

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR DİSK İÇERİSİNDE BULUNAN FAZ DEĞİŞTİREN MADDENİN ÇARPAN
JET İLE ERİTME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Burak KIYAK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İ. Gökhan AKSOY

MART 2024

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR DİSK İÇERİSİNDE BULUNAN FAZ DEĞİŞTİREN MADDENİN ÇARPAN
JET İLE ERİTME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Burak KIYAK
(36183618033)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İ. Gökhan AKSOY
Eş Danışman: Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP

MART 2024

İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

**BİR DİSK İÇERİSİNDE BULUNAN FAZ DEĞİŞTİREN MADDENİN
ÇARPAN JET İLE ERİTME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Tezi Hazırlayan: Burak KIYAK
Doktora Tezi

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgemedi beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. İ. Gökhan AKSOY'a ve ikinci danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hakan F. ÖZTOP'a,

Çalışmalarında ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme ve tez yazım sürecinde bana manevi destek veren sevgili eşim Beyza KIYAK'a

Tezin uygulama aşamasında FDK-2022-3092 proje numarası ile sağladıkları maddi destekten dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) birimine ve tez süreci boyunca sunduğu burs imkânı için TÜBİTAK BİDEB'e,

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Bir Disk İçerisinde Bulunan Faz Değiştiren Maddenin Çarpan Jet ile Eritme Prosesinin Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Burak KIYAK



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	i
ONUR SÖZÜ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amaç ve Kapsamı.....	2
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. Kanat Kullanımının Etkisi	5
2.2. Nanopartikül Kullanımının Etkisi.....	6
2.3. Metal Köpük Kullanımının Etkisi.....	6
2.4. Konteyner Eğim Açısının Etkisi	7
2.5. Konteyner Geometrisinin Etkisi	8
2.6. Manyetik Alan Etkisi	8
2.7. Birleştirilmiş Isı Transferi Arttırma Yöntemleri.....	9
2.8. Çalışmanın Özgün Değeri.....	9
3. GENEL BİLGİLER	11
3.1. Termal Enerji Depolama Yöntemleri.....	11
3.1.1. Kimyasal ısı depolama	12
3.1.2. Duyulur ısı depolama	13
3.1.3. Gizli ısı depolama.....	15
3.2. Faz Değiştiren Malzemeler	17
3.2.1. FDM'lerin sınıflandırılması.....	19
3.2.1.1. Organik FDM'ler.....	20
3.2.1.2. İnorganik FDM'ler	24
3.2.1.3. Ötektik FDM'ler.....	26
3.2.2. FDM'lerin avantajları ve dezavantajları.....	27
3.2.3. FDM'lerin kullanım alanları.....	27
4. MATERYAL VE METOT	29
4.1. Deney Düzenegi.....	29
4.2. Deney Numunesinin Üretimi	31

4.2.1.	Konteyner geometrisi	32
4.2.2.	FDM seçimi	33
4.2.3.	Termokuplların konumlandırılması.....	33
4.3.	Sayısal Çalışma.....	34
4.3.1.	Fiziksel model	35
4.3.2.	Matematiksel model	36
4.3.2.1.	SST k- ω model	39
4.3.3.	Başlangıç ve sınır şartları	40
4.3.4.	Ağ hassasiyeti çalışması ve HAD modelinin doğrulanması.....	40
4.4.	İncelenen parametreler.....	42
5.	BULGULAR VE TARTIŞMA	44
5.1.	H/D Oranının Etkisi	44
5.1.1.	0° konteyner açısı için sonuçlar.....	44
5.1.2.	45° konteyner açısı için sonuçlar.....	47
5.1.3.	90° konteyner açısı için sonuçlar.....	49
5.2.	Konteyner Eğim Açısının Etkisi	52
5.2.1.	H/D = 0.4 için sonuçlar	52
5.2.2.	H/D = 0.5 için sonuçlar	55
5.2.3.	H/D = 0.6 için sonuçlar	57
5.3.	Reynolds Sayısının Etkisi	60
5.3.1.	0° konteyner açısı için sonuçlar.....	60
5.3.2.	45° konteyner açısı için sonuçlar.....	61
5.3.3.	90° konteyner açısı için sonuçlar.....	62
5.4.	Jet Açısının Etkisi	64
5.4.1.	0° konteyner açısı için sonuçlar.....	64
5.4.2.	45° konteyner açısı için sonuçlar.....	66
5.4.3.	90° konteyner açısı için sonuçlar.....	68
5.5.	FDM Erime Yapısının İncelenmesi	70
5.6.	Enerji Depolama Performansının İncelenmesi	79
6.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82
	KAYNAKLAR.....	86
	ÖZGEÇMİŞ	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1: Farklı enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması	12
Çizelge 3.2: GID sistemlerinde kullanılan tipik malzemeler	15
Çizelge 3.3: FDM'leri değerlendirmede kullanılan kriterler	18
Çizelge 3.4: Atom sayılarına veya zincir uzunluklarına göre parafinlerin erime noktası ve gizli füzyon ısısı	21
Çizelge 3.5: Bazı parafinlerin fiziksel özellikleri	22
Çizelge 3.6: Yağ asitlerinin erime noktası ve gizli füzyon ısıları	23
Çizelge 3.7: Tuz hidratların erime sıcaklığı ve gizli füzyon ısıları	25
Çizelge 3.8: Metaliklerin erime sıcaklığı ve gizli füzyon ısıları	26
Çizelge 3.9: Organik, inorganik ve ötektik FDM'nin avantajları ve dezavantajları	27
Çizelge 3.10: FDM'nin farklı uygulama alanları	28
Çizelge 4.1: Termofiziksel özellikler: RT25HC ve pleksiglas	33
Çizelge 4.2: $\theta = 0^\circ$ konteyner açısı için kullanılan parametreler	43
Çizelge 4.3: $\theta = 45^\circ$ konteyner açısı için kullanılan parametreler	43
Çizelge 4.4: $\theta = 90^\circ$ konteyner açısı için kullanılan parametreler	43

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: FDM'nin ısı iletkenliğini arttırmak için üzerinde çalışılan parametreler.....	4
Şekil 3.1: Termal enerji depolama sistemleri.....	11
Şekil 3.2: Bir KID sisteminde enerji depolama prensibi.....	13
Şekil 3.3: Duyulur ısı depolama sırasında sıcaklık artışı	13
Şekil 3.4: FDM'nin faz geçiş profili.....	16
Şekil 3.5: FDM'lerin sınıflandırılması	19
Şekil 3.6: Çeşitli FDM'ler için sıcaklık ve entalpi aralıkları	20
Şekil 4.1: Deney düzeneği; (a) Şematik diyagram (b) Gerçek görünüm.....	30
Şekil 4.2: Veri kaydedici.....	31
Şekil 4.3: Konteyner yapısı; (a) Gövde (b) Kapak	32
Şekil 4.4: ÇSHJ ile FDM eritme prosesi; (a) Deney düzeneğinin bir bölümü (b) Sayısal simülasyon	32
Şekil 4.5: Termokuplların konumu; (a) FDM ile doldurulmuş disk şeklindeki kabın içindeki görünüm (b) Konteynerin üst kapağına sabitlenmiş görünüm (c) Konteyner merkezinden kesit görünüm	34
Şekil 4.6: Sayısal çözüm geometrisi; (a) İzometrik görünüm (b) 2B görünüm.....	36
Şekil 4.7: HAD modelinin ağ yapısı	40
Şekil 4.8: Farklı eleman sayıları için HAD analizi sonuçları; (a) Ortalama FDM sıcaklığının karşılaştırılması (deneysel sonuç ile birlikte) (b) Sıvı fraksiyonunun karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.9: $H/D = 0.4$ için farklı zaman adımlarında deneysel ve sayısal termokupl sıcaklıklarının karşılaştırılması; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$	42
Şekil 5.1: $Re = 2235$ ve 0° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal	45
Şekil 5.2: $Re = 4470$ ve 0° konteyner açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	46
Şekil 5.3: H/D oranının 0° konteyner açısı için sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$	47
Şekil 5.4: $Re = 2235$ ve 45° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal	48
Şekil 5.5: $Re = 4470$ ve 45° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal	48
Şekil 5.6: H/D oranının 45° konteyner açısı için sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$	49
Şekil 5.7: $Re = 2235$ ve 90° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal	50
Şekil 5.8: $Re = 4470$ ve 90° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal	50
Şekil 5.9: H/D oranının 90° konteyner açısı için sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$	51
Şekil 5.10: $Re = 2235$ ve $H/D = 0.4$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	53
Şekil 5.11: $Re = 4470$ ve $H/D = 0.4$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	54
Şekil 5.12: $H/D = 0.4$ için konteyner eğim açısının sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$	54
Şekil 5.13: $Re = 2235$ ve $H/D = 0.5$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	55

Şekil 5.14: $Re = 4470$ ve $H/D = 0.5$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	56
Şekil 5.15: $H/D = 0.5$ için konteyner eğim açısının sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$	56
Şekil 5.16: $Re = 2235$ ve $H/D = 0.6$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	57
Şekil 5.17: $Re = 4470$ ve $H/D = 0.6$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	58
Şekil 5.18: $H/D = 0.6$ için konteyner eğim açısının sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$	58
Şekil 5.19: 0° konteyner açısı için Re sayısının (a) $H/D = 0.4$ (b) $H/D = 0.5$ (c) $H/D = 0.6$ için FDM'nin ortalama sıcaklığının ve (d) sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi.....	61
Şekil 5.20: 45° konteyner açısı için Re sayısının (a) $H/D = 0.4$ (b) $H/D = 0.5$ (c) $H/D = 0.6$ için FDM'nin ortalama sıcaklığının ve (d) sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi.....	62
Şekil 5.21: 90° konteyner açısı için Re sayısının (a) $H/D = 0.4$ (b) $H/D = 0.5$ (c) $H/D = 0.6$ için FDM'nin ortalama sıcaklığının ve (d) sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi.....	63
Şekil 5.22: 0° konteyner açısı için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	65
Şekil 5.23: Jet açısının 0° konteyner açısında sıvı fraksiyonun zamana göre değişimi üzerine etkisi.....	65
Şekil 5.24: 45° konteyner açısı ve $Re = 2235$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	66
Şekil 5.25: 45° konteyner açısı ve $Re = 4470$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	67
Şekil 5.26: Jet açısının 45° konteyner açısında sıvı fraksiyonun zamana göre değişimi üzerine etkisi.....	68
Şekil 5.27: 90° konteyner açısı ve $Re = 2235$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	68
Şekil 5.28: 90° konteyner açısı ve $Re = 4470$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal.....	69
Şekil 5.29: Jet açısının 90° konteyner açısında sıvı fraksiyonun zamana göre değişimi üzerine etkisi.....	70
Şekil 5.30: 0° konteyner açısında $H/D = 0.4$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması	71
Şekil 5.31: 0° konteyner açısında FDM içerisinde akım çizgileri ile hız dağılımı	72
Şekil 5.32: 0° konteyner açısında $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması	72
Şekil 5.33: 0° konteyner açısında $H/D = 0.6$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması	73
Şekil 5.34: $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıcak hava jetinin çarptığı pleksiglas kap yüzeyindeki sıcaklık dağılımı: (a) termal kamera tarafından çekilen deneysel termal görüntü (b) HAD modeli	74
Şekil 5.35: 45° konteyner açısında $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması	75
Şekil 5.36: 45° konteyner açısında FDM içerisinde akım çizgileri ile hız dağılımı	76
Şekil 5.37: 90° konteyner açısında $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması	78

Şekil 5.38: 90° konteyner açısında FDM içerisinde akım çizgileri ile hız dağılımı	79
Şekil 5.39: 0° konteyner açısında $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ için deneysel ve sayısal olarak depolanan enerjiler	80
Şekil 5.40: 45° konteyner açısında $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ için deneysel ve sayısal olarak depolanan enerjiler	80
Şekil 5.41: 90° konteyner açısında $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ için deneysel ve sayısal olarak depolanan enerjiler	81



SEMBOLLER VE KISALTMALAR

A_{lapa}	: Lapa bölge sabiti
β	: Termal genleşme
C	: Özgül ısı
dk	: Dakika
Φ	: Jetin konteyner yüzeyine çarpma açısı
F_2	: Karıştırma fonksiyonu
g	: Yerçekimi ivmesi
H	: Entalpi
H/D	: Jet-konteyner arası mesafenin konteyner çapına oranı
h_1	: Duyulur entalpi
h_{ref}	: Referans sıcaklıktaki entalpi
k	: Termal iletkenlik
k_1	: Türbülans kinetik enerji
m	: Kütle
μ	: Dinamik viskozite
P	: Basınç
Q	: Depolanan ısı
ρ	: Yoğunluk
Re	: Reynolds sayısı
S	: Momentum kaynak terimi
S_1	: Gerinim hızı
θ	: Konteyner eğim açısı
T_{ref}	: Referans sıcaklığı
T_k	: Katılaşma sıcaklığı
T_s	: Erime sıcaklığı
t	: Zaman
v	: Hız
Y	: Sıvı fraksiyonu
ω	: Spesifik dağılım hızı
ÇSHJ	: Çarpan Sıcak Hava Jeti
DID	: Duyulur Isı Depolama
FDM	: Faz Değiştiren Malzeme
GID	: Gizli Isı Depolama
HAD	: Hesaplamalı Akışkan Dinamiği
KID	: Kimyasal Isı Depolama
TED	: Termal Enerji Depolama

ÖZET

Doktora Tezi

BİR DİSK İÇERİSİNDE BULUNAN FAZ DEĞİŞTİREN MADDENİN ÇARPAN JET İLE ERİTME PROSESİNİN SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

BURAK KIYAK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

96+xi sayfa

2024

Danışman: Prof. Dr. İ. Gökhan AKSOY

Faz değıştiren malzemeler (FDM), sabit bir sıcaklıkta ve düşük hacimsel değışimde yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahiptirler. Enerji depolama ve geri kazanım süreçlerindeki verimliliği artırmak için, FDM'lerin ısı iletkenliğinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Geleneksel yöntemlerin yanı sıra, yenilikçi teknolojiler ve gelişmiş malzemeler, FDM'lerin termal iletkenliği konusundaki kısıtlamaları aşmak için kullanılmaktadır.

Bu çalışmada FDM eritme işlemi, geleneksel yöntemlerden farklı olarak etkili ısı transferi sağlayan çarpan sıcak hava jeti (ÇSHJ) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, homojen ısı dağılımını sağlamak için konteyner dairesel bir geometride tasarlanmıştır. FDM'nin erime ve enerji depolama performansı Reynolds sayısı, konteyner açısı, sıcak hava jetinin konteyner yüzeyine çarpma açısı ve jet ile konteyner arasındaki mesafenin konteyner çapına oranı olan H/D oranı olmak üzere dört ana parametreye göre sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu parametreler için iki farklı Reynolds sayısı ($Re = 2235$ ve 4470), üç farklı konteyner açısı ($\theta = 0^\circ, 90^\circ$ ve 180°), üç farklı jet açısı ($\Phi = 45^\circ, 90^\circ$ ve 135°) ve üç farklı H/D oranı ($H/D = 0.4, 0.5$ ve 0.6) değerlendirilmiştir. Sayısal analizler, “Ansys Fluent” ticari yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışmaya en uyumlu sonuçları veren SST $k-\omega$ türbülans modeli tercih edilmiştir. Sayısal ve deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular doğrultusunda her bir parametrenin etkisi detaylı bir şekilde sunulmuş ve incelenen parametreler arasında optimum sonuç veren durumlar belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz değıştiren malzeme, Termal enerji depolama, Sıcak hava jeti, Erime

SUMMARY

Doctoral Thesis

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE MELTING
PROCESS OF PHASE CHANGE MATERIAL IN A DISC BY IMPINGING JET

Burak KIYAK

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

96+xi pages

2024

Supervisor: Prof. Dr. İ. Gökhan AKSOY

Phase change materials (PCMs) exhibit high energy storage density at a constant temperature and low volume change. To enhance efficiency in energy storage and recovery processes, it is crucial to improve the thermal conductivity of PCMs. In addition to conventional methods, innovative technologies and advanced materials are being explored to overcome the limitations on the thermal conductivity of PCMs.

In this study, the PCM melting process was conducted using an impinging hot air jet, known for its efficient heat transfer compared to conventional methods. The container was designed in a circular geometry to ensure homogeneous heat distribution. The melting and energy storage performance of the PCM was investigated both experimentally and numerically, considering four main parameters: Reynolds number, container angle, the angle of impact of the hot air jet on the container surface and the H/D ratio (the ratio of the distance between the jet and the container to the container diameter). Two different Reynolds numbers ($Re = 2235$ and 4470), three container angles ($\theta = 0^\circ$, 90° , and 180°), three jet angles ($\Phi = 45^\circ$, 90° , and 135°), and three H/D ratios ($H/D = 0.4$, 0.5 , and 0.6) were evaluated. Numerical analyses were conducted using the commercial software "Ansys Fluent," and the SST $k-\omega$ turbulence model, which yielded the most consistent results in line with the experimental study, was preferred. In accordance with the findings obtained from numerical and experimental studies, the effect of each parameter is presented in detail and the optimum results among the parameters analysed are determined.

Keywords: Phase change material, Thermal energy storage, Hot air jet, Melting

1. GİRİŞ

Dünya nüfusundaki sürekli artış, beraberinde artan bir enerji ihtiyacına sebep olmaktadır. Bu anlamda fosil yakıtlar günümüzde enerji arzının büyük bir bölümünü yönetmektedir. Bununla birlikte fosil yakıtların tüketimi sera gazı emisyonlarına neden olduğundan, enerji ve iklim sorunları dünya çapında dikkat çekmiştir. Bu durum, çevre üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle insanları yeni ve sürdürülebilir enerji kaynakları arayışına yönlendirmiştir. Enerji krizinin ve çevre kirliliğinin azaltılması için son yıllarda alternatif olarak yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilmektedir. Örneğin güneş enerjisi, tükenmez doğası, kolay erişimi ve düşük işletme maliyeti gibi avantajları sayesinde çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının coğrafi ve zamansal olarak düzensiz dağılımı, enerji arzı ile talebi arasında uyumsuzluk yaratır ve bu da enerjinin depolanma ihtiyacını gerektirir. Örneğin güneş radyasyonunun bol olduğu gündüz saatlerinde, en yüksek enerji talebi ise genellikle akşam saatlerinde, evsel sıcak su ve ısıtma için oluşur. Bu nedenle, yenilenebilir termal kaynakları kullanan sistemlerin verimli bir şekilde çalışabilmesi için termal enerji depolama (TED) sistemleri önemli bir rol oynamaktadır.

TED için farklı yaklaşımlar arasında gizli, duyulur ve termokimyasal depolama yöntemleri yer almaktadır. Faz değiştiren malzeme (FDM) ile çalışan gizli ısı depolama (GID) sistemleri, termal enerjinin depolanması için oldukça etkili bileşenlerdir. FDM'ler kimyasal stabilite, yüksek depolama yoğunluğu, düşük buhar basıncı, ısı geri kazanımı sırasında hafif sıcaklık düşüşü ve aşındırıcı olmama gibi bir dizi avantaja sahiptir [1]. Bununla birlikte, FDM'lerin düşük ısıl iletkenliği, termal depolama sistemlerinde kritik bir dezavantaj olarak kabul edilmektedir [2]. FDM'ler, ısıyı emme ve salma süreçlerini gerçekleştirirken, termal iletkenlikleri düşük olduğundan dolayı ısı transferi yavaş olmaktadır. Bu durum, depolama ve geri kazanım süreçlerinde verimliliği olumsuz etkileme ve enerji kaybına neden olma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, FDM'leri etkin bir şekilde kullanabilmek için termal iletkenliğin iyileştirilmesi ve depolama sistemlerinin tasarımında bu dezavantajın dikkate alınması önemlidir. Yenilikçi teknolojiler ve gelişmiş malzemelerin kullanımı, FDM'lerin termal iletkenliği konusundaki kısıtlamaları aşmak ve daha etkin TED sistemleri oluşturmak için umut verici çözümler sunmaktadır. Günümüze kadar, araştırmacılar FDM'lerin düşük ısıl iletkenlik sorunun çözmek için çeşitli parametreler üzerinde çalışmalar gerçekleştirmiştir. En geleneksel yöntemlerden biri, TED sistemlerinde kanatlı yapıların kullanılmasıdır. Ayrıca FDM'nin depolandığı konteynerin geometrisi ve eğim açısı gibi

faktörler de üzerinde çalışılan önemli parametrelerdendir. FDM'nin gözenekli yapılara dahil edilmesi ve yüksek ısı iletkenliğe sahip nanopartiküllerin kullanımı da ısı transferini artırmak için etkili yöntemler arasındadır. Bu parametreleri daha da optimize etmek ve yeni gelişmiş yöntemlerle FDM'ye daha etkin bir ısı transferi sağlamak için çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez çalışmasında, dairesel geometriye sahip bir konteyner içerisinde bulunan FDM'nin, geleneksel yöntemlerden farklı olarak sıcak hava jeti ile eritilmesi prosesi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılan parametreler; Reynolds sayısı (Re), konteyner açısı (θ), jet açısı (Φ) ve boyutsuzlaştırılmış bir parametre olan H/D (jet-konteyner arası mesafenin konteyner çapına oranı) oranıdır. Bu dört farklı parametrenin FDM'nin erime performansı ve enerji depolama yeteneği üzerine etkileri sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir.

1.1. Tezin Amaç ve Kapsamı

Bu tez çalışması, çarpan sıcak hava jeti (ÇSHJ) kullanılarak dairesel geometriye sahip bir konteyner içindeki FDM'nin erime sürecini incelemektedir. FDM'lerde sıklıkla karşılaşılan önemli bir zorluk, düşük ısı iletkenlik sorunudur. Bunun yanı sıra, çarpan jetler zorlanmış taşınım yoluyla ısı transferi açısından son derece etkili araçlardır. Bu iki sistem arasındaki entegrasyon üzerine yapılan araştırmalar sınırlıdır ve bu alanda bir boşluk mevcut olup geliştirilmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu tezin amacı, FDM ve çarpan jet kombinasyonunu aynı sistem içinde kullanarak, araştırmacılara bu alanda farklı bir perspektif sunmaktır.

Bu çalışma, altı bölümden oluşmaktadır ve bölüm içerikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

İlk bölümde, genel bir anlatım ile faz değiştiren malzemeler hakkında bilgi verilmiş ve tez çalışmasının içeriği hakkında özet bir açıklama yapılmıştır.

İkinci bölümde, kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu çalışmanın özgün değerini belirleyen unsurlar vurgulanmış ve literatüre katkı sağlama potansiyeli ele alınmıştır.

Üçüncü bölümde, termal enerji depolama yönetimleri açıklanmış ve faz değiştiren malzemeler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

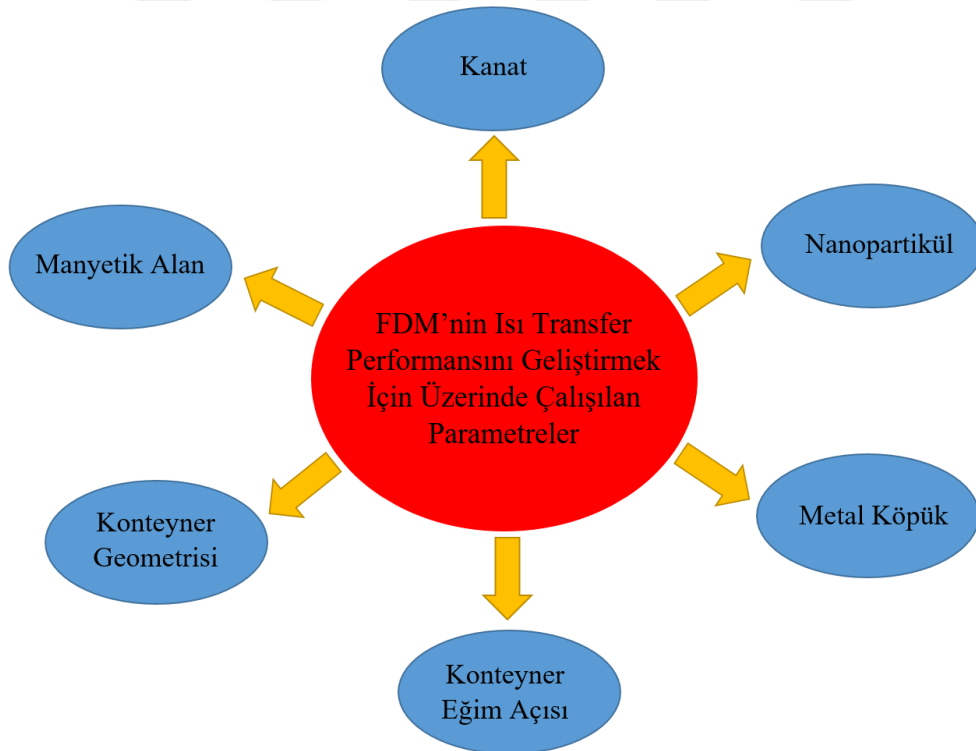
Dördüncü bölümde, çalışmada kullanılan deney düzeneği detaylı bir şekilde tanıtılmıştır. Bu kapsamda, numune üretimi ve kullanılan FDM'nin seçiminde temel alınan kriterler açıklanmıştır. Aynı zamanda, çalışmanın sayısal bölümü için oluşturulan HAD modelinin yapısı, modelde kullanılan ağ yapısı ve modelin doğrulanma süreci incelenmiş, çözümde kullanılan türbülans modeli ve yönetici denklemler detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu bağlamda, çalışmada incelenen parametreler de belirtilmiştir.

Beşinci bölümde, elde edilen bulgular farklı parametreler altında sunularak her bir parametrenin FDM erime davranışı ve enerji depolama performansı üzerindeki etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Böylece deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları karşılaştırılarak elde edilen sonuçların tutarlılığı değerlendirilmiştir.

Altıncı bölümde, elde edilen sonuçlar doğrultusunda genel bir değerlendirme yapılmış ve bu çerçevede yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

TED sistemleri, talebin düşük olduğu dönemlerde üretilen fazla enerjiyi depolamanın ve talebin yüksek olduğu zamanlarda kullanmanın bir yolunu sunar. Termal enerji, TED sistemlerinde duyulur ısı, gizli ısı veya termokimyasal reaksiyonlar gibi farklı biçimlerde depolar. GID sistemleri içinde bir FDM kullanılarak ısı depolama kapasitesi önemli ölçüde artırılabilir [3]. Bu sistemler, faz geçişi sırasında gizli füzyon ısısı yoluyla FDM'nin yüksek enerji depolama yoğunluğunu, üstün termal verimliliğini ve enerji tasarrufu özelliklerini kullanır [4]. FDM'ler, binalar [5,6], soğutma [7,8], güneş termal yönetimi [9,10] ve elektronik sistemler için termal yönetim [11,12] dahil olmak üzere çeşitli alanlarda çeşitli uygulamalara sahiptir. Verimli ısı transferi, FDM'deki şarj ve deşarj hızlarını en üst düzeye çıkarmak için hayati öneme sahiptir. Bununla birlikte, FDM'lerin kayda değer bir dezavantajı, sonuç olarak ısı transfer oranını yavaşlatan düşük termal iletkenlikleridir [13,14]. Son yıllarda, FDM'lerin ısı transfer performansını artırmak için çeşitli araştırmalar yapılmış (Şekil 2.1) ve çok sayıda etkili strateji geliştirilmiştir [15,16].



Şekil 2.1: FDM'nin ısı iletkenliğini arttırmak için üzerinde çalışılan parametreler

Mevcut çalışmaya bir temel oluşturması açısından, literatürde FDM'nin erime ve enerji depolama performansını etkileyen parametreler üzerine yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar incelenmiş ve aşağıdaki gibi kategorilere ayrılarak özetlenmiştir.

2.1. Kanat Kullanımının Etkisi

Kanatlar daha geniş bir yüzey alanı sağlayarak ısı transfer oranını artırabilirler. Bu nedenle enerji depolama ve termal yönetim problemlerinde sıkça tercih edilirler [17]. Zhao ve diğ. [18], farklı kanatçık aralığı ve malzemelerin kullanıldığı kanatlı dikdörtgen bir kutu içindeki bir FDM'nin erime özelliğini sayısal olarak araştırmışlardır. Sonuç olarak, optimum kanatçık aralığının, kanat uzunluğu altında kanat malzemesinden bağımsız olduğu ve kanat uzunluğunun artmasının erime oranını sürekli olarak artırmadığı gözlemlenmiştir. Xu ve diğ. [19] tarafından üç katmanlı yatay borulu ısı enerji depolama ünitesinde FDM'lerin erime performansını maksimize etmek için farklı kanat kombinasyonları kullanılmıştır. Optimum sonuç için, kanatların olmadığı duruma göre erime süresinde %71 oranında bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, geleneksel kanatlardan farklı olarak, maksimum avantaj sağlayacak kanat geometrisini elde etmek için farklı geometriler kullanılarak araştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, üçgen kanat [20,21], L şekilli [22,23], V şekilli [24,25] ve Y şekilli kanat [26] gibi farklı tiplerde kanat geometrileri kullanılmıştır. Öte yandan geleneksel kanat geometrilerinden farklı olarak Luo ve diğ. [27] tarafından kombine fraktal kanatlar kullanılan çalışmada, geleneksel fraktal kanat ısı değiştiricisine kıyasla FDM'nin tam erime süresinde %68'lik oranda önemli bir azalma elde etmişlerdir. Kanadın GID sistemindeki konumu, FDM eritme performansını etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır. Qin ve diğ. [28] tarafından yapılan çalışmada, en verimli kanat konumunun yüzeyin alt yarısında olduğu ve en etkili ısı iletimini sağladığını tespit etmişlerdir. Üst kanat konumuna kıyasla erime süresinde %3,6 oranında azalma gözlemlemişlerdir. FDM'nin erime davranışı üzerindeki etkisine odaklanarak kanat uzunluğu düzenlemesine dayalı sayısal bir çalışma Ji ve diğ. [29] tarafından gerçekleştirilmiştir. Daha uzun bir alt kanat ile daha kısa bir üst kanat doğal konveksiyon olgusunu geliştirdiği ve FDM'nin erime oranını iyileştirdiği sonucuna varmışlardır. Öte yandan, İsmail ve diğ. [30], bir silindir içerisindeki faz değişim sürecinde dikey eksenel kanatçıkların doğal konveksiyon üzerinde istenmeyen etkilere sahip olduğunu bulmuşlardır. Kanat yapıları ısı transferini artırma konusunda oldukça etkili elemanlar olsa da, bir TED sistemine yerleştirilen kanatların bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar, ısı tankının

maliyeti, ısı depolama tankında ağırlık artışı, üretimde zorluklar gibi sorunlardır. Bu dezavantajlar ile özellikle uygulamada karşılaşılmaktadır [31].

2.2. Nanopartikül Kullanımının Etkisi

Nanopartiküllerin FDM'lere eklenmesi, ısı iletkenliğini artırabilir ve böylece enerji depolama performansını geliştirebilir. Birçok çalışma, nanoparçacıkların varlığının FDM'lerin faz değişim hızını artırdığını göstermektedir. Bu nedenle enerji depolama uygulamalarında nano-FDM (NFDM) kullanımı tercih edilebilir [32]. Farahani ve diğ. [33] üç boyutlu silindirik termal enerji depolama sisteminde Fe_3O_4 nanopartikülleri kullanılarak FDM'nin erime sürecini incelenmişlerdir. FDM'ye %2.5 ve %5 hacim oranında nanopartikül eklemenin, nanopartikülsüz duruma göre erime süresini sırasıyla %15 ve %22 iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Bir diğer çalışmada, Sciacovelli ve diğ. [34] bir termal enerji depolama sistemindeki erime sürecini, hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) analizi kullanılarak araştırmışlardır. Çalışmalarında, doğal konveksiyonun rolünü ve termal performansı artırmak için nanoparçacık geliştirmenin etkisini analiz etmişlerdir. Hacimce %4'lük nanopartikül eklentisinin, termal iletkenlikteki artış nedeniyle erime süresinde %15'lik bir azalma sağladığını gözlemlemişlerdir.

Her etkili yöntem sağladığı birçok avantajın yanı sıra kendi içerisinde bir dezavantaj barındırmaktadır. Nanopartikülleri FDM içerisinde homojen bir şekilde dağıtmak zor olabilir ve istenmeyen birikme ve çökme uzun vadeli çalışmaları etkileyebilir [35].

2.3. Metal Köpük Kullanımının Etkisi

Bakır, alüminyum ve nikel gibi metal köpükler, nanopartiküller yerine tercih edilebilecek yüksek gözenekliliğe ve kararlı termo-fiziksel özelliklere sahip sürekli ağ yapılarına sahip olmaları nedeniyle umut verici bir potansiyele sahiptir. Metal köpükler, FDM içerisinde kullanıldığında, düşük ısı iletkenliklerine sahip FDM'lerin faz değişim sürecini hızlandırarak ve iyileştirerek daha homojen erime ve katılaşma süreci sağlar. Bu da daha kısa şarj ve deşarj sürelerine yol açar ve termal performansını artırır [36]. Enerji depolama birimi olarak bakır köpüğün kullanıldığı borulu ısı eşanjöründe FDM eritme süreci deneysel olarak Martinelli ve diğ. [37] tarafından incelenmiştir. Elde ettikleri bulgular, radyal kanatlı bakır boru ve bakır köpük ısı eşanjörü, basit bir borudan yaklaşık 10,8 kat daha hızlı eriyiğini göstermiştir. Bir diğer çalışmada, Esapour ve diğ. [38] çoklu borulu ısı eşanjöründe metal köpüğe gömülü faz değişim malzemesinin erime ve katılaşma süreçleri incelenmiştir. İki

gözeneklilik değeri olan $\varepsilon = 0.9$ ve $\varepsilon = 0.7$ için erime süresinde sırasıyla %14 ve %55 azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Zhao ve Tian [39], FDM olarak RT58'in erime ve katılaşma süreçleri üzerinde metal köpüğün etkisini araştırmak için deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Metal köpüğün eklenmesinin, genel ısı transfer hızını 3-10 kat artırabileceği sonucuna varmışlardır.

Meng ve diğ. [40] tarafından yapılan çalışmada gözenek yoğunluğunun artmasıyla erime süresinin önemli oranda azaldığı tespit edilmiştir. Isı transfer yüzey alanı arttığından bu, beklenen bir durumdur. Ancak metal köpüklerin yüksek gözenek yoğunluğa sahip olmaları üretim zorluklarının yanı sıra, TED sistemi içerisinde büyük hacim kaplayabilir ve bu nedenle FDM'in hacminde azalma olabilir. Bu durum FDM'nin toplam enerji depolama kapasitesinin azalması şeklinde bir dezavantaj olarak karşımıza çıkabilir.

2.4. Konteyner Eğim Açısının Etkisi

Bir TED sisteminde, FDM erime performansı ve enerji depolama üzerinde oldukça etkili olan bir diğer parametre, FDM'nin içinde bulunduğu konteynerin eğim açısıdır. Çünkü FDM ile dolu bir konteynerin eğim açısı, yerçekimi tarafından etkilenen doğal konveksiyonun davranışı aracılığıyla erime performansı üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir [41]. Eğim açısının ısı transfer hızı üzerindeki etkisini Saleem ve Ahmed [42], hava ile doldurulmuş üçgen bir model üzerinde sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlara göre en yüksek ısı transfer hızının 0° açıda ve en düşük hızın 90° açıda gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. Karami ve Kamkari [43], farklı eğim açıları için dikdörtgen bir konteynerde FDM'nin erime sürecini incelemişlerdir. Konteynerin eğim açısının azaltılmasıyla, erime süresinin azaldığını ve en düşük erime süresinin 0° eğim açısında, alt yüzeyden ısıtma ile elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Meng ve diğ. [44], FDM'nin termal davranışı üzerinde eğim açısının etkisini incelemek için 0° ila 360° arasında on iki eğim açısı kullanmışlardır. Eğim açısını optimize ederek, tam faz değişim süresinde %43,16'lık bir kısalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Bouzennada ve diğ. [45], FDM ile doldurulmuş dikdörtgen bir kapsülün termal davranışı üzerinde eğim açısının etkisini araştırmak amacıyla sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kapsülün eğim açısı 90° 'den 0° 'a düşükçe, erime ve enerji depolama hızlarının arttığını belirlemişlerdir.

2.5. Konteyner Geometrisinin Etkisi

FDM'nin bir konteynerdeki erime davranışı, erken aşamalarda katı FDM'nin iletkenliğinden ve sonraki aşamalarda eriyik içindeki doğal konveksiyon akımlarından etkilenir. Literatürde bu alandaki çalışma sayısı kısıtlı olmakla birlikte [46], FDM'nin termofiziksel özellikleri ve konteynerin geometrisi, doğal konveksiyon akışının belirlenmesinde çok önemli bir rol oynar. Bu nedenle FDM'nin bulunduğu konteynerin şekli ve boyutu, erime kinetiğini ve sistem içindeki sıcaklık dağılımını önemli ölçüde etkiler [47]. FDM'lerin erime davranışını optimize etmek amacıyla birçok farklı kap geometrisi üzerinde sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların hedefi, en etkili sonuçları verecek konteyner geometrisini belirlemektir. Qin ve diğ. [48], aynı kesit alanına sahip ancak farklı konfigürasyonlara sahip konteynerlerdeki FDM'nin erime davranışını ve ısı depolama performansını inceleyerek, dikdörtgen şekilli ve iç bükey ile dışa doğru katlanmış yan duvarlara sahip konteyner geometrileri arasında performans karşılaştırması yapmışlardır. Hekmat ve diğ. [3], daire, yatay elips, dikey elips, kare, üçgen, aşağı doğru ve yukarı doğru yamuk gibi altı farklı konteyner geometrisini kullanarak konteyner geometrisinin FDM erime ve katılma hızı üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

2.6. Manyetik Alan Etkisi

Önceki bölümlerde, ısı transferini artırmak için kullanılan yöntemler, pasif yöntemler olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu bölümde, manyetik alan kullanarak ısı transferini artırma yöntemi aktif bir yöntem olarak adlandırılır. Aktif yöntemler, harici bir güç gereksinimiyle çalışan yöntemlerdir [49]. Bu yöntemler, sistem üzerinde dışarıdan bir etki yaparak ısı transferini etkileyebilir ve kontrol edebilirler. Selimefendigil ve Öztıp [50], manyetik alanın FDM ile dolu bir silindirdaki hibrit nano sıvı konveksiyonu sırasında faz değişim süreci dinamikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmalarında düz ve çatallı olmak üzere iki farklı kanal tipi kullanmışlardır. Faz değişim dinamiği davranışında manyetik alanın, düz ve çatallı kanallar için ters etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Tamamen faz geçiş süresi için, çatallanan kanalda yaklaşık %146 artış, düz kanalda ise %20'lik bir azalma elde etmişlerdir. Saha [51], homojen manyetik alan ve termo-kılcal etkilere tabi ısıtılmış bir çevresel duvar ile yarı dairesel bir boşlukta galyumun katılma ve erime prosedürlerini araştırmıştır. Manyetik alan yönü, Hartmann sayısı, Rayleigh sayısı, Marangoni sayısı ve yerçekimi koşulları üzerinde ayrıntılı bir parametrik çalışma yapmıştır. Manyetik alan

varlığında, 45° manyetik açıda Hartmann sayısının 0'dan 25'e çıkarılmasıyla erime süresinin % 5,48 oranında uzadığını gözlemlemiştir.

