyen akıllı tekstillerin geliştirilmesine olanak sağlar. Bu teknolojinin ilk örneklerinden biri NASA tarafından geliştirilmiş olup, uzay giysilerinde sıcaklık değişimlerinin etkisini sınırlamak amacıyla FDM eklenmiştir (Mondal, 2008). Günümüzde, bu tür akıllı tekstiller dağcılık kıyafetleri, battaniyeler, yataklar ve yastık kılıflarında termal konforu artırmak amacıyla kullanılmaktadır (Pielichowska ve Pielichowski, 2014). FDM'ler, sentetik tekstillere çeşitli yöntemlerle entegre edilebilir, ancak genellikle çekirdek-kılıf elyaf yapıları veya mikro kapsülleme teknikleri tercih edilir. Bu yaklaşımlar, FDM'nin elyaf içinde stabil kalmasını sağlarken, üretim sürecindeki zorlu koşullar FDM mikro kapsüllerine zarar verebilir. Outlast Technologies gibi firmalar, FDM içeren polimer elyaflar ve kaplamalar geliştirmekte olup, bu malzemeler giysi, ayakkabı ve yatak ürünlerinde kullanılmaktadır (Outlast®, 2018). Ayrıca, FDM içeren elyaflar, termoplastik kompozitler üretmek için de kullanılabilir.

1.6.6. FDM'lerin Binalarda Kullanımı

Son yıllarda binalarda enerji tüketimi, nüfus artışı, iklim değişikliği ve termal konfor gibi iç ortam kalitesine yönelik artan talep, enerji verimliliği çözümlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Konut ve ticari binalar, toplam birincil enerjinin %40'ından fazlasını tüketmekte ve küresel CO₂ emisyonlarının yaklaşık %19'unu oluşturmaktadır (Cao vd., 2016). FDM'ler, binalarda termal enerji depolama (TED) sistemlerinin geliştirilmesinde potansiyel bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, son yıllarda FDM'lerin binalarda pasif veya aktif enerji depolama sistemlerinde kullanım olanakları sıklıkla araştırılmaktadır. FDM'lerin binalarda pasif ve aktif TED uygulamaları bulunmaktadır. Pasif yöntemler, FDM'lerin yapı malzemelerine entegre edilmesiyle çalışırken, aktif yöntemler evsel zemin ısı pompaları, klima üniteleri gibi HVAC sistemlerine entegrasyonunu içermektedir.

Pasif termal enerji depolama (TED) sistemleri, geniş ısı transfer yüzey alanına sahip olmaları ve ek bir enerji sistemi gerektirmemeleri nedeniyle, aktif sistemlere kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. Pasif TED sistemleri, FDM'lerin doğrudan yapı malzemelerine entegre edilmesi yoluyla uygulanır ve bu sayede enerji depolama kapasitesine ulaşmak için ek bir ekipman ihtiyacı ortadan kalkar. Pasif depolama sistemlerine örnek olarak FDM'lerin duvar panelleri, tavanlar veya zemin malzemelerine entegre edilmesi gösterilebilir. Bu malzemeler, gün içerisinde (pik saatlerde) fazla termal enerjiyi depolayarak, gece (pik olmayan saatlerde) bu enerjiyi serbest bırakmakta ve aşırı hava koşullarında bile sıcaklık düzenlemesini sağlamaktadır (Pielichowska ve Pielichowski, 2014). İç mekân termal konforu, genellikle 18 °C ile 25 °C arasındaki sıcaklık aralığında sağlandığından, bina uygulamaları için seçilen FDM'lerin faz değişim sıcaklıklarının da bu aralığa uygun olması gerekmektedir (Kenisarin ve Mahkamov, 2016). FDM'lerin bina uygulamalarında kullanımına dair bazı örnekler Şekil 11'de sunulmuştur.



Şekil 11. FDM'lerin bina uygulamalarında kullanımına dair örnekler (Zahir vd., 2023)

Bina uygulamaları için uygun bir FDM, belirli fiziksel, termal, kimyasal ve kinetik özelliklere sahip olmalıdır. Bunun yanı sıra, maliyet, bulunabilirlik, güvenlik, bina bileşenleri uyumluluk ve malzemenin uzun vadeli güvenilirliği gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır (Pasupathy vd., 2008; Kalnæs ve Jelle, 2015; Sharma vd., 2015; Souayfane vd., 2016). Fiziksel özellikler açısından ise malzemenin, döngüsel stabilite sergilemesi, düşük derecede aşırı soğuma, faz ayrışmasının olmaması, uyumlu erime, yüksek termal iletkenlik, düşük buhar basıncı, minimum hacim değişimi ve faz değişimi sırasında kimyasal stabilite göstermesi gerekmektedir. FDM'lerin bu özelliklere sahip olmasının yanı sıra, bina uygulamalarında başarılı bir TED sisteminin uygulanması büyük ölçüde bu malzemelerin yapı bileşenlerine entegrasyon yöntemlerine bağlıdır. FDM'lerin eklenme yönteminin seçilmesi sırasında dikkate alınması gereken önemli faktörler arasında, FDM sızıntısı, ısı transfer performansı, faz değişimi sürecinde meydana gelen hacim değişiklikleri ve yapı malzemeleri ya da bileşenlerinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz etkiler yer almaktadır (Jegadheeswaran ve Pohekar, 2009; Kenisarin ve Kenisarina, 2012). FDM ekleme yöntemleri genel olarak doğrudan ve dolaylı ilave yöntemleri olarak sınıflandırılabilir.

Doğrudan ilave yöntemi, FDM'lerin yapı malzemelerine entegre edilmesinin en basit ve ekonomik yöntemidir. Sıvı veya toz formundaki FDM, üretim sürecinde doğrudan yapı malzemelerine karıştırılır ve ek bir ekipman veya işlem gerektirmez. Ancak, bu yöntemde

en sık karşılaşılan sorunlar arasında sızıntı problemi ve bazı yapı malzemeleriyle fiziksel ve fizikokimyasal uyumsuzluk yer almaktadır.

Dolaylı faz değişim malzemesi (FDM) ilave yöntemleri, FDM'lerin yapı malzemeleri veya elemanlarına entegre edilmeden önce katı yüzey malzemeleri ile kapsüllemesi ya da birleştirilmesi sürecini ifade eder. Bu yöntem, doğrudan ekleme yöntemine kıyasla bir dizi avantaj sunar. Özellikle, FDM sıvı fazdayken yapı malzemesi içerisinde etkin bir şekilde tutulabilir ve FDM'nin dış çevre ile doğrudan temasının önüne geçilebilir. Dolaylı FDM ekleme yöntemleri, kullanılan ekleme tekniğine ve destekleyici malzemelere bağlı olarak, makro/mikro kapsülleme, şekilce kararlı kompozit FDM'ler ve formca kararlı kompozit FDM'ler olarak sınıflandırılabilir (Sawadogo vd., 2021; Sharma vd., 2022).

Bu nedenle, tez çalışmasında, iç mekân termal konforunu iyileştirmek amacıyla faz değiştiren malzemelerin (FDM) bina bileşenlerine entegre edilerek pasif termal enerji depolama (TED) uygulamalarının kullanılması temel odak noktası olarak ele alınmıştır.

1.6.7. Makro Kapsülleme Yöntemi

Makro kapsülleme yöntemi, FDM'lerin makroskopik kaplar (tüp, torba, küre ve panel vb.) içerisinde hapsedilerek kullanıldığı bir tekniktir. Bu kapsülleme boyutları birkaç milimetreden birkaç litreye kadar değişebilir. Yöntemin temel amacı, büyük miktarda FDM'yi tek bir kapta toplayarak bu malzemeyi çevresel etmenlerden izole etmektir. Bu sayede FDM'nin sıvı faza geçişinden kaynaklanabilecek sızıntılar engellenir ve FDM'nin dış ortamla uyumluluğu artırılır. Ayrıca, malzemeyi transfer etmek ve kullanmak daha kolay hale gelir. Kapsülleme işlemi, uygulamaya uygun şekilde tasarlanabildiği için, bu yöntemin sağladığı esneklik de önemli avantajlar arasında yer alır. Makro kapsülleme, prefabrik yapı elemanlarında, özellikle duvar ve çatı gibi yapıların içerisine FDM'nin entegre edilmesinde yaygın olarak tercih edilir. Yöntemin diğer bir avantajı, FDM'nin beton veya harç gibi yapı malzemeleriyle doğrudan karıştırılmaması sayesinde bu malzemelerin mekanik özelliklerinde herhangi bir bozulmaya neden olmamasıdır. Bununla birlikte, makro kapsülleme yönteminin bazı dezavantajları da vardır. Eğer kapsülleme metal gibi ısı iletkenliği yüksek bir malzeme ile yapılmazsa, ısı iletkenlik düşük kalabilir. Ayrıca, fiziksel tahribata karşı kapsülün korunması gerekir ve FDM'lerin köşeler veya kenarlarda düzenli eriyip katılaşmama olasılığı ısı depolama ve salıverme verimliliğini azaltabilir (Cabeza vd., 2011; Kuznik vd., 2011; Sharma vd., 2022).

1.6.8. Mikro Kapsülleme Yöntemi

FDM'lerin mikroenkapsülasyonu, çekirdek olarak katı veya sıvı fazdaki FDM'nin, polimerik veya inorganik bir malzeme ile kaplanarak mikrokapsüller haline getirilmesi işlemidir. Bu kapsüller, 600 µm ila 1 mm boyut aralığında olup, çekirdeğin FDM'den ve dış kabuğun polimer malzemeden oluştuğu bir yapıdadır. Mikrokapsüller, genellikle küresel veya asimetrik şekillerde üretilebilir. Bu teknik, FDM'lerin yapı malzemelerine entegre edilmesi açısından oldukça pratiktir, çünkü mikrokapsüller yapı malzemelerinin üretimi sırasında çimento veya agrega gibi malzemelerle kolayca karıştırılabilir (Dubey vd., 2009).

Mikroenkapsülleme, FDM'lerin sıvı fazda akışını engelleyerek bu malzemelerin etkili bir şekilde kullanılması için bir çözüm sunar. Ayrıca, polimer kabuğun oluşturduğu bariyer, FDM'lerin kimyasal reaksiyonlara karşı korunmasını sağlayarak çevreyle reaktivitesini önler. Bu yöntemin önemli avantajlarından biri, makro kapsüllemeye kıyasla daha yüksek ısı transfer hızına sahip olmasıdır. Mikronize boyut ve geniş yüzey alanı, ısı transferini hızlandırır ve faz değişimi sırasında oluşan hacim değişiklikleri mikroskobik düzeyde önemli ölçüde azaltılır. Böylece yapı malzemelerinin performansı olumsuz etkilenmez (Hamad vd., 2021). Ancak mikrokapsülleme tekniğinin bazı dezavantajları da mevcuttur. Özellikle polimer kabuğun düşük mukavemeti ve sertliği, yapı malzemeleri ile karıştırma işlemi sırasında kapsüllerin zarar görme veya tamamen kırılma riskini artırır. Ayrıca, bu yöntem makro kapsüllemeye göre daha yüksek maliyetlidir. Buna rağmen, mikroenkapsülasyon, yapı malzemelerinde FDM kullanımının sağladığı avantajlar ve yüksek ısı transfer verimliliği nedeniyle tercih edilmektedir (Regin vd., 2008; Tyagi vd., 2011; Sharma vd., 2022).

1.6.9. Şekilce Kararlı Kompozit Yöntemi

Bu teknikte, FDM'ler kendisinden daha yüksek erime sıcaklığına sahip bir destek malzemesi içinde hapsedilir. Destek malzemeleri arasında polipirol, poliüretan, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), polimetil metakrilat (PMMA), polivinil butiral ve polietilen gibi polimerler yaygın olarak kullanılır (Wang ve Meng, 2010; Silakhori vd., 2015; Tang vd., 2016; Lin, vd., 2018). Şekilce kararlı kompozit FDM'lerin üretimi, destek malzemesinin ve FDM'nin, destek malzemesinin erime sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta karıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Ardından bileşim, camsı geçiş sıcaklığının altına kadar soğutulur katı hale getirilir (Zhang vd., 2006). Bu işlem sonucunda elde edilen kompozit

malzeme, FDM'nin erime noktası civarında şeklini korur, böylece sıvı FDM'nin sızma riskini ortadan kaldırır.

Ancak bu tür kompozitlerin düşük termal iletkenliğe sahip olması, ısı transfer hızını sınırlayan bir dezavantajdır. Bu sorunu aşmak için, kompozitlere yüksek termal iletkenliğe sahip dolgu malzemeleri eklenir, böylece ısı transfer hızı artırılır (Mu vd., 2016; Ouikhalfan vd., 2022). Çeşitli çalışmalar, bu yöntemle üretilen şekilce kararlı kompozit FDM'lerin ısı iletkenliğini geliştirmeye yönelik farklı yaklaşımlar sunmaktadır.

1.6.10. Formca Kararlı Kompozit Yöntemi

Faz değişim malzemelerinde (FDM) sızıntı problemini önlemek için yaygın olarak kullanılan etkili bir yöntem, FDM'leri erime noktalarının üzerinde dahi destekleyici bir matris içinde hapseden ve böylece sızmayı engelleyen formca kararlı kompozit FDM (FKK-FDM) tekniğidir. Bu yöntemde, FDM'ler bir kabukla kaplanmak yerine gözenekli destek malzemelerine emdirilir. Böylece, FDM'ler erime ve katılaşma süreçlerinde gizli ısı depolama ve salınım işlevini yerine getirirken, destek malzemesi sıvı FDM'nin sızıntısını önleyerek malzemenin katı formunun korunmasını sağlar (Sharma vd., 2015; Lv vd., 2017; Arshad vd., 2019). FKK-FDM'ler, FDM'nin gözenekli malzemelere kapiler kuvvetler ve yüzey gerilimi sayesinde emdirildiği bir bileşimdir. Bu yöntem, FDM'lerin stabilizasyonu için destek malzemesinin eritilmesini gerektirmez, çünkü destek malzemesi katı formdadır.

FKK-FDM'ler genellikle doğrudan karıştırma veya vakumla emdirme yöntemiyle üretilir. Doğrudan karıştırma yöntemi, erimiş FDM'nin destek malzemesine atmosferik basınç altında emdirilmesiyle gerçekleştirilir. Ancak bu yöntemde destek malzemesinin FDM absorpsiyon kapasitesi düşük olabilir. Bu sorunu aşmak için vakumla emdirme yöntemi tercih edilir; bu yöntemde sıvı FDM, düşük basınç altında gözenekli malzemelere emdirilir ve bu sayede yüksek FDM absorpsiyon oranı ve daha yüksek termal enerji depolama kapasitesi elde edilir (Sarı vd., 2018; Hekimoğlu vd., 2021; Sharma vd., 2022).

Form stabilizasyonu, kullanılan destek malzemesinin gözenekliliği ile doğrudan ilişkilidir. Gözenekli malzeme seçerken işlenebilirlik, ısı iletkenlik, mekanik ve ısı kararlılık, FDM ile uyumluluk, maliyet ve çevresel etki gibi faktörler dikkate alınır. İnorganik matrisli FKK-FDM'lerde, ara yüzey adsorpsiyon etkisi ve kılcal kuvvetler sayesinde sızıntı sorunu büyük ölçüde çözülür. Ayrıca, inorganik malzemelerin yüksek termal iletkenliği, ısı iletimini artırır. Sepiolit (Konuklu ve Ersoy, 2016), vermikülit (Zhang

vd., 2017), perlit (Zhang vd., 2017), diatomit (Yu vd., 2020), atapulgit (Li vd., 2011), genişletilmiş grafit (Xia vd., 2010), biyo-karbon (Das vd., 2020) ve aktif karbon (Hekimoğlu vd, 2021a) gibi gözenekli malzemeler, FKK-FDM üretiminde yaygın olarak kullanılır.

Ancak, özellikle kil bazlı malzemelerin yenilenemez doğası ve sınırlı rezervleri bu malzemelerin maliyetini artırabilir. Ayrıca, bu malzemeler kullanılmadan önce yüzey modifikasyon işlemlerine ihtiyaç duyabilir, bu da üretim maliyetini yükseltir. Polimer ve karbon esaslı malzemeler de yüksek performans sunarken maliyet açısından dezavantajlı olabilir.

Bu noktada, yenilenebilir bir kaynak olan odun hammaddesi esaslı kompozitler, sürdürülebilir malzeme alternatifleri arasında önemli bir yer edinmektedir. Odun kompozitleri, çevre dostu özelliklerinin yanı sıra geniş bir hammadde kaynağına sahip olmaları nedeniyle sürdürülebilir bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, düşük yoğunlukları, tatmin edici mekanik performansları ve üretim süreçlerinde düşük enerji gereksinimiyle ekonomik açıdan avantajlıdır. Bu malzemelerin geri dönüştürülebilirlik potansiyeli ve üretim sırasında daha az enerji tüketmeleri, hem ekonomik hem de çevresel açıdan olumlu katkılar sağlamaktadır. Bu özellikler, odun kompozitlerinin sürdürülebilirlik ve yenilenebilirlik ilkelerini benimseyen uygulamalarda giderek artan bir şekilde tercih edilmesine neden olmaktadır. Bu sebeple bu tez kapsamında, gözenek destek malzemesi olarak odun liflerine FDM'ler vakum emprenye yöntemiyle emprenye edildikten sonra formca kararlı kompozitler (FKK-FDM) üretilmiştir.

1.7. FDM'lerin Odun ve Odun Esaslı Kompozitlerde Kullanımı

Odun ve odun esaslı malzemeler, yapı ve inşaat endüstrisinde biyolojik kökenli malzemeler arasında en yaygın kullanılanıdır. Ahşabın yenilenebilir bir kaynak olması ve kolay erişilebilirliği, dünyada birçok ülkede yapı ve inşaat sektöründe yoğun olarak tercih edilmesine olanak sağlamaktadır. Odun ve odun esaslı ürünlerin sahip olduğu kendine özgü fiziksel ve mekanik özellikler, bu malzemelerin yenilenemez yapı malzemelerinin yerini kısmen veya tamamen almasına zemin hazırlamıştır. Günümüzde, çelik ve betona kıyasla üretimi için daha az enerji gereksinimi duyulan mühendislik ürünü ahşap elemanlara yönelik ilgi artmaktadır. Bu nedenle, son on yılda hem tek katlı hem de çok katlı binalarda kereste ve diğer ahşap esaslı malzemelerin kullanımı belirgin bir artış göstermiş; bu da yenilenebilirlik, sürdürülebilirlik ve iklim avantajları bakımından olumlu katkılar

sağlamıştır (Ramage vd., 2017; Hepburn vd., 2019; Amiri vd., 2020; Omer ve Noguchi, 2020).

Günümüzde enerji sorunlarının önem kazandığı bir dönemde, dünya çapında üretilen enerjinin yaklaşık %40'tan fazlası konutlarda tüketilmektedir. 2019 verilerine göre, binalar dünya genelindeki nihai enerji kullanımının yaklaşık %36'sını ve enerjiye bağlı karbondioksit (CO₂) emisyonlarının %39'unu oluşturmaktadır (Santamouris ve Vasilakopoulou, 2021). Bu orana, hem konut hem de ticari yapılar dâhildir ve özellikle ısıtma, soğutma ve elektrik kullanımı ile ilgilidir. Emisyonların yaklaşık %11'i, çelik, çimento ve cam gibi yapı malzemelerinin üretiminden kaynaklanarak, inşaat sektörünün küresel emisyonlar üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Bu durum, enerji arzındaki zorluklar ve diğer sektörlerdeki artan talep dikkate alındığında etkin bir yönetim gerektirmektedir (Pasupathy vd., 2008; Tyagi vd., 2011; Bland vd., 2017; Souayfane vd., 2016; Nazari vd., 2020). Konutlarda enerji verimliliğini artırmak için bir çözüm, binaların termal kütlesini artırarak fazla enerjiyi gizli ısı olarak depolayan ve iç mekan sıcaklığı belirli bir seviyenin altına düştüğünde bu enerjiyi geri salan biyolojik bazlı faz değiştiren malzemeler (BFDM'ler) içeren mühendislik ürünü ahşap malzemelerin üretilmesidir. Bu çevre dostu yaklaşım, ahşap endüstrisi yan ürünlerini değerlendirmeyi hedeflerken, fosil yakıt bazlı yapı malzemelerinin yerine geçerek konutların enerji tüketimini azaltmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, talaş kompozitleri geliştirerek ve biyolojik bazlı faz değiştiren malzemelerin yanıcılığını azaltıcı katkı maddeleri ekleyerek bazı özellikleri iyileştirmek mümkündür ki bu, katı ahşap malzemelerde her zaman sağlanamayabilir.

Bununla birlikte, ahşap paneller, çalışma sıcaklığına uygun yağ asitleri veya esterler gibi biyolojik kökenli faz değiştiren malzemeler (BFDM'ler) ile entegre edildiğinde, binaların içindeki sıcaklık dalgalanmaları kontrol altına alınabilir ve bu sayede enerji kullanım verimliliği artırılabilir (Mathis vd., 2018). Ahşabın gözenekli yapısı, BFDM'lerin emprenye yöntemiyle kapsüllenmesi için potansiyel bir matris görevi görmektedir. Ayrıca, konstrüksiyon tam kereste (KVH), duo/trio lamine kirişler, çapraz lamine ahşap (CLT) ve lamine kaplama kereste (LVL) gibi gelişmiş ahşap yapı elemanlarının tasarımındaki yenilikler, BFDM'lerin ahşap malzemelere entegrasyonu konusunda ek olanaklar sunmaktadır. Bununla birlikte, ahşap yapısının karmaşıklığı, BFDM'lerin bu malzemelere entegre edilme sürecini zorlaştırmakta ve BFDM'lerin sıcaklık ile termofiziksel özellikleri gibi çeşitli faktörlerin dikkate alınmasını gerektirmektedir.

Ahşap, çeşitli formlarda (lifler, toz, masif ahşap, kaplama) BFDM'leri barındırmak amacıyla bina uygulamaları için bir matris olarak değerlendirilmiştir; bu kapsamda iç duvarlar veya kaplamalar, zemin döşemeleri ve bina cephelerinde kullanımı gibi örnekler verilebilir (Farid ve Khudhair, 2004; de Gracia vd., 2013; Mathis vd., 2018). Binalarda enerji depolama konusunda ahşap ve ahşap esaslı malzemelere BFDM'lerin entegrasyonu, araştırmacıların ilgisini çekmiş ve yapılan çalışmalar, masif ahşap, lignini giderilmiş masif ahşap ve ahşap liflerinden oluşan kompozitlerde BFDM olarak yağ asitlerinin, esterlerin ve bunların ötektik karışımlarının kullanımına odaklanmıştır (de Gracia vd., 2013; Liang vd., 2018; Khudhair ve Farid, 2021). Bu çalışmaların çoğu, ticari yağ asitlerinin ötektik karışımlar oluşturmak için kullanılması ve farklı ağaç türlerine ait masif ahşap, ahşap lifleri, parçacıkları ve tarımsal yan ürünler (örneğin meyve kabukları) içine çeşitli esterlerin emprenye edilmesine odaklanmıştır (Hekimoğlu, vd., 2021a; Hekimoğlu, vd., 2021b; Hekimoğlu vd., 2022)

Odun/FDM kompozitler üzerine yapılan araştırmalar, ya ahşap yan ürünlerinin BFDM'ler için kapsül olarak kullanılmasına ya da masif ahşap üzerine yoğunlaşmıştır. Ahşap lifleri, talaş, un ve yonga gibi yan ürünlerin kullanımı, enerji üretiminde yakıt olarak değerlendirilmeleri yerine, yapı uygulamaları için enerji akıllı biyo-kompozitlerin üretimine yönelik yenilikçi bir yaklaşımın benimsenmesiyle bu ürünlerin büyük miktarlarına ek değer kazandırılması açısından avantaj sağlamaktadır. Bu yaklaşıma örnek olarak, kompozitlerde gizli ısı depolama kapasitesini artırmak amacıyla yağ asitleri veya karışımları ile emprenye edilen odun tozu üzerine yapılan çalışmalar gösterilebilir (Liang vd., 2018; Ma vd., 2018). Kavak odun tozu ile parafin karıştırılarak, gizli ısı depolama kapasitesine sahip bir biyo-kompozit elde edilmiş ve malzemenin termal iletkenliğini artırmak amacıyla grafit ilavesi gerçekleştirilmiştir (Guo vd., 2018). Li vd. (2009), ise parafin/yüksek yoğunluklu polietilen/odun tozu kompozitinin, bina uygulamaları için stabil bir FDM formu ve elektrikli yerden ısıtma sisteminde bir ısı depolama katmanı olarak kullanım potansiyelini araştırmıştır. Elde edilen kompozit, 20 ila 30 °C'lik bir faz geçiş sıcaklığı, yüksek gizli erime ısısı, termal iletkenlik ve iyi bir şekil koruma özellikleri sergileyerek, bu uygulama için umut vadeden bir FDM olarak öne çıkmıştır. 2023 yılında Sheng vd. (2023), termal enerji depolama için yenilikçi, şekil kararlı faz değişim kompozitleri üzerine yoğunlaşmıştır. Gizli ısı depolama ortamı olarak polietilen glikol (PEG) ve odun tozu kullanılırken, matris olarak polilaktik asit (PLA) tercih edildi. PLA ile birleştirildikten sonra, kompozitler yüksek gizli ısı kapasitesini (87,2 J/g) koruduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca, diğer çalışmalarda bina

uygulamalarında kullanılmak üzere FDM ile emprenye edilmiş ahşap veya bitki liflerinden oluşan kompozitler incelenmiştir (Sarı vd., 2020; Sawadogo vd., 2022). Örneğin, Sarı vd. (2020), BFDM'nin ahşap liflerine entegre edilmesini araştırmış ve bu malzemenin uygun sıcaklık aralığında gerçekleştirilen termal çevrimler sonrasında termal ve kimyasal olarak kararlı olduğunu ve sızıntı yapmadığını ortaya koymuştur. Bir başka çalışmada, laurik ve kaprik asit karışımından oluşan BFDM, dekoratif ahşap esaslı panellere (orta yoğunlukta lif levha, MDF) entegre edilmiştir. Başlangıçta FDM plastik poşetlere kapsüllenmiş ve ardından oluklu MDF panellere dahil edilmiştir. Sonuç olarak, FDM ile doldurulmuş ahşap panellerin bina uygulamalarına uygun faz geçiş sıcaklığı ve sırasıyla 22,2 °C ve 57,1 J/g'lik gizli erime ısısına sahip olduğu belirlenmiştir (Mathis vd., 2019).Çeşitli ağaç türlerinden masif ahşap, BFDM'ler için matris olarak değerlendirilmiştir. Temiz vd. (2020), çam ağacının öz odununun kaprik ve stearik asitlerin ötektik bir karışımıyla emprenye edilmesini araştırmışlardır. Malzemenin termal özelliklerinin değerlendirilmesinin ardından, odun/BFDM sisteminin ahşap yapıların iç ortam sıcaklığının kontrolünde ve enerji tasarrufunda etkili bir şekilde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Nazari vd. (2022), biyolojik bazlı FDM olarak yağ asitlerinden oluşan bir karışımı Sarıçam ve Avrupa kayını numunelerine emprenye etmişlerdir. Emprenye edilmiş Sarıçam ve kayın numuneleri için ölçülen gizli erime ısısı sırasıyla 42,4 ve 27,0 J/g olarak bulunmuştur. Diğer yandan, işlem görmemiş kayın ağacının işlem görmemiş çama göre iki kat daha yüksek ısı iletkenliğine sahip olduğu, bunun da yüksek yoğunluğundan kaynaklandığı belirtilmiştir. Emprenye işlemi sonrasında her iki numunenin de ısı iletkenliği artmıştır. Emprenye edilmiş numuneler, kayın için 3,8 J/g K ve çam için 5 J/g K özgül ısı kapasitesi göstermiştir. Yazarlar, numunelerin gizli erime ısısının, kullanılan FDM'in gizli erime ısısına ve miktarına bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Benzer şekilde, Grzybek vd. (2023), Norveç ladini odununun termal özelliklerini iyileştirmek için biyolojik bazlı bir FDM olarak kaprik asit ve stearik asit karışımının potansiyelini değerlendirmiştir. FDM karışımı farklı konsantrasyonlarda kullanılmış ve vakum-basınç yöntemiyle emprenye edilmiştir. Sonuçlar, emprenye edilmiş ahşapta yoğunluk ve liflere dik yönde basınç mukavemetinde artış olduğunu göstermiştir. Bu artışın, emprenye işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi ve ahşap yapısındaki tüm gözeneklerin doldurulması nedeniyle olduğu belirtilmiştir. En yüksek tutulum oranı 267 kg/m³ olup, gizli erime ısısı 70,5 J/g olarak elde edilmiştir. Yazarlar, bu asit karışımının ahşabın termal özelliklerini artırma potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir. Liu vd. (2021), termal enerji depolama için faz değişim malzemeleri

(FDM) olarak miristik asit, parafin ve polietilen glikolün (PEG) kullanımını incelemiştir. Araştırmacılar, vakum emprenye yöntemi kullanarak balsa ağacında bu FDM'leri uygulamışlardır. Ahşap numunelerinde PEG'in adsorpsiyon kapasitesi en düşük bulunurken, parafin en yüksek gizli erime ısısına sahip olup 181,9 J/g değeri göstermiştir. Test edilen üç kompozit arasında, miristik asit/ahşap kompoziti üstün termal güvenilirlik ve yeniden kullanılabilirlik sergilemiştir

Ma vd. (2019), termal enerji depolama sistemi olarak kaprik asit-palmitik asit (PA) ötektiği ile emprenye edilmiş delignifiye sedir ağacını incelemiştir. Kompozitin termal analizi, 94 J/g gizli erime ısı ve 23 °C faz geçiş sıcaklığı göstermiştir. Ayrıca, kompozitin termal iletkenliği ve güvenilirliği, saf ötektik FDM'ye kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Mathis vd. (2018), 30 °C'de güneş enerjisini absorbe edip depolayabilen bir ahşap döşeme üst katmanını geliştirmiştir. Ticari bir mikro kapsüllü BFDM ile işlenmiş olan meşe ve şeker akça ağacı odunları incelenmiş ve bu işlem sonucunda 7,6 J/g gizli ısı kapasitesi ve işlem görmemiş ahşaba göre %77'lik bir termal kütle artışı tespit edilmiştir. Yang vd. (2019), laurik asitle (LA) emprenye edilen delignifiye edilmiş ve karbonize edilmiş ahşap örnekleri incelemiştir. Kompozit, %80'in üzerinde yüksek bir kapsülleme oranına ve 178 J/g'lik bir gizli ısı kapasitesine sahip, hafif ve yüksek gözenekli bir malzeme olarak geliştirilmiştir. Barreneche vd. (2017), bina cephelerinde pasif enerji depolama için kaplamalı bir FDM/ahşap kompoziti incelemiştir. İncelenen kompozit, FDM olarak RT21 ve RT27 parafinleri ile emprenye edilmiş kara huş ağacından oluşmaktadır. Emprenye edilmiş ahşap, kompozitin yapısal stabilitesini artırmak amacıyla polistiren ile kaplanmıştır. RT21 için faz geçiş sıcaklıkları 20-21 °C, RT27 içinse 25-27 °C olarak belirlenmiştir. Bu kompozitler, ılıman bölge ikliminde uygulamalar için önerilmektedir. Diğer biyomalzemelerin BFDM'ler için kapsül görevi görmesiyle ilgili örnekler arasında, meyve kabukları ve enerji akıllı kompozitlerle birleştirilmiş BFDM'lerin yapı uygulamaları için kullanılması bulunmaktadır. Yapılan bir dizi araştırma, ceviz, kayısı ve fındık kabuklarının BFDM ile emprenye edilerek enerji verimli panellerin üretiminde kullanılabilirliğini incelemiştir. Araştırmalarda, öğütülmüş meyve kabuklarının gözenekli yapısının bu malzemelerin FDM'lerle emprenye edilmesine uygun olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, kompozitlerin uzun süreli çevrimsel testler sonrasında kimyasal ve termal olarak kararlılık gösterdiği ve minimum ya da hiç sızıntı yapmadığı rapor edilmiştir (Hekimoğlu vd., 2021a; Hekimoğlu vd., 2021b; Hekimoğlu vd., 2022).

Literatür özetlerinden de anlaşıldığı üzere FDM'lerin ahşap kompozitlerde incelendiği çalışmalar olmasına rağmen, bu çalışmaların hiçbiri FDM/ nişasta-odun lifi kompozitini binalar için yeni bir biyobazlı enerji depolama malzemesi olarak geliştirmeye odaklanmamıştır. Pek çok ülkede ahşap kompozit endüstrisi, üretimde bağlayıcı olarak üre formaldehit kullanmaktadır; ancak bu yapıştırıcı, insan sağlığı ve çevre için risk oluşturan formaldehit emisyonlarına yol açmaktadır. Bu tez kapsamında ilk kez geliştirilen nişasta bazlı bağlayıcı ile yapısal olarak kararlı biyo-esaslı FDM odun kompozitlerinin, ısı enerji depolama ve salınım yeteneklerinin deneysel olarak incelenmesi ve bina uygulamalarında pratik kullanım potansiyellerinin ortaya konması, literatürdeki kompozit FDM çalışmalarına yeni bir bakış açısı kazandıracaktır. Bu özgün yaklaşımlar, ilgili alanda önemli bir katkı sunacaktır. Ayrıca biyobazlı bağlayıcıya sahip yapısal olarak kararlı BFDM odun kompozitlerinin geliştirilmesi, formaldehit emisyonlarını ve binaların karbon ayak izini azaltarak sürdürülebilir inşaat uygulamaları için önemli sonuçlar vererek uygulanabilir bir çözüm sunacaktır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Materyal

Deneyisel çalışmalar sırasında kullanılan hammadde, kimyasal maddeler, tutkal, deney planı, kullanılan cihazlar ve kompozit levhalara uygulanan testlerle ilgili bilgiler sırasıyla sunulmuştur.

2.1.1. Hammadde

Bu çalışmada hammadde olarak, Yıldız Entegre AŞ'den temin edilen sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) yongalarından elde edilen lifler kullanılmıştır. Defibratör çıkışında liflere tutkal uygulanmadan alınan bu lifler, kurutma işlemine tabi tutularak deneyler için kullanıma hazır hale getirilmiştir.

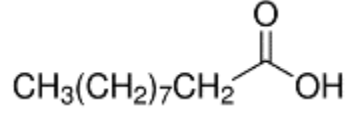
2.1.2. Kimyasal Maddeler

➤ Faz Değiştiren Maddeler

Bu tez çalışmasında, FDM esaslı odun kompozitlerinin üretilmesi amacıyla biyolojik kökenli üç farklı yağ asidi türü; kaprik asit (KA), metil palmitat (MP) ve lauril alkol (LA) seçilmiştir. Seçilen yağ asitleri, organik yapıları, yüksek ısı depolama kapasitesi, termal ve döngüsel stabilite özellikleri, düşük buhar basıncı ile hacim değişimi gibi avantajları ve ayrıca biyo-tabanlı olmaları nedeniyle tercih edilmiştir.

➤ Kaprik Asit

Dekanoik asit olarak da bilinen Kaprik asit kimyasal formülü ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_8\text{COOH}$) olan bir organik asittir. Doğada birçok bitkide ve hayvanda bulunabilen bir yağ asidi türüdür. Kaprik asit, süt yağı, hindistan cevizi yağı ve palmye yağı gibi birçok bitkisel yağda bulunur. Ayrıca, et ve süt ürünleri gibi hayvansal gıdalarda da bulunabilir. Çalışmamızda kullanılan kaprik asit %98 saflıkta olup Sigma-Aldrich şirketinden satın alınmıştır. Kaprik asidin erime sıcaklığı aralığı 27 °C ila 32 °C arasında olup, molekül ağırlığı 172.27 g/mol ve yoğunluğu 0.893 g/mL olan kaprik asidin kimyasal formülü Şekil 12' de verilmiştir. Çalışmada termal enerji depolama amacıyla kullanılan kaprik asitin gıda endüstrisi, ilaç endüstrisi, kozmetik endüstrisi, tarım endüstrisi gibi birçok alanda kullanımı mevcuttur.

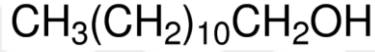


Şekil 12. Kaprik asitin kimyasal formülü

➤ Lauril alkol

Lauril alkol, doğal olarak hindistan cevizi yağı ve palmiye yağı gibi bazı bitkisel kaynaklarda bulunan, sentetik olarak da üretilebilen bir yağ alkolüdür. Kimyasal formülü ($\text{C}_{12}\text{H}_{26}\text{O}$) olan lauril alkol, 12 karbon atomu ve bir hidroksil grubu içerir. Çalışmamızda termal enerji depolamak amacıyla kompozit üretiminde kullanılan lauril alkolün temizlik, gıda, ilaç ve kozmetik endüstrisi gibi birçok alanda kullanımı da mevcuttur.

Lauril alkol (LA, %99 saflık) Sigma Aldrich şirketinden satın alınmıştır. Molekül ağırlığı 270.45 g/mol ve erime noktası 22-26 °C olan bir organik yağ alkolüdür. Lauril alkolün kimyasal formülü Şekil 13'te verilmiştir.

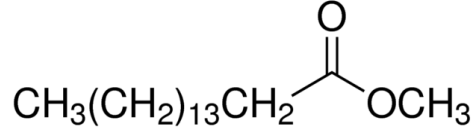


Şekil 13. Lauril alkolün kimyasal formülü

➤ Metil palmitat

Metil palmitat, palmitik asit adı verilen doymuş bir yağ asidinin metil esteridir ve palmitik asit ile metanolün birleşmesi sonucu elde edilir. Bu işlem, palmitik asidin metilasyonu olarak adlandırılır ve bir katalizör (genellikle sülfürik asit) yardımıyla gerçekleştirilir. Renksiz, kokusuz bir yapıya sahiptir. Metil palmitat, doğal olarak palmiye yağı ve hindistan cevizi yağında bulunur ve bu bitkilerin ekstraksiyonu ile de elde edilebilir. Ancak, endüstriyel olarak metil palmitat genellikle sentetik olarak üretilir, çünkü bu yöntem daha ekonomiktir ve daha büyük ölçekte üretim yapılabilir. İlaç, tarım, gıda, kozmetik endüstrisi gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

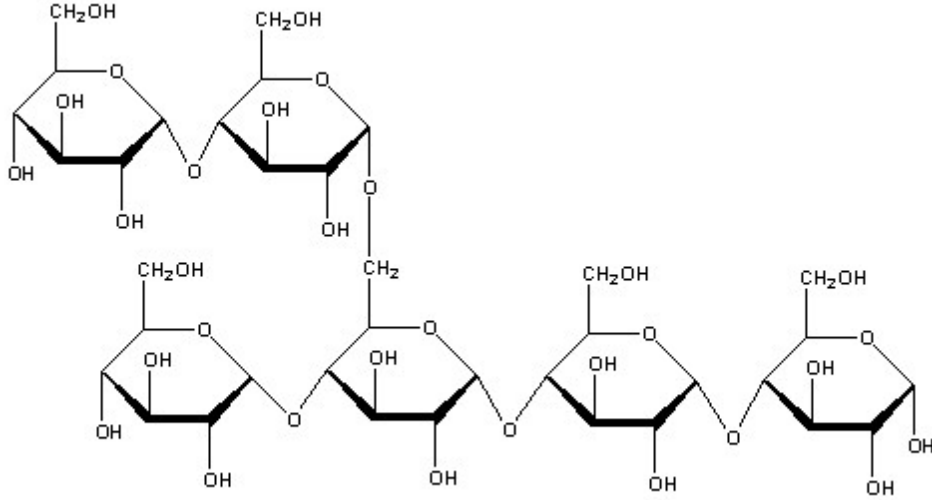
Metil palmitat ($\text{C}_{17}\text{H}_{34}\text{O}_2$) (MP, %99 saflık) Sigma Aldrich şirketinden satın alınmıştır. Molekül ağırlığı 270.45 g/mol ve erime noktası 32-35 °C'dir. Metil palmitatın kimyasal formülü Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Metil palmitatın kimyasal formülü

➤ Nişasta

Bir karbonhidrat olan nişasta, α -D-glukoz birimlerinden meydana gelir, sarmal bir yapıdadır ve sıcak suda kolloidal çözünürler. Çözünen (1/4) kısım amiloz, çözünmeyen kısım amilo pektindir. Glukoz birimleri (üniteleri) α -(1→4), amilopektin birimleri ise α -(1→6) bağıyla bağlıdır. α -glikozidik bağ kolayca kopar ve bu metabolik işlemlerde taşınması için önemlidir. Her bir sarmalda 6 adet glukoz birimleri 120 °C'lik bir açı altında düzenlenmiştir (Şekil 15).



Şekil 15. Nişastanın kimyasal yapısı (Deniz, 2012)

Nişasta, genellikle buğday, mısır, patates, pirinç, arpa, yulaf ve diğer tahıllar gibi bitkisel kaynaklardan elde edilir. Nişasta, gıda endüstrisi, tekstil endüstrisi, ilaç endüstrisi, kağıt endüstrisi, biyoplastikler ve daha birçok alanda kullanılan çok yönlü bir bileşiktir.

Nişasta bazlı bağlayıcılar, odun esaslı kompozit malzemelerinde kullanılan sürdürülebilir, yenilenebilir ve çevre dostu bir alternatif kaynak olarak kabul edilir.

Bu bağlayıcılar, nişasta, glikoz ve diğer doğal kaynaklardan elde edilen diğer bileşenlerden oluştuğundan dolayı, çevresel olarak zararlı olan fenol-formaldehit veya üre-formaldehit reçinelerinin yerini alabilir.

Nişasta bazlı bağlayıcılar, odun esaslı kompozit malzemelerin üretiminde kullanıldığında, malzemenin çevre dostu özelliklerini ve malzemenin geri dönüştürülebilirliğini artırabilir. Ayrıca, bu bağlayıcılar, diğer bağlayıcıların aksine düşük VOC (uçucu organik bileşik) emisyonlarına sahiptir, bu da insan sağlığına daha az zararlı olduğu anlamına gelir.

Nişasta bazlı bağlayıcıların odun esaslı kompozit malzemelerde kullanımı, sadece çevresel faydalar sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik olarak da avantajlıdır. Bu bağlayıcılar, geleneksel bağlayıcıların yerine kullanıldığında, genellikle daha ucuz ve daha kolay elde edilebilirler. Çalışmamızda bu avantajlarından ötürü nişasta, çapraz bağlayıcı ve katalizör yardımıyla modifiye edilmiş olup kompozit üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan nişasta, Türkiye'deki Pendik Nişasta ticari üreticisinden temin edilmiştir.

➤ Sitrik Asit

Sitrik asit, kimyasal formülü $C_6H_8O_7$ olan bir organik asittir. Genellikle doğal olarak birçok bitki ve meyvede bulunur ve fermente gıdaların üretiminde kullanılır. Ayrıca, sitrik asit birçok endüstriyel amaç için kullanılır. Temizlik ürünlerinde, deterjanlarda, kozmetiklerde ve ilaçlarda kullanılan bir bileşendir. Ayrıca gıda ve içeceklerde koruyucu olarak kullanılabilir. Sitrik asit, nişastalarda çapraz bağlayıcı olarak kullanılan bir bileşiktir. Sitrik asidin nişasta ile etkileşime girmesi, hidroksil grupları arasında kimyasal bağlar oluşturarak çapraz bağlar oluşturur. Bu çapraz bağlar nişastanın yapısını güçlendirir ve moleküller arasında daha sağlam bir ağ oluşturur. Sonuç olarak, nişasta daha dayanıklı bir jel haline gelir. Çalışmamızda nişastayı daha etkin bir hale getirmek için çapraz bağlayıcı olarak kullanılan sitrik asit Kimyalab firmasından satın alınmıştır.

➤ Sodyum hipofosfit

Sodyum hipofosfit, kimyasal formülü $NaPO_2H_2$ olan bir bileşiktir. Sodyum ve hipofosfit iyonlarını içeren bir tuzdur. Sodyum hipofosfit, beyaz veya hafif sarı bir toz veya kristal formunda bulunmakla birlikte birçok endüstriyel uygulamada kullanımı mevcut olan

önemli bir kimyasal maddedir. Sodyum hipofosfit, metal kaplama işlemlerinde, bazı alev geciktirici bileşiklerin üretiminde, pestisitler, zararlı böcekleri ve diğer organizmaları kontrol etmede, kullanılan bir bileşiktir. Ayrıca, çeşitli organik bileşiklerin sentezinde bir katalizör olarak kullanılabilir. Bazı kimyasal reaksiyonlarda indirgeyici bir ajan olarak işlev görebilir. Tez çalışmasında, sodyum hipofosfit katalizör amaçlı kullanılmış olup Kimyalab firmasından satın alınmıştır.

2.2. Yöntem

Tez çalışmaları kapsamında izlenecek yöntemlerin belirlenmesi ve deneysel üretim şablonunun oluşturulabilmesi için çeşitli deney parametreleri tanımlanmıştır. Bu parametrelerin uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla bir dizi ön deneme gerçekleştirilmiştir. Ön denemelerde, farklı parametre kombinasyonları denenmiş ve sonuçların analizi yapılmıştır. Bu analizler sonucunda, en uygun parametrelerin belirlenmesi ve deneysel üretim şablonunun oluşturulması için gerekli adımlar atılmıştır.

