



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİ İLE ÇİFT BORULU ENERJİ
DEPOLAMADA KANAT YERLEŞİM DÜZENİNİN ERİME VE
KATILAŞMA PERFORMANSINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ORÇUN ALTINOK

NİSAN

ORÇUN ALTINOK

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

NİSAN 2025

**FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİ İLE ÇİFT BORULU ENERJİ DEPOLAMADA
KANAT YERLEŞİM DÜZENİNİN ERİME VE KATILAŞMA
PERFORMANSINA ETKİSİ**

Orçun ALTINOK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Danışman

Doç. Dr. Burak KURŞUN

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2025

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Orçun ALTINOK tarafından hazırlanan “Faz Değişim Malzemesi İle Çift Borulu Enerji Depolamada Kanat Yerleşim Düzeninin Erime Ve Katılaşma Performansına Etkisi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç Dr. Burak KURŞUN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Başkan : Doç Dr. Mahmut KAPLAN

Makine ve Metal Teknolojileri, Gaziantep Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Korhan ÖKTEN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum

Tez Savunma Tarihi: 07/04/2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Orçun ALTINOK

07/04/2025

FAZ DEĞİŞİM MALZEMESİ İLE ÇİFT BORULU ENERJİ DEPOLAMADA KANAT YERLEŞİM DÜZENİNİN ERİME VE KATILAŞMA PERFORMANSINA ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Orçun ALTINOK

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2025

ÖZET

Enerji depolama teknolojileri, enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve sürdürülebilirlik açısından giderek daha büyük bir öneme sahip olmaktadır. Bu kapsamda, faz değişim malzemeleri (FDM'ler), yüksek enerji yoğunlukları ve sabit sıcaklıklarda enerji depolayabilme özellikleriyle dikkat çekmektedir. Ancak, FDM'lerin düşük ısı iletkenliği, bu malzemelerin pratik ve ticari uygulamalardaki en önemli kısıtlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla, FDM ile çalışan enerji depolama sistemlerinde ısı iletkenliği artırmaya yönelik kanat kullanımı, nanoparçacık ilavesi ve metal köpük uygulamaları gibi çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmada da enerji depolama performansını artırmak için kanat kullanımı tercih edilmiş olup, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak kanatçıklar FDM haznesinin alt ve üst bölgelerinde farklı oranlarda yoğunlaştırılmıştır. Bu farklı yoğunlaştırma oranlarının doğal konveksiyon akışı, enerji depolama verimi, şarj ve deşarj süresi üzerindeki etkileri birlikte ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, kanatlar arası değişken açılara sahip altı farklı kanat yerleşim konfigürasyonu modellenmiş ve ilgili sayısal analizler zamana bağlı iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Erime ve katılaşma sürecinin modellenmesinde entalpi-porozite yöntemi kullanılmıştır. Parametrik analizler sonucunda, kanatların tamamının iç borunun alt yüzeyinde yoğunlaştırıldığı 45°'lik kanat arası açısına sahip konfigürasyonun (Model 6) en yüksek erime performansını sergilediği ve şarj süresini referans duruma kıyasla %27,2 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Farklı kanat yerleşim düzenlerinde ortalama FDM sıcaklıkları birbirine oldukça yakın olduğundan kanat yerleşim düzeninin enerji depolama kapasitesi üzerindeki etkisinin düşük olduğu anlaşılmıştır. Katılaşma performansı açısından da 30°'lik kanat arası açısına sahip Model 6 kanat yerleşim düzeni ile referans modele göre deşarj süresinde %129,1'lik en yüksek artışı meydana gelmiştir. Ortalama FDM sıcaklıkları dikkate alındığında 60°'lik kanat arası açısına sahip Model 6 kanat yerleşim düzeninde en yüksek enerji salınım kapasitesi oluşmuştur. Erime ve katılaşma performanslarının dikkate alındığı enerji depolama verimi hesaplamaları en yüksek enerji depolama veriminin %87 ile 45° kanat arası açısıya sahip Model 6 ile elde edildiğini ortaya koymuştur.