2.7. Birleştirilmiş Isı Transferi Arttırma Yöntemleri

Literatürde ısı transferi arttırmada etkili olan farklı yöntemlerin FDM erime performansı üzerindeki etkileri; metal köpük-kanat [52–54], eğim açısı-kanat [55,56] ve nanopartikül-eğim açısı [57,58] gibi entegre sistemler kullanılarak incelenmiştir. Chen ve diğ. [59] üçgen çift kanatlı bir kapsüldeki FDM'nin erime performansına gözenekli ortam ve nanopartiküllerin etkisini araştırmıştır. Saf FDM, nano-FDM, gözenekli ortam-FDM ve nano/gözenekli ortam FDM olmak üzere dokuz farklı durum için inceleme yapmışlardır. %1 ve %2 nanopartikül ilavesinin erime performansını artırdığını, ancak %4 ilavesinin performansın olumsuz etkilediğini gözlemlemişlerdir. Benzer şekilde gözenekli ortamın tek başına kullanımı erime performansını önemli ölçüde artırırken nanopartiküllerin gözenekli ortam içindeki kullanımı, nanopartikül hacim fraksiyonuna bakılmaksızın FDM erime performansını olumsuz etkilediği sonucuna varmışlardır. Pahamli ve diğ. [1] özellikle farklı nanopartikül ilaveleri ve eğim açıları ile bir kabuk-boru ısı eşanjöründe FDM'nin erime davranışını araştırmışlardır. Erime sürecinin başlangıç aşamalarında ısı iletim mekanizmasının etkili olduğu ve erime süresinin bu parametrelerle kontrol edilebildiği gözlemlenmiştir. Öte yandan Baby ve Balaji [60] bakır bir gözenek matrisle dolu FDM tabanlı sistemin ısı transfer performansı üzerine eğim açısının etkisini incelemişlerdir. Gözenekli ortamın varlığında, eğim açısının ısı transfer performansı üzerinde herhangi önemli bir etkiye sahip olmadığını gözlemlemişlerdir.

2.8. Çalışmanın Özgün Değeri

Yapılan literatür araştırması genel olarak ele alındığında FDM'lerin düşük ısı iletkenlik sorununa çözüm olarak kanat, nanopartikül ve metal köpük kullanımı, konteyner eğim açısı ve geometrisi gibi pasif yöntemlerin yanı sıra manyetik alan gibi aktif yöntemler üzerine çalışmaların yoğunlaştığı görülmektedir. Bununla birlikte, çarpan jetler, yüksek yerel ısı transfer hızları üretme yeteneklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda soğutma veya ısıtma amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır [61,62]. Bu bağlamda Bharanitharan ve diğ. [63], endüstriyel ve otomotiv kaynaklarından egzoz ısını geri kazanmak için FDM ve jet çarpma ısı transferini kullanan birleşik bir yaklaşım önermişlerdir. Selimefendigil ve Öztöp

[64], bir manyetik alanın etkilerini göz önünde bulundurarak, faz değişim dolgulu yatak alt sistemine sahip sınırlı çoklu jet çarpma sisteminde konvektif ısı transfer performansının sayısal bir değerlendirmesini yapmışlardır. Zhang ve diğ. [65], çalışma sıvısı olarak bir mikrokapsüllenmiş FDM bulamacı kullanarak jet çarpmasının ısı transfer özelliklerini araştırmışlardır.

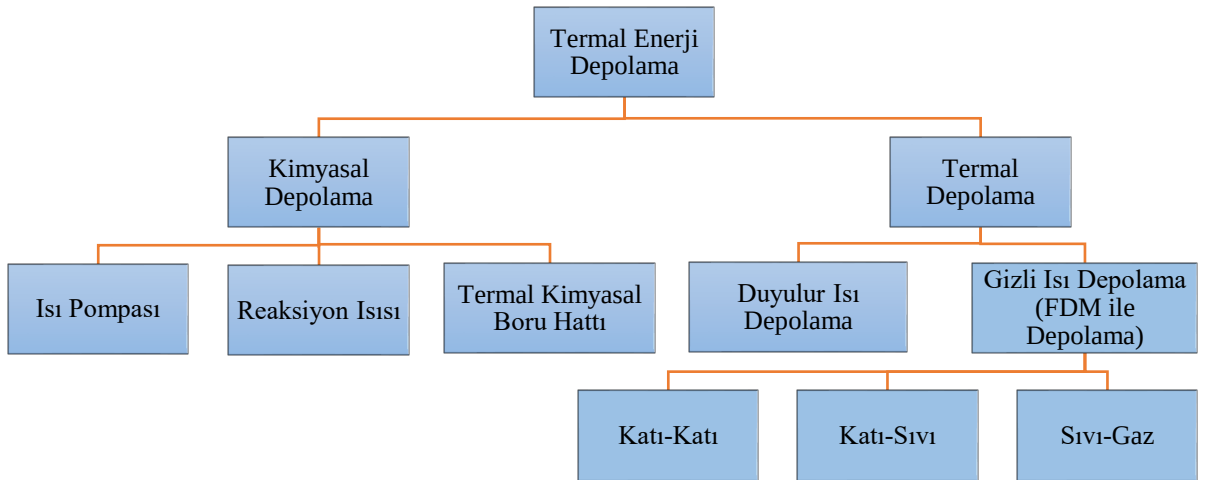
Çok sayıda sayısal ve deneysel çalışma, FDM enerji depolama ve çarpan jet ısı transferi konusunda ayrı ayrı incelenmiş olmasına rağmen, literatürde bu tekniklerin birleşimini içeren bir boşluk bulunmaktadır. Literatürden de görüleceği üzere, hava jetleri, zorlanmış taşınım sağlayarak ısı transferini önemli ölçüde arttıran araçlardır. Bu çalışmada, FDM erime ve enerji depolama performansı, etkili ısı transferi sağlayan çarpan sıcak hava jeti (ÇSHJ) ile konvektif ısı transferi kullanarak sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın temel amacı ve orijinalliği, verimli ısı transferi sağlayan hava jeti kullanarak FDM'nin düşük ısıl iletkenlik sorununu en aza indirmektir. Bu amaçla, disk şeklindeki bir konteyner içindeki FDM'nin erime ve enerji depolama performansı, bir ÇSHJ kullanarak hem sayısal hem de deneysel olarak kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu yenilikçi çalışmanın sonuçları, çeşitli mühendislik sistemlerinin termal yönetiminde, tasarımında ve optimizasyonundaki ilerlemelere katkıda bulunma ve bu alanda araştırmacılara farklı bir bakış açısı sunma potansiyeline sahiptir.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Ticari, endüstriyel ve hizmet sektörlerinin enerji talepleri, günlük, haftalık ve mevsimsel döngülere tabi olarak dalgalanmaktadır. Bu talepler, koordine bir şekilde çalışan TED sistemleri yardımıyla karşılanabilir. TED sistemlerinin, mekân ve su ısıtma, soğutma, iklimlendirme ve benzeri termal uygulamalar için kullanımları son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Bu sistemler, termal enerji ekipmanlarının daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayarak ve ekonomik açıdan büyük çaplı enerji dönüşümlerini kolaylaştırarak büyük bir avantaj sağlamaktadır [66].

İnsanlığın büyük ölçekteki ısı enerji tüketimi nedeniyle, termal enerji yönetimi uygulamalarındaki herhangi bir iyileştirme topluma önemli faydalar sağlayabilir. Termal enerji yönetimindeki önemli bir bileşen, termal enerjinin depolanması prosesidir [67]. Termal enerji, bir maddenin sıcaklığını yükselterek veya düşürerek (yani belirgin ısını değiştirerek), bir maddenin fazını değiştirerek (yani gizli ısını değiştirerek) veya bu iki yöntemin bir kombinasyonu ile depolanabilir. TED, yüksek veya düşük sıcaklıktaki enerjinin geçici olarak depolanması anlamına gelir ve termal enerjinin arz-talep arasındaki uyumsuzluğunu dengeleme açısından önemli bir araçtır [66]. Şekil 3.1’de farklı termal enerji depolama yöntemleri gösterilmektedir. Burada sınıflandırma genel olarak, kimyasal depolama ve termal depolama (duyulur ısı ve gizli ısı) şeklinde yapılabilir. Farklı TED sistemlerinin özellikleri Çizelge 3.1’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.1: Termal enerji depolama sistemleri [68]

Çizelge 3.1: Farklı enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması [69]

Kriter	Termokimyasal Enerji Depolama Sistemi	Duyulur Enerji Depolama Sistemi	Gizli Enerji Depolama Sistemi
Uygulama	Son derece karmaşık sistem	Kullanımı kolay	Orta düzeyde karmaşık sistem
Hacimsel yoğunluk	Yüksek	Çok düşük	Orta derece
Isı kayıpları	Isı kaybı yok	Maksimum	Orta derece
Depolama süresi	Mevsimler boyunca depolanabilir	Birkaç saat	Birkaç saat
Depolama sıcaklığı	Oda sıcaklığı	Sıcaklık aralıkları	Faz değişim sıcaklığı

3.1.1. Kimyasal ısı depolama

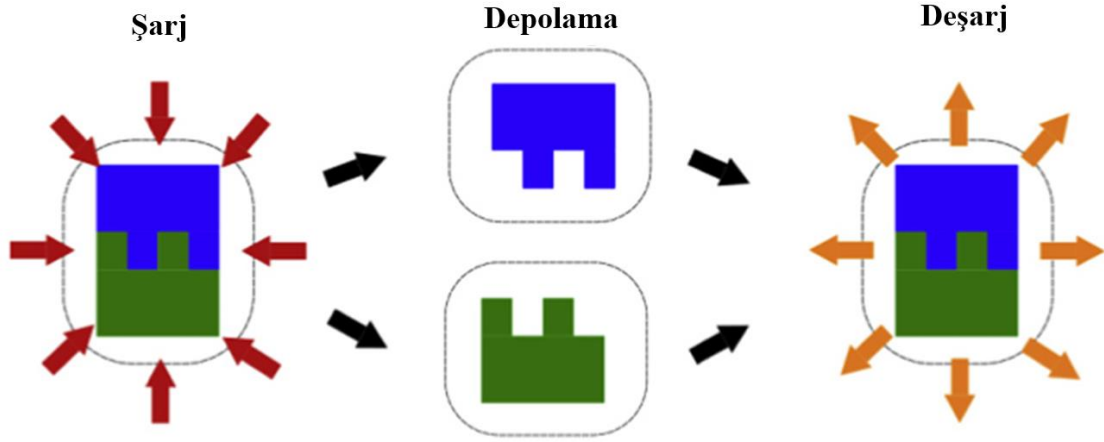
Kimyasal ısı depolama (KID) yüksek enerji yoğunluğu, yüksek verimlilik ve yüksek çalışma sıcaklığı ile karakterize edilir. KID, tersinir bir kimyasal reaksiyon yoluyla elde edilir. Şarj/deşarj döngüsünde yer alan moleküllerin kimyasal bağlarında potansiyel kimyasal enerji tutulur. Bu enerji depolama türü, tüm TED sistemleri arasında en yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, ancak reaksiyon verimliliği zamanla azalır [70].

KID sistemleri, endotermik ve ekzotermik reaksiyonlar sonucu ısıyı depolayan ve salan termokimyasal malzemeler kullanır. Şarj işlemi sırasında A malzemesine ısı uygulanır ve bunun sonucunda B + C olmak üzere iki parça ayrılır. Deşarj prosesi gerekli olana kadar ayrıışan reaksiyon ürünleri kolayca ayrılabilir ve depolanabilir. Daha sonra B ve C ürünleri uygun basınç ve sıcaklık koşullarında karıştırılarak enerji açığa çıkar [71].



Sorpsiyon tabanlı KID sisteminin şarj, depolama vedeşarj süreçleri Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Şarj etme, ısıнын dışarıdan sağlandığı endotermik bir süreçtir ve sonuç olarak sorbent ve sorbat ayrışır. Ayrışan malzemeler ortam sıcaklığında ayrı olarak

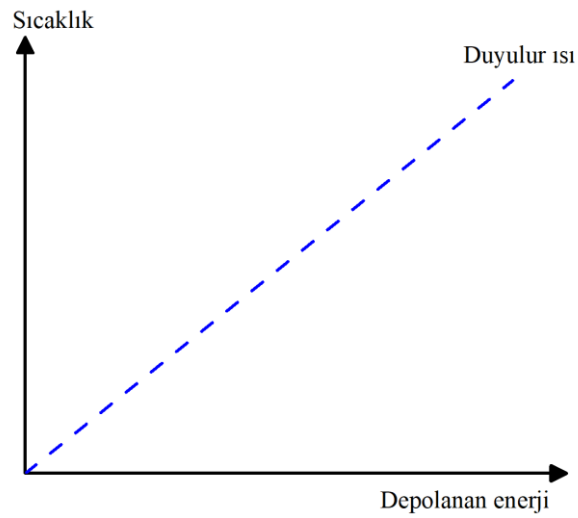
depolanabilir. Deşarj işlemi sırasında sorbent ve sorbat, ısının üretildiği orijinal substratı oluşturmak üzere bir araya getirilir. Bu işlem, açığa çıkan ısının kullanılabileceği ekzotermik bir reaksiyondur [72].



Şekil 3.2: Bir KID sisteminde enerji depolama prensibi

3.1.2. Duyulur ısı depolama

Duyulur ısı depolama (DID), ısı depolamanın en yaygın yöntemidir ve aynı zamanda en basit ve kolay ısı depolama teknolojisi biçimidir. Duyulur ısı, bir sistemin fazını değiştirmeyen ancak depolama ortamının sıcaklığını değiştiren ısıdır.



Şekil 3.3: Duyulur ısı depolama sırasında sıcaklık artışı [70]

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi depolanan ısıya göre sıcaklık doğrusal olarak değişir ve bu değişim malzemenin özgül ısı kapasitesine bağlıdır. Bu enerji depolama yönteminin dezavantajları arasında düşük enerji yoğunluğu ve herhangi bir sıcaklıkta termal enerji kaybı bulunmaktadır [70].

Duyulur ısının depolanması, termal enerjinin bir katı veya sıvının sıcaklığını artırarak depolandığı bir süreçtir. DID sistemi, şarj ve deşarj aşamaları boyunca malzemenin ısı kapasitesini ve sıcaklık değişimini kullanmaktadır. Depolanan ısı miktarı, ortamın spesifik ısısına, sıcaklık değişimine ve depolama malzemesinin kütlesine bağlı olarak değişmektedir [5].

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT \quad (3.2)$$

$$= m \bar{C}_p (T_f - T_i) \quad (3.3)$$

Burada, Q depolanan ısı miktarını ve m, C_p, T_i ve T_f sırasıyla, ısı depolayan malzemenin kütlesini, özgül ısısını, ilk ve son sıcaklıklarını temsil etmektedir. Ayrıca $\bar{C}_p$, sıcaklık değerine bağlı olarak değişkenlik gösteren özgül ısının ortalama değeridir.

Gerekli herhangi bir sıcaklık aralığında çok sayıda malzeme mevcuttur. Bu nedenle depolama malzemesi genellikle ısı kapasitesine ve depolama için mevcut alana göre seçilir. Gazlar çok düşük hacimsel ısı kapasitesine sahip olduklarından dolayı duyulur ısı veya soğuk depolama için kullanılmazlar. Çizelge 3.2'de, DID sistemlerinde kullanılan bazı yaygın malzemeler ve özellikleri verilmiştir [66].

Çizelge 3.2: GID sistemlerinde kullanılan tipik malzemeler [66]

Malzeme	Yoğunluk [kg/m ³]	Özgül ısı [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
Ahşap	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
Çakıllı toprak	2050	1840	3.77
Manyetit	5177	752	3.89
Su	988	4182	4.17

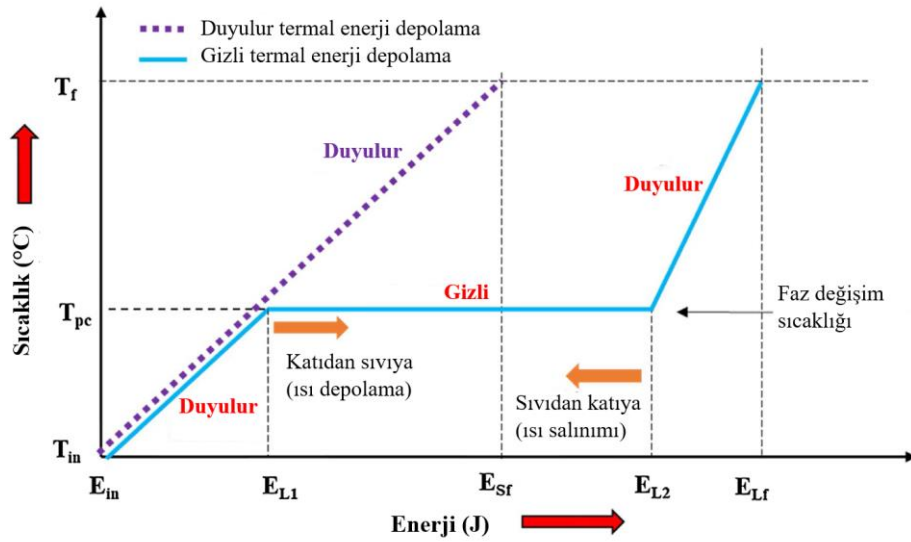
Su, düşük maliyetli olması ve yüksek özgül ısıya ve hacimsel termal kapasiteye sahip olması nedeniyle DID sistemleri için mevcut en iyi sıvı gibi görünmektedir. Ancak 100 °C'nin üzerinde, suyun basınçlı olmasından dolayı yağlar, erimiş tuzlar ve sıvı metaller gibi malzemeler tercih edilir. Hava ısıtma uygulamaları için kaya veya metal yatak tipi depolama malzemeleri kullanılmaktadır [73].

3.1.3. Gizli ısı depolama

Zamana bağlı enerji kaynaklarının etkili kullanımı, enerji arzı ve talebi arasındaki zaman ve oran uyumsuzluğunu azaltmak için uygun TED yöntemlerini gerektirir. TED, güneş kolektörleri, biyoyakıt yakıcılar, ısı pompaları ve yoğun olmayan elektrik jeneratörleri gibi çeşitli enerji teknolojileriyle entegre edilebildiği için yüksek derecede esneklik sağlar. Bir maddenin bir fazdan diğerine geçmesi sırasında transfer edilen ısıya gizli ısı denir. Gizli ısı

değişimi, belirli bir ortam için, özgül ısısıyla ilgili olan, duyulur ısı değişiminden genellikle çok daha yüksektir [66].

Gizli ısı depolama (GID) malzemeleri, fiziksel durumdaki bir değişiklikle enerjiyi depolama veya salma özelliklerinden dolayı FDM'ler olarak bilinir. GID durumunda enerji depolama yoğunluğu artar ve dolayısıyla depolama için gerekli olan hacim azalır (Şekil 3.4). Isı, esas olarak faz değiştirme işleminde depolanır (oldukça sabit bir sıcaklıkta) ve doğrudan maddenin gizli ısısına bağlıdır. FDM'leri kullanan bir GID sisteminin kullanılması, termal enerjiyi depolamanın etkili bir yoludur ve yüksek enerji depolama yoğunluğu ve depolama sürecinin izotermal doğası gibi avantajlara sahiptir [71].



Şekil 3.4: FDM'nin faz geçiş profili [74]

DID malzemesinin aksine, FDM'de bir faz geçişi olduğunda (katı-sıvı, sıvı-gaz ve katı-gaz) enerji depolanır veya salınır. Sıcaklığın artmasıyla FDM, DID malzemesi gibi ısıyı faz geçiş sıcaklığına kadar emmeye başlar, ardından malzeme içindeki kimyasal bağlar kopar ve FDM sabit bir sıcaklıkta çok büyük enerjiyi emer. FDM ile GID sisteminde depolanan enerji miktarı şu şekilde verilir [74]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad (3.4)$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m\Delta h_m + C_{lp}(T_f - T_m)] \quad (3.5)$$

Burada, Q depolanan ısı miktarını, m, C_p, T_i, T_f ve T_m sırasıyla, ısı depolayan malzemenin kütlesini, özgül ısısını, ilk, son ve erime sıcaklıklarını temsil etmektedir. Öte yandan a_m kütle fraksiyonunu, Δh_m erime ısısının kütleye oranını ve C_{lp}, T_m ve T_f arasındaki ortalama özgül ısı değerini göstermektedir [73].

3.2. Faz Değiştiren Malzemeler

FDM'lere dayalı TED sistemleri, DID sistemlerine kıyasla daha etkili bir alternatif olarak kabul edilmektedir. Ayrıca bu sistemler DID sistemlerine kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğu potansiyeli taşımaktadır. Şekil 3.1'de gösterildiği üzere, GID sistemlerinde kullanılan FDM'ler katı-katı, katı-sıvı ve sıvı-gaz tiplerini içermektedir.

Katı-katı geçişlerde ısı, kristalin bir yapıdan diğerine geçiş sırasında depolanır. Bu geçişler genellikle katı-sıvı geçişlere oranla daha az miktarda gizli ısı ve hacim değişimleri ile karakterize edilir. Katı-katı faz değişim malzemeleri daha esnek kap gereksinimleri ve geniş tasarım esnekliği sunar. Öte yandan, sıvı-gaz geçişleri daha yüksek buharlaşma gizli ısıya sahip olmalarına rağmen, faz değişiminde büyük hacim değişiklikleri söz konusu olduğundan muhafaza zorlukları ile karşılaşılabilir. Bu durum, bu tür malzemelerin termal enerji depolama sistemlerinde uygulanmasını sınırlar. Katı-sıvı geçişler, sıvı-gaz geçişlere göre daha az miktarda gizli ısıya sahip olsalar da, küçük hacim değişiklikleri (yaklaşık %10 veya daha az) içerirler. Bu sebeple, katı-sıvı faz değişimleri termal enerji depolama sistemlerinde en ilgi çekici ve ekonomik açıdan cazip seçenek olarak değerlendirilir [75].

Erime noktası (erime sıcaklığı ve erime entalpisi), bir FDM seçerken göz önünde bulundurulması gereken temel hususlardan biridir. FDM'nin çalışacağı ortam dikkate alındığında, erime noktası, ısı besleme sıcaklığından düşük ve ortam sıcaklığından yüksek olmalıdır. TED malzemesinin seçimi, dikkate alınması gereken parametre sayısı göz önüne alındığında oldukça karmaşık bir süreçtir [70].

Çok sayıda organik ve inorganik FDM, 0–120 °C sıcaklık aralığında yüksek bir füzyon ısısıyla erir. Bununla birlikte, TED sistemlerinde ısı depolama malzemeleri olarak kullanılmaları için FDM'lerin ayrıca arzu edilen belirli termodinamik, kinetik, kimyasal, teknik ve ekonomik özelliklere sahip olması gerekir. FDM'leri değerlendirirken dikkate alınan kriterlerden bazıları Çizelge 3.3'te verilmiştir:

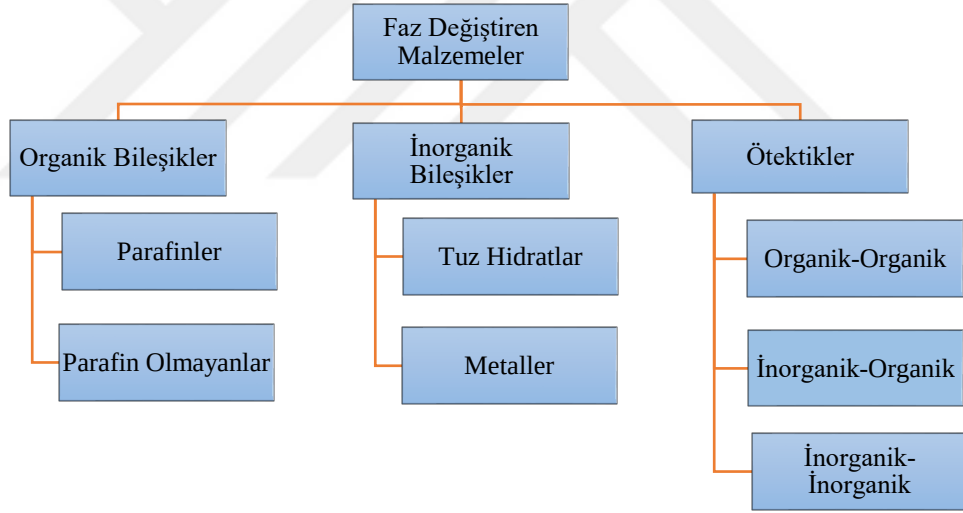
Çizelge 3.3: FDM'leri değerlendirmede kullanılan kriterler [66]

Termodinamik kriterler	• İstenen çalışma sıcaklığında bir erime noktası, • Birim kütle başına yüksek gizli füzyon ısısı; böylece daha az miktarda malzeme belirli miktarda enerji depolar, • Malzemenin daha az hacim kaplaması için yüksek yoğunluk, • Yüksek bir özgül ısı; böylece önemli ölçüde duyulur TED meydana gelebilir, • Yüksek termal iletkenlik; böylece şarj ve deşarj için küçük sıcaklık farkları gerekir, • Uyumlu erime; yani sıvı ve katı fazların homojen olması için malzeme tamamen erimelidir (bu, malzemenin kimyasal bileşiminde değişikliklere neden olan katı ve sıvı arasındaki ayrışmadan dolayı yoğunluk farkını önler, • Faz geçişi sırasında küçük hacim değişiklikleri; böylece basit bir konteyner ve ısı eşanjörü kullanılabilir.
Kinetik kriter	• Kristalleşme sırasında az veya hiç aşırı soğuma olmamalıdır, yani erime noktasında eriyik kristalleşmelidir. Bu kriter, kristallerin yüksek oranda çekirdeklenme ve büyüme hızı ile elde edilebilir. Aşırı soğumanın bastırılması, depolama malzemesine bir çekirdek oluşturan madde veya soğuk tetikleyici maddenin eklenmesiyle sağlanabilir.
Kimyasal kriterler	• Kimyasal stabilite, • Kimyasal bozulmaya yatkınlık olmaması, dolayısıyla uzun bir çalışma ömrünün mümkün olması, • Yapı malzemelerine karşı aşındırıcı olmayan davranış, • Toksik olmayan, yanıcı olmayan ve patlayıcı olmayan özellikler.
Teknik kriterler	• Basitlik, • Uygulanabilirlik, • Verimlilik, • Kompaktlık, • Uyumluluk, • Canlılık, • Güvenilirlik.

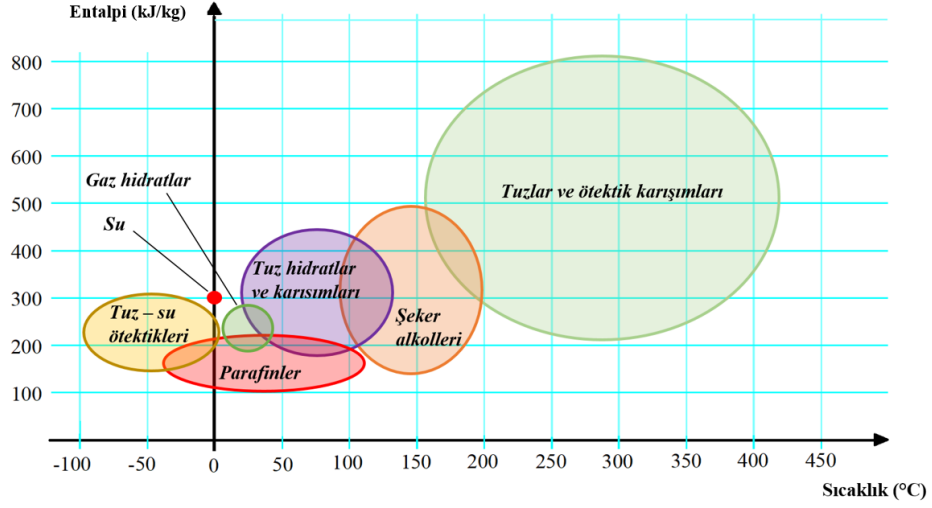
Ekonomik kriterler	• Ticari kullanılabilirlik, • Düşük maliyet.
---------------------------	---

3.2.1. FDM'lerin sınıflandırılması

FDM'lerin malzeme bileşimlerine göre derinlemesine sınıflandırılması literatürde [76–78] mevcut olmakla birlikte genellikle organik, inorganik ve ötektik olarak üç ana kategoride sınıflandırılır ve aynı zamanda Şekil 3.5'te gösterilen alt gruplara ayrılırlar. Her bir sınıf, depolama sistemi koşullarına bağlı olarak farklı termal özelliklere sahip olabilir. Şekil 3.6'da belirtilen FDM sınıflarının erime aralığı ve entalpisi sunulmuştur. Organik bir FDM örneği olan parafinin ısıtma ve soğutma uygulamaları için uygun bir aralığa sahip olduğunu gösterir. Bu malzeme, geniş bir faz geçişi sıcaklığı aralığı, düşük maliyet ve iyi optik ve ışık geçirgenliği özellikleri nedeniyle çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Özellikle termal konforun sağlandığı uygulamalarda parafin, geniş bir yelpazede yaygın olarak kullanılmıştır [79].



Şekil 3.5: FDM'lerin sınıflandırılması[80]



Şekil 3.6: Çeşitli FDM'ler için sıcaklık ve entalpi aralıkları [81]

3.2.1.1. Organik FDM'ler

Organik FDM'ler, TED alanında oldukça önemli bir role sahiptir. Bu malzemeler, parafinler ve parafin olmayanlar olarak iki ana alt kategoriye ayrılırlar (Şekil 3.5). Organik malzemelerdeki kovalent bağlar nedeniyle, yüksek sıcaklıklara karşı kararlılık konusu dikkate değerdir. Genellikle, organik FDM'lerin yoğunluğu, çoğu inorganik malzemeye göre daha düşüktür. Bu durum, bu malzemelerin taşıma ve depolama kolaylığı sağladığı anlamına gelir.

a) Parafinler

Özellikle parafinler, organik FDM'ler arasında sıkça kullanılan bir alt gruptur. Parafin, lineer alkanlar için özel bir isimlendirilmez ve genellikle C_{2n+2} genel formülüne sahip lineer alkanlar için özel olarak kullanılır [73]. Bu malzemenin yüksek füzyon gizli ısısı ve uygun sıcaklık aralığı, ısıtma ve soğutma uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmasını sağlamıştır. Organik FDM'ler, termal enerji depolama sistemlerinin tasarımında ve uygulanmasında önemli bir seçenek olarak değerlendirilmektedir.

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi parafinler, oldukça geniş bir erime sıcaklığı aralığına sahip olmaları nedeniyle FDM'ler için uygun adaylardır. Bu malzemelerdeki C atom sayısının artması, zincir uzunluğunu artırır ve bu da füzyon gizli ısısı ve erime noktası üzerinde

doğrudan bir etkiye sahiptir. Zincir uzunluğu arttıkça, gizli ısı ve erime noktası da artar [82]. Seçilen bazı parafinler, atom sayılarına, erime noktasına ve gizli ısılarına göre Çizelge 3.4'te gösterilmektedir. Bu çizelgede 14 C atomundan 30 C atomuna kadar zincir uzunluğuna sahip parafinler, erime noktasının 5.5 °C ile 65.4 °C arasında değiştiği ve füzyon gizli ısısının 228 kJ/kg ile 251 kJ/kg arasında değiştiği birkaç örnek parafin yer almaktadır.

Çizelge 3.4: Atom sayılarına veya zincir uzunluklarına göre parafinlerin erime noktası ve gizli füzyon ısısı [83]

Parafindeki C atom sayısı	Erime sıcaklığı [°C]	Gizli ısı [kJ/kg]
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28	244
19	32	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251

Parafinler güvenli, öngörülebilir ve korozyona uğramayan özelliklere sahip malzemelerdir. Kimyasal olarak inert ve 500 °C'nin altında stabildirler. Uyumlu olarak erirler ve erime sırasında az miktarda hacim değişimi gösterirler. Ayrıca erimiş fazda düşük buhar basıncına

sahiptirler. Ancak, maliyet nedeniyle sadece teknik sınıf parafinler GID sistemlerinde FDM olarak kullanılabilir. Çizelge 3.5, 42-68 °C erime aralığı ve 189-210 kJ/kg gizli ısıya sahip bazı teknik sınıf parafinleri listelenmiştir. Bu parafin karışımları tamamen arıtılmış yağ değildir. Bu nedenle Çizelge 3.4'teki saf parafinlere göre daha düşük bir füzyon gizli ısı sergilerler [84,85].

Çizelge 3.5: Bazı parafinlerin fiziksel özellikleri [86]

Parafindeki tipi	Erime sıcaklığı [°C]	Gizli ısı [kJ/kg]
6160	42-44	189
P116	45-48	210
5338	48-50	189
6035	58-60	189
6403	62-64	189
6499	66-68	189

Parafinlerin bazı olumlu özelliklerinin yanı sıra, parafin kullanan sistemler, zayıf termal iletkenlik nedeniyle genellikle çok uzun donma-erime döngülerine sahiptirler [73]. Parafinlerin diğer istenmeyen özellikleri arasında plastik kaplarla uyumsuzluk ve orta derecede yanıcılık vardır. Tüm bu istenmeyen etkiler, parafin ve depolama birimi değiştirilerek kısmen hafifletilebilir.

b) Parafin olmayanlar

Şekil 3.5'te organik bileşikler altında bulunan bir diğer faz değiştiren malzeme türü ise parafin olmayanlardır. Parafin olmayan malzemeler yağ asitleri ve diğer parafin olmayan organikler olmak üzere ikiye ayrılır. Organik malzemeler; yüksek erime gizli ısı, yanıcılık, düşük termal iletkenlik, düşük parlama noktaları, değişen düzeylerde toksisite ve yüksek sıcaklıklarda kararsızlık gibi bazı özelliklere sahiptirler. Parafinlerin sahip olduğu özellikler benzer şekilde yağ asitleri, yüksek erime gizli ısı değerlerine sahiptirler. Ayrıca yağ asitleri tekrarlanabilir bir erime ve donma davranışı sergiler ve aşırı soğutma olmadan donarlar. Tüm yağ asitlerini tanımlayan genel formülü $CH_3(CH_2)_{2n}.COOH$ şeklindedir. Bu zincir yapısı iyi FDM'ler olarak nitelendirilmelerine olanak tanır. Ancak, maliyetleri teknik sınıf

parafinlerinkinden 2-2.5 kat daha yüksektir ve hafif düzeyde korozyona yol açabilirler. Düşük sıcaklıkta GID uygulamaları için ilgi gösterilen bazı yağ asitleri Çizelge 3.6'da sıralanmıştır [73].

Çizelge 3.6: Yağ asitlerinin erime noktası ve gizli füzyon ısıları [73]

Malzeme	Erime sıcaklığı [°C]	Gizli ısı [kJ/kg]
Asetik asit	16.7	184
Polietilen glikol 600	20-25	146
Kaprik asit	36	152
Elaidik asit	47	218
Laurik asit	49	178
Pentadekanoik asit	52.5	178
Tristearin	56	191
Miristik asit	58	199
Palmitik asit	55	163
Stearik asit	69.4	199
Asetamid	81	241
Metil fumarat	102	242

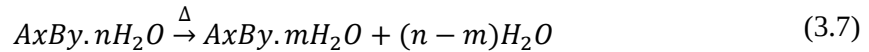
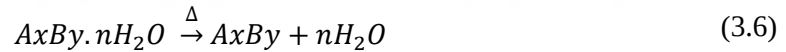
Genel olarak, parafinler ve yağ asitleri arasında yapılan karşılaştırmalarda, parafinlerin yağ asitlerine göre daha düşük erime sıcaklıklarında yüksek gizli ısı kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Parafinler, çeşitli karbon zincir uzunluklarına sahip olmaları sebebiyle geniş bir erime sıcaklığı aralığına sahiptir ve bu özellikleri, TED sistemlerinde çeşitli uygulamalarda kullanılmalarını desteklemektedir. Diğer yandan, parafinlerin yüksek gizli ısı kapasitesi, yüksek enerji depolama yoğunluğu sağlar. Bu özellik, uzun süreli depolama gereksinimlerine uygun bir seçenek olarak öne çıkarır. Yağ asitleri ise genellikle parafinlere kıyasla daha yüksek erime sıcaklıklarına sahip olabilirler. Bu durum, belirli uygulamalar için daha yüksek sıcaklık aralığı gerektiren durumlarda tercih edilebilecekleri anlamına gelir. Parafinler ve yağ asitleri arasındaki bu karşılaştırma, termal depolama sistemlerinin tasarımında ve uygulamalarında doğru FDM seçiminin önemini vurgulamaktadır.