Bu ön denemelerin sonucunda; kimyasal madde seçimi, konsantrasyon düzeyi, muamele yöntemi, tutkal türü, pres şartları gibi değişkenlerden kaynaklanan olumsuzluklar tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ve tespitler doğrultusunda, optimal deney koşulları belirlenmiş ve deneysel çalışmalar bu doğrultuda yürütülmüştür.

Ön denemelerde, farklı kimyasal maddelerin kullanımı, çeşitli konsantrasyon düzeylerinin denenmesi, farklı muamele yöntemlerinin uygulanması, çeşitli tutkal türlerinin kullanılması ve farklı pres şartlarının test edilmesi gibi değişkenler üzerinde çalışılmıştır. Bu denemelerde elde edilen sonuçlar, her bir değişkenin deney sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek ve olumsuzlukları tespit etmek amacıyla değerlendirilmiştir.

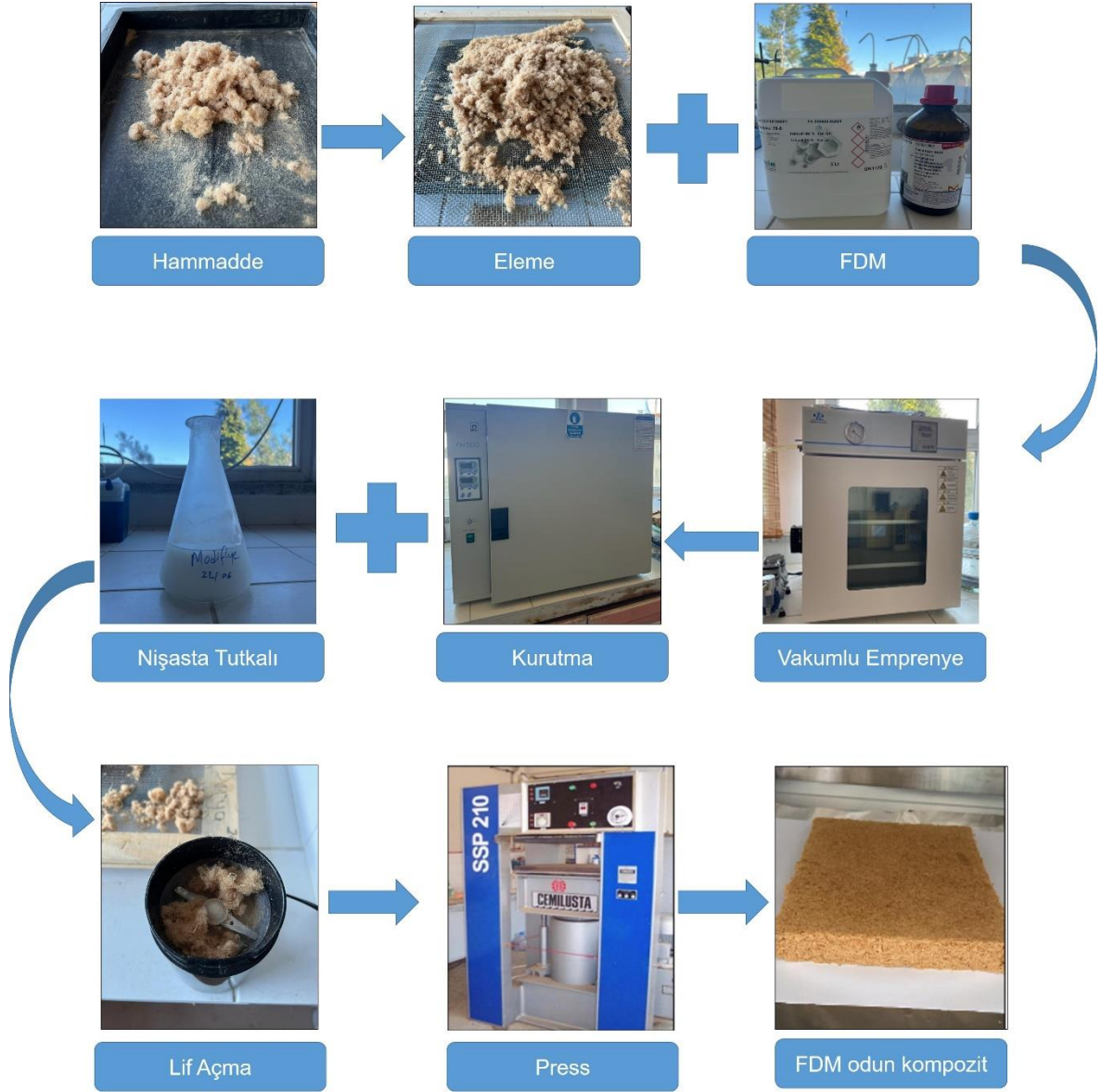
Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, hangi kimyasal maddenin, hangi konsantrasyon düzeyinin, hangi muamele yönteminin, hangi tutkalın ve hangi pres şartlarının optimum sonuçları sağladığı belirlenmiştir. Bu bilgiler, deneysel çalışmaların daha ileri aşamalarında doğru deney koşullarının uygulanabilmesi için temel oluşturmuştur. Denemelerde farklı konsantrasyonda FDM' ler emprenye edilmiş liflere önceden hazırlanan nişasta tutkalı püskürtme yöntemi ile liflere uygulanmaya çalışılmıştır ancak bu uygulama yönteminin nişasta tutkalı ile FDM' lerin pH uyumsuzluğu, oldukça fazla tutkallama güçlüğü ve problemleri çıkartması sebebiyle kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, yüksek konsantrasyondaki kimyasal maddelerin kullanılabilirliğini artırmak ve bu

maddelerin liflerin içyapısına daha etkili bir şekilde nüfuz etmelerini sağlamak amacıyla, bağlayıcı tutkalın sulu çözelti halinde hazırlanması ve bu çözeltilerin liflere homojen şekilde karıştırılarak uygulanması yöntemi tercih edilmiştir. Tez kapsamında üretilmiş olan odun kompozitler için hedeflenen yoğunluk 350 kg/m^3 'tür.

Deneyisel çalışmada kullanılan tutkal, kimyasal maddeler ve konsantrasyonları Tablo 5'de, ayrıca deneyisel prosedür şeması da Şekil 16'da verilmiştir.

Tablo 5. Üretilen odun kompozitlerine ait deneyisel şablon

FDM Türü	Lif Miktarı	FDM Miktarı	Nişasta Tutkalı Miktarı
Kaprik Asit	%40	%40	%20
Lauril Alkol	%40	%40	%20
Metil Palmitat	%40	%40	%20



Şekil 16. FDM odun kompozitlerinin üretimine ait deneysel prosedür şeması

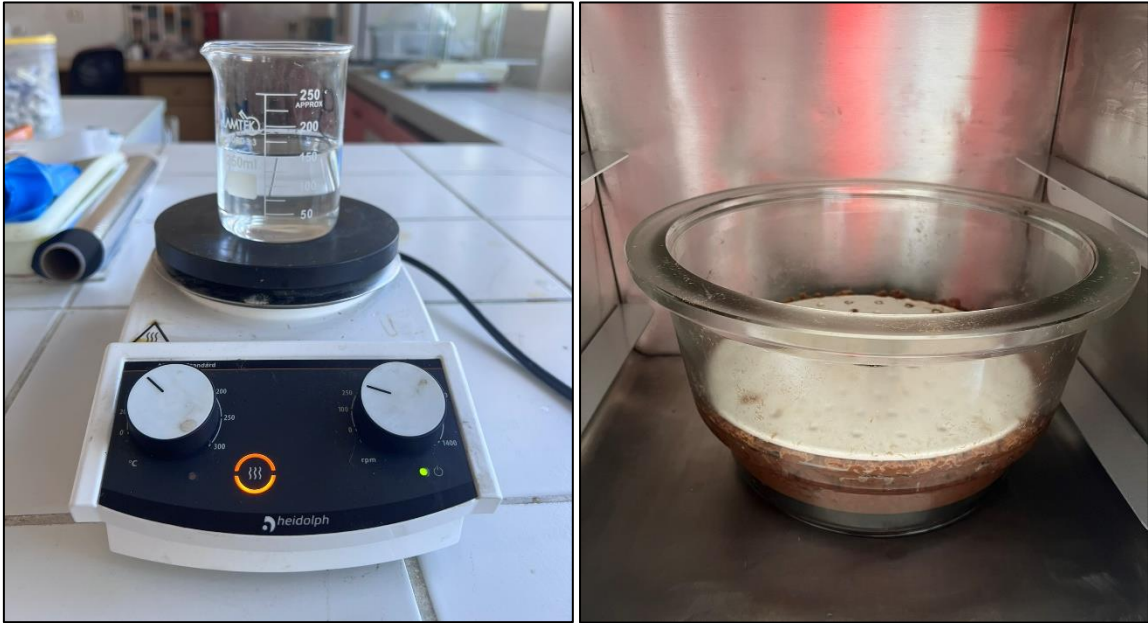
2.2.1. Liflerin Hazırlanması ve Emprenye Edilmesi

Temin edilen sarıçam lifleri kimyasal maddelerle muamele edilmeden önce, liflerde bireyselliği ve homojenliği sağlamak amacıyla bir elek yardımıyla elek yüzeyine hafifçe bastırmak suretiyle Şekil 17’de gösterildiği gibi elenmiştir. Hava kurusu haldeki liflerin rutubeti rutubet ölçerle %10 civarında tespit edilmiştir.



Şekil 17. Elek yardımıyla lif topaklarının açılması

Hedeflenen levha yoğunluklarına göre hesaplanan %40 oranındaki FDM'ler organik çözücülerde (etil alkol ve kloroform) ve erime sıcaklığının üzerinde 50 °C ısıyla çözdürdükten sonra yine %40 oranında tartılan lifler ile büyük bir kap içerisinde muamele edilmiş ve bu muamele işlemine lifler tamamen çözelti içerisinde kalacak şekilde homojen bir şekilde karıştırılarak emprenye işlemine uygun hale getirilmiştir. (Şekil 18)



Şekil 18. Liflerin FDM ile muamelesi

FDM'lerle muamele edilen lifler vakumlu etüvde 50 °C'de 0,7 bar basınçta 24 saat boyunca emprenye edilmiştir. Emprenye işleminin ardından lif çözeltisinde bulunan organik çözücü etüvde kurutularak uzaklaştırılmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Vakumlu etüv

2.2.2. Nişasta Tutkalının Hazırlanması

%20'lik nişasta çözeltisi saf su ile hazırlanarak bir erlenmayer içerisine alınmıştır. Nişasta, 50°C'de mekanik bir karıştırıcı ile kontrollü koşullarda çözündürülmeye başlanmıştır ve ardından sıcaklık 95°C'ye kadar kademeli olarak yükseltilmiştir; bu esnada dönme hızı 1000 rpm olarak ayarlanmıştır. Tam çözünme sağlandıktan sonra, çapraz bağlayıcı olarak %5 oranında sitrik asit ve katalizör olarak sitrik asidin yarısı kadar (ağırlıkça) sodyum hipofosfit eklenmiştir. Jelleşme süreci başlayana dek karıştırma işlemine devam edildi. Elde edilen modifiye nişasta çözeltisi, kompozit uygulamalar için kullanılmak üzere soğumaya bırakılmıştır (Şekil 20).



Şekil 20. Nişasta tutkalını hazırlama düzeneği

2.2.3. Liflerin Tutkallanması, Levha Taslağının Preslenmesi ve Pres sonrası İşlemler

FDM' lerle emprenye edildikten sonra kurutulan lifler, levha üretim sürecine geçilmeden önce, önceden üretilip soğutulan nişasta tutkalı ile homojen bir şekilde karıştırılarak tutkallanmıştır. Tutkallama işleminin ardından topaklaşan lifler, bir mikser yardımıyla açılarak bireysel hale getirilmiştir. Bireysel hale getirilen lifler daha sonra serme işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem için, pres sacı zemine yerleştirilmiş ve üzerine 20x20 cm boyutlarında bir şekillendirme çerçevesi konulmuştur. Tutkallanmış lifler, çerçeve içerisine homojen bir şekilde yerleştirilerek serilmiştir. Serme işleminin ardından, çerçevenin içerisine girebilen bir ahşap tabla ile taslak iyice bastırılarak ön presleme gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, tablayı bastırarak çerçeve yavaşça kaldırılmış ve levha taslağı oluşturulmuştur. Pres sacı üzerindeki taslağın kenarlarına 1 cm mesafe kalacak şekilde 2 cm kalınlığında takozlar yerleştirildikten sonra, diğer pres sacı taslağın üzerine yerleştirilerek levha preslemeye hazır hale getirilmiştir.

Tez çalışması kapsamında, her biri 350 kg/m³ hedef yoğunluğa göre emprenye edilip hazır hale getirilen lifler, 20x20x2 cm boyutlarındaki levha taslağı ile preslenmek üzere kullanılmıştır. Bu işlem, Şekil 21'de görülen ve Tablo 6'da teknik özellikleri belirtilen tek katlı pres yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneme levhalarının üretimi sırasında optimum

koşulların belirlenmesi amacıyla çok sayıda levha üretilmiş; optimum pres parametreleri ise sıcaklık 100 °C, pres süresi yaklaşık 30 dk ve pres basıncının 10 kg/cm²'den başlayarak 30 kg/cm²'ye kadar tedrici olarak artırılması şeklinde belirlenmiştir. Pres basıncının artması yaklaşık 16. dakika sonunda gerçekleşmiş olup yaklaşık 2 dk sonunda basınç tekrar düşürülmüştür. Levha üretim işlemleri, KTÜ Orman Fakültesi Orman Endüstri Mühendisliği, Orman Ürünleri Kimyası ve Teknolojisi Anabilim Dalı laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 21. Levha üretiminde kullanılan sıcak pres

Tablo 6. Prese ait teknik bilgiler

Pres tablaları	550x550 mm
Faydalı alan	500x500 mm
Çalışma şekli	Altan kalkmalı otomatik açma
Zaman ayarı	5 sn ile 12 saat ayarlanabilir
Piston sayısı	1 x 280 mm+2x50 mm
Pres açıklığı	200 mm
Strok	200 mm
Toplam basınç	210 ton
Max. basınç	70 kg/cm ²
Max. çalışma sıcaklığı	250 °C

Presleme sonrası üretilen levhalar 1 gün boyunca 60 °C'deki bir fırında kurumaya bırakılmıştır. Levhalar kurutulduktan sonra ağırlıkça tartılarak yoğunlukları hesaplanmıştır. Üretilen tüm levhaların yoğunlukları başlangıçta hedeflenen yoğunlukla (350 kg/m³) yaklaşık aynı değerlerde çıktığı tespit edilmiştir. Ardından üretilen FDM esaslı ve kontrol odun kompoziti levhaları ilgili deneyleri yapmak için standartlara göre gerekli örnek boyutlarında kesilerek hazırlanmışlardır.

Tez kapsamında termal enerjiyi depolamak amaçla üretilen FDM katkılı izolasyon levhalarının ve kontrol levhalarının bazı fiziksel, mekanik, analitik, akustik ve biyolojik özellikleri aşağıdaki yöntemlere göre belirlenmiştir.

2.2.4. Fiziksel Testler

➤ Sızıntı Testi

Üretilen formca kararlı FDM odun kompozitlerinin gözenekli destek malzemesi tarafından emilebilen maksimum FDM oranları, sızıntı testi ile belirlenmiştir. Bu amaçla, 50x50 mm boyutlarında kesilen FDM odun kompozitleri bir filtre kâğıdı üzerinde, ilgili FDM'lerin erime sıcaklıklarının üstünde bir sıcaklığa (50 °C) ısıtılmış ve yeterli bir süre (30 dakika) beklendikten sonra kâğıt üzerinde sızıntı olup olmadığı incelenerek maksimum FDM oranları doğrulanmıştır. Ayrıca, kompozitlerde FDM sızıntısı nedeniyle herhangi bir kütle kaybı olup olmadığını tespit etmek amacıyla sızıntı testi sonrasında ağırlık ölçümü tekrarlanmıştır. Bu şekilde, sızıntının tespit edilmediği en yüksek FDM oranına sahip kombinasyonlar, formca kararlı kompozit FDM'ler (FKK-FDM) olarak adlandırılmıştır.

➤ Su Alma Oranının Belirlenmesi

Tez kapsamında üretilen odun kompozit levhalarının su alma oranları, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında incelenmiştir. Su alma oranı, ASTM D1037 (2012) standardına uygun olarak belirlenmiştir. 50x50x20 mm boyutlarındaki tekrar sayısı 5 olan örnekler, ±0.01gr hassasiyetindeki terazide tartılmıştır. Ardından, örnekler 20±2°C'de destile suyun 25 mm altında bekletilmiştir. 2 ve 24 saatlik periyotlarda ölçümler yapılmıştır. Her ölçümde, sudan çıkarılan örneklerin fazla suyu bir bezle silinerek ağırlıkları ± 0.01 gr hassasiyetindeki terazide tekrar ölçülmüştür. Su alma oranı (SA), aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir:

$$SA = (m_y - m_1 / m_1) \times 100 \quad (2)$$

Burada;

SA = Su alma oranı (%)

m_1 : Örneğin ilk ağırlığı (g)

m_y : Örneğin suda bekletildikten sonraki ağırlığı (g)

➤ Kalınlık Artış Oranın Belirlenmesi

Üretilen levhaların kalınlık artışı oranı, Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölüm laboratuvarlarında incelenmiştir. Kalınlık artışı oranı, ASTM D1037 (2012) standardına göre belirlenmiştir. Numuneler, 50x50x20 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Tekrar sayısı 5 olan numunelerin kalınlıkları, 0.01 mm hassasiyetle dijital kumpas kullanılarak beş farklı noktadan ölçülmüş ve ölçüm noktaları işaretlenmiştir. Sonrasında, numuneler 20±2°C'deki destile suyun 25 mm altında tutularak deney süresince bekletilmiştir. 2 ve 24 saatlik aralıklarla ölçümler periyodik olarak gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm için sudan çıkarılan numunelerin üzerindeki fazla su bir bez ile silinmiş ve kalınlıkları ilk ölçüm noktasından tekrar ölçülmüştür. Kalınlık artış oranı (KA) aşağıdaki formül kullanılarak belirlenmiştir.

$$KA = (e_y - e_k / e_k) \times 100 \quad (3)$$

Burada;

KA: Kalınlık artış oranı (%)

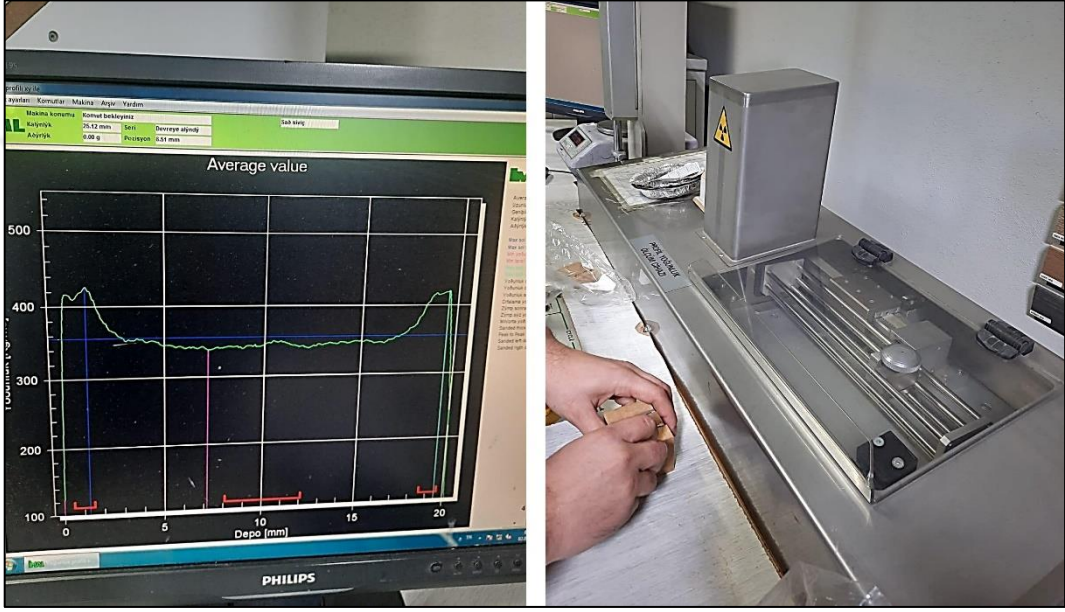
e_y : Suda bekletilen örneklerin kalınlığı (mm)

e_k : Klimatize edilmiş durumdaki örnek kalınlığı (mm)

➤ Yoğunluk Profiline Ölçülmesi

Levhaların yoğunluk dağılım testleri için 50×50×20 mm boyutlarında örnekler kesilmiş ve ölçümler Sakarya Çamsan Entegre Tesisleri'nde gerçekleştirilmiştir. Dikey yoğunluk profili, farklı yoğunluklarda malzeme katmanları üzerinden geçen enerjiyi zayıflatma prensibiyle çalışan, DPX200-LTE marka (Imal, Modena, İtalya) kompakt X-ışını yoğunluk profil analiz cihazı kullanılarak elde edilmiştir. Hazırlanan örnekler, DPX200-LTE cihazına özel tutucular aracılığıyla yerleştirilmiştir. Cihaz, malzemenin belirli bir kesitine odaklanan X-ışınları gönderir. X-ışınları, malzeme içindeki farklı yoğunluklardan geçerken enerjideki değişiklikleri ölçmektedir. X-ışınlarının malzeme içinden geçerken

zayıfladığı veya güçlendiği noktadaki sinyalleri algılamaktadır. Algılanan sinyaller, cihaz tarafından işlenir ve analiz edilmektedir. Yoğunluğun malzemenin belirli bölgelerindeki değişiklikleri belirlenmiştir. Elde edilen verilere dayanarak, DPX200-LTE cihazı yoğunluk profili oluşturmuştur. Bu profil, malzemenin belirli bir düzlem boyunca yoğunluğundaki değişiklikleri göstermiştir. Bu şekilde, DPX200-LTE cihazı, malzemenin içsel yapısındaki yoğunluk değişikliklerini hassas bir şekilde ölçerek, yoğunluk profilini belirlemiştir (Şekil 22).

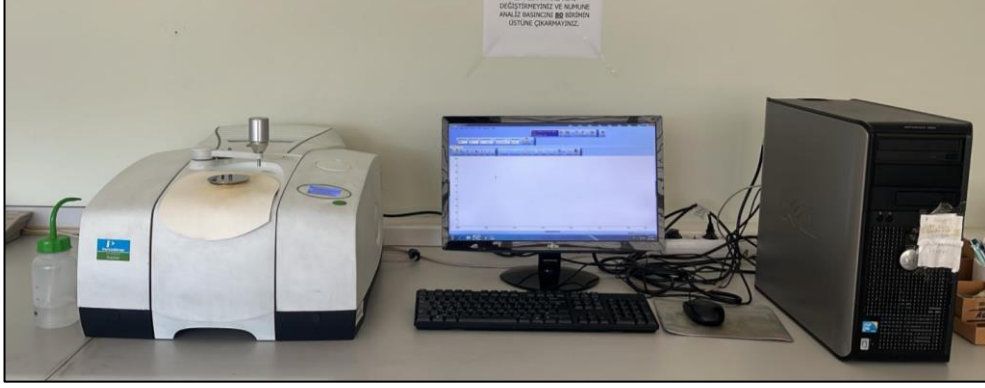


Şekil 22. DPX200-LTE yoğunluk profili ölçüm cihazı

2.2.5. Kimyasal Testler

➤ FTIR Analizi

Kompozit bileşenlerinin kimyasal yapıları ve aralarındaki fizikokimyasal etkileşimler, KTÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Thermo Scientific Nicolet iS10, Nicolet Co. cihazı kullanılarak Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi analizleri ile belirlenmiştir (Şekil 32). Spektrumlar, 4000 ile 500 cm^{-1} dalga boyu aralığında ve 4 cm^{-1} çözünürlükte elde edilmiştir.



Şekil 23. FTIR spektroskopi cihazı

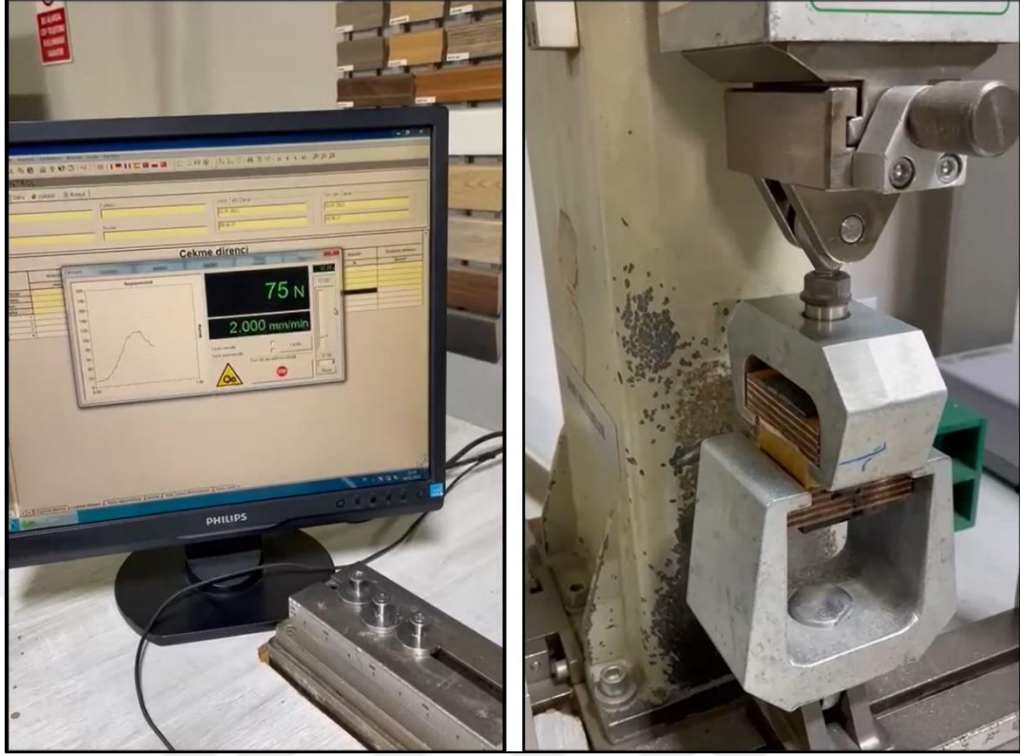
2.2.6. Mekanik Testler

➤ Levha Yüzeyine Dik Çekme Direnci Testi

Levha yüzeyine dik çekme direnci testi, her bir levhadan üçer adet 50mm×50mm×20mm boyutlarında odun kompozit örnekleri kullanılarak TS EN 319 standardına uygun olarak ve Sakarya Çamsan Entegre Tesisleri'nde Imal IB 600 cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 23). Her bir deneme numunesi alüminyum bloklara yapıştırılmıştır. Daha sonra, deneme numunesinin yüzeyine dikey olarak bir gerilim yükü uygulanmıştır. Bu çalışmada, gerilim yükü hızı yaklaşık olarak 2 mm/dakika olarak belirlenmiştir. Yapışma bölümünün kırılma anındaki maksimum yük (PI) ölçülmüştür. İç bağ, aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$\text{İç bağ (N/mm}^2\text{)} = \text{PI} / bL \quad (4)$$

Burada PI, maksimum yük (N)'yi; b, deneme parçasının genişliğini (mm); ve L, deneme parçasının uzunluğunu (mm) temsil eder.



Şekil 24. Imal IB 600 cihazı

➤ Basınç Direnci Testi

Deney örnekleri, ASTM C165-07 (2012) standardına uygun olarak 30x20x20 mm boyutlarında her bir gruptan 5'er adet örnek hazırlanmıştır. Ölçümler öncesinde, kuvvetin etki ettiği enine kesit alanı dijital kumpas ile ölçülerek, ezilme sırasındaki maksimum kuvvet (F_{max}) belirlenmiş ve basınç dirençleri (σ_b) hesaplanmıştır. Basınç direnci ölçümleri, KTÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan MTS marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 24). Basınç direnci değerleri aşağıdaki formül kullanılarak elde edilmiştir.

$$\sigma_b = \frac{F_{max}}{A} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (5)$$

Eşitliğinden hesaplanmıştır. Burada;

F_{max} : Kırılma anındaki max kuvvet (kg)

A : Örneğin enine kesit alanı (mm^2) dir.



Şekil 25. MTS test cihazı

2.2.7. Termal Testler

➤ Isıl İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi

Tez çalışması kapsamında üretilen FDM katkılı odun kompoziti levhalarının, belirlenen amaca uygun bir şekilde termal enerji depolamak amacıyla yalıtım malzemesi olarak değerlendirilebilmesi için her levha grubunun ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesi hedeflenmiştir. FDM esaslı odun kompozitlerinin ısı iletkenlik katsayılarının tespiti, İzmir Teknoloji Enstitüsü'nde yer alan Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, KEM QTM 500 ısı iletkenlik ölçüm cihazı üzerinde yapılmıştır (Şekil 25). 150x150x20 mm boyutlarındaki levhaların ön ve arka yüzeylerinden 3 ölçüm alınarak ısı iletim katsayısı belirlenmiştir.

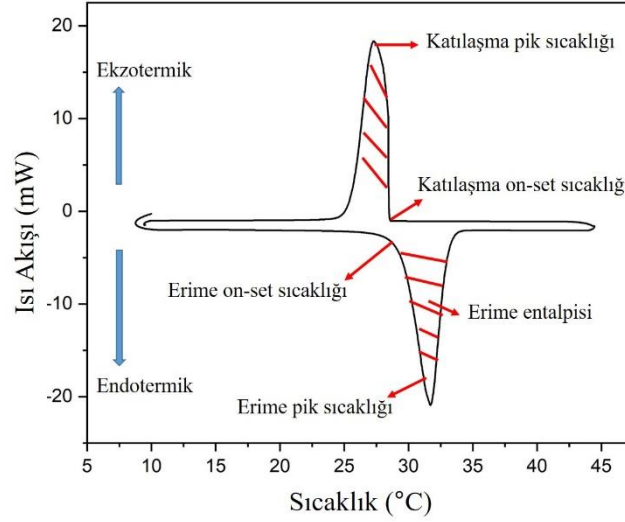


Şekil 26. KEM QTM 500 Isıl iletkenlik ölçüm cihazı

► Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testi

Saf FDM'lerin ve üretilen odun kompozitlerinin gizli ısı depolama (GID) özellikleri, nitrojen gazı atmosferi altında 3 °C/dakika ısıtma-soğutma hızında bir diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC, Hitachi 7020 model, Japonya) cihazı ile KTÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda incelenmiştir (Şekil 27). Ölçümler için ortalama 10 mg ağırlığında numuneler kullanılmış ve referans olarak boş hücreler tercih edilmiştir. Bu sayede, incelenen örneklerin ısı akışlarına karşı gösterdikleri tepkiler, referans hücreye göre belirlenmiştir. DSC analizlerinin sonuçlarına dayanarak, cihazın yazılımıyla elde edilen ısı akışı-sıcaklık grafiklerinde çalışılarak numunelerin gizli ısı depolama (GID) özellikleri hakkında bilgi edinilmiştir. Termogramlardaki piklerin başlangıç (on-set) değerleri, numunenin faz değişiminin başladığı sıcaklığı temsil ederken, pik sıcaklığı ise faz değişiminin tamamlandığı sıcaklığı göstermektedir. Faz dönüşümüne karşılık gelen erime ya da katılaşma pikinden maksimum eğim olacak şekilde temel çizgiye (base line) bir çizgi çizilmesi sonucu elde edilen kesişim noktası, numunenin faz dönüşüm

on-set sıcaklığı olarak kabul edilmektedir. Faz değişimlerine karşılık gelen entalpi değişimi, yani depolanan veya salıverilen gizli ısı, erime-katılaşma piklerinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır. Şekil 26’da örnek bir DSC eğrisi üzerinde karakteristik GID verileri sunulmuştur. Ölçüm sonuçlarının doğruluğunu sağlamak amacıyla analizler üç kez tekrarlanmış ve sonuç olarak faz dönüşüm sıcaklıkları ile faz dönüşüm entalpi değerlerindeki hata payları $\pm 0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\pm \% 1.7$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 27. Tipik bir DSC termogramında karakteristik değerlerin belirlenmesi



Şekil 28. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı

➤ Isıl Döngü Testi (IDT)

Üretilen odun kompozitlerinin termal enerji depolama sistemleri (TES) güvenilirliği ve kimyasal stabilitesi, KTÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan Prime model, Carl Roth GmbH + Co.KG, Karlsruhe, Germany modeli termal döngü cihazı kullanılarak yapılan 600 erime-donma döngüsü üzerinde araştırılmıştır (Şekil 28). Örnek (8 mg), bir santrifüj tüpüne yerleştirilmiştir. Örnek, FDM'nin kompozit içindeki kimyasal ve termal stabilitesini değerlendirmek için 0 ila 40 °C arasında sabit bir oranda 0.5 °C/s hızla 600 döngü boyunca hızlandırılmış eritme ve soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Testlerden sonra, DSC ve FTIR analizleri tekrarlanarak kompozitlerin termal ve kimyasal kararlılıkları, döngülerden önceki başlangıç değerleriyle karşılaştırılarak incelenmiştir.



Şekil 29. Isıl Döngü Testi (IDT) cihazı

➤ Termal Kütle Analizi (TGA)

Kompozit bileşenlerinin ve her bir kompozitin termal kararlılık özellikleri, Termogravimetri analizleri, KTÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan, Perkin Elmer model cihaz kullanılarak incelenmiştir (Şekil 29). Analizler, argon gazı ortamında 25-600 °C aralığında argon gazı akış hızı 20 mL/dakika, ısıtma hızı 25 °C/dakikada gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerle bir numunenin sıcaklığının artmasına bağlı olarak kütleinde meydana gelen azalma, sıcaklığın

bir fonksiyonu olarak ölçülür. Başka bir deyişle, TGA analizleri ile bir numunenin hangi sıcaklıklarda bozunmaya başladığı veya hangi sıcaklığa kadar yüksek bozunma direnci gösterebildiği belirlenir. Bir numunenin kütlesi, atmosferle etkileşime girmediği süreçte sıcaklık artışına bağlı olarak ya aynı kalır ya da azalır. Analiz sonrasında, numune kütlesindeki herhangi bir değişim, kalan kütle ya da yüzde kütle kaybı olarak ifade edilir.

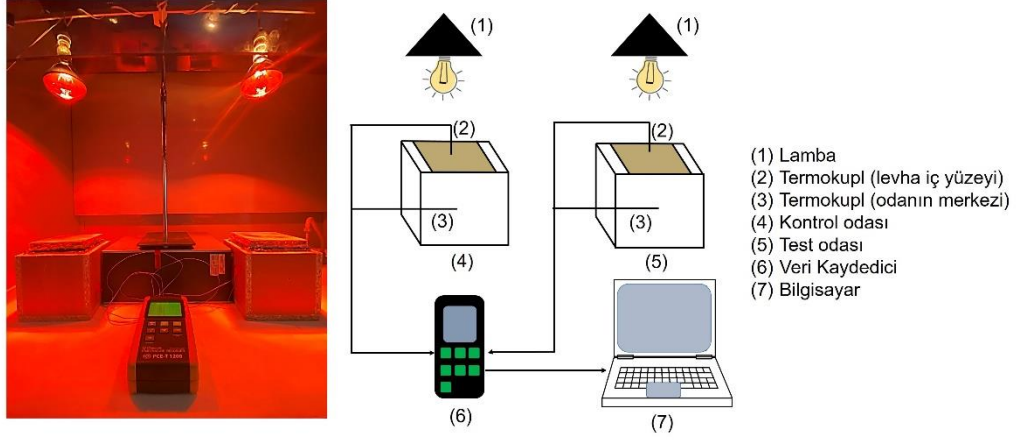


Şekil 30. Termal Kütle Analizi (TGA) cihazı

➤ Laboratuvar Ölçekli Termoregülasyon Performans Testi

MDF ve polistiren yalıtım köpüğünden 200×200×50 mm boyutlarında kontrol ve test odası olmak üzere iki küp oluşturularak Karadeniz Teknik Üniversitesi (KTÜ) Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bir adet 150×150×20 mm boyutlarında FDM içeren lif levha (test) ve bir adet FDM içermeyen lif levha (kontrol), küplerin üstüne yerleştirilmiştir. Kübik odaların oluşturulması sırasında duvarların birleşim noktaları arasındaki tüm boşluklar silikon ile doldurulmuş ve herhangi bir ısı transferi engellenerek sadece üst duvar olarak yerleştirilen panellerden ısı transferinin sağlanması amaçlanmıştır. Isı kaynağı olarak 250 Watt'lık tungsten halojen ısıtıcı ampuller, küplerden 65 cm uzaklıkta yerleştirilmiştir (Şekil 30). Test ve kontrol kompozitlerinin iç yüzey sıcaklıkları ile küplerin merkez sıcaklıkları ayrı ayrı yerleştirilen $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ hassasiyetinde K-tipi termokupl ile aynı anda ölçülerek veri kaydedici (PCE-T 1200 Model) ile kayıt altına alınmıştır. Isıtma sonrasında serbest soğuma dönemi başlamıştır.

Odaların soğutulması ise ısıtıcı lambaların eş zamanlı olarak kapatılması ve bunun sonucunda oda sıcaklığına bağlı olarak serbest soğuma ile gerçekleştirilmiştir ve bu süreç odaların iç sıcaklıklarının ilgili FDM'lerin katılma sıcaklıklarının altına düşene kadar devam ettirilmiştir.

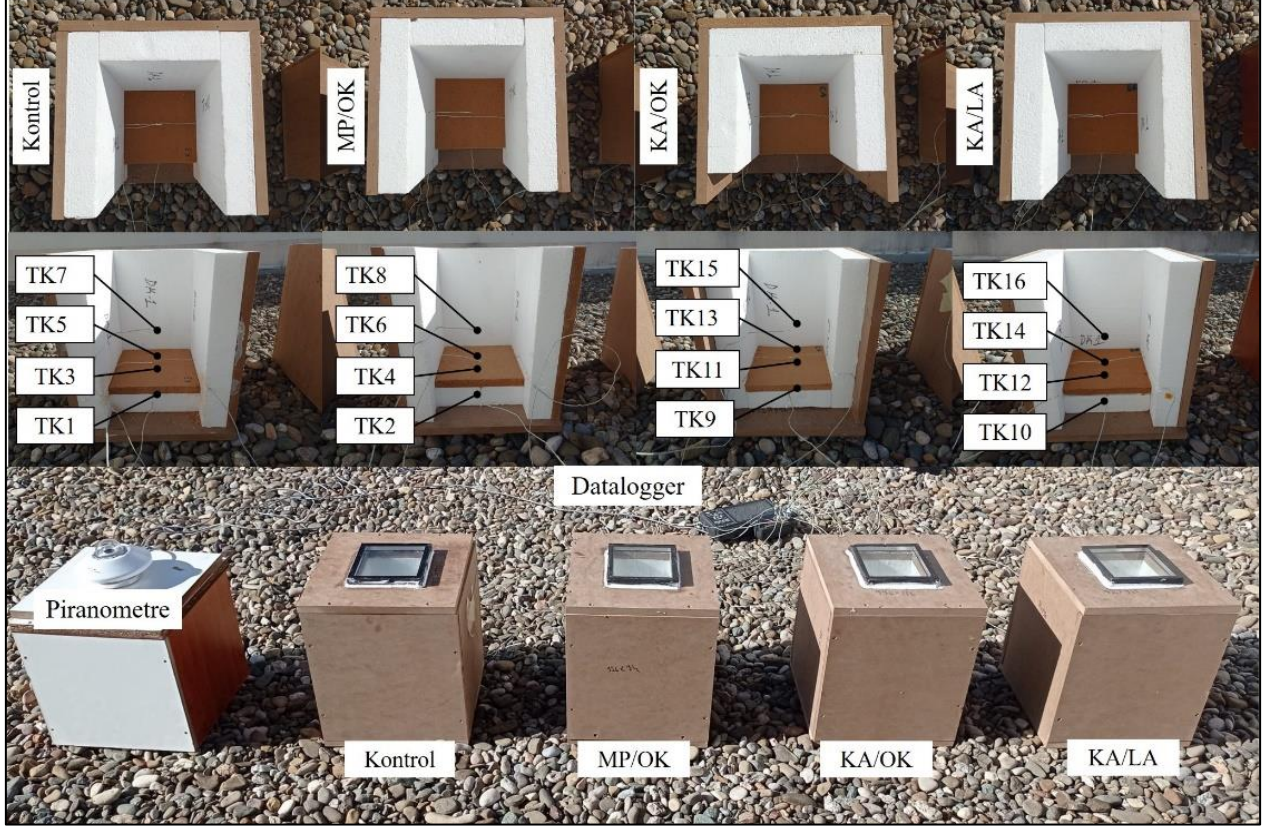


Şekil 31. Termoregülasyon Performans Testi Düzenegi ve Şematik Gösterimi

➤ Solar Termoregülasyon Performansı Testi

Üretilen FDM katkılı odun kompozit levhalarının solar termoregülasyon performansını gerçek hava koşullarında belirlemek için, 20 mm kalınlığında MDF kullanılarak $200 \times 200 \times 20$ mm boyutunda iki benzer test kabini alan testleri için hazırlanmıştır. Test kurulumunun fotoğraf görüntüsü ve termokupl pozisyonları Şekil 31'de gösterilmiştir. Şekil 31'te gösterildiği gibi, her iki kabinin çatısına $140 \times 140 \times 2$ mm boyutlarında ve güneş ışını geçirgenliğini 0.77 vt olan çift camlı pencere enerji kazanımı için küplerin üst yüzeylerine yerleştirildi. İç duvarlar, oda zemini ve pencere çevresi 5 cm genişletilmiş polistiren köpük (EPS) ile kaplandı. Testler, Türkiye'nin Bartın ilinde ($41^\circ 38' 8.99''$ N ve $32^\circ 20' 15''$ E) güneşli-bulutlu bir günde (14.11.2023-16.11.2023) çatıda gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık verileri Graphtec veri kaydedici tarafından kaydedildi ve küresel güneş ışını ölçümü Eco MS-410 piranometre kullanılarak yapılmıştır. Ambiyans (ortam) ve oda sıcaklıklarını ölçmek için K tipi termokupl kullanılmıştır. Her test odası için dört farklı termokupl (TK) kullanılmıştır. Test odasında TK2, TK4, TK6, TK8, TK9, TK11, TK13, TK15, TK10, TK12, TK14, TK16 termokuplları kullanılırken, referans odasında TK1, TK3, TK5 ve TK7 kullanılmıştır. Şekil 31'de görüldüğü gibi, termokupllar oda

merkezlerine, panellerin yüzeyine yakın (yüzeyden 10 mm uzaklıkta) ve panellerin alt ve üst yüzeylerine yerleştirilmiştir. Ortam sıcaklığı ise TK17 ile ölçülmüştür.



Şekil 32. Gerçek hava koşullarında termoregülasyon performansının değerlendirilmesi için deneysel düzenek ve test kabinlerindeki termokupl pozisyonları

2.2.8. Morfolojik Testler

➤ Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Saf odun lifi ve FDM'lerle emprenye edilmiş her bir kompozitin yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu cihazı (SEM, EVO LS 10 model, Carl Zeiss, Almanya) kullanılarak KTÜ, Merkezi Araştırma Laboratuvarında incelenmiştir.

Bu analizler ile, FDM ile emprenye edilmiş odun lifinin emprenye edildikten sonra gözenekli yapısının veya yüzey morfolojisinin nasıl etkilendiği ayrıca FDM'nin kompozit yapı içerisinde ne şekilde dağıldığını göstermek amacıyla bu analizler yapılmıştır.

2.2.9. Akustik Testler

➤ Ses Yutum Katsayısının Belirlenmesi

Tez kapsamında üretilen izolasyon levhalarının ses yutum katsayıları (α) değerleri, TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Akustik Bölümü'nde TS EN ISO 10534-2:2003 standardına göre belirlenmiştir. Empedans tüpü deneyi, bir malzemenin ses yutma ve ses yalıtım özelliklerini ölçmek için kullanılan bir laboratuvar testidir. Bu deney, özellikle malzemelerin akustik performansını değerlendirmek amacıyla yapılır. Test, bir empedans tüpü olarak adlandırılan, içi boş bir boru içerisinde ses dalgalarının malzeme numunesine çarpması ve bu dalgaların malzeme tarafından ne kadar emildiğinin veya geri yansıtıldığının ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Akustik çalışmalarda geniş bir frekans aralığını kapsamak için iki empedans tüpü konfigürasyonu kullanılmıştır. Büyük olan tüp, 100 mm çapında silindirik numuneler gerektirerek 100 ila 1600 Hz arasındaki frekansları ölçmeye olanak tanır. Küçük tüp ise 500 ila 6400 Hz frekans aralığını ölçer ve daha küçük numuneler (30 mm çapında) kullanır. Her iki durumda da, 20 mm kalınlığında iki silindirik numune kullanılmıştır. Tüm ölçümlerde, ses dalgalarının aynı açıyla numuneye yaklaşabilmesi için numunelerin düz yüzeyinin tüpe dik olması gerekmektedir. Toplanan veriler, bilgisayar yazılımı aracılığıyla analiz edilir. Ses yutma katsayısı (α) ve ses iletim kaybı (TL) gibi değerler hesaplanır. Frekanslara göre malzemenin ses yutma ve iletim performansı grafikler halinde sunulur.