Sayfa Adedi	: 90
Anahtar Kelimeler	: Termal Enerji Depolama, Yenilenebilir Kaynaklar, Faz Değişim Malzemeleri, Gizli Isı, Kanatçıklar
Danışman	: Doç. Dr. Burak KURŞUN

EFFECT OF FIN PLACEMENT ON MELTING AND SOLIDIFICATION
PERFORMANCE IN DOUBLE-TUBE ENERGY STORAGE WITH PHASE
CHANGING MATERIAL

(M. Sc. Thesis)

Orçun ALTINOK

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2025

ABSTRACT

Energy storage technologies are becoming increasingly important for the efficient utilization of energy resources and sustainability. In this context, phase change materials (PCMs) stand out due to their high energy densities and ability to store energy at nearly constant temperatures. However, the low thermal conductivity of PCMs represents a significant limitation in practical and commercial applications. To address this issue, various methods have been developed to enhance thermal conductivity in PCM-based energy storage systems, including the use of fins, nanoparticle additives, and metal foams. In this study, fin utilization was selected as the enhancement method to improve energy storage performance. Unlike previous studies, fins were concentrated in different proportions in the upper and lower regions of the PCM enclosure. The effects of these varying concentration ratios on natural convection flow, energy storage efficiency, and charging and discharging durations were analyzed simultaneously. Within the scope of the study, six different fin placement configurations with varying inter-fin angles were modelled, and numerical analyses were conducted in a transient, two-dimensional framework. The enthalpy-porosity method was employed to simulate the melting and solidification processes. Parametric analyses revealed that the configuration where all fins were concentrated on the lower surface of the inner tube with an inter-fin angle of 45° (Model 6) exhibited the highest melting performance, reducing the charging time by 27,2% compared to the reference case. Since the average PCM temperatures across different fin configurations were relatively similar, it was concluded that fin placement had a minimal effect on energy storage capacity. In terms of solidification performance, the Model 6 configuration with a 30° inter-fin angle yielded the most significant improvement, increasing the discharging duration by 129,1% compared to the reference model. Moreover, when considering average PCM temperatures, the Model 6 configuration with a 60° inter-fin angle demonstrated the highest energy release capacity. Finally, energy storage efficiency calculations, which accounted for both melting and solidification performance, indicated that the highest efficiency of 87% was achieved with Model 6 at a 45° inter-fin angle.

Number of pages : 90

Keywords : Thermal Energy Storage, Renewable Resources, Phase Change Materials, Latent Heat, Fins

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Burak KURŞUN

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her aşamada beni destekleyen, çalışmalarım konusunda bana güvenen ve inanan, desteklerini her daim üzerimde tutan, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren danışman hocam Amasya Üniversitesi Doç. Dr. Burak KURŞUN'a şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmada her türlü desteklerini benden esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkür ediyorum. Son olarak, iyi kötü her anımda yanımda olan, beni destekleyen, bu süreçte beni motive eden, sonsuz sabır ve sevgisi için sevgili eşim Aysun ALTINOK'a özellikle teşekkür etmek istiyorum.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ISIL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ	3
2.1. Termal Enerji ve Termal Enerji Depolama Yöntemleri.....	4
2.1.1. Termokimyasal ısı depolama.....	6
2.1.2. Duyulur ısı depolama.....	7
2.1.3. Gizli ısı depolama.....	9
2.2. Faz Değiştiren Maddeler	11
2.2.1. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması.....	12
2.2.1.1. Parafinler.....	15
2.2.1.2. Yağ asitleri	16
2.2.1.3. İnorganik tuz hidratları	18
2.2.1.4. Ötektik karışımlar	20
2.2.2. Faz değiştiren malzemelerin kullanılma potansiyeli olan alanlar	21
2.2.3. Faz değiştiren malzemelerin sahip olması gereken özellikler	22
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	24
4. MATERYAL VE YÖNTEM	31