3.2.1.2. İnorganik FDM'ler

İnorganik malzemeler tuz hidratlar ve metalikler olarak sınıflandırılır (Şekil 3.5). Bu FDM'lerin en önemli özelliklerinden biri, füzyon ısılarında şarj-deşarj döngüsüne bağlı olarak önemli ölçüde bir azalmanın görülmemesidir [73]. Ayrıca yanıcı değildir; ancak çoğu metal üzerinde korozyona neden olurlar ve çözünme ile aşırı soğuma sorunları yaşarlar. Bu durum ise erime sıcaklığı ve ısı depolama kapasitesi gibi faz değiştirme özelliklerini etkileyebilir [87].

a) Tuz Hidratlar

İnorganik tuz hidratları için genel formül $A_xB_y \cdot nH_2O$ 'dur. Burada n su molekülünü ve A_xB_y tuzu temsil eder. Bir faz geçişi sırasında sıcaklık malzemenin erime sıcaklığına ulaştığında, faz geçişinin gizli ısısı emilir ve su moleküllerinin bir kısmı veya tamamı kaybedilip çözünerek daha az su molekülü içeren tuz hidratları oluşur. Tersine bir faz değişimi gerçekleştiğinde, faz geçişi gizli ısısı serbest bırakılır. Birçok tuz hidratı yüksek faz geçişi gizli ısıya ve uygun erime sıcaklığına sahiptir.



İnorganik tuz hidratların erime sıcaklığı genellikle 120 °C'nin altındadır ve bu, düşük sıcaklıklı FDM'lerin incelenmesi için daha uygundur [88]. Erime noktasında hidrat kristalleri susuz tuz ve suya veya daha düşük bir hidrat ve suya parçalanır. Tuz hidratların çoğuyla ilgili bir problem, açığa çıkan kristalizasyon suyunun mevcut tüm katı fazı çözmek için yeterli olmamasından kaynaklanan uyumsuz erimedir. Bu problem yoğunluk farkından dolayı düşük yoğunluğa sahip hidratın (veya susuz tuz) kabın dibine çökmesine sebep olur [73]. Hidrat tuzların uyumsuz erime sorununu çözmek için çeşitli yöntemler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemler arasında FDM'nin ayrışmasını azaltmak için kapsülleme [89–91], mekanik karıştırma [92], tuzu asılı tutarak tuz ayrışmasını önlemek için kalınlaştırıcı etkenlerin eklenmesi [93] ve aşırı doymuş çözeltiyi önlemek için fazla su kullanımı [94] bulunmaktadır.

Çizelge 3.7, çeşitli hidrat tuzlarını ve termal özelliklerini sunmaktadır. Hidrat tuzları, yüksek gizli ısıları (100-200 kJ/kg) ve düşük maliyetleri nedeniyle TED için çekici malzemelerdir. Ancak hidrat tuzları en az bir tuz ve su içeren birden fazla bileşenden oluştuğundan, potansiyel olarak farklı fazlara ayrılabilirler ve bu nedenle döngüsel kararlılık sorunları gösterebilirler. Aşırı soğutma sorunlarına ek olarak, bazıları 80 °C'ye kadar düşük erime sıcaklıklarına sahiptirler. Bu durum tuz hidratların yüksek sıcaklıklı ısıtma depolarında kullanımlarını yetersiz kılmaktadır [73].

Çizelge 3.7: Tuz hidratların erime sıcaklığı ve gizli füzyon ısıları

Malzeme	Erime sıcaklığı [°C]	Gizli ısı [kJ/kg]	Malzeme	Erime sıcaklığı [°C]	Gizli ısı [kJ/kg]
K ₂ HPO ₄ .6H ₂ O	14.0	109	FeBr ₃ .6H ₂ O	21.0	105
Mn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	25.5	148	CaCl ₂ .12H ₂ O	29.8	174
LiNO ₃ .2H ₂ O	30.0	296	LiNO ₃ .3H ₂ O	30.0	189
Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	32.0	267	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	32.4	241
KFe(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	33.0	173	CaBr ₂ .6H ₂ O	34.0	138
LiBr ₂ .2H ₂ O	34.0	124	Zn(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	36.1	134
FeCl ₃ .6H ₂ O	37.0	223	Mn(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	37.1	115
Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	40.0	279	CoSO ₄ .7H ₂ O	40.7	170
KF.2H ₂ O	42.0	162	MgI ₂ .8H ₂ O	42.0	133
CaI ₂ .6H ₂ O	42.0	162	K ₂ HPO ₄ .7H ₂ O	45.0	145
Zn(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	45.0	110	Mg(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	47.0	142
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	47.0	153	Fe(NO ₃) ₃ .9H ₂ O	47.0	155
Na ₂ SiO ₃ .4H ₂ O	48.0	168	K ₂ HPO ₄ .3H ₂ O	48.0	99
Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	48.5	210	MgSO ₄ .7H ₂ O	48.5	202
Ca(NO ₃) ₂ .3H ₂ O	51.0	104	Zn(NO ₃) ₂ .2H ₂ O	55.0	68
FeCl ₃ .2H ₂ O	56.0	90	Ni(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	57.0	169
MnCl ₂ .4H ₂ O	58.0	151	MgCl ₂ .4H ₂ O	58.0	178
CH ₃ COONa.3H ₂ O	58.0	265	Fe(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	60.5	126
NaAl(SO ₄) ₂ .10H ₂ O	61.0	181	NaOH.H ₂ O	64.3	273
Na ₃ PO ₄ .12H ₂ O	65.0	190	LiCH ₃ COO.2H ₂ O	70.0	150
Al(NO ₃) ₂ .9H ₂ O	72.0	155	Ba(OH) ₂ .8H ₂ O	78.0	265
Mg(NO ₃) ₂ .6H ₂ O	89.9	167	MgCl ₂ .6H ₂ O	117	167

b) Metaller

Bu kategori, düşük erime noktalı metalleri ve metal ötektikleri içerir. Bu metalikler, yüksek yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle FDM teknolojisi için henüz ciddi şekilde düşünülmemiştir. Ancak hacim açısından bakıldığında, yüksek hacim başına düşen erime ısısı sayesinde olası adaylardır. Yüksek termal iletkenlikleri nedeniyle ek ağırlık yükleri gerektiren dolduruculara ihtiyaç duyulmaz. Metaliklerin kullanımı bir dizi olağandışı mühendislik sorununu beraberinde getirir. Metalikler ile diğer FDM'ler arasındaki temel fark, yüksek termal iletkenlikleridir. Seçilmiş bazı metaliklerin listesi Çizelge 3.8'de verilmiştir. Birim ağırlık başına düşük erime ısısı, birim hacim başına yüksek erime ısısı, yüksek termal iletkenlik, düşük özgül ısı ve nispeten düşük buhar basıncı bu materyallerin bazı özellikleri arasında yer almaktadır [73].

Çizelge 3.8: Metaliklerin erime sıcaklığı ve gizli füzyon ısıları

Malzeme	Erime sıcaklığı [°C]	Gizli ısı [kJ/kg]
Galyum-galyum antimon ötektik	29.8	-
Galyum	30	80.3
Cerrolow ötektik	58	90.9
Bi-Cd-In ötektik	61	25
Cerrobend ötektik	70	32.6
Bi-Pb-In ötektik	70	29
Bi-In ötektik	72	25
Bi-Pb-kalay ötektik	96	-
Bi-Pb ötektik	125	-

3.2.1.3. Ötektik FDM'ler

Ötektik FDM'ler, en az iki farklı FDM'nin birleştirilmesiyle üretilir. Organik ve inorganik FDM'lerle karşılaştırıldığında, bu tip FDM'ler bina duvarı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaz ve bunların özelliklerine ilişkin mevcut veriler sınırlıdır [95]. Tek bileşenli

FDM'lerden farklı olarak ötektik FDM'nin erime noktası, her bir bileşenin bileşiminden etkilenir. Erime sıcaklığı ile bileşim arasındaki ilişki ötektik FDM'ler için önemlidir [96].

3.2.2. FDM'lerin avantajları ve dezavantajları

FDM'lerin avantajları ve dezavantajları, literatürde [97–99] ele alınan konular arasında yer almaktadır. Çizelge 3.9'da organik, inorganik ve ötektik FDM'lerin avantaj ve dezavantajları sunulmaktadır.

Çizelge 3.9: Organik, inorganik ve ötektik FDM'nin avantajları ve dezavantajları [100]

	Organik FDM	İnorganik FDM	Ötektik FDM
Avantajlar	• Aşındırıcı olmayan • İyi kimyasal ve termal stabilite • Aşırı soğutma yok • Yüksek füzyon ısısı • Düşük buhar basıncı • Toksik olmayan	• Yanıcı değil • Ucuz • Yüksek füzyon ısısı • İyi termal iletkenlik	• Geniş faz değişim sıcaklığı aralığı • İyi kimyasal ve termal stabilite • Yüksek ısı kapasitesi • Süper soğutma yok veya çok az
Dezavantajlar	• Düşük ısı iletkenliği • Düşük faz değişim entalpisi • Faz geçişi sırasında hacimlerde yüksek değişiklikler	• Korozyon • Faz ayrışması • Yüksek süper soğutma etkisi • Süreç boyunca hidrat kaybı • Yetersiz termal stabilite • Ağırlık problemi	• Faz geçişi sırasında sızıntı • Düşük ısı iletkenliği

3.2.3. FDM'lerin kullanım alanları

FDM teknolojisinin ısı depolama ve termal koruma amaçlı birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Bu uygulamalar arasında bina uygulamaları [101,102], soğutma

uygulamaları [103,104] güneş enerjisinin termal yönetimi [105,106] ve elektronik sistemler [107,108] gibi çeşitli alanlar yer almaktadır. Çizelge 3.10, literatürde yer alan FDM'lerin farklı uygulamalarından bazılarını sunulmaktadır.

Çizelge 3.10: FDM'nin farklı uygulama alanları

Uygulama Alanı	Referanslar
Isıtma ve sıcak su	[109–112]
Buz bankası	[113]
Yiyecek depolama	[114,115]
Medikal uygulamaları	[116,117]
Uzay aracı termal sistemleri	[118–120]

4. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasının ana odak noktası, düşük ısı iletkenliğine sahip FDM'nin erime ve enerji depolama performansını, etkili ısı transfer yetenekleriyle bilinen ÇSHJ tekniğini kullanarak ayrıntılı bir şekilde incelemektir. Bu bölümde, “*Deney Düzeneği*” ve “*Deney Numunesinin Üretimi*” başlıkları altında; deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan ekipmanlar ve deneysel veri toplama yöntemi gibi konular ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bunun yanı sıra, tercih edilen FDM tipi, konteyner malzemesi ve geometrisinin hangi kriterleri sağlaması amacıyla seçildiği açıkça ortaya konulmuştur. Ayrıca “*Sayısal Çalışma*” başlığı altında; kullanılan model, modelin matematiksel temeli, modele uygulanan başlangıç ve sınır şartları ve ağ doğrulama çalışması detaylı bir biçimde ele alınmıştır. Son olarak “*İncelenen Parametreler*” başlığı altında deneysel ve sayısal çalışmalarda kullanılan parametreler sunulmuştur.

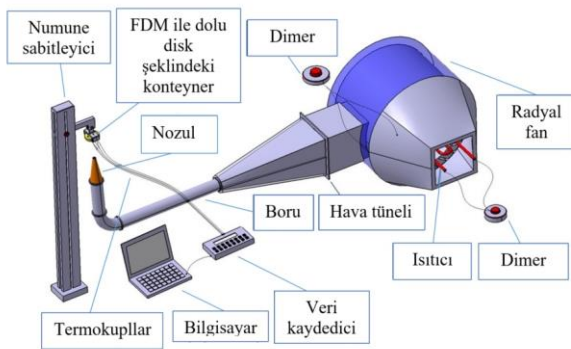
4.1. Deney Düzeneği

Deney düzeneği, Şekil 4.1'de gösterildiği gibi radyal fan, dimmerler, ısıtıcılar, hava tüneli, PPRC (Polypropylene Random Copolymer) boru, termokupllar, veri kaydedici, nozul, numune sabitleyici ve FDM ile doldurulmuş disk şeklinde bir konteynerden oluşmaktadır. Deney düzeneğinde kullanılan her bir elemanın özellikleri ve kullanım amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- **Radyal fan:** Radyal fanlar yüksek basınç üretebilen elemanlardır. Deney düzeneğinde kullanılan radyal fan 550 W gücüne sahip olup, havayı basınçlı bir şekilde nozula doğru yönlendirmek için kullanılmıştır.
- **Dimer:** Dimer birçok elektronik cihazda güç ayarlama elemanı olarak kullanılabilir. Deney düzeneğinde, hava hızını ve sıcaklığını kontrol etmek amacıyla radyal fan ve ısıtıcılara entegre edilen dimmerler kullanılmıştır.
- **Spiral Isıtıcı:** Deney düzeneğinde fan girişinde 7500W gücünde bir spiral ısıtıcı rezistans ve nozula yakın dikey boruda (Şekil 4.1 (b)), 75W gücünde bir şerit ısıtıcı kullanılmıştır. Fandan çıkan hava akımını bozmaması amacıyla rezistans ısıtıcı, radyal fanın giriş kısmına konumlandırılmıştır. Şerit ısıtıcı ise hava sıcaklığında hassas ayar yapmak için, nozula yakın bir bölgeye sabitlenmiştir.
- **Hava tüneli:** Hava tüneli radyal fan çıkışındaki 100 mm x 100 mm ölçülerinde kare kesit alanını, 25 mm çapında dairesel kesit alana daraltacak şekilde metal

malzemeden üretilmiştir. Isı kaybını önlemek amacıyla dış yüzeyi cam yünü ile kaplanmıştır.

- **PPRC boru:** Hava tüneli ile nozul arası hava transferini sağlamak amacıyla yatayda 1000 mm ve düşeyde 500 mm boyutlarına sahip, iç çapları 25 mm olan PPRC borular kullanılmıştır. Bu tercih, PPRC borularının düşük ısı iletkenliğe sahip olmalarından kaynaklanmaktadır ve bu nedenle ek bir izolasyon gereksinimi duyulmamıştır. Ayrıca, hava akışının giriş bölgesindeki etkilerden arınmış bir şekilde düzenli hale gelmesini sağlamak için yeterli uzunlukta boru tercih edilmiştir. Bu düzenlemeler, hava akımının verimli bir şekilde kontrol edilmesini ve ölçümlerin güvenilirliğini artırmayı amaçlamaktadır.
- **Termokupl:** FDM'nin zamana bağlı sıcaklık değişimini ölçmek için konteyner içerisinde farklı noktalara sabitlenmiş, toplamda yedi adet T-tipi termokupl kullanılmıştır. Ayrıca hava sıcaklığını kontrol etmek amacıyla nozul çıkışına bir adet termokupl yerleştirilmiştir. Termokuplların konteyner içindeki yerleşim düzeni “Deney Numunesinin Üretimi” başlığı altında detaylı olarak incelenmiştir.

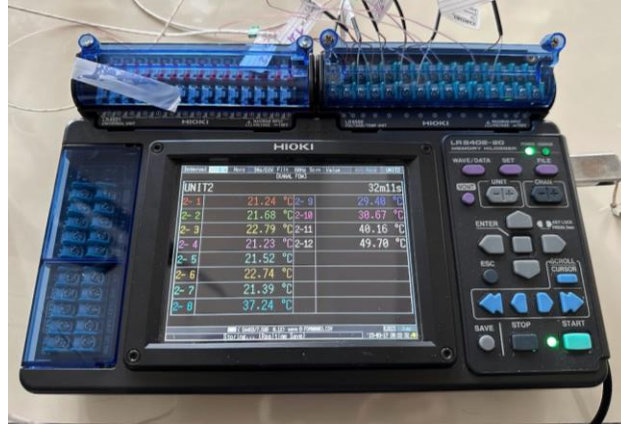


(a)

(b)

Şekil 4.1: Deney düzeneği; (a) Şematik diyagram (b) Gerçek görünüm

- **Veri kaydedici:** Deney düzeneğinde, Şekil 4.2’de gösterilen *HIOKI* marka bir veri kaydedici kullanılmıştır. Veri kaydediciler, termokupldan gelen elektriksel sinyali alarak belirli bir periyot boyunca sıcaklık verisi olarak kayıt altına almaktadır. Deneysel çalışmaların yürütüldüğü süreçte, hava jeti sıcaklığını anlık olarak kontrol etmek amacıyla veri kaydedici frekansı 1 saniye olarak ayarlanmıştır. Bu konfigürasyona göre, FDM içerisindeki zamana bağlı sıcaklık değerleri de her saniye başı düzenli aralıklarla kaydedilmiştir.

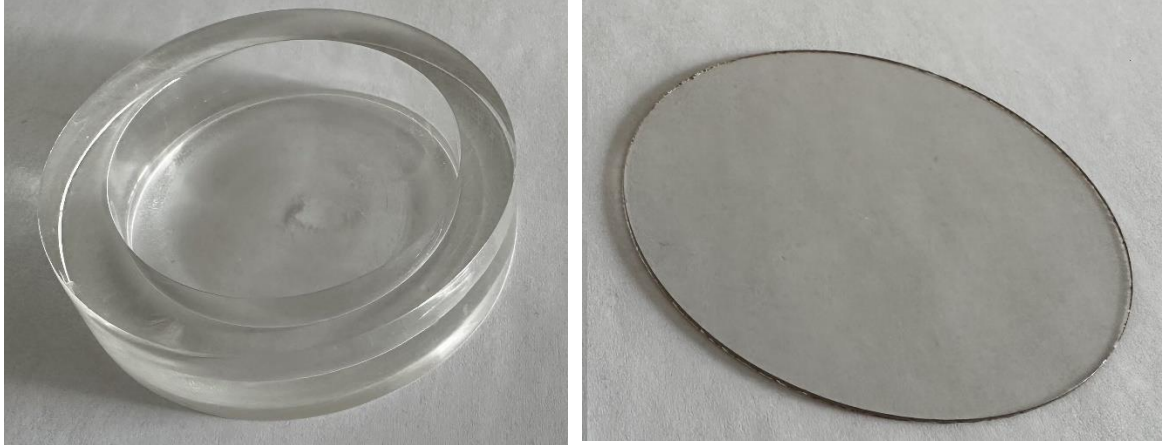


Şekil 4.2: Veri kaydedici

- **Nozul:** Şekil 4.1’de gösterilen nozul, hava jeti akımını sağlayan nihai elemandır. Pirinç malzemeden üretilmiş olan bu nozul, PPRC borudan gelen hava akımının çapını 25 mm’den 10 mm’ye düşürerek, istenen hava jetinin oluşmasını sağlar.
- **Numune sabitleyici:** İçerisi FDM ile dolu disk şeklindeki konteyneri sabitlemek için üç ekseninde hareket edebilen bir numune sabitleyici kullanılmıştır.
- **Konteyner:** FDM’nin erime sürecini gözlemleyebilmek için konteyner, pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Konteyner özelliği ve numune üretim süreci, “Deney Numunesinin Üretimi” başlığı altında detaylı olarak incelenmiştir.

4.2. Deney Numunesinin Üretimi

Deneyisel aşamada, öncelikle konteyner üretimi gerçekleştirilmiştir. Erime sürecini izleyebilmek amacıyla konteyner yapımında, Çizelge 4.1’de termofiziksel özellikleri verilen pleksiglas malzeme tercih edilmiştir. Konteyner, Şekil 4.3’te gösterildiği gibi gövde ve kapak olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. Konteynerin dış çapı 100 mm, iç çapı ise 74 mm ölçülerinde, CNC tezgâh yardımıyla üretilmiştir. Konteynerin alt ve üst yüzeyleri 2 mm kalınlığa sahiptir. FDM, sıvı fazda oldukça sızıntı problemi olan bir malzemedir. Bu sorunu çözmek ve yan yüzeylerden kaynaklanan ısı transferini minimum düzeye indirmek amacıyla, konteynerin yan duvarı 15 mm genişliğinde tasarlanmıştır. Son aşamada, FDM sıvı fazı konteynerin içine doldurulmuş ve kloroform kullanılarak gövdeye yapıştırılmıştır.



(a)

(b)

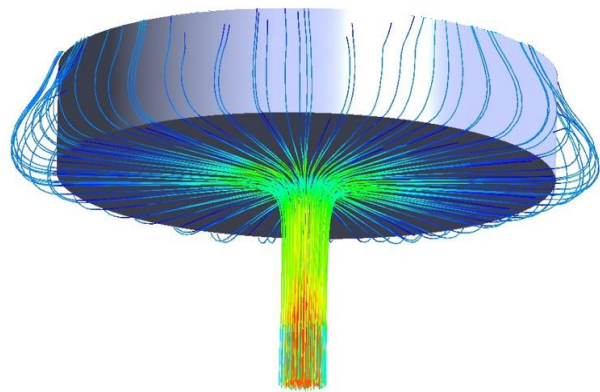
Şekil 4.3: Konteyner yapısı; (a) Gövde (b) Kapak

4.2.1. Konteyner geometrisi

Şekil 4.4'te ÇSHJ ile FDM eritme prosesinin deneysel ve sayısal simülasyon görüntüsü gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında konteyner geometrisinin dairesel seçilmesinin sebebi, yüzeye çarpan havanın her noktaya eşit şekilde dağılmasını sağlamaktır. Şekil 4.4'te sayısal çalışmadan alınan ve hava akım çizgilerini gösteren görüntü havanın konteyner yüzeyi boyunca homojen bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 4.4: ÇSHJ ile FDM eritme prosesi; (a) Deney düzeneğinin bir bölümü (b) Sayısal simülasyon

4.2.2. FDM seçimi

FDM tabanlı bir enerji depolama sistemi için FDM'nin seçimi, erime sıcaklığı, özgül ısı, termal iletkenlik, hacimsel genleşme, aşırı soğutma, kararlılık ve maliyet dahil olmak üzere çeşitli kriterlerin dikkate alınmasını içermektedir [121]. Buna göre ticari RT25HC'nin erime sıcaklığı ve ısı depolama kapasitesi (Çizelge 4.1), bu çalışmanın ele aldığı sistemin spesifik termal koşullarıyla güçlü bir uyum sergilemektedir. Ayrıca kararlılık faktörü göz önüne alındığında RT25HC, mevcut araştırmanın parametreleri dahilinde verimli enerji depolama ve termal düzenleme sağlamak için uygun bir seçim olarak ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.1: Termofiziksel özellikler: RT25HC [122,123] ve pleksiglas [124]

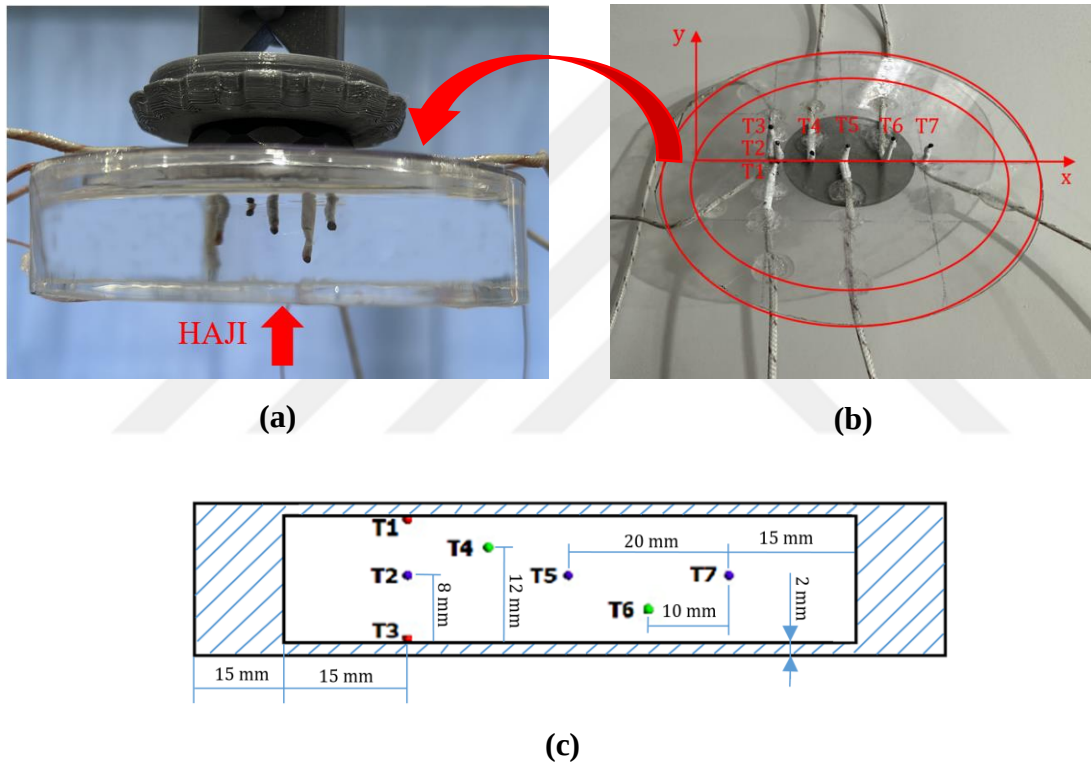
Malzeme Özellikleri	RT25HC	Pleksiglas
Yoğunluk, ρ [kg/m ³]	880 (katı) 770 (sıvı)	1180
Özgül ısı, C_p [J/kg.K]	2000	1464
Termal iletkenlik, k [W/m.K]	0.19	0.19
Katılaşma sıcaklığı, T_k [°C]	22	-
Erime sıcaklığı, T_s [°C]	26	-
Füzyon ısısı, L [J/kg]	230000	-
Termal genleşme, β [1/K]	0.0006	-
Dinamik viskozite, μ [kg/m.s]	0.026	-

4.2.3. Termokuplların konumlandırılması

Şekil 4.5 (a)'da, içi FDM ile dolu disk şeklindeki konteynerin genel görünümü sunulmuştur. Şekil 4.5 (b), ise bu kapın üst kapağına sabitlenmiş olan termokuplları göstermektedir. Burada kırmızı dairesel çizgilerle işaretlenmiş bölge, konteyner gövdesinin (Şekil 4.3 (a)) yan duvarının, kapak (Şekil 4.3 (b)) üzerindeki konumunun göstermektedir. Ayrıca, Şekil 4.5 (c), bu kapın merkezinden alınmış kesit görünümünde termokuplların yerleştirilme düzenini göstermektedir. T1 ve T3 termokuplları konteynerin alt ve üst yüzeylerine temas edecek şekilde sabitlenmiştir. T2, T5 ve T7 termokuplları konteynerin y eksenine göre orta noktasında olup T5 diskin tam merkezindedir. T4, x ekseninde T2 ve T5'in, y ekseninde ise

T1 ve T2'nin tam orta noktasında yer almaktadır. Benzer şekilde T6 ise x ekseninde T5 ve T7'nin, y ekseninde ise T2 ve T3'ün tam orta noktasında konumlanmıştır.

FDM içerisindeki sıcaklık dağılımını ayrıntılı bir şekilde inceleyebilmek ve sayısal simülasyon sonuçlarını doğrulayabilmek için eritme işlemi sırasında FDM'yi etkilemeyecek şekilde, her biri yaklaşık 1 mm çapında olan yedi adet T-tipi termokupl simetrik bir şekilde kabın içine yerleştirilmiştir. Termokupl problemlerinin konteyner içerisindeki düzeni Şekil 4.5 (b)'de gösterildiği gibi, kabın merkezine x eksenı boyunca sıralanmış ve y ekseninde değişen yüksekliklerde sabitlenmiştir. Bu termokupl düzeni, FDM içerisindeki sıcaklık değişiminin ayrıntılı bir şekilde izlenmesine olanak tanımıştır.



Şekil 4.5:Termokuplların konumu; **(a)** FDM ile doldurulmuş disk şeklindeki kabın içindeki görünüm **(b)** Konteynerin üst kapağına sabitlenmiş görünüm **(c)** Konteyner merkezinden kesit görünüm

4.3. Sayısal Çalışma

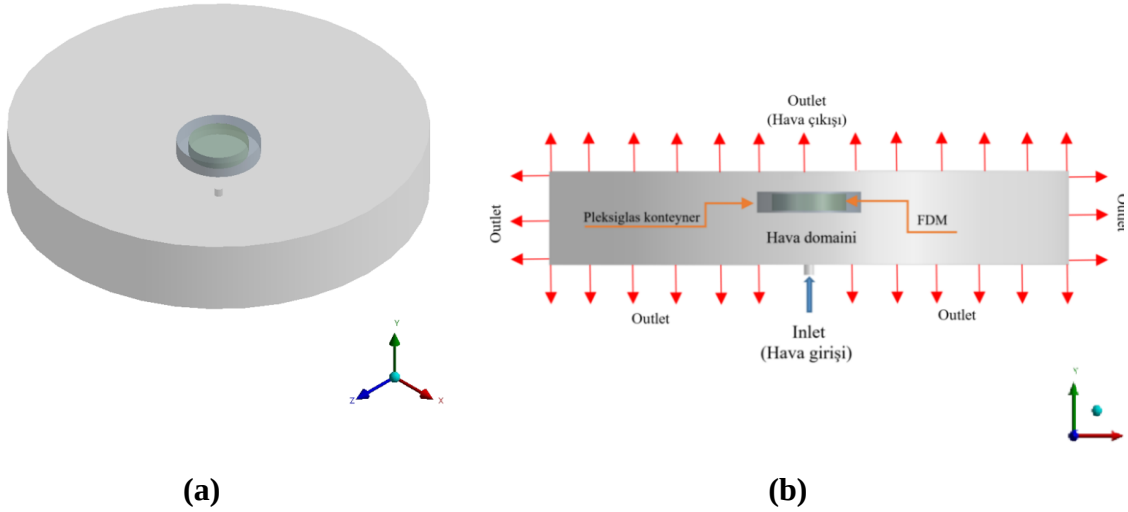
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), mühendislik uygulamalarındaki ısı ve akış problemlerinin çözümünde büyük bir öneme sahiptir. Mühendislerin ve araştırmacıların tasarım süreçlerini optimize etmelerine, zaman ve kaynak tasarrufu yapmalarına ve daha

güvenilir sonuçlara ulaşmalarına olanak tanımaktadır. Bu tez çalışmasının ele aldığı problemde, kütle, momentum ve enerjiye ilişkin temel denklemler, sonlu hacim yöntemini kullanan “*ANSYS FLUENT*” ticari yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Eritme işlemi, hassas sayısal hesaplamaları sağlamak için çift hassasiyetli bir katılaşma/erime modeli kullanılarak modellenmiştir. Momentum ve enerji denklemleri, akış ve sıcaklık gradyanlarını etkili bir şekilde yakalayan “*QUICK*” şeması kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Ek olarak, basınç-hız bağlantısı, yaygın olarak benimsenen “*SIMPLE*” algoritması kullanılarak çözülmüştür. Sayısal metodolojinin ek bir yönü olarak, basınç düzeltme denklemi “*PRESTO*” şeması kullanılarak çözülmüştür.

4.3.1. Fiziksel model

Mevcut çalışmada, FDM'nin erime sürecini incelemek ve HAD yöntemini kullanarak disk şeklindeki konteyner içindeki bu süreci simüle etmek için Şekil 4.6 (a)'da gösterilen üç boyutlu (3B) model oluşturulmuştur. Bu modeli oluşturan bölgeler ve sınır bölgeleri ise iki boyutlu (2B) olarak Şekil 4.6 (b)'de gösterilmiştir. Model, FDM bölgesi, pleksiglas bölgesi ve hava bölgesi olmak üzere üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Her bir bölge Tablo 1'de belirtilen termodinamik özelliklere sahiptir. Modelin konteyner ve FDM bölgesi, çalışmanın deney numunesinin boyutlarıyla eşit ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Analizlerde hava bölgesinin boyutunun belirlenmesi çözüm sonuçlarını etkileyen parametrelerden biridir. Bu seçimin büyük olması çözüm yapılacak eleman sayısını artırdığından aşırı hesaplama süresine sebep olmaktadır. Öte yandan küçük boyutlu bir seçim, sınır koşullarının sonuçlar üzerindeki olumsuz etkilerine sebep olacaktır. Bu nedenle farklı boyutlarda analizler yapılarak sonuçlar karşılaştırılmış ve konteyner çapının beş katı büyüklüğündeki bir hava bölgesi boyutunun deneysel bulgularla uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu model, disk şeklindeki kap içindeki FDM erime sürecini sayısal olarak simüle etmek için güçlü bir araç oluşturmuştur.



Şekil 4.6: Sayısal çözüm geometrisi; **(a)** İzometrik görünüm **(b)** 2B görünüm

4.3.2. Matematiksel model

Bu çalışma, ÇSHJ yöntemini kullanarak disk şeklindeki bir konteyner içindeki RT25HC'nin FDM olarak enerji depolama etkinliğini ve erime davranışını araştırmaktadır. Jet akışı türbülanslı olarak modellenmiştir ve bu bağlamda; Zuckerman ve Lior [125] çarpmalı ısı transferi üzerine yaptıkları sayısal çalışmada farklı türbülans modellerini karşılaştırmışlardır. SST modelinin, duvara yakın bölgedeki $k-\omega$ modelinin ve duvardan uzaktaki $k-\varepsilon$ modelinin avantajlı yönlerini içerdiği ve bu özelliğin türbülanslı jet akışlarında gelişmiş doğruluk sağladığını gözlemlemişlerdir. Yaygın olarak kullanılan HAD türbülans modellerine ait yaptıkları karşılaştırma sonucunda SST $k-\omega$ modelin çözüm hızını ve doğruluğunu dengeleyen bir seçim olduğunu gözlemlemişlerdir. Mevcut çalışmada da farklı türbülans modelleri kullanılarak yapılan analizlerde, bu modelin deneysel sonuçlarla uyumluluk ve çözüm süresi açısından optimum özelliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle temel denklemlerin çözümü için SST $k-\omega$ modeli kullanılmıştır.

FDM için temel denklemler aşağıdaki gibi verilebilir:

Süreklilik

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \rho v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial (\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

Burada; ρ , FDM yoğunluğunu, v_r , v_θ ve v_z ise sırasıyla r , θ ve z yönlerindeki hızları temsil etmektedir.

Momentum

r-bileşeni:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial P}{\partial r} \\ + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] + S_r \end{aligned} \quad (4.2)$$

θ -bileşeni:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) \\ = - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \right) - \frac{v_\theta}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right] + S_\theta \end{aligned} \quad (4.3)$$

z -bileşeni:

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g \beta (T - T_{ref}) \\ + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + S_z \end{aligned} \quad (4.4)$$

Denklemler (4.1)-(4.4) boyunca kullanılan P , t ve g değişkenleri sırasıyla basıncı, zamanı ve yer çekimi ivmesini temsil eder. Ayrıca β , termal genleşme katsayısını, μ FDM'nin dinamik viskozitesini ve T_{ref} ise referans sıcaklığıdır. Öte yandan S_r , S_θ ve S_z momentum düşüşü terimleridir. Entalpi-gözeneklilik tekniği, kısmen katılaşmış yumuşak bölgeyi (lapa bölge olarak anılır) gözenekli bir ortam olarak kabul eder. Her hücrenin gözenekliliği o hücre içindeki sıvı fraksiyonuna göre belirlenir. Bölge tamamen katılaştığında gözeneklilik sıfır olur ve bu bölgelerdeki hızlar etkili bir şekilde durdurulur. Lapa bölgedeki gözenekliliğin azalmasından kaynaklanan momentum düşüşü her üç ekseninde şu şekilde ifade edilebilir [126]:

$$S_r = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} A_{lapa} v_r \quad (4.5)$$

$$S_\theta = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} A_{lapa} v_\theta \quad (4.6)$$

$$S_z = \frac{(1 - \gamma)^2}{(\gamma^3 + \varepsilon)} A_{lapa} v_z \quad (4.7)$$

Burada γ sıvı hacim fraksiyonunu temsil eder, ε tamamen katı durumda sıfıra bölünmeyi önlemek için kullanılan küçük bir sayıdır (0,001), A_{lapa} ise lapa bölge sabitini ifade eder ve bu çalışmada 10^5 değeri seçilmiştir. γ olarak gösterilen sıvı fraksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{eğer } T < T_k \\ \frac{T - T_k}{T_s - T_k} & \text{eğer } T_k < T < T_s \\ 1 & \text{eğer } T > T_s \end{cases} \quad (4.8)$$

Burada T_s ve T_k sırasıyla FDM'nin erime ve donma sıcaklıklarıdır.