Testler için, FDM katkılı izolasyon levhalarından her bir grup için 30 mm ve 100 mm çapında üçer adet örnek hazırlanmıştır. Deneyde kullanılacak ekipman, kullanıma geçmeden önce bir dizi deneme yapılarak kontrol edilmiştir. Deneyin gerçekleştirileceği ortamın sıcaklığı 21.4 °C, bağıl nem oranı %56 ve basınç 100 kPa olarak ölçülmüştür. Ölçümlerden önce hoparlör, sıcaklığın istikrarlı bir duruma gelmesini sağlamak amacıyla 10 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Ön deneyler ve ölçümler tamamlandıktan sonra, deney numunesi ve numune tutucunun ön yüzü, tüp içinde çıkıntı yapmayacak ve hava sızdırmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Her çap için 3 numunede ölçüm yapılmıştır (Şekil 33). Sinyal üretici ile empedans tüpü arasındaki bağlantı sağlandıktan sonra, 100-6300 Hz frekans aralığında her bir 1/3 oktav bant merkez frekansında sinyal üretilmiş ve uygun yazılım kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

➤ Ses İletim Kaybının Belirlenmesi

Tez kapsamında üretilen izolasyon levhalarının ses iletim kaybı (TL) değerleri, TSE Yapı Malzemeleri Yangın ve Akustik Laboratuvarı Akustik Bölümü'nde TS EN ISO 10534-2:2003 standardına göre belirlenmiştir. Testler için, FDM katkılı izolasyon levhalarından her bir grup için 30 mm ve 100 mm çapında üçer adet örnek hazırlanmıştır (Şekil 33). Deneyde kullanılacak ekipman, kullanıma geçmeden önce bir dizi deneme yapılarak kontrol edilmiştir. Deneyin gerçekleştirileceği ortamın sıcaklığı 21.4 °C, bağıl nem oranı %56 ve basınç 100 kPa olarak ölçülmüştür. Ölçümlerden önce hoparlör, sıcaklığın istikrarlı bir duruma gelmesini sağlamak amacıyla 10 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Ön deneyler ve ölçümler tamamlandıktan sonra, deney numunesi ve numune tutucunun ön yüzü, tüp içinde çıkıntı yapmayacak ve hava sızdırmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Her çap için 3 numunede ölçüm yapılmıştır. Sinyal üretici ile empedans tüpü arasındaki bağlantı sağlandıktan sonra, 100-6300 Hz frekans aralığında her bir 1/3 oktav bant merkez frekansında sinyal üretilmiş ve uygun yazılım kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 33. Empedans tüpü test cihazıyla ses yutum katsayılarının ve ses iletim kaybının belirlenmesi

2.2.10. Biyolojik Testler

Tez çalışması kapsamında üretilen FDM esaslı levhaların biyolojik etmenlere karşı davranışları, İtalya'nın Floransa (Firenze) şehrinde bulunan CNR-IVALSA İtalya Ulusal Araştırma Konseyi Entomoloji Laboratuvarları'nda incelenmiştir. Bu testler arasında küf mantar testi ve termit testi yer almaktadır. Tüm örnekler, test öncesinde 20 °C'deki %65 bağıl nemdeki iklimlendirme odasında sabit ağırlığa ulaşana kadar bekletilmiştir. Ayrıca, biyolojik testlerin ardından örneklerin dayanıklılık sınıfları belirlenmiştir.

➤ Termit testi

Yeraltı termitlerine karşı direncin değerlendirilmesi, İtalyan türü *Reticulitermes lucifugus*'a uygun olarak Avrupa standardı EN 117'ye göre gerçekleştirilmiştir. EN 117 standardı laboratuvar testlerine dayanan bir standarttır. Örnekler 50 x 25 x 20 mm boyutunda 0,5 mm tolerans ile kesilmiştir ve her bir ürün için 5 tekrar yapılmıştır. Test için alınan termitlerin virülansını doğrulamak için gerekli olan işlenmemiş kontrol örnekleri ise 3 tekrardır ve referans olarak kullanılan tür çam türüdür. Odun kompozit örnekleri test ve kontrol olmak üzere ayrılmış ve her bir kavanoza önce termit substratı daha sonra substratın üstüne ise bir test ve bir kontrol grubu olmak üzere odun örnekleri yerleştirilmiştir. Her bir kavanoza 250 adet termit yerleştirilmiştir. Asker termit, işçi termit ve yarı ergin (nif) termit olmak üzere üç tip termit türü kullanılmıştır. Bu koloni, FDM ile emprenye edilmiş örneklerle sekiz hafta boyunca tüm termitler ölene kadar veya işlenmiş numunelerdeki tüm termitler ölene kadar sürdürülmüştür. Testin geçerliliği, işlenmemiş çam örneklerinde hayatta kalan termite oranının yüzde 50 olduğu durumda geçerli kabul edilmektedir.

Her 250 bireyden oluşan grup, içinde su, kum bulunan bir kap içine indirilir; içeride merkezde bir cam halka ve orijinal koloniden küçük bir ahşap parça bulunmaktadır. Bir gün sonra, bir test örneği halkanın üzerine yerleştirilir. Her kavanoz kapatılır ve yaklaşık 26 ± 2 °C sıcaklıkta ve $\%70 \pm 5$ nemde iyi havalandırılmış bir klima odasına götürülür. Örnekler, termitlerin uygun bir şekilde adapte olup olmadığını doğrulamak için 8 haftaya kadar izlenir. Termitlerin kumlu alt tabakada hareketini gözlemlemek, özellikle kavanozun duvar kenarlarında açıkça görülebilmektedir. Eğer termitlerin hâlâ yaşayıp yaşamadığını görmek mümkün değilse, Şekil 34'te gösterildiği gibi kavanoz açılır ve boşaltılır; eğer faaliyet varsa, kavanoz tekrar düzenlenir, aksi takdirde test tamamlanmış kabul edilir.



Şekil 34. Termit testi örnekleri

Tahribatın değerlendirilmesi, termitlerin ahşaba kazdığı galerilerin genişliği, derinliği ve hayatta kalma durumunu dikkate alan dört dereceli bir sıralamaya dayanarak belirlenmiştir. Sonuçlar aynı zamanda EN 350: 2016 standardında bildirilen Dayanıklılık Sınıfı olarak da hesaplanmıştır. Bu dayanıklılık değerlendirmesi, aynı işleme ait tekrarlar arasındaki farklı sıralama derecelerinin yüzdelikleri üzerine kuruludur. Eğer saldırı derecesi örneklerin %90'ından fazlası için 0 veya 1 ise ve kalan %10'unun derecesi 2'den fazla değilse, işlem dayanıklı kabul edilir. Saldırı derecesi %90'dan fazla numune için 0 veya 1 olduğunda ve kalan %10'luk numunelerde saldırı derecesi 2'yi geçmediğinde, işlem dayanıklı olarak kabul edilir. Saldırı dereceleri 3 veya 4 olan numuneler %50'den az olduğunda, dayanıklılık sınıfı orta derecede dayanıklı olarak kabul edilir ve aynı derecelendirme %50 veya daha fazla olduğunda, dayanıklılık sınıfı dayanıklı değildir. Görsel inceleme ile her örnek, saldırının varlığı, yaygınlığı ve derinliği göz önüne alınarak değerlendirilir. Deney örneklerinin görsel olarak değerlendirilmesinde aşağıdaki zarar faaliyeti ölçeğinden yararlanılmıştır.

- 0 = Hiçbir zarar faaliyetine rastlanılmamıştır.
- 1 = Çok az zarar faaliyetine rastlanılmıştır.
- 2 = Az zarar faaliyetinde rastlanılmıştır.
- 3 = Orta derece zarar faaliyetinde rastlanılmıştır.
- 4 = Yüksek zarar faaliyetine rastlanılmıştır.

Deney standardına göre deneyin geçerli sayılabilmesi için 3 adet kontrol örneğinde zarar faaliyet puanının ortalama 4 olması, yani termitlerin yüksek zarar faaliyetinde bulunması gerekmektedir.

➤ Küf Testi

Bu test, AWP A E24-06 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Küf büyümesine karşı direnç, sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) işlenmemiş çam odununa göre değerlendirilir. Yöntemin ana amacı, mantar büyümesine uygun bir ortamda ahşap ürünlerin yüzey küf büyümesine karşı gösterdiği direnci belirlemektir.

75 x 100 x 20 mm ölçülerinde kesilen kompozitler ve referans işlenmemiş çam odun örneği altışar adet olarak alınmıştır. Kullanılan küfler *Aerobasidium pullulans*, *Penicillium spp*, *Sydowia polispora*, *Trichoderma viride* dir.

Bu yöntemi gerçekleştirmek için özel bir kutu inşa edilmiştir. Kutu, alt kısmında toprak ve torf içeren ve küf sporlarının dağıtıldığı bir tabana sahip pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Odada, ahşap ve biyokompozit örneklerini destekleyen bazı taşıma çubukları yerleştirilmiştir (Şekil 35). Küfler petri kabına inoküle edilmiş ve sonra spor oluştuktan sonra topraklara aktarılmıştır. Odanın içindeki hava dolaşımı sürekli olarak örnekleri belirtilen küflerle inoküle edilmiştir ve test süresince örnekleri sporlara maruz bırakılmıştır. Odanın koşulları 25°C sıcaklık ve %90-98 nem olarak ayarlanmıştır. Yöntem steril değildir, bu nedenle hava veya topraktan gelen formlar, inoküle edilmiş küflerle ürün test yüzeylerinde yer kapma konusunda rekabet edebilir. Kontroller için, örnekler odadan çıkarılıp ve her 2 ila 8 haftada bir örnek yüzeylerindeki küf büyümesi değerlendirilmiştir. Kabin düzgün çalışıyorsa, işlem görmemiş çam diri odunu kontrol örnekleri, dört hafta içinde (kabin 25°C'de çalıştırıldığında) en az 3 ortalama küf büyüme derecesi geliştirmelidir. Bu büyüme elde edilmezse, kabin koşulları tatmin edici değildir, odada müdahale eden bir madde vardır veya inokülasyon başarısız olmuştur. Test iptal edilmelidir.



Şekil 35. Biyokompozitlerin küfe karşı direncini değerlendirmek için tasarlanmış pleksiglas kutu

Her örnek, küf büyümesinin derecesine ve yoğunluğuna bakılarak derecelendirilmiştir. FDM emprenye edilmiş odun kompozit örnekler için elde edilen sonuçlar, kontrol kompozitleri ve işlenmemiş sarıçam örnekler için elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak ürünlerin küf büyümesine karşı göreceli direnci değerlendirilmiştir. Sonuçlar, 2, 4, 6 ve 8 hafta sonrasındaki sıralamaya göre tablo 7'de açıklandığı gibi rapor edilmiştir.

Tablo 7. Küf direncini değerlendirmek için derecelendirme

Derece	Açıklama
0	Görünür bir büyüme yok
1	Yüzeyin %10'una kadar küf kaplamış
2	Yüzeyin %10 ile %30'u arasında küf kaplamış
3	Yüzeyin %30 ile %70'i arasında küf kaplamış
4	Yüzeyin %70'ten fazlasında küf bulunuyor
5	Yüzeyin %100'ünde küf bulunuyor

2.2.11. İstatistiksel Analiz

Yapılan testler sonrasında elde edilen verilerin istatistiksel analizi, istatistik paket programı (IBM SPSS v22) kullanılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerde %95 güven düzeyi dikkate alınarak tespit edilmiştir. Basit varyans analizi deney grupları arasında farklılıklar tespit edilmiştir. Deney grupları arasında sonuçların anlamlı çıkması durumunda homojenlik grupları belirlenerek gruplar arası karşılaştırma gerçekleştirmek amacıyla Duncan testi gerçekleştirilmiştir.

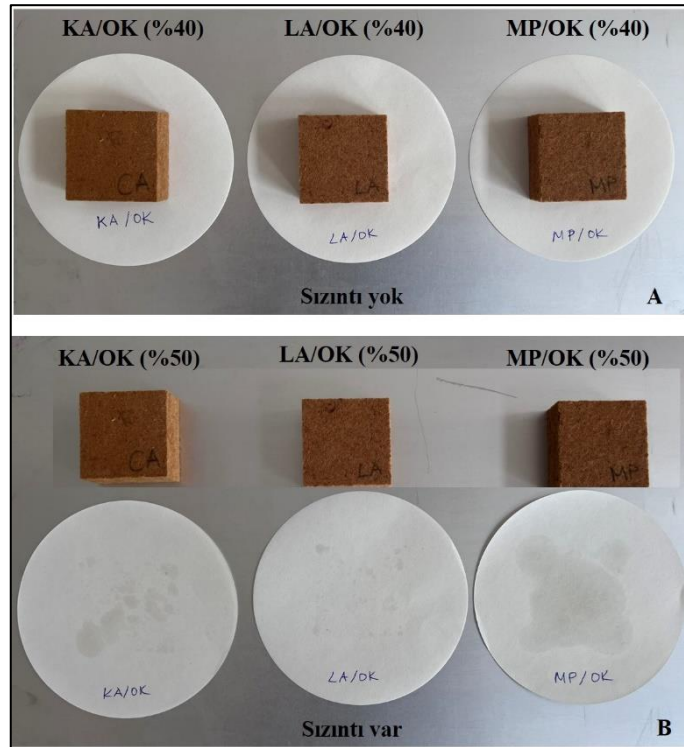
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Fiziksel Testlere Ait Bulgular

3.1.1. Sızdırmazlık Testine Ait Bulgular

Tez kapsamında üretilen odun kompozitlerinin sızdırmazlık davranışlarının incelendiği test sonuçları, aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Fotoğraflar, odun lifleri içinde seçilen FDM'lerin maksimum oranda sızıntı olmaksızın hapsedilme miktarlarını göstermektedir.

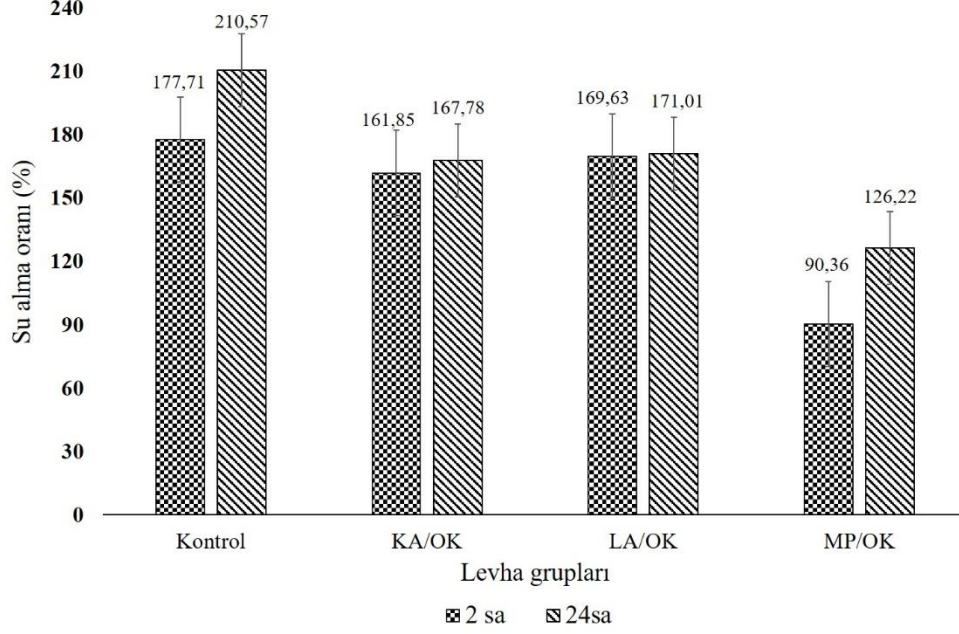
Bu sızdırmazlık testlerinde, odun kompozit yapısındaki maksimum FDM yükleme oranları belirlenmiş olup; 3 farklı FDM için bu değer, Şekil 36'da gösterildiği gibi, kütlece %40 olarak tespit edilmiştir. Fotoğraflardan da anlaşılacağı üzere, bu oranların üzerinde FDM yüklemesi yapıldığında, filtre kağıtları üzerinde FDM sızıntısı gözlemlenirken, belirlenen bu oranlarda veya daha düşük FDM yüklemelerinde sızıntı gözlenmemiştir. Dolayısıyla, FDM sızıntısı tespit edilmeyen en yüksek FDM oranına sahip odun ön-kompozitleri, formca kararlı kompozit FDM (FKK-FDM) olarak kabul edilmiştir.



Şekil 36. FDM odun kompozitlerinin sızdırmazlık test sonuçları

3.1.2. Su Alma ve Kalınlık Artışına Ait Bulgular

Tez kapsamında üretilen FDM esaslı kompozit levhalarının 2 ve 24 saat süre sonunda su alma ve kalınlık artış oranına ait veriler Şekil 37 ve Şekil 38’de sunulmuştur.



Şekil 37. FDM esaslı kompozitlerin su alma oranları

Şekil 37’de 2 saatlik ve 24 saatlik su alma oranlarını incelediğimizde FDM esaslı levha gruplarının su alma oranları kontrol grubuna göre daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi; kullanılan FDM’ler yağ karakterli olduğundan dolayı su itici özelliğe sahip olmasıdır. Hidrofobik yapıya sahip malzemeler suyla temas eden yüzeyde su emilimini azaltır. Bu durumda su alma testlerinde malzeme, suyu itme eğiliminde olur ve daha az su emer. En yüksek su alma oranı kontrol grubu levhalarına aitken ardından sırasıyla LA/OK, KA/OK ve MP/OK takip etmiştir. Yine 2 saat ile 24 saatlik suya maruz kalan grupları kendi arasında değerlendirdiğimizde ise 24 saatlik su alma oranları 2 saatlik su alma oranlarına göre bir miktar daha artış göstermektedir. Bu durum, daha uzun süreli daldırmanın, numunelerdeki hidrojen bağlarını kırmak için daha fazla zaman tanınması ve böylece daha fazla suyun emilmesine neden olması ile açıklanmıştır. En fazla fark MP/OK ve kontrol levha grubuna aitken KA/OK ve LA/OK gruplarındaki artış daha az olmuştur. Sonuç olarak, FDM katkısı kullanılarak üretilen levhaların su alma oranı kontrol levhasına göre daha düşüktür ve bu, literatürdeki FDM katkılı odun esaslı levhalarla kıyaslandığında uyumludur (Dasiewicz vd.,

2024; Rodríguez vd., 2024). Lif levhaların su alma kapasitesi kullanılan malzemelere ve üretim yöntemlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Genel olarak, odun bazlı lif levhalar yüksek su alma oranına sahiptir, bu da özellikle düşük yoğunluklu levhalar için geçerlidir (Kaya, 2018; Kara vd., 2024). Ayrıca odun bazlı lif levhaların su alma oranları, kullanılan bağlayıcı türleri ve hidrofobik katkı maddelerinin miktarına göre değişkenlik gösterir. Düşük yoğunluklu levhalar özellikle bu etkenlere karşı daha hassastır, çünkü lif yapıları daha gözenekli olup su alımına daha yatkındır. Su alma oranını azaltmak için bağlayıcıların modifikasyonu önemlidir; örneğin, hidrofobik katkı ve biyobazlı bağlayıcılar ile işlenmiş levhalarda su dayanımı daha iyi gözlemlenmiştir. Bu amaçla kullanılan fenol-formaldehit gibi reçineler, lif levhalarda su emilimini önemli ölçüde azaltabilir ve panelin boyutsal kararlılığını artırabilir. (Zhang vd., 2018; Savov vd., 2022 ; Nithipaiboon vd., 2023)

FDM türünün su alma oranlarına etkisinin belirlemek amacıyla basit varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 8’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde FDM katkısının odun kompoziti malzemesinin 2 ve 24 saat su alma oranlarına etkisi anlamlı düzeyde bulunmuştur.

Tablo 8. Farklı FDM katkılı odun kompozitlerinin su alma oranlarına ait basit varyans analizi sonuçları

	Varyans Kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-Hesap	Önem Derecesi
Su Alma Oranı (%) 2 saat	Gruplar arası	24252.8	3	8084.267	10.425	0.000
	Gruplar içi	12407.44	16	775.465		
	Toplam	36660.24	19			
Su Alma Oranı (%) 24 saat	Gruplar arası	17821.05	3	5940.35	12.402	0.000
	Gruplar içi	7664	16	479.00		
	Toplam	25485.05	19			

2 saat su alma testi sonunda, varyans kaynakları ortalamalarının karşılaştırılması ve homojenlik gruplarının tespit edilmesi maksadıyla yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. FDM katkılı odun kompozitlerinin 2 saat sonunda su alma oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)

Varyans Kaynakları	N	Su Alma Oranı (%)		H.G*
		2 saat	Standart Sapma	
Kontrol	5	177.71	21.88	A
KA/OK	5	161.85	8.68	A
LA/OK	5	169.63	24.15	A
MP/OK	5	90.36	24.31	B

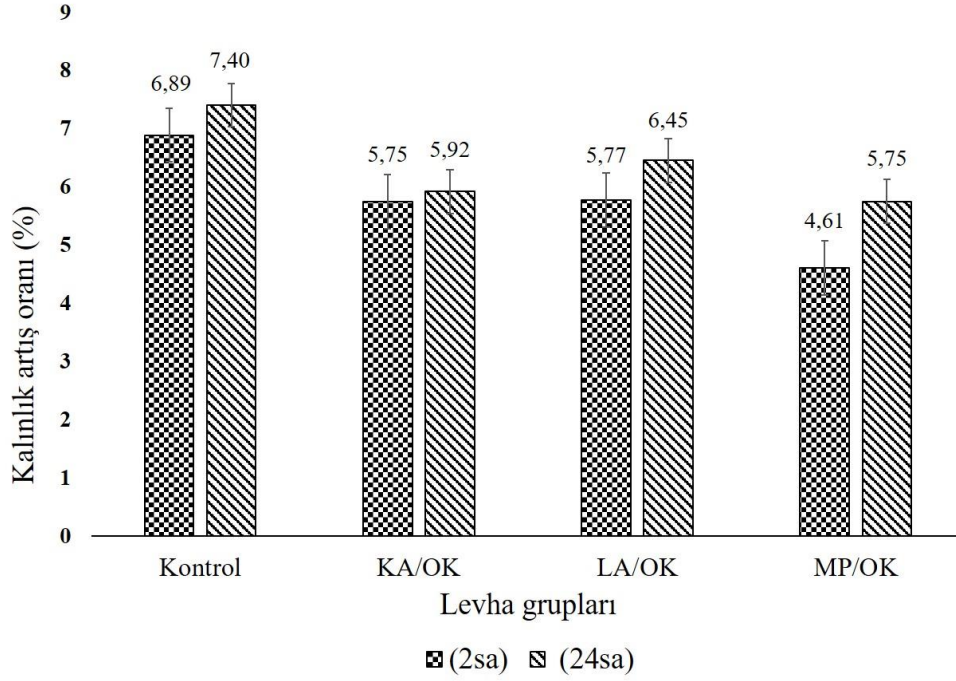
Tablodaki veriler ışığında 2 saat sonunda kontrol grubu, ortalama %177,71 su alma oranıyla en yüksek değeri gösterirken, MP/OK grubu, ortalama %90,36 su alma oranı ile en düşük değeri göstermektedir. Duncan testi sonuçlarına göre, kontrol, KA/OK ve LA/OK grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır ve bu gruplar A kategorisinde yer almaktadır. Bu durum, bu üç grubun 2 saat sonundaki su alma oranlarının birbirine yakın olduğunu ve FDM ilavesinin bu gruplarda su alma kapasitesini önemli ölçüde etkilemediğini göstermektedir. Buna karşın, MP/OK grubu, diğer tüm gruplardan istatistiksel olarak anlamlı derecede farklılık göstermektedir ve B kategorisinde yer almaktadır. MP/OK grubunun düşük su alma oranı, FDM ilavesinin bu grup üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve 2 saat sonundaki su alma kapasitesini büyük ölçüde azalttığını göstermektedir. Yapılan araştırmalar, metil palmitatın hidrofobik etkisinin ahşap matrisiyle etkileşiminden kaynaklandığını ve lignin gibi organik bileşenlerle bütünleşerek kompozitin suya karşı dayanıklılığını artırdığını öne sürmektedir. Bu bileşik, su itici özellikleri sayesinde yapı ve mobilya uygulamalarında su emilimini sınırlandırarak malzemelerin dayanıklılığını artırabilir. Ayrıca, metil palmitat ve benzer yağ asidi metil esterlerinin ahşap veya ahşap-polimer kompozitlere eklenmesiyle malzemenin yüzeyinde su geçirmez bir tabaka oluşturarak nem alımını etkili bir şekilde sınırladığını göstermektedir. Bu durum, ahşap ürünlerin boyutsal kararlılığını artırmakta ve nemli ortamlarda ömrünü uzatmaktadır (Liu vd.,2009; Cong vd., 2011; Yu vd., 2021; Wang vd.,2022)

24 saat su alma testi sonunda, varyans kaynakları ortalamalarının karşılaştırılması ve homojenlik gruplarının tespit edilmesi amacıyla yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10. FDM katkılı odun kompozitlerinin 24 saat sonunda su alma oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)

Varyans Kaynakları	N	Su Alma Oranı (%)		H.G*
		24 saat		
		Ortalama	Standart Sapma	
Kontrol	5	210.57	24.21	A
KA/OK	5	167.78	10.49	B
LA/OK	5	171.01	21.59	B
MP/OK	5	126.22	27.44	C

Tablodaki veriler incelendiğinde 24 saat sonunda kontrol grubu, ortalama %210,57 su alma oranıyla en yüksek değeri gösterirken, MP/OK grubu, ortalama %126,22 su alma oranı ile en düşük değeri göstermektedir. Duncan testi sonuçlarına göre, KA/OK ve LA/OK grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır ve bu gruplar B kategorisinde yer almaktadır. Bu durum, bu iki grubun 24 saat sonundaki su alma oranlarının birbirine yakın olduğunu ve FDM ilavesinin bu gruplarda su alma kapasitesini benzer ölçüde etkilediğini göstermektedir. Buna karşın, kontrol ve MP/OK grubu, diğer gruplardan ve birbirlerinden istatistiksel olarak anlamlı derecede farklılık göstermektedir. Kontrol grubu en yüksek değerle A ve MP/OK ise en düşük değer ile C kategorisinde yer almaktadır. Kontrol grubu ile kıyaslandığında FDM katkısının odun kompozitlerinin 24 saat sonunda su alma oranını azalttığı en önemli azalmanın ise MP/OK grubunda meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 38.FDM esaslı kompozitlerin kalınlık artış oranları

Şekil 38’yi incelediğimizde 2 ve 24 saatlik suda bekletme sonucu levha gruplarındaki kalınlık artış oranları, su alma oranlarındaki artışla paralellik göstermiştir. Kontrol levha grubundaki kalınlık artış oranı test gruplarına nazaran daha yüksek çıkmıştır. Kontrol levha grubunun 2 saatteki kalınlık artışı %6,89 iken, 24 saatte %7,40’a çıkmıştır. Kontrol levhası suyu aldıktan sonra belirgin bir kalınlık artışı göstermektedir. KA/OK levha grubunda 2 saatte %5,75 kalınlık artış, 24 saatte ise %5,92 oranında artış gözlemlenmiştir. Kalınlık artışı oldukça sınırlı kalmıştır ve kontrol grubuna kıyasla daha düşük seviyededir. LA/OK levha grubu 2 saatlik kalınlık artış oranı %5,77 iken, 24 saatte %6,45’e çıkmıştır. Kalınlık artışı diğer gruplara göre orta seviyede gerçekleşmiştir. MP/OK levha grubu 2 saatteki kalınlık artışı %4,61 iken, 24 saatte %5,75’e çıkmıştır. MP grubunun kalınlık artış oranı, diğer gruplara kıyasla en düşük seviyede kalmıştır.

FDM türünün kalınlık artış oranlarına etkisini belirlemek amacıyla basit Varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 11’de verilmiştir. Veriler incelendiğinde FDM katkısının odun kompozit malzemenin 2 saatlik süre için gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır ($p > 0,05$). Ancak, p-değerinin 0,067 olması, gruplar arasında fark olabileceğini göstermektedir. 24 saatlik süre için ise gruplar arasında anlamlı bir fark

bulunmuştur ($p < 0,05$). Bu, grupların uzun süreli kalınlık artış performanslarında önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir.

Tablo 11. Farklı FDM katkılı odun kompozitlerinin kalınlık artışı oranlarına ait basit varyans analizi sonuçları

	Varyans Kaynağı	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-Hesap	Önem Derecesi
Kalınlık Artış Oranı (%) 2 saat	Gruplar arası	12.977	3	4.326	2.898	0.067
	Gruplar içi	23.884	16	1.493		
	Toplam	36.861	19			
Kalınlık Artış Oranı (%) 24 saat	Gruplar arası	8.315	3	2.772	3.596	0.037
	Gruplar içi	12.333	16	0.771		
	Toplam	20.648	19			

2 saat kalınlık artışı testi sonunda, varyans kaynakları ortalamalarının karşılaştırılması ve homojenlik gruplarının tespit edilmesi maksadıyla yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. FDM katkılı odun kompozitlerinin 2 saat sonunda kalınlık artışı oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)

Varyans Kaynakları	N	Kalınlık Artış Oranı (%)		H.G*
		2 saat		
		Ortalama	Standart Sapma	
Kontrol	5	6.89	0.42	A
KA/OK	5	5.75	1.73	AB
LA/OK	5	5.77	1.20	AB
MP/OK	5	4.61	1.16	B

Duncan testi sonucunda, kontrol grubu ortalama %6,89’luk kalınlık artışıyla en yüksek değeri, MP/OK grubu ise ortalama %4,61 kalınlık artışı ile düşük değeri almıştır. KA/OK ve LA/OK grupları ise sırasıyla %5,75 ve %5,77’lik birbirine oldukça yakın değerler almıştır. Bu sonuçlara göre kontrol grubu en yüksek kalınlık artışı değeri ile diğer gruplardan anlamlı bir farklılık göstererek ayrı bir grupta yer almış, MP/OK grubu ise diğer gruplardan anlamlı bir farklılık göstererek ayrı bir grupta yer almıştır. KA/OK ve LA/OK grupları arasında 2 saatlik kalınlık artış oranı bakımından anlamlı bir fark yok iken diğer gruplar ile arasında anlamlı farklılıklar vardır.

24 saat kalınlık artışı testi sonunda, varyans kaynakları ortalamalarının karşılaştırılması ve homojenlik gruplarının tespit edilmesi maksadıyla yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. FDM katkılı odun kompozitlerinin 24 saat sonunda kalınlık artışı oranlarına varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)

Varyans Kaynakları	N	Kalınlık Artış Oranı (%)		H.G*
		24 saat Ortalama	Standart Sapma	
Kontrol	5	7.40	0.36	A
KA/OK	5	5.92	1.48	B
LA/OK	5	6.45	0.77	AB
MP/OK	5	5.75	0.42	B

Duncan testi sonucunda, 24 saatlik su alma testi sonucunda kontrol grubu ortalama %7,40’lık kalınlık artışıyla en yüksek değeri almıştır. KA/OK ve MP/OK grupları arasında 24 saatlik kalınlık artış oranı bakımından anlamlı bir fark yok iken bunlar ile kontrol grubu arasında anlamlı farklılıklar vardır. LA/OK grubu ise her iki gruba da yakın değerler almış ve her iki grupta da yer almıştır.

Tez kapsamında üretilen nişasta tutkalı ile bağlanmış FDM esaslı levhalarının kalınlık artış oranları incelendiğinde, yüksek su alma oranlarına sahip olmalarına rağmen levhalarda kalınlık artış oranlarının oldukça az olduğu tespit edilmiştir (Şekil 38). Bu da levhaların üretim yöntemi ve nispeten yoğunluklarının düşük olmasından dolayı, levhalarda boşluk oranının yüksek olması dolayısıyla absorplanan suyun serbest su olduğunu göstermektedir. Ayrıca levha üretiminde kullanılan nişasta tutkalı üretiminde kullanılan çapraz bağlı bağlayıcı olarak kullanılan sitrik asitin de etkisi olduğu düşünülmektedir. Çapraz bağlı nişasta ile üretilmiş odun kompozitleri, yoğunlaşma reaksiyonu sonrasında doğal nişastanın hidroksil gruplarının azalması ve kürlleme işlemleri sırasında üç boyutlu ağların oluşması nedeniyle su alma direncini artırmaktadır (Kaith vd., 2010). Nişasta aslında hidrofilik (su çekici) bir malzemedir. Doğal nişasta, suyla temas ettiğinde kolayca şişer ve çözünür, çünkü hidroksil grupları ($-OH$) su molekülleriyle hidrojen bağı oluşturur. Bu özelliği sayesinde suyu çeker ve su içinde dağılır. Ancak, nişastanın kimyasal olarak modifiye edilmesiyle (örneğin, asetillenmiş nişasta, çapraz bağlanmış nişasta gibi işlemlerle) hidrofobik özellikler kazandırılabilir. Bu tür işlemler nişastanın suya karşı direncini artırabilir ve onu hidrofobik

hale getirebilir. Nişastanın çapraz bağlanması, nem içeriğini en aza indirmek ve moleküler hareketliliği azaltarak onun bariyer özelliklerini iyileştirmede kullanılan bir metottur (Gürler, 2020). Nişasta hidroksil grupları ile sitrik asitteki karboksilik grupları arasında yeni kimyasal bağlara yol açar ve sonuç olarak hidrofilik karakter özelliği azalır ve retrogradasyon da önlenmiş olur. Dolayısıyla çapraz bağlama, nişastanın retrogradasyonunu kısıtlayarak onun özelliklerinin iyileşmesine de yardımcı olur (Seligra vd., 2016).

Yapılan benzer bir çalışmada %5, %10, %30, %50 oranlarda FDM eklenerek ürefoormaldehit tutkalı kullanılarak üretilen MDF panellerinin su alma ve kalınlık artış oranı, FDM miktarının artmasıyla kontrol grubuna kıyasla azalmıştır (Dasiewicz vd., 2024). Yine benzer bir diğer çalışmada ise, %2 ve %6 FDM ve MikroFDM kullanılarak üretilen MDF panellerinin su alma ve kalınlık artış oranları kontrol grubuna kıyasla daha düşük çıkmıştır (Rodríguez vd., 2024). Yapılan literatür taraması, tez kapsamında yapılan su alma ve kalınlık artış oranı testini doğrular niteliktedir.

Yapılan su alma ve kalınlık artış testlerine göre, FDM katkılı levhalar ve kontrol levhası arasında önemli farklar gözlemlenmiştir. Kontrol levhası, hem su alma hem de kalınlık artışı bakımından en yüksek değerlere sahip olup, 24 saat sonunda %210,57 oranında su almış ve %7,40 oranında kalınlık artışı göstermiştir. Bu sonuç, katkı maddesi içermeyen levhaların suya karşı en hassas olduğunu ve boyutsal kararlılığını en çok kaybeden grup olduğunu ortaya koymaktadır.

Buna karşın, FDM katkılı levhalar, suya karşı daha dirençli performans sergilemiştir. Özellikle MP/OK grubu, %126,22 ile en düşük su alma oranına ve %5,75 ile en düşük kalınlık artışına sahip olmuştur. Bu da MP katkısının levhanın hem su alma oranını iyileştirdiği hem de boyutsal stabilite özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir. KA/OK ve LA/OK grupları ise su alma ve kalınlık artışı açısından orta seviyelerde yer almış, kontrol levhasına göre daha iyi performans göstermiş, ancak MP/OK grubunun gerisinde kalmıştır. FDM katkısı, lif levhaların suya karşı dayanıklılığını ve boyutsal stabilitesini önemli ölçüde artırmıştır. Özellikle MP katkılı levhalar, bu özellikler açısından en başarılı sonuçları vererek su geçirmezlik ve şişme direnci konularında öne çıkmıştır. Test sonlandırıldıktan sonra levhalarda herhangi bir dağılma ve bozulma söz konusu olmaması da boyutsal stabilitelerinin iyi olduğunu bir diğer kanıttır (Şekil 39).



Şekil 39. Su alma ve kalınlık artış testinden sonra kompozitlerin boyutsal stabilitesi

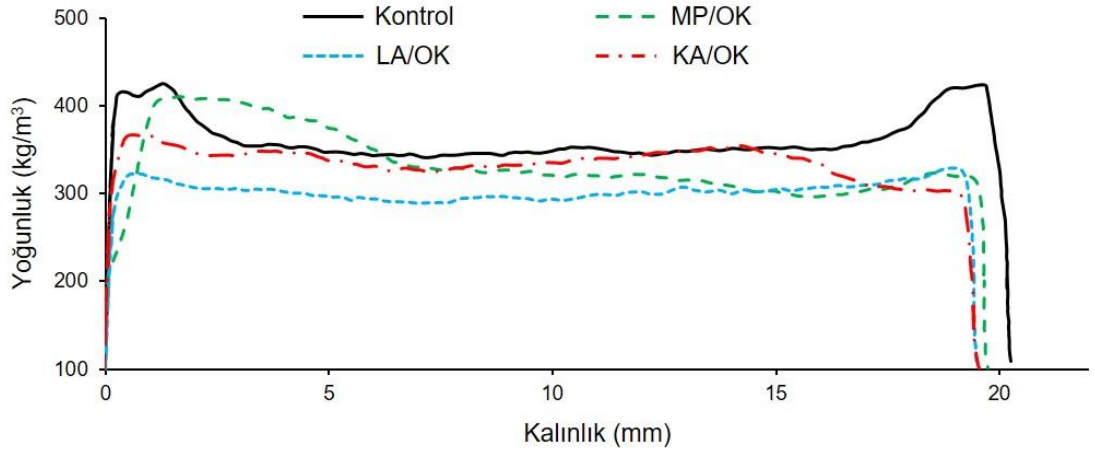
Sonuç olarak, FDM katkılı levhalar, özellikle suya dayanıklı ve boyutsal olarak kararlı malzemelere ihtiyaç duyulan bina uygulamalarında kullanılabilirlik açısından büyük potansiyele sahiptir.

3.1.3. Levhaların Yoğunluk Profiline Ait Bulgular

Lif levhalarda dikey yoğunluk profil testi (DYP), levhanın farklı katmanlarındaki yoğunluğun dağılımını incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Lif levhalar, özellikle ahşap esaslı malzemelerde (MDF, HDF, sunta gibi) geniş bir uygulama alanına sahiptir ve bu malzemelerin performansını etkileyen en kritik özelliklerden biri, yoğunluk dağılımıdır. Dikey yoğunluk profili, levhanın üretim sürecinde homojenlik, mekanik dayanım ve yüzey kalitesi gibi parametrelerin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynar. DYP sonuçları, levhanın üretim parametrelerinin optimize edilmesi için kritik veriler sağlar. Yüksek yoğunluklu yüzey katmanları, levhanın yüzey sertliğini artırırken, düşük yoğunluklu iç katmanlar, levhanın hafif olmasını sağlar. Üretim sürecindeki sıcaklık, basınç ve presleme süresi gibi faktörler, DYP üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Bu parametrelerin doğru ayarlanması, istenilen yoğunluk profilinin elde edilmesi için gereklidir.

Tez kapsamında üretilen FDM katkılı formca kararlı odun kompozitlerinin kalınlıkları boyunca yoğunluk dağılım grafikleri Şekil 40'da verilmiştir. Tez kapsamında hedeflenen levha yoğunlukları 350 kg/m^3 'tür. Grafikten de anlaşıldığı üzere levhaların yoğunluğu yaklaşık 350 kg/m^3 civarında bulunmuştur.

Grafikte görüldüğü üzere, yoğunluk değerleri merkezde ve yüzeyde daha yüksek olmasına rağmen, yalıtım panelleri genellikle lineer bir yoğunluk profiline sahiptir. Lineer yoğunluk profilleri, kompozitler içinde oldukça homojen bir yoğunluk dağılımını işaret etmektedir. Bu profil türü, yalıtım panellerinin yüzeye dik çekme mukavemeti gibi belirli mekanik özellikleri iyileştirebilir. Kontrol levhası biraz daha U tipi bir yoğunluk dağılım profili sergilemiş ve 421 kg/m^3 yoğunluk ile en yüksek yüzey yoğunluğuna sahip olup, akabinde 350 kg/m^3 çekirdek yoğunluğu göstererek en belirgin yoğunluk farkı profiline sahiptir. Diğer bir ifadeyle, FDM katkılı kompozitler kontrol levhasına göre daha lineer bir profil sergilemiştir.



Şekil 40. FDM odun kompozitlerin yoğunluk dağılım grafiği

Dikey yoğunluk profili, ahşap kompozit levhaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde en önemli etkilerden birine sahip faktörlerden biri olarak kabul edilmektedir (Winistorfer vd., 1995; Young vd., 1999; Winistorfer vd., 2000). Xu (1999), dikey yoğunluk dağılımının, ahşap kompozit levhaların temel yapısal karakteristiklerinden biri olduğunu vurgulamıştır. Ahşap kompozit levhalarda dikey yoğunluk profili, levha taslağının sıcak presleme işlemi sırasında pres basıncı, kütle transferi ve ısı transferi gibi faktörlerin karmaşık etkileşimleri sonucunda oluşur. (Kamke ve Casey, 1988a, 1988b; Xu ve Winistorfer, 1995), dikey yoğunluk profilinin oluşum sürecinin presleme işlemi sırasında meydana gelen gaz basıncı değişiklikleri ile açıklanabileceğini belirtmiştir.

Ahşap kompozit levhalarda dikey yoğunluk profili, sıcak presleme esnasında hem taslağın sıkışması sırasında hem de presin istenen kalınlığa erişmesinin ardından devam eden süreçlerin birleşimi olarak oluşmaktadır (Wang ve Winistorfer, 2000; Wang vd., 2004).

Dikey yoğunluk profili ile ilgili pek çok durumda, levhanın özelliklerini etkileyen başlıca faktörler olarak maksimum tepe yoğunluğu ve orta tabaka yoğunluğu öne çıkmaktadır. Ancak, levha özellikleri yalnızca bu faktörlere bağlı olmayabilir. Aksine, levhanın performansı, tepe ve orta tabaka yoğunlukları arasındaki etkileşimlerden etkilenir. Başka bir deyişle, levhanın genel yoğunluk profili performans üzerinde belirleyici rol oynar (Wong vd., 1998).

Sıcak presleme süresinin uzamasıyla birlikte, levha taslağındaki sıcaklık dağılımı daha homojen hale gelecektir. Çünkü levhanın preste daha uzun süre kalması, sıcaklığın orta tabakalara ulaşması için yeterli süreyi sağlayarak, bu bölgelerdeki sıcaklık artışını kolaylaştırır. Bu durum, orta tabakaların sıkıştırılmasını kolaylaştıracak ve yüzey ile orta tabaka bileşenleri arasındaki sıkıştırılabilirlik farkını azaltacaktır. Sonuç olarak, levhadaki yoğunluk zirveleri daha az belirgin hale gelecek ve daha dengeli bir dikey yoğunluk profili ortaya çıkacaktır. Kısa presleme sürelerinde ise bunun tersi bir durum meydana gelecektir; orta tabakaların sıcaklığı daha kısa sürede artacak ve yüzeydeki yongalar ile orta tabakadaki yongalar arasındaki sıkıştırılabilirlik farkı daha büyük olacaktır. Bu süreç sonucunda, yüksek sıcaklık nedeniyle yüzeye yakın tabakalar daha kolay sıkıştırılabilirken, daha düşük sıcaklığa sahip orta tabakanın sıkıştırılması daha zor olacaktır. Bu etkileşimler sonucunda, nihai levhada yüzeye yakın tabakalarda keskin tepe yoğunlukları oluşurken, dikey yoğunluk profilinin orta bölümleri düz yapısını koruyacaktır (Painter vd., 2006).

Sonuç olarak, tez kapsamında üretilen FDM katkılı odun kompozitlerinin yoğunluk dağılım grafiği, piyasada yaygın olarak üretilen ticari MDF panelleri ve izolasyon levhaları ile dikkate değer bir benzerlik göstermektedir. Bu benzerlik, FDM katkısının odun kompozitleri üzerindeki etkisinin, ticari olarak kullanılan malzemelerdeki kalite ve performans standartlarına yaklaştığını ortaya koymaktadır. Özellikle yapı sektöründe yaygın olarak tercih edilen MDF paneller ve izolasyon levhaları, malzemelerin yoğunluk dağılımı açısından mekanik dayanım, ısı yalıtımı ve boyutsal stabilite gibi kritik özellikler sunar. Üretilen FDM katkılı kompozitlerin bu ticari ürünlerle benzer özellikler sergilemesi, geliştirilen malzemenin hem iç hem de dış mekan uygulamaları için potansiyel olarak uygun olabileceğini göstermektedir.

Ayrıca, FDM katkısının odun kompozitlerinde su emme ve kalınlık artışına karşı sağladığı iyileştirici etkiler göz önüne alındığında, bu malzemelerin sadece yoğunluk dağılımı açısından değil, aynı zamanda çevresel koşullara karşı dayanıklılık açısından da piyasadaki benzer ürünlerle rekabet edebileceği öngörülmektedir. Ticari MDF ve izolasyon

levhalarının performans kriterleri düşünüldüğünde, FDM katkılı odun kompozitleri, yapı malzemeleri sektöründe yeni bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Dolayısıyla, bu çalışmada geliştirilen kompozit malzemelerin yapı malzemeleri pazarında yer bulma potansiyeli, ileriye dönük araştırmalar ve endüstriyel üretim süreçleri ile daha da detaylandırılabilir.