	Sayfa
4.1. Fiziksel Model.....	31
4.2. Matematiksel Model.....	34
4.3. Sınır Şartları	37
4.4. Sayısal Yöntem	38
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	40
5.1. Sayısal Sonuçların Doğrulanması	40
5.2. Erime Analizi Bulguları	42
5.3 Katılma Analizi Bulguları.....	58
6. SONUÇLAR	80
KAYNAKLAR	82
ÖZGEÇMİŞ	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Faz değıştiren maddelerin gruplandırması.....	13
Çizelge 2.2. FDM türlerine örnek maddeler ve özellikleri	14
Çizelge 2.3. FDM'lerin kullanım potansiyeli olan alanlar	22
Çizelge 4.1. N-eikosan FDM'nin termofiziksel özellikleri	31
Çizelge 5.1. Modeller ve erime süreleri.....	57
Çizelge 5.2. Modeller ve katılşma süreleri.....	77
Çizelge 5.3. Enerji depolama verimi sonuçları.....	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Enerji depolama teknikleri.....	3
Şekil 2.2. Isı depolamasında uygulanan yöntemler	5
Şekil 2.3. Termal (ısı) enerji depolama sisteminin genel bileşenleri.....	5
Şekil 2.4. Gizli ısı olarak ısı enerji depolama	10
Şekil 4.1. Tasarlanmış referans model	32
Şekil 4.2. Sayısal analizde kullanılan tüm modeller	33
Şekil 5.1. Izgara boyutundan (a) ve zaman adımından (b) bağımsızlık testi sonuçları ..	40
Şekil 5.2. Literatür çalışması (Darzi ve diğerleri, 2012) ile karşılaştırma sonuçları a) Sıvı fraksiyonu konturları b) Sıvı fraksiyon eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması	41
Şekil 5.3. Model 1 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları.....	42
Şekil 5.4. Model 2 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	43
Şekil 5.5. Model 3 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	46
Şekil 5.6. Model 4 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları.....	49
Şekil 5.7. Model 5 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	51
Şekil 5.8. Model 6 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	53
Şekil 5.9. Tüm modeller için erime periyodundaki sıvı fraksiyonunun zamana bağlı değişim grafiği	56
Şekil 5.10. Tüm modelleri için erime periyodundaki ortalama FDM sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği	57
Şekil 5.11. Model 1 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları	59

Şekil 5.12. Model 2 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	60
Şekil 5.13. Model 3 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	63
Şekil 5.14. Model 4 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları	67
Şekil 5.15. Model 5 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	68
Şekil 5.16. Model 6 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$	71
Şekil 5.17. Tüm modeller için katılaşma periyodundaki sıvı fraksiyonunun zamana bağlı değişim grafiği	76
Şekil 5.18. Tüm modeller için katılaşma periyodundaki ortalama FDM sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği	77
Şekil 5.19. Enerji depolama verimi sonuçlarının grafiksel gösterimi.....	79

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1 Parafin örnekleri	15
Resim 2.2 Yağ asidi bağlı polivinil alkol polimer	17
Resim 2.3 Kalsiyum klorür hekzahidrat	18



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
Q	depolanan ısı miktarı
a_r	tepkiyen madde kesri
m	maddenin kütlesi
ΔH_r	birim kütlenin reaksiyon ısısı
C_p	özgül ısı kapasitesi
T	sıcaklık
H_e	erime gizli ısısı
M	inorganik tuz
ρ	yoğunluk
g	yer çekimi ivmesi
μ	dinamik viskozite
β	termal genleşme katsayısı
λ	sıvı fraksiyonu
k	iletimle ısı transfer katsayısı
h	entalpi
H	gizli ısı