Enerji:

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = k \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) \quad (4.9)$$

Burada k termal iletkenlik, H entalpidir ve duyulur entalpi, h_1 ve gizli ısı'nın toplamı olarak hesaplanır,

$$H = h_1 + \Delta H \quad (4.10)$$

$$h_1 = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (4.11)$$

burada h_{ref} referans sıcaklıktaki entalpiyi temsil eder ve C_p , FDM'nin özgül ısısını belirtir. Ayrıca Denklem (4.10)'daki ΔH , 0 (katı faz için) ile L (sıvı faz için) arasında değişebilen

gizli ısı içeriğini temsil eder. Gizli ısı içeriği, FDM'nin gizli ısısı cinsinden aşağıda gibi ifade edilebilir:

$$\Delta H = \gamma L \quad (4.12)$$

4.3.2.1. SST k- ω model

SST k- ω modeli, duvarların yakınında k- ω modelini ve duvarlardan uzak bölgelerde serbest akış bağımlılığını önlemek için k- ε modelini kullanan hibrit bir türbülans modelidir [126] ve Eddy viskozitesi şu şekilde verilmiştir [127]:

$$v_t = \rho a_1 k_1 \frac{1}{\max(a_1 \omega, b_1 S_1 F_2)} \quad (4.13)$$

burada ρ yoğunluk, a_1 deneysel sabit (0,31 değeriyle) ve k_1 türbülans kinetik enerjisidir. Ayrıca, ω spesifik dağılım hızıdır, b_1 1.0'a ayarlanmıştır, S_1 gerinim hızıdır ve F_2 karıştırma fonksiyonu olup şu şekilde ifade edilir:

$$F_2 = \tanh F_2 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left(\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{\rho y^2 \omega} \right), 100 \right) \right\}^2 \right\} \quad (4.14)$$

k ve ω 'yi tanımlayan denklemler aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \min(P_k, 10\beta_0^* k \omega) - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} &= \rho \alpha \frac{\omega}{k} \min \left[G, \frac{c_1 \beta_0^* \omega}{a_1} \max(a_1 \omega, b_1 F_{23} S) \right] \\ &- \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_t \sigma_w) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega_2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4.16)$$

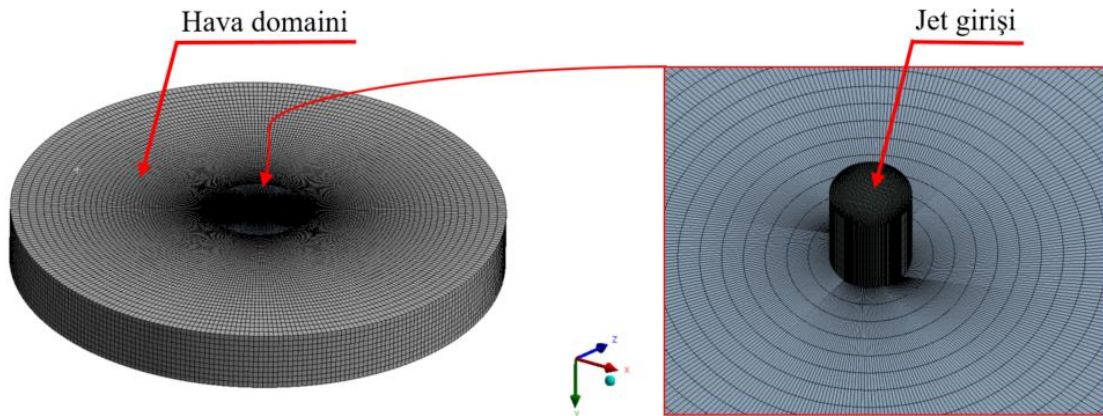
Burada $P_k = G = v_t S^2$ ve türbülans sabitleri: $\beta_0^* = \beta^* = 0.09$, $\sigma_{k_1} = 0.85$, $\alpha_1 = 5/9$, $\sigma_{\omega_1} = 0.5$, $\beta_1 = 0.075$, $b_1 = \sigma_{k_2} = 1$, $c_1 = 10$, $\alpha_2 = 0.44$, $\sigma_{\omega_2} = 0.856$ ve $\beta_2 = 0.0828$.

4.3.3. Başlangıç ve sınır şartları

Girişteki hava sıcaklığı $T_g = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (deneysel çalışmada jet çıkışındaki hava sıcaklığı) ve diğer termal sınır koşulları “birleşik (coupled)” olarak ayarlanmıştır. Hava girişi için hız girişi sınır şartı kullanılırken, hava çıkışı için sıfır gösterge basıncını korumak amacıyla basınç çıkışı sınır şartı uygulanmıştır. Hava giriş hızları $Re = 2235$ ve 4470 'e karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır. Ek olarak, başlangıç zamanında ($t = 0\text{ s}$), FDM, kap ve hava bölgesi sıcaklıkları, deney koşullarına uygun şekilde $T_b = 19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye eşit şekilde ayarlanmıştır.

4.3.4. Ağ hassasiyeti çalışması ve HAD modelinin doğrulanması

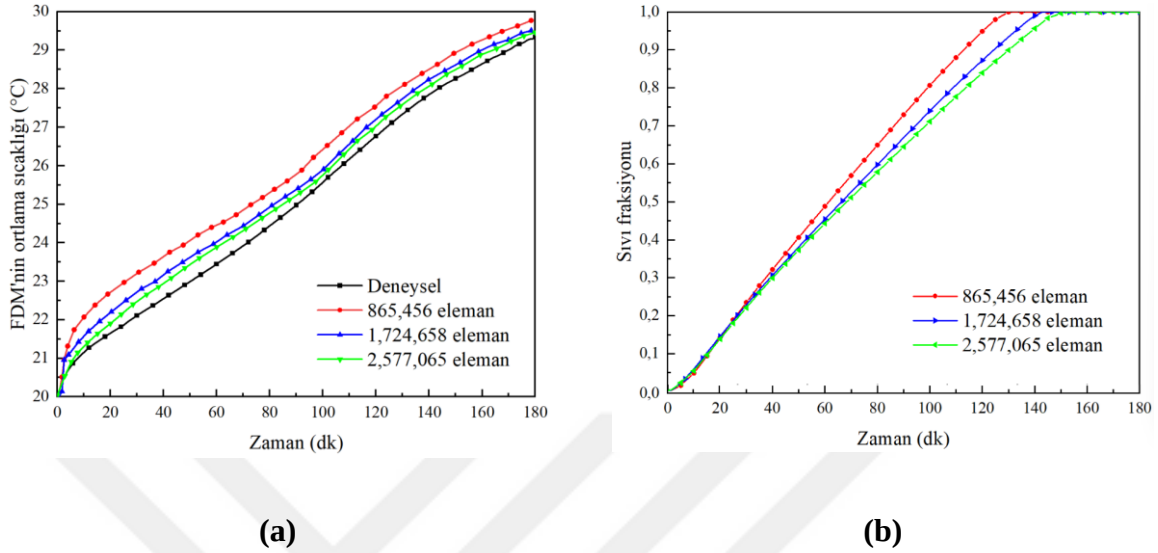
HAD modelinde kullanılan ağ yapısı Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Jet akışı ve eşlenik ısı transferini içeren kritik bölgelerde hassasiyeti arttırmak için daha yoğun bir ağ yapısı kullanılmıştır. Optimum eleman sayısını belirlemek için özel bir durumla ağ hassasiyeti çalışması yapılmıştır. Analizler 865.456, 1.724.658 ve 2.577.065 olmak üzere üç farklı eleman sayısı için yapılmıştır.



Şekil 4.7: HAD modelinin ağ yapısı

Şekil 4.8'de farklı eleman sayılarına sahip modellerden elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki grafikten de görülebileceği gibi 1.724.658 eleman sayısına sahip model ile 2.577.065 eleman sayısına sahip modeller, birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Hem hesaplama süresi hem de tutarlılık dikkate alındığında 1.724.658 eleman

sayısına sahip modelin optimum sonuç verdiği görülmektedir. Dolayısıyla bu eleman boyutu diğer modellerde referans olarak kullanılmıştır.

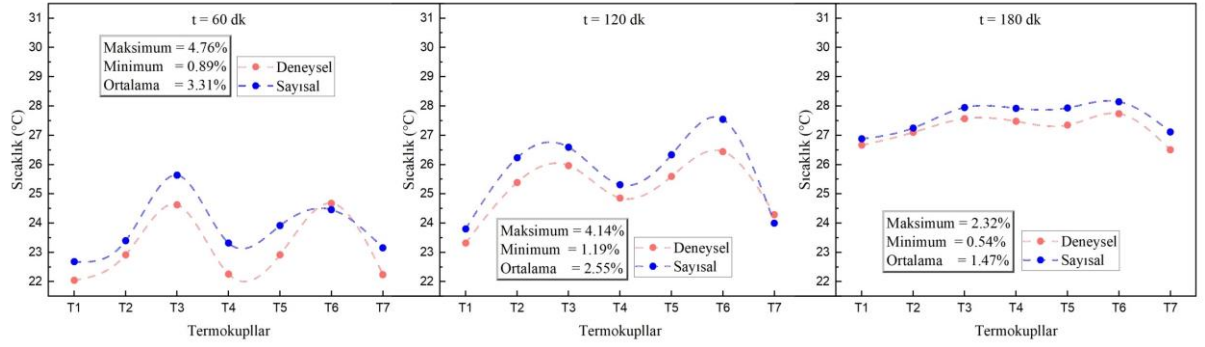


Şekil 4.8: Farklı eleman sayıları için HAD analizi sonuçları; **(a)** Ortalama FDM sıcaklığının karşılaştırılması (deneysel sonuç ile birlikte) **(b)** Sıvı fraksiyonunun karşılaştırılması

Şekil 4.8 aynı zamanda deneysel ve sayısal sonuçlar arasındaki karşılaştırmayı da göstermektedir. FDM erime simülasyonundaki mevcut sayısal şemanın kesinliği ve güvenilirliği, deneysel verilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Şekil incelendiğinde HAD modelinden elde edilen sıcaklık değerleri ile ilk zaman adımlarındaki deneysel veriler arasında yaklaşık %5,19'luk bir fark bulunmaktadır. Ancak daha sonraki zaman adımlarında bu fark %1,83'e düşerek oldukça iyi bir uyum göstermiştir.

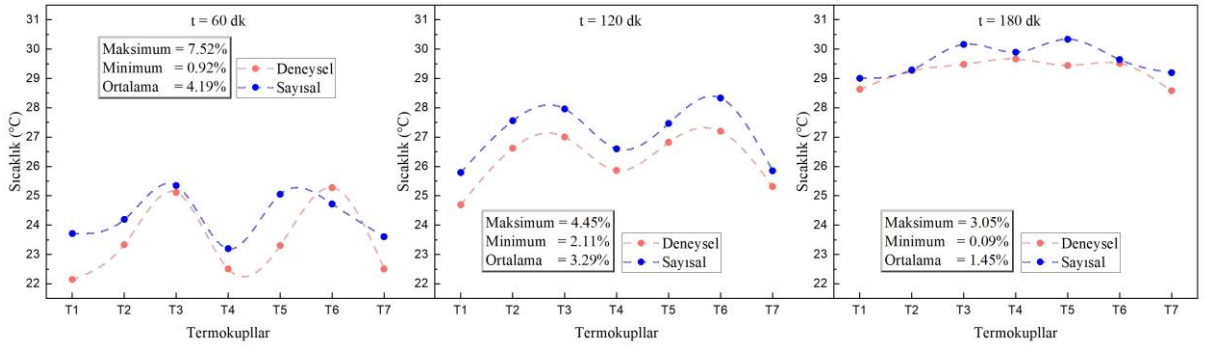
Şekil 4.9, sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki başka bir karşılaştırmayı göstermektedir. Bu şekilde; $H/D = 0.4$, $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ parametreleri için üç farklı zaman adımında ($t = 60$ dk, $t = 120$ dk ve $t = 180$ dk) sayısal simülasyonlardan elde edilen sıcaklıklar ile deneysel termokupllardan alınan ölçümler arasında bir karşılaştırma gösterilmektedir. Şekil aynı zamanda, bu üç zaman adımındaki maksimum, minimum ve ortalama farkları da göstermektedir. Sonuçlar, termokupl sıcaklıkları arasında iyi bir uyum olduğunu ve tüm zaman adımlarında benzer bir eğilimi göstermektedir. Ayrıca zaman adımları ilerledikçe sayısal ve deneysel ölçümler arasındaki farkın giderek azaldığı da görülmektedir.

$$H/D = 0.4 - Re = 2235$$



(a)

$$H/D = 0.4 - Re = 4470$$



(b)

Şekil 4.9: $H/D = 0.4$ için farklı zaman adımlarında deneysel ve sayısal termokupl sıcaklıklarının karşılaştırılması; **(a)** $Re = 2235$ **(b)** $Re = 4470$

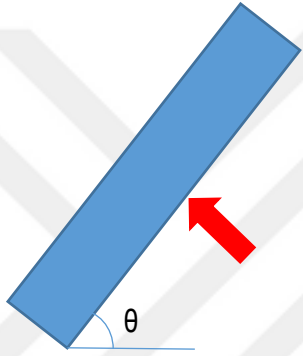
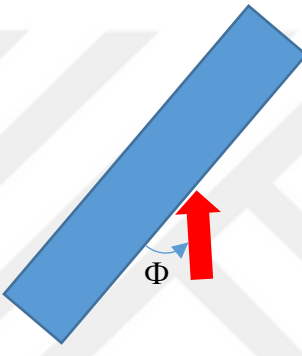
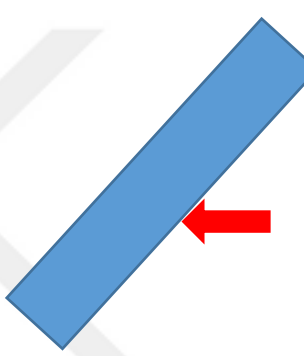
4.4. İncelenen parametreler

FDM'nin erime özelliği ve enerji depolama performansı birçok parametre tarafından etkilenmektedir. Bu çalışmada; jet hızı, konteynerin yatay açısı, jetin konteynere çarpma açısı ve jet-konteyner arası mesafe, sayısal ve deneysel olarak incelenen parametrelerdir. Bu parametreler, konteyner açısı altında gruplandırılarak Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4'te sunulmuştur. Burada jet hızı, Re sayısı olarak hesaplanmış olup, $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ için deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Ayrıca konteyner-jet arası mesafe, H/D oranı (konteyner-jet arası mesafenin konteyner çapına oranı) şeklinde bir boyutsuz sayı olarak incelenmiştir. Genel olarak üç farklı konteyner yatay açısı, üç farklı jet-konteyner açısı, iki farklı Re sayısı ve üç farklı H/D oranı olmak üzere 11 parametrenin kombinasyonlu şekilde analizleri yapılarak FDM erime ve enerji depolama performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Çizelge 4.2'de gösterilen 0° konteyner açısında, 45° ve 135° jet-konteyner açısı benzer sonuçları vereceğinden sadece 45° jet-konteyner açısı incelenmiştir.

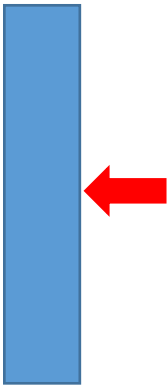
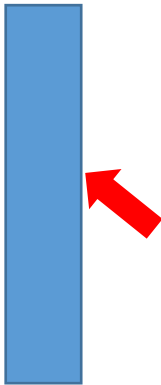
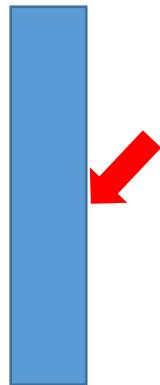
Çizelge 4.2: $\theta = 0^\circ$ konteyner açısı için kullanılan parametreler

Kullanılan parametreler		
Jet-konteyner açısı (Φ)	90°	45°
Re sayısı	2235 - 4470	
H/D oranı	0.4 - 0.5 - 0.6	

Çizelge 4.3: $\theta = 45^\circ$ konteyner açısı için kullanılan parametreler

Kullanılan parametreler			
Jet-konteyner açısı (Φ)	90°	45°	135°
Re sayısı	2235 - 4470		
H/D oranı	0.4 - 0.5 - 0.6		

Çizelge 4.4: $\theta = 90^\circ$ konteyner açısı için kullanılan parametreler

Kullanılan parametreler			
Jet-konteyner açısı (Φ)	90°	45°	135°
Re sayısı	2235 - 4470		
H/D oranı	0.4 - 0.5 - 0.6		

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, geleneksel FDM eritme yöntemlerine alternatif bir yaklaşım olan ÇSHJ yöntemi ile dairesel bir geometriye sahip bir konteynerde bulunan FDM'nin erime süreci ve enerji depolama performansı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, çalışmalarda kullanılan parametrelerin FDM erime sürecine ve enerji depolama kapasitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, çalışmada kullanılan parametrelerin etkisini daha detaylı gözlemleyebilmek amacıyla ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

5.1.H/D Oranının Etkisi

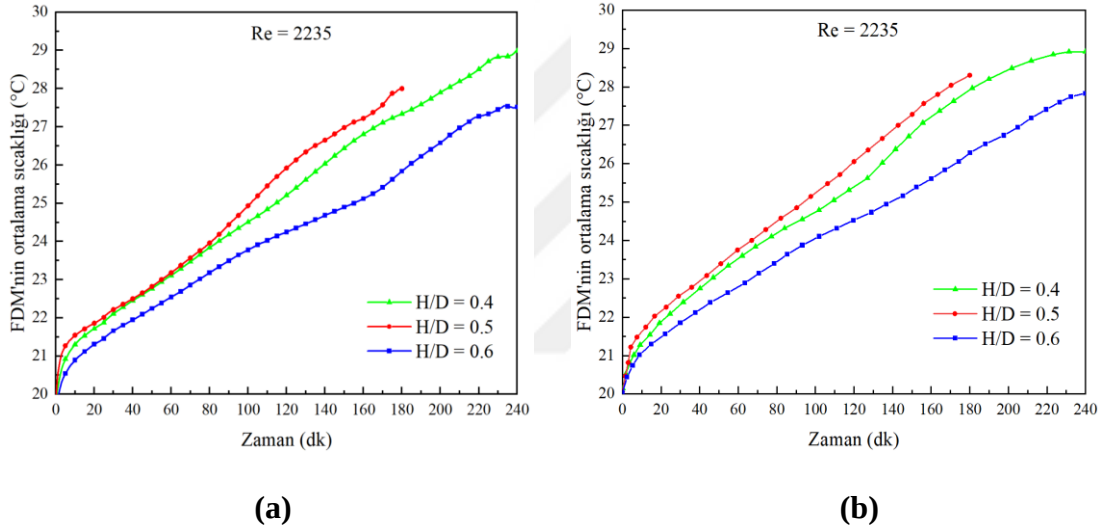
H/D oranı, jet çıkışı ile konteyner arasındaki mesafenin konteyner çapına oranı olarak hesaplanan boyutsuz bir parametreyi ifade eder. Bu çalışmada 0.4, 0.5 ve 0.6 olmak üzere üç farklı H/D oranı incelenmiştir. Bu üç parametrenin, FDM'nin erime süreci üzerindeki etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar, farklı konteyner açıları için ayrı başlıklar altında sunulmuştur. Bu yaklaşımla, her bir parametrenin etkisi açıkça anlaşılır hale getirilmiştir.

5.1.1. 0° konteyner açısı için sonuçlar

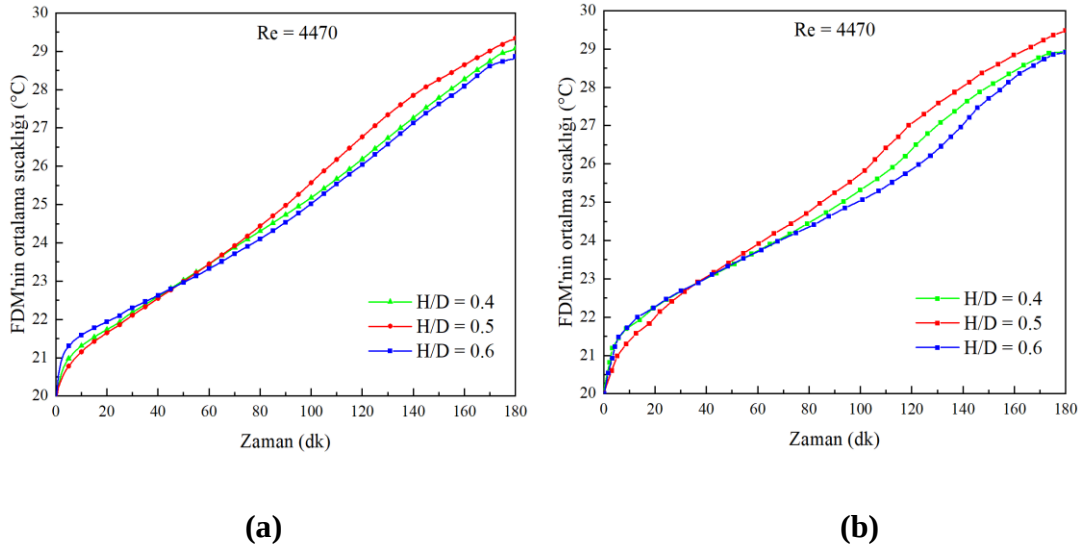
Jet-konteyner arası mesafenin, konteyner çapına oranı, boyutsuz bir parametre olan H/D oranı ile tanımlanmış ve çalışmalarda 0.4, 0.5 ve 0.6 olmak üzere üç farklı H/D oranı kullanılmıştır. $Re = 2235$ ve 0° konteyner açısı parametreleri için H/D oranının, FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi Şekil 5.1'de sunulmuştur. Şekil 5.1 (a) deneysel çalışmadan elde edilen ortalama sıcaklık dağılımını gösterirken, Şekil 5.1 (b) sayısal simülasyonlardan hesaplanan dağılımı göstermektedir. Hesaplanan ve ölçülen sıcaklıklar, her iki durumda da yaklaşık olarak doğrusal artışlarla benzer profiller sergilediği görülmektedir. Ancak, deneysel olarak ölçülen sıcaklık değerlerine göre HAD sonuçlarının genellikle bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu fark, HAD modelinde yapılan idealleştirilmiş varsayımlara bağlanabilir.

Benzer şekilde Şekil 5.2, konteyner içindeki FDM'nin ortalama sıcaklığını daha yüksek bir Reynolds sayısında göstermektedir. Şekil 5.1 ve 5.2'nin karşılaştırılması, H/D oranına göre ortalama sıcaklık değerleri arasındaki farkın Re sayısının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Bu durum, sıcak hava hızının yüksek değerleri için H/D oranının, ısınma veya erime üzerindeki etkilerinin kayda değer bir öneme sahip olmadığı anlamına gelir. Tüm

durumlarda, FDM'nin ortalama sıcaklığında doğrusal bir artış gözlemlenmiş olup en yüksek sıcaklıklar $H/D = 0.5$ 'te kaydedilirken, en düşük sıcaklıklar $H/D = 0.6$ 'da görülmüştür. Bu, erime sürecini kontrol etmek için H/D oranının optimal bir değeri olduğu anlamına gelmektedir. Hava jeti ile konteyner arasındaki mesafe azaldıkça (daha düşük H/D oranları için), FDM'nin sıcaklığının ve dolayısıyla erime hızının artması beklenir. Ancak hava jeti yaklaştıkça etkisinin noktasal hale geldiğini belirtmekte fayda var. $H/D = 0.5$ mükemmel bir termal dağılım sağlayabilirken, daha düşük bir H/D aşırı etkileşime ve eşit olmayan sıcaklık dağılımına neden olabilir. Öte yandan daha yüksek H/D oranları yetersiz ısı transferine neden olabilir. Bu nedenle H/D oranının 0.5 olması üstün performans sergileyerek bu çelişen faktörler arasında bir denge görevi gördüğü söylenebilir.

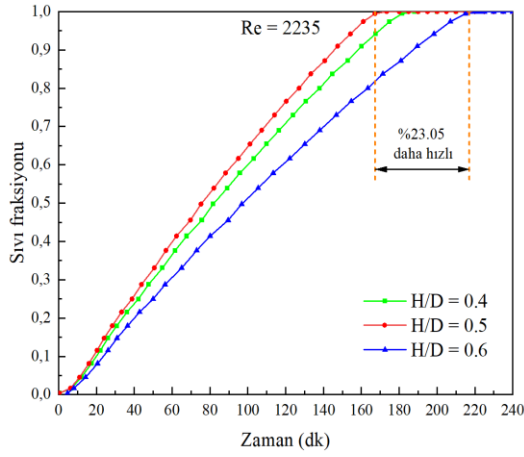


Şekil 5.1: $Re = 2235$ ve 0° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

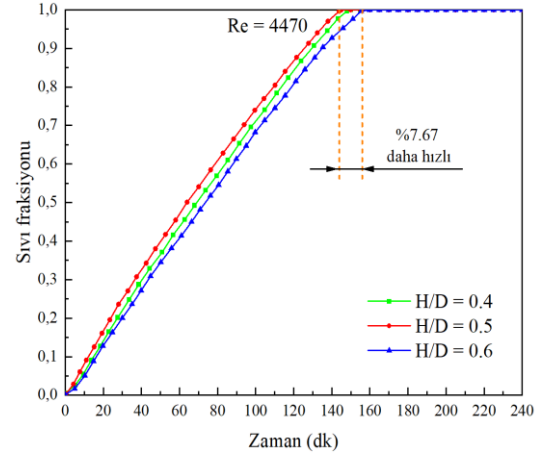


Şekil 5.2: $Re = 4470$ ve 0° konteyner açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Konteyner açısı 0° için farklı Re sayılarında H/D oranının zaman içinde FDM'nin sıvı fraksiyonundaki değişimi üzerindeki etkileri Şekil 5.3'te sunulmaktadır. Bu şekil sayısal sonuçları yansıtmaktadır; beklendiği gibi, FDM'nin erimesi nedeniyle sıvı fraksiyon zamanla artmakta ve daha yüksek Re sayısında faz değişiminin hızlandığı görülmektedir. Daha yüksek bir Re sayısı, artan kinetik enerji ile birlikte artan ısı transfer katsayılarının ve konveksiyon ısı transferinin oluşmasını sağlar. Böylece daha yüksek Re sayılarında tam erimeye daha hızlı ulaşılır. Re sayısı 2235'ten 4470'e çıktığında 0.4, 0.5 ve 0.6 olan H/D oranları için erime sürelerinde sırasıyla %18.68, %14.22 ve %27.93 oranında azalmalar görülmüştür. Ayrıca en hızlı erime her iki Re sayısı için de $H/D = 0.5$ 'te meydana geldiği görülmüştür. Bununla birlikte, Şekil 5.3'te görüldüğü gibi Re sayısı arttıkça H/D parametresinin erime süresi üzerindeki etkisi azalmıştır. $Re = 2235$ 'te maksimum ve minimum erime süreleri arasındaki fark %23.05 iken $Re = 4470$ 'de bu fark %7.67'ye düşmektedir.



(a)

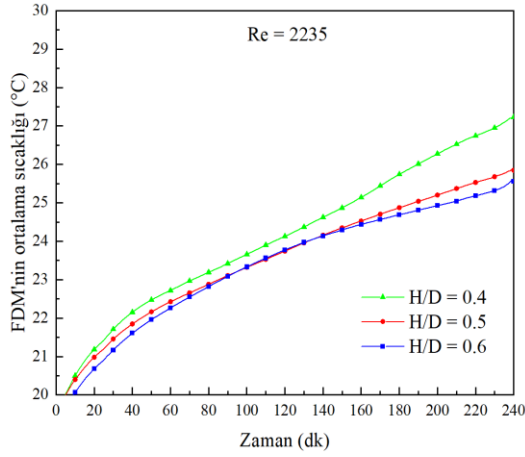


(b)

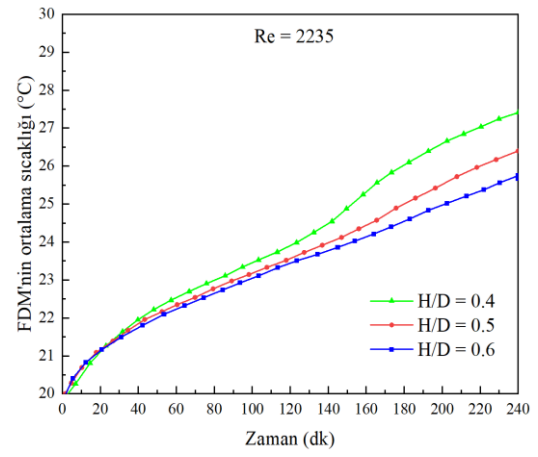
Şekil 5.3: H/D oranının 0° konteyner açısı için sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; **(a)** $Re = 2235$ **(b)** $Re = 4470$

5.1.2. 45° konteyner açısı için sonuçlar

H/D oranının, $Re = 2235$ ve 45° konteyner açısı parametreleri için FDM'nin ortalama sıcaklığının zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi, Şekil 5.4'te deneysel ve sayısal olarak sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde ölçülen ve hesaplanan ortalama sıcaklık değerlerinin zamana göre değişiminin oldukça benzer bir profile sahip olduğu görülmektedir. En yüksek ortalama sıcaklık, H/D = 0.4 parametresi için elde edilirken, H/D = 0.5 ve 0.6 parametreleri yaklaşık olarak eşit ortalama sıcaklık değerlerine sahiptir. Ayrıca, yaklaşık olarak $t = 140$ dk zaman adımına kadar sıcaklıklar benzer trendi izlerken bu süre sonrasında H/D = 0.4 parametresi belirgin bir sapma göstererek daha yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır. Başka bir ifade ile H/D = 0.4 parametresi için FDM'nin ortalama sıcaklığı $t = 140$ dk zaman adımından son zaman adımına kadar %10.97 oranında artarken en düşük ortalama sıcaklık değerlerine sahip H/D = 0.6 parametresi için bu artış %5.63 oranında olmuştur. Bu durum H/D = 0.4 parametresi için belirtilen zaman adımından sonra tamamen katı fazda bulunan FDM'nin oldukça az miktarda olduğunu göstermektedir.



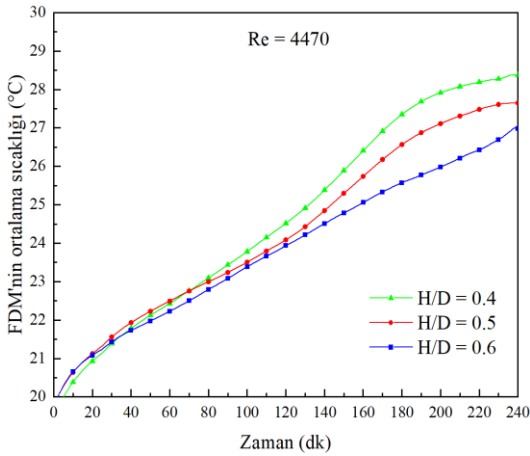
(a)



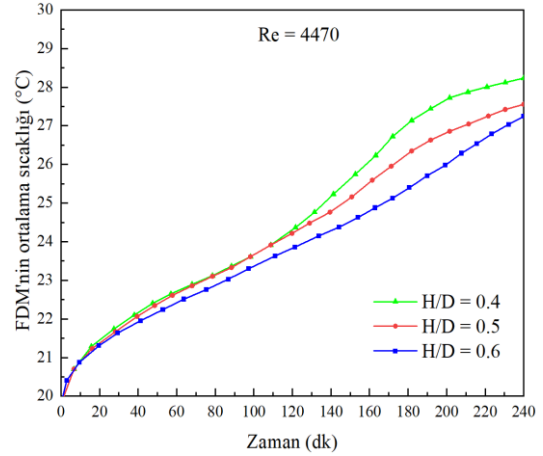
(b)

Şekil 5.4: $Re = 2235$ ve 45° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 5.5, $Re = 4470$ için H/D oranının, ortalama FDM sıcaklığının zaman içindeki değişimi üzerine etkisini göstermektedir. Şekil 5.4'e benzer şekilde, $H/D = 0.4$ parametresi için ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar en yüksek değerlere sahiptir. Ancak dikkat çeken bir nokta, $Re = 2235$ için $H/D = 0.6$ parametresi ile benzer bir eğilim gösteren $H/D = 0.5$ 'in, $Re = 4470$ için $H/D = 0.4$ parametresi ile benzer bir eğilim sergilemesidir. Bu gözlem, Re sayısının artmasıyla birlikte H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığı üzerindeki etkisini azalttığını ortaya koymaktadır.



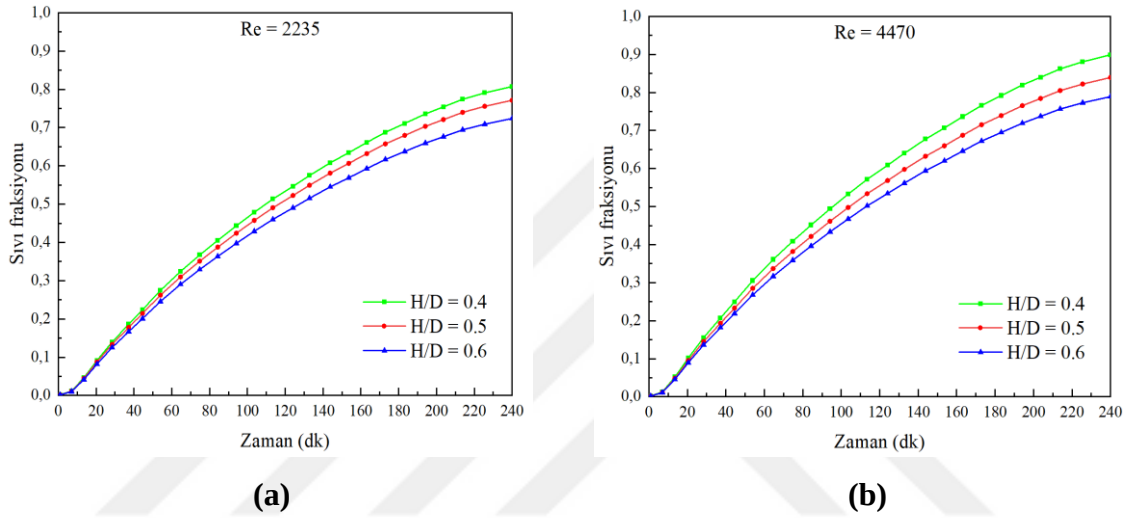
(a)



(b)

Şekil 5.5: $Re = 4470$ ve 45° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

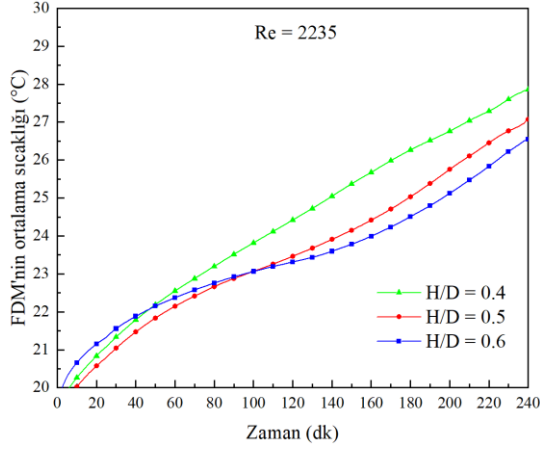
Şekil 5.6, 45° konteyner açısı altında ve farklı Re sayılarında H/D oranının FDM'nin sıvı fraksiyonundaki değişime olan etkilerini göstermektedir. İki farklı Re sayısı ve tüm H/D oranları için, deneysel süreye eşit olan analiz süresi boyunca konteyner içindeki FDM'nin tamamen sıvı faza geçmediği gözlenmektedir. Bununla birlikte, H/D oranı arttıkça sıvı fraksiyonunda bir azalma meydana gelmektedir. Bu etki, yüksek Re sayılarında daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle, maksimum ve minimum sıvı fraksiyon değerlerine sahip $H/D = 0.4$ ve $H/D = 0.6$ parametreleri için yapılan karşılaştırmada, $Re = 2235$ için %10.4'lük bir azalma görülürken $Re = 4470$ için bu fark %12.4 olarak kaydedilmiştir.



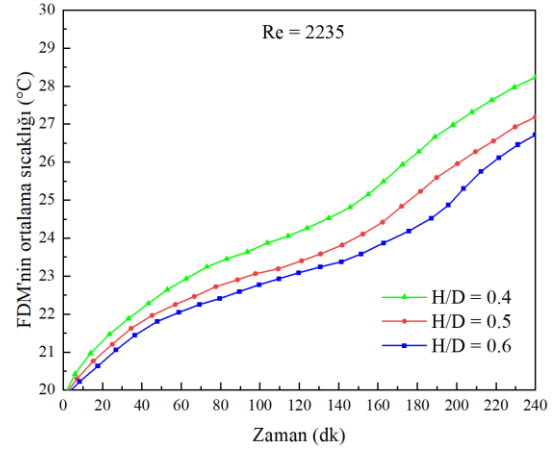
Şekil 5.6: H/D oranının 45° konteyner açısı için sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; **(a)** $Re = 2235$ **(b)** $Re = 4470$

5.1.3. 90° konteyner açısı için sonuçlar

$Re = 2235$ ve 90° konteyner açısı altındaki koşullarda, H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklık değişimi üzerindeki etkisini inceleyen Şekil 5.7, deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmaktadır. Grafikler incelendiğinde, her H/D oranı için benzer zamana bağlı sıcaklık eğrileri görülmekte olup, $H/D = 0.4$ için deneysel sıcaklık eğrisinin yaklaşık olarak lineer bir yapıda olduğu dikkat çekmektedir. Özellikle, H/D oranı 0.6 olan parametre, $t = 50$ dk zaman adımıyla $H/D = 0.4$ ile $t = 100$ dk zaman adımıyla ise $H/D = 0.5$ olan parametre ile neredeyse aynı sıcaklık değerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, belirtilen H/D oranlarının verilen zaman dilimlerine kadar, FDM'nin ortalama sıcaklığı üzerinde etkili bir parametre olmadığını göstermektedir. Ancak, nihai sonuçlar incelendiğinde, her üç parametre için de sıcaklık değerlerinin H/D oranı arttıkça azaldığı görülmektedir.



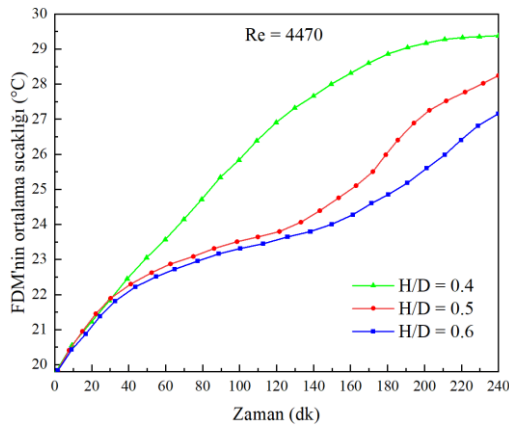
(a)



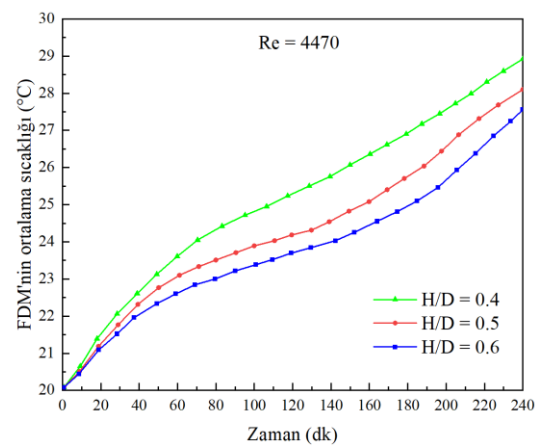
(b)

Şekil 5.7: $Re = 2235$ ve 90° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 5.8'de, $Re = 4470$ için ölçülen ve hesaplanan değerler incelendiğinde ise $H/D = 0.4$ parametresi için deneysel sıcaklık eğrisinin sayısal sonuçlara göre daha dik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu farklılık, deneysel çalışmaların çevresel faktörlerden etkilenebileceği, ancak sayısal simülasyonların daha kusursuz ortam kabulü yaptığı gerçeğinden kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca, deneysel sonuçlara göre H/D oranı 0.5 ve 0.6 olan parametrelerin sıcaklık eğrileri, yaklaşık 160 dk sonrasında ortalama sıcaklık artışı hızlanmıştır. Benzer bir durum sayısal sonuçlarda da görülmekte birlikte, tüm H/D oranlarının analiz süresi boyunca orantılı bir şekilde arttığını göstermektedir.