3.2. Kimyasal Testlere Ait Bulgular

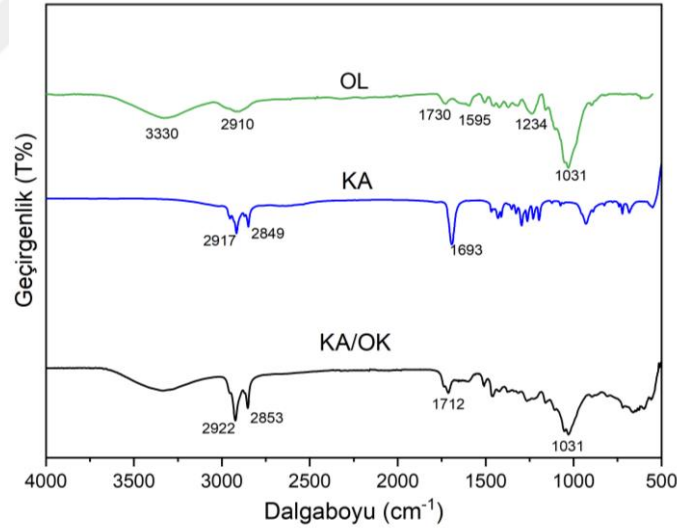
3.2.1. FTIR Analizine Ait Bulgular

Tez kapsamında üretilen her bir kompozitin kimyasal yapısı, bileşenler arasındaki olası kimyasal ve fiziksel etkileşimler ile uyumlulukları FTIR analizleriyle incelenmiştir. Bu doğrultuda, destek malzemesi olarak kullanılan saf odun lifi ile termal enerji depolama amacıyla kullanılan saf KA, MP, LA ve bu bileşenlerden oluşan kompozitlerin FTIR spektrumları $4000-500\text{ cm}^{-1}$ pik aralığında analiz edilmiş olup, ilgili sonuçlar aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.

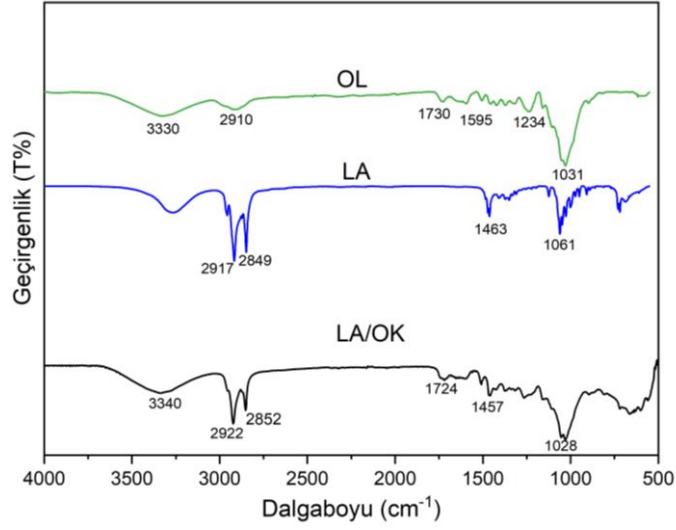
Şekil 41, 42 ve 43 incelendiğinde kompozit bileşeni olan saf odun lifinin (OL) FTIR spektrumunda $3330, 2910, 1730, 1595, 1234, 1031\text{ cm}^{-1}$ dalga boylarında karakteristik pikler görülmektedir. Bu piklerden, 3330 cm^{-1} 'deki geniş bant, ligninde bulunan alifatik veya aromatik alkollerdeki hidroksil gruplarının moleküller arası bağlanmasına karşılık gelmektedir. Hemiselüloz içinde bulunan asetil gruplarındaki C-H ve C=O'un uzama bantları ile ligninde bulunan karbonil aldehitin 2910 ve 1730 cm^{-1} 'de absorpsiyon zirveleri olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda, 1595 cm^{-1} ve 1234 cm^{-1} bantları, aromatik yapıdaki C=C bağlarının uzama titreşimlerini ve lignindeki C-H gruplarının bükülme titreşimlerini yansıtmaktadır. Ayrıca bu piklerindeki artışlar lignin yapılarındaki değişimi göstermektedir (Pandey ve Pitman, 2003; Schwanninger vd., 2004; Mohebbi, 2005). Selüloz ve hemiselüloz içindeki C-O-C'nin eşitsiz uzamasının bir sonucu olarak oluşan 1031 cm^{-1} bandı da dikkat çekmektedir. Bu spektral özellikler, odun lifi spektrumunda belirginleşen moleküler bağların ve fonksiyonel grupların çeşitli vibrasyonlarını tanımlamada kullanılır.

Saf KA, LA ve MP'nin FTIR spektrumlarından görüldüğü üzere, bu maddeler benzer karakteristik bantlar sergilemektedir. FTIR spektrumlarında yer alan 2917 ve 2849 cm^{-1} 'deki pikler, CH_2 ve CH_3 gruplarındaki asimetric ve simetric C-H titreşimlerini temsil etmektedir. Bu pikler, yeni fonksiyonel grupların varlığını işaret etmektedir (Schwanninger vd., 2004).

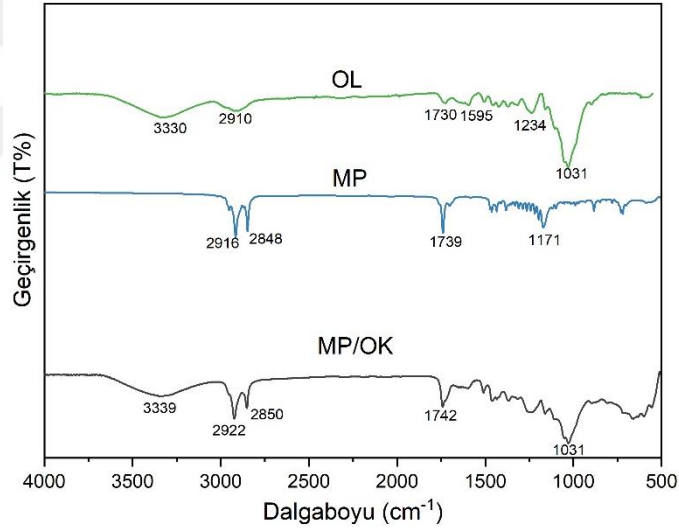
Şekil 41'deki saf KA'nın 1693 cm^{-1} dalga boyunda kaydedilenler OH ve H-O-H gruplarının gerilme titreşimlerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 42'deki saf LA spektrumundaki 1463 cm^{-1} deki pik $-\text{CH}_2$ gruplarına ait gerilme titreşimlerini temsil eder. Bu dalga sayısı, metilen gruplarındaki karbon-hidrojen bağlarının belirli bir vibrasyon modunu yansıtır. 1061 cm^{-1} dalga boyundaki pik ise, genellikle C-O (karbon-oksijen) bağlarına aittir. Bu dalga sayısı, özellikle alkol gruplarındaki C-O bağının streç vibrasyonlarına karşılık gelir. Şekil 43'teki saf MP spektrumundaki 1740 cm^{-1} piki esterlerdeki C=O titreşimini yani lignoselülozdaki iki karbonil grubu ifade etmektedir. Bu dalga sayısı, karbonil gruplarının streç vibrasyon modunu yansıtır. Bu pik hidroksil, asetil ve eter gruplarına yol açan halka açma ürünleri için karakteristiktir. Aynı zamanda bu pikteki artışlar hemiselülozun bozunmasını ifade etmektedir (Pandey ve Pitman, 2003; Mohebbi, 2005). 1171 cm^{-1} civarındaki dalga sayısı ise, FTIR spektrumunda genellikle C-O (karbon-oksijen) bağlarına karşılık gelir ve karbonil gruplarından farklı bir bağ türünü ifade eder, genellikle alkollerdeki C-O bağlarının streç vibrasyon moduna işaret eder.



Şekil 41. KA esaslı kompozitlerin FTIR spektrumları



Şekil 42. LA esaslı kompozitlerin FTIR spektrumları



Şekil 43. MP esaslı kompozitlerin FTIR spektrumları

Sarı vd. (2020) yaptığı benzer bir çalışmada, odun lifine KA-SA ötektik FDM karışımının emdirdikten sonra oluşturdukları yapıca kararlı kompozitin FTIR bulguları odun lifinin selülozik OH grupları ile FDM'nin karboksil grupları arasındaki hidrojen bağ etkileşimi nedeniyle bileşenler arasında iyi bir uyumun varlığını kanıtladığını bildirmişlerdir. Temiz vd. (2020) sarıçam odununa KA-SA ötektik FDM emprenye ettikten sonra elde ettikleri FTIR bulgularına göre, 3329, 2925 ve 1263 cm^{-1} 'deki pikler, selüloz ve lignin yapısına karşılık gelen bulgularla uyumlu olduğunu, alkinlerin uzama titreşimine ait asetilenik grup için 3329 cm^{-1} , metilen C—H doymuş alifatik grubu için 2925 ve 2850 cm^{-1} ,

karboksilik asidin karbonil grubu için 1700 cm^{-1} , organik fosfatların P—O uzama titreşimi için 1263 cm^{-1} , organik siloksan veya silikon (Si—O—Si) için 1032 cm^{-1} ve alifatik C—I uzama titreşimi için 560 cm^{-1} 'de çeşitli pikler gösterdiğini bildirmişlerdir. Amini vd. (2022), KA ile emprenye edilmiş masif odunun FT-IR spektrumunda bazı karakteristik pikler gözlemlenmiştir. Örneğin, 3329 cm^{-1} 'deki pik alkinlerin asetilenik grubunun uzama titreşimini ve 2850 cm^{-1} 'deki pik metilen C—H'nin doymuş alifatik grubunu temsil etmektedir (Liu vd., 2018). 1700 cm^{-1} 'deki pik karboksilik asidin karbonil grubunu, 1263 cm^{-1} 'deki pik P=O uzama titreşimini ve 560 cm^{-1} 'deki pik alifatik C—I uzama titreşiminin varlığını göstermektedir (Zhou vd., 2019; Fei vd., 2020). KA ile emprenye edilmiş ahşapta, 2922 cm^{-1} 'de asimetrik uzama titreşimini ve 2853 cm^{-1} 'de —CH₂'nin simetrik uzama titreşimini temsil eden yeni pikler ortaya çıkmıştır. C=O'nun uzama titreşim bandı, KA'nın karakteristiklerinden biri olan 1703 cm^{-1} 'de tespit edilmiştir. 934 cm^{-1} 'deki pik, C—OH grubunun uzama titreşimini, 683 cm^{-1} 'deki pik ise COO'nun değişken açılı titreşimini gösterdiğini bildirmişlerdir. (Hekimoğlu vd., 2021)

Sonuç olarak, saf FDM'lerde olduğu gibi, FDM bazlı ahşap kompozitlerinin FTIR spektrumlarında da ilgili bileşenlerin tüm ana karakteristik bantları, dalga boyu aralıklarında belirgin bir kayma olmaksızın tespit edilebilmektedir. FDM'lerle ile emprenye edilmiş odun kompozit numunelerinde FDM'nin spektrumuna benzer yeni piklerin varlığı, FDM'lerin odunun yapısına başarılı bir şekilde emprenye edildiğini göstermektedir. Ayrıca, saf kompozit bileşenlerinin karakteristik absorpsiyon zirveleri dışında yeni bir bant oluşumu gözlemlenmemektedir. Başka bir ifadeyle, kompozit bileşenlerine özgü bantlar, kompozitlerin FTIR spektrumlarında yeni karakteristik bantlar meydana gelmeksizin tanımlanabilir. Bu bulgular, odun lifi ile FDM'ler arasında yalnızca fiziksel etkileşimlerin gerçekleştiğini ve bileşenlerin kimyasal özelliklerini koruduğunu göstermektedir.

3.3. Mekanik Testlere Ait Bulgular

3.3.1. Levha Yüzeyine Dik Çekme Direnci Testine Ait Bulgular

Aynı konsantrasyonda 3 farklı FDM ve odun lifi kullanılarak üretilen izolasyon levhalarının ve kontrol levhasının levha yüzeyine dik çekme direnci testine ait bulgular tespit edilmiş ve aşağıdaki Tablo 14'de verilmiştir.

Tablo 14. Levha yüzeyine dik çekme direnci testine ait veriler

Levha Grubu	Levha Yüzeyine Dik Çekme Direnci Testi Değerleri (N/mm ²)
	Ortalama
Kontrol	0.04
KA/OK	0.02
MP/OK	0.02
LA/OK	0.01

Tabloda verilen bulgular incelendiğinde en yüksek levha yüzeyine dik çekme direnç değerinin beklenildiği gibi herhangi bir FDM içermeyen kontrol levhasının olduğu gözlemlenirken, en düşük değerin lauril alkol ile üretilen levha olduğu gözlemlenmiştir. Kaprik asit ve metil palmitat ile üretilen levhaların değerleri ise aynı olduğu tespit edilmiştir. Odun kompozit bünyesindeki FDM'nin iştirakına bağlı olarak gözlenen bu azalma eğilimi, FDM'lerin yağsı yapısına ve FDM'lerin odun lifine göre daha az kompakt bir yapıya sahip olması yani daha düşük mekanik özelliklere sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Elde edilen veriler incelendiğinde, kompozitlerin levha yüzeyine dik çekme direnci testi değerlerinin 0.01 ila 0.04 N/mm² arasında ölçülmüş olup, bu değer genelde 0,01–0,08 N/mm² aralığında olan geleneksel termal yalıtım malzemelerinin iç yapışma direnci değerleri ile uyumludur (Pfundstein vd., 2008). Yapılan bir çalışmada, yoğunluğu 0,3 g/cm³ olan düşük yoğunluklu lif levhanın yaklaşık 0,1 N/mm² iç yapışma direnci gücüne sahip olduğu bildirilmiştir. Bu sonuçlar, liflerin yeterince yakın olmadığı için düşük yoğunluklu lif levhanın düşük bir IB (internal bonding = iç yapışma direnci) değerine sahip olduğunu göstermektedir (Kawasaki vd., 1998). Bir başka çalışmada ise, bağlayıcı içermeyen hindistancevizi kabuğu yalıtım panelleri için elde edilen en yüksek IB değerinin 0.002 N/mm² olduğunu, bağlayıcı içermeyen kamış posası yalıtım panelleri için 350 kg/m³ yoğunluğunda maksimum IB oranının ise 0.014 N/mm² olduğunu rapor etmişlerdir (Panyakaew ve Fotios, 2011). Cam elyafı veya taş yününden yapılan yalıtım panoları genellikle 0.003 ila 0.08 N/mm² aralığında iç bağlama değerleri sergilerler (Pfundstein vd., 2008). Yapılan bir diğer çalışmada ise, farklı oranlarda FDM kullanılarak üretilen her biri 750 kg m⁻³ hedef yoğunluğa sahip MDF panellerinin IB değerlerinin FDM oranı arttıkça

0.78 N mm⁻² ile 0.27 N mm⁻² arasında azaldığını bildirmişlerdir (Dasiewicz vd., 2024). Öte yandan, ASTM C208–12 standardına göre, çeşitli uygulamalarda kullanılan yalıtım levhaları olarak odun esaslı kompozitler için mekanik özellik gereksinimlerini belirtmektedir. Bu standarda göre, gerekli iç bağlama değerleri, levhaların yoğunluk dağılım aralığına bağlıdır ve 160 ila 497 kg/m³ arasındaki yoğunluklar için 0,024 ila 0,038 N/mm² arasında olmalıdır. Tez kapsamında üretilen FDM katkılı ve FDM içermeyen odun kompozitlerinin levha yüzeyine dik çekme direnç değerleri bu aralık içindedir. Sonuç olarak elde edilen tüm bu değerlere göre üretilen FDM içerikli kompozitlerin ASTM C208–12 standardına göre binalarda kullanılmak için yeterli mekanik dayanım şartlarını karşıladığı söylenilebilir.

3.3.2. Basınç Direncine Ait Bulgular

Tez kapsamında üç farklı FDM kullanılarak üretilen odun kompozitlerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için basınç direnci testi uygulanmıştır. Dayanım değerlerini belirlemek için testler gerçekleştirilmiş ve elde edilen ortalama değerler aşağıdaki Tablo 16’da verilmiştir. FDM katkılı test örneklerinin kontrol grubuna kıyasla basınç direnci değerlerinde azalma olmuştur. FDM esaslı örnekler içerisinde en yüksek basınç direnci değeri MP/OK örnek grubuna ait iken, LA/OK ile KA/OK test grupları birbirine yakın değerler göstermiştir.

FDM ilavesinin mekanik özellikleri düşürmesinin nedenlerini anlamak için FDM’lerin malzeme yapısına nasıl etki ettiğine bakmamız gerekmektedir. FDM’ler genellikle katı malzemelerin yapısına entegre edildiğinde, faz değiştirme özelliklerinden dolayı mikroyapısal değişikliklere neden olabilirler. Katı fazdan sıvı faza geçiş yaptıklarında, malzeme içindeki boşlukları dolduramazlar ve bu boşluklar malzemenin yapısında zayıflıklara yol açabilir. Bu, malzemenin basınç direncini azaltır. Ayrıca FDM’ler genellikle yumuşak ve elastik özelliklere sahip oldukları için, yapıya entegre edildiklerinde sertlik ve dayanıklılığı azaltabilmektedirler (Tyagi vd., 2011). FDM’ler sıcaklık değişimlerinde faz değiştirirken termal genişleme ve büzülme gösterirler. Bu durum, yapıdaki mekanik streslerin artmasına ve iç gerilimlerin oluşmasına neden olabilir. Bu tür termal döngüler, malzemenin mikro çatlaklara ve yapısal zayıflamalara yol açmasına sebep olur. Bu da mekanik mukavemetin, özellikle basınç direncinin düşmesine yol açar (Kuznik vd., 2011). Bunlara ilaveten, FDM’ler genellikle elastik veya viskoelastik özelliklere sahip olurlar. Bu, basınç altında katı malzemeye kıyasla daha fazla deformasyona uğramalarına neden olabilir.

Bu esneklik, malzemenin sertliğini ve dolayısıyla basınç direncini düşürmektedir (Kenisarin, 2010).

FDM türünün kompozit levhaların basınç direncine etkisini belirlemek amacıyla basit varyans analizi yapılmış ve sonuçlar Tablo 15’de verilmiştir. Varyans analizi sonuçlarına göre, basınç direnci açısından gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklar bulunmaktadır ($p < 0,05$). Bu durum, farklı FDM katkılarının malzemenin basınç direnci üzerinde önemli etkileri olduğunu göstermektedir.

Tablo 15. Farklı FDM katkılı odun kompozitlerinin basınç direncine ait basit varyans analizi sonuçları

Basınç Direnci	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Kareler ortalaması	F-Hesap	Önem Derecesi
Gruplar arası	937.094	3	312.365	844.543	0.000
Gruplar içi	50.301	136	0.37		
Toplam	987.395	139			

Basınç direnci testi sonunda, varyans kaynakları ortalamalarının karşılaştırılması ve homojenlik gruplarının tespit edilmesi maksadıyla yapılan Duncan testi sonuçları Tablo 16’da verilmiştir.

Tablo 16. FDM katkılı odun kompozitlerinin basınç direncine varyasyon faktörlerinin etkileri araştırılan varyans kaynakları ortalamalarının Duncan testi sonuçları ($p \leq 0,05$)

Varyans Kaynakları	N	Basınç Direnci (MPa)		H.G*
		Ortalama	Standart Sapma	
Kontrol	33	6.83	1.22	A
KA/OK	38	0.66	0.13	C
LA/OK	36	0.62	0.12	C
MP/OK	33	1.00	0.20	B

Bu test sonucuna göre kontrol grubu en yüksek basınç direncine sahiptir ve A harfiyle gösterilerek diğer tüm gruplardan anlamlı şekilde ayrılmaktadır. Bu, FDM katkısı bulunmayan numunenin, katkılı numunelere kıyasla daha yüksek basınç direncine sahip olduğunu göstermektedir. MP/OK grubu B harfiyle gösterilmiş olup, kontrol grubuna göre anlamlı şekilde daha düşük basınç direncine sahiptir, ancak KA/OK ve LA/OK gruplarına kıyasla daha yüksek bir direnç göstermektedir. KA/OK ve LA/OK grupları en düşük basınç direncine sahiptir ve "C" harfiyle gruplandırılmıştır. Bu iki grup arasında istatistiksel olarak

anlamalı bir fark bulunmamaktadır, ancak her iki grup da hem kontrol grubuna hem de MP/OK grubuna göre anlamalı derecede daha düşük basınç direnci sergilemektedir. ASTM C165-07 standardı bağlamında ölçülen basınç dayanımı, lif levhanın yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Düşük yoğunluklu lif levhalar (350 kg/m^3 civarı) $0.5\text{-}3 \text{ MPa}$ aralıkta basınç dayanımı göstermektedir. Tez kapsamında üretilen FDM katkılı levhalar bu aralık içinde olup, binalarda kullanmak için yeterli mekanik dayanıma sahiptir diyebiliriz.

3.4. Termal Testlere Ait Bulgular

3.4.1. Isıl İletkenlik Katsayısına Ait Bulgular

Tez kapsamında üretilen FDM esaslı odun kompozitlerinin ısı iletkenlik katsayı değerlerine ilişkin elde edilen veriler Tablo 17’de verilmiştir. FDM esaslı odun kompozitlerinin termal iletkenlik katsayıları $0,0943$ ila $0,1384 \text{ W/m } ^\circ\text{K}$ değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. En yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahip olan metil palmitat (MP) ile üretilen odun kompoziti olup, en düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olan ise lauril alkol (LA) ile üretilmiş olan odun kompozitine aittir.

Tablo 17. FDM esaslı odun kompozit levhalarının termal iletkenlik katsayı değerleri

Levha Grubu	Termal İletkenlik Katsayı Değerleri ($\text{W/m } ^\circ\text{K}$)
Kontrol	0.0998
KA/OK	0.1182
LA/OK	0.0943
MP/OK	0.1384

Termal iletkenlik, kompozit FDM’lerin geliştirilmesinde dikkate alınması gereken birincil özelliklerden biridir. Çünkü bu özellik, ısı depolama ve salınım sürelerini azaltarak sistem verimliliğini artırır. Tablodaki verilere bakıldığında, ısı iletkenlik katsayılarının, LA katkılı kompozit hariç diğer FDM katkılı gruplarda kontrol levhasına göre arttığı görülmektedir. Bunun sebepleri; lauril alkolün yapısal özellikleri, kompozit levhanın içindeki boşlukların ve moleküler yapıların ısı iletimini sınırlıyor olabilir. Alkoller genelde düşük termal iletkenliğe sahiptir, çünkü hidrokarbon zincirleri arasında ısının yayılmasını

zorlaştıran boşluklar ve zayıf bağlar bulunabilir. Lauril alkolün 12 karbonlu hidrokarbon zinciri, ısı iletimini sınırlandırarak daha iyi bir yalıtım sağlayabilir. Ayrıca, lauril alkol, kaprik asit veya metil palmitat gibi katkı maddelerine göre daha düşük yoğunluğa sahip olduğundan, bu da malzemenin daha fazla hava boşluğu içerdiği ve ısıyı daha yavaş ilettiği anlamına gelmektedir. Termal iletkenlik katsayısı daha yüksek olan malzemeler, ısıyı daha hızlı iletir. Dolayısıyla, MP/OK (0.1384 W/m °K) en yüksek termal iletkenliğe sahiptir ve ısıyı en hızlı ileten levhadır. Yapılan bir çalışmada, odun kompozitlerindeki FDM varlığının, enerji depolama yeteneğine ek olarak kompozitlerin termal iletkenlik katsayısını artırdığını bildirmişlerdir (Frahata vd., 2023; Öztürk vd., 2024).

Tablo 18. Üretilen FDM odun kompozitlerinin ısı iletkenliklerinin literatür ile karşılaştırılması

Yalıtım Malzemesi	Yoğunluk (kg/m ³)	Termal İletkenlik (W/ mK)	Kaynak
Kontrol	300-350	0.0998	Bu Tez Çalışması
KA/OK	300-350	0.1182	Bu Tez Çalışması
LA/OK	300-350	0.0943	Bu Tez Çalışması
MP/OK	300-350	0.1384	Bu Tez Çalışması
Küspe	250-350	0.049-0.055	(Panyakaew ve Fotios, 2011)
Melez kabuğu	250-500	0.069-0.093	(Kain vd., 2014)
Hindistan cevizi kabuğu	250-350	0.046-0.068	(Panyakaew ve Fotios, 2011)
Pamuk sapı lifi	150-450	0.059-0.082	(Zhou vd., 2010)
Polistiren	16-35	0.034-0.035	(Zou, 2008)
Mineral yün	24-200	0.025-0.047	(Zou, 2008)
Ekstrüde polistiren köpük (XPS)	24-42	0.026-0.035	(Zou, 2008)
Kenaf	150-200	0.051-0.058	(Xu Jianying vd., 2004)

Tablo 18, FDM katkılı odun kompozitlerinin termal iletkenliği ile diğer yaygın olarak kullanılan termal yalıtım malzemeleri arasında bir karşılaştırma sunmaktadır. Ayrıca, polistiren, ekstrüde polistiren köpük gibi bazı malzemeler polimerik malzemelerdir ve FDM içeremezler. Bu nedenle, daha düşük bir termal iletkenlik katsayısı sunarlar. Dahası, bu sentetik malzemelerin yoğunluk değerleri ahşap lif yalıtım panellerine kıyasla daha düşüktür. Malzeme yoğunluğu ve termal iletkenlik arasındaki güçlü bir korelasyon vardır. Yapılan çalışmalarda, ahşap malzemelerin termal iletkenliğinin yoğunluk, nem içeriği ve ahşap türüne bağlı olarak değiştiğini tartışmıştır (Simpson ve TenWolde, 1999; Collet ve Pretot, 2014).

Ayrıca, tez kapsamında üretilen FDM kompozitler için elde edilen termal iletkenlik değerlerinin, literatürde bildirilen diğer odun kompozit faz değişim malzemeleriyle karşılaştırılması ve önceki çalışmalardaki durumu incelenmiştir. Odun destek malzemesi kullanarak üretilen FDM esaslı kompozitlerin termal iletkenlik katsayılarını sırasıyla 0,32 W/m²K (Li vd., 2009) ve 0.33 W/m²K (Xu vd., 2020), 0.23 W/m²K (Chao vd., 2020), 0.67 W/m²K (Yang vd., 2018) olarak tespit edilmiştir. Literatür taramasından da anlaşıldığı üzere, tez çalışmasında üretilen KA, LA, MP katkılı odun kompozit levhaları geleneksel izolasyon malzemelerine göre yüksek performans sergilerken, FDM katkılı diğer odun kompozitlerine göre biraz düşük ısı iletkenlik değerlerine sahiptir. Bunun sebebi, FDM katkılı odun kompozit çalışmalarında grafen, grafit, silisyum dioksit (SiO₂), karbon gibi ısı iletkenliği artıran yardımcı maddelerin kullanılmasıdır. Metalik bazlı FDM'ler hariç, diğer tüm FDM türleri düşük termal iletkenliğe sahiptir. Organik FDM'ler, en düşük termal iletkenlik değerine sahipken, inorganik FDM'lerin termal iletkenliği organik FDM'lere kıyasla biraz daha yüksektir (İbrahim vd., 2017). FDM'ler, büyük miktarlarda ısıyı veya soğuşu depoladığı için ve bu ısıyı depolama dışına aktarmak gerektiğinden dolayı, düşük termal iletkenlik problem olabilir. Bir FDM'den, kullanıldığı enerji depolama sistemlerinde sıcaklık değişimlerine hızlı tepki verebilmesi ve bu amaçla yeterli bir iletkenlik değerine sahip olması beklenir. Örneğin, bir enerji depolama sistemi içinde düşük termal iletkenliğe sahip bir FDM, büyük miktarlarda kullanılsa bile sıcaklık değişimlerini karşılayamayabilir ve bu nedenle ısı veya soğuşu etkin bir şekilde depolayamayabilir. Bu nedenle, termal iletkenliğin artırılması, FDM'lerin geliştirilmesinde önemli bir odak noktasıdır. Hızlı ısı transferi gereken durumlarda, FDM'lerin termal iletkenliğini artırmanın bir yolu, onları daha yüksek termal iletkenliğe sahip malzemelerle birleştirmektir (Lin vd., 2018; Qureshi vd., 2018; Huang vd., 2019; Wu vd., 2020).

FDM kompozitlerin ısı iletkenlik performansını iyileştirmek için yüksek termal iletken malzemelerin takviyesine ilişkin literatürden elde edilen bulguların bir özeti aşağıda sunulmuştur.

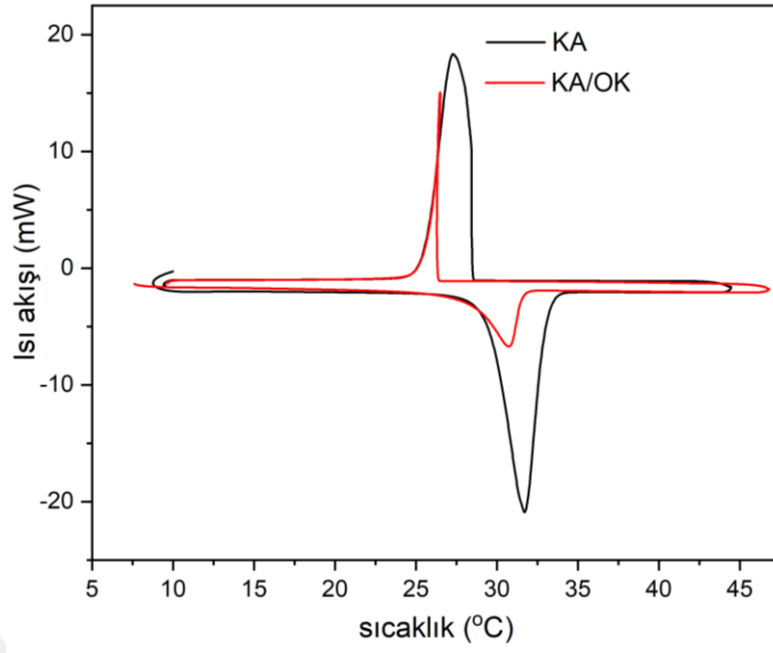
Bir çalışmada, FDM'nin termal iletkenliğini iyileştirmek amacıyla genişletilmiş perlit ve n-eikozan karışımına %1 oranında karbon nanotüp (CNT) eklenmiş ve bu katkının termal iletkenliği önemli ölçüde artırdığı saptanmıştır. Yapılan incelemede, %1 CNT ilavesinin FDM kompozitin termal iletkenliğini %113,3 oranında artırdığı gözlemlenmiştir. Bu artış, CNT'lerin yüksek termal iletkenlik katsayılarına (2000–6000 W/mK) sahip olmasına ve FDM içerisinde geniş bir ısı transfer yüzeyi sağlamasına atfedilmiştir (Karaipekli vd., 2017).

Başka bir çalışmada ise kaprik asit (KA) ile miristik asidin (MA) ötektik karışımı genişletilmiş perlit ile birleştirilmiştir. FDM kompozit üretiminde yapılan testlerde, KA-MA karışımının genişletilmiş perlit tarafından maksimum absorpsiyon kapasitesinin ağırlıkça %55 olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, formda kararlı kompozit FDM'nin termal iletkenliği, ağırlıkça %10 oranında genişletilmiş grafit eklenerek yaklaşık %58 oranında artırılmıştır (Karaipekli ve Sarı, 2008). Bir başka çalışmada ise palmitik asit/stearik asit ötektik karışımı, destek malzemesine emdirilerek kompozitler oluşturulmuş ve bu kompozitlerin FDM sızıntısını engellemek ve termal iletkenliği yükseltmek amacıyla ağırlıkça %5 genişletilmiş grafit eklenmiştir. Bu uygulama sonucunda, kompozitin termal iletkenliğinin %5 grafit katkısıyla 4.9 kat arttığı rapor edilmiştir (Huang vd., 2017).

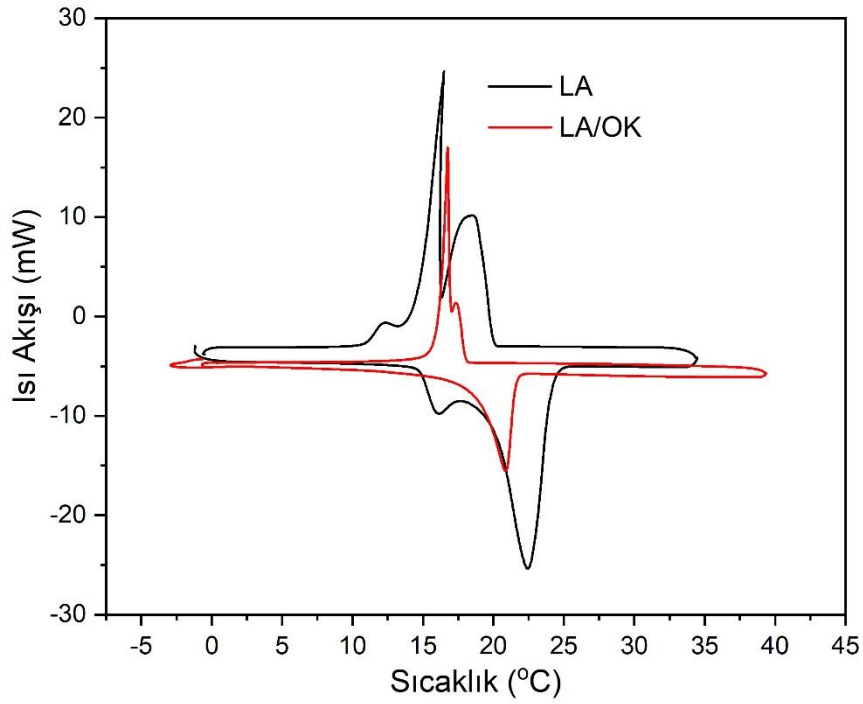
Bu nano katkı maddelerinin FDM kompozitlerinin termal iletkenliğini etkili bir şekilde artırmasının temel nedeni, nano katkı maddelerinin kompozit yapısı içerisinde bir ağ yapısı oluşturarak ısı transfer yolları meydana getirme mekanizmasıdır. Sonuç olarak, literatürdeki benzer araştırmalar ve piyasada bulunan diğer izolasyon malzemeleri ile karşılaştırıldığında, bu çalışma kapsamında üretilen FDM katkılı ahşap kompozitlerin, yüksek termal iletkenlik performanslarıyla oldukça rekabetçi olduğu görülmektedir.

3.4.2. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) Testine Ait Bulgular

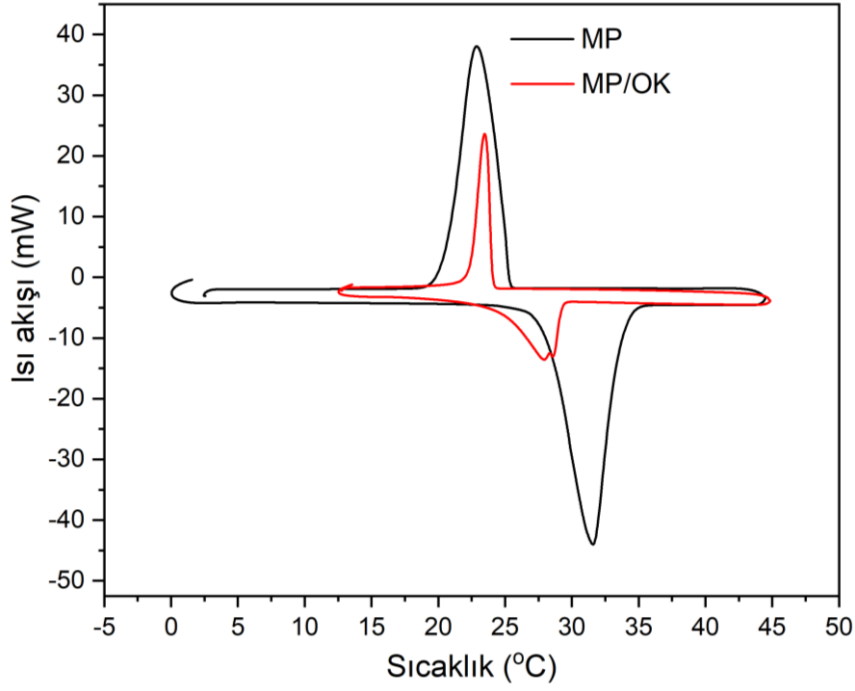
Saf FDM'lerin ve kompozit FDM'lerin ısıtma ile soğutma periyotlarına ait DSC termogramları Şekil 44-46 'da sunulmuştur. Bu grafiklerde gözlemlenen endotermik ve ekzotermik pikler sırasıyla erime ve katılaşma faz geçişlerine denk gelmektedir. FDM kompozitlerinin DSC termogramları incelendiğinde, saf FDM'ler gibi düzenli endotermik ve ekzotermik pikler gösterdiği görülmüştür. Bu da FDM'lerin faz değişim süreci sırasında esas olarak gizli termal enerji depolama rolünü üstlendiği anlamına gelmektedir. Ayrıca, erime ve donma eğrilerinde yalnızca tek ve belirgin olmayan bir tepe gözlemlenmiştir. Bu kompozit FDM'lerin faz değişim özelliklerinin odun lifinin etkisi altında mükemmel olmayan kristallerin varlığı nedeniyle odun lifinin eklenmesinden etkilendiğini göstermektedir (Liang vd., 2018).



Şekil 44. KA esaslı odun kompozitinin DSC termogramları



Şekil 45. LA esaslı odun kompozitinin DSC termogramları



Şekil 46. MP esaslı odun kompozitinin DSC termogramları

Termogram analizleri sonucunda elde edilen ısı özellikler ayrıca Tablo 19'da gösterilmiştir. Bu veriler incelendiğinde, saf FDM'ler ile karşılaştırıldığında kompozitlerin faz dönüşüm sıcaklıklarında çok küçük farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, kompozit bileşenleri arasındaki zayıf fiziksel etkileşimler (hidrojen bağları, kapiler kuvvetler ve yüzey gerilimi gibi), FDM'lerin hapsedilme etkisi ve ısı transfer hızındaki artışla açıklanabilir. Ayrıca, Tablo 19'daki verilere göre, FDM kompozitlerinin gizli ısı depolama kapasiteleri, saf FDM'lere kıyasla beklendiği üzere daha düşüktür. Bunun sebebi, gizli ısı depolama kapasitesine sahip malzemelerin yalnızca FDM'ler olması, kompozitin diğer bileşenleri olan lifsel yapı, bağlayıcı nişasta ve eklenen katkı maddelerinin bu özelliği taşımasıdır. Bu nedenle, odun kompoziti FDM'lerde FDM absorpsiyon oranlarına paralel olarak gizli ısı depolama kapasitesi elde edilmiştir. En yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip kompozit MP/OK olurken, en düşük kapasiteye sahip kompozit KA/OK olarak tespit edilmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde, üretilen kompozitlerin faz değişim sıcaklıkları ve gizli ısı depolama kapasitelerinin, iklim koşullarına bağlı sıcaklık dalgalanmalarını ve piklerini azaltarak enerji tasarrufu sağlamak amacıyla binalarda termal enerji depolama sistemleri için oldukça uygun olduğu söylenebilir.

Tablo 19. Saf FDM'lerin ve hazırlanan FDM/OK'lerin DSC analizleri sonucunda elde edilen ısı özellikleri

Örnek	Erime Sıcaklığı (°C)	Erime Gizli Isısı (J/g)	Katılma Sıcaklığı (°C)	Katılma Gizli Isısı (J/g)
KA	29.4	177.0	28.4	179.0
KA/OK	28.2	70.3	26.6	69.5
LA	20.8	234.0	19.4	233.0
LA/OK	18.1	93.1	18.0	92.9
MP	28.1	245.0	26.1	237.0
MP/OK	25.0	97.7	24.0	97.3

Tablo 20'de ise tez kapsamında hazırlanan kompozit form-stabil FDM'lerin termal özelliklerinin, literatürdeki bazı ahşap bazlı form-stabil FDM'lerle karşılaştırmasını göstermektedir. Karşılaştırıldığında, hazırlanan FDM odun kompozitlerinden özellikle MP/OK için erime ve katılma süreçlerinde maksimum gizli ısıların sırasıyla 97.7 J/g ve 97.3 J/g'ye ulaşabileceği rapor edilen kompozit FDM'lerden daha yüksek gizli ısıya sahip olduğu görülmektedir. Bu yüksek gizli ısı değerleri, enerji verimliliğini artırmaya yönelik yapı malzemelerinde kullanılabilecek etkili bir termal enerji depolama malzemesi olabileceğini işaret etmektedir. Özellikle, erime ve katılma süreçlerinde kaydedilen yüksek enerji depolama kapasitesi, bu malzemenin binalarda enerji tasarrufu sağlayarak sürdürülebilir bir çözüm olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. Bu bağlamda, tez kapsamında üretilen FDM içeren odun kompozitlerin, enerji verimliliği hedefleyen mimari uygulamalarda kullanımı, uzun vadeli enerji tasarruflarını destekleyebilir.

Tablo 20. FDM odun kompozitlerin gizli ısı depolama özelliklerinin, literatürdeki bazı ahşap bazlı form-stabil FDM'lerle karşılaştırılması.

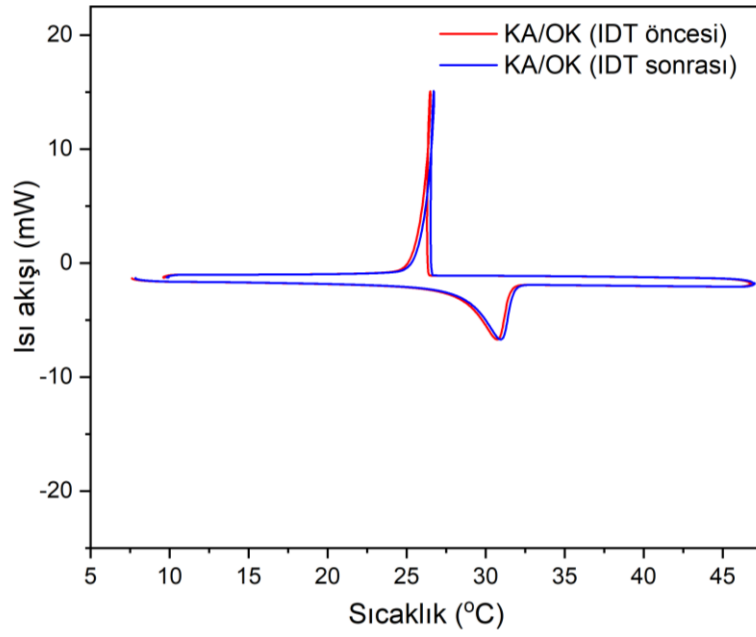
Formca Kararlı FDM	Erime Isısı		Katılma Isısı		Kaynak
	T _m (°C)	Δ H _m (J/g)	T _f (°C)	Δ H _f (J/g)	
Laurik-miristik asit/ CS	33.1	98.2	32.8	96.1	(Ma vd., 2018)
Mikro kapsüllenmiş parafin/HDPE	16.7	45.9	7.9	44.3	(Li vd., 2009)
Mikro kapsüllenmiş LA /HDPE	22.2-28.7	31.6	—	20.3	(Guo vd., 2016)
Parafin/odun tozu	26.18	20.62	—	—	(Barreneche vd., 2017)
KA/OK	28.2	70.3	26.6	69.5	Bu Tez Çalışması
LA/OK	18.1	93.1	18	92.9	Bu Tez Çalışması
MP/OK	25	97.7	24	97.3	Bu Tez Çalışması

3.4.3. Isıl Döngü Testine (IDT) Ait Bulgular

Saf FDM'lerin veya kompozit FDM'lerin, birçok erime-katılaşma döngüsünden sonra dahi kimyasal yapıları ve gizli ısı depolama özelliklerini kullanım amacına uygun şekilde korumaları beklenmektedir. Bu doğrultuda, hazırlanan kompozit FDM'lerden KA/OK, LA/OK ve MP/OK, 600 kez hızlandırılmış erime-katılaşma döngüsüne tabi tutulmuş, ardından termal kararlılık açısından DSC, kimyasal kararlılık açısından ise FTIR analizleriyle tekrar incelenmiştir. Bu analiz sonuçları, başlangıçta herhangi bir ısı döngüye maruz kalmamış kompozitlerle karşılaştırılarak, herhangi bir değişiklik olup olmadığı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, 600 erime-katılaşma döngüsü sonrası kompozitlerin termal döngü kararlılıklarını gösteren DSC eğrileri Şekil 47-49'da sunulmuştur.