Kısaltmalar**Açıklama**

TED

termal enerji depolama

FDM

faz değişim malzemeleri

 h_{konv}

konveksiyonla ısı transfer katsayısı

Nu

nusselt sayısı

Re

reynolds sayısı

Fo

fourier sayısı



1. GİRİŞ

Dünyadaki nüfus artışı, enerji tüketimini önemli ölçüde artırmış ve bunun sonucunda enerji kullanım yoğunluğu yükselmiştir. Eskiden yalnızca ısınma, barınma gibi temel ihtiyaçlar için kullanılan enerji, teknolojik ilerlemelerle birlikte, insanların hayatlarının hemen her alanında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Enerji üretimi için mevcut olan kaynaklar, yenilenebilir ve yenilenebilir olmayan (fosil yakıtlar ve madensel yakıtlar) olarak iki ana gruba ayrılabilir. Fosil enerji kaynaklarına dayalı enerji dönüşüm sistemleri günümüzde geniş bir kullanım alanına sahip olup, neredeyse her sektörde kullanılmaktadır. Ancak yapılan araştırmalar, dünya çapında fosil yakıt rezervlerinin hızla azaldığını göstermektedir. Bu durum, kısa bir süre içinde fosil yakıtlarla enerji üreten sistemlerin işlevselliğini kaybedeceğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple, yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanan sistemlerin geliştirilmesi ve verimliliklerinin artırılması daha da hayati bir hale gelmektedir (Bilen, Işık, Gezer ve Kıyık, 2021).

Küresel enerji talebinin artmasıyla birlikte, enerji koşulları her geçen gün daha da kötüleşmektedir. Fosil yakıtların hem sınırlı olması hem de çevreye verdikleri zararlar, alternatif enerji kaynaklarının önemini daha fazla artırmaktadır. Diğer taraftan güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları devamlı bir enerji kaynağı sağlamaz. Bu sorunu aşmak için, termal enerji depolama (TED) teknolojisi devreye girmektedir. Güneş ışıını olan dönemlerde bu enerjiyi depolayarak, enerji talebi ile arzı arasındaki dengesizlik ortadan kaldırılmaktadır.

Duyulur enerji depolama ve gizli enerji depolama termal enerji depolama yönetmeleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Güneş enerjisinin depolanmasında en yaygın kullanılan yöntem duyulur enerji depolamadır. Ancak son zamanlarda, belirli sıcaklık aralıklarında eriyip katılaşılan faz değıştiren malzemelerle gizli ısıyı depolama tekniğı, alternatif bir seçenek olarak öne çıkmıştır. Duyulur enerji depolama, sistemin korozyona uğraması, sızıntı yapma riski, yüksek basınç gereksinimi, yalıtım ihtiyaçları ve büyük boyutlarda ısı depolama kapasitesi gibi dezavantajlarla birlikte yüksek maliyetler doğurduğundan, giderek daha fazla gizli ısı depolama teknolojilerine yönelme gözlemlenmektedir. Gizli ısı depolama, daha dar sıcaklık aralıklarında ve daha az hacimlerde daha yüksek ısı depolama kapasitesi olması

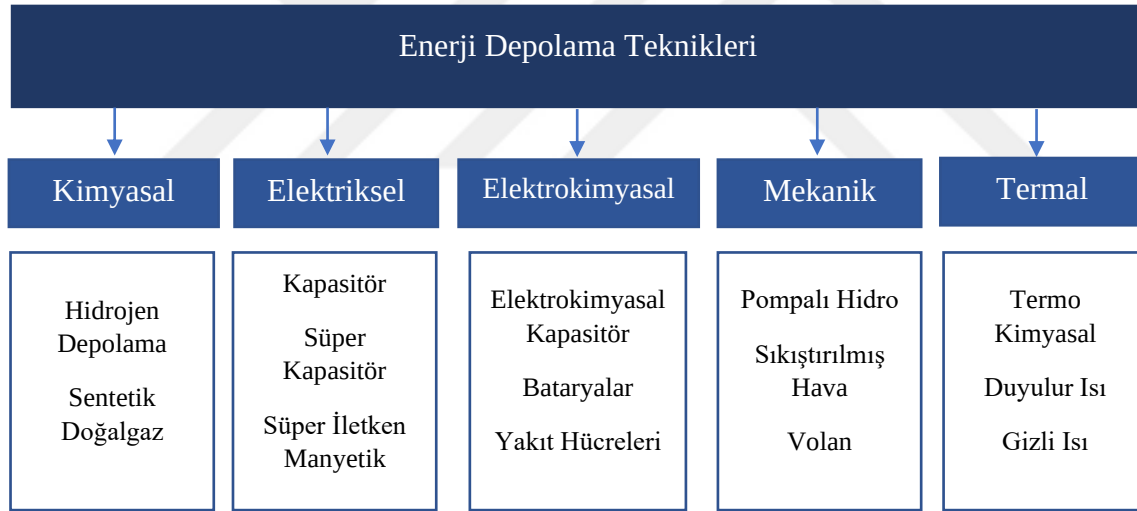
nedeniyle, güneş enerjisinden sıcak su temini ve yer ısıtma gibi uygulamalarda en verimli termal depolama çözümü olarak kabul edilmektedir.