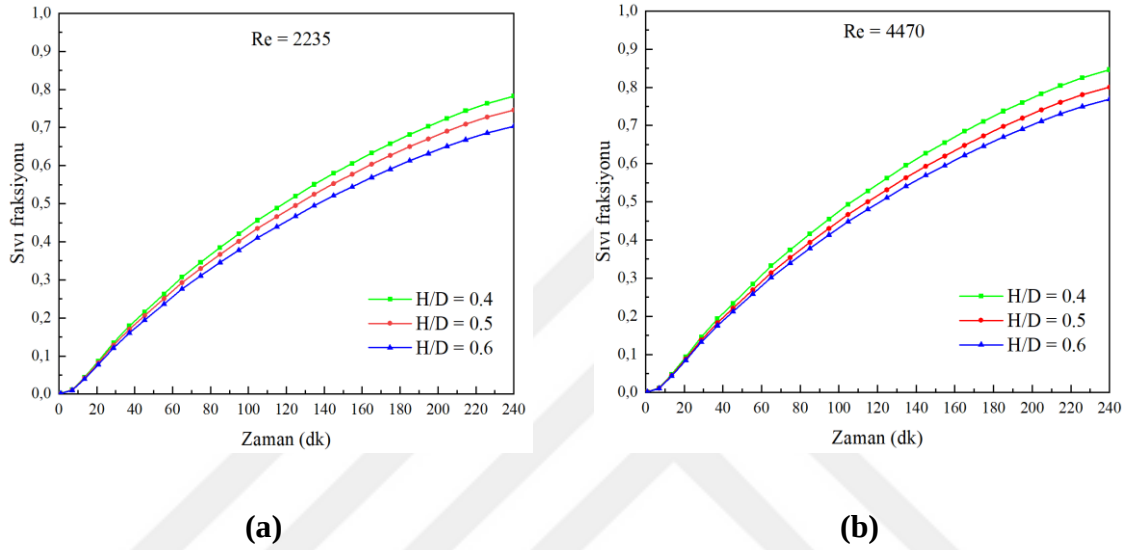
(a)



(b)

Şekil 5.8: $Re = 4470$ ve 90° disk açısı için H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 5.9, 90° konteyner açısında farklı Re sayılarına için H/D oranının, FDM'nin sıvı fraksiyonundaki değişime olan etkilerini sunmaktadır. Her farklı Re sayısı ve tüm H/D oranları için, analiz süresi boyunca FDM'nin tamamen sıvı hale geçmediği gözlenmektedir. Benzer şekilde H/D oranı azaldıkça her iki Re sayısı için sıvı fraksiyonunda bir artış olmuştur. Her bir H/D oranı için sıvı fraksiyonu, analizin ilk zaman adımlarında birbirine yakın değerlere sahipken ilerleyen zaman adımlarında bu farkın arttığı gözlenmiştir.



Şekil 5.9: H/D oranının 90° konteyner açısı için sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; **(a)** Re = 2235 **(b)** Re = 4470

H/D oranının FDM'nin ortalama sıcaklığı ve erime performansı üzerine etkileri üzerine genel bir değerlendirme yapılacak olursa bu oranının her bir konteyner açısında farklı etkilere sahip olduğu söylenebilir. 0° konteyner açısında maksimum ortalama sıcaklık ve erime performansı H/D = 0.5 için sağlanırken, 45° ve 90° konteyner açısında H/D = 0.4 oranı optimum performans sergilemiştir. 0° konteyner açısında Re = 2235 için H/D oranının ortalama sıcaklık ve erime performansı üzerinde oldukça etkili bir parametre olduğu gözlemlenmiştir. Ancak Re = 4470 olması durumunda ise H/D oranının etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bununla birlikte 45° konteyner açısında Re = 2235 için H/D = 0.5 ve 0.6 parametrelerinde FDM'nin ortalama sıcaklık değeri oldukça yakın değerlere sahip olurken, 90° konteyner açısında Re = 4470 olması durumunda bu parametreler yaklaşık olarak eşit performans göstermişlerdir. Sonuç olarak, 0° konteyner açısında FDM'nin tamamen sıvı fazda olduğu $t = 180$ dk zaman adımını göz önüne alarak, H/D oranının etkisini incelendiğinde, parametreler arasındaki farklar net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Buna

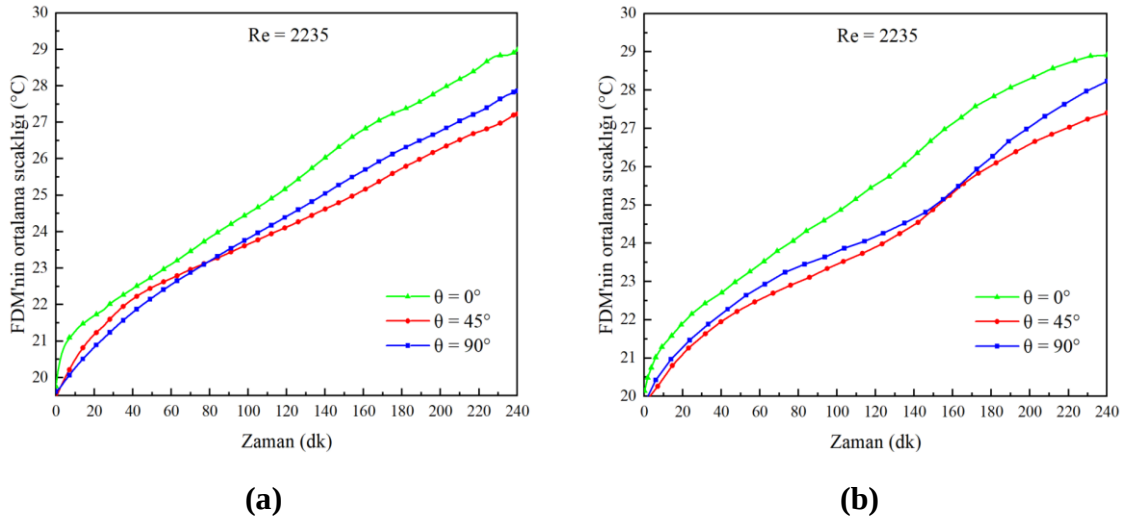
göre, H/D oranının en az etkili olduğu durum, $Re = 4470$ ile 0° konteyner açısında gözlenmiş olup bu iki parametre için maksimum ve minimum ortalama sıcaklık değerleri arasındaki fark %1.66'dır. Öte yandan, H/D oranının en fazla etkili olduğu senaryo, $Re = 4470$ ile 90° konteyner açısında görülmüş ve bu iki parametre için maksimum ve minimum ortalama sıcaklık değerleri arasındaki fark %13.17 olarak hesaplanmıştır.

5.2.Konteyner Eğim Açısının Etkisi

Konteyner eğim açısı, yerçekimi tarafından yönlendirilen doğal konveksiyonun karakteristiklerini şekillendirmede etkin bir rol oynar. Bu etkiyi incelemek amacıyla çalışmada, $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ ve 90° olmak üzere üç farklı konteyner eğim açısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı H/D oranları için ayrı ayrı sunulmuş ve konteyner eğim açısının, FDM'nin zamana bağlı ortalama sıcaklık değişimi ve erime süreci üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

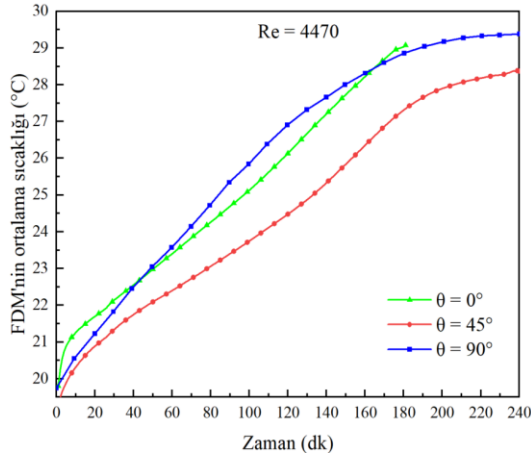
5.2.1. H/D = 0.4 için sonuçlar

Konteyner eğim açısının, FDM'nin ortalama sıcaklığının zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi $Re = 2235$ için Şekil 5.10'da deneysel ve sayısal verilerle sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, farklı konteyner eğim açılara sahip sistemler arasında belirgin farklılıkların olduğunu göstermektedir. Özellikle, 0° eğim açısına sahip olan konteynerde, hem deneysel hem de sayısal sonuçlar, FDM'nin ortalama sıcaklığının diğer eğim açılara göre daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer yandan, 45° ve 90° eğimli konteynerler için nihai sonuçlar dikkate alındığında deneysel sonuçlara göre %2.38 sayısal sonuçlara göre %2.87 oranında bir fark görülse de bu farklar, analiz süresi boyunca önemsiz düzeydedir. Bu sonuçlar, konteynerin eğim açısının, FDM'nin sıcaklık performansına olan etkisini vurgulamakta olup, 0° eğim açısının özellikle bu performansı artırdığını göstermektedir.

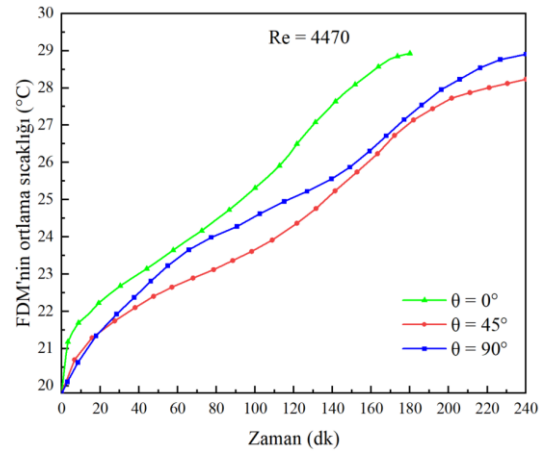


Şekil 5.10: $Re = 2235$ ve $H/D = 0.4$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; **(a)** Deneysel **(b)** Sayısal

Şekil 5.11’de $Re = 4470$ için FDM’nin ortalama sıcaklık değerinin zamana bağlı değişimi verilmiş olup 0° konteyner açısında $t = 180$ dk zaman adımına kadar konteynerde bulunan FDM’nin tamamı sıvı faza geçtiği için analizler bu zaman adımında sonlandırılmıştır. Özellikle sayısal sonuçlara göre 0° konteyner açısında FDM’nin ortalama sıcaklığı diğer konteyner açılarına göre yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Benzer şekilde deneysel grafikte izlediği eğilim dikkate alındığında eşit zaman adımında daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşacağı gözlemlenebilmektedir. Öte yandan 45° ve 90° eğim açıları için ölçülen sıcaklık farkı deneysel sonuçlarda sayısal sonuçlara göre daha belirgin düzeydedir. Özellikle $t = 180$ dk zaman adımı dikkate alındığında deneysel sonuçlara göre 0° ve 90° eğim açılarındaki sıcaklıklar yaklaşık olarak eşit değere sahipken, sayısal sonuçlara göre 45° ve 90° eğim açılarındaki sıcaklık değerleri yakın değerlere sahip olmuştur. Deneysel ve sayısal grafiklerde her bir eğim açısına ait trendler karşılaştırıldığında 0° ve 45° eğim açıları benzer yapıya sahipken en büyük fark 90° eğim açısında görülmektedir. Bu farklılık, deneysel ölçümlerin bir dizi parametre tarafından etkilendiği gerçeğinden kaynaklanmaktadır.



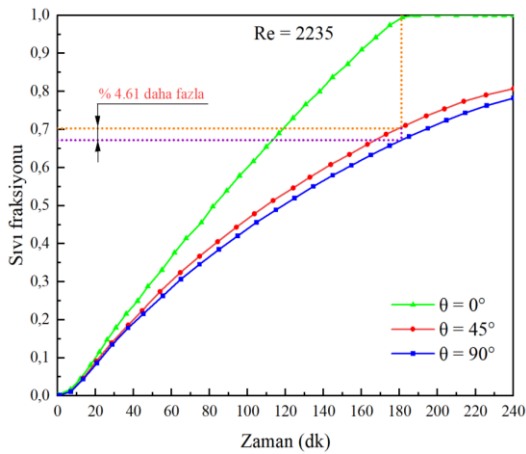
(a)



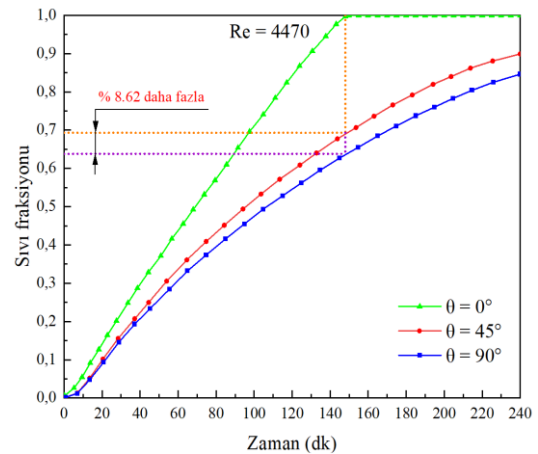
(b)

Şekil 5.11: Re = 4470 ve H/D = 0.4 için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 5.12, farklı Re sayılarının altında konteyner eğim açısının, FDM'nin sıvı fraksiyonundaki değişime olan etkisini göstermektedir. Her iki Re sayısında, 0° eğim açısında sahip konteynerlerdeki FDM'nin tamamen eridiği görülmektedir. Ancak 45° ve 90° eğim açılarında sahip konteynerlerde ise FDM'nin tamamen sıvı faza geçemediği görülmektedir. Re = 2235'te 0° için FDM'nin tamamen sıvı faza geçtiği t = 180 dk zaman adımında, 45° eğim açısındaki sıvı fraksiyonu 90° 'ye göre %4.61 oranında daha fazladır. Benzer şekilde Re = 4470'te ise 0° için FDM'nin tamamen sıvı faza geçtiği t = 148 dk zaman adımında 45° eğim açısındaki sıvı fraksiyonu 90° 'ye göre %8.62 oranında daha fazladır. Bu sonuçlar, eğim konteyner eğim açısının FDM erime performansı üzerinde güçlü bir parametre olduğunu göstermektedir.



(a)

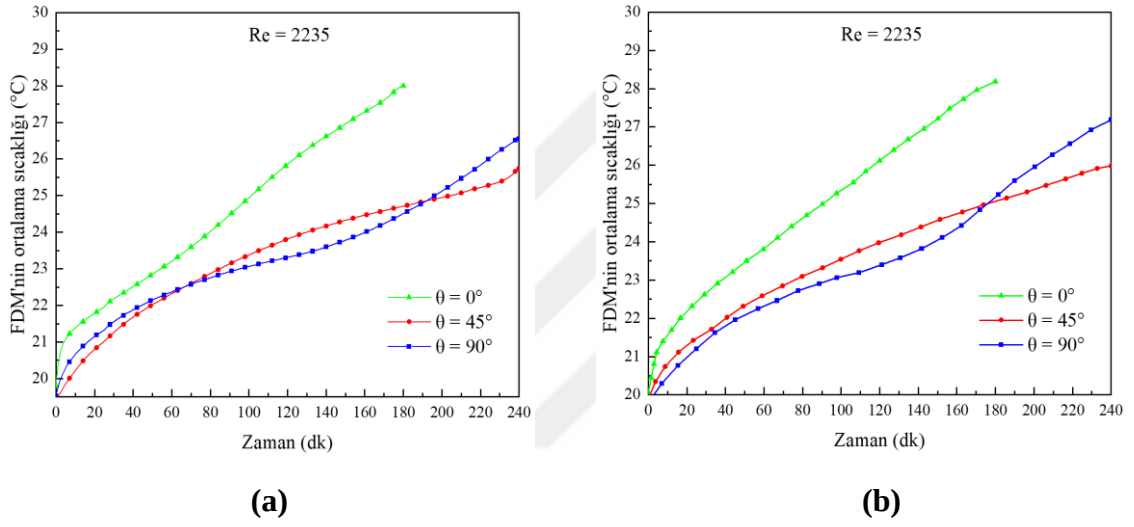


(b)

Şekil 5.12: H/D = 0.4 için konteyner eğim açısının sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) Re = 2235 (b) Re = 4470

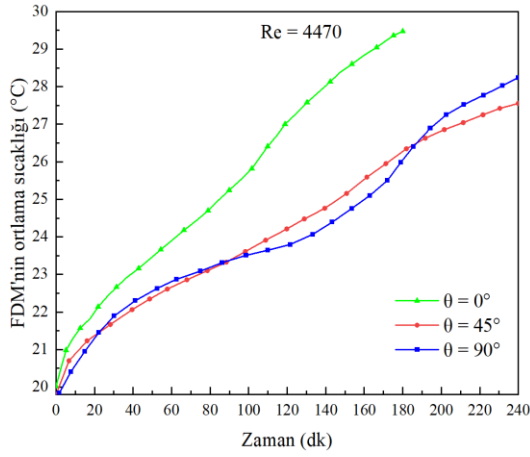
5.2.2. $H/D = 0.5$ için sonuçlar

$Re = 2235$ ve $H/D = 0.5$ parametreleri altında farklı konteyner açıları için FDM'nin zamana bağlı ortalama sıcaklık değişimi Şekil 5.13'te deneysel ve sayısal olarak verilmiştir. 0° konteyner eğim açısında sıcaklık artışının diğer eğim açılarna göre oldukça hızlı olduğu söylenebilir. Ayrıca 90° konteyner açısında deneysel ve sayısalda yaklaşık olarak sırasıyla $t = 190$ ve $t = 170$ dk zaman adımlarında 45° konteyner açısı ile eşit sıcaklık değerine sahip oldukları görülmektedir. Son zaman adımında ise deneysel sonuçlara göre 90° konteyner açısındaki FDM'nin ortalama sıcaklığı 45° 'ye göre % 3.14 oranında daha yüksek iken bu oran sayısal hesaplamalara göre % 4.61 olmuştur.

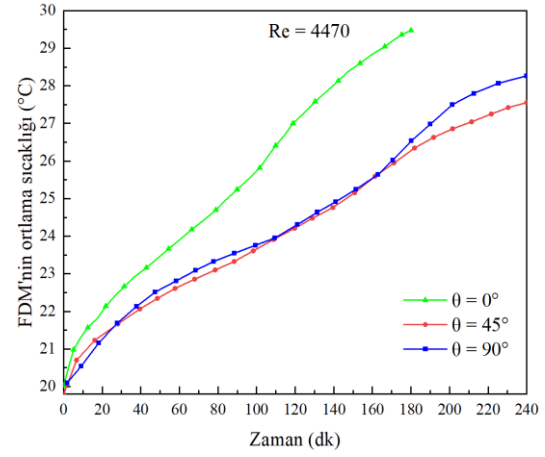


Şekil 5.13: $Re = 2235$ ve $H/D = 0.5$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 5.14, konteyner eğim açısının, FDM'nin ortalama sıcaklığının zaman ile değişimine etkisini $Re = 4470$ ve $H/D = 0.5$ parametreleri için göstermektedir. $Re = 2235$ 'teki sonuçlara benzer şekilde deneysel sonuçlar ve sayısal hesaplamalar 0° konteyner açısında maksimum sıcaklık değerine ulaşıldığını göstermektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre 45° ve 90° konteyner açılarında, bu konteynerlerdeki ortalama sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakın değerlere sahip olmuştur. Ancak son zaman adımında 90° için FDM'nin ortalama sıcaklığı %1.37 gibi küçük bir oranda daha yüksek seviyeye ulaşırken bu oran sayısal sonuçlara göre %2.57 olarak hesaplanmıştır.



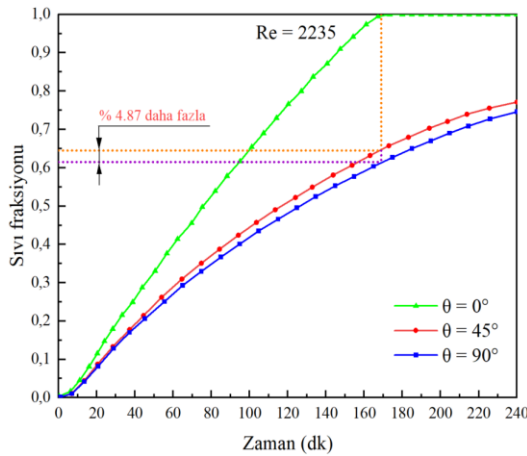
(a)



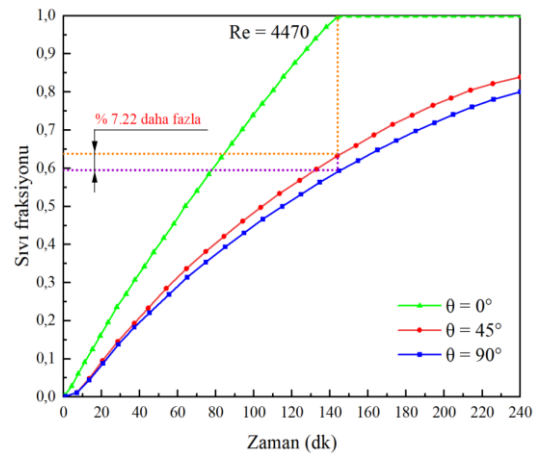
(b)

Şekil 5.14: $Re = 4470$ ve $H/D = 0.5$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Konteyner eğim açısının, zaman içinde sıvı fraksiyonundaki değişime olan etkisi iki farklı Reynolds sayısı için Şekil 5.15'te sunulmuştur. $Re = 2235$ için, 0° konteyner açısında FDM'nin 169 dakikada tamamen sıvı hale geçtiği anda, 45° konteyner açısındaki sıvı fraksiyonu 90° eğim açısındaki duruma göre %4.87 daha fazladır. Benzer şekilde $Re = 4470$ için, sıvı fraksiyonu zaman grafiği incelendiğinde, 0° konteyner açısında FDM yaklaşık olarak 145 dakikada tamamen erimiştir. Aynı zaman adımıında, 45° konteyner açısındaki sıvı fraksiyonu 90° eğim açısındaki duruma göre %7.22 oranında daha fazladır.



(a)

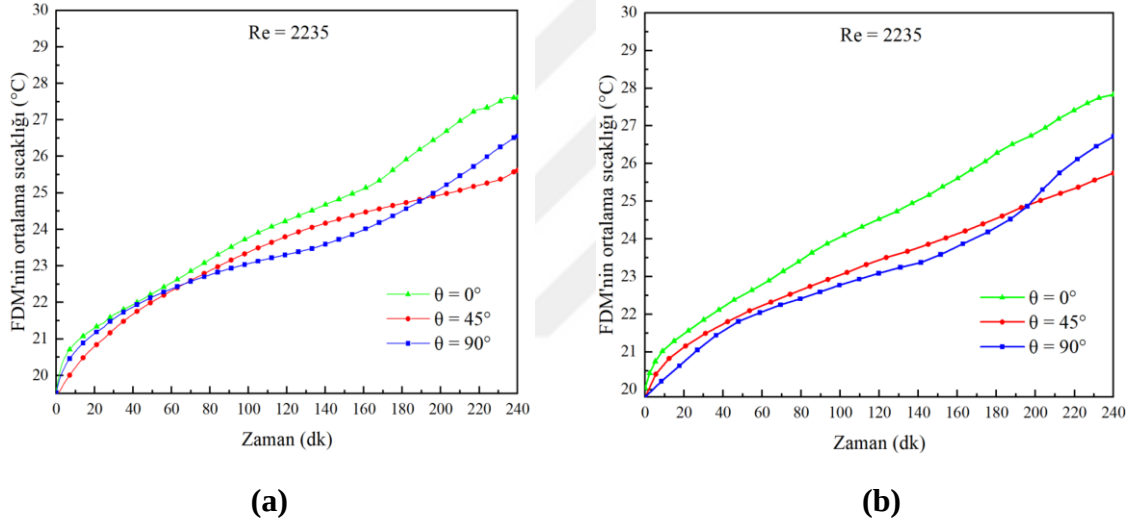


(b)

Şekil 5.15: $H/D = 0.5$ için konteyner eğim açısının sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$

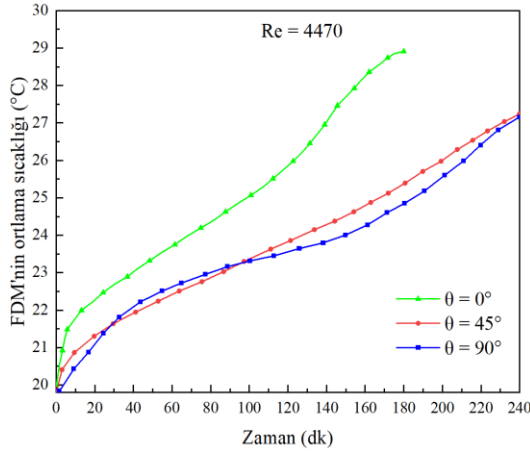
5.2.3. $H/D = 0.6$ için sonuçlar

$Re = 2235$ ve $H/D = 0.6$ koşulları altında, konteyner açısının FDM ortalama sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 5.16'da deneysel ve sayısal sonuçlarla sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, tüm konteyner açıları arasında 0° konteyner açısı, en yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmıştır. 90° konteyner açısındaki FDM'nin ortalama sıcaklık değeri, deneysel verilere göre yaklaşık olarak $t = 60$ ve 180 dk zaman adımlarında, sayısal sonuçlara göre ise $t = 200$ dk zaman adımıyla 45° konteyner açısındakiyle benzer bir sıcaklık değerine sahip olmuştur. Ancak bu belirtilen zaman adımlarından sonra, son zaman adımı kadar olan süreçte %3.67'lik bir farkla 90° konteyner açısı daha yüksek bir ortalama sıcaklık değerine ulaşmıştır.

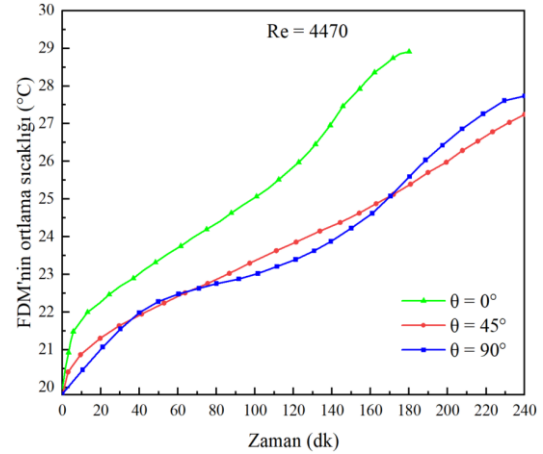


Şekil 5.16: $Re = 2235$ ve $H/D = 0.6$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 5.17'de ise konteyner açısının, zamanla değişen FDM'nin ortalama sıcaklığı üzerine etkisi, $Re = 4470$ için gösterilmiştir. Benzer şekilde 0° konteyner açısında bulunan FDM'nin ortalama sıcaklık değeri diğer konteyner açılarına göre kısa zamanda oldukça yüksek seviyelere ulaşarak maksimum performans göstermiştir. Bunun yanı sıra 45° ve 90° eğim açılarındaki konteynerlerde bulunan FDM'nin ortalama sıcaklık değeri deney süresi boyunca yakın değerlerde ilerlerken sayısal sonuçlara analiz sonunda 90° açıda, % 1.79 gibi küçük bir oranda daha yüksek sıcaklık değerine ulaşmıştır.



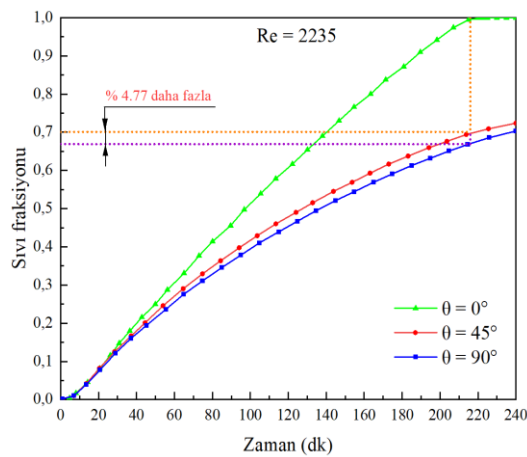
(a)



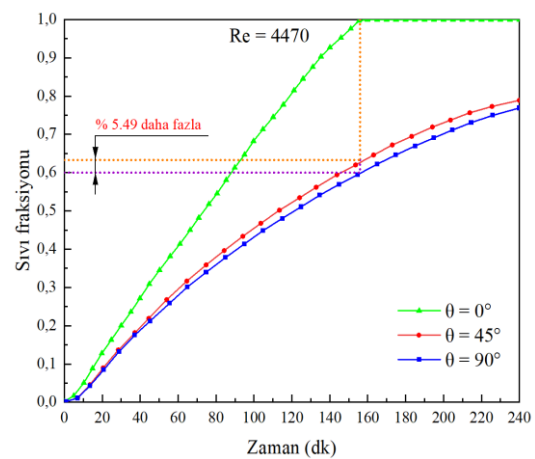
(b)

Şekil 5.17: $Re = 4470$ ve $H/D = 0.6$ için konteyner eğim açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Her bir konteyner açısında bulunan FDM sıvı fraksiyonunun zamanla değişimi her iki Re sayısı için Şekil 5.18'de sunulmuştur. Daha önce paylaşılan H/D oranlarındaki sıvı fraksiyon değişimlerine benzer şekilde 0° konteyner açısında bulunan FDM tamamen sıvı faza geçerken diğer konteyner açılarında tam erime görülmemiştir. $Re = 2235$ için FDM'nin tamamen sıvı faza geçtiği $t = 216$ dk anında 45° konteyner açısı için sıvı fraksiyonu 90° durumuna göre %4.77 oranında daha fazladır. Benzer şekilde $Re = 4470$ anında ise 0° konteyner açısında tam erime yaklaşık olarak $t = 156$ 'nci dakika anında gerçekleşmiştir. Bu zaman adımımda ise 45° ve 90° konteyner açılarındaki sıvı fraksiyon farkı %5.49 oranında gerçekleşmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.18: $H/D = 0.6$ için konteyner eğim açısının sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi; (a) $Re = 2235$ (b) $Re = 4470$

Konteyner eğim açısının FDM ortalama sıcaklığı ve erime performansı üzerine etkisi üzerine genel bir değerlendirme yapılacak olursa her bir H/D oranı için maksimum ortalama sıcaklık değerinin ve erime performansının 0° açısı için sağlandığı söylenebilir. 45° ve 90° konteyner açılarında ise sonuçlar farklılık gösterse de ihmal edilebilir düzeyde olmuştur. Örneğin ortalama sıcaklık grafikleri incelendiğinde bu iki konteyner açısı için sıcaklık eğrilerinin dalgalı bir hareket sergileyerek yer yer aynı sıcaklık değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu dalgalı ortalama sıcaklık değişimi nispeten 45° ve 90° konteyner açılarında görülmüştür. Bu duruma sebep olabilecek olgular aşağıdaki gibi açıklanabilir:

Doğal Konveksiyon: Konteyner eğim açısı, yerçekimi tarafından yönlendirilen doğal konveksiyonun karakteristiğini etkiler. 0° konteyner açısında, doğal konveksiyon çok daha düzgün bir şekilde ilerler, bu da daha lineer bir sıcaklık artışı gösterir. Ancak 45° ve 90° konteyner açısında ise konveksiyon daha karışık ve dalgalı bir şekilde hareket edebilir.

Sıcaklık Dağılımı: Konteynerin eğim açısı aynı zamanda içerideki sıcaklık dağılımını da etkiler. 0° konteyner açısında ısı, daha homojen bir şekilde dağılabilir, bu da daha sabit bir sıcaklık artışı gösterir. 45° ve 90° konteyner açısında ise ısı dağılımı daha karmaşık olabilir.

Konveksiyon Hızı: Konteyner açısının eğimi, içerideki akış hızını etkileyebilir. Daha dik bir açı, daha hızlı bir akışa neden olabilir ve bu da daha dalgalı sıcaklık değişimlerine yol açabilir.

Akış Kararlılığı: Akışın kararlılığı, özellikle 0° dereceye göre 45° ve 90° konteyner açısında daha düzensiz bir akış olabilir ve bu durum sıcaklık dalgalanmalarına neden olabilir.

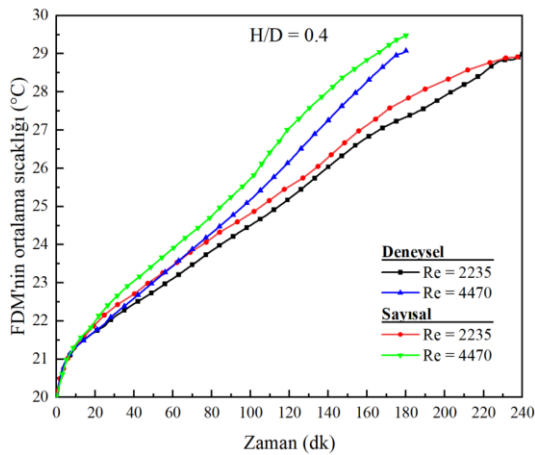
Bunun yanı sıra sıvı fraksiyon grafikleri incelendiğinde ise aynı şekilde 0° konteyner açısında maksimum erime performansı sağlanmıştır. Öte yandan tüm H/D oranlarında, 45° ve 90° eğim açılarındaki konteynerlerde sıvı fraksiyon değeri birbirine yakın değerlere sahip olmakla birlikte 45° konteyner açısında daha fazladır. Ortalama sıcaklık değerlerinde ise benzer şekilde yakın değere sahip olurken son zaman adımı kadar 90° konteyner açısının daha yüksek seviyelere ulaştığı görülmüştü. Bu durum bir çelişki gibi görünse de ortalama sıcaklık değerleri, konteyner içerisine yerleştirilen yedi adet termokupldan alınan sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması ile hesaplanmıştır. Bölüm 5.5'te belirtildiği gibi FDM'nin erime profili konteyner eğim açısına göre farklılık göstermektedir. Konteyner içerisinde FDM'nin sıvı fazı, katı fazından daha yüksek sıcaklık değerine sahiptir. Dolayısıyla 45° konteyner açısında ise 90°'ye göre daha düşük FDM ortalama sıcaklığına karşın daha yüksek sıvı fraksiyon değerinin elde edilmesi, ölçüm alınan termokuplların 90° durumunda büyük çoğunluğunun, FDM'nin sıvı fazı içerisinde olması ile açıklanabilir.

5.3. Reynolds Sayısının Etkisi

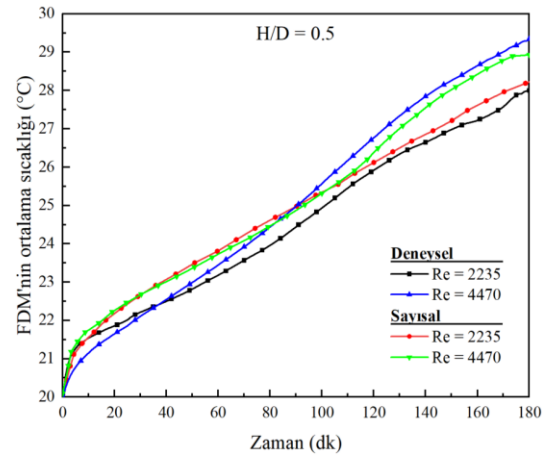
Bu bölümde, jet çıkışındaki havanın Reynolds sayısının FDM'nin ortalama sıcaklık değeri ve erime performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmada, $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ olmak üzere iki farklı Re sayısı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı konteyner açıları için ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

5.3.1. 0° konteyner açısı için sonuçlar

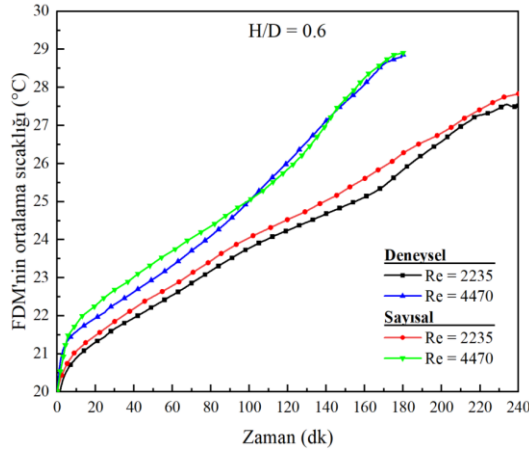
Şekil 5.19 (a)-(c), farklı H/D oranları için Reynolds sayısının, FDM'nin ortalama sıcaklığı üzerine etkisini deneysel ve sayısal olarak, Şekil 5.19 (d) ise Reynolds sayısının sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisini sayısal olarak göstermektedir. Sunulan grafiklerde deneysel ve sayısal sonuçların yüksek düzeyde tutarlı olduğunu görülmektedir. Yüksek Reynolds sayısında, artan kinetik enerji ve birim zamanda taşınan enerji miktarının daha fazla olmasından dolayı daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi sıcaklık değerleri neredeyse doğrusal olarak artmış ve tüm parametreler için $t = 144 - 217$ dk aralığında tam erime gerçekleşmiştir. Şekil 5.19 incelendiğinde, Reynolds sayısının ortalama sıcaklık üzerine etkisi en belirgin biçimde $H/D = 0.6$ parametresi için görülürken en az etkili olduğu parametre $H/D = 0.5$ olmuştur. $H/D = 0.6$ için Reynolds sayısının 2235'ten 4470'e çıkmasıyla FDM'nin erime süresinde % 27.8 oranında bir azalma görülürken bu oran $H/D = 0.5$ için % 16.2 olmuştur. Bu durum özellikle $H/D = 0.5$ parametresinin 0° konteyner eğim açısında optimum sonuçlar verdiğini tekrar göstermektedir.