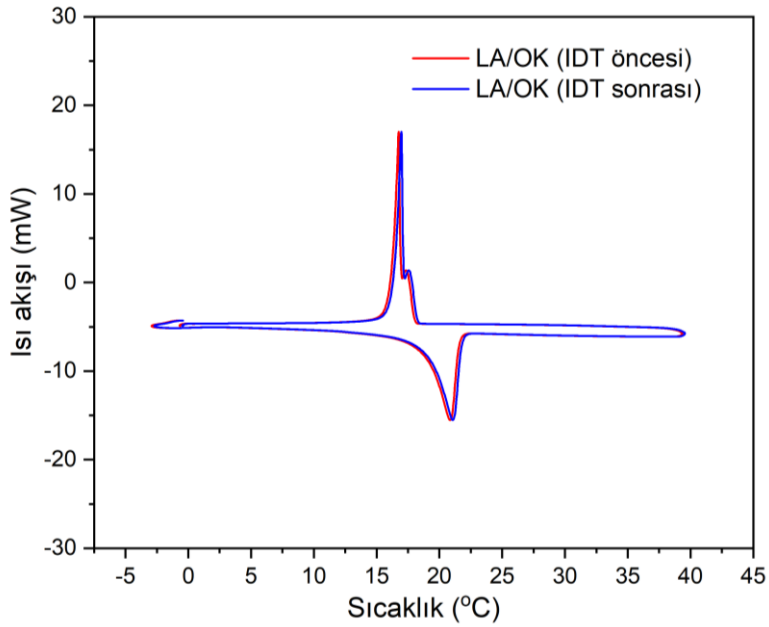
DSC eğrilerinde görüldüğü gibi, kompozitlerin faz değişimlerini temsil eden endotermik ve ekzotermik piklerin şeklinde veya konumunda termal çevrimlerden sonra herhangi bir değişiklik meydana gelmemiştir. Bu bulgu, kompozitlerin mükemmel ısı döngü kararlılığına sahip olduğunu göstermektedir. Kompozitlerin ısı döngü kararlılığını doğrulayan bir diğer gösterge ise, termal çevrimler sonrası faz değişim sıcaklıklarında ve gizli ısı depolama kapasitelerinde oluşan değişikliklerdir.

Örneğin, 600 ısı döngüsü sonrası Şekil 47'de görüldüğü gibi KA/OK kompozitinin erime/katılaşma sıcaklıklarında meydana gelen değişimler $-0.1/+0.1$ °C iken, bu kompozitin gizli ısı depolama kapasitelerinde sırasıyla yalnızca $-0.5/-0.7$ J/g'lık bir değişim gözlenmiştir.



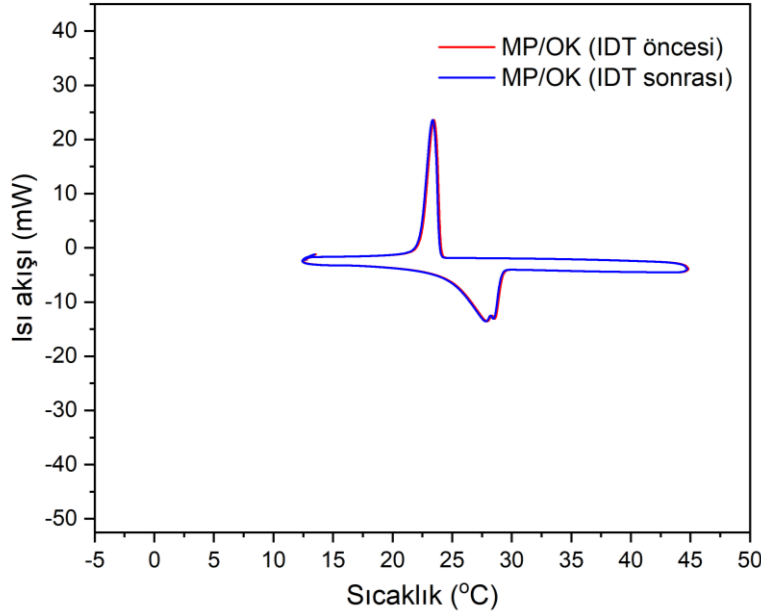
Şekil 47. KA/OK kompozitinin IDT öncesi ve sonrasındaki DSC termogramları

Aynı şekilde, 600 ısıtım çevrim sonucunda LA/OK kompozitlerinin erime/katılaşma sıcaklıklarındaki değişim $+0.1/-0.1$ °C iken; bu kompozitlerin erime/katılaşma entalpilerinde kaydedilen düşüşler sırasıyla sadece $-0,7$ / $-0,8$ J/g olarak tespit edilmiştir (Şekil 48).



Şekil 48. LA/OK kompozitinin IDT öncesi ve sonrasındaki DSC termogramları

Son olarak, 600 ısıl çevrim sonucunda, MP/OK kompozitlerinin erime/katılaşma sıcaklıklarındaki değişim $+0.1/0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken; bu kompozitlerin erime/katılaşma entalpilerinde kaydedilen düşüşler sırasıyla sadece $-0,7/-0,7\text{ J/g}$ olarak tespit edilmiştir (Şekil 49).

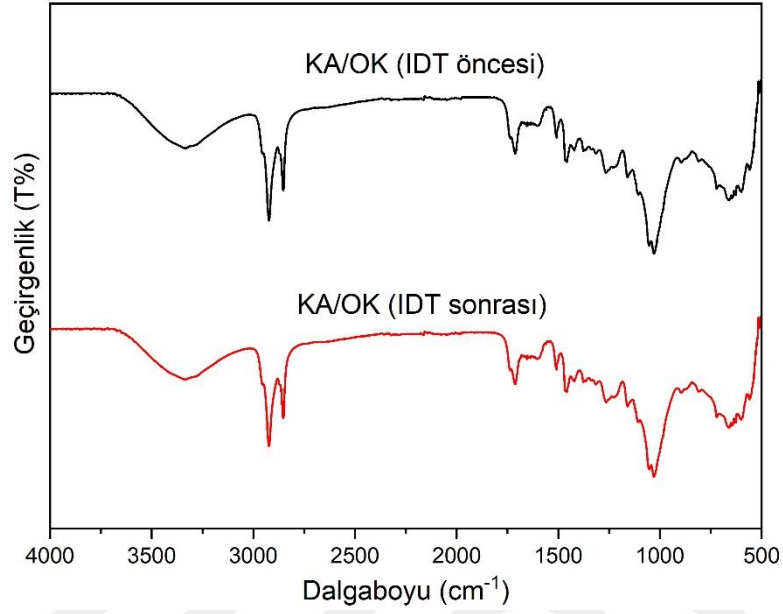


Şekil 49. MP/OK kompozitinin IDT öncesi ve sonrasındaki DSC termogramları

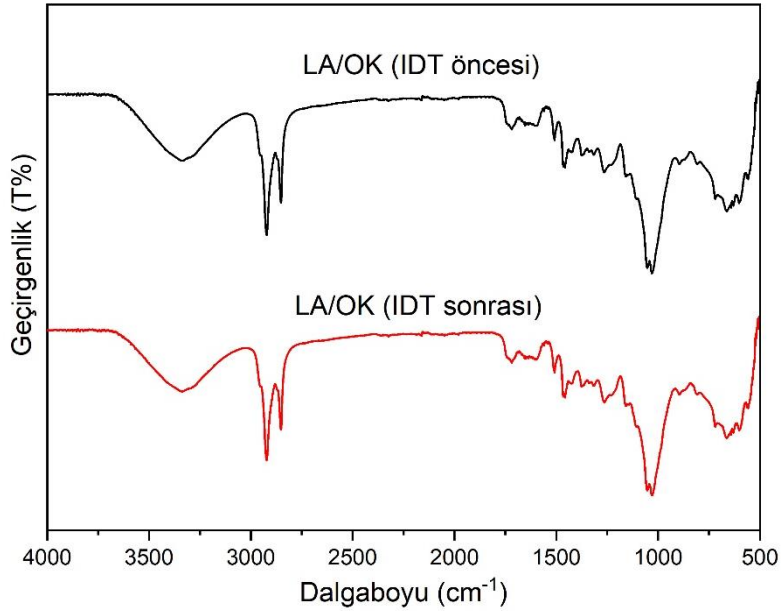
Sonuç olarak, 600 döngü gibi yeterince yüksek bir test sonrasında kompozitlerin gizli ısı özelliklerinde gözlenen değişiklikler oldukça kabul edilebilir düzeydedir. Bu, kompozitlerin termal enerji depolama kapasitesinin, uzun süreli ve tekrarlanabilir kullanım koşullarında da etkin bir şekilde korunabileceğini göstermektedir. Yani, bu kompozitler, birden fazla erime ve katılaşma faz dönüşümünden geçtikten sonra bile, gerekli ısıl döngü kararlılığını ve stabilitesini koruyabilmektedir. Bu durum, kompozitlerin uzun vadeli uygulamalar için uygun olduğunu ve performanslarının zamanla önemli ölçüde bozulmadığını ortaya koymaktadır. Böylece, bu kompozitler, çeşitli termal enerji depolama uygulamalarında güvenilir ve etkili bir çözüm sunma potansiyeline sahiptir.

Öte yandan, 600 ısıl çevrim sonrasında kompozit FDM'lerin kimyasal stabilitesini gösteren FTIR spektrumları Şekil 50-52'de sunulmuştur. Bu spektrumlar incelendiğinde, ısıl döngü testinin kompozitlerin kimyasal yapısında herhangi bir değişikliğe yol açmadığı görülmektedir. Çevrim öncesi spektrumlarla karşılaştırıldığında, karakteristik bantların konumunda veya şeklinde belirgin bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Ayrıca, ısıl döngü testinden sonra FTIR spektrumlarında yeni bantların oluşumu da söz konusu değildir. Bu

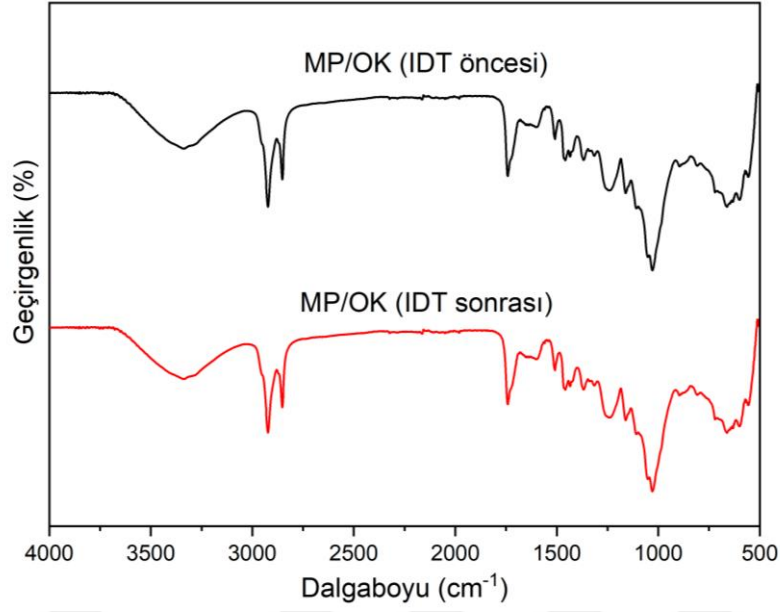
bulgular, hazırlanan kompozitlerin çok sayıda erime-katılaşma döngüsünden sonra dahi kimyasal yapılarını koruduklarını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, bu kompozitler uzun vadeli kullanım için yüksek düzeyde kimyasal kararlılık sergilemektedir.



Şekil 50. KA/OK kompozitinin ısı döngü testi öncesi ve sonrası FTIR spektrumlarının karşılaştırılması



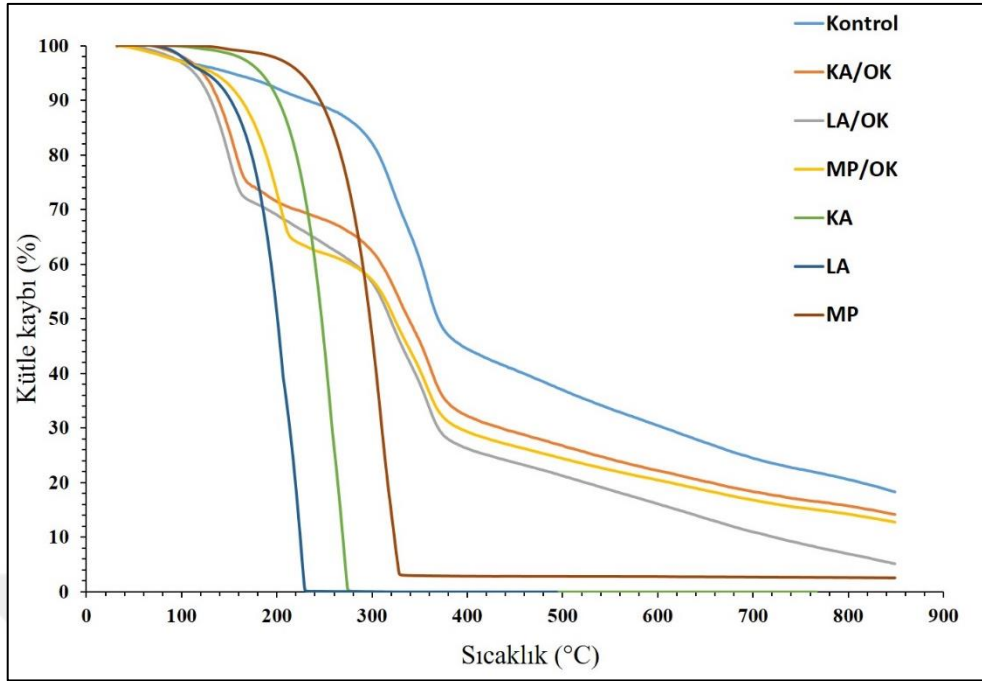
Şekil 51. LA/OK kompozitinin ısı döngü testi öncesi ve sonrası FTIR spektrumlarının karşılaştırılması



Şekil 52. MP/OK kompozitinin ısı döngü testi öncesi ve sonrası FTIR spektrumlarının karşılaştırılması

3.4.4. Termal Kütle Analizine (TGA) Ait Bulgular

Termal kararlılık, bir FDM ya da kompozit FDM'nin, ısı enerji depolama (TED) malzemesi olarak tercih edilmesinde en kritik faktörlerden biridir. Termal kararlılık, kompozit FDM'nin kullanılacağı uygulama alanında yeterli sıcaklık dayanımına sahip olmasını, yani kompozitin servis ömrü boyunca maruz kaldığı sıcaklıklarda kütleini koruyabilmesi için yüksek termal direnç göstermesini ifade eder. Başka bir deyişle, kompozitlerin hizmet sıcaklıklarına karşı yapısal bütünlüklerini koruyabilme yeteneği olarak tanımlanır. Bu özellikler genellikle TGA analizleri ile değerlendirilir. TGA analizinde numuneler, belirli bir ısıtma hızıyla istenen sıcaklıklara kadar ısıtılır ve bu süreçte numunenin kütle kaybı sıcaklıkla ilişkilendirilerek kaydedilir. Bu sayede, numunenin termal kararlılığını belirleyen en önemli parametrelerden biri olan bozunma sıcaklığı tespit edilir. Bu kapsamda, kompozit bileşenlerinin ve üretilen FKK-FDM'lerin termal kararlılığı TGA analizleri ile incelenmiş, elde edilen TGA eğrileri Şekil 53'de sunulmuş, bu eğriler doğrultusunda numunelerin bozunma sıcaklıkları tespit edilmiştir.



Şekil 53. FDM esaslı odun kompozitlerin TGA eğrileri

Şekil incelendiğinde, başlangıçta ortam sıcaklığı ile 100 °C arasında çok az miktarda bir kütle kaybı gözlemlenmektedir. Bu durum, lignoselülozik malzemedeki serbest ve kimyasal olarak bağlı suyun kademeli olarak buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda ise kütle kayıpları artış göstermektedir. Bunun nedeni, lignoselülozik materyalin üç ana bileşeni olan selüloz, hemiselüloz ve ligninin piroliz sürecine girmesidir. Hemi-selüloz 150-350 °C, selüloz 275-350 °C ve lignin 250-500 °C sıcaklık aralığında pirolize uğramaktadır (Mansaray ve Ghaly, 1998).

Tez kapsamında kullanılan saf FDM'lerin TGA eğrileri şekilde de görüldüğü üzere tek kademeli termal bozunma davranışı göstermektedir. Termal bozunma sıcaklıkları; saf KA için 120,88-278,67 °C iken, LA için 122,89-232,14 °C, MP için ise 141,89-332,42 °C'dir.

Kompozit FDM'lerin TGA eğrileri ise 3 kademeli termal bozunma davranışı sergilemektedir. İlk aşamada gözlemlenen kütle kaybı çoğunlukla hemiselüloz, lignin, selüloz ve şeker bazlı polimer zincirlerinin termal bozunması ile ilişkilidir (Segovia vd., 2020). Özellikle, kütle kaybının ilk aşaması, yaklaşık 200°C'de başlayan hemiselülozun bozunması ile başlar. Bu aşama, hemiselülozun daha küçük bileşiklere ayrılması, su buharı ve uçucu organik bileşiklerin serbest bırakılmasıyla karakterizedir. Ardından, hemiselülozun bozunmasından sonra selülozun bozunması gerçekleşir ve bu süreç 350°C'ye kadar devam eder. Selülozun termal bozunması, amorf kısmının bozunarak metanol, asetik asit ve furfural

gibi uçucu ürünlerin salınmasına ve kömürleşmenin oluşmasına neden olur. Hemiselüloz ve selüloz bozunurken, ahşap içinde karmaşık bir polimer olan lignin de geniş bir sıcaklık aralığında bozunur. Sıcaklık 377°C'yi aştığında, selüloz, hemiselüloz ve ligninin bozunmasından kalan kömürleşmiş kalıntılar da daha fazla bozunmaya uğrar ve ek kütle kaybına yol açar (Varol ve Mutlu, 2023).

İkinci aşamadaki termal bozunma kompozit yapıda bulunan FDM'lerin bozunmasıyla ilişkilidir. Bu aşamada termal bozunma sıcaklıkları saf FDM'lere göre ötelenmiş olup; KA/OK için 171,33-286,5 °C, LA/OK 169,96-298,95 °C için, MP/OK için 217,41-292,56 °C olarak ölçülmüştür. Saf FDM'lerin termal bozunma sıcaklığındaki bu ötelenme, iki nedenden kaynaklanıyor olabilir: (i) Karboksil grupları ile odun lifinin selülozik OH grupları arasındaki hidrojen bağlarının varlığı (Han vd., 2017; Liang vd., 2018), (ii) odun lifinin yapısal ağının FDM'nin termal buharlaşması üzerindeki hapsetme etkisi (Atinafu vd., 2018; Wen vd., 2018; Sarı vd., 2020). Öte yandan, kompozitlerin TGA eğrilerinden, yalnızca kompozitlerin termal kararlılığı belirlenmemiş, aynı zamanda odun lifine emprenye edilen FDM miktarları da doğrulanmıştır. Burada oluşan kütle kayıpları sırasıyla KA/OK için %36,59, LA/OK için %44, MP/OK için ise %42,8 olarak bulunmuştur. Bu değerler FDM'lerin katılım oranına oldukça yakın olup dolayısıyla, TGA analizleri ile de söz konusu FKK-FDM'lerdeki FDM emprenye oranları teyit edilmiştir.

Üçüncü aşamada ise yaklaşık 300-400 °C'de FDM kompozitlerde gerçekleşen termal bozunma ise nişasta bazlı bağlayıcıdan kaynaklandığını, FDM içermeyen kontrol kompozitinin benzer eğri vermesinden anlaşılmaktadır. 800 °C'ye kadar ısıtma sonucunda KA/LA/MP esaslı kompozitler için kaydedilen kütle kayıplarının sırasıyla %15,66, %6,86, %14,12 olarak tespit edilmiştir. Tüm bu bulgular göz önüne alındığında, kompozitlerin bozunma sıcaklıkları, çalışma sıcaklıklarından oldukça yüksek olup, termal bozunmaya karşı yüksek dayanıklılık sergilediklerini göstermektedir.

Sonuç olarak, üretilen tüm FKK-FDM'lerin termal kararlılıkları incelendiğinde, en düşük termal stabiliteye sahip olan numunenin bile termal bozunma başlangıç sıcaklığının 150°C'nin üzerinde olduğu saptanmıştır. Bu durum, üretilen FKK-FDM'lerin 150°C'ye kadar yüksek termal dayanıklılık sergilediğini göstermektedir. Güneş enerjisi ile ısıtma ve iklimlendirme gibi enerji verimliliği uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanan bu kompozitlerin, hedeflenen binalarda çalışma koşullarına uygun olduğu görülmektedir. Özellikle, bu kompozitlerin servis sıcaklık aralığı olan yaklaşık 10-35°C ile karşılaştırıldığında, termal bozunma sıcaklıklarının oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Bu da, FKK-FDM'lerin termal bozunmaya karşı üstün direnç sunduğunu ve uzun vadeli kullanım için termal açıdan güvenilir malzemeler olduğunu ifade etmektedir. Dolayısıyla, bu kompozitler binalarda enerji tasarruflu ısıtma ve soğutma sistemleri için son derece uygun olup, yüksek termal stabiliteleri ile performans açısından avantaj sağlamaktadır.

3.4.5. Laboratuvar Ölçekli Termoregülasyon Testine Ait Bulgular

Bir FDM'nin hızlı enerji depolama ve serbest bırakma yeteneği, enerji gereksinimleri için bekleme süresini doğrudan azalttığından, ısıtma ve soğutma uygulamaları açısından kritik bir öneme sahiptir. Burada bahsedilen ısı depolama ve serbest bırakma performansı, FDM'nin veya kompozit FDM'nin erime ve katılaşma faz dönüşümlerinin tamamlanma süresini ifade eder. Bu sürecin önemi, FDM'lerin ısı depolama ve salınım işlevlerini erime ve katılaşma faz değişimleri sırasında gerçekleştirdiği önceki bölümlerde teorik olarak detaylıca ele alınmıştır.

Kompozitler için sunulan tüm sıcaklık değişim eğrileri, ısıtma sürecinde üç farklı bölgeye ayrılabilir. İlk bölgede, kompozitler erime noktalarına kadar, sahip oldukları termal iletkenliğe bağlı olarak hızla duyulur ısı kazanır. İkinci bölgede, FDM'lere özgü gizli ısı depolama süreci, erimenin neredeyse sabit bir sıcaklıkta gerçekleştiği sırada meydana gelir. Bu aşamada FDM'lerin erimesi tamamlandıktan sonra, eğrilerde bir kırılma noktası oluşur ve sabit sıcaklık eğilimi sona erer; üçüncü bölgede ise kompozitler yeniden duyulur ısı depolar. Isıtma sürecinde tanımlanan bu üç farklı bölge, soğutma sürecinde de tersinir bir şekilde geçerlidir. Soğutma sürecinde birinci bölgede duyulur ısı salınımı, ikinci bölgede katılaşma sıcaklığı civarında gizli ısı salınımı, üçüncü bölgede ise yeniden duyulur ısı salınımı gözlemlenir (Hekimoğlu, 2023).

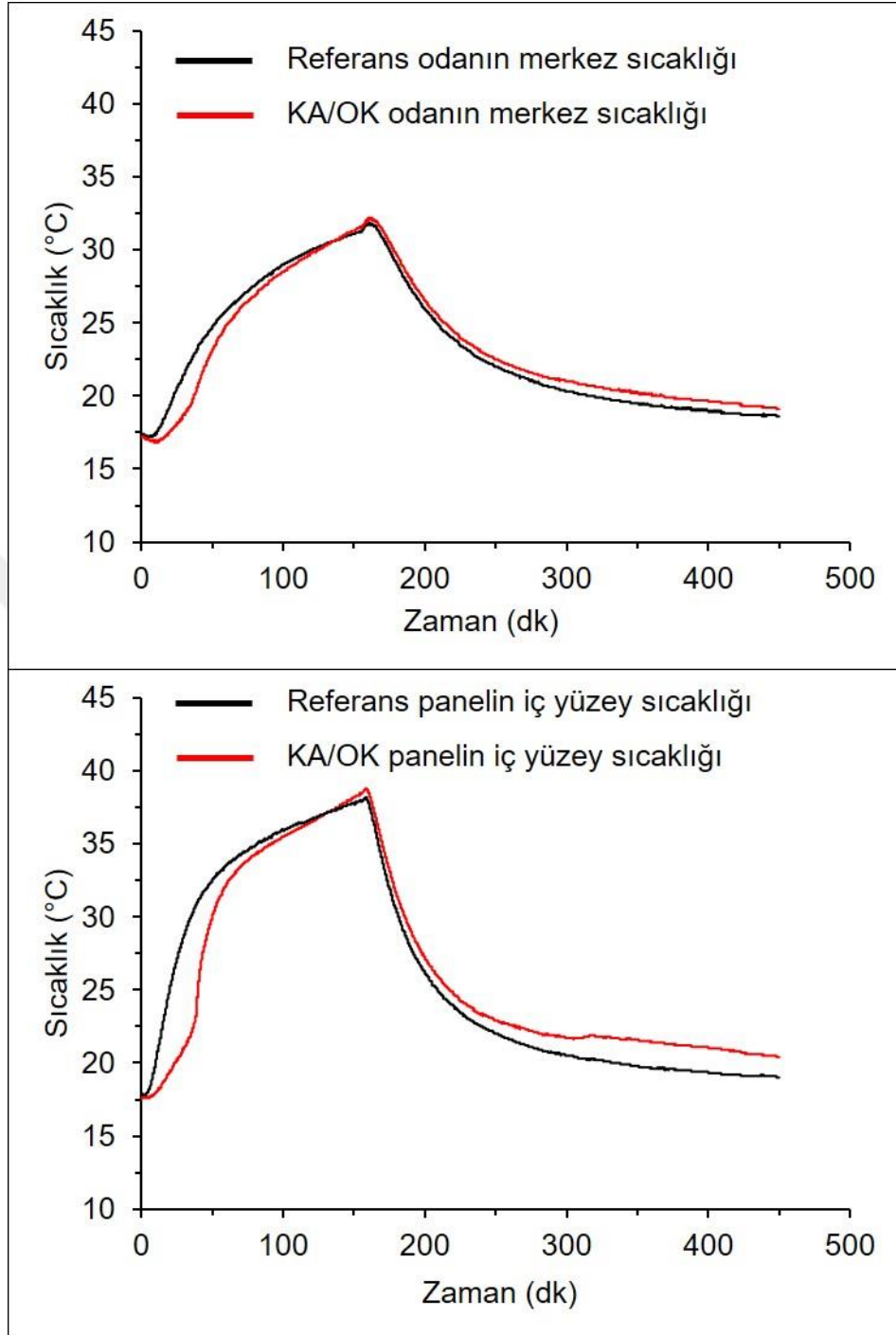
Isıl enerji depolama ve salınım performanslarını belirlemek amacıyla, kompozitlerin erime ve katılaşma süreleri esas alınmıştır. Bu süreler, eşit başlangıç sıcaklıklarından itibaren, sabit sıcaklıkta faz değişimlerinin tamamlandığı noktalara kadar geçen süreler olarak belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle, erime ve katılaşma faz geçiş süreleri, yaklaşık sabit sıcaklıklarda bu faz değişimlerinin tamamen gerçekleştiği süreler olarak kabul edilmiştir.

Bu çerçevede, üretilen FDM esaslı izolasyon levhalarının termal regülasyon performansı laboratuvar ölçekli bir düzende test edilmiştir. Test sonuçlarında, ısıtma ve soğutma aşamaları sırasında hem referans hücre hem de FDM içerikli test hücresinin ısı depolama ve salınım özelliklerini gösteren eğriler elde edilmiştir. Bu eğriler, ısıtma ve

soğutma süreçlerinde zamana bağlı olarak odaların üst duvarlarının iç yüzey sıcaklıkları ve iç ortam merkez sıcaklıklarındaki değişimleri göstermektedir. Termal regülasyon performansını belirlemek için, bu eğrilerden yararlanılarak odaların ısıtma ve soğutma aşamalarında eşit süreli ısıtma/soğutma işlemlerinden sonra kaydedilen maksimum ve minimum tepe sıcaklıkları karşılaştırılmıştır.

KA ile üretilen odun kompozit levhası ve kontrol levhasının iç yüzey sıcaklıkları ile küplerin merkez sıcaklıklarındaki değişim eğrileri Şekil 54'te; LA ile üretilen levhanın ve kontrol levhasının Şekil 55'te; MP ile üretilen levhanın ve kontrol levhasının ise Şekil 56'da karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.





Şekil 54. Referans ve KA/OK panelin ısıtma ve soğutma periyotlarındaki termoregülasyon performans test sonuçları

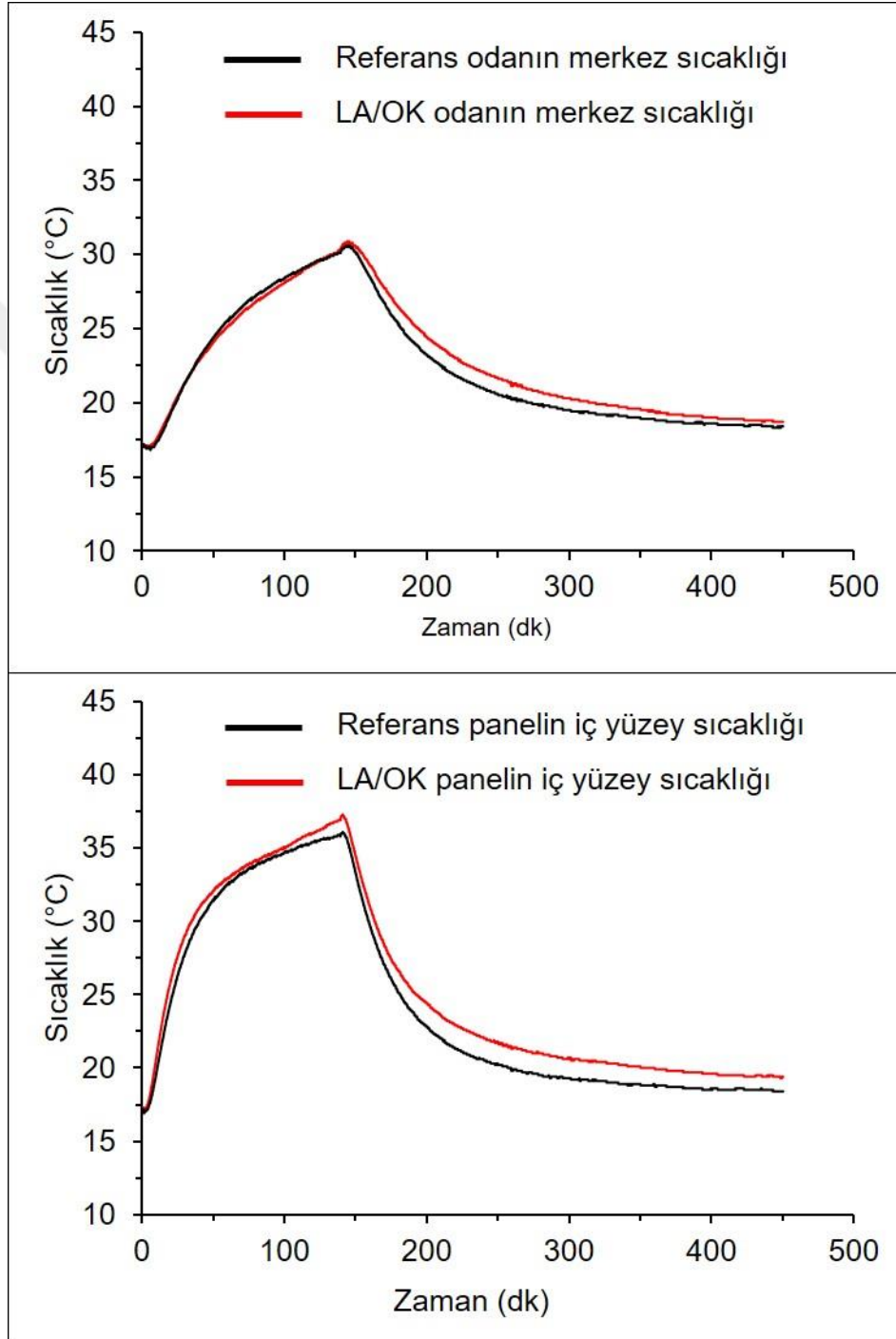
Şekil 54’da eşit ısınma sürecinde referans odanın merkez sıcaklığının 30 °C’ye ulaşması 119 dk sürerken, KA/OK levhasının bulunduğu test odasında 124 dk sürmüştür. Aynı şekilde referans ve test küpünün üst duvarlarının iç yüzey sıcaklıklarının 30 °C’ye ulaşması için geçen süre sırasıyla 35 dk ve 50 dk olarak bulunmuştur. Bu durumda, test

odasının merkez sıcaklığının 30 °C'ye ulaşma süresi referans odasına göre yaklaşık %4.20, üst duvarının iç yüzey sıcaklığı ise yaklaşık %42.86 daha uzundur. Verilerden de anlaşıldığı üzere FDM içeren test odası belirlenen sıcaklığa daha geç ulaşmıştır. Bu bulgu, binalarda FDM içeren odun kompozitlerinin kullanılmasıyla konfor bölgesi sıcaklıklardan rahatsız edici yüksek sıcaklıklara geçişin geciktirilebileceğini ve böylece oda sıcaklığının termoregülasyonuna yardımcı olabileceğini göstermektedir.

Bu iki odanın ısıl düzenleme performansını ayırt etmenin bir başka yolu, her iki odanın aynı ısıtma süresi sonunda belirtilen noktalarındaki ortalama sıcaklık değerlerini dikkate almaktır. Eşit ısıtma sonucunda, referans odasının ve KA/OK test odasının ortalama merkez sıcaklıkları sırasıyla 20,45 °C ve 18,71 °C olarak ölçülmüştür, yani bu iki odanın merkez sıcaklıkları arasındaki ortalama fark 1,74 °C olarak ölçülmüştür. Aynı ısıtma süresi sonunda, ortalama iç yüzey sıcaklıkları referans odası için 25,88 °C ve test odası için 21,26 °C olarak bulunmuştur ve aralarındaki ortalama fark 4,62 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda, test odasının ortalama merkez sıcaklığı referans odasına göre yaklaşık %8.51, ortalama iç yüzey sıcaklığı yaklaşık %17,85 daha düşüktür. Yukarıda verilen karşılaştırmalı örneklerden de görülebileceği gibi, belirtilen noktalardaki test odasının sıcaklıkları ısıtma süresi boyunca referans odasına göre daha düşük kalmıştır, çünkü kompozit içindeki FDM, ortamdaki bir miktar ısıyı emmektedir. Bu şekilde, ortamdan odanın içine doğru ısı transfer oranı azalmakta ve dolayısıyla sıcaklık artış hızı yavaşlamaktadır.

Aynı şekilde eşit soğutma sürecinde referans odanın merkez sıcaklığının 20 °C'ye düşmesi 146 dk sürerken, KA/OK levhasının bulunduğu test odasında 197 dk sürmüştür. Yine referans ve test odasının üst duvarlarının iç yüzey sıcaklıklarının 20 °C'ye düşmesi için geçen süre sırasıyla 180 dk ve 291 dk olarak bulunmuştur. Bu durumda, test odasının merkez sıcaklığının 20 °C'ye düşme süresi referans odasına göre yaklaşık %34.93, üst duvarının iç yüzey sıcaklığı ise yaklaşık %61.67 daha uzundur. Test odasının soğuma süresi kontrolden daha uzun çıkmasının sebebi FDM ısınma sürecinde bünyesine gizli ısı depolarken soğuma esnasında absorbe ettiği bu termal enerjiyi çevreye yayarak soğuma süresinin uzamasına katkı sağlamasıdır. Eşit soğutma süresi sonucunda, referans odanın ve KA/OK test odasının ortalama merkez sıcaklıkları sırasıyla 23,17 °C ve 23,77 °C olarak tespit edilmiş olup, iki oda arasındaki merkez sıcaklık farkı ortalama 0,6 °C olarak kaydedilmiştir. Ortalama iç yüzey sıcaklıkları ise referans odası için 23,71 °C, test odası için 24,88 °C olup, aralarındaki sıcaklık farkı 1,17 °C olarak belirlenmiştir. Bu durumda, test odasının merkez sıcaklığı referans odasına göre yaklaşık %2.59, ortalama iç yüzey sıcaklığı %4.93 daha yüksektir.

Soğuma süresi bulgularına göre, test odasındaki belirtilen noktalarındaki sıcaklığının kontrol odasına kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu, FDM'nin test odasının aşırı soğumasını geciktirmeye yardımcı olduğunu göstermektedir. Başka bir ifadeyle, FDM'nin varlığı, ortam sıcaklığının daha düşük seviyeye ulaşma süresini geciktirmiştir.

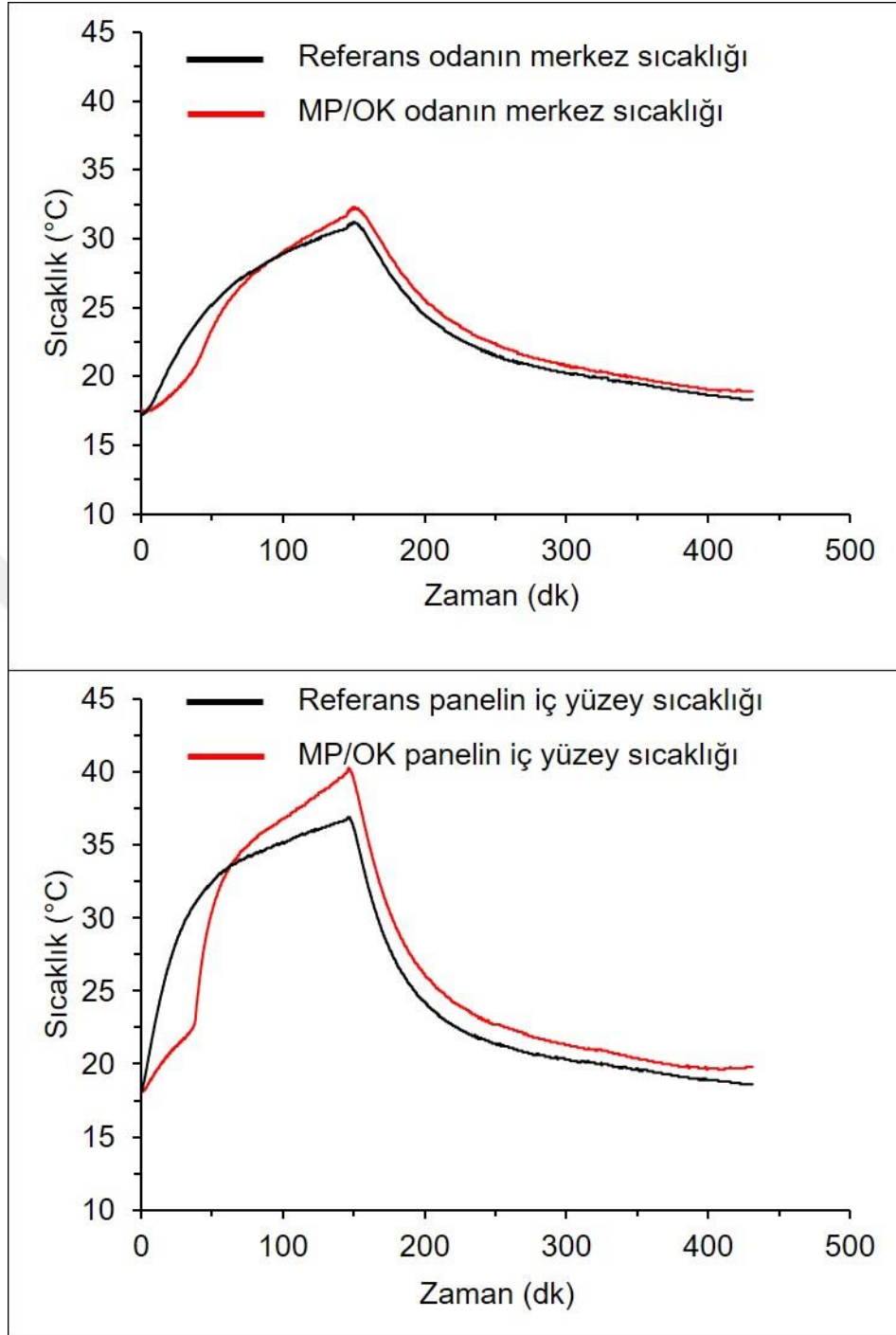


Şekil 55. Referans ve LA/OK panelin ısıtma ve soğutma periyotlarındaki termoregülasyon performans test sonuçları

LA/OK kompozitin ve referans kompozitinin termal regülasyon performans test sonuçlarını gösteren eğriler Şekil 55’de verilmiştir. Eşit ısınma sürecinde referans odanın merkez sıcaklığının 30 °C’ye ulaşması 135 dk sürerken, LA/OK levhasının bulunduğu test odasında 132 dk sürmüştür. Aynı şekilde referans ve test küpünün üst duvarlarının iç yüzey sıcaklıklarının 30 °C’ye ulaşması için geçen süre sırasıyla 40 dk ve 35 dk olarak bulunmuştur. Bu durumda, test odasının merkez sıcaklığının 30 °C’ye ulaşması referans odasına göre yaklaşık %2.22, üst duvarının iç yüzey sıcaklığı ise yaklaşık %12.5 daha kısa sürmüştür.

Eşit ısıtma sonucunda, referans ve test odasının ortalama merkez sıcaklıkları sırasıyla 20,27 °C ve 20,21 °C olarak ölçülmüştür, yani bu iki odanın merkez sıcaklıkları arasındaki ortalama fark 0,6 °C olarak ölçülmüştür. Aynı ısıtma süresi sonunda, ortalama iç yüzey sıcaklıkları referans odası için 26,08 °C ve test odası için 25,07 °C olarak bulunmuştur ve aralarındaki ortalama fark 1,01 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda, test odasının ortalama merkez sıcaklığı referans odasına göre yaklaşık %0.3, ortalama iç yüzey sıcaklığı yaklaşık %3.87 daha düşüktür.

Isıtma periyodu boyunca LA/OK odun kompozitinin olduğu test odasındaki FDM, yüklenen ısının bir kısmını gizli ısı formunda depoladığından dolayı iki hücrenin belirtilen noktaları arasında bu sıcaklık farkları ortaya çıkmıştır. Eşit soğutma sürecinde ise referans odanın merkez sıcaklığının 20 °C’ye düşmesi 125 dk sürerken, LA/OK levhasının bulunduğu test odasında 170 dk sürmüştür. Aynı şekilde referans ve test odasının üst duvarlarının iç yüzey sıcaklıklarının 20 °C’ye düşmesi için geçen süre sırasıyla 116 dk ve 209 dk olarak bulunmuştur. Bu durumda, test odasının merkez sıcaklığının 20 °C’ye düşmesi, referans odasına göre yaklaşık %36, üst duvarının iç yüzey sıcaklığı ise yaklaşık %80.17 daha uzun sürmüştür. Eşit soğutma süresi sonucunda, referans odasının ve LA/OK test odasının ortalama merkez sıcaklıkları sırasıyla 22,95 °C ve 23,93 °C olarak ölçülmüştür, yani bu iki odanın merkez sıcaklıkları arasındaki ortalama fark 0,98 °C olarak ölçülmüştür. Ortalama iç yüzey sıcaklıkları referans odası için 23,24 °C ve test odası için 24,68 °C olarak bulunmuştur ve aralarındaki ortalama fark 1,44 °C olarak ölçülmüştür. Bu durumda, test odasının ortalama merkez sıcaklığı referans odasına göre yaklaşık %4.27, ortalama iç yüzey sıcaklığı %6.19 daha yüksektir.



Şekil 56. Referans ve MP /OK panelin ısıtma ve soğutma periyotlarındaki termoregülasyon performans test sonuçları

Son olarak, Şekil 56’da MP/OK kompozitin ve referans kompozitinin termal regülasyon performans test sonuçlarını gösteren eğriler verilmiştir.

Eşit ısınma sürecinde referans odanın merkez sıcaklığının 30 C’ye ulaşması 68 dk sürerken, MP/OK levhasının bulunduğu test odasında 74 dk sürmüştür. Aynı şekilde referans

ve test odasının üst duvarlarının iç yüzey sıcaklıklarının 30°C 'ye ulaşması için geçen süre sırasıyla 20 dk ve 43 dk olarak bulunmuştur. Bu durumda, test odasının merkez sıcaklığının 30°C 'ye ulaşması referans odasına göre yaklaşık %8.82, üst duvarının iç yüzey sıcaklığı ise yaklaşık %115 daha uzun sürmüştür. Verilerden de anlaşıldığı üzere FDM içeren test odası belirlenen sıcaklığa daha geç ulaşmıştır. Eşit ısıtma sonucunda, referans ve test odasının ortalama merkez sıcaklıkları sırasıyla $21,31^{\circ}\text{C}$ ve $19,39^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür, yani bu iki odanın merkez sıcaklıkları arasındaki ortalama fark $1,92^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Ortalama iç yüzey sıcaklıkları ise referans odası için $27,18^{\circ}\text{C}$ ve test odası için $22,04^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur ve aralarındaki ortalama fark $5,14^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Bu durumda, test odasının ortalama merkez sıcaklığı referans odasına göre yaklaşık %9,01, ortalama iç yüzey sıcaklığı ise %18,91 daha düşüktür.