Kısıtlı zaman dilimlerinde mevcut termal enerjinin, ihtiyaç duyulduğunda kullanılabilmesi için mümkün olan en kısa zamanda depolanması, sistem performansı, açısından kritik bir önem arz eder. Katı sıvı faz değişimi üzerine kurulu gizli ısı depolama sistemlerinde, depolama zamanlarının minimuma indirilmesi, depo içindeki faz değişim malzemelerinin (FDM) tamamının belirlenen süre zarfında faz dönüşümünü gerçekleştirmesini gerektirir. Ancak bu sistemlerde, faz değişim malzemelerinin düşük ısıl iletkenlikleri, ısı kaynağı ile FDM arasındaki ısı transferinin düşük seviyelerde kalmasına sebep olmaktadır. Bu durum, kısıtlı zaman içerisinde mevcut ısı enerjinin depolanmasını engeller ve sistemin ısı verimliliğini olumsuz yönde etkiler. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla, sistemlerde aktif ve pasif iyileştirmeler yapılmaktadır. Aktif iyileştirmeler, ısı transfer akışkanının sıcaklık ve debisinin artırılması yolu ile sisteme birim zamanda daha fazla enerji girişi sağlanmasını hedefler. Pasif iyileştirmeler ise, ısı transfer yüzeyinin büyütülmesi (örneğin kanatçık ekleme, metal köpük kullanımı) veya FDM'lere nanopartikül ilavesi yaparak ısı iletiminin iyileştirilmesi gibi, dışarıdan ek bir enerji kaynağına ihtiyaç duymayan yöntemleri kapsamaktadır. Isı depolama sistemlerinde aktif iyileştirmelerin etkinliği, ısı kaynağının gücüne bağlı olduğundan, pasif iyileştirme yöntemleri daha etkili bir seçenek olarak öne çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında düşük maliyeti ve yüksek ısıl performansı dikkate alınarak çift borulu gizli ısı depolamada kanatçık kullanımı tercih edilmiştir. Tez çalışmasında altı adet kanat yerleşim düzeni tasarlanarak kanatlar arasındaki farklı açılar için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sayısal akış ve ısı transferi analizleri zamana bağlı ve iki boyutlu olarak yürütülmüştür. Erime ve katılaşma analizleri gerçekleştirilerek kanat yerleşim düzenlerinin ısı verim ve şarj ve deşarj süreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. ISIL ENERJİ DEPOLAMA YÖNTEMLERİ

Enerjinin istenilen zaman ve mekânda kullanılabilir olması, modern enerji sistemlerinin temel hedeflerinden biridir. Bu amaca ulaşabilmek için enerji depolama gereklidir. Enerji depolamanın amacı, bir yandan enerji kullanım alanlarında ortaya çıkan atık enerjilerin (endüstri ve sanayideki atık ısı gibi) depolanması, aynı zamanda yalnızca belirli zaman dilimlerinde enerji sağlayabilen (örneğin güneş enerjisi gibi) yenilenebilir enerji kaynaklarının enerjisini depolayarak, enerji temin zamanı ile talep arasındaki farkı gidermektir. Bu süreç, enerji sistemlerinin verimliliğini artırmak ve enerji tasarrufu sağlamak için kritik öneme sahiptir (Sarı, 2011; Kozak ve Kozak, 2012). Enerji, çeşitli biçimlerde depolanabilir; bunlar arasında mekanik, kimyasal, elektriksel, elektrokimyasal ve termal depolama yöntemleri yer almaktadır (Şekil 2.1) (Mazman, 2018; Sara Enerji, 2021; Mazman ve Yılmaz, 2019; TÜBA, 2020).