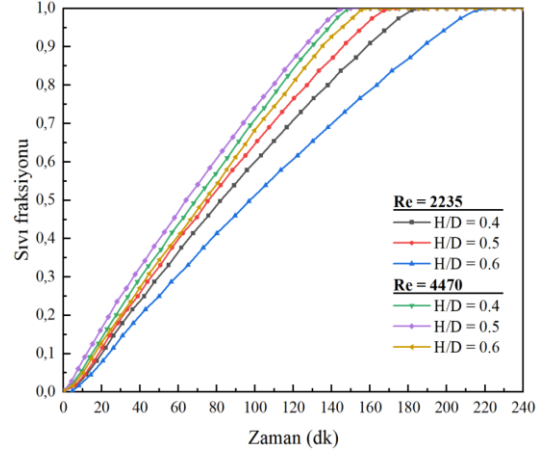
(a)



(b)



(c)

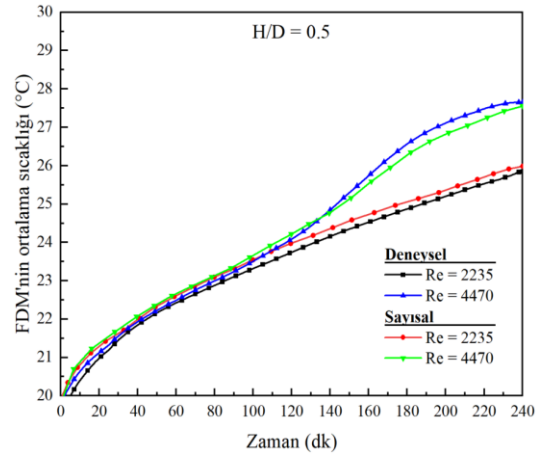
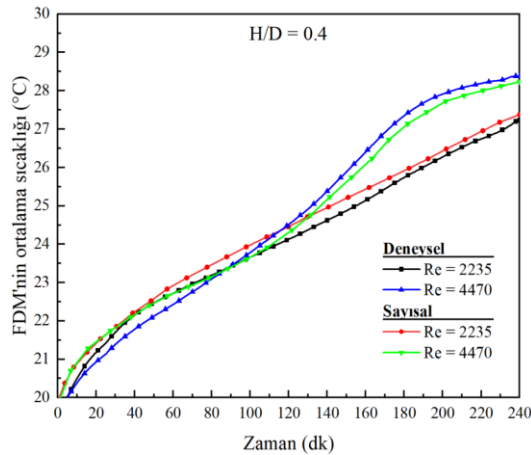


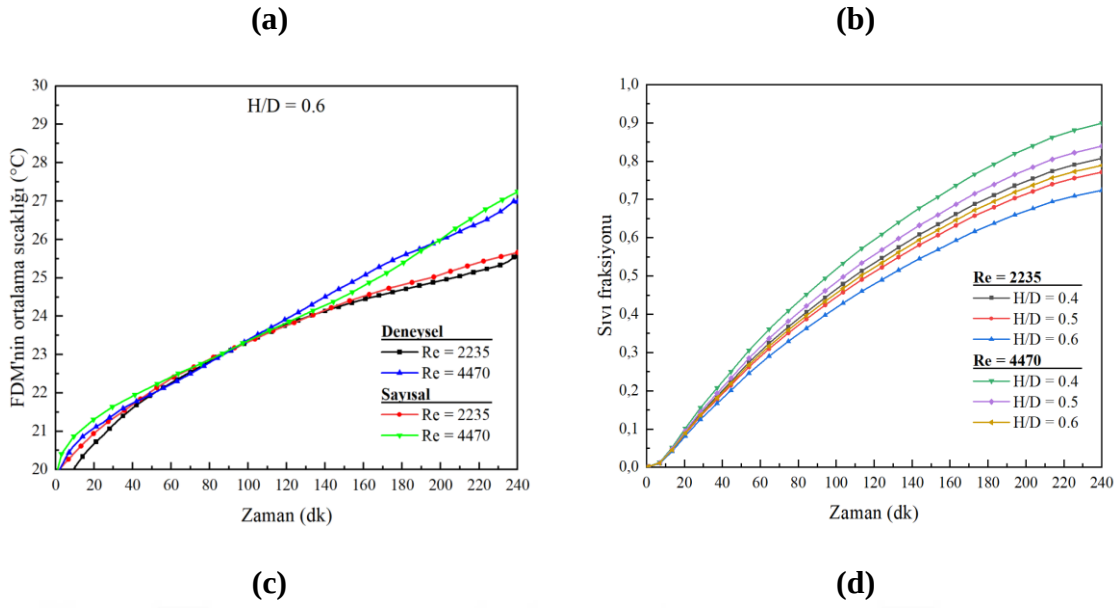
(d)

Şekil 5.19: 0° konteyner açısı için Re sayısının (a) $H/D = 0.4$ (b) $H/D = 0.5$ (c) $H/D = 0.6$ için FDM'nin ortalama sıcaklığının ve (d) sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi

5.3.2. 45° konteyner açısı için sonuçlar

Reynolds sayısındaki değişimin 45° konteyner açısındaki etkisini incelemek amacıyla Şekil 5.20 (a)-(c)'de, farklı H/D oranları için FDM'nin ortalama sıcaklık ve Şekil 5.20 (d)'de ise sıvı fraksiyonunun zamanla değişim grafikleri, deneysel ve sayısal olarak sunulmuştur. Genel olarak tüm H/D oranları için ortalama $t = 125$ dk zaman adımına kadar Reynolds sayısının dikkate değer bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Belirtilen zaman adımından sonra $Re = 2235$ 'te ortalama sıcaklık yaklaşık olarak lineer artışa devam ederken $Re = 4470$ olması durumunda özellikle $H/D = 0.4$ ve 0.5 için ortalama sıcaklık artışının belirli bir aralıkta parabolik bir hal aldığı söylenebilir.





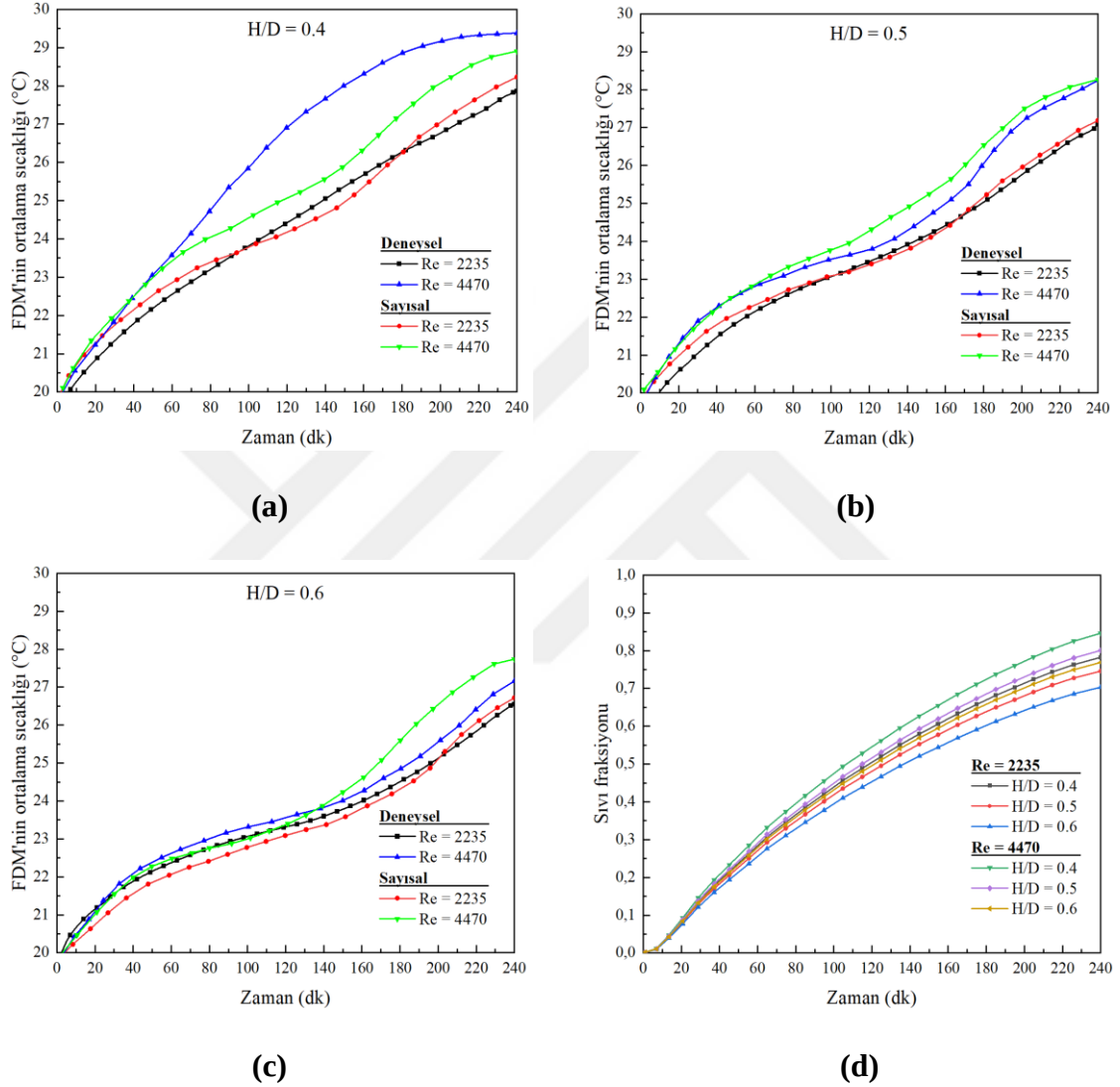
Şekil 5.20: 45° konteyner açısı için Re sayısının (a) H/D = 0.4 (b) H/D = 0.5 (c) H/D = 0.6 için FDM'nin ortalama sıcaklığının ve (d) sıvı fraksiyonunun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi

Şekil 5.20 (d) incelendiğinde en iyi erime performansı gösteren $Re = 4470$ ve $H/D = 0.4$ parametrelerinde, en kötü performans gösteren $Re = 2235$ ve $H/D = 0.6$ parametrelerine göre %24.34 oranında daha fazla sıvı fraksiyonu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca daha düşük Reynolds sayısına sahip olmasına rağmen, $Re = 2235 - H/D = 0.4$ parametrelerinde $Re = 4470 - H/D = 0.6$ parametrelerine göre ihmal edilebilir düzeyde olsa da (%1.52) daha fazla sıvı fraksiyonuna ulaşılmıştır. Bu durum 45° konteyner açısı için H/D oranının 0.5'ten büyük olması durumunda Reynolds sayısının FDM erime performansı üzerindeki etkisini dikkate değer bir biçimde azalttığını göstermektedir.

5.3.3. 90° konteyner açısı için sonuçlar

Reynolds sayısının farklı H/D oranları için, FDM'nin ortalama sıcaklığının zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi Şekil 5.21 (a)-(c) ve sıvı fraksiyonunun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi ise Şekil 5.21 (d)'de, deneysel ve sayısal olarak sunulmuştur. FDM'nin ortalama sıcaklık değişimini gösteren grafiklerde deneysel ve sayısal sonuçların özellikle $Re = 2235$ için oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra $Re = 4470$ için analize süresi içerisinde deneysel ve sayısal sonuçlar kısmi sapmalar gösterse de süre sonunda ölçülen ve hesaplanan değerler birbirine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Genel olarak Reynolds sayısının ortalama sıcaklık üzerine etkisi en belirgin şekilde $H/D = 0.4$ için görülürken $H/D = 0.6$ için özellikle deneysel sonuçlara göre ortalama sıcaklıkların yakın

değerlere sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.21 (d)'de gösterilen sıvı fraksiyonu-zaman grafiğinde 45° konteyner açısına benzer şekilde en fazla sıvı fraksiyonu $Re = 4470 - H/D = 0.4$ parametrelerinde görülürken en az sıvı fraksiyonu $Re = 2235 - H/D = 0.6$ parametrelerinde görülmüştür. Bu iki durum arasında % 20.85 oranında sıvı fraksiyon farkı olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 5.21: 90° konteyner açısı için Re sayısının (a) $H/D = 0.4$ (b) $H/D = 0.5$ (c) $H/D = 0.6$ için FDM'nin ortalama sıcaklığının ve (d) sıvı fraksiyonun zaman içindeki değişimi üzerindeki etkisi

Reynolds sayısının FDM'nin ortalama sıcaklığı ve erime performansı üzerine genel bir değerlendirme yapılacak olursa; Reynolds sayısının 2235'ten 4470'e yükseltilmesiyle ortalama sıcaklığın en fazla etkilendiği durum %11.92 artışla 0° konteyner açısıyla $H/D = 0.6$ parametresi olmuştur. Öte yandan Reynolds sayısının artmasıyla birlikte % 2.25 ortalama

sıcaklık artışıyla en az etkilenen durum 90° konteyner açısıyla $H/D = 0.6$ parametresi olmuştur. Ayrıca bu parametreler, sıvı fraksiyonu açısından değerlendirilecek olursa; 0° konteyner açısında belirtilen parametrelerde analiz süresi sonunda FDM tamamen sıvı faza geçerken, 90° konteyner açısında tam erime görülmemiştir. Dolayısıyla, 0° konteyner açısı için erime süresi açısından yapılan değerlendirmede Reynolds sayısının 2235'te 4470'e çıkarılmasıyla $H/D = 0.6$ parametresinde FDM'nin erime süresinde %27.9 azalma, 90° konteyner açısında ise erime açısından yapılan değerlendirmeye göre Reynolds sayısının 2235'te 4470'e çıkarılmasıyla FDM sıvı fraksiyonunda %9.71 oranında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular doğrultusunda, Reynolds sayısının FDM'nin ortalama sıcaklığı ve erime performansı üzerindeki etkisinin konteyner açısına bağlı olduğu ve konteyner açısının artmasıyla bu etkinin azaldığı söylenebilir.

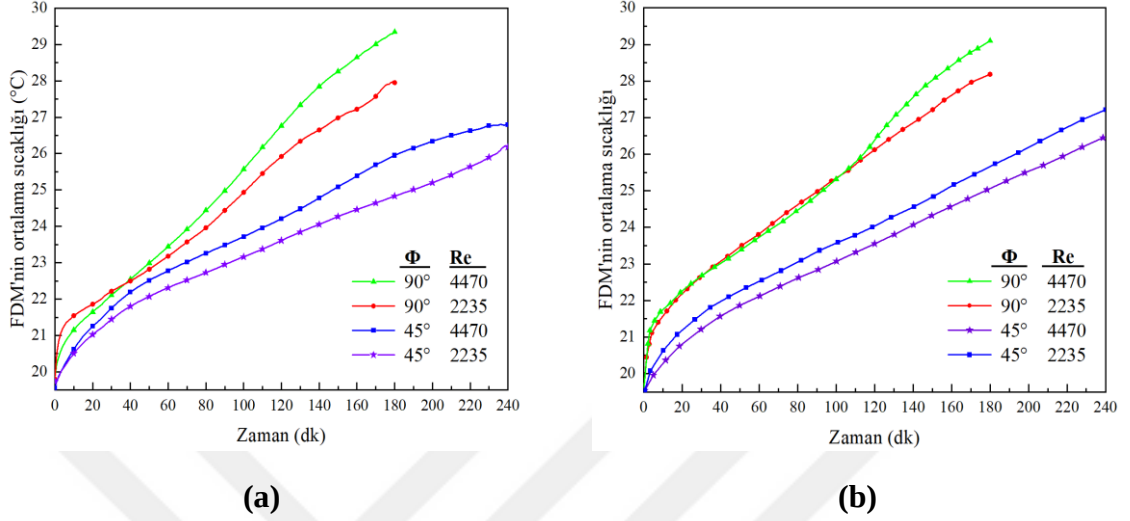
5.4. Jet Açısının Etkisi

Hava jetinin konteyner yüzeyine çarpma açısının, FDM'nin ortalama sıcaklığı ve erime performansı üzerine etkilerini incelemek amacıyla 45° , 90° (dik açı) ve 135° olmak üzere üç farklı jet açısı kullanılarak deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Jet açısının etkisi sadece $H/D = 0.5$ parametresi için incelenmiş olup, elde edilen bulgular her bir konteyner açısı için ayrı başlıklar altında sunulmuştur.

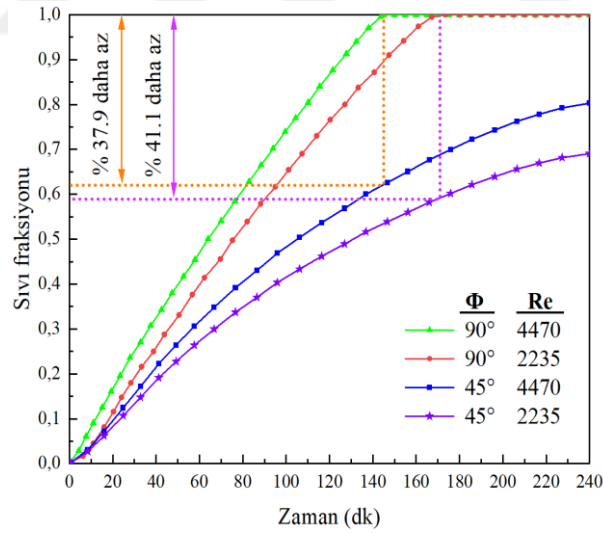
5.4.1. 0° konteyner açısı için sonuçlar

0° açığa sahip konteynerde FDM'nin erime performansı, 45° ve 135° jet açısı için benzer sonuçlar vereceğinden sadece 45° jet açısı için analizler yapılmıştır. Şekil 5.22'de iki farklı Reynolds sayısı için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zaman içindeki değişimi üzerine etkileri deneysel ve sayısal olarak gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde jetin konteyner yüzeyine dik çapması, 45° açı ile çarpmasına göre FDM'nin daha yüksek ortalama sıcaklık değerine ulaşmasını sağlamıştır. Ayrıca beklenen bir sonuç olarak Reynolds sayısı arttıkça her iki jet açısı için ortalama sıcaklık değerleri artmıştır. Ancak Reynolds sayısı, jet açısının etkisini önemli ölçüde etkilememiştir. Yüzdesel olarak ifade edilirse, $t = 180$ dk anında $Re = 4470$ için 90° jet açısında ulaşılan ortalama sıcaklık değeri 45° jet açısına göre %12.52 oranında daha yüksek iken bu oran $Re = 2235$ için %13.10 olmuştur. Bununla birlikte, iki Reynolds sayısı için FDM'nin ortalama sıcaklık farkı 90° jet açısı için son zaman adımlarında daha belirgin hale gelmiştir. Öte yandan 45° jet açısında ise bu fark ilk zaman adımlarında belirgin hale gelmiş ve bu fark deney süresi boyunca yaklaşık olarak sabit

kalmıştır. Ortalama sıcaklık eğrilerinin 45° jet açısında yaklaşık olarak lineer ilerlediği görülürken dik açılı durumda daha düzensiz hareket etmektedir. Bu değişimin, erime esnasındaki farklı doğal konveksiyon süreçlerinden kaynaklandığı belirtilebilir.



Şekil 5.22: 0° konteyner açısı için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; **(a)** Deneysel **(b)** Sayısal



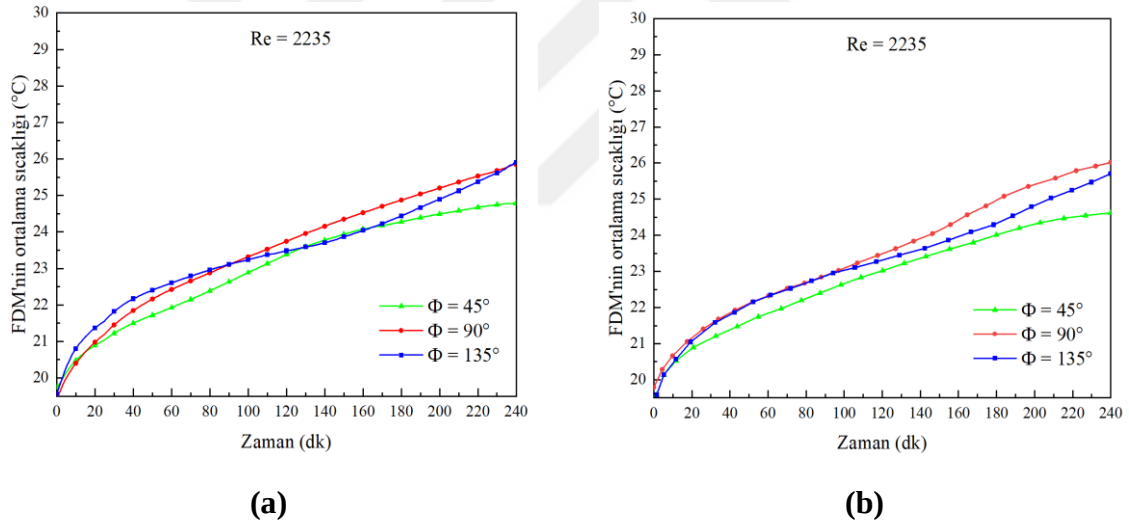
Şekil 5.23: Jet açısının 0° konteyner açısında sıvı fraksiyonun zamana göre değişimi üzerine etkisi

Şekil 5.23'te 0° konteyner açısı için jet açısının FDM sıvı fraksiyonunun zamana göre değişimi üzerine etkisi her iki Reynolds sayısı için verilmiştir. Şekilde 90° jet açısında FDM'nin tamamen sıvı faza geçtiği zaman adımı dikkate alınarak, jet açısının sıvı fraksiyonu üzerine etkisini incelemek amacıyla sıvı fraksiyonları arasında bir karşılaştırma

yapılmıştır. Buna göre, 45° jet açısının dik açılı duruma göre $Re = 4470$ için %37.9 ve $Re = 2235$ için %41.1 oranında daha az sıvı fraksiyonuna sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç Reynolds sayısının azalması durumunda jet açısının daha etkili bir parametre olduğunu ortaya koymaktadır.

5.4.2. 45° konteyner açısı için sonuçlar

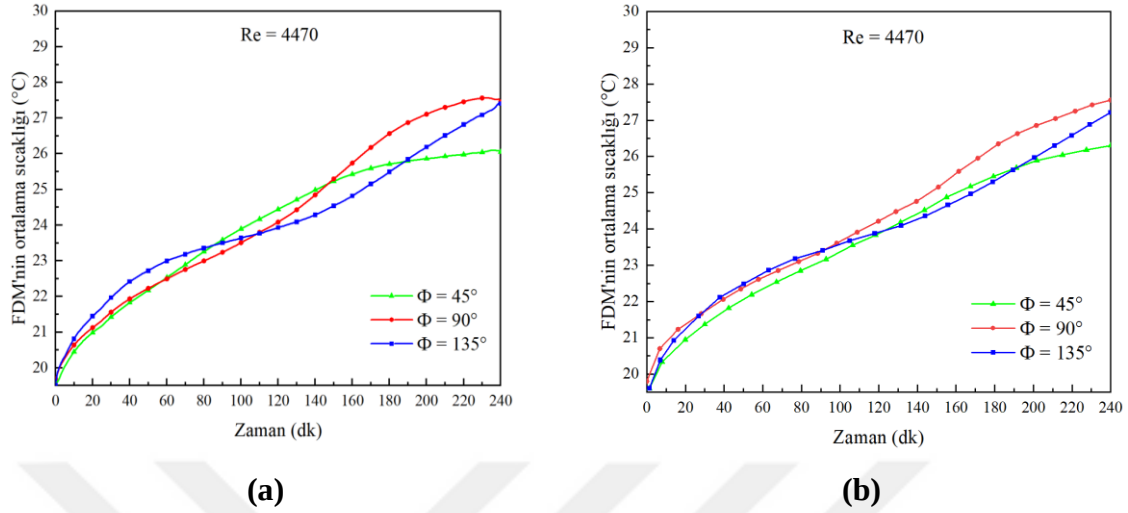
Şekil 5.24, 45° konteyner açısı ve $Re = 2235$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamanla değişimi üzerine etkisini deneysel ve sayısal olarak göstermektedir. Her üç jet açısı için ortalama sıcaklıkların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. 90° ve 135° jet açılarında son zaman adımında yaklaşık eşit ortalama sıcaklık değerleri görülse de 45° jet açısı için $t = 180$ dk zaman adımından sonra aradaki fark, son zaman adımına kadar artmaya devam etmiştir. Son zaman adımında 45° jet açısında FDM'nin ortalama sıcaklığı 90° ve 135° jet açılara göre %4.28 oranında azalmıştır.



Şekil 5.24: 45° konteyner açısı ve $Re = 2235$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; **(a)** Deneysel **(b)** Sayısal

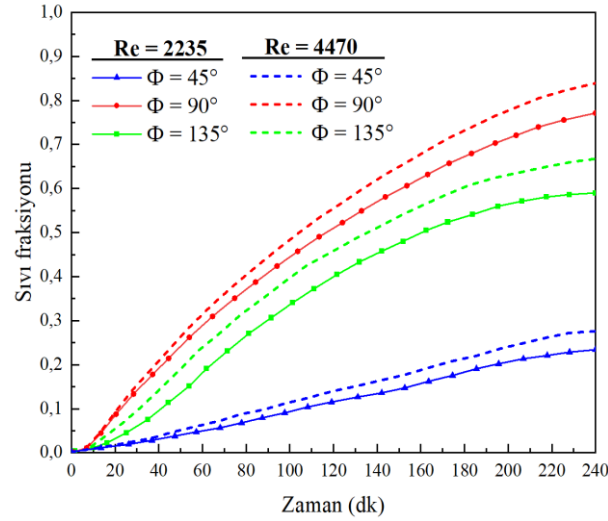
Şekil 5.25'te ise aynı parametrelerin ortalama sıcaklık üzerine etkisi, deneysel ve sayısal olarak $Re = 4470$ için sunulmuştur. $Re = 2235$ 'e benzer şekilde her bir jet açısı için elde edilen ortalama sıcaklık eğrilerinin birbirine yakın olduğu gözlemlenmektedir. Son zaman adımında 90° ve 135° jet açıları için ortalama sıcaklıkların yaklaşık olarak eşit olduğu görülmektedir. 45° jet açısı için elde edilen ortalama sıcaklık değeri ise 90° ve 135° jet açısına göre %5.28 oranında daha düşüktür. Genel olarak her iki Reynolds sayısında jet

açısının, 45° konteyner açısı için FDM'nin ortalama sıcaklığı üzerinde düşük bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 5.25: 45° konteyner açısı ve $Re = 4470$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; **(a)** Deneysel **(b)** Sayısal

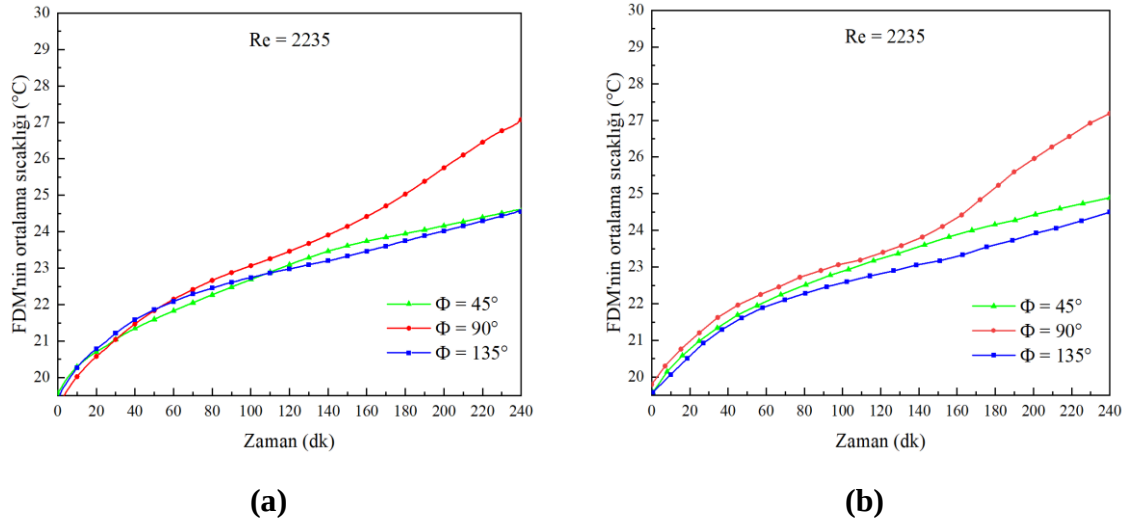
Şekil 5.26'te her iki Reynolds sayısı için jet açısının sıvı fraksiyonun zamana bağlı değişimi üzerine etkisi gösterilmektedir. Her bir jet açısı için beklenen şekilde Reynolds sayısının artmasıyla sıvı fraksiyonda bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Dikkat çekici bir sonuç olarak, Şekil 5.23 ve 5.24'te FDM'nin ortalama sıcaklık değeri özellikle son zaman adımıyla 90° ve 135° jet açıları için yaklaşık olarak aynı değere sahip olmalarına rağmen sıvı fraksiyonlarında kayda değer bir fark olduğu görülmektedir. $Re = 2235$ için 90° jet açısında sıvı fraksiyon miktarı, 135° jet açısına göre %23.37, $Re = 4470$ için ise %20.5 oranında daha fazladır. Bu durum tutarsız görünse de 90° jet açısında konteyner yüzeyinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı görülürken jetin açılı olması durumunda yüzeydeki sıcaklık artışı kısmi olmaktadır. Bu durum, konteyner yüzeyindeki sıcaklığın yüksek olduğu bölgede, FDM'nin eriyerek daha yüksek sıcaklıklara ulaşırken düşük olduğu bölgede lapa ya da katı fazda kalmasına sebep olmaktadır. Ortalama sıcaklık değerleri de FDM içerisine yerleştirilen termokupllardan alınarak hesaplandığı için aynı ortalama sıcaklık değerlerine sahip olan koşullarda farklı sıvı fraksiyonu görülebilmektedir. Ayrıca 45° jet açısı olması durumunda FDM erime performansı yönünden oldukça kötü performans sergilediği görülmektedir. Bu jet açısında analiz süresi boyunca her iki Reynolds sayısında sıvı fraksiyonu yakın değerlere sahip olmuştur. Analiz süresi sonunda ise $Re = 4470$ için bir karşılaştırma yapılacak olurda 45° jet açısındaki sıvı fraksiyonu miktarı 135° jet açısına göre % 58.63 daha az iken bu fark 90° jet açılı duruma göre % 67.11 seviyelerine kadar çıkmıştır.



Şekil 5.26: Jet açısının 45° konteyner açısında sıvı fraksiyonun zamana göre değişimi üzerine etkisi

5.4.3. 90° konteyner açısı için sonuçlar

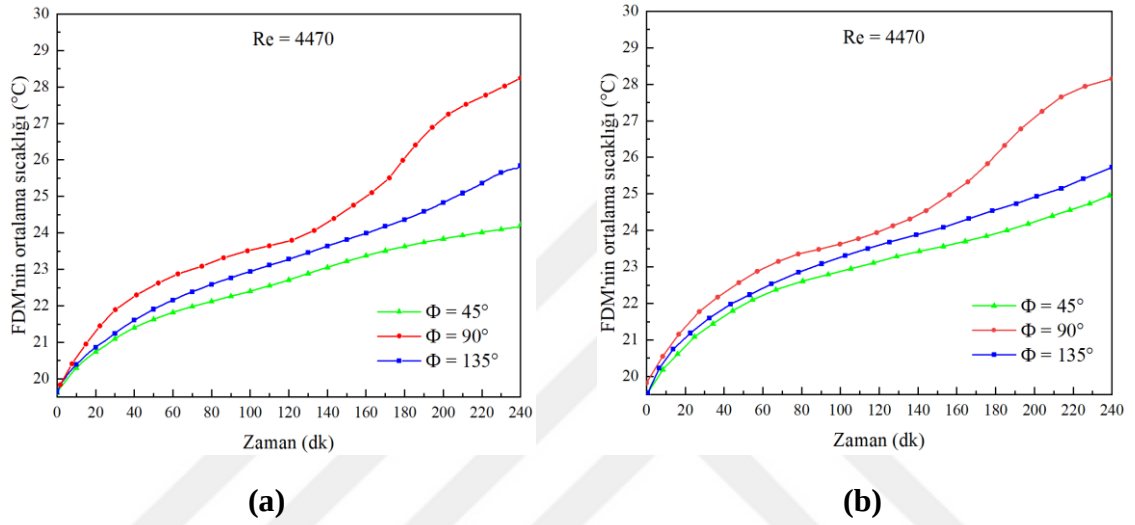
Jet açısının 90° konteyner açısında $Re = 2235$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerine etkisi Şekil 5.27'de deneysel ve sayısal olarak sunulmuştur. Ortalama sıcaklık eğrileri incelendiğinde 45° ve 135° jet açılarının oldukça yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. 90° jet açısında ise yaklaşık olarak %9.75 oranında daha yüksek ortalama sıcaklık değerine ulaşılmıştır.



Şekil 5.27: 90° konteyner açısı ve $Re = 2235$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

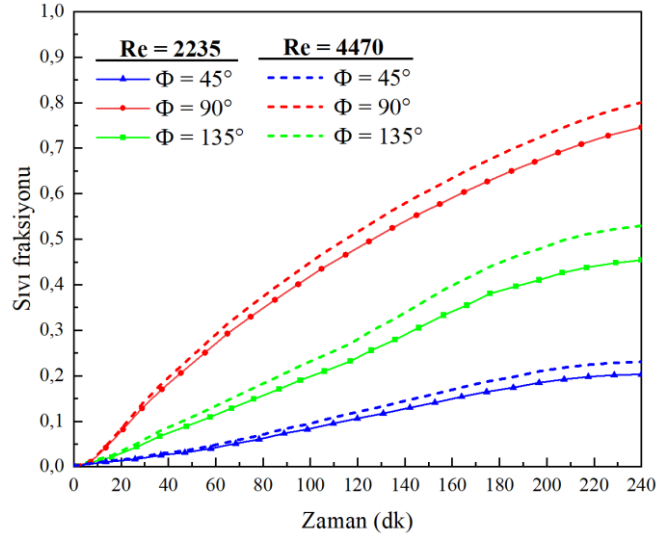
Şekil 5.28'de ise 90° konteyner açısı için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerine etkisi, $Re = 4470$ için gösterilmektedir. Reynolds sayısının artmasıyla

birlikte 45° ve 135° jet açıları için FDM'nin ortalama sıcaklık değerlerindeki farkın belirgin hale geldiği görülmektedir. Deneysel ve sayısal ortalama sıcaklık eğrileri benzer profile sahiptir. Ancak 45° ve 135° jet açılı durumlar için özellikle son zaman adımlarına doğru ihmal edilebilir düzeyde de olsa sapmalar olduğu görülmektedir. Deneysel sonuçlar dikkate alınarak son zaman adımı için yapılan karşılaştırmada 45° jet açısına göre, 135° jet açısının kullanıldığı durumda ortalama sıcaklık değeri % 6.26 ve 90° jet açısının kullanıldığı durumda ise % 14.23 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 5.28: 90° konteyner açısı ve $Re = 4470$ için jet açısının FDM'nin ortalama sıcaklığının zamana göre değişimi üzerindeki etkisi; (a) Deneysel (b) Sayısal

Şekil 5.29'da her iki Reynolds sayısı için jet açısının sıvı fraksiyonu-zaman değişimi üzerine etkisi gösterilmektedir. 45° konteyner açısındaki duruma benzer şekilde $Re = 2235$ için 45° ve 135° jet açılarında FDM'nin ortalama sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakın olmasına rağmen 135° jet açısında sıvı fraksiyonu % 125 oranında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum tutarsız gibi görünse de 45° jet açısında FDM içerisinde kısmi erimelerin ortalama sıcaklık değerini yükseltmesi ve ısı transferi mekanizmasında iletimin güçlü olması ile açıklanabilir. Başka bir ifade ile 135° jet açısında, aynı ortalama sıcaklık değeri için FDM içerisindeki ısı transferi mekanizmasında taşınım güçlü hale geldiği ortam sayesinde daha fazla miktarda erime sağlamıştır.