Eşit soğutma sürecinde ise referans odanın merkez sıcaklığının 20°C 'ye düşmesi 164 dk sürerken, test odasında 220 dk sürmüştür. Aynı şekilde referans ve test odasının üst duvarlarının iç yüzey sıcaklıklarının 20°C 'ye düşmesi için geçen süre sırasıyla 117 ve 240 dk olarak bulunmuştur. Bu durumda, test odasının merkez sıcaklığının 20°C 'ye düşmesi referans odasına göre yaklaşık %34.15, üst duvarının iç yüzey sıcaklığının ise yaklaşık %105.13 daha uzun sürmüştür. Referans ve test odasının ortalama merkez sıcaklıkları sırasıyla $23,80^{\circ}\text{C}$ ve $24,74^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür, yani bu iki odanın merkez sıcaklıkları arasındaki ortalama fark $0,94^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Ortalama iç yüzey sıcaklıkları referans odası için $24,08^{\circ}\text{C}$ ve test odası için $25,86^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur ve aralarındaki ortalama fark $1,80^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür. Bu durumda, test odasının ortalama merkez sıcaklığı referans odasına göre yaklaşık %3,95, ortalama iç yüzey sıcaklığı ise yaklaşık %7,47 daha yüksektir. Eğriler incelendiğinde sıcaklık artarken, test levhasının bulunduğu odalar kontrol levhasının bulunduğu odaya göre iç yüzey sıcaklığında ve merkez sıcaklığındaki artışın zamana bağlı olarak daha yavaş arttığı gözlemlenirken, soğutma safhasının başlangıcından itibaren referans odasının iç yüzey sıcaklığı ile merkez sıcaklığı hızlı bir biçimde düşerken test odasının bu noktalardaki düşüşünün bünyesinde depoladığı gizli ısı sayesinde daha yavaş gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

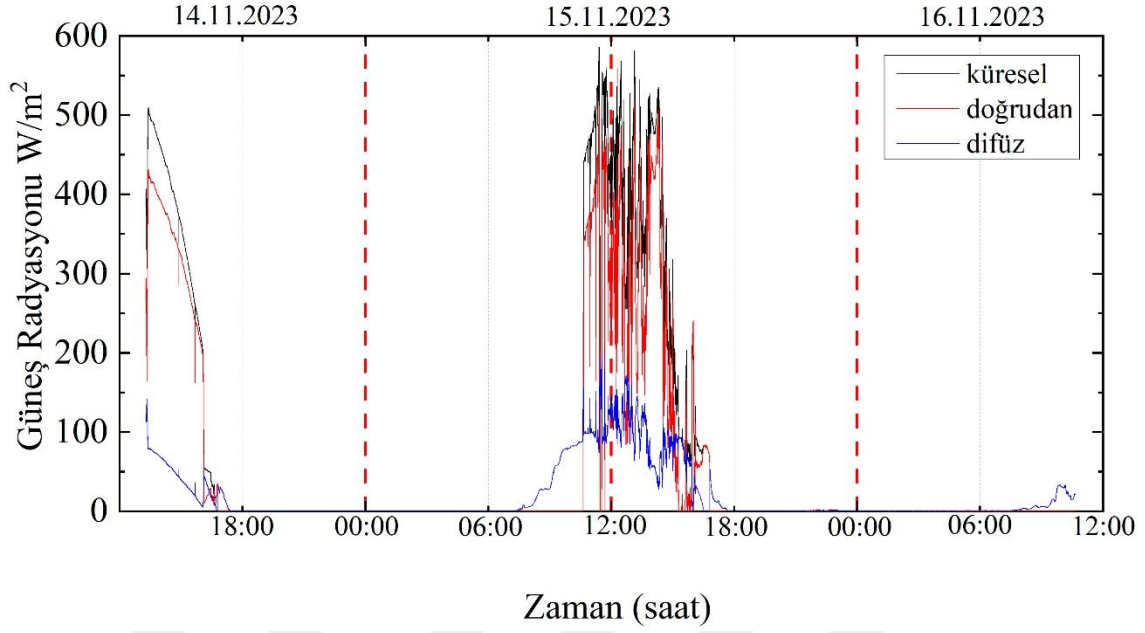
Yukarıdaki tüm veriler incelendiğinde, 3 farklı FDM içeren test odaları içerisinde referans odasına göre, ısıtma ve soğutma süresinde en yüksek ortalama sıcaklık farkını veren MP/OK levhasının bulunduğu test odası olmuştur. Ayrıca referans odasına göre $1,92^{\circ}\text{C}$ 'lik ortalama merkez sıcaklık farkı ve $5,14^{\circ}\text{C}$ 'lik ortalama iç yüzey sıcaklığı farkı ile yine en yüksek termal performans değeri MP/OK ile elde edilmiştir. Ardından en iyi

termoregülasyon performansı sergileyen KA/OK ve en düşük performansı veren LA/OK test odası olmuştur. Bu sonuçlar, önceden bahsettiğimiz ısı iletkenlik katsayı değerleriyle de doğrulanmaktadır. Isı iletkenlik katsayısı en yüksek olan MP/OK en iyi termoregülasyon performansı sergilemiş, ısı iletkenlik değeri en düşük olan LA/OK ise en düşük termoregülasyon performansı sergilemiştir.

Sonuç olarak, farklı FDM kullanılarak yapılan bu deneysel çalışma ile, bu malzemelerin bina içi sıcaklıklarının termoregülasyonunda önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir. FDM'ler, ortam sıcaklığı yükseldiğinde ısıyı emerek ve sıcaklık düştüğünde ısıyı serbest bırakarak, sıcaklık dalgalanmalarını dengelemeye yardımcı olurlar. Bu özellikleri sayesinde, konfor bölgesi sıcaklıklarından rahatsız edici yüksek sıcaklıklara geçiş süresini uzatarak, bina içi sıcaklıklarının daha stabil kalmasını sağlarlar. Farklı FDM odun kompozitler kullanılarak yapılan bu testler, bu malzemelerin iç sıcaklık artışı ve düşüşünü geciktirerek, binalarda enerji verimliliğini artırabileceğini ve termal konforu iyileştirebileceğini ortaya koymuştur.

3.4.6. Solar Termoregülasyon Performansına Ait Bulgular

Güneş radyasyonu testi, genellikle güneş enerjisi araştırmaları, enerji verimliliği ve çevresel analizler için yapılır. Bu testin başlıca amacı, farklı güneş radyasyonu türlerini ölçerek belirli bir zaman diliminde ve coğrafi konumda güneşten gelen enerji miktarını analiz etmektir. Termal regülasyon testlerinde güneş radyasyonu testi, sistemlerin veya malzemelerin doğrudan güneş ışığı altında nasıl ısındığını, bu ısıyı nasıl yönettiğini ve iç sıcaklıklarını nasıl düzenlediğini analiz etmek amacıyla yapılır. Güneş radyasyonu, özellikle dış ortam koşullarına maruz kalan yapıların, cihazların veya malzemelerin performansını etkileyen önemli bir faktördür.



Şekil 57. Küresel doğrudan ve difüz güneş radyasyonu verileri (15.11.2023 tarihli)

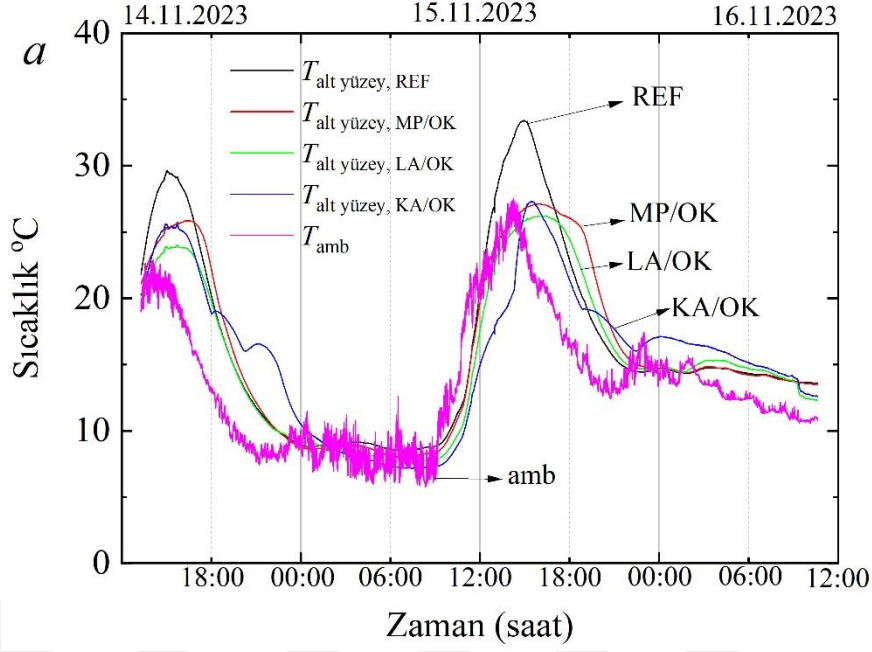
Şekil 57, deneyin gerçekleştirildiği gün küresel, doğrudan, ve difüz güneş radyasyonları verilerini göstermektedir. Güneş radyasyonu ölçümü, meteorolojik koşullar hakkında önemli bir öngörü sağlar. Küresel ve difüz radyasyondaki dalgalanmalar, bulutlu saatleri tasvir ederken, doğrudan radyasyonlar güneşli saatleri temsil etmektedir. Bulutlu saatlerde ve gölgede difüz radyasyon daha etkilidir (Gencel vd., 2022). Test kabiniindeki sıcaklık artışı, doğrudan güneş radyasyonuna bağlanabilir. Bu nedenle, doğrudan ve difüz radyasyonlar, bulutlu-güneşli-yağmurlu bir günde test kabiniinde meydana gelen olayları anlamak için kritik göstergeler olabilir. Bulutlu günler, FDM odun kompozitinin faydasını azaltabilir çünkü numunenin güneşten yararlanması için direkt güneş radyasyonu önemlidir. Ancak bazı bölgelerde açık hava günlerinin sayısı sınırlı olabilir ve bu durum performansın meteorolojik koşullara göre değerlendirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Deneyin yapıldığı yer (Bartın), yılın büyük bir bölümünde bulutlu, güneşli ve yağmurlu hava koşullarına sahiptir. Deneyin yapıldığı gün, o bölgenin karakteristik bir günü olarak kabul edilebilir. Bu nedenle deney o gün yapılmıştır. Daha güvenilir ve kapsamlı test sonuçları elde etmek için ölçümler 14 Kasım 2023 ile 16 Kasım 2023 tarihleri arasında, 48 saat boyunca alınmıştır. İlk test gününde, test kabiniinin doğrudan güneşe maruz kalmadığı gölge sıcaklık saatlerinde test saatleri nedeniyle küresel ve doğrudan radyasyon azalmıştır. İkinci test gününde (15.11.2023), daha yüksek dalgalanmalar gün boyunca gözlemlenen güneşli ve bulutlu gökyüzünü temsil etmektedir ve maksimum küresel radyasyonun 11:40'ta

yaklaşık 585 W/m^2 olarak ölçülmüştür. Doğrudan güneş radyasyonu 10:30–15:30 arasında gözlemlenirken, difüz radyasyon 07:50–17:30 arasında görülebilir. Test sonuçları, bulutlu bir sonbahar gününde test odasındaki sıcaklık değişimine dair bir perspektif sunmaktadır(Şekil 57).

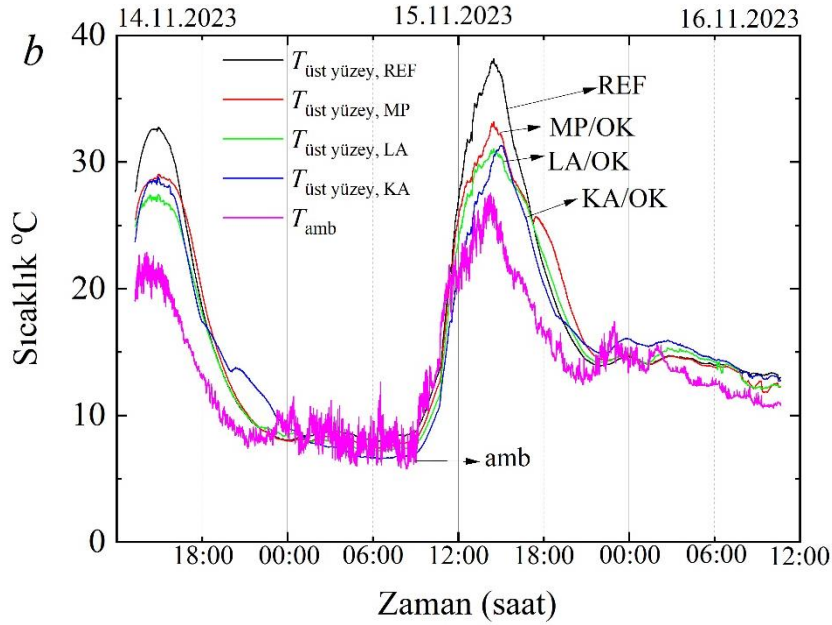
Referans odun kompoziti içeren kontrol odası ve FDM esaslı odun kompozit örneği içeren test odalarında Şekil 58’de alt yüzeyde, Şekil 59’de üst yüzeyde, Şekil 60’da yakın yüzeyde, Şekil 61’de ise oda merkezinde gözlemlenen sıcaklık değişim eğrilerini göstermektedir. Bu grafiklerde bulunan eğriler, FDM'nin sıcaklık düzenleme üzerindeki etkinliği hakkında açık bir perspektif sunmaktadır. Verilen bilgilere göre, 14 Kasım 2023'te öğle saatlerinde başlayan testlere tabi tutulan örnekler, 16 Kasım 2023'te öğle saatlerine kadar 48 saatlik bir teste tabi tutulmuştur. Yukarıda bahsettiğimiz güneş ışıınımı ölçümlerinin en etkin olduğu ikinci test günü (15.11.2023) verileri esas alınmıştır.

Çevresel sıcaklık, 08:45'e kadar yaklaşık $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında değişmiştir. Güneşin doğuşundan sonra kademeli olarak artmış ve 08:40–13:20 saatleri arasında $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik faz geçiş sıcaklığına ulaşmıştır. Çevresel sıcaklık, 11:20–17:50 saatleri arasında $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde kalmıştır. Maksimum çevresel sıcaklık yaklaşık olarak 14:30 civarında $27,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak gözlemlenmiştir. İç sıcaklıklar, güneş irtifasındaki azalmaya ve gelen ışıının azalmasına bağlı olarak gece yarısına kadar düşüş göstermiştir. Odaların termal izolasyonu nedeniyle iç sıcaklık, çevresine kıyasla daha yavaş değişmiştir. Referans malzemenin bulunduğu odadaki sıcaklık değişim eğrileri ile test kompozit FDM'nin bulunduğu odalardaki eğriler karşılaştırıldığında, çevresel (ambiyans) sıcaklık artarken referans odanın sıcaklık değerlerinin FDM kompozit içeren test odalarının sıcaklık değerlerinden aynı saatlerde daha yüksek olduğu, çevresel sıcaklık azalırken ise FDM kompozitli test odalarının sıcaklık değerleri referans odasına göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, ilk olarak Şekil 58’de 15.11.2023 tarihinde, referans odası için alt yüzey zirve sıcaklık değeri $33.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçüldüğünde, test odaları için zirve sıcaklık değeri KA/OK için $27.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, LA/OK için $26.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, MP/OK için $27.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür.



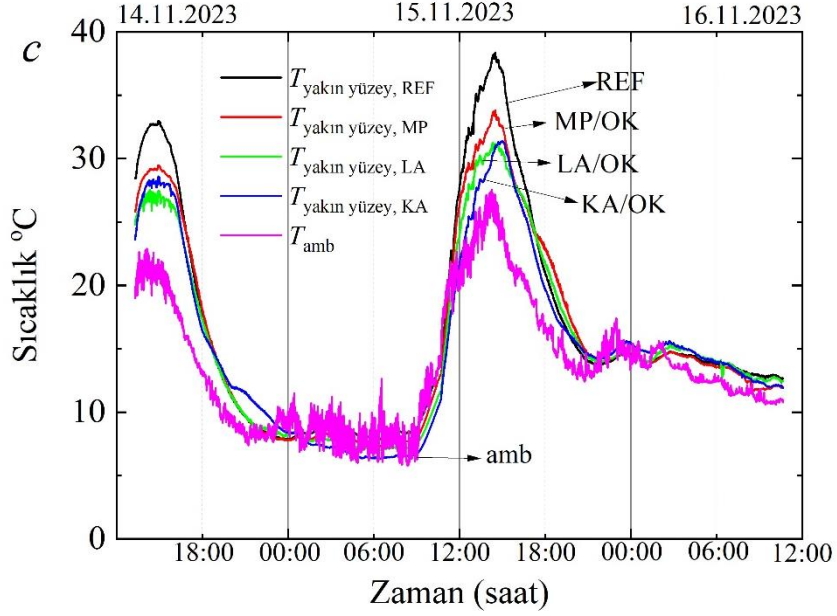
Şekil 58. Referans ve test odalarındaki alt yüzey sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Aynı şekilde Şekil 59’da üst yüzey sıcaklık değişim eğrilerine baktığımızda referans odası için zirve sıcaklık değeri 38,1 °C iken, test odaları zirve sıcaklık değerleri KA/OK için 31,2 °C, LA/OK için 30,9 °C, MP/OK için 33,2 °C olarak ölçülmüştür.



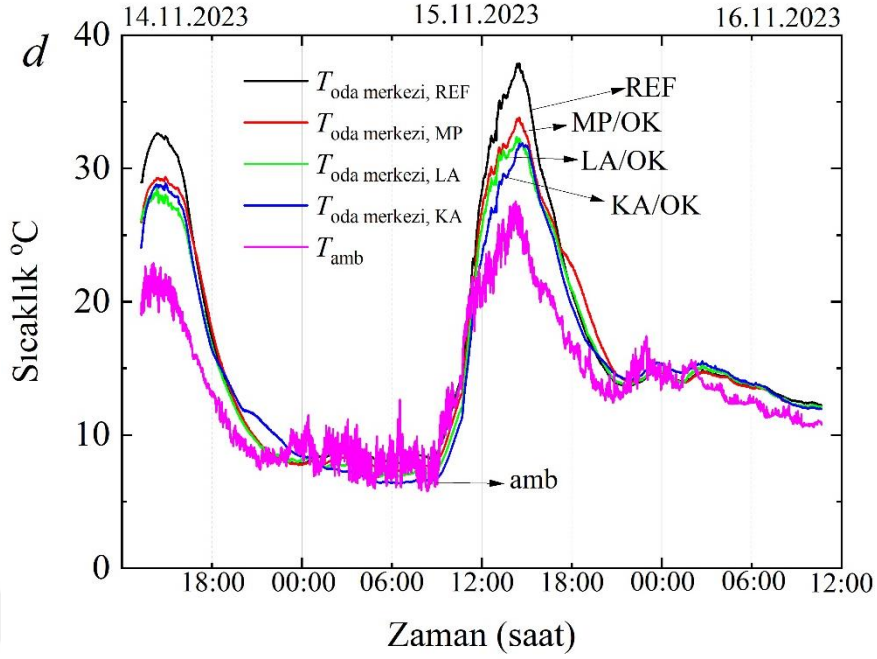
Şekil 59. Referans ve test odalarındaki üst yüzey sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Şekil 60'da ise yakın yüzey sıcaklık değişim eğrilerine baktığımızda referans örneği için zirve sıcaklık değeri 38.4 °C iken, KA/OK için 31.3 °C, LA/OK için 31.2 °C, MP/OK için 33.8 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 60. Referans ve test odalarındaki yakın yüzey sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Son olarak Şekil 61'de ise merkez sıcaklık eğrilerine göre zirve sıcaklık değerleri referans odası için 37.9 °C iken, test odaları zirve sıcaklık değerleri KA/OK için 31.9 °C, LA/OK için 32.3 °C, MP/OK için 33.8 °C'dir.



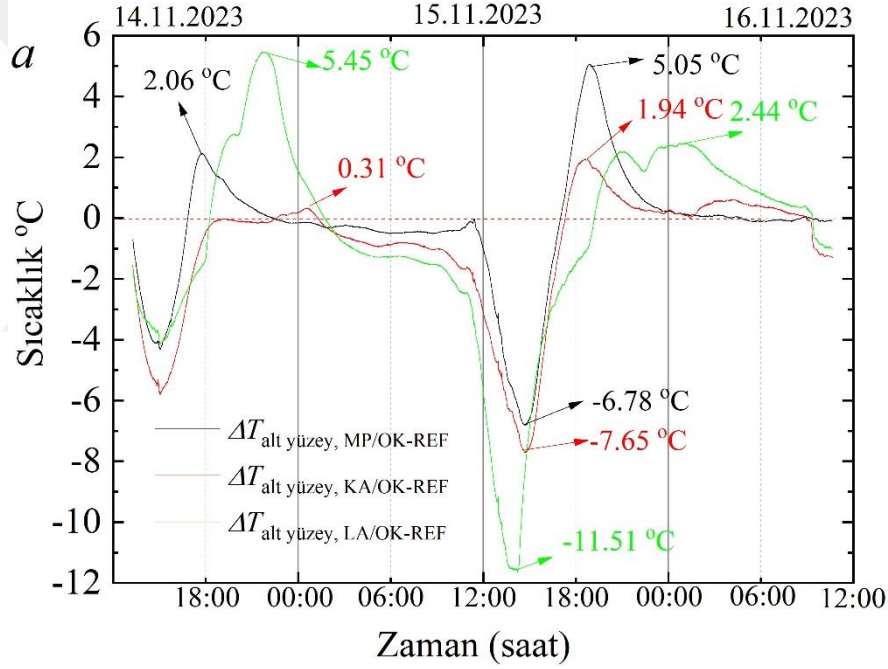
Şekil 61. Referans ve test odalarındaki oda merkezi sıcaklık değişimleri (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Şekildeki eğrilerden ve sonuçlardan da anlaşıldığı üzere, FDM kullanıldığında sıcaklık düzenleme test odasındaki sıcaklık, referans odasına kıyasla çevresel sıcaklığa daha yakın olma eğilimindedir. Bu eğilim, FDM'nin faz geçişleri geçirebilme, termal enerjiyi emebilme ve serbest bırakabilme yeteneğinden kaynaklanmaktadır. FDM'ler yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptir ve çevresel sıcaklık faz geçiş sıcaklıklarını aştığında fazla ısıyı emerek etkili bir termal tampon gibi davranmaktadırlar.

Test odasındaki sıcaklık, FDM'nin faz geçiş sıcaklığından yüksek olduğunda, FDM'ler katıdan sıvıya geçerek faz fazlası ısıyı emer. Bu faz geçiş süreci, termal enerjiyi emerek oda sıcaklığında keskin bir artışı önleyerek sıcaklığı düzenlemeye yardımcı olur.

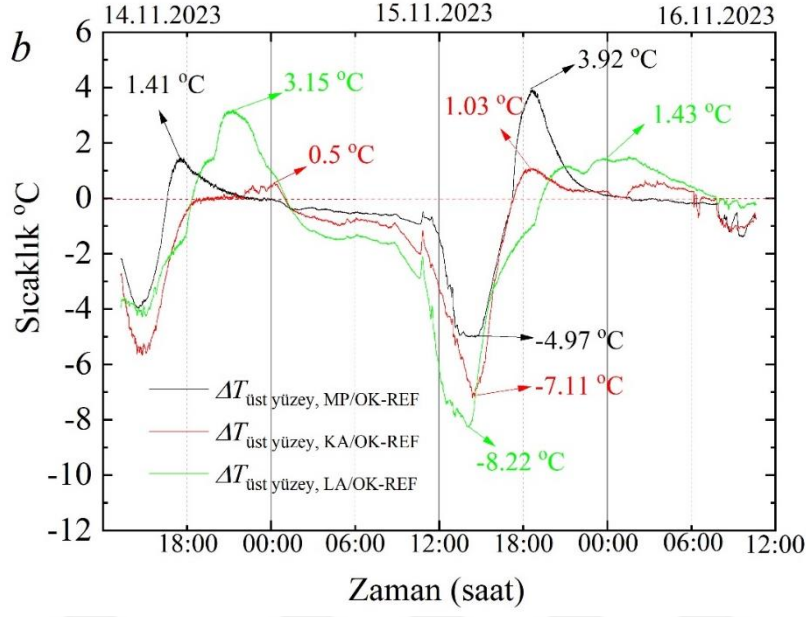
Farkı net bir şekilde görmek için, test ve referansın yüzey sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farklarını gösteren eğriler aşağıdaki grafiklerde sunulmuştur. Şekil 62-65, 15.11.2023 tarihinde farklı sürelerde test ve referans odaları arasındaki sıcaklık farklarını göstermektedir. Test ve referans numunelerinin alt yüzeyleri, üst yüzeyleri, yakın yüzeyleri ve odaların merkezleri arasındaki sıcaklık farkı (ΔT) şekilde sunulmuştur. Test ve referans odaların yüzey sıcaklıkları arasındaki pozitif $+\Delta T$, FDM içeren test odasının referans odasına göre daha yüksek sıcaklıklara sahip olduğunu, negatif $-\Delta T$ olanlar ise test odasının referans odasına göre daha düşük bir sıcaklığı temsil etmektedir.

15.11.2023 tarihinde, odanın sıcaklığının en yüksek olduğu saat olan 14:00 civarında, sıcaklık farkı değerleri zirve yapar ve FDM esaslı odun kompozit örneklerinin bulunduğu test odasının referans odasına göre alt yüzeyleri için sıcaklık farkları sırasıyla MP/OK için -6.78 °C, KA/OK için -7.65 °C, LA/OK için -11.51 °C' lik negatif yönde bir fark ($-\Delta T$) olduğu gözlemlenmiştir. Burada FDM'nin ısı depolama sağladığı negatif sıcaklık farkı değerinden anlaşılmaktadır. Saat 15.00'den sonra ise ortam sıcaklığının azalmasıyla birlikte test odasının alt yüzey sıcaklıkları referans odasına göre MP/OK için 5.05 °C, KA/OK için 1.94 °C, LA/OK için 2.44 °C'lik pozitif yönde fark ($+\Delta T$) olduğu gözlemlenmiştir. Bu da FDM içerikli kompozitlerin bünyesinde depoladığı gizli ısıyı hava soğuduğunda açığa çıkardığının bir göstergesidir (Şekil 62).



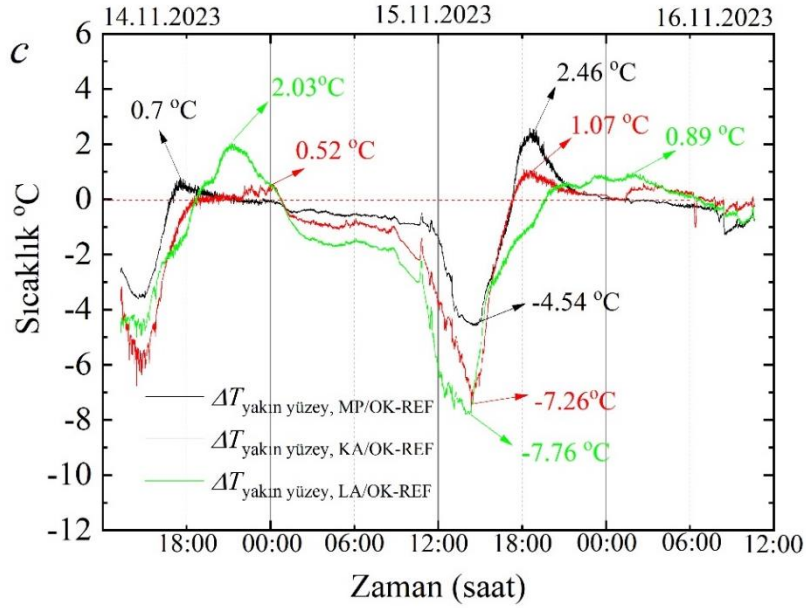
Şekil 62. Referans ve test odalarındaki alt yüzey sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Şekil 63'e baktığımızda sıcaklık en yüksek olduğu saatte test odası örneklerinin referansa odasına göre üst yüzey sıcaklık farkları sırasıyla KA/OK için -7.11 °C, LA/OK için -8.22 °C, MP/OK için -4.97 °C'lik negatif yönde fark ($-\Delta T$), ortam sıcaklığının azalmasıyla birlikte farklar KA/OK için 1.03 °C, LA/OK için 1.43 °C, MP/OK için 3.92 °C ile pozitif yönde farkla ($+\Delta T$) değişmiştir.



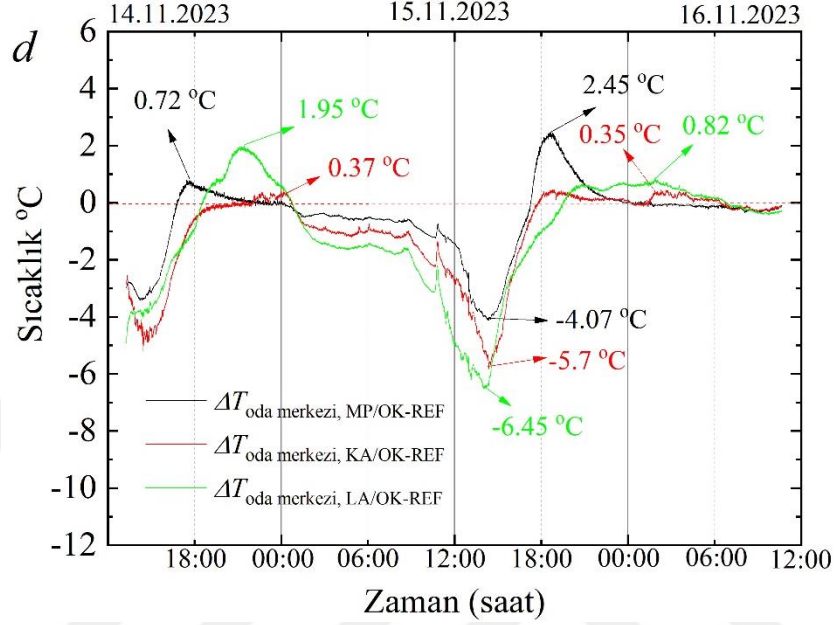
Şekil 63. Referans ve test odalarındaki üst yüzey sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Şekil 64' de ise sıcaklığın en yüksek olduğu zamanda test odasının referans odasına göre yakın yüzey sıcaklık farkları KA/OK için -7.26 °C, LA/OK için -7.76 °C, MP/OK için -4.54 °C olup, sıcaklığın azalmasıyla bu farklar sırasıyla 1.07 °C, 0.89 °C, 2.46 °C'ye pozitif yönde fark oluşmuştur.



Şekil 64. Referans ve test odalarındaki yakın yüzey sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Son olarak Şekil 65’de ise günün en sıcak saatlerinde referans ve test odalarının merkez sıcaklıkları arasındaki fark KA/OK için -5.7 °C, LA/OK için -6.45 °C, MP/OK için -4.07 °C iken, havanın soğumasıyla bu farklar sırasıyla 0.35 °C, 0.82°C, 2.45 °C olmuştur.



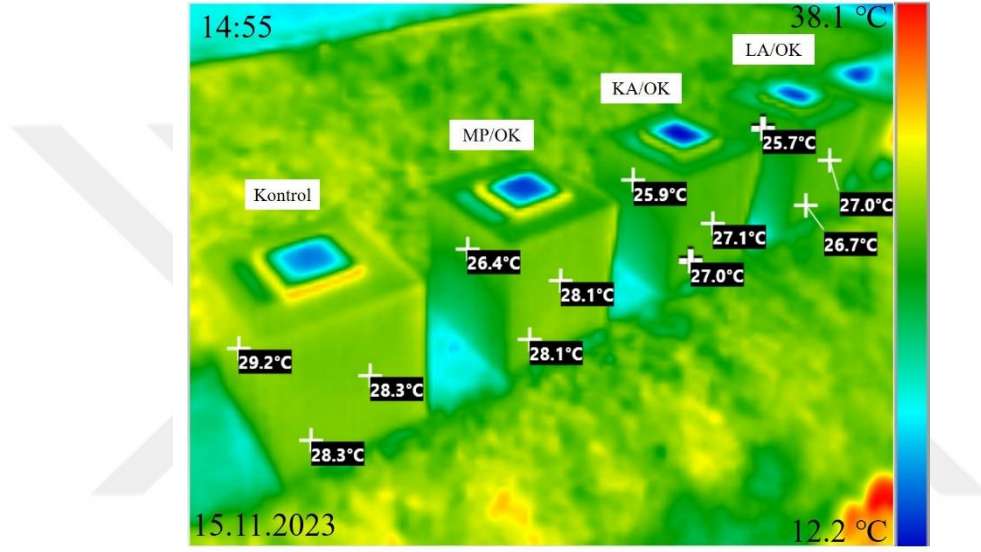
Şekil 65. Referans ve test odalarındaki oda merkezi sıcaklık farkları (14.11.2023-16.11.2023 tarihleri arasında)

Kurulan odalar incelendiğinde merkez sıcaklık farkları diğer yüzeylerdeki sıcaklık farklarına oranla daha az değişmiştir. Çevresel sıcaklık artarken referans malzemeye göre tüm yüzeylerde LA/OK daha fazla fark oluştururken, sıcaklığın azalmasıyla MP/OK bünyesinde daha fazla ısı depolayarak en yüksek sıcaklık farklarını ortaya çıkarmıştır.

Sıcaklık farkı grafiklerinden anlaşıldığı üzere, çevresel sıcaklık artarken FDM içerikli kompozitlerin bulunduğu test odaları referansa göre daha düşük sıcaklık gösterdiğinden negatif değerler alırken, sıcaklığın azalmasıyla referans odasına göre daha yüksek sıcaklıklar gösterip pozitif yönde fark oluşturmuştur. Bu durum sıcaklık artarken faz geçiş esnasında bünyesine ısı depolarken, sıcaklık azaldığında depoladığı ısıyı açığa çıkardığının bir sonucudur. FDM esaslı odun kompozit örnekleri bulunan test odasının sıcaklığı daha düşük olduğunda sıcaklık farkı değerlerinin negatif değerlere dönüştüğü düşünüldüğünde, FDM katkısının ısı depolama yeteneği ile sıcaklık azalma sürecinin 10:00'dan sonra ortam sıcaklığının artmasıyla gerçekleştiği anlaşılmaktadır. 20:00'den sonra, ortam sıcaklığının

azalmasıyla dikkate değer pozitif bir değer alan sıcaklık farkı değerlerinin, FDM katkısının ortam sıcaklığını artırmaya teşvik ettiği açıkça belirlenmiştir.

Deneyin bulguları, FDM'nin ahşap lifine entegre edilmesinin gün boyunca soğutma ihtiyaçlarını azaltma ve gece boyunca ısıtma taleplerini en aza indirme konusunda büyük potansiyel taşıdığını göstermektedir. Ayrıca, FDM esaslı odun kompozitleri tarafından kolaylaştırılan azalmış sıcaklık varyasyonlarının, bina ortamlarında termal konforu önemli ölçüde artırma potansiyeli bulunmaktadır.



Şekil 66. Referans ve test odalarının termal kamera görüntüleri.

FDM katkılı odun kompozitlerin bulunduğu test odalarının ve referans odasının termal kamera görüntüleri Şekil 66'da gösterilmiştir. Farklı renkler, yüzey sıcaklıklarını belirtmek için kullanılmış ve bu renkler yan taraftaki sıcaklık ölçeği ile ilişkilendirilmiştir. Renk skalasına göre, sarı ve turuncu tonlar daha sıcak bölgeleri, yeşil ve mavi tonlar ise daha serin alanları göstermektedir. En solda bulunan kontrol odası daha sıcak renklere sahip iken, soldaki KA/OK, LA/OK, MP/OK levhalarının bulunduğu test odaları nispeten daha serin tonlara sahiptir. Sıcaklığın en yüksek değerine (38.1 °C) ulaştığı an, test odası yüzey sıcaklıkları referans odasının altındadır. Termal kamera görüntülerinin termokupl ile yapılan ölçümlerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, güneş termoregülasyon performansı deneyi, kompozit içindeki FDM'nin çevreden fazla ısıyı etkili bir şekilde depoladığını ve ısı transferini çevreye engellediğini göstermiştir. Ayrıca, FDM tarafından depolanan ısı enerjisi, sıcaklık düştükçe çevreye salınmıştır.

3.5. Morfolojik Testlere Ait Bulgular

3.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Ait Bulgular

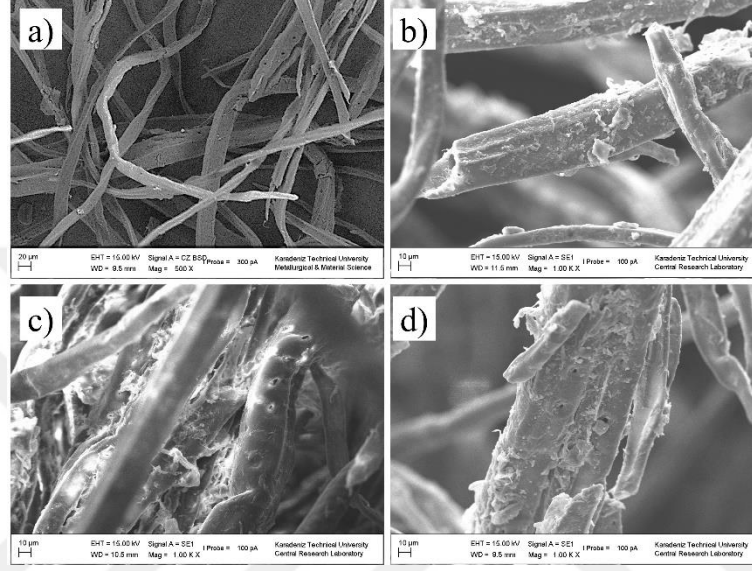
Tez kapsamında 3 farklı FDM ile emprenye edilip üretilen kompozitlerin ve saf odun lifinin mikro yapılarına dair SEM görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 67a'da saf odun lifinin Şekil 67b'de KA ile emprenye edilmiş odun lifinin, Şekil 67c'de LA ile emprenye edilmiş odun lifinin, Şekil 67d' de ise MP ile emprenye edilmiş odun lifine ait SEM görüntüleri verilmiştir.

Tez kapsamında üretilen odun lifi ve FDM birleşiminden oluşan kompozit FDM'lerin mikroyapıları verilmiştir ve bunlardan görüldüğü gibi FDM kompozitlerinin yüzey morfolojileri emprenye işleminden sonra farklılaşmıştır ve lifler üzeri ve gözeneklerin büyük bir kısmı FDM'lerce kaplanmıştır. Yüksek büyütme görüntüde, matristeki liflerin yüzeylerinde kaplanmış olan FDM'ler açıkça görülebilmektedir. Bu, 3 farklı FDM'nin hücre çeperleri tarafından emildiğini ve dolayısıyla mevcut gözenekli boşlukları doldurduğunu ve formca stabilize bir bileşik oluşturduğunu göstermektedir. Üç bileşimin lif yüzeyleri arasında hiçbir fark gözlemlenmemiştir. Hepsinin ortak bir faktörü vardır: FDM'lerin gözenekli liflerin hücre çeperleri tarafından emilmiş olduğu görünmektedir. Bu durum, FDMOK'ların vakumla emprenye yöntemi ile başarılı bir şekilde üretildiğini gösterir

Ayrıca, kompozit numunelere analizler sırasında sıcaklık artışına neden olan yüksek voltaj altında elektron ışını uygulanmış olmasına rağmen, kapiller/yüzey gerilim kuvvetlerinin tüm matris içerisindeki yapısal direncinden dolayı ikinci bir faz olarak herhangi bir sıvı faz tespit edilmemiştir. Bu sonuçlar odun lifleri ile FDM'ler arasında çok iyi bir fiziksel uyumluluğun varlığını kanıtlamaktadır. Bu yüksek uyumluluk sayesinde bu kompozitler GID uygulamalarında FDM sızıntı problemi olmaksızın doğrudan yapı elemanları ile kullanılabilir.

Bu çalışmada elde edilen SEM görüntülerine benzer sonuçlar çeşitli araştırmacılar tarafından da tespit edilmiştir. Sarı vd. (2020) odun liflerine CA-SA ötektik karışımının emprenye edilmesiyle formca kararlı kompozitler üretmişlerdir. SEM görüntülerine baktığımızda mikro yapısından gözlemlendiği üzere, erimiş durumdaki ötektik karışım hem lif demetleri arasındaki yüzeye hem de boşluklara başarıyla emprenye edildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca bileşenler arasındaki hidrojen bağ çekimi ve kapiler/yüzey gerilimi kuvvetleri sayesinde, tüm yapı FDM'nin kompozit yüzeyinden sızmasını önleyebildiğini

belirtmişlerdir. Liang vd. (2018) odun ununa yağ asitleri emprenye edildikten sonra kompozit form-stabil FDM'lerin SEM görüntülerini incelemiştir. Elde edilen SEM görüntülerinde matris yüzeylerinin ve aradaki boşlukların FDM ile kaplandığı gözlemlenmiştir, bu da kullanılan yağ asitlerinin başarılı bir şekilde emildiğini bildirmişlerdir.



Şekil 67. SEM görüntüleri (a) Saf odun lifi (b) KA emprenyeli odun lifi (c) LA emprenyeli odun lifi (d) MP emprenyeli odun lifi

3.6. Akustik Testlere Ait Bulgular

3.6.1. Ses Yutum Katsayısı ve Ses İletim Kaybı Değerlerine Ait Bulgular

Sesi oluşturan dalgaların 1 saniyedeki sayısı frekans (f) olarak adlandırılır, birimi Hertz (Hz) dir. İnsan kulağı 16 ile 20.000 Hz. arasında olan sesleri duyabilir. 1,000-4,000 Hz frekans en hassas olduğu aralıktır. Dolayısıyla, tez kapsamında üretilen odun kompozit levhalarının ses geçiş kaybı ve ses iletim katsayısı değerleri bu bağlamda değerlendirilmesi gerekmektedir.

Ses yutumu için gözenekli malzemeler, ses yalıtımı için ise yansıtıcı ve özellikle masif malzemeler kullanıldığında etkili sonuçlar elde edilebilir (Kocatepe vd., 2018). Genellikle havayı geçiren bir malzeme sesi de geçirebilmektedir. Ancak ses yutum performansı iyi olan bir malzemenin sesi yalıtım performansının da iyi olması mümkün değildir. Bundan dolayı, ses yutumu yüksek olan bir malzeme düşük yoğunluklu olup yüksek hava geçirime

özelliktir (Erol vd., 2018). Sandviç yapıda bir materyalin merkez katmanına yutum özelliği yüksek bir malzeme kullanılması durumunda yalıtım özelliği önemli oranda yükselecektir. Genellikle gözenekli ve kalın bir malzemenin ses yutumu performansı yüksek olup hava geçirimli olduğundan ses iletim kaybı düşüktür (Pasayev ve Erol, 2018). Malzemenin yoğunluğu, herhangi bir malzemenin ses emilimini etkileyen önemli faktörlerden biri olarak kabul edilir. Numunenin yoğunluğu arttıkça, orta ve yüksek frekansta ses emilim değeri artar (Koizumi vd., 2002). Görünür yoğunluk büyük olduğunda birim alan başına lif sayısı artar. Yüzey sürtünmesi arttıkça enerji kaybı da artar, bu nedenle ses emme katsayısı artar. Daha az yoğun ve daha açık yapılar düşük frekanslı sesleri (500 Hz) emer. Daha yoğun yapılar ise 2000 Hz'in üzerindeki frekanslar için daha iyi performans gösterir. Gözenekli malzemelerde ses emilimi üzerine yapılan çeşitli çalışmalar, düşük frekanslı ses emiliminin kalınlıkla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. (İbrahim ve Melik, 1978), malzeme kalınlaştıkça sadece düşük frekanslarda ses emiliminin arttığını göstermiştir. Ancak, yüksek frekanslarda kalınlığın ses emilimi üzerinde önemli bir etkisi yoktur.

Ses yutum kapasitesini etkileyen bir diğer önemli unsur, bağlayıcı maddedir. Bağlayıcının belirli bir seviyeye kadar artırılması, ses yutumunu artırırken, yapının sert ve kırılgan hale gelmesi durumunda ses yutumu azalır ve yansıtma artar (Demiryürek ve Aydemir, 2016). Ayrıca, kullanılan bağlayıcının türüne göre malzemenin özellikleri değişebilir. Suda çözünebilir bağlayıcıların tercih edilmesi, ses yutma performansını artırmaktadır (Stanciu, 2012).

Tez kapsamında üretilen izolasyon levhalarının ses yutum katsayısı ve ses iletim kaybına ilişkin değerler sırasıyla Tablo 21 ve 22'de verilmiştir.