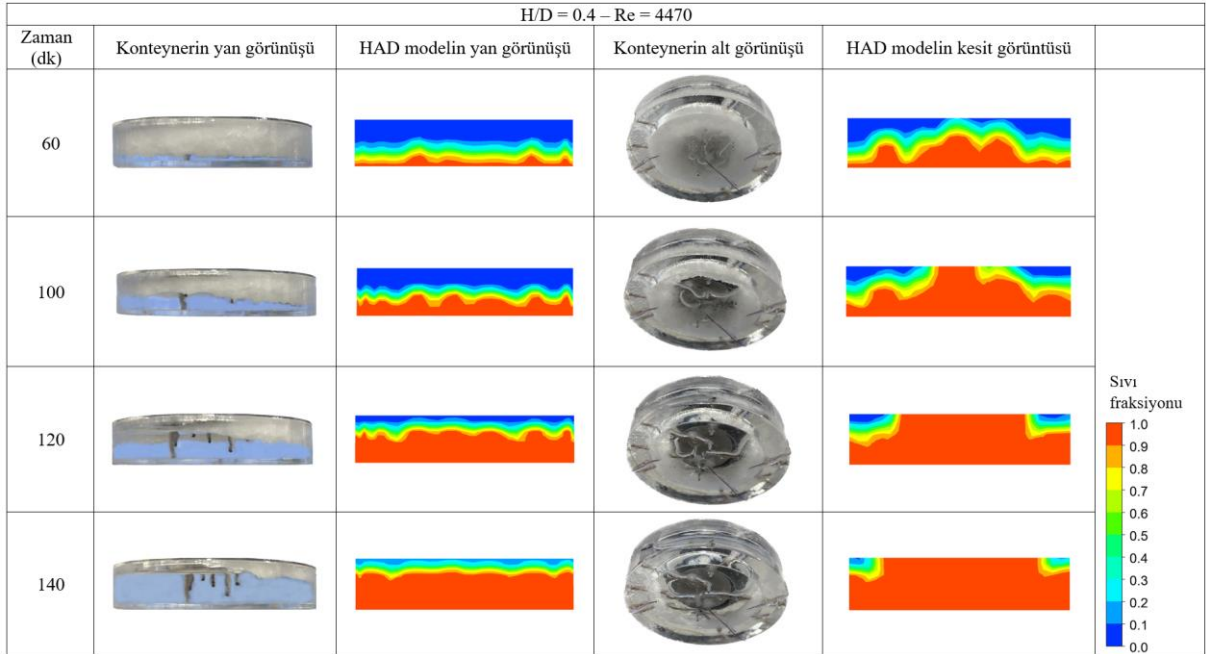
Şekil 5.29: Jet açısının 90° konteyner açısında sıvı fraksiyonun zamana göre değişimi üzerine etkisi

Jet açısının FDM erime performansı ve ortalama sıcaklığı üzerine genel bir değerlendirme yapılacak olursa tüm konteyner eğim açıları için en iyi ortalama sıcaklık ve erime performansı 90° jet açılı durumunda sağlanmıştır. Genel olarak 45° jet açısı tüm konteyner açılarında en kötü erime performansına sahip olmuştur. Ancak ortalama sıcaklık açısından bazı durumlarda 135° jet açısı ile yakın değerlere sahip olduğu söylenebilir. Bu durum, jetin konteyner yüzeyine çarpma açısının, konteyner içindeki FDM'deki kısmi erimeleri etkilediğine işaret etmektedir.

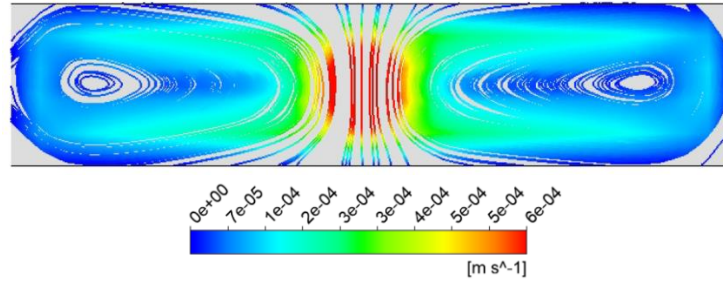
5.5. FDM Erime Yapısının İncelenmesi

Şekil 5.30, $H/D = 0.4$ ve $Re = 4470$ koşulları altında konteyner içinde FDM'nin deneysel ve sayısal erime sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırma, belirli koşullar altında erime davranışını analiz etmeyi ve deneysel ile sayısal sonuçlar arasındaki farklılıkları veya benzerlikleri gözlemlemeyi hedeflemektedir. Erime fraksiyonu konturlarında, kırmızı bölge FDM'nin sıvı fazını, mavi bölge katı fazını ve geçiş renkleri ise lapa bölgeyi temsil etmektedir. Ayrıca, dijital bir kamerayla kaydedilen bir videodan, belirtilen zaman adımlarında alınan anlık görüntüler, şeffaf konteyner içindeki FDM'nin katı-sıvı ara yüzünün göstermektedir. Sayısal simülasyondan elde edilen erime kontur resimleri incelendiğinde, sıcak jetin konteynerin ortasına doğrudan çarptığı ve konteyner içinde eşit bir erime oranı elde ettiği fark edilebilir. Erime süreci boyunca konteyner yan yüzeyinden bakıldığında katı-sıvı ara yüzü, konteynerin alt yüzeyine paralel bir şekilde hareket etmiştir. Ancak, HAD modelinin merkezi kesiti ve deneysel alt görüntüsü incelendiğinde, bu ara yüzün koni

benzeri bir geometrik şekle sahip olduğu görülmektedir. FDM'nin sıvı fazı, $t = 100$ dk zaman adımında merkezden konteynerin üst yüzeyine ulaşmıştır. Bu karşılaştırma, sayısal simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla benzerlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Erime sırasında konteyner içinde kıvrımlı bir katı-sıvı ara yüzü meydana geldiği dikkat çekmektedir. Bu durum, genellikle alttan ısıtma ile FDM eritme prosesinde görülmektedir. Çünkü bu durumda ısı transferinin ana yönü yerçekimi yönüne paralel olmasına rağmen tam tersi yönde ve doğal konveksiyon için tercih edilen bir bölge bulunmamaktadır. FDM'nin alttan ısıtılması durumunda, ısı kaynağında aralıklı karşı dönen rulo hücreleri (Benard hücreleri) oluşur. Zamanla, küçük rulo hücreleri evrilir ve büyük döngüler oluşturmak üzere bir araya gelir ve bu süreç, FDM'nin tamamen eriyip üst bölgeye ulaşana kadar devam eder [128]. Ayrıca şekilde gösterilen son zaman adımında FDM'nin neredeyse tamamı erimesine rağmen konteynerin üst köşesinde ince bir katı FDM tabakası gözlemlenmektedir. Şekil 5.31'de sayısal simülasyondan alınmış konteyner merkezindeki akım çizgileri, erime sırasında FDM içerisindeki hız dağılımı gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde hızın merkezde maksimum düzeyde olduğu ve konteyner duvarına yaklaştıkça azaldığı görülmektedir. Üst köşedeki ince katı FDM, bu bölgedeki düşük hızdan dolayı yetersiz konveksiyon etkisi nedeniyle oluşmaktadır.



Şekil 5.30: 0° konteyner açısında $H/D = 0.4$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonunun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması



Şekil 5.31: 0° konteyner açısında FDM içerisinde akım çizgileri ile hız dağılımı

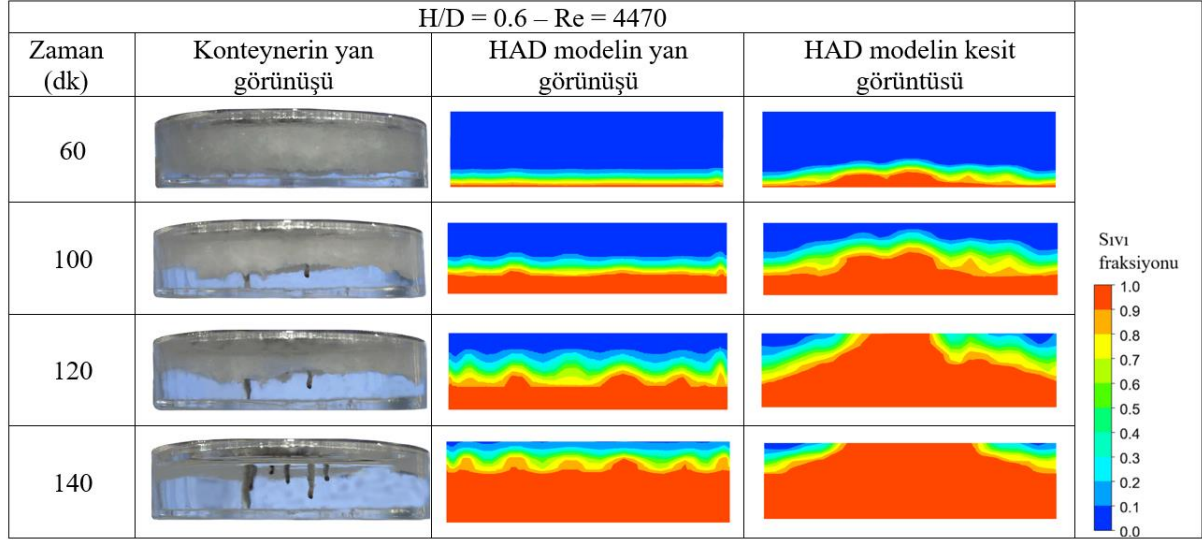
Şekil 5.32, $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ 'de FDM'nin erime profilleri için deneysel ve sayısal simülasyonun ardışık fotoğraflarını farklı zaman adımlarında karşılaştırmaktadır. Şekilde görüldüğü üzere, erime süreci jetin çarptığı yüzeyden başlar ve katı-sıvı ara yüzü neredeyse ÇSHJ yüzeyine paraleldir. Sayısal sonuçlar, HAD modelinin yan görünümünden (orta sütun) ve merkezi kesit görünümünden (son sütun) verilmiştir. Başlangıçta ısı transfer mekanizması iletimle sağlanır ve ÇSHJ'nin çarpma etkisi sayesinde konik form elde edilir. Sonuçlar $t = 140$ dk zaman adımına kadar verilmiştir ve bu zaman adımında, CFD modelinin yan görünümünden görüldüğü gibi, konteyner içinde simetrik bir dağılım bulunmamaktadır. Çünkü sistem, bu zaman adımında neredeyse tamamen sıvı fazı elde etmiştir. Bu sonuç şekil 5.3'te, farklı Reynolds sayılarında da görülmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, erime formu jet hareketini yansıtmaktadır. Sayısal simülasyonun avantajı, konteyner içindeki erime şeklinin gözlemlenmesine olanak tanımasıdır.

H/D = 0.5 – Re = 4470				Sıvı fraksiyonu
Zaman (dk)	Konteynerin yan görünüşü	HAD modelin yan görünüşü	HAD modelin kesit görüntüsü	
60				
100				
120				
140				

Şekil 5.32: 0° konteyner açısında $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonunun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması

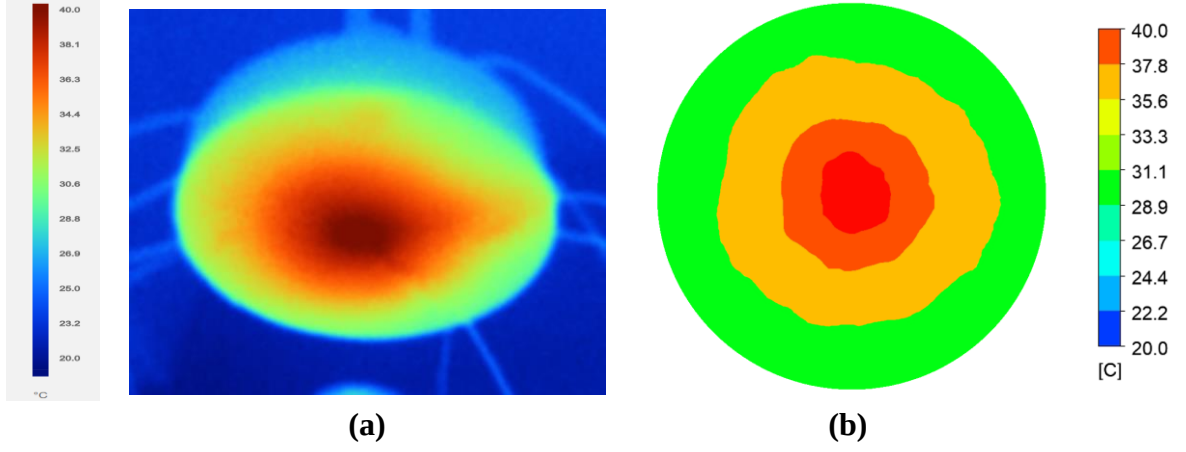
Şekil 5.30 ve 5.32'ye benzer şekilde, Şekil 5.33, $H/D = 0.6$ ve $Re = 4470$ için erime sonuçlarını göstermektedir. Bu üç şeklin karşılaştırılması, erimenin zamanı için H/D

oranının oldukça etkili bir kontrol parametresi olduğunu göstermektedir. Zaman adımını ilerledikçe konteyner içinde bir konveksiyon akımı meydana gelmektedir. İlginç bir şekilde, konteynerin üst köşesindeki FDM'nin erimesi uzun zaman gerektirmiştir (bu durumda yaklaşık olarak 170 dakika). Başka bir deyişle sorun, kapalı bir hacimde gerçek bir konveksiyon sorunu haline gelmektedir.



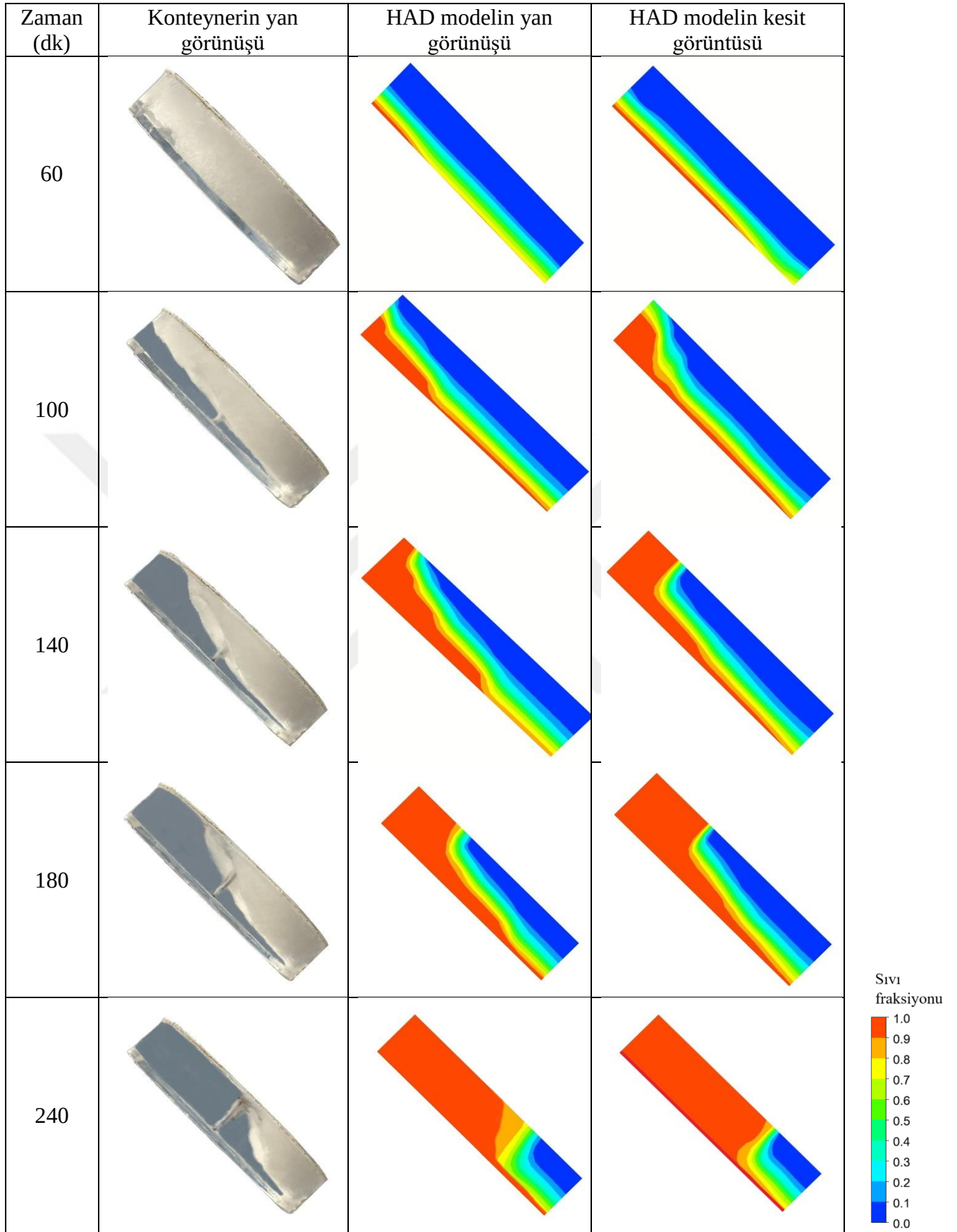
Şekil 5.33: 0° konteyner açısında H/D = 0.6 ve Re = 4470 için sıvı fraksiyonunun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması

Şekil 5.34, “Fluke” marka termal kamera ile çekilmiş görüntüyü ve HAD model simülasyonundan alınan sıcak hava jeti tarafından etkilenen pleksiglas konteynerin yüzeyindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Deneysel ölçüm ve sayısal çalışmalardan elde edilen sıcaklık dağılımı görüntüleri, şekilde gösterildiği gibi benzer bir desen sergilemektedir. Sıcak hava jetinin etkilediği disk merkezinde, sıcaklık 40 °C maksimum seviyeye ulaşırken kenarlara doğru beklenildiği gibi kademeli olarak azalmaktadır. Şekil 5.30, 5.32 ve 5.33'teki erime görüntülerinde görüldüğü gibi, bu sıcaklık dağılımı, konteynerin merkezinde daha hızlı bir erime sağlarken, erime hızı yan duvarlara doğru azalmaktadır.

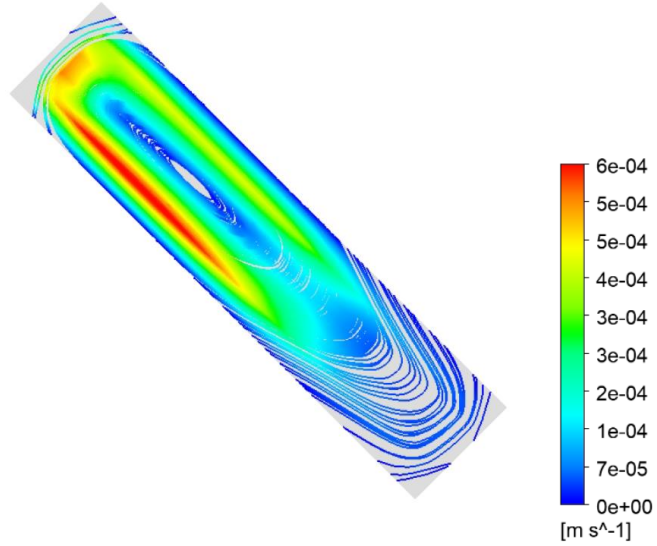


Şekil 5.34: $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıcak hava jetinin çarptığı pleksiglas kap yüzeyindeki sıcaklık dağılımı: **(a)** termal kamera tarafından çekilen deneysel termal görüntü **(b)** HAD modeli

45° konteyner açısında $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için farklı zaman adımlarında deneysel çalışmadan ve sayısal simülasyondan alınan erime profillerini karşılaştıran görüntüler Şekil 5.35'te verilmiştir. İlk zaman adımında ($t = 60$ dk) jetin çarptığı bölgeden erimenin başladığı, lapa tabakanın oluştuğu ve konteynerin üst kısmında ince sıvı FDM tabakasının oluştuğu özellikle sayısal simülasyonda net bir şekilde görülmektedir. Bu zaman adımına kadar ısı transfer mekanizmasında iletimin baskın olması tabakaların yüzeye paralel olmasıyla açıklanabilir. Öte yandan ilerleyen zaman adımlarında ısı transferinde taşınımın rol almasıyla bu paralelliğin bozulduğu görülmektedir. Ayrıca sıvı FDM'nin diskin üst yüzeyine, konteyner cidarlarına oranla merkezinde daha hızlı ulaşarak erimenin konkav bir şekilde ilerlediği dikkat çekmektedir. Bu durum Şekil 5.34'te görüldüğü gibi sıcaklık dağılımının ÇSHJ etkisiyle disk merkezinden yan yüzeylerine doğru azalan bir profile sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Son zaman adımında ise FDM'nin büyük bir kısmının sıvı fazda olduğu ve konteynerin alt köşesinde bir miktar FDM'nin katı fazda kaldığı görülmektedir.



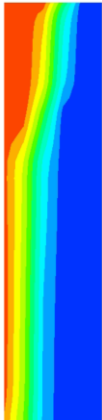
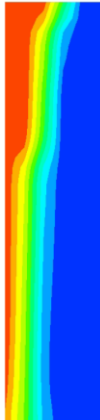
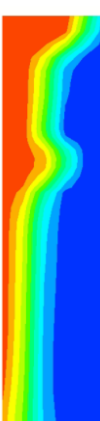
Şekil 5.35: 45° konteyner açısında $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması

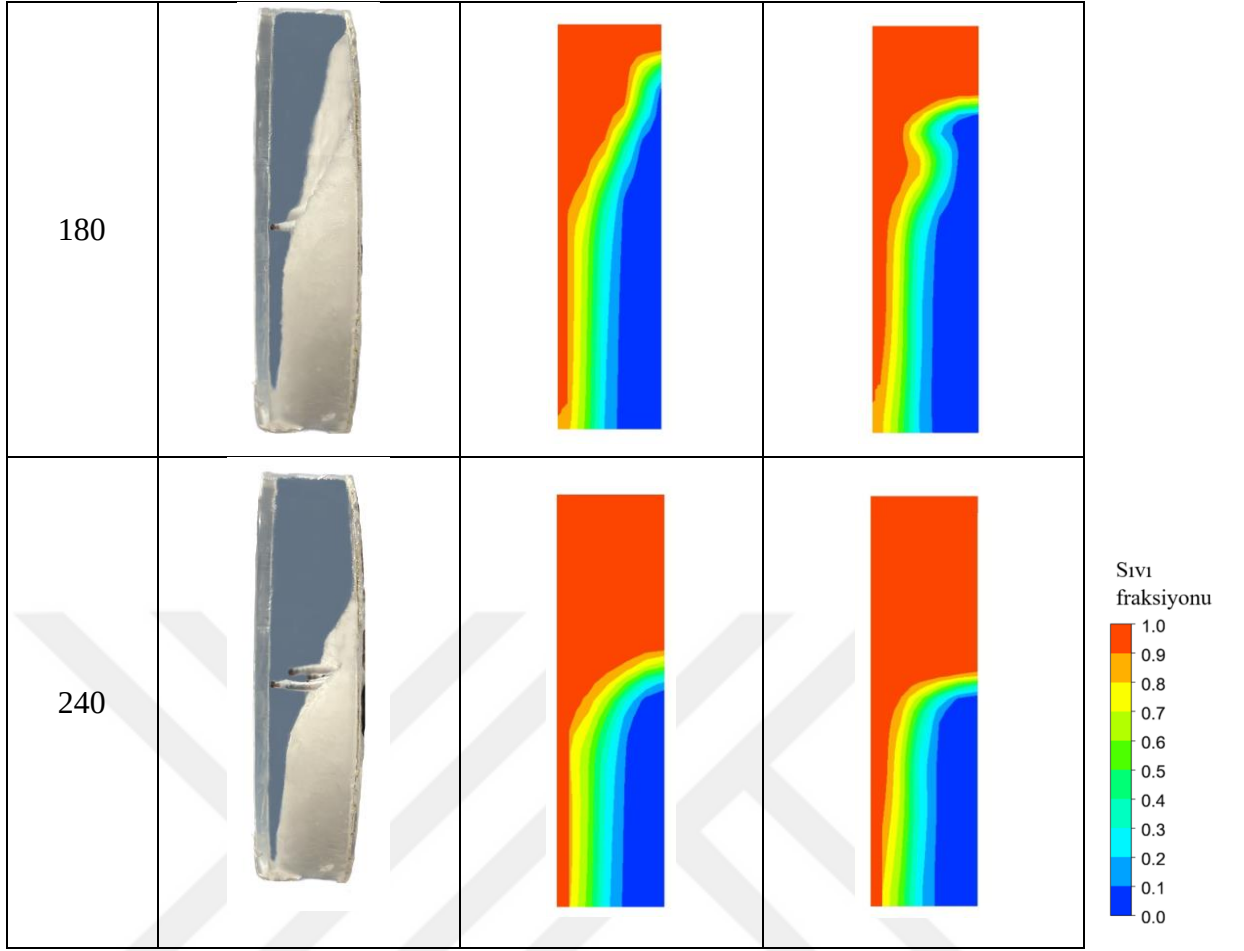


Şekil 5.36: 45° konteyner açısında FDM içerisinde akım çizgileri ile hız dağılımı

45° konteyner açısında FDM içerisindeki hız dağılımı Şekil 5.36’da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek hızın konteynerin üst köşesine doğru ve jetin çarptığı yüzeyde olduğu görülmektedir. Konteynerin alt bölgelerinde ise hız düşüktür. Bu durum hızın yüksek olduğu bölgelerde ısı transferinde konveksiyonun etkili olduğunu göstermektedir. FDM’nin erime yapısı bunu desteklemektedir.

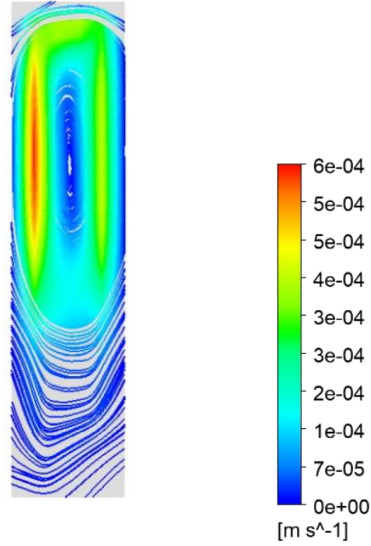
Şekil 5.37’de 90° konteyner açısında $Re = 4470$ ve $H/D = 0.5$ parametreleri için FDM’nin erime görüntüleri deneysel ve sayısal olarak sunulmuştur. İlk zaman adımında ($t = 60$ dk) konteynerin üst bölgesinde daha kalın olmakla birlikte jetin çarptığı yüzeyde ince bir tabaka sıvı FDM olduğu görülmektedir. Daha sonra, $t = 140$ dk’da dikey konteynerdeki FDM’nin katı-sıvı ara yüzü önce konteynerin sağ üst köşesine ulaşmakta ve ilerleyen zaman adımlarında konteynerin sağ duvarı boyunca hızlı bir şekilde alçalmaktadır. Bu durum doğal konveksiyon etkilerinin bu konteyner açısında güçlü olduğunu göstermektedir. Son zaman adımında konteynerdeki FDM’nin çoğunlukla eridiği ve sayısal simülasyonda sağ alt köşesinde yaklaşık olarak eşit miktarda katı ve lapa durumunda FDM kaldığı görülmektedir.

Zaman (dk)	Konteynerin yan görünüşü	HAD modelin yan görünüşü	HAD modelin kesit görüntüsü
60			
100			
140			



Şekil 5.37: 90° konteyner açısında $H/D = 0.5$ ve $Re = 4470$ için sıvı fraksiyonun deneysel fotoğrafları ve HAD simülasyonlarının karşılaştırılması

Şekil 5.38, 90° konteyner açısında FDM içerisindeki hız dağılımını göstermektedir. 45° konteyner açısına benzer bir durum burada da görülmektedir. Doğal konveksiyon etkisiyle konteynerin üst bölgelerinde yüksek hız görülürken alt bölgelere inildikçe hızda düşüş görülmektedir.

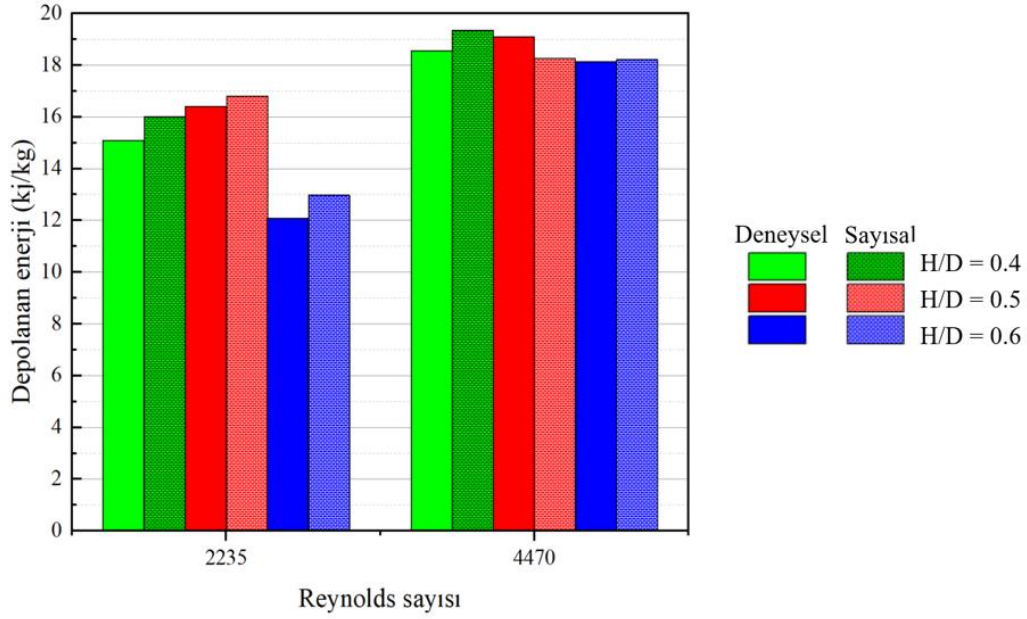


Şekil 5.38: 90° konteyner açısında FDM içerisinde akım çizgileri ile hız dağılımı

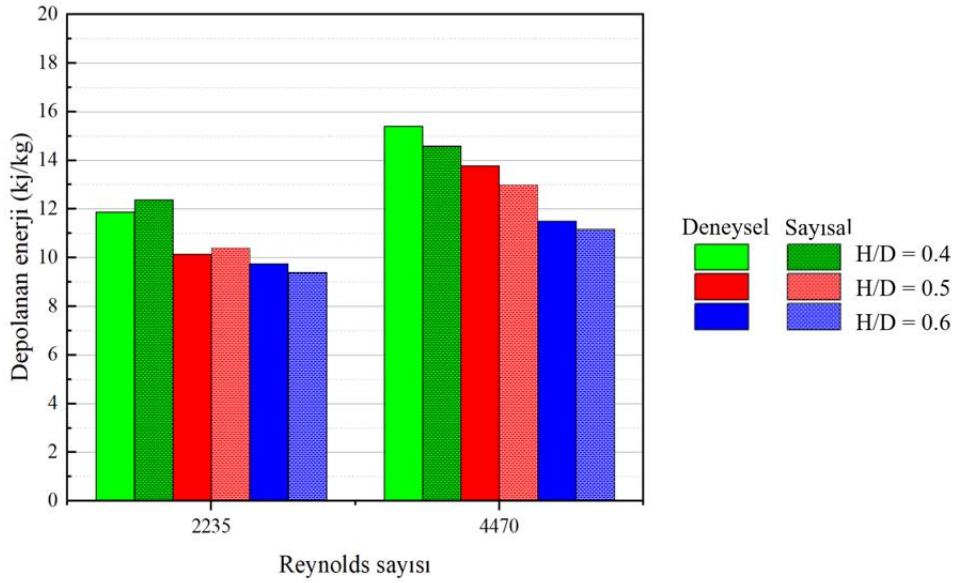
5.6. Enerji Depolama Performansının İncelenmesi

Bu bölümde farklı konteyner açıları için hesaplanan, FDM tarafından birim kütle başına depolanan enerji miktarı deneysel ve sayısal olarak sunulmuştur. 0° konteyner açısında, 180 dakika içinde FDM tamamen eridiği için bu zaman adımına kadar depolanan enerji miktarları dikkate alınarak karşılaştırma yapılmıştır. Bu karşılaştırma, farklı konteyner eğim açılarının, Reynolds sayılarının ve H/D oranlarının enerji depolama kapasiteleri üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır.

Şekil 5.39'de $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ için 0° konteyner açısında depolanan enerji miktarı, sayısal ve deneysel olarak verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, Reynolds sayısındaki artışın beklenildiği gibi enerji depolama kapasitesinde bir artışa neden olduğu gözlemlenmiştir. Her iki Reynolds sayısı için, maksimum enerji depolanan durum, $H/D = 0.5$ 'e karşılık gelmektedir. Sayısal sonuçların incelenmesinde, bu durumun $Re = 2235$ için de aynı olduğu görülmüştür. Ancak, sayısal sonuçlar $Re = 4470$ 'de en fazla depolanan enerjiye sahip durumun $H/D = 0.4$ 'e karşılık geldiğini göstermektedir. Genel olarak, H/D 'nin enerji depolama kapasitesi üzerindeki etkisi $Re = 2235$ 'te daha belirgin görünmektedir. Kinetik enerji, enerji depolamada önemli bir rol oynamaktadır. Deneysel karşılaştırmada, her iki Reynolds sayısında en fazla enerjinin depolandığı $H/D = 0.5$ parametresi dikkate alındığında, $Re = 2235$ 'te $H/D = 0.6$ parametresinde depolanan enerji %26.42 oranında daha az iken bu farkın $Re = 4470$ 'de %5.03'e düştüğü görülmektedir.



Şekil 5.39: 0° konteyner açısında Re = 2235 ve Re = 4470 için deneysel ve sayısal olarak depolanan enerjiler

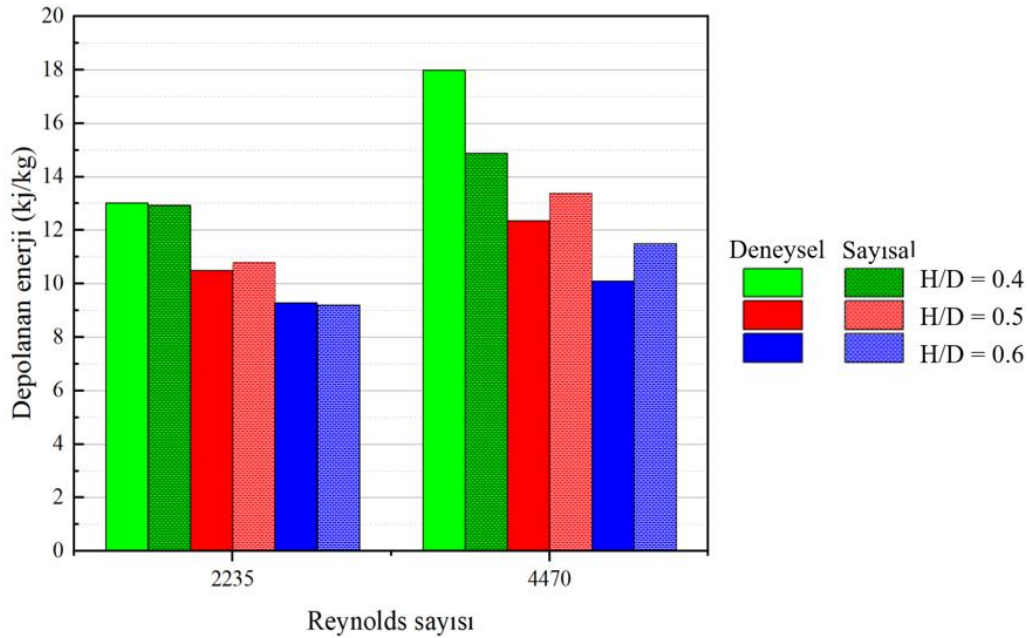


Şekil 5.40: 45° konteyner açısında Re = 2235 ve Re = 4470 için deneysel ve sayısal olarak depolanan enerjiler

45° konteyner açısında birim kütle başına FDM'nin depoladığı enerji miktarları her iki Reynolds sayısı ve tüm H/D oranları için deneysel ve sayısal olarak Şekil 5.40'ta gösterilmektedir. Genel olarak H/D oranı arttıkça depolanan enerji miktarının azaldığı görülmektedir. Reynolds sayısının enerji depolama üzerine en etkili olduğu parametre H/D = 0.5 olmuştur. Reynolds sayısının 2235'te 4470'e artmasıyla birlikte H/D = 0.4, 0.5 ve 0.6

parametreleri için depolanan enerji miktarı sırasıyla %29.62, %35.71 ve %18.06 oranında artış göstermiştir.

Şekil 5.41’de 90° konteyner açısında FDM’nin kütle başına depoladığı enerji miktarı tüm parametreler için deneysel ve sayısal olarak sunulmuştur. $Re = 2235$ ’te $H/D = 0.4$ parametresi için depolanan enerji miktarı $H/D = 0.5$ ’ten %23.81 oranında daha fazla iken $Re = 4470$ olması durumunda bu fark sadece %5.11 olmaktadır. Bu durum Reynolds sayısının H/D parametresinin etkisini azaltan ve enerji depolama üzerinde oldukça önemli bir parametre olduğu göstermektedir. Çalışmalarda kullanılan tüm parametrelerde deneysel ve sayısal veriler oldukça yakın sonuçlar verirken deneysel ve sayısal arasındaki maksimum fark $Re = 4470$ ve $H/D = 0.4$ parametrelerinde görülmüştür. Depolanan enerji miktarı $t = 180$ dk zaman adımına kadar hesaplanmış olması bu farkın oluşmasına sebep olmuştur. Çünkü Şekil 5.21’de 90° konteyner açısı için gösterilen zamana göre ortalama sıcaklık değişim grafiği incelendiğinde $t = 180$ dk’dan $t = 240$ dk’ya kadar deneysel olarak sıcaklık değeri yaklaşık olarak sabit kalırken sayısal olarak hesaplanan sıcaklık değerinde sıcaklık artışı devam etmektedir. Yüzdesel olarak ifade edilirse $t = 180$ dk anında depolanan enerji miktarı arasında deneysel ve sayısal fark % 16.68 iken $t = 240$ dk anında bu fark % 4.21’e düşmüştür.



Şekil 5.41: 90° konteyner açısında $Re = 2235$ ve $Re = 4470$ için deneysel ve sayısal olarak depolanan enerjiler

6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında pleksiglas malzemeden üretilen disk şeklindeki bir konteyner içerisinde bulunan FDM'nin erime ve enerji depolama performansı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. FDM eritme prosesi geleneksel yöntemlerden farklı olarak ÇSHJ kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada hava jetinin Reynolds sayısı, H/D oranı, konteyner açısı ve jetin konteynere çarpma açısı olmak üzere dört farklı parametrenin etkisi incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir.