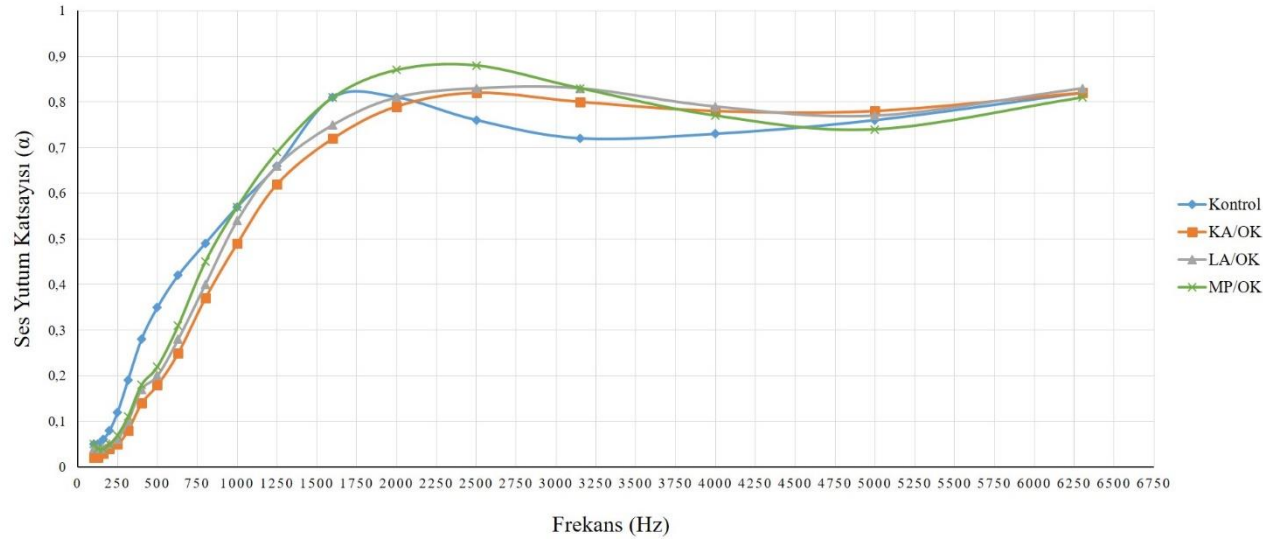
Şekil 68, kontrol ve test numunelerinin 100 Hz'den 6300 Hz'e kadar olan frekans aralığındaki ses yutma değerlerinin dağılımını göstermektedir. Genel olarak, α değerleri 0.02 ile 0.88 arasında değişmekte olup, bu değişim çoğunlukla frekans varyasyonu ile ilişkilidir. FDM'nin varlığına veya yokluğuna bağlı olarak her frekans bandı için farklı desenler göstermiştir. Düşük frekanslarda, kontrol örneğinin ses emme katsayısı, KA/OK, LA/OK, MP/OK 'nin ses emme katsayısından daha yüksektir. Ancak, 1600 ila 4500 Hz arasındaki daha yüksek frekanslarda bu eğilim tersine dönmekte ve FDM içerikli kompozitler kontrol örneğinden daha yüksek emme katsayısı göstererek bu eğilim tersine dönmüştür. En yüksek ses emme katsayısına 2500 Hz'de 0,88 emme katsayısı ile MP/OK, 0,83 ile LA/OK, 0,82 ile KA/OK ulaştığı gözlemlenmiştir. Kontrol örneği ise daha düşük frekans noktası olan 1600

hz'de 0,81 emme katsayısı ile ulaşmıştır. FDM katkılı levhalar kontrol örneğine göre ses emme katsayıları biraz daha yüksek çıkmıştır. Verilerden de görüldüğü üzere en büyük farkı MP/OK levhasına ait numuneler göstermiştir. FDM içeren odun kompoziti levhaların ses emme katsayılarının kontrol levhasına göre daha yüksek çıkmasının birkaç muhtemel nedeni olabilir: FDM'nin kompozit yapıya eklenmesiyle malzemenin iç yapısında mikro boşluklar veya daha fazla gözenek oluşmuş olabilir. Bu mikro boşluklar ve gözenekler, ses dalgalarının içine girerek emilmesine ve yutulmasına katkıda bulunur, bu da ses emme katsayısını artırır. FDM'ler, belirli bir sıcaklıkta katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçerken enerjiyi absorbe eder. Bu faz değişim sürecinde, FDM'nin ses dalgalarının enerjisini absorbe edebilme kapasitesi de artabilir, dolayısıyla daha fazla ses emme sağlanabilir. FDM katkısı, levhaların elastikiyet ve diğer mekanik özelliklerini değiştirebilir. Daha esnek veya titreşim emici özelliklere sahip levhalar, ses emme performansında artış sağlayabilir.

Herhangi bir malzeme sesi emebilir; fark, emme kapasitelerinin büyük ölçüde değişmesidir. Ses emici malzemeler, büyük ölçüde gözenekliliklerine bağlıdır. Emici malzemelerin etkinliğini belirtmenin standart yolu, emilim katsayısı ile ölçülür. Bu katsayı, 0 ile 1.0 arasında değişir; 0, tamamen emici olmayan bir malzemeyi, 1.0 ise yüzde 100 emici bir malzemeyi temsil eder. Tüm malzemeler belirli frekanslarda diğer frekanslara göre daha fazla ses emdiği için, emilim katsayısı değerleri frekansın bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Şekil 68'e baktığımızda, tüm gruplar yaklaşık 750 Hz'den başlayan frekanslarda 0.5'in üzerinde bir emilim katsayısına sahip olduğu için emici olarak değerlendirilebilir. Kontrol ve üç farklı FDM kompozit grubunun tüm malzemeleri, benzer bir şekilde ses emici olarak çalışmaktadır; numuneler, 700 ile 6300 Hz frekans bandında 0.5'in üzerinde bir katsayı değeri ile birbirlerinden önemli ölçüde farklılık göstermezler. Ayrıca numunelerin çoğunda, en yüksek ses emme değerleri yaşam gürültüsü frekans bandına benzer olan orta frekans bandında gözlemlenmiştir. Orta frekans, yaşam gürültüsüne benzerdir (Choi vd., 2022) ve ses emiliminin özellikle önemli olduğu bir alandır. Gerçek yaşam senaryolarında, bu frekans aralığında yüksek bir ses emilim katsayısı sergileyen malzemeler, akustik konforu önemli ölçüde artırabilir. Bunun nedeni, konuşma, televizyon sesleri ve genel arka plan gürültüsü gibi yaygın ev içi gürültüleri etkili bir şekilde azaltabilmeleridir, bu da daha sessiz ve daha rahat bir yaşam ortamı sağlar. Bu frekanslardaki yüksek ses emilimi, yankı ve yankılanmayı azaltarak alanların daha huzurlu ve akustik olarak dengeli olmasına yardımcı olur.

Tablo 21. FDM esasl kompozitlere ait ses yutum katsayısı değerleri

Levha Türü	Frekans (Hz)																		
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Kontrol	0.05	0.05	0.06	0.08	0.12	0.19	0.28	0.35	0.42	0.49	0.57	0.66	0.81	0.81	0.76	0.72	0.73	0.76	0.82
KA/OK	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.08	0.14	0.18	0.25	0.37	0.49	0.62	0.72	0.79	0.82	0.80	0.78	0.78	0.82
LA/OK	0.04	0.04	0.04	0.05	0.06	0.1	0.17	0.2	0.28	0.4	0.54	0.66	0.75	0.81	0.83	0.83	0.79	0.77	0.83
MP/OK	0.05	0.04	0.04	0.05	0.07	0.11	0.18	0.22	0.31	0.45	0.57	0.69	0.81	0.87	0.88	0.83	0.77	0.74	0.81



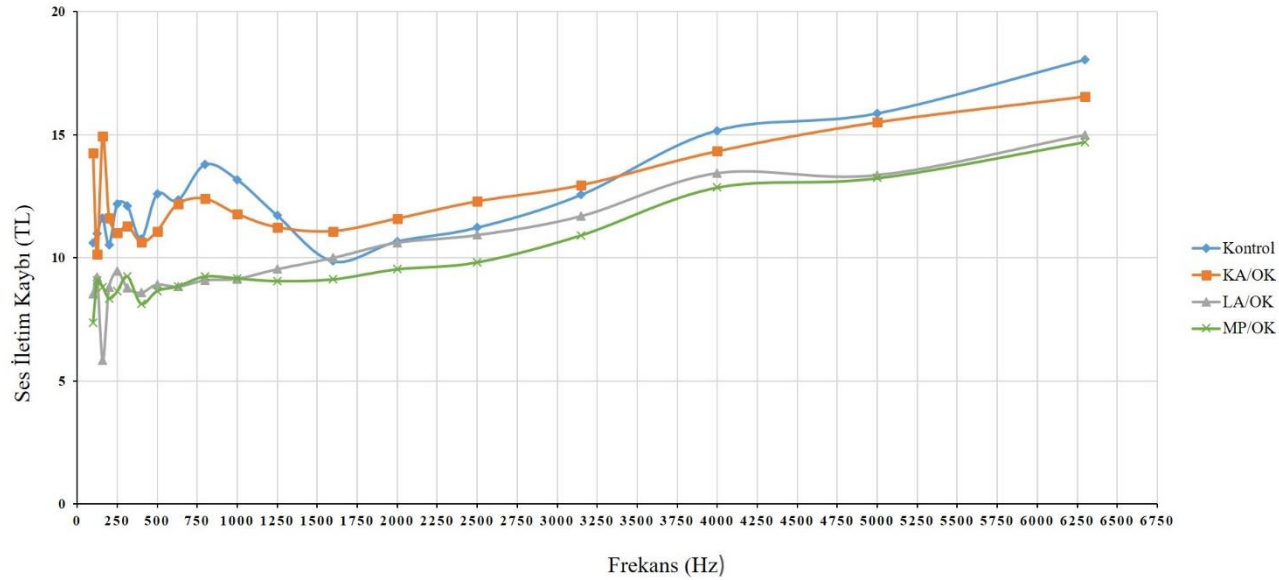
Şekil 68. FDM esasl odun kompozitlerin ses yutum katsayısı değerleri grafiği

Ses iletim kaybı (Transmission Loss - TL) testi, bir malzemenin veya yapının ses geçirmezlik performansını değerlendirmek için kullanılır. Bu test, malzemenin bir yüzeyine gelen ses enerjisinin ne kadarının diğer tarafa geçmediğini ve ne kadarının yansıtıldığını veya emildiğini ölçer. Testin sonuçları, belirli frekans aralıklarında dB cinsinden ifade edilen bir TL değeri olarak sunulur.

100 ile 6300 Hz arası ses iletim spektrumları Şekil 69'da sunulmuştur. TL değeri, frekansa bağlı olarak değişebilir. Genellikle, düşük frekanslı (bas) seslerin iletimini engellemek zor olabilir, bu nedenle malzemenin TL değeri düşük frekanslarda daha düşük olabilir. Ancak, yüksek frekanslarda TL değeri genellikle artar. Şekil 69'a baktığımızda frekans değeri arttıkça TL değerleri her ürün grubu için artış göstermiştir. Daha yüksek TL değerleri, malzemenin daha iyi ses yalıtımı sağladığını gösterir. Diğer bir ifadeyle yüksek TL değerleri, sesin bir bölgeden diğerine geçişini engelleyerek daha sessiz ve daha konforlu bir yaşam veya çalışma ortamı sağlar. Tablo 22'de frekans noktalarına göre ses iletim kaybı değerlerini değerlendirdiğimizde ise, 1600-3150 Hz arası KA/OK kompozitine ait numunelerin ses iletim değerleri diğer kompozit numunelerine göre daha yüksek TL değerlerine sahip iken, 3150-6300 Hz arası bu eğilim değişerek kontrol levhasına ait numunelerin ses iletim kaybı değerleri FDM esaslı kompozit numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır. Bunun birkaç olası sebebi vardır. Bunlardan birincisi malzeme yoğunluğudur. Önceden bahsettiğimiz yoğunluk dağılım grafiğine göre kontrol levhalarının yoğunluğu FDM esaslı levhalara göre daha yüksek çıkmıştır. Yüksek yoğunluklu malzemeler, genellikle ses dalgalarının geçişini daha fazla engeller ve bu da ses iletim kaybını artırır. FDM esaslı kompozitler ise daha hafif ve daha düşük yoğunluklu olduğundan dolayı, bu da sesin daha kolay iletilmesine neden olmuştur. Bir diğeri, gözenek yapısı ve hava boşluklarıdır. FDM esaslı kompozit malzemelerde, kullanılan katkı maddelerinin (örneğin, FDM veya diğer bileşenler) içyapısında mikro gözenekler veya hava boşlukları olabilir. Bu boşluklar, ses dalgalarının malzeme boyunca yayılmasına neden olur ve bu da ses iletim kaybının azalmasına yol açar. Ayrıca, FDM esaslı kompozitlerin elastik özellikleri kontrol levhasına göre farklılık göstermektedir. Elastik veya daha esnek malzemeler, ses dalgalarını absorbe etmek yerine geçirme eğiliminde olduğundan dolayı, bu da ses iletim kaybını azaltır. Kontrol levhası ise daha rijit bir yapıda olduğundan daha yüksek bir ses iletim kaybı sağlamaktadır.

Tablo 22. FDM esaslı kompozitlere ait ses iletim kaybı değerleri

Levha Türü	Frekans (Hz)																		
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300
Kontrol	10.61	10.99	11.61	10.53	12.2	12.11	10.78	12.6	12.34	13.79	13.18	11.73	9.87	10.67	11.23	12.56	15.17	15.86	18.04
KA/OK	14.25	10.14	14.94	11.63	11.01	11.30	10.63	11.08	12.19	12.40	11.78	11.24	11.08	11.59	12.29	12.95	14.33	15.51	16.56
LA/OK	8.55	9.22	5.85	8.81	9.47	8.78	8.58	8.92	8.83	9.09	9.15	9.54	10	10.62	10.93	11.7	13.45	13.37	15.01
MP/OK	7.37	9.07	8.82	8.36	8.64	9.25	8.14	8.66	8.85	9.25	9.17	9.06	9.13	9.54	9.82	10.92	12.86	13.24	14.71



Şekil 69. FDM esaslı odun kompozitlerin ses iletim kaybı değerleri grafiği

Yapılan literatür çalışması sonucunda FDM esaslı kompozitlerin empedans tüpü deneyi ile akustik özelliklerinin araştırılması yok denecek kadar az olmakla birlikte tez kapsamında üretilen FDM esaslı kompozitlerin akustik özellikleri, ticari olarak mevcut akustik panellerle, yani ahşap yünü yapı levhaları ve düşük yoğunluklu yonga levhaları ile karşılaştırılabilir düzeydedir.

Akustik uygulamalar için yaygın olarak kullanılan panel ürünlerinden bazıları, ahşap yünü yapı levhası ve düşük yoğunluklu yonga levhadır. Bununla birlikte, lif levhalar, verimli bir akustik panel ürünü olma potansiyeline sahiptir. Yapılan bir çalışmada, farklı yoğunluklarda üretilmiş lif levhalardan düşük yoğunluklu lif levhaların daha iyi ses emilimi sağladığı ve yoğunluk arttıkça ses emiliminin azaldığı gözlemlenmiştir. En düşük yoğunluğa (220 kg/m^3) sahip yonga levha için 4000 Hz frekansta maksimum ses emilim katsayısı olan 0.66 gözlemlenmiştir. Düşük frekanslarda (125 Hz) ise, yoğunluğa bakılmaksızın tüm örneklerde daha düşük ses emilim katsayısı gözlemlenmiştir. Ses emilim katsayısında en büyük artış 1000 Hz ile 2000 Hz frekansları arasında gözlemlenmiştir (Nandanwar vd., 2017).

Kim vd. (2015), ahşap ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) kompozitlerinin ses iletim özelliklerini incelemiş ve mineral dolguların bu özellikler üzerindeki etkilerini belirlemiştir. Araştırmaları, mineral dolguların kompozitlerin akustik performansını, özellikle ses iletim ve emilim özelliklerini nasıl etkilediğine odaklanmıştır. Bu araştırma, çeşitli uygulamalar için kompozit malzemelerin daha iyi akustik performans için nasıl optimize edilebileceğini anlamak açısından değerlidir.

Özetle, analiz edilen FDM esaslı odun kompozit numuneler, inşaatta kullanılan yaygın emici malzemelerle karşılaştırıldığında akustik özellikler açısından rekabetçi bir davranış sergilemektedir.

3.7. Biyolojik Testlere Ait Bulgular

3.7.1. Termit Testine Ait Bulgular

Termitlerin odun tüketimini etkileyen unsurlar oldukça çeşitlidir. Bu unsurların başlıcaları arasında, odunun türü ve yoğunluğu, içerdiği toksik bileşenler, inhibitörler veya caydırıcı maddeler, mantarların varlığı veya yokluğu ile mantar kaynaklı bozulma düzeyi, odunun ve toprağın nem oranı gibi faktörler yer almaktadır (Smythe ve Williams, 1972;

Nagnan ve Clement, 1990). Ayrıca, odun yoğunluğu ile termitlere karşı gösterilen direnç arasındaki ilişki, daha önceki araştırmalarda da ele alınmış ve bildirilmiştir (Beal vd., 1979; França vd., 2016).

FDM emprenye edilmiş odun biyo-kompozitlerin termit testi etkinliği *Reticulitermes lucifugus* termitleri kullanılarak araştırılmış olup sonuçlar Tablo 23’de verilmiştir.

Tablo 23. Termit testi sonuçları

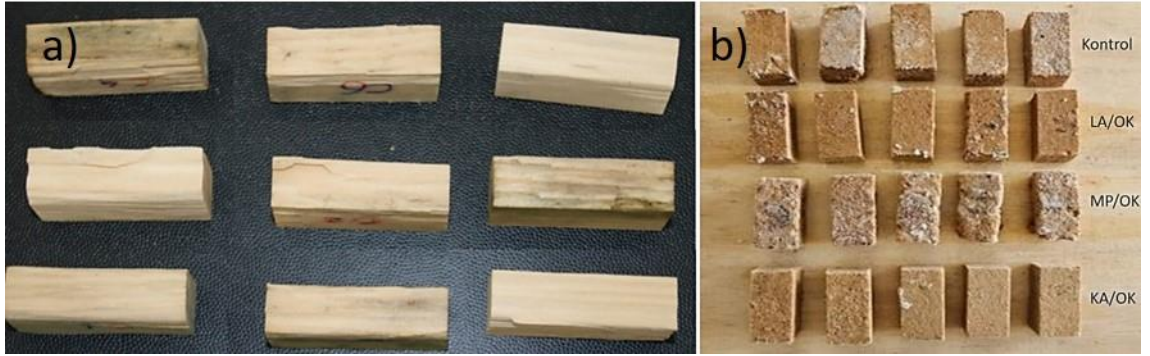
Varyasyon	Atak ortalaması	Tekrar sayısı	Termit ölüm oranı (%)
Sarıçam Kontrol	4	3	28
OK Kontrol	0	5	100
KA/OK	0	5	100
LA/OK	0	5	100
MP/OK	0	5	100

Termit testinin dördüncü haftasının sonunda test gruplarında termit zararı oluşmamıştır. Test süresince mineral ortamda olan termitler kanal açarak olabildiğince test örneklerinden uzak kalmış ve canlılıklarını yitirmişlerdir. İşlenmemiş masif odun örneklerinde ise test sonrasında bile termitler oldukça aktif ve canlı kalmış, kontrol örnekleri yüksek miktarda tahrip olmuştur. Ayrıca kontrol örneği termitleri 5 hafta boyunca canlılıklarını koruduğundan ve kontrol örneklerindeki termitlerin hayatta kalma oranı %50'nin üzerinde olduğu için standarda göre geçerli sayılmaktadır. Diğer taraftan FDM esaslı örneklerin bulunduğu kaplardaki termitlerin canlılık süreçleri ve atak ortalamaları tabloda verilmiştir. Test sonuçları, FDM esaslı kompozitlerin ve kontrol kompozitinin termit saldırısına karşı duyarlı olmadığını, yani malzemenin dayanıklı olduğunu, oysa sarıçam kontrol örneklerinin dayanıklı olmadığını doğrulamıştır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta hem FDM içeren kompozitlerin hem de içermeyen kontrol kompozitlerinin termitlere karşı aynı derecede duyarlılık göstermesidir. Yani FDM katkısının termit saldırısına bir etkisi olmadığı, kullanılan nişasta tutkalının etkisi olduğu düşünülmektedir. Bunun sebebi ise; kompozitleri bağlamada kullanılan nişasta tutkalının modifikasyonunda kullanılan sitrik asit olduğu düşünülmektedir. Çünkü, termitler asidik ortamlarda yaşamaya uygun değildirler. Çoğu termit türü, nötr veya hafif alkali pH seviyelerinde daha iyi yaşar ve gelişir. Termitlerin besin kaynağı olan selüloz, genellikle ahşapta bulunur ve bu malzemenin doğal

pH seviyesi genellikle nötrdür. Termitlerin sindirim sistemi de nötr veya hafif alkali bir ortamda en iyi şekilde çalışır.

Asidik bir ortam, termitlerin yaşam koşullarını zorlaştırabilir ve sindirim enzimlerinin etkinliğini azaltarak besinlerini sindirmelerini zorlaştırabilir. Bu nedenle, asidik bir ortam termitler için genellikle elverişsizdir ve onları uzaklaştırabilir veya öldürebilir (Husseneder, 2010; Arora vd., 2022).

Şekil 70a ve 70b'de, testin sonunda işlenmemiş kontrol örneklerinin ve FDM kompozitlerinin görüntüleri yer almaktadır. Şekil 70a'daki kontrol örneklerinde termitlerin bozulduğuna dair işaretler varken, Şekil 70b'deki FDM ile emprenye edilmiş örneklerde hiçbir işaret görülmemektedir.



Şekil 70. Termit testlerinin sonunda (a) işlenmemiş kontrol örnekleri ve (b) FDM emprenyeli odun kompozit örnekleri

Sonuç olarak yağ asitleriyle emprenye edilerek üretilen odun kompozitlerinin ve kontrol kompozitlerinin *Reticulitermes lucifugus* termitine karşı direnç göstermiştir. Testlerin geçerliliği, işlem görmemiş çam kontrol numunelerinin maruz kaldığı şiddetli saldırılarla doğrulanmıştır. İşlem görmemiş numuneler testin sonuna kadar kaplarda tutulmuş ve 4. dereceye kadar saldırıya uğramışlardır.

3.7.2. Küf Testine Ait Bulgular

Küf büyümesi ve mikotoksin salınımı ile ilgili sağlık sorunları, binalardaki sakinleri etkiler (Shelton vd., 2002) ve bu durum, malzeme seçimi ve yaşam ortamının önemini vurgular. Bu durum, enerji depolama amacıyla biyolojik esaslı bina kabuklarında BFDM'lerin kullanıldığı durumlarda daha da önem kazanmaktadır. Küf testi, işlenmemiş örnekler ile FDM ile emprenye edilmiş kompozitleri küf büyümesi ve renk değişimi

açısından incelemek ve karşılaştırmak amacıyla yapılmıştır. Seçilen küf mantarları çok yaygın olup çam ve ladin üzerinde iyi büyürler. Laboratuvar testi, seçilen mantarların büyümesi için optimal sıcaklık ve bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Bir diğer amaç, laboratuvar testini, uygulamada renk değişimi sürecinin hızlandırılmış bir öngörüsü olarak değerlendirmektir. Test mantarlarının ortalama büyümesi Tablo 24'te gösterilmiştir.

Tablo 24. Küf testine ait sonuçlar

Varyasyon	2 hafta	4 hafta	6 hafta	8 hafta
Sarıçam Kontrol	4	4	4	5
OK Kontrol	3	3	3	4
KA/OK	2	3	3	4
LA/OK	1	1	1	2
MP/OK	5	-	-	-

Sonuçlar, EN 350:2016 standardına göre dayanıklılık sınıfı olarak aşağıda ifade edilmiştir. Tablo 24'ten de görüldüğü üzere, işlenmemiş masif odun örnekleri ile kontrol kompozit örnekleri ve 3 farklı FDM içeren kompozit örneklerinin küf büyümesine karşı farklılıklar göstermiştir. 8 haftalık küf maruziyetinden sonra, işlenmemiş çam örneği küf gelişimine karşı duyarlıdır ve 5. seviyeye ulaşmıştır; küf gelişimine olan bu duyarlılık, ahşap yüzeyinde bulunan glikoz, fruktoz ve sakkaroz gibi düşük moleküler ağırlıklı şekerlerin miktarıyla ilişkili olabilir. Kontrol levha grubuna ait örnekler ile KA/OK grubuna ait örnekler benzer küf gelişimi gösterip 4.seviyeye ulaşmışlardır. LA/OK grubuna ait örnekler küf gelişimine karşı en düşük hassasiyete sahip olarak 8 hafta sonunda 2.seviyeye ulaşmışlardır. MP/OK grubu örneklerinde ise 2 haftalık maruziyetten sonra 5 derece küf büyümesi gösterdikten sonra örnekte kırılma meydana geldiği için diğer haftalar dikkate alınmamıştır. Elde edilen bulgulara göre, odun lifine FDM emprenye edilmesi, büyüme oranları üzerinde bazı etkiler yapmıştır. KA/OK ve kontrol kompozit örneği aynı etki derecesine sahip iken, LA/OK çok düşük, MP/OK ise yüksek duyarlılık göstermiştir. Bunun sebebi; bu üç farklı yağ asitlerinden kaprik asit ve lauril alkol kimyasal yapıları ve özellikleri bakımından antimikrobiyal özelliklere sahip olmasını söyleyebiliriz. Metil palmitat da ise böyle bir özellik yoktur.

BFDM'ler genellikle çeşitli şekil ve malzemelerde kapsüllenmiş olmasına rağmen, her zaman iç mekan ortamlarında kullanılırlar ve bu nedenle kompozitlerin biyolojik bozulma

ve degradasyona duyarlılığı her zaman dikkate alınmalıdır. Bildiğimiz kadarıyla, BFDM malzemelerinin küf/reng değişimine karşı uzun vadeli dayanımını araştıran çalışmalar yapılmamıştır. Bu çalışmada kullanılan BFDM'nin bileşenleri, yani yağ asitleri, küf mantarları tarafından örnek yüzeyinde bulunan mevcut karbonhidratlar gibi besin olarak kullanılmaktadır. Odun lifleri, BFDM ile emprenye edildikten sonra, yüzey küf büyümesi için zenginleştirilmiş ve uygun hale gelmiştir. Küf duyarlılığı testi, küflerin görünümü ve büyümesinin kritik nem ve sıcaklık seviyeleriyle ilişkili olduğunu göstermiştir. BFDM, ahşapta su itici bir formülasyon olarak rol oynayabilir ve nem emilimini geciktirebilir, ancak tamamen önleyemez. İç mekan ortamında yaygın olarak bulunan hava kaynaklı mantar cinslerinin *Cladosporium* spp., *Penicillium* spp., *Aspergillus* spp. ve spor oluşturmeyen küfler (Hunter vd., 1988; Shelton vd., 2002), nemin mevcudiyeti ile sınırlıdır. Bu nedenle, odun lifi /BFDM kompozitlerindeki küf renk değişimi, emprenye edilmemiş ahşaba göre daha düşüktür; bu tür ahşap ise yaygın olarak bina yapımında kullanılmaktadır.

Bazı araştırmacılar, FDM ile emprenye edilmiş ahşabın doğal çürüme etmenlerine karşı davranışlarına odaklanmıştır. Palanti vd. (2022), dört farklı Bio-FDM (kaprik asit, metil palmitat, lauril alkol ve hindistancevizi yağı yağ asitleri ile linoleik asit karışımı) ile emprenye edilen sarıçam ahşabının biyolojik bozulmaya karşı direncini, termitler, böcekler ve küf mantarlarına karşı incelemiştir. Biyolojik testler, BFDM'lerin yeni çıkmış termit larvalarına karşı direnç gösterdiğini ortaya koymuştur. Değerlendirilen BFDM'ler, küf mantarları tarafından neden olunan renk değişimini engellememiştir. Ayrıca, küf büyümesi doğrudan nem ve sıcaklık seviyeleri ile ilişkili bulunmuştur. Benzer şekilde, Nazari vd. (2022a), üç farklı termal olarak geliştirilmiş ahşap türünün (sarıçam, kayın ve ladin) bir hindistancevizi yağı ve linoleik asit karışımı içeren FDM ile termal davranışını ve küf kaynaklı renk değişimine olan potansiyel hassasiyetini değerlendirmiştir. Küf hassasiyeti testleri, ahşap/FDM numunelerinin, işlenmemiş ahşaba kıyasla küf kaynaklı renk değişimine daha az duyarlılık gösterdiğini ortaya koymuştur

Literatür incelendiğinde, FDM'lerin masif ahşapta biyolojik istilacı organizmalara karşı direncini araştıran çalışmalar bulunmasına rağmen, FDM-odun lifi kompozitlerinin bu organizmalara karşı direncini inceleyen herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen termit ve küf testleri, literatürdeki bu boşluğu doldurması açısından büyük önem taşımaktadır.

4. SONUÇLAR

“Binalarda Termal Enerji Depolamak Amacıyla Faz Değiştiren Maddelerin Odun Kompozitlerinde Kullanımı” başlıklı yürütülen tez çalışması kapsamında, binalarda enerji verimliliğini artırmak ve sürdürülebilirliği teşvik etmek amacıyla soğutma ve ısıtma için gereken enerji talebini azaltacak yenilikçi odun biyo-kompozit malzemelerin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda, biyo-kaynaklı 3 farklı FDM, gözenek ve destek malzemesi olarak odun liflerine emprenye edilmiş, ardından üretilen nişasta tutkalı ile bağlanarak formca kararlı FDM odun biyo-kompozitleri oluşturulmuştur. Üretilen kompozitlerin fiziksel, kimyasal, mekaniksel, biyolojik ve termal testleri yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen temel bulgular şu şekilde özetlenebilir:

1) Farklı oranlarda hazırlanan odun kompozitlerinin sızdırma testleri sonucunda, maksimum FDM yükleme oranları belirlenmiştir. Üç farklı FDM için bu değer kütlece %40 olarak tespit edilmiştir. Bu oranların üzerinde FDM yüklemesi yapıldığında filtre kağıtlarında FDM sızıntısı gözlemlenirken, %40 ve altında yapılan yüklemelerde sızıntı tespit edilmemiştir. Sonuç olarak, FDM sızıntısı tespit edilmeyen ve en yüksek FDM oranına sahip odun ön-kompozitleri, formca kararlı kompozit FDM (FKK-FDM) olarak kabul edilmiştir.

2) Yapılan su alma ve kalınlık artışı testlerinde FDM katkılı levhalar, kontrol levhasına kıyasla üstün performans sergilemiş, özellikle MP katkılı levhalar suya karşı en dirençli grup olmuştur. Bu levhalar, hem düşük su alma oranı hem de minimal kalınlık artışı ile boyutsal stabilitelerini koruyarak, yapı malzemesi olarak kullanılabilirliklerini artırmıştır. Bu sonuçlar, FDM katkısının lif levhaların suya dayanıklılığını ve boyutsal kararlılığını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla, FDM katkılı levhalar, suya maruz kalan yapı uygulamalarında güvenilir ve dayanıklı bir alternatif olarak değerlendirilebilir.

3) Üretilen levhaların yoğunluk dağılım profillerine bakılmıştır. FDM katkılı kompozitler lineer bir profil sergilerken kontrol kompozit levhası biraz daha U tipi bir profil sergilemiştir. Başka bir deyişle, FDM katkılı kompozitler, kontrol levhasına kıyasla daha lineer bir yoğunluk profili sergilemiştir. Sonuç olarak, bu tez kapsamında üretilen FDM katkılı odun kompozitlerinin yoğunluk dağılım grafiği, piyasada yaygın olarak üretilen ticari MDF panelleri ve yalıtım levhalarıyla önemli bir benzerlik göstermektedir. Üretilen FDM katkılı kompozitlerin bu ticari ürünlerle benzer özellikler göstermesi, geliştirilen

malzemenin hem iç hem de dış mekan kullanımları için potansiyel olarak uygun olabileceğine işaret etmektedir.

4) 3 farklı FDM ile üretilen formca kararlı odun kompozitlerinin kimyasal yapıları FTIR analizleri ile karakterize edilmiştir. Sonuç olarak, FDM bazlı ahşap kompozitlerinin FTIR spektrumlarında, bileşenlere ait ana karakteristik bantlar belirgin bir kayma olmadan tespit edilmiş ve yeni bant oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu bulgular, kompozit bileşenleri arasında yalnızca fiziksel etkileşimlerin gerçekleştiğini ve kimyasal özelliklerini koruduğunu göstermektedir.

5) Üretilen kompozitlerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için iç bağlanma ve basınç direnci testi uygulanmıştır. Her iki teste göre mekanik dayanımı en yüksek MP/OK grubuna ait çıkmakla birlikte diğer test gruplarına ait sonuçlar ilgili standartlar ve piyasadaki diğer yalıtım malzemeleriyle eş değer sonuçlar vermiştir. Bu bulgular, FDM katkılı kompozitlerin, binalarda kullanılmak için yeterli mekanik dayanımı sağlayarak özellikle yapı sektöründe güvenilir bir alternatif olabileceğini ortaya koymaktadır.

6) FDM esaslı odun kompozitlerinin termal iletkenlik katsayıları 0,0943 ila 0,1384 W/m °K değerleri arasında olduğu tespit edilmiştir. En yüksek ısı iletkenlik katsayısı, metil palmitat (MP) katkılı odun kompozitinde tespit edilirken, en düşük ısı iletkenlik katsayısı ise lauril alkol (LA) ile üretilen odun kompozitinde gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, literatürdeki benzer çalışmalar ve piyasadaki diğer yalıtım malzemeleriyle karşılaştırıldığında, bu araştırmada üretilen FDM katkılı ahşap kompozitlerin yüksek termal iletkenlik performanslarıyla oldukça rekabetçi olduğu görülmektedir.

7) Saf FDM'lerin ve kompozit FDM'lerin ısıtma ile soğutma periyotlarına ait DSC termogramları, erime-katılama sıcaklıkları ile erime-katılama entalpileri gibi gizli ısı enerji depolama özellikleri DSC analizleri ile belirlenmiştir. FDM kompozitlerinin DSC termogramları incelendiğinde, saf FDM'ler gibi düzenli endotermik ve ekzotermik pikler sergilediği gözlemlenmiştir. Termogram analizleri sonucunda elde edilen ısı özellikler sonucu en yüksek gizli ısı depolama kapasitesine sahip kompozit MP/OK olurken, en düşük kapasiteye sahip kompozit KA/OK olarak tespit edilmiştir. MP/OK için erime ve katılama süreçlerinde maksimum gizli ısıların sırasıyla 97.7 J/g ve 97.3 J/g'ye ulaştığı ve literatürde rapor edilen diğer kompozit FDM'lerden daha yüksek gizli ısıya sahip olduğu görülmüştür. Bu yüksek gizli ısı değerleri, enerji verimliliğini artırmak amacıyla yapı malzemelerinde etkili bir termal enerji depolama çözümü olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Özellikle

erime ve donma süreçlerindeki yüksek enerji depolama kapasitesi, bu malzemelerin binalarda enerji tasarrufuna katkıda bulunarak sürdürülebilir bir alternatif olarak değerlendirilebileceğini işaret etmektedir.

8) Üretilen kompozitlerin uzun süreli ısı döngü kararlılığını belirlemek için hızlandırılmış 600 erime-katılaşma faz dönüşümünden oluşan ısı döngü testi uygulanmıştır. Testin ardından, döngüsel kimyasal ve termal stabiliteler, tekrarlanan FTIR ve DSC analizleri ile incelenmiş ve başlangıçtaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular, kompozitlerin ne kimyasal yapılarında ne de gizli ısı özelliklerinde önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Bu durum, kompozitlerin uzun süreli kullanım için uygun olduğunu ve performanslarının zamanla belirgin bir şekilde azalmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, bu kompozitler, farklı termal enerji depolama uygulamalarında güvenilir ve verimli bir seçenek sunma potansiyeline sahiptir.

9) Kompozit bileşenlerinin ve üretilen FDM odun kompozitlerinin termal kararlılığı TGA analizleri ile incelenmiş, elde edilen TGA eğrileri doğrultusunda numunelerin bozunma sıcaklıkları tespit edilmiştir. Sonuç olarak, üretilen FKK-FDM kompozitlerinin 150°C'nin üzerindeki termal bozunma sıcaklıkları, yüksek termal dayanıklılık gösterdiklerini ortaya koymaktadır. Ayrıca kompozitlerin TGA eğrilerinden, yalnızca kompozitlerin termal kararlılığı belirlenmemiş, aynı zamanda odun lifine emprenye edilen FDM miktarları da doğrulanmıştır. Servis sıcaklık aralıkları (10-35°C) dikkate alındığında, bu kompozitlerin güneş enerjisi ile ısıtma ve iklimlendirme gibi enerji verimliliği uygulamalarında kullanılmak üzere uygun olduğu görülmüştür. Bu özellikleri sayesinde, binalarda enerji tasarruflu sistemler için güvenilir ve uzun ömürlü malzemeler olarak değerlendirilebilirler.

10) Üretilen FDM esaslı odun kompozit levhalarının ve kontrol levhasının termal regülasyon performansı laboratuvar ölçekli bir düzende test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, FDM içeren odun kompozit levhaların bulunduğu test odaları, hem ısınma hem de soğuma süreçlerinde referans odasına göre daha yavaş tepki vermiştir. Isınma sürecinde test odasının merkez sıcaklığı ve iç yüzey sıcaklıkları referans odasına göre daha geç belirlenen sıcaklıklara ulaşmış, bu da FDM'nin ortamdaki ısıyı emerek sıcaklık artış hızını yavaşlattığını göstermiştir. Soğuma sürecinde ise test odası, depoladığı gizli ısıyı çevreye yayarak soğuma süresini uzatmıştır. Ayrıca, ısıtma aşamasında söz konusu kompozit FDM'leri içeren test odalarının ortalama merkez sıcaklıkları ve iç yüzey sıcaklıkları referans odasına kıyasla daha düşük çıkmıştır. Soğutma safhasında ise söz konusu kompozit

FDM'leri içeren test odalarının ortalama merkez sıcaklıkları ve iç yüzey sıcaklıkları referans odasına kıyasla daha yüksek çıkmıştır. Test odaları içerisinde referans odasına göre, ısıtma ve soğutma süresinde en yüksek ortalama sıcaklık farkını veren MP/OK levhasının bulunduğu test odası olmuştur.

11) Solar termoregülasyon testinde dış ortam koşullarında kurulan odalar incelendiğinde, çevresel sıcaklık yükseldiğinde FDM içerikli kompozitlerin bulunduğu test odaları, referans malzemeye göre daha düşük sıcaklıklar sergilemiş ve negatif değerler almıştır. Sıcaklık düştüğünde ise referans odasına göre daha yüksek sıcaklıklar gözlemlenmiş ve pozitif farklar oluşmuştur. Bu durum, malzemelerin sıcaklık artarken ısıyı depolayıp faz geçişi sırasında enerji biriktirmeleri, sıcaklık azaldığında ise biriktirdikleri ısıyı geri vermeleri sonucunda meydana gelmiştir. Kurulan odaların termal kamera görüntülerinin, termokupl ile yapılan ölçümlerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca dış ortam koşullarında yapılan bu testin sonuçları, laboratuvar ortamında yapılan termoregülasyon testi sonuçlarını doğrulamıştır. Bu sonuçlar, FDM odun kompozitlerinin, iç mekan sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak, oda sıcaklıklarını daha uzun süre boyunca konforlu seviyelerde tutma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir ve bu özellikleri sayesinde, binalarda önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabilir.

12) Üretilen kompozitlerin akustik performansını değerlendirmek amacıyla, empedans tüpü deneyi ile ses yutma katsayısı ve ses iletim kaybı değerleri incelenmiştir. Ses yutum katsayısı grafiğine göre, kontrol ve FDM içerikli kompozit numunelerin 100 Hz ile 6300 Hz arasındaki frekanslarda farklı ses yutma davranışları sergilemiştir. Düşük frekanslarda kontrol örneği daha yüksek emme katsayısı gösterirken, daha yüksek frekanslarda FDM içerikli kompozitler bu eğilimi tersine çevirerek daha iyi performans göstermiştir. MP/OK, 2500 Hz'de en yüksek ses emme değerine ulaşmıştır. Tüm gruplar, 700 Hz'den itibaren 0.5'in üzerinde bir ses emme katsayısına sahip oldukları için ses emici olarak değerlendirilmiştir. Özellikle orta frekanslarda yüksek ses emme performansı gösteren tüm kompozitler, yaşam gürültülerini etkili bir şekilde azaltarak akustik konforu artırma potansiyeline sahiptir. Ses iletim kaybı grafiğine baktığımızda frekans değeri arttıkça TL değerleri her ürün grubu için artış göstermiştir. Daha yüksek TL değerleri, malzemenin daha iyi ses yalıtımı sağladığını göstermektedir. Sonuç olarak, incelenen FDM bazlı odun kompozit numuneler, akustik performans açısından inşaatta yaygın kullanılan diğer malzemelerle kıyaslandığında benzer ve rekabetçi özellikler göstermektedir.

13) Tez kapsamında üretilen FDM esaslı formca kararlı odun kompozitler termit testi ve küf mantar testi ile biyolojik özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak yağ asitleriyle emrenye edilerek üretilen odun kompozitlerinin *Reticulitermes lucifugus* termitine karşı direnç göstermiştir. Odun lifine FDM emprenye edilmesinin küf gelişimi üzerinde belirgin etkileri olduğu gözlemlenmiştir. İşlenmemiş çam örneği ve MP/OK grubu yüksek duyarlılık gösterirken, LA/OK grubu en düşük küf gelişimi seviyesine ulaşmıştır. KA/OK grubu ise kontrol kompozit örneğiyle benzer sonuçlar vermiştir. Bu farklar, kaprik asit ve lauril alkolün antimikrobiyal özelliklerine dayandırılabilirken, metilpalmitat bu tür özellikler göstermemiştir.



5. ÖNERİLER

Binalarda enerji tasarrufu ve ısı konforu artırmak amacıyla geliştirilen termal enerji depolayan FDM odun kompozitlerinin termal performansı, küçük odalar kurularak gerçek atmosferik koşullarda yapılan solar termoregülasyon testi ile incelenmiştir. Ancak, bu kompozitlerin gerçek bina uygulamalarındaki performansını belirlemek için büyük ölçekli test odaları kurularak, ısı konfor koşullarını iyileştirip iyileştirmediği incelenebilir.

Termogravimetrik analiz (TGA) sonuçlarına göre, malzemelerin bozunma sıcaklıkları yüksek çıkmıştır. Ancak, malzemelerin yanma performansını daha kapsamlı değerlendirebilmek için kompozitlere yanmayı geciktirici maddeler ekleyerek LOI (Limit Oksijen İndeksi) testinin de yapılması önemli bir katkı sağlayacaktır.

FDM odun kompozitlerinde karşılaşılan en büyük sorunlardan biri sızdırma problemidir. FDM'nin yapıdan sızmasını önlemek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bunlardan birisi de mikrokapsülleme yöntemidir. Tez çalışması sürecinde Mikro FDM içerikli odun kompoziti üretilmiş olup, sızdırma problemine çözüm sağladığı ve bundan sonraki çalışmalara mikro kapsüllenmiş FDM kullanımı ile sızıntı problemine karşı etkin bir yöntem olabileceği öngörülmüştür.

Üretilen biyo-bazlı bağlayıcılı ve biyo-kaynaklı FDM kompozitlerinin çevresel etkilerini daha iyi değerlendirebilmek için karbon emisyon miktarı ve karbon ayak izi analizlerinin yapılması, malzemenin sürdürülebilirlik açısından performansını ortaya koyarak çevresel etkilerini belirlemede önemli bir katkı sağlayacaktır. Böylece, enerji tasarrufu ve ısı konfor hedeflerine ek olarak çevresel sorumluluk perspektifinde de değerlendirme yapılabilecektir.

6. KAYNAKLAR

- Abed, J., Rayburg, S., Rodwell, J. ve Neave, M. (2022). A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. *Sustainability*, 14(9), 5570.
- Abedin, A. H. ve Rosen, M. A. (2011). A critical review of thermochemical energy storage systems. *The open renewable energy journal*, 4(1), 42-46.
- Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Zeynali Famileh, I., Calautit, J. K., Hughes, B. R. ve 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.
- Al-Hallaj, S., Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M. ve Selman, J. R. (2005). Passive thermal management using phase change material (PCM) for EV and HEV Li-ion batteries. *IEEE vehicle power and propulsion conference*, s. 5. Ontario.
- Alva, G., Lin, Y. ve Fang, G. (2018). An overview of thermal energy storage systems, *Energy*, 144, 341-378.
- Amiri, A., Ottelin, J., Sorvari, J. ve Junnila, S. (2020). Cities as carbon sinks—classification of wooden buildings, *Environmental Research Letters*, 15(9), 094076.
- Apaydın Varol, E. ve Mutlu, Ü. (2023). TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin. *Energies*, 16(9). 3674.
- Akgün, H., Turan, E., Özkan, A., Günkaya, Z. ve Banar, M. (2023). Faz Değişim Malzemelerinde Kullanılan İnorganik Nanomalzemelerin Multimoora Yöntemiyle Önceliklendirilmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 15(3), 153-165.
- Arora, J., Kinjo, Y., Šobotník, J., Buček, A., Clitheroe, C., Stiblik, P., Roisin, Y., Žifčáková, L., Park, Y. C., Kim, K. Y., Sillam-Dussès, D., Hervé, V., Lo, N., Tokuda, G., Brune, A. ve Bourguignon, T. (2022). The functional evolution of termite gut microbiota, *Microbiome*, 10(1), 78.
- Arshad, A., Jabbal, M., Yan, Y., & Darkwa, J. (2019). The micro-/nano-PCMs for thermal energy storage systems: a state of art review. *International Journal of Energy Research*, 43(11), 5572-5620.

- ASTM D 1037. (1996). Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C 165-07. (2017). Standard Test Method for Measuring Compressive Properties of Thermal Insulations, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Atinafu, D. G., Dong, W., Huang, X., Gao, H. ve Wang, G. (2018). Introduction of organic-organic eutectic PCM in mesoporous N-doped carbons for enhanced thermal conductivity and energy storage capacity. *Applied Energy*, 211, 1203-1215.
- AWPA E-24 06. (2010). Standard method of evaluating the resistance of wood product surfaces to mold growth. American Wood-Preservers' Association, Inc., Birmingham.
- Azarifar, M., Sömek, S. K. ve Dönmezer, N. (2017). Faz Değiştirme ile Isı Depolamada Kullanılan Parafin-Grafit, Parafin-Kanatçık ve Saf Parafinli Yapıların Performans Analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 155-164.
- Baetens, R., Jelle, B. P. ve Gustavsen, A. (2010). Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9), 1361-1368.
- Bal, L. M., Satya, S. ve Naik, S. N. (2010). Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2298-2314.
- Barbi, S., Barbieri, F., Marinelli, S., Rimini, B., Merchiori, S., Bottarelli, M. ve Montorsi, M. (2022). Phase change material evolution in thermal energy storage systems for the building sector, with a focus on ground-coupled heat pumps. *Polymers*, 14(3), 620.
- Barreneche, C., Vecstaudza, J., Bajare, D. ve Fernandez, A. I. (2017). PCM/wood composite to store thermal energy in passive building envelopes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 251(1), s. 12111. IOP Publishing.
- Beal, R. H., Amburgey, T. L., Bultman, J. D. ve Roberts, D. R. (1979). Resistance of wood from paraquat-treated southern pines to subterranean termites, decay fungi, and marine borers, *Forest Products Journal*, 29(4), 35-38.
- Bland, A., Khzouz, M., Statheros, T. ve Gkanas, E. I. (2017). PCMs for residential building applications: A short review focused on disadvantages and proposals for future development. *Buildings*, 7(3), 78.
- Bose, P. ve Amirtham, V. A. (2016). A review on thermal conductivity enhancement of paraffinwax as latent heat energy storage material. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 81-100.

- Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C. D., De Gracia, A. ve Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1675-1695.
- Cabeza, L. F., Martorell, I., Miró, L., Fernández, A. I. Ve Barreneche, C. (2015). *Introduction to thermal energy storage (TES) systems*. In Advances in thermal energy storage systems (s.1-28). Woodhead Publishing.
- Can, A., Erkan, G., Duran, H.ve Sivrikaya, H. (2021). Microencapsulated di-ammonium hydrogen phosphate (DAHP) with a polyurethane shell: characterization and its properties in wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(6), 1405-1417.
- Cao, X., Dai, X. ve Liu, J. (2016). Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy and buildings*, 128, 198-213.
- Chao, W., Yang, H., Cao, G., Sun, X., Wang, X. ve Wang, C. (2020). Carbonized wood flour matrix with functional phase change material composite for magnetocaloric-assisted photothermal conversion and storage. *Energy*, 202, 117636.
- Chekifi, T. ve Boukraa, M. (2023). CFD applications for sensible heat storage: A comprehensive review of numerical studies. *Journal of Energy Storage*, 68, 107893.
- Chen, F., Kessel, A. ve Wolcott, M. (2012). A novel energy saving wood product with phase change materials. *55th International Convention of Society of Wood Science and Technology*, s. 27-31. Beijing, China.
- Cheng, F., Wen, R., Huang, Z., Fang, M., Liu, Y. G., Wu, X. ve Min, X. (2017). Preparation and analysis of lightweight wall material with expanded graphite (EG)/paraffin composites for solar energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 120, 107-114.
- Choi, J. Y., Yun, B. Y., Kim, Y. U., Kang, Y., Lee, S. C. ve Kim, S. (2022). Evaluation of thermal/acoustic performance to confirm the possibility of coffee waste in building materials in using bio-based microencapsulated PCM. *Environmental Pollution*, 294, 118616.
- Choure, B. K., Alam, T. ve Kumar, R. (2023). A review on heat transfer enhancement techniques for PCM based thermal energy storage system. *Journal of Energy Storage*, 72, 108161.
- Collet, F. ve Pretot, S. (2014). Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and building materials*, 65, 612-619.

- Cong Y., Su Z., Zou W., Yang M., Ma H. ve Zhang H. (2011). GC determination content of seven fatty acid hydrophobic group in Tween-80. *Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis*, 31(4), 651-654.
- Cornelius, M. L. ve Osbrink, W. L. A. (2009). Bioassay design and length of time in the laboratory affect intercolonial interactions of the Formosan subterranean termite (*Isoptera, Rhinotermitidae*). *Insectes sociaux*, 56, 203-211.
- Cot-Gores, J., Castell, A. ve Cabeza, L. F. (2012). Thermochemical energy storage and conversion: A-state-of-the-art review of the experimental research under practical conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5207-5224.
- De Gracia, A. ve Cabeza, L. F. (2015). Phase change materials and thermal energy storage for buildings. *Energy and Buildings*, 103, 414-419.
- Da Cunha, S. R. L. ve de Aguiar, J. L. B. (2020). Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge. *Journal of Energy Storage*, 27, 101083.
- Das, D., Bordoloi, U., Muigai, H. H. ve Kalita, P. (2020). A novel form stable PCM based bio composite material for solar thermal energy storage applications. *Journal of Energy Storage*, 30, 101403.
- Dasiewicz, J., Wronka, A., Jeżo, A. ve Kowaluk, G. (2024). Thermally Active Medium-Density Fiberboard (MDF) with the Addition of Phase Change Materials for Furniture and Interior Design. *Materials*, 17(16), 4001.
- De Gracia, A., Navarro, L., Castell, A., Ruiz-Pardo, Á., Álvarez, S. ve Cabeza, L. F. (2013). Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period. *Energy and Buildings*, 58, 324-332.
- Demiryürek, O. ve Aydemir, H. (2017). Sound absorbing properties of roller blind curtain fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 47(1), 3-19.
- Deniz İ. (2012). *Odun Kimyası*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi, Trabzon, 200 s.
- Dincer, I., Hamut, H. S. ve Javani, N. (2016). *Thermal management of electric vehicle battery systems*. John Wiley & Sons.
- Dincer, I. ve Rosen, M. A. (2002). *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*, John Wiley & Sons. USA.
- Dincer, I. ve Ezan, M. A. (2018). *Heat storage: a unique solution for energy systems*. Springer.

- Douvi, E., Pagkalos, C., Dogkas, G., Koukou, M. K., Stathopoulos, V. N., Caouris, Y. ve Vrachopoulos, M. G. (2021). Phase change materials in solar domestic hot water systems: A review. *International Journal of Thermofluids*, 10, 100075.
- Dubey, R., Shami, T. C. ve Rao, K. U. (2009). Microencapsulation technology and applications. *Defence Science Journal*, 59(1), 82-95.
- EN-117, (2013). Wood preservatives. Determination of toxic values against *Reticulitermes* species (European termites) (Laboratory method), European Committee for Standardization Brussels, Belgium.
- EN 350, (2016). Durability of wood and wood-based products – Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials, European Standards for Structural Use.
- Fabiani, C., Santini, C., Barbanera, M., Giannoni, T., Rubino, G., Cotana, F. ve Pisello, A. L. (2023). Phase change materials-impregnated biomass for energy efficiency in buildings: Innovative material production and multiscale thermophysical characterization. *Journal of Energy Storage*, 58, 106223.
- Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K. ve Al-Hallaj, S. (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45(9-10), 1597-1615.
- Frahat, N. B., Ustaoglu, A., Gencel, O., Sarı, A., Hekimoğlu, G., Yaras, A. ve del Coz Díaz, J. J. (2023). Fuel, cost, energy efficiency and CO₂ emission performance of PCM integrated wood fiber composite phase change material at different climates. *Scientific Reports*, 13(1), 7714.
- França, T. S. F. A., França, F. J. N., Arango, R. A., Woodward, B. M. ve Arantes, M. D. C. (2016). Natural resistance of plantation grown African mahogany (*Khaya ivorensis* and *Khaya senegalensis*) from Brazil to wood-rot fungi and subterranean termites. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 107, 88-91.
- Gencel, O., Yaras, A., Hekimoğlu, G., Ustaoglu, A., Erdogan, E., Sutcu, M. ve 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.
- Goli, P., Legedza, S., Dhar, A., Salgado, R., Renteria, J. ve Balandin, A. A. (2014). Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 248, 37-43.

- Grzybek, J., Paschová, Z., Meffert, P., Petutschnigg, A. ve Schnabel, T. (2023). Impregnation of Norway spruce with low melting-point binary fatty acid as a phase-change material. *Wood Material Science & Engineering*, 18(5), 1755-1764.
- Gu, X., Liu, P., Bian, L. ve He, H. (2019). Enhanced thermal conductivity of palmitic acid/mullite phase change composite with graphite powder for thermal energy storage. *Renewable Energy*, 138, 833-841.
- Gunasekara, S. N., Kumova, S., Chiu, J. N. ve Martin, V. (2017). Experimental phase diagram of the dodecane–tridecane system as phase change material in cold storage. *International Journal of Refrigeration*, 82, 130-140.
- Guo, X., Cao, J., Peng, Y. ve Liu, R. (2016). Incorporation of microencapsulated dodecanol into wood flour/high-density polyethylene composite as a phase change material for thermal energy storage. *Materials & Design*, 89, 1325-1334.
- Guo, X., Zhang, L., Cao, J. ve Peng, Y. (2018). Paraffin/wood flour/high-density polyethylene composites for thermal energy storage material in buildings: a morphology, thermal performance, and mechanical property study. *Polymer Composites*, 39(S3), E1643-E1652.
- Gulfam, R., Zhang, P. ve Meng, Z. (2019). Advanced thermal systems driven by paraffin-based phase change materials—A review. *Applied Energy*, 238, 582-611.
- Gürler, N. (2020). Sitrik Asit ile Modifiye Edilmiş Mısır Nişastası/Mikrokristalin Selüloz Filmlerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. *Int. J. Pure Appl. Sci*, 6(2), 179-185.
- Hallaj, S.A. ve Selman, J. R. (2000). A novel thermal management system for electric vehicle batteries using phase-change material. *Journal of the Electrochemical Society*, 147(9), 3231.
- Hamad, G. B., Younsi, Z., Naji, H. ve Salaün, F. (2021). A comprehensive review of microencapsulated phase change materials synthesis for low-temperature energy storage applications. *Applied Sciences*, 11(24), 11900.
- Han, L., Xie, S., Sun, J., & Jia, Y. (2017). Preparation and thermal characterization of oxalic acid dihydrate/bentonite composite as shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 182(1), s. 012010. IOP Publishing.
- Hanif, F., Imran, M., Zhang, Y., Jia, Z., Lu, X., Lu, R. ve Tang, B. (2023). Form-stable phase change material with wood-based materials as support. *Polymers*, 15(4), 942.

- Harmen, Y., Chhiti, Y., M'Hamdi, Alaoui F. E., Bentiss, F., El Khouakhi, M., Jama, C., Duquesne, S., Bensitel, M. ve Deshayes, L. (2021). Thermal and energetic behaviour of solid-solid-liquid phase change materials storage unit: Experimental and numerical comparative study of the top, bottom and horizontal configurations. *Journal of Energy Storage*, 33, 102025.
- Hasanuzzaman, M. ve Abd Rahim, N. (2019). *Energy for sustainable development: demand, supply, conversion and management*. Elsevier Science Academic Press.
- Hasnain, S. M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy conversion and management*, 39(11), 1127-1138.
- Hekimoğlu, G., Nas, M., Ouikhalfan, M., Sarı, A., Kurbetci, Ş., Tyagi, V. V., Sharma, R. K. ve Saleh, T. A. (2021). Thermal management performance and mechanical properties of a novel cementitious composite containing fly ash/lauric acid-myristic acid as form-stable phase change material. *Construction and Building Materials*, 274, 122105.
- Hekimoğlu G., Sarı A., Kar T., Keleş S., Kaygusuz K., Yıldırım, N., Tyagi, V. V., Sharma, R. K. ve Saleh, T. A. (2021a). Carbonized waste hazelnut wood-based shape-stable composite phase change materials for thermal management implementations. *International Journal of Energy Research*, 45(7), 10271-10284.
- Hekimoğlu, G., Sarı, A., Kar, T., Keleş, S., Kaygusuz, K., Tyagi, V. V., Sharma, R. K., Al-Ahmed, A., Al-Sulaiman, F. A. ve Saleh, T. A., (2021b). Walnut shell derived bio-carbon/methyl palmitate as novel composite phase change material with enhanced thermal energy storage properties, *Journal of Energy Storage*, 35, 102288.
- Hekimoğlu, G., Sarı, A., Önal, Y., Gencel, O., Tyagi, V. V. ve Aslan, E. (2022). Utilization of waste apricot kernel shell derived-activated carbon as carrier framework for effective shape-stabilization and thermal conductivity enhancement of organic phase change materials used for thermal energy storage. *Powder Technology*, 401, 117291.
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J. C., Smith, P. ve Williams, C. K., (2019). The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature*, 575(7781), 87-97.
- Huang, X., Alva, G., Liu, L. ve Fang, G. (2017). Preparation, characterization and thermal properties of fatty acid eutectics/bentonite/expanded graphite composites as novel form-stable thermal energy storage materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 166, 157-166.
- Huang, X., Chen, X., Li, A., Atinafu, D., Gao, H., Dong, W. ve Wang, G. (2019). Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications. *Chemical Engineering Journal*, 356, 641-661.

- Huang, Y., Stonehouse, A. ve Abeykoon, C. (2023). Encapsulation methods for phase change materials–A critical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 200, 123458.
- Hunter, C. A., Grant, C., Flannigan, B. ve Bravery, A. F. (1988). Mould in buildings: the air spora of domestic dwellings. *International biodeterioration*, 24(2), 81-101.
- Husseneder, C. (2010). Symbiosis in subterranean termites: a review of insights from molecular studies. *Environmental Entomology*, 39(2), 378-388.
- Ianniciello, L., Biwolé, P. H. ve Achard, P. (2018). Electric vehicles batteries thermal management systems employing phase change materials. *Journal of power sources*, 378, 383-403.
- ISO/DIS Standard 10534. (2004). Acoustics Determination of Sound Absorption coefficient and Impedance or Admittance by The Impedance Tube Method”– International Standard Organization; Switzerland.
- Ibrahim, M. A. ve Melik, R. W. (1978). Physical parameters affecting acoustic absorption characteristics of fibrous materials. *Proceedings of the mathematical and physical society of Egypt*, 46, 17-25.
- Ibrahim, N. I., Al-Sulaiman, F. A., Rahman, S., Yilbas, B. S. ve 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.
- Jamekhorshid, A., Sadrameli, S. M. ve Farid, M. (2014). A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 531-542.
- Jegadheeswaran, S. ve Pohekar, S. D. (2009). Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(9), 2225-2244.
- Kahwaji, S., Johnson, M. B., Kheirabadi, A. C., Groulx, D. ve White, M. A. (2018). A comprehensive study of properties of paraffin phase change materials for solar thermal energy storage and thermal management applications. *Energy*, 162, 1169-1182.
- Kain, G., Güttler, V., Barbu, M. C., Petutschnigg, A., Richter, K. ve Tondi, G. (2014). Density related properties of bark insulation boards bonded with tannin hexamine resin. *European Journal of Wood and Wood Products*, 72, 417-424.
- Kaith, B. S., Jindal, R., Jana, A. K. ve Maiti, M. (2010). Development of corn starch based green composites reinforced with *Saccharum spontaneum* L fiber and graft

copolymers–Evaluation of thermal, physico-chemical and mechanical properties. *Bioresource Technology*, 101(17), 6843-6851.

Kalnæs, S. E. ve Jelle, B. P. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94, 150-176.

Kamke F. A. ve Casey L. J. (1988a). Fundamentals of flakeboard manufacture: internal-mat conditions, *Forest Products Journal*, 38(6), 38-44.

Kamke F. A. ve Casey L. J. (1988b). Gas pressure and temperature in the mat during flakeboard manufacture, *Forest Products Journal*, 38(3), 41-43.

Kara, M. E., Koç, E. ve Aykan, R. Yonga Levhanın Bazı Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Üzerine Atık Taş Yünü Kullanımının Etkisi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 26(4), 448-457.

Karaipekli, A. ve Sarı, A. (2008). Capric–myristic acid/expanded perlite composite as form-stable phase change material for latent heat thermal energy storage. *Renewable Energy*, 33(12), 2599-2605.

Karaipekli, A., Biçer, A., Sarı, A. ve Tyagi, V. V. (2017). Thermal characteristics of expanded perlite/paraffin composite phase change material with enhanced thermal conductivity using carbon nanotubes. *Energy conversion and management*, 134, 373-381.

Kawasaki, T., Zhang, M. ve Kawai, S. (1998). Manufacture and properties of ultra-low-density fiberboard. *Journal of Wood Science*, 44, 354-360.

Kaya, N. (2018). Investigation of mechanical and physical properties of glass fiber reinforced fiber plates (MDF) produced from agricultural wastes. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(3), 905-916.

Kaygusuz, K. (2024). Faz Değiştiren Kimyasal Maddelerle Enerji Depolama. *Interdisciplinary Studies on Contemporary Research Practices in Engineering in the 21st Century-VI*, 157.

Kee, S. Y., Munusamy, Y. ve Ong, K. S. (2018). Review of solar water heaters incorporating solid-liquid organic phase change materials as thermal storage. *Applied Thermal Engineering*, 131, 455-471.

Kenisarin, M. M. (2010). High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(3), 955-970.

- Kenisarin, M. M. ve Kenisarina, K. M. (2012). Form-stable phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 1999-2040.
- Kenisarin, M. ve Mahkamov, K. (2016). Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. *Renewable and sustainable energy reviews*, 55, 371-398.
- Khan, Z., Khan, Z. ve Ghafoor, A. (2016). A review of performance enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility. *Energy conversion and management*, 115, 132-158.
- Khudhair, A. M. ve Farid, M. (2021). A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. *Thermal energy storage with phase change materials*, 162-175, CRC Press.
- Kocatepe, S., Erol, M. ve Paşayev, N. (2018). Statistical Analysis of Effects of Production Parameters of Sound Insulation Materials Produced From Chicken Feather Fibers on Acoustic Properties, *1. International Technological Sciences And Design Symposium*, s.1319-1333. Giresun, Türkiye.
- Koizumi, T., Tsujiuchi, N. ve Adachi, A. (2002). The development of sound absorbing materials using natural bamboo fibers. *WIT Transactions on The Built Environment*, 59, 157-166.
- Kong, W., Dannemand, M., Berg, J. B., Fan, J., Englmair, G., Dragsted, J. ve Furbo, S. (2019). Experimental investigations on phase separation for different heights of sodium acetate water mixtures under different conditions. *Applied Thermal Engineering*, 148, 796-805.
- Konuklu, Y. ve Ersoy, O. (2016). Preparation and characterization of sepiolite-based phase change material nanocomposites for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 107, 575-582.
- Koohi-Fayegh, S. ve Rosen, M. A. (2020). A review of energy storage types, applications and recent developments. *Journal of Energy Storage*, 27, 101047.
- Król, K., Macherzyńska, B. ve Pielichowska, K. (2016). Acrylic bone cements modified with poly (ethylene glycol)-based biocompatible phase-change materials. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(36).
- Kuznik, F., David, D., Johannes, K. ve Roux, J. J. (2011). A review on phase change materials integrated in building walls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 379-391.

- Lane, G. A. ve Shamsundar, N. (1983). Solar Heat Storage: Latent Heat Materials, Vol. I: Background and Scientific Principles, *Journal of Solar Energy Engineering*, 105(4), 467-467.
- Li, C., Wen, X., Cai, W., Yu, H. ve Liu, D. (2023). Phase change material for passive cooling in building envelopes: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 65, 105763.
- Li, J., Xue, P., Ding, W., Han, J. ve Sun, G. (2009). Micro-encapsulated paraffin/high-density polyethylene/wood flour composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(10), 1761-1767.
- Li, J., Xue, P., He, H., Ding, W. ve Han, J. (2009). Preparation and application effects of a novel form-stable phase change material as the thermal storage layer of an electric floor heating system. *Energy and Buildings*, 41(8), 871-880.
- Li, M., Wu, Z. ve Kao, H. (2011). Study on preparation, structure and thermal energy storage property of capric-palmitic acid/attapulgit composite phase change materials. *Applied energy*, 88(9), 3125-3132.
- Liang, J., Zhimeng, L., Ye, Y., Yanjun, W., Jingxin, L. ve Changlin, Z. (2018). Fabrication and characterization of fatty acid/wood-flour composites as novel form-stable phase change materials for thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 171, 88-99.
- Lin, Y., Jia, Y., Alva, G. ve Fang, G. (2018). Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and sustainable energy reviews*, 82, 2730-2742.
- Lin, Y., Zhu, C., Alva, G. ve Fang, G. (2018). Palmitic acid/polyvinyl butyral/expanded graphite composites as form-stable phase change materials for solar thermal energy storage. *Applied Energy*, 228, 1801-1809.
- Liu, L., Su, D., Tang, Y. ve Fang, G. (2016). Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 305-317.
- Liu, S., Wu, H., Du, Y., Lu, X. ve Qu, J. (2021). Shape-stable composite phase change materials encapsulated by bio-based balsa wood for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 230, 111187.
- Liu, X., Guo, Z., Wang, J. ve Xie, H. (2023). Fluorescence and thermal regulation using low-supercooling inorganic microencapsulated phase-change materials. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(16), 20444-20457.

- Liu, Y.B., Wang, Y.N., Shi, G.L., Ren, J.J., Zhao, L., Du, J. ve Zhao, L.L. (2009). Acaricidal Activity of Methyl Palmitate to *T. cinnabarinus*. *3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, s.1-4. Beijing, China
- Lv, P., Liu, C. ve Rao, Z. (2017). Review on clay mineral-based form-stable phase change materials: Preparation, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 707-726.
- Lv, Y., Zou, Y. ve Yang, L. (2011). Feasibility study for thermal protection by microencapsulated phase change micro/nanoparticles during cryosurgery. *Chemical engineering science*, 66(17), 3941-3953.
- Ma, L., Guo, C., Ou, R., Sun, L., Wang, Q. ve Li, L. (2018). Preparation and characterization of modified porous wood flour/lauric-myristic acid eutectic mixture as a form-stable phase change material. *Energy & Fuels*, 32(4), 5453-5461.
- Ma, L., Wang, Q. ve Li, L. (2019). Delignified wood/capric acid-palmitic acid mixture stable-form phase change material for thermal storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 194, 215-221.
- Mabrouk, R., Naji, H., Benim, A. C. ve Dhahri, H. (2022). A state of the art review on sensible and latent heat thermal energy storage processes in porous media: Mesoscopic Simulation. *Applied Sciences*, 12(14), 6995.
- Mahfuz, M. H., Kamyar, A., Afshar, O., Sarraf, M., Anisur, M. R., Kibria, M. A., Saidur, R. ve Metselaar, I. H. S. C. (2014). Exergetic analysis of a solar thermal power system with PCM storage. *Energy conversion and management*, 78, 486-492.
- Mahlia, T. M. I., Saktisahdan, T. J., Jannifar, A., Hasan, M. H. ve Matseelar, H. S. C. (2014). A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and sustainable energy reviews*, 33, 532-545.
- Mansaray, K. G. ve Ghaly, A. E. (1998). Thermogravimetric analysis of rice husks in an air atmosphere. *Energy sources*, 20(7), 653-663.
- Mathis, D., Blanchet, P., Landry, V. ve Lagi re, P. (2018). Impregnation of wood with microencapsulated bio-based phase change materials for high thermal mass engineered wood flooring. *Applied Sciences*, 8(12), 2696.
- Mathis, D., Blanchet, P., Landry, V. ve Lagi re, P. (2019). Thermal characterization of bio-based phase changing materials in decorative wood-based panels for thermal energy storage. *Green Energy & Environment*, 4(1), 56-65.
- Mehling H. ve Cabeza L. F., (2008). *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction Into Basics and Applications*. Springer.

- Memon, S. A. (2014). Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 870-906.
- Mohebbi, B. (2005). Attenuated total reflection infrared spectroscopy of white-rot decayed beech wood. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 55(4), 247-251.
- Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied thermal engineering*, 28(11-12), 1536-1550.
- Morrison, D. J. ve Abdel-Khalik, S. I. (1978). Effects of phase-change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems. *Solar Energy*, 20(1), 57-67.
- Mu, M., Basheer, P. A. M., Sha, W., Bai, Y. ve McNally, T. (2016). Shape stabilised phase change materials based on a high melt viscosity HDPE and paraffin waxes. *Applied Energy*, 162, 68-82.
- Muthukumar, P. ve Niyas, H., (2020). Materials, Design and Development of Latent Heat Storage Systems for Medium and Large-Scale Applications: Issues and Challenges, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Saleem Hashmi ve Imtiaz Ahmed Choudhury (Ed.), Elsevier, Oxford, 417-437.
- Nagnan, P. ve Clement, J. L. (1990). Terpenes from the maritime pine *Pinus pinaster*: toxins for subterranean termites of the genus *Reticulitermes* (Isoptera: Rhinotermitidae)?. *Biochemical systematics and ecology*, 18(1), 13-16.
- Nandanwar, A., Kiran, M. C. ve Varadarajulu, K. C. (2017). Influence of density on sound absorption coefficient of fibre board. *Open Journal of Acoustics*, 7(01), 1.
- Nazari, M., Jebrane, M. ve Terziev, N. (2020). Bio-based phase change materials incorporated in lignocellulose matrix for energy storage in buildings—a review. *Energies*, 13(12), 3065.
- Nazari, M., Jebrane, M. ve Terziev, N. (2022). Solid wood impregnated with a bio-based phase change material for low temperature energy storage in building application. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(19), 10677-10692.
- Nithipaiboon, J., Prakaypan, W., Chakartnarodom, P., Laitila, E. A. ve Kongkajun, N. (2023). Effect of aluminum hybrid additive on water absorption of fiber-cement composites. *Science, Engineering and Health Studies*, 23040013-23040013.
- Nomura, T., Okinaka, N. ve Akiyama, T. (2010). Technology of latent heat storage for high temperature application: a review. *ISIJ international*, 50(9), 1229-1239.

- Omer, M. A. ve Noguchi, T. (2020). A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs). *Sustainable Cities and Society*, 52, 101869.
- Oró, E., De Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M. ve Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, 513-533.
- Osterman, E., Tyagi, V. V., Butala, V., Rahim, N. A. ve Stritih, U. (2012). Review of PCM based cooling technologies for buildings. *Energy and Buildings*, 49, 37-49.
- Ouikhalfan, M., Sarı, A., Hekimoğlu, G., Gencel, O. ve Tyagi, V. V. (2022). Thermal energy storage properties, thermal conductivity, chemical/and thermal reliability of three different organic phase change materials doped with hexagonal boron nitride. *Surfaces and Interfaces*, 32, 102176.
- Öztürk, G., Temiz, A., Hekimoğlu, G., Aslan, M., Demirel, G. K., Erdeyer, Ö. N., Sarı, A., Gencel, O. ve Subaşı, S. (2024). Microencapsulated phase change material/wood fiber-starch composite as novel bio-based energy storage material for buildings, *Journal of Energy Storage*, 84, 110911.
- Painter, G., Budman, H. ve Pritzker, M. (2006). Prediction of oriented strand board properties from mat formation and compression operating conditions. Part 1. Horizontal density distribution and vertical density profile. *Wood science and technology*, 40(2), 139-158.
- Palanti, S., Temiz, A., Köse Demirel, G., Hekimoğlu, G., Sarı, A., Nazari, M., Jebrane, M., Schnabel, T. ve Terziev, N. (2022). Bio-Based Phase Change Materials for Wooden Building Applications. *Forests*, 13(4), 603.
- Pandey, K. K. ve Pitman, A. J. (2003). FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. *International biodeterioration & biodegradation*, 52(3), 151-160.
- Panyakaew, S. ve Fotios, S. (2011). New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse. *Energy and buildings*, 43(7), 1732-1739.
- Pasayev N. ve Erol M. (2018). Acoustical properties of sandwich structures developed from chicken feather rachis material. *Innovative Approaches In Engineering*, 117-130.
- Pasupathy, A., Velraj, R. ve Seeniraj, R. V. (2008). Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(1), 39-64.

- Pfundstein, M., Gellert, R., Spitzner, M. ve Rudolphi, A. (2008). *Insulating materials: principles, materials, applications*. DETAIL-Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.
- Pielichowska, K. ve Pielichowski, K. (2014). Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in materials science*, 65, 67-123.
- Pincemin, S., Olives, R., Py, X. ve Christ, M. (2008). Highly conductive composites made of phase change materials and graphite for thermal storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(6), 603-613.
- Prakash, J., Garg, H. P. ve Datta, G. (1985). A solar water heater with a built-in latent heat storage. *Energy conversion and management*, 25(1), 51-56.
- Py, X., Azoumah, Y. ve Olives, R. (2013). Concentrated solar power: Current technologies, major innovative issues and applicability to West African countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 306-315.
- Qureshi, Z. A., Ali, H. M. ve Khushnood, S. (2018). Recent advances on thermal conductivity enhancement of phase change materials for energy storage system: a review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 838-856.
- Rahman, M. M., Oni, A. O., Gemechu, E. ve Kumar, A. (2020). Assessment of energy storage technologies: A review. *Energy Conversion and Management*, 223, 113295.
- Ramage M. H., BurrIDGE H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D. U., Wu G., Yu L., Fleming P., Densley-Tingley D., Allwood J., Dupree P., Linden P. F. ve Scherman O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and sustainable energy reviews*, 68, 333-359.
- Rashid, F. L., Al-Obaidi, M. A., Dhaidan, N. S., Hussein, A. K., Ali, B., Hamida, M. B. B., ve Younis, O. (2023). Bio-based phase change materials for thermal energy storage and release: A review. *Journal of Energy Storage*, 73, 109219.
- Rathod, M. K. ve Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18, 246-258.
- Rathore, P. K. S. ve Kumar Shukla, S. (2021). Improvement in thermal properties of PCM/Expanded vermiculite/expanded graphite shape stabilized composite PCM for building energy applications. *Renewable Energy*, 176, 295-304.
- Regin, A. F., Solanki, S. C. ve Saini, J. S. (2008). Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), 2438-2458.

- Rodríguez, G. E., Bustos Ávila, C. ve Cloutier, A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Fiberboard Made of MDF Residues and Phase Change Materials. *Forests*, 15(5), 802.
- Romdhane, S. B., Amamou, A., Khalifa, R. B., Saïd, N. M., Younsi, Z. ve Jemni, A. (2020). A review on thermal energy storage using phase change materials in passive building applications. *Journal of Building Engineering*, 32, 101563.
- Santamouris, M. ve Vasilakopoulou, K. (2021). Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100002.
- Sarı, A., Bicer, A., Karaipekli, A. ve Al-Sulaiman, F. A. (2018). Preparation, characterization and thermal regulation performance of cement based-composite phase change material. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 174, 523-529.
- Sarı, A., Hekimoğlu, G. ve Tyagi, V. V. (2020). Low cost and eco-friendly wood fiber-based composite phase change material: Development, characterization and lab-scale thermoregulation performance for thermal energy storage. *Energy*, 195, 116983.
- Sarier, N. ve Onder, E. (2012). Organic phase change materials and their textile applications: an overview. *Thermochimica acta*, 540, 7-60.
- Savov, V., Valchev, I., Antov, P., Yordanov, I. ve Popski, Z. (2022). Effect of the adhesive system on the properties of fiberboard panels bonded with hydrolysis lignin and phenol-formaldehyde resin. *Polymers*, 14(9), 1768.
- Sawadogo, M., Benmahiddine, F., Hamami, A. E. A., Belarbi, R., Godin, A. ve Duquesne, M. (2022). Investigation of a novel bio-based phase change material hemp concrete for passive energy storage in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 212, 118620.
- Sawadogo, M., Duquesne, M., Belarbi, R., Hamami, A. E. A. ve Godin, A. (2021). Review on the integration of phase change materials in building envelopes for passive latent heat storage. *Applied Sciences*, 11(19), 9305.
- Schiavoni, S., Bianchi, F. ve Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011.
- Schwanninger, M. J. C. R., Rodrigues, J. C., Pereira, H. ve Hinterstoisser, B. (2004). Effects of short-time vibratory ball milling on the shape of FT-IR spectra of wood and cellulose. *Vibrational spectroscopy*, 36(1), 23-40.
- Segovia, F., Blanchet, P., Auclair, N. ve Essoua Essoua, G. G. (2020). Thermo-mechanical properties of a wood fiber insulation board using a bio-based adhesive as a binder. *Buildings*, 10(9), 152.

- Seligra, P. G., Jaramillo, C. M., Famá, L. ve Goyanes, S. (2016). Biodegradable and non-retrogradable eco-films based on starch–glycerol with citric acid as crosslinking agent. *Carbohydrate Polymers*, 138, 66-74.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. ve Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Sharma, R., Jang, J. G. ve Hu, J. W. (2022). Phase-change materials in concrete: Opportunities and challenges for sustainable construction and building materials. *Materials*, 15(1), 335.
- Sharma, R. K., Ganesan, P., Tyagi, V. V., Metselaar, H. S. C. ve Sandaran, S. C. (2015). Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy conversion and management*, 95, 193-228.
- Shelton, B. G., Kirkland, K. H., Flanders, W. D. ve Morris, G. K. (2002). Profiles of airborne fungi in buildings and outdoor environments in the United States. *Applied and environmental microbiology*, 68(4), 1743-1753.
- Sheng, M., Sheng, Y., Wu, H., Liu, Z., Li, Y., Xiao, Y., Lu, X. ve Qu, J. (2023). Bio-based poly (lactic acid) shaped wood-plastic phase change composites for thermal energy storage featuring favorable reprocessability and mechanical properties. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 252, 112186.
- Shen, Z., Qin, M., Xiong, F., Zou, R. ve Zhang, J. (2023). Nanocellulose-based composite phase change materials for thermal energy storage: status and challenges. *Energy & Environmental Science*, 16(3), 830-861.
- Silakhori, M., Fauzi, H., Mahmoudian, M. R., Metselaar, H. S. C., Mahlia, T. M. I., ve Khanlou, H. M. (2015). Preparation and thermal properties of form-stable phase change materials composed of palmitic acid/polypyrrole/graphene nanoplatelets. *Energy and Buildings*, 99, 189-195.
- Simpson, W., ve TenWolde, A. (1999). Physical properties and moisture relations of wood. *The Encyclopedia of Wood*. Skyhorse Publishing.
- Smythe, R. V. ve Williams, L. H. (1972). Feeding and survival of two subterranean termite species at constant temperatures. *Annals of the Entomological Society of America*, 65(1), 226-229.
- Souayfane, F., Fardoun, F. ve Biwole, P. H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. *Energy and buildings*, 129, 396-431.

- Su, W., Darkwa, J. ve Kokogiannakis, G. (2015). Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 373-391.
- Sulaiman, N. S. ve Mohamad Amini, M. H. (2022). Review on the phase change materials in wood for thermal regulative wood-based products. *Forests*, 13(10), 1622.
- Sundararajan, S., Samui, A. B. ve Kulkarni, P. S. (2017). Versatility of polyethylene glycol (PEG) in designing solid–solid phase change materials (PCMs) for thermal management and their application to innovative technologies. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(35), 18379-18396.
- Švajlenka, J. ve Kozlovská, M. (2021). Factors influencing the sustainability of wood-based constructions' use from the perspective of users. *Sustainability*, 13(23), 12950.
- Stanciu, M. D., Curtu, I., Cosereanu C., Lica, D., Nastac, S. (2012). Research regarding acoustical properties of recycled composites, *8th International Daaam Baltic Conference Industrial Engineering*, Tallinn, Estonia.
- Tan, F. L. ve Tso, C. P. (2004). Cooling of mobile electronic devices using phase change materials. *Applied thermal engineering*, 24(2-3), 159-169.
- Tang, B., Wang, L., Xu, Y., Xiu, J. ve Zhang, S. (2016). Hexadecanol/phase change polyurethane composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 1-6.
- Temiz, A., Hekimoğlu, G., Köse Demirel, G., Sarı, A. ve Mohamad Amini, M. H. (2020). Phase change material impregnated wood for passive thermal management of timber buildings. *International Journal of Energy Research*, 44(13), 10495-10505.
- Tian, Y. ve Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied energy*, 104, 538-553.
- Togun, H., Sultan, H. S., Mohammed, H. I., Sadeq, A. M., Biswas, N., Hasan, H. A., Homod, R. Z., Abdulkadhim, A. H., Yaseen, Z. M. ve Talebizadehsardari, P., (2024). A critical review on phase change materials (PCM) based heat exchanger: different hybrid techniques for the enhancement. *Journal of Energy Storage*, 79, 109840.
- Tupenaite, L., Kanapeckiene, L., Naimaviciene, J., Kaklauskas, A. ve Gecys, T. (2023). Timber construction as a solution to climate change: A systematic literature review. *Buildings*, 13(4), 976.
- Tomizawa, Y., Sasaki, K., Kuroda, A., Takeda, R. ve Kaito, Y. (2016). Experimental and numerical study on phase change material (PCM) for thermal management of mobile devices. *Applied Thermal Engineering*, 98, 320-329.

- Tyagi, V. V., & Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and sustainable energy reviews*, 11(6), 1146-1166.
- Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K. ve Akiyama, T. (2011). Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(2), 1373-1391.
- Umair, M. M., Zhang, Y., Iqbal, K., Zhang, S. ve Tang, B. (2019). Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage—A review. *Applied energy*, 235, 846-873.
- Ünal, M., Konuklu, Y. ve Paksoy, H. (2019). Thermal buffering effect of a packaging design with microencapsulated phase change material. *International Journal of Energy Research*, 43(9), 4495-4505.
- Wang, B., Fu, Q., Yi, X., Wang, L., Li, D., Liu K., Zheng Y., Su, X., Wang D., Jiao, X., Zhang, K. ve Yan, S. (2023). Phase change materials for a blood transport container to support long-term storage and transportation of red blood cells in extreme conditions. *Journal of Energy Storage*, 73, 109170.
- Wang, C., Cheng, C., Jin, T. ve Dong, H. (2022). Review on bio-based shape-stable phase change materials for thermal energy storage and utilization. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 14(5).
- Wang, L. ve Meng, D. (2010). Fatty acid eutectic/polymethyl methacrylate composite as form-stable phase change material for thermal energy storage. *Applied Energy*, 87(8), 2660-2665.
- Wang, S. ve Winistorferf, P. M. (2000). Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part II. Methodology of vertical density formation under dynamic conditions. *Wood and Fiber Science*, 220-238.
- Wang, S., Winistorfer, P. M. ve Young, T. M. (2004). Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part III. MDF density formation during hot-pressing. *Wood and fiber science*, 17-25.
- Wen, R., Zhang, X., Huang, Y., Yin, Z., Huang, Z., Fang, M., Liu, Y. ve Wu, X. (2017). Preparation and properties of fatty acid eutectics/expanded perlite and expanded vermiculite shape-stabilized materials for thermal energy storage in buildings. *Energy and Buildings*, 139, 197-204.
- Wen, R., Zhang, W., Lv, Z., Huang, Z. ve Gao, W. (2018). A novel composite Phase change material of Stearic Acid/Carbonized sunflower straw for thermal energy storage. *Materials Letters*, 215, 42-45.

- Winistorfer, P. M., Moschler, W. W., Wang, S., DePaula, E. ve Bledsoe, B. L. (2000). Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part I. In-situ density measurement of the consolidation process. *Wood and fiber science*, 209-219.
- Winistorfer, P. M., Xu, W. ve Wimmer, R. (1995). Application of a drill resistance technique for density profile measurement in wood composite panels. *Forest products journal*, 45(6), 90.
- Wong, E. D., Zhang, M., Wang, Q. ve Kawai, S. (1998). Effects of mat moisture content and press closing speed on the formation of density profile and properties of particleboard. *Journal of Wood Science*, 44, 287-295.
- Wu S. (2010). Heat energy storage and cooling in buildings, *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, Matthew R. Hall (Ed.), Woodhead Publishing, 101-126.
- Wu, S., Yan, T., Kuai, Z. ve Pan, W. (2020). Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review. *Energy Storage Materials*, 25, 251-295.
- Wu, Z. G. ve Zhao, C. Y. (2011). Experimental investigations of porous materials in high temperature thermal energy storage systems. *Solar Energy*, 85(7), 1371-1380.
- Yang, L., Yan, H. ve Lam, J. C. (2014). Thermal comfort and building energy consumption implications—a review. *Applied energy*, 115, 164-173.
- Yang, Z., Deng, Y., & Li, J. (2019). Preparation of porous carbonized woods impregnated with lauric acid as shape-stable composite phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 150, 967-976.
- Yu, Q., Wang, Y., Ye, H., Sheng, Y., Shi, Y., Zhang, M., Fan, W., Yang, R., Xia, C. ve Ge, S. (2021). Preparation and properties of wood plastic composites with desirable features using poplar and five recyclable plastic wastes. *Applied Sciences*, 11(15), 6838.
- Xia, L., Zhang, P. ve Wang, R. Z. (2010). Preparation and thermal characterization of expanded graphite/paraffin composite phase change material. *Carbon*, 48(9), 2538-2548.
- Xu, J., Sugawara, R., Widyorini, R., Han, G. ve Kawai, S. (2004). Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core. *Journal of Wood Science*, 50, 62-67.

- Xu, J., Yang, T., Xu, X., Guo, X. ve Cao, J. (2020). Processing solid wood into a composite phase change material for thermal energy storage by introducing silica-stabilized polyethylene glycol. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 139, 106098.
- Xu, W. (1999). Influence of vertical density distribution on bending modulus of elasticity of wood composite panels: a theoretical consideration. *Wood and fiber science*, 277-282.
- Xu, W. ve Winistorfer, P. M. (1995). Layer thickness swell and layer internal bond of medium density fiberboard and oriented strandboard. *Forest products journal*, 45(10), 67.
- Yang, H., Wang, Y., Yu, Q., Cao, G., Sun, X., Yang, R., Zhang, Q., Liu, F., Di, X., Li, J., Wang, C. ve Li, G. (2018). Low-cost, three-dimension, high thermal conductivity, carbonized wood-based composite phase change materials for thermal energy storage. *Energy*, 159, 929-936.
- Young, T. M., Winistorfer, P. M. ve Wang, S. (1999). Multivariate control charts of MDF and OSB vertical density profile attributes. *Forest Products Journal*, 49(5), 79.
- Yu, H., Li, C., Zhang, K., Tang, Y., Song, Y. ve Wang, M. (2020). Preparation and thermophysical performance of diatomite-based composite PCM wallboard for thermal energy storage in buildings. *Journal of Building Engineering*, 32, 101753.
- Zahir, M. H., Irshad, K., Shafiullah, M., Ibrahim, N. I., Islam, A. K., Mohaisen, K. O. ve Sulaiman, F. A. A. (2023). Challenges of the application of PCMs to achieve zero energy buildings under hot weather conditions: A review. *Journal of Energy Storage*, 64, 107156.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F. ve Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*, 23(3), 251-283.
- Zhang, X., Wen, R., Huang, Z., Tang, C., Huang, Y., Liu, Y., Fang, M., Wu, X., Min, X. ve Xu, Y. (2017). Enhancement of thermal conductivity by the introduction of carbon nanotubes as a filler in paraffin/expanded perlite form-stable phase-change materials. *Energy and Buildings*, 149, 463-470.
- Zhang, X., Yin, Z., Meng, D., Huang, Z., Wen, R., Huang, Y., Min X., Liu Y., Fang M. ve Wu X. (2017). Shape-stabilized composite phase change materials with high thermal conductivity based on stearic acid and modified expanded vermiculite. *Renewable Energy*, 112, 113-123.

- Zhang, W., Sun, H., Zhu, C., Wan, K., Zhang, Y., Fang, Z. ve Ai, Z. (2018). Mechanical and water-resistant properties of rice straw fiberboard bonded with chemically-modified soy protein adhesive. *RSC advances*, 8(27), 15188-15195.
- Zhang, Y. P., Lin, K. P., Yang, R., Di, H. F. ve Jiang, Y. (2006). Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings. *Energy and buildings*, 38(10), 1262-1269.
- Zhao, C. Y. ve Wu, Z. G. (2011). Heat transfer enhancement of high temperature thermal energy storage using metal foams and expanded graphite. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(2), 636-643.
- Zhao, K., Wang, J., Xie, H., ve Guo, Z. (2023). Microencapsulated phase change n-Octadecane with high heat storage for application in building energy conservation. *Applied Energy*, 329, 120284.
- Zhou, X. Y., Zheng, F., Li, H. G. ve Lu, C. L. (2010). An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers. *Energy and Buildings*, 42(7), 1070-1074.
- Zhu, F., Zhang, C. ve Gong, X. (2017). Numerical analysis on the energy storage efficiency of phase change material embedded in finned metal foam with graded porosity. *Applied Thermal Engineering*, 123, 256-265.
- Zou, D., Liu, X., He, R., Zhu, S., Bao, J., Guo, J., Hu Z. ve Wang B. (2019). Preparation of a novel composite phase change material (PCM) and its locally enhanced heat transfer for power battery module. *Energy Conversion and Management*, 180, 1196-1202.
- Zou, N. Y. (2008). *Thermal Insulation Materials for Wall and Roof*. Chemical Industry Publish House, Beijing.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Samsun/Bafra’da tamamlamıştır. 2007 yılında Bartın Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümüne kayıt yaptırmıştır ve lisans öğrenimini 2012 yılında tamamlamıştır. 2012-2015 yılları arasında KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2019 yılında YÖK’ün 100/2000 öncelikli alanlar “Orman Ürünleri ve Teknolojisi” programı kapsamında, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Orman Biyolojisi ve Odun Koruma Teknolojisi Bilim Dalında doktora programına başladı. Doktora tezi çalışması, TÜBİTAK (Ufuk 2020, 120N500 nolu proje) ile desteklenmiştir. 3 adet uluslararası (SCI ve SCI indeksli) dergilerde yayımlanmış makalesi, 2 adet uluslararası dergilere gönderilmiş değerlendirme aşamasında olan makalesi, 15 adet ulusal ve uluslararası konferans ve sempozyum kitaplarında yer almış bildirisi bulunmaktadır. İyi derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.