- 0° konteyner açısında her iki Reynolds sayısında en iyi erime performansı ve en yüksek FDM ortalama sıcaklığı $H/D = 0.5$ parametresinde sağlanmıştır. Bu değerlerin en düşük olduğu durum ise $H/D = 0.6$ parametresi olmuştur. Öte yandan 45° ve 90° konteyner açılarında H/D oranı arttıkça FDM erime ve enerji depolama performansı olumsuz etkilenmiştir.
- Reynolds sayısının artmasıyla erime süreleri önemli ölçüde azalmıştır. Örneğin 0° konteyner açısı için Reynolds sayısı 2235'ten 4470'e çıktığında 0.4, 0.5 ve 0.6 olan H/D oranları için erime sürelerinde sırasıyla %18.68, %14.22 ve %27.93 oranında azalmalar görülmüştür.
- Farklı konteyner açıları için FDM sıvı fraksiyonunun zaman içindeki değişiminde Re sayısının H/D oranı üzerindeki etkisi farklılık göstermiştir. 0° açılı konteynerde, Re sayısının artması H/D oranının etkisi azaltmıştır. Ancak 45° açılı konteynerde tam tersi bir durum görülmüş ve Re sayısının artmasıyla H/D oranının etkisi de artmıştır. 90° açılı konteynerde ise, farklı Re sayılarına rağmen H/D oranının etkisi benzer kalmıştır.
- 0° konteyner açısında, Reynolds sayısı arttıkça H/D parametresinin erime süresi üzerindeki etkisi azalmıştır. $Re = 2235$ 'te maksimum ve minimum erime süreleri arasındaki fark %23.05 iken $Re = 4470$ 'de bu fark %7.67'ye düşmektedir.
- 45° konteyner açısında her iki Reynolds sayısı için en yüksek ortalama sıcaklık, $H/D = 0.4$ parametresi için elde edilmiştir. Bununla birlikte $Re = 2235$ 'te $H/D = 0.5$ ve 0.6 parametreleri yaklaşık olarak eşit ortalama sıcaklık değerlerine sahip olmuştur.
- 90° konteyner açısında ortalama ilk 60 dakikalık periyotta tüm H/D oranlarında yaklaşık aynı ortalama sıcaklık ve sıvı fraksiyonu görülürken ilerleyen zaman adımlarında H/D oranının etkin bir parametre olduğu görülmektedir.

- Tüm H/D oranları için 0° eğim açısına sahip olan konteynerde, hem deneysel hem de sayısal sonuçlar, FDM'nin ortalama sıcaklığının diğer eğim açılarına göre daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan 45° ve 90° konteyner açılarında ise ortalama sıcaklık değerleri birbirine yakın değerlere sahip olmuştur. Ancak sıvı fraksiyonu açısından değerlendirildiğinde 45° konteyner açısında daha iyi performans sağlanmıştır.
- 0° konteyner eğim açısında Reynolds sayısının ortalama sıcaklık üzerine etkisi en belirgin biçimde $H/D = 0.6$ parametresi için görülürken en az etkili olduğu parametre $H/D = 0.5$ olmuştur. $H/D = 0.6$ için Reynolds sayısının 2235'ten 4470'e çıkmasıyla FDM'nin erime süresinde % 27.8 oranında bir azalma görülürken bu oran $H/D = 0.5$ için % 16.2 olmuştur.
- 45° konteyner eğim açısında tüm H/D oranları için yaklaşık $t = 125$ dk zaman adımına kadar Reynolds sayısının dikkate değer bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir.
- 45° konteyner eğim açısında en iyi erime performansı gösteren $Re = 4470$ ve $H/D = 0.4$ parametrelerinde, en kötü performans gösteren $Re = 2235$ ve $H/D = 0.6$ parametrelerine göre %24.34 oranında daha fazla sıvı fraksiyonu olduğu gözlemlenmiştir.
- 90° konteyner eğim açısında Reynolds sayısının ortalama sıcaklık üzerine etkisi en belirgin şekilde $H/D = 0.4$ için görülürken $H/D = 0.6$ için özellikle deneysel sonuçlara göre farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir.
- 90° konteyner eğim açısında en fazla sıvı fraksiyonu $Re = 4470 - H/D = 0.4$ parametrelerinde görülürken en az sıvı fraksiyonu $Re = 2235 - H/D = 0.6$ parametrelerinde görülmüştür. Bu iki durum arasında % 20.85 oranında sıvı fraksiyon farkı olduğu hesaplanmıştır.
- 0° konteyner eğim açısında Reynolds sayısı, jet açısı üzerinde etkili bir parametre olmamıştır. $t = 180$ dk anında $Re = 4470$ için 90° jet açısında ulaşılan ortalama sıcaklık değeri 45° jet açısına göre %12.52 oranında daha yüksek iken bu oran $Re = 2235$ için %13.10 olmuştur.
- 0° konteyner eğim açısında, 45° jet açısının dik açılı duruma göre $Re = 4470$ için %37.9 ve $Re = 2235$ için %41.1 oranında daha az sıvı fraksiyonuna sahip olduğu gözlemlenmiştir.

- $Re = 2235$ için 45° konteyner eğim açısında, 90° ve 135° jet açılarında FDM ortalama sıcaklıkları yaklaşık olarak eşit değerlere sahip olmuştur. $Re = 4470$ 'te ise bu iki jet açısı için analiz süresi boyunca ortalama sıcaklık değerleri değişkenlik gösterse de son zaman adımında yaklaşık olarak eşit oldukları ve 45° jet açısında ortalama sıcaklık değerinin %5.28 oranında daha düşük gözlemlenmiştir.
- 45° konteyner eğim açısında, $Re = 2235$ için 90° jet açısında sıvı fraksiyon miktarı, 135° jet açısına göre %23.37, $Re = 4470$ için ise %20.5 oranında daha fazladır. Bu durum bir önceki sonuca göre tutarsız görünse de 90° jet açısında konteyner yüzeyinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı görülürken jetin açılı olması durumunda yüzeydeki sıcaklık artışı kısmi olmaktadır.
- 90° konteyner eğim açısında $Re = 2235$ için 45° ve 135° jet açılarının oldukça yakın değerlere sahip olurken, 90° jet açısında yaklaşık olarak %9.75 oranında daha yüksek ortalama sıcaklık değerine ulaşılmıştır.
- 90° konteyner eğim açısında $Re = 4470$ için son zaman adımı için yapılan karşılaştırmada 45° jet açısına göre, 135° jet açısının kullanıldığı durumda ortalama sıcaklık değeri % 6.26 ve 90° jet açısının kullanıldığı durumda ise % 14.23 oranında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.
- 90° konteyner eğim açısında ve $Re = 2235$ için 135° jet açısında elde edilen sıvı fraksiyonu 45° jet açısına göre % 125 oranında daha yüksektir.
- 45° ve 90° konteyner eğim açılarında doğal konveksiyon, 0° konteyner eğim açısına göre daha etkili olmasına rağmen tüm parametrelerde erime süreleri daha uzundur. Örneğin, $Re = 4470$ ve $H/D = 0.5$ 'te 0° konteyner açısındaki FDM yaklaşık $t = 145$ dk anında tamamen sıvı fazda iken aynı zaman adımında 45° ve 90° konteyner açılarındaki sıvı fraksiyonu %60-65 civarındadır.
- 0° konteyner açısında H/D 'nin enerji depolama kapasitesi üzerindeki etkisi $Re = 2235$ 'te daha belirgin görülmekle birlikte her iki Reynolds sayısında en fazla enerjinin depolandığı parametre $H/D = 0.5$ olmuştur. En az enerjinin depolandığı $H/D = 0.6$ parametresinde depolanan enerji miktarı, maksimum enerjinin depolandığı duruma göre $Re = 2235$ için %26.42 oranında daha az iken bu oran $Re = 4470$ 'te % 5.03'e düşmektedir.
- 45° konteyner açısında Reynolds sayısının enerji depolama üzerine en etkili olduğu parametre $H/D = 0.5$ olmuştur. Reynolds sayısının 2235'te 4470'e artmasıyla birlikte

H/D = 0.4, 0.5 ve 0.6 parametreleri için depolanan enerji miktarı sırasıyla %29.62, %35.71 ve %18.06 oranında artış göstermiştir.

- 90° konteyner açısında Reynolds sayısı, H/D oranının enerji depolama performansı üzerindeki etkisini önemli derecede azaltan bir parametre olmuştur. Re = 2235'te H/D = 0.4 parametresi için depolanan enerji miktarı H/D = 0.5'ten %23.81 oranında daha fazla iken Re = 4470 olması durumunda bu fark sadece %5.11 olmaktadır.

Mevcut çalışmada, ÇSHJ yöntemi ile FDM eritme prosesi için FDM türü, jet çıkış çapı ve sıcaklığı değişken olmayan parametreler arasındadır. Gelecekteki araştırmalarda, bu parametrelerin çeşitlendirilerek FDM erime özellikleri ve enerji depolama üzerindeki etkileri daha ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. Aynı zamanda, farklı konteyner boyutları kullanılarak konteyner yüksekliği/çapı oranının, bu süreç üzerindeki etkileri bir diğer önemli parametre olarak değerlendirilebilir. Önerilen bir diğer çalışma alanı ise farklı ısı iletim katsayılarına sahip konteyner malzemeleri kullanılarak, konteyner malzemesinin bu süreç üzerindeki etkileri daha derinlemesine araştırılmasıdır. Bu bağlamda, ÇSHJ ile FDM eritme prosesi için önerilen parametreler üzerine yapılacak araştırmalardan elde edilecek sonuçlar, FDM erime performansı ve enerji depolama kapasitesi üzerindeki potansiyel etkilerini ortaya koyarak gelecekteki çalışmalara önemli bir katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Pahamli, Y., Hosseini, M.J., Ranjbar, A.A., & Bahrampoury, R.** (2017). Effect of nanoparticle dispersion and inclination angle on melting of PCM in a shell and tube heat exchanger. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 81, 316–334.
- [2] **Aziz, S., Amin, N.A.M., Abdul Majid, M.S., Belusko, M., & Bruno, F.** (2018). CFD simulation of a TES tank comprising a PCM encapsulated in sphere with heat transfer enhancement. *Applied Thermal Engineering*, 143, 1085–1092.
- [3] **Hekmat, M.H., Haghani, M.H.K., Izadpanah, E., & Sadeghi, H.** (2022). The influence of energy storage container geometry on the melting and solidification of PCM. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 137, 106237.
- [4] **Xie, S., & Wu, W.** (2023). Effect of aspect ratio on PCM melting behavior in a square cavity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 143, 106708.
- [5] **Anter, A.G., Sultan, A.A., Hegazi, A.A., & El Bouz, M.A.** (2023). Thermal performance and energy saving using phase change materials (PCM) integrated in building walls. *Journal of Energy Storage*, 67, 107568.
- [6] **Zhussupbekov, M., Memon, S.A., Khawaja, S.A., Nazir, K., & Kim, J.** (2023). Forecasting energy demand of PCM integrated residential buildings: A machine learning approach. *Journal of Building Engineering*, 70, 106335.
- [7] **Gil, A., Oró, E., Miró, L., Peiró, G., Ruiz, Á., Salmerón, J.M., & Cabeza, L.F.** (2014). Experimental analysis of hydroquinone used as phase change material (PCM) to be applied in solar cooling refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, 39, 95–103.
- [8] **Liu, G., Li, Q., Wu, J., Xie, R., Zou, Y., Marson, A., & Scipioni, A.** (2022). Improving system performance of the refrigeration unit using phase change material (PCM) for transport refrigerated vehicles: An experimental investigation in South China. *Journal of Energy Storage*, 51, 104435.
- [9] **Pawar, V.R., & Sobhansarbandi, S.** (2023). Heat transfer enhancement of a PCM-porous metal based heat pipe evacuated tube solar collector: An experimental study. *Solar Energy*, 251, 106–118.
- [10] **Stalin, P.M.J., Prasad, K.S., Kumar, K.P., Hemadri, G., & Rajesh, M.** (2021). Performance improvement of solar PV through the thermal management using a nano-PCM. *Materials Today: Proceedings*, 50, 1553–1558.
- [11] **Nirwan, A., Gupta, D., Matta, R., Kumar, R., & Mondal, B.** (2022). Evaluation of heat transfer performance of PCM based composites for thermal management of electronics. *Materials Today: Proceedings*, 57, 954–957.
- [12] **Ali, H.M., Ashraf, M.J., Giovannelli, A., Irfan, M., Bin Irshad, T., Hamid, H.M., Hassan, F., & Arshad, A.** (2018). Thermal management of electronics: An

- experimental analysis of triangular, rectangular and circular pin-fin heat sinks for various PCMs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 123, 272–284.
- [13] **Liu, D., Xie, K., Zhang, H., Qiang, Y., Yang, D., Wang, Z., Zhu, L., Akkurt, N., Du, Y., Shen, M., Zhong, L., Yu, F., & Xu, Q.** (2022). Numerical evaluation of convective heat transfer properties of two-dimensional rotating PCM melt in the unilaterally heated rectangular container. *Renewable Energy*, 193, 920–940.
 - [14] **Rawat, P., Ashwni, & Sherwani, A.F.** (2023). A numerical study on the impact of fin length arrangement and material on the melting of PCM in a rectangular enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 205.
 - [15] **Mourad, A., Qasem, N.A.A., Abderrahmane, A., Marzouki, R., Guedri, K., Younis, O., Shah, N.A., & Botmart, T.** (2022). Numerical study on n-octadecane PCM melting process inside a pear-shaped finned container. *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102328.
 - [16] **Peng, B., Qiu, M., Xu, N., Zhou, Y., Sheng, W., Su, F., & Wang, S.** (2022). Impacts of the Thermophysical properties of the phase change materials (PCMs) on the melting performance and optimum dimensions of fins. *Computers and Chemical Engineering*, 165, 107929.
 - [17] **Mostafavi, A., & Jain, A.** (2022). Thermal Management Effectiveness and Efficiency of a Fin Surrounded by a Phase Change Material (PCM). *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 191, 122630.
 - [18] **Zhao, C., Wang, J., Sun, Y., He, S., & Hooman, K.** (2022). Fin design optimization to enhance PCM melting rate inside a rectangular enclosure. *Applied Energy*, 321, 119368.
 - [19] **Xu, H., Wang, N., Zhang, C., Qu, Z., & Cao, M.** (2020). Optimization on the melting performance of triplex-layer PCMs in a horizontal finned shell and tube thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 176, 115409.
 - [20] **Yao, S., & Huang, X.** (2021). Study on solidification performance of PCM by longitudinal triangular fins in a triplex-tube thermal energy storage system. *Energy*, 227, 120527.
 - [21] **Mansir, I.B., Sinaga, N., Farouk, N., Aljaghtham, M., Diyoke, C., & Nguyen, D.D.** (2022). Numerical simulation of dimensions and arrangement of triangular fins mounted on cylindrical lithium-ion batteries in passive thermal management. *Journal of Energy Storage*, 50, 104392.
 - [22] **Wang, G., Feng, L., Altanji, M., Sharma, K., Sooppy Nisar, K., & Khorasani, S.** (2021). Proposing novel “L” shaped fin to boost the melting performance of a vertical PCM enclosure. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101465.
 - [23] **Zhang, Y., Sun, B.G., Zheng, X.B., Singh, P.K., Ayed, H., Mouldi, A., Mohamed, A., & Mehrez, S.** (2022). Investigation on effect of connection angle of “L” shaped fin on charging and discharging process of PCM in vertical enclosure. *Case Studies in Thermal Engineering*, 33, 101908.

- [24] **Ao, C., Yan, S., Hu, W., Zhao, L., & Wu, Y.** (2022). Heat transfer analysis of a PCM in shell-and-tube thermal energy storage unit with different V-shaped fin structures. *Applied Thermal Engineering*, 216.
- [25] **Sheikholeslami, M., ul Haq, R., Shafee, A., & Li, Z.** (2019). Heat transfer behavior of nanoparticle enhanced PCM solidification through an enclosure with V shaped fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 130, 1322–1342.
- [26] **Belazreg, A., Abderrahmane, A., Qasem, N.A.A., Sene, N., Mohammed, S., Younis, O., Guedri, K., & Nasajpour-esfahani, N.** (2022). Effect of Y-shaped fins on the performance of shell-and-tube thermal energy storage unit. *Case Studies in Thermal Engineering*, 40, 102485.
- [27] **Luo, X., Gu, J., Ma, H., Xie, Y., Li, A., Wang, J., & Ding, R.** (2022). Numerical study on enhanced melting heat transfer of PCM by the combined fractal fins. *Journal of Energy Storage*, 45, 103780.
- [28] **Qin, Z., Ji, C., Low, Z., Dubey, S., Hoong Choo, F., & Duan, F.** (2017). Effect of Fin Location on the Latent Heat Storage: A Numerical Study. *Energy Procedia*, 143, 320–326.
- [29] **Ji, C., Qin, Z., Dubey, S., Choo, F.H., & Duan, F.** (2018). Simulation on PCM melting enhancement with double-fin length arrangements in a rectangular enclosure induced by natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 255–265.
- [30] **Ismail, K.A.R., Alves, C.L.F., & Modesto, M.S.** (2001). Numerical and experimental study on the solidification of PCM around a vertical axially finned isothermal cylinder. *Applied Thermal Engineering*, 21, 53–77.
- [31] **Kok, B.** (2020). Examining effects of special heat transfer fins designed for the melting process of PCM and Nano-PCM. *Applied Thermal Engineering*, 170.
- [32] **Yang, L., Huang, J. nan, & Zhou, F.** (2020). Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review. *Energy Conversion and Management*, 214.
- [33] **Farahani, S.D., Farahani, A.D., Mamoei, A.J., & Yan, W.M.** (2023). Enhancement of phase change material melting using nanoparticles and magnetic field in the thermal energy storage system with strip fins. *Journal of Energy Storage*, 57.
- [34] **Sarkar, J., & Bhattacharyya, S.** (2012). Application of graphene and graphene-based materials in clean energy-related devices. *Archives of Thermodynamics*, 33, 23–40.
- [35] **Lin, Y., Jia, Y., Alva, G., & 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.
- [36] **Dukhan, N.** (2011). Metal-Foam-Enhanced PCM Storage System: The Cylindrical Shell Geometry. *Energy Sustainability*, 1383–1388.

- [37] **Martinelli, M., Bentivoglio, F., Caron-Soupart, A., Couturier, R., Fourmigue, J.F., & Marty, P.** (2016). Experimental study of a phase change thermal energy storage with copper foam. *Applied Thermal Engineering*, 101, 247–261.
- [38] **Esapour, M., Hamzehnezhad, A., Rabienataj Darzi, A.A., & Jourabian, M.** (2018). Melting and solidification of PCM embedded in porous metal foam in horizontal multi-tube heat storage system. *Energy Conversion and Management*, 171, 398–410.
- [39] **Zhao, C.Y., Lu, W., & Tian, Y.** (2010). Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs). *Solar Energy*, 84, 1402–1412.
- [40] **Meng, X., Yan, L., Xu, J., He, F., Yu, H., & Zhang, M.** (2020). Effect of porosity and pore density of copper foam on thermal performance of the paraffin-copper foam composite Phase-Change Material. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100742.
- [41] **Korti, A.I.N., & Guellil, H.** (2020). Experimental study of the effect of inclination angle on the paraffin melting process in a square cavity. *Journal of Energy Storage*, 32, 1–12.
- [42] **Saleem, K.B., & Alshara, A.K.** (2019). Natural convection in a triangular cavity filled with air under the effect of external air stream cooling. *Heat Transfer - Asian Research*, 48, 3186–3213.
- [43] **Karami, R., & Kamkari, B.** (2019). Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units. *Applied Thermal Engineering*, 146, 45–60.
- [44] **Meng, X., Liu, S., Zou, J., Liu, F., & Wang, J.** (2021). Inclination angles on the thermal behavior of Phase-Change Material (PCM) in a cavity filled with copper foam partly. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100944.
- [45] **Bouzennada, T., Mechighel, F., Ismail, T., Kolsi, L., & Ghachem, K.** (2021). Heat transfer and fluid flow in a PCM-filled enclosure: Effect of inclination angle and mid-separation fin. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 124, 105280.
- [46] **Punniakodi, B.M.S., & Senthil, R.** (2021). A review on container geometry and orientations of phase change materials for solar thermal systems. *Journal of Energy Storage*, 36, 102452.
- [47] **El Omari, K., Kousksou, T., & Le Guer, Y.** (2011). Impact of shape of container on natural convection and melting inside enclosures used for passive cooling of electronic devices. *Applied Thermal Engineering*, 31, 3022–3035.
- [48] **Qin, Z., Ji, C., Low, Z.H., Tong, W., Wu, C., & Duan, F.** (2022). Geometry effect of phase change material container on waste heat recovery enhancement. *Applied Energy*, 327, 120108.

- [49] **Bergles, A.E.** (2011). Recent developments in enhanced heat transfer. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 47, 1001–1008.
- [50] **Selimefendigil, F., & Öztop, H.F.** (2022). Combined effects of bifurcation and magnetic field on the performance of phase change material installed cylinder with small inlet temperature perturbations during nanofluid convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 188, 122640.
- [51] **Saha, S.K.** (2022). Dynamics of phase change of gallium under magnetic field and thermocapillary effects under variable gravity conditions. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29.
- [52] **Mahdi, J.M., Najim, F.T., Aljubury, I.M.A., Mohammed, H.I., Khedher, N. Ben, Alshammari, N.K., Cairns, A., & Talebizadehsardari, P.** (2022). Intensifying the thermal response of PCM via fin-assisted foam strips in the shell-and-tube heat storage system. *Journal of Energy Storage*, 45.
- [53] **Zhao, C., Opolot, M., Liu, M., Bruno, F., Mancin, S., & Hooman, K.** (2020). Numerical study of melting performance enhancement for PCM in an annular enclosure with internal-external fins and metal foams. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 150.
- [54] **Cui, W., Si, T., Li, X., Li, X., Lu, L., Ma, T., & Wang, Q.** (2022). Heat transfer analysis of phase change material composited with metal foam-fin hybrid structure in inclination container by numerical simulation and artificial neural network. *Energy Reports*, 8.
- [55] **Karami, R., & Kamkari, B.** (2019). Investigation of the effect of inclination angle on the melting enhancement of phase change material in finned latent heat thermal storage units. *Applied Thermal Engineering*, 146.
- [56] **Groulx, D., Biwole, P.H., & Bhourri, M.** (2020). Phase change heat transfer in a rectangular enclosure as a function of inclination and fin placement. *International Journal of Thermal Sciences*, 151.
- [57] **Li, Z., Shahsavar, A., Al-Rashed, A.A.A.A., & Talebizadehsardari, P.** (2020). Effect of porous medium and nanoparticles presences in a counter-current triple-tube composite porous/nano-PCM system. *Applied Thermal Engineering*, 167.
- [58] **Afsharpanah, F., Izadi, M., Hamedani, F.A., Ajarostaghi, S.S.M., & Yaïci, W.** (2022). Solidification of nano-enhanced PCM-porous composites in a cylindrical cold thermal energy storage enclosure. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39.
- [59] **Chen, S.B., Saleem, S., Alghamdi, M.N., Nisar, K.S., Arsalanloo, A., & Issakhov, A.** (2021). Combined effect of using porous media and nano-particle on melting performance of PCM filled enclosure with triangular double fins. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25.
- [60] **Baby, R., & Balaji, C.** (2013). Experimental investigations on thermal performance enhancement and effect of orientation on porous matrix filled PCM based heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 46.

- [61] **Matthieu, F., Dorignac, E., & Lantier, R.** (2021). Heat transfer and flow structure of a hot annular impinging jet. *International Journal of Thermal Sciences*, 170.
- [62] **Coşanay, H., Öztop, H.F., Gür, M., & Bakır, E.** (2022). Analysis of turbulent wall jet impingement onto a moving heated body. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 32.
- [63] **Bharanitharan, K.J., Kang, S., Sanjay, K.J., & Senthilkumar, S.** (2022). A combined technique using phase change material and jet impingement heat transfer for the exhaust heat recovery applications – A numerical approach. *Journal of Energy Storage*, 55.
- [64] **Selimefendigil, F., & Öztop, H.F.** (2023). Multijet impingement heat transfer under the combined effects of encapsulated-PCM and inclined magnetic field during nanoliquid convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 203.
- [65] **Zhang, J.J., Yang, C.H., Jin, Z.G., Ma, S.X., Zhang, J.S., & Pang, X.M.** (2021). Experimental study of jet impingement heat transfer with microencapsulated phase change material slurry. *Applied Thermal Engineering*, 188.
- [66] **Dincer, I., & Rosen, M.A.** (2021). Thermal energy storage: systems and applications. *John Wiley & Sons*.
- [67] **Alva, G., Lin, Y., & Fang, G.** (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144.
- [68] **Anisur, M.R., Mahfuz, M.H., Kibria, M.A., Saidur, R., Metselaar, I.H.S.C., & Mahlia, T.M.I.** (2013). Curbing global warming with phase change materials for energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18.
- [69] **Alnaimat, F., & Rashid, Y.** (2019). Thermal energy storage in solar power plants: A review of the materials, associated limitations, and proposed solutions. *Energies*, 12.
- [70] **Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D., Lipinski, T.** (2020). Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. *International Journal of Thermofluids*, 5–6.
- [71] **Sarbu, I., Sebarchievici, C.** (2018). A comprehensive review of thermal energy storage, *Sustainability (Switzerland)*, 10.
- [72] **Desai, F., Prasad, J. S., Muthukumar, P., Rahman, M. M.** (2021). Thermochemical energy storage system for cooling and process heating applications: A review, *Energy Conversion and Management*, 229, 113617.
- [73] **Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., Buddhi, D.** (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318–345.
- [74] **Reddy, K. S., Mudgal, V., Mallick, T. K.** (2018). Review of latent heat thermal energy storage for improved material stability and effective load management, *Journal of Energy Storage*, 15, 205–227.

- [75] **Meccanica Ciclo XXVIII, Arena Simone coordinator Mandas Natalino Supervisor Cau Giorgio** (2014). DOTTORATO DI RICERCA Modelling, design and analysis of innovative thermal energy storage systems using PCM for industrial processes, heat and power generation.
- [76] **Pielichowska, K., Pielichowski, K.** (2014). Phase change materials for thermal energy storage, *Progress in Materials Science*, 65, 67–123.
- [77] **Podara, C. V., Kartsonakis, I. A., Charitidis, C. A.** (2021). Towards phase change materials for thermal energy storage: classification, improvements and applications in the building sector, *Applied Sciences (Switzerland)*, 11, 1–26.
- [78] **Kancane, L., Vanaga, R., Blumberga, A.** (2016). Modeling of Building Envelope's Thermal Properties by Applying Phase Change Materials, *Energy Procedia*, 95, 175–180.
- [79] **Arasteh, H., Maref, W., Saber, H. H.** (2023). Energy and Thermal Performance Analysis of PCM-Incorporated Glazing Units Combined with Passive and Active Techniques: A Review Study, *Energies*, 16.
- [80] **Li, Z., Lu, Y., Huang, R., Chang, J., Yu, X., Jiang, R., Yu, X., Roskilly, T.** (2021). Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage, *Applied Energy*, 283, 116277.
- [81] **Faraj, K., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., Castelain, C.** (2020). Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109579.
- [82] **Abhat, A.** (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials, *Solar Energy*, 30, 313–332.
- [83] **Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., Buddhi, D.** (2009). Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318–345.
- [84] **Farid, M. M., Husian, R. M.** (1990). An electrical storage heater using the phase-change method of heat storage, *Energy Conversion and Management*, 30, 219–230.
- [85] **Delgado, J. M. P. Q., Martinho, J. C., Vaz Sá, A., Guimarães, A. S., Abrantes, V.** (2019). Thermal Energy Storage with Phase Change Materials.
- [86] **Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F., Mehling, H.** (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, *Applied Thermal Engineering*, 23, 251–283.
- [87] **Farid, M. M., Khudhair, A. M., Razack, S. A. K., Al-Hallaj, S.** (2004). A review on phase change energy storage: materials and applications, *Energy Conversion and Management*, 45, 1597–1615.
- [88] **Man, X., Lu, H., Xu, Q., Wang, C., Ling, Z.** (2023). Review on the thermal property enhancement of inorganic salt hydrate phase change materials, *Journal of Energy Storage*, 72, 108699.

- [89] **Yu, K., Liu, Y., Jia, M., Wang, C., Yang, Y.** (2022). Thermal energy storage cement mortar containing encapsulated hydrated salt/fly ash cenosphere phase change material: Thermo-mechanical properties and energy saving analysis, *Journal of Energy Storage*, 51, 104388.
- [90] **Cindrella, L., Dyer, A.** (2009). Ion-exchanged and salt hydrates-encapsulated zeolites for solar refrigeration, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93, 161–166.
- [91] **Heßbrügge, B. J., Vaidya, A. M.** (1997). Preparation and characterization of salt hydrates encapsulated in polyamide membranes, *Journal of Membrane Science*, 128, 175–182.
- [92] **Herrick, C. S.** (1982). Melt-freeze-cycle life-testing of Glauber’s salt in a rolling cylinder heat store, *Solar Energy*, 28, 99–104.
- [93] **Telkes, M.** (1952). Nucleation of Supersaturated Inorganic Salt Solutions, *Industrial & Engineering Chemistry*, 44, 1308–1310.
- [94] **Biswas, D. R.** (1977). Thermal energy storage using sodium sulfate decahydrate and water, *Solar Energy*, 19, 99–100.
- [95] **Lamrani, B., Johannes, K., Kuznik, F.** (2021). Phase change materials integrated into building walls: An updated review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110751.
- [96] **Sun, M., Liu, T., Sha, H., Li, M., Liu, T., Wang, X., Chen, G., Wang, J., Jiang, D.** (2023). A review on thermal energy storage with eutectic phase change materials: Fundamentals and applications, *Journal of Energy Storage*, 68, 107713.
- [97] **Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Ahmad, D., Lipinski, T.** (2020). Latent thermal energy storage technologies and applications: A review, *International Journal of Thermofluids*, 5–6, 100039.
- [98] **Sharma, S., Tahir, A., Reddy, S., Mallick, T.** (2016). Performance enhancement of a Building-Integrated Concentrating Photovoltaic system using phase change material, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 149.
- [99] **Khalifa, M. A.** (2013). Application of phase change materials as a solution for building overheating: a case for the UK.
- [100] **Ghani, S. A. A., Jamari, S. S., Abidin, S. Z.** (2021). Waste materials as the potential phase change material substitute in thermal energy storage system: a review, *Chemical Engineering Communications*, 208, 687–707.
- [101] **Kalbasi, R., Samali, B., Afrand, M.** (2023). Taking benefits of using PCMs in buildings to meet energy efficiency criteria in net zero by 2050, *Chemosphere*, 311, 137100.
- [102] **Li, Q., Ju, Z., Wang, Z., Ma, L., Jiang, W., Li, D., Jia, J.** (2022). Thermal performance and economy of PCM foamed cement walls for buildings in different climate zones, *Energy and Buildings*, 277, 112470.

- [103] **Bista, S., Hosseini, S. E., Owens, E., Phillips, G.** (2018). Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM), *Applied Thermal Engineering*, 142, 723–735.
- [104] **Schalbart, P., Leducq, D., Alvarez, G.** (2015). Ice-cream storage energy efficiency with model predictive control of a refrigeration system coupled to a PCM tank, *International Journal of Refrigeration*, 52, 140–150.
- [105] **Venkatesan, A., Fuskele, V., Ganganagunta, S., Khare, K., Kumar Mahobia, S., Kumar Kushwah, K.** (2022). Investigating the impact of using a ND-PCM on the thermal management of solar PV panels, *Materials Today: Proceedings*.
- [106] **Gürbüz, H., Demirtürk, S., Akçay, H., Topalci, Ü.** (2023). Thermal stabilization and energy harvesting in a solar PV/T-PCM-TEG hybrid system: A case study on the design of system components, *Energy Conversion and Management*, 294, 117536.
- [107] **He, J., Chu, W., Wang, Q.** (2023). Experimental study on pressure-enhanced close contact melting with PCMs for stable temperature control of high heat flux electronic devices, *Applied Thermal Engineering*, 230, 120707.
- [108] **Mozafari, M., Lee, A., Mohammadpour, J.** (2021). Thermal management of single and multiple PCMs based heat sinks for electronics cooling, *Thermal Science and Engineering Progress*, 23, 100919.
- [109] **Bouhal, T., El Rhafiki, T., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y.** (2018). PCM addition inside solar water heaters: Numerical comparative approach, *Journal of Energy Storage*, 19, 232–246.
- [110] **Zou, D., Ma, X., Liu, X., Zheng, P., Cai, B., Huang, J., Guo, J., Liu, M.** (2017). Experimental research of an air-source heat pump water heater using water-PCM for heat storage, *Applied Energy*, 206, 784–792.
- [111] **Al-Kayiem, H. H., Lin, S. C.** (2014). Performance evaluation of a solar water heater integrated with a PCM nanocomposite TES at various inclinations, *Solar Energy*, 109, 82–92.
- [112] **Saravanan, M., Arul Selvan, S., Radhakrishnan, N., Srinivasa Rao, S., Sharma, V., Madhavarao, S., Siva Chandran, S.** (2023). Improving the thermal efficiency of a solar water heater by using PCM, *Materials Today: Proceedings*.
- [113] **Ismail, K. A. R., de Jesus, A. B.** (2001). Parametric study of solidification of PCM around a cylinder for ice-bank applications, *International Journal of Refrigeration*, 24, 809–822.
- [114] **Sarkar, S., Mestry, S., Mhaske, S. T.** (2022). Developments in phase change material (PCM) doped energy efficient polyurethane (PU) foam for perishable food cold-storage applications: A review, *Journal of Energy Storage*, 50, 104620.
- [115] **Gin, B., Farid, M. M.** (2010). The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food, *Journal of Food Engineering*, 100, 372–376.

- [116] **Pielichowska, K., Szatkowski, P., Pielichowski, K.** (2023). PCMs in biomedical applications, in: K. Pielichowska, K. Pielichowski (Eds.), *Multifunctional Phase Change Materials*, Woodhead Publishing, pp. 411–444.
- [117] **B. P.** (2007). Application of phase change and shape memory materials in medical textiles, in: L. Van Langenhove (Ed.), *Smart Textiles for Medicine and Healthcare*, Woodhead Publishing, pp. 74–87.
- [118] **Kim, T. Y., Hyun, B.-S., Lee, J.-J., Rhee, J.** (2013). Numerical study of the spacecraft thermal control hardware combining solid–liquid phase change material and a heat pipe, *Aerospace Science and Technology*, 27, 10–16.
- [119] **Kabir, M., Gameda, T., Preller, E., Xu, J.** (2021). Design and Development of a PCM-Based Two-Phase Heat Exchanger Manufactured Additively for Spacecraft Thermal Management Systems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 180, 121782.
- [120] **Wu, W., Liu, N., Cheng, W., Liu, Y.** (2013). Study on the effect of shape-stabilized phase change materials on spacecraft thermal control in extreme thermal environment, *Energy Conversion and Management*, 69, 174–180.
- [121] **Lawag, R. A., Ali, H. M.** (2022). Phase change materials for thermal management and energy storage: A review, *Journal of Energy Storage*, 55, 105602.
- [122] **Emam, M., Ookawara, S., Ahmed, M.** (2019). Thermal management of electronic devices and concentrator photovoltaic systems using phase change material heat sinks: Experimental investigations, *Renewable Energy*, 141, 322–339.
- [123] **Faghani, M., Hosseini, M. J., Bahrampoury, R.** (2018). Numerical simulation of melting between two elliptical cylinders, *Alexandria Engineering Journal*, 57, 577–586.
- [124] **Kabbara, M., Kheirabadi, A. C., Groulx, D.** (2016). Numerical modelling of natural convection driven melting for an inclined/finned rectangular enclosure, *ASME 2016 Heat Transfer Summer Conference, HT 2016*, Collocated with the ASME 2016 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME 2016 14th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 2.
- [125] **Zuckerman, N., Lior, N.** (2005). Impingement heat transfer: Correlations and numerical modeling, *Journal of Heat Transfer*, 127, 544–552.
- [126] **Ansys Inc.** (2020). *ANSYS FLUENT Theory Guide*, ANSYS Inc., USA, Release 20, 814.
- [127] **Huang, H., Sun, T., Zhang, G., Li, D., Wei, H.** (2019). Evaluation of a developed SST k- Ω turbulence model for the prediction of turbulent slot jet impingement heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 700–712.
- [128] **Ghahremannezhad, A., Xu, H., Salimpour, M. R., Wang, P., Vafai, K.** (2020). Thermal performance analysis of phase change materials (PCMs) embedded in gradient porous metal foams, *Applied Thermal Engineering*, 179, 115731.

ÖZGEÇMİŞ

Ad – Soyad: Burak KIYAK

Öğrenim Bilgisi

- **Doktora** : İnönü Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı (2018-2024)
- **Yüksek Lisans** : Fırat Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü /Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı (2015-2017)
- **Lisans** : Bayburt Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/Makine Mühendisliği Bölümü (2010-2014)

Mesleki Deneyim

- Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü – Araştırma Görevlisi (2017-...)
- Özel Sektör (2014-2016)

Tez Çalışmasından Türetilen Yayınlar

- **Kiyak, B., Öztıp, H. F., Aksoy, İ. G.** (2023). Experimental and Numerical Investigation on Melting of Phase Change Material in a Disc-Shaped Container via Hot Air Jet Impinging. *Applied Thermal Engineering*, 121761.
- **Kiyak, B., Öztıp, H. F., Aksoy, G.** (2023). Three dimensional analysis of melting performance of phase change materials in a disk-shaped container with partial circular heating. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 0, 1–18.
- **Kiyak, B., Öztıp, H. F., Aksoy, I. G.** (2024). A numerical study on the effects of inclination angle and container material on thermal energy storage by phase change material in a thick-walled disc. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*.
- **Kiyak, B., Öztıp, H. F., Ertam, F., Aksoy, İ. G.** (2024). An intelligent approach to investigate the effects of container orientation for PCM melting based on an XGBoost regression model. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 161, 202–213.
- **Öztıp, H. F., Kiyak, B., Aksoy, I. G.** (2024). Effect of hot air inclined jet impingement to container for controlling of energy storage of PCM: Experimental and numerical investigation. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*.