Şekil 2.1. Enerji depolama teknikleri

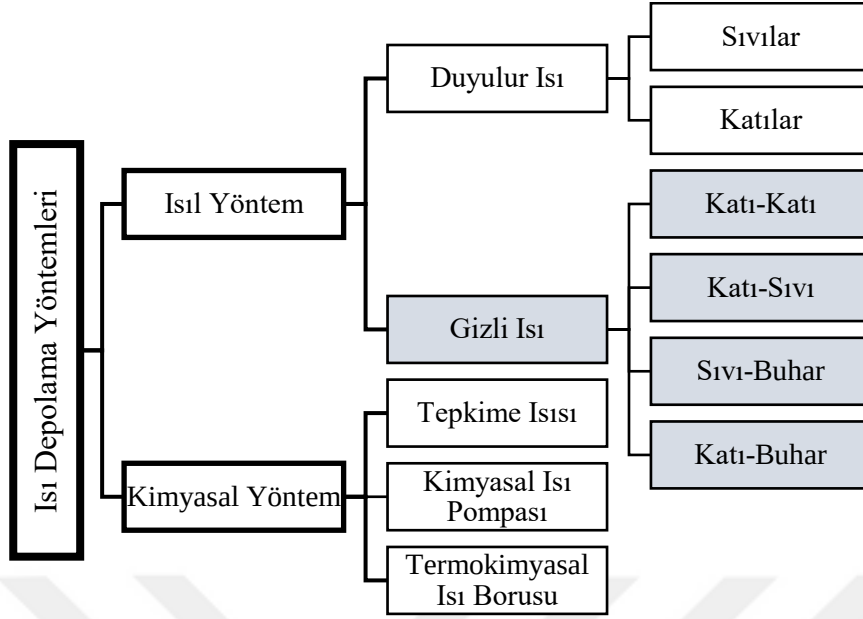
Enerji depolama teknolojisinin birçok avantajı olması ile beraber bazı dezavantajları da görülmektedir. Enerji depolama, şarj-deşarj süreçleri, güç yoğunluğu, maliyet, enerji yoğunluğu, cevap süresi ve kullanım ömrü gibi farklı faktörler sebebiyle bazı zorluklarla karşılaşmaktadır (Leblebicioğlu, 2020). Bu çalışmanın amacı, termal enerji depolama sistemlerinden biri olan gizli ısı depolama tekniklerinde performans iyileştirmesini analiz etmektir.

2.1. Termal Enerji ve Termal Enerji Depolama Yöntemleri

Termal (ısı) enerji, bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin potansiyel ve kinetik enerjilerinin toplamını ifade eder. Bu enerji, maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin titreşim hareketleri sonucu ortaya çıkar ve bu enerji, sistem ile ortam arasındaki sıcaklık farkı nedeniyle ısı akışı yoluyla aktarılır (Dikici, 2004; Alay, 2010). Başka bir ifadeyle, sıcaklık farklarının oluşması sonucu gerçekleşen ısı geçişi ile bu enerji aktarılmaktadır. Düşük ya da yüksek ısı enerjisinin ihtiyaç duyulduğu vakitte kullanılması amacıyla herhangi bir sistemden kontrol dışında açığa çıkan ya da sistemde kullanılmadan kalan enerjinin değişik metotlarla belli bir süreyle depo edilmesine termal enerji depolama (TED) denir. Enerjiye duyulan ihtiyaç ve tüketim arasındaki uyumsuzluk, tasarruflu enerji tüketimini sağlayan termal enerji depolamasına olan ilgi ve ihtiyacı arttırmıştır. Bu da son yıllarda ısıtma, soğutma ve atık ısı kullanımını temel alan uygulamaları arttırarak enerji ihtiyacı ve tüketimi arasındaki uyumsuzluğu çözüp enerjinin tasarruflu kullanımını sağlamıştır. Termal enerji depolamada asıl amaç artan enerjinin depolanmasıyla enerjinin üretilmesi ve tüketilmesi arasındaki süre uyumsuzluğunun yok edilmesidir. Termal enerji depolama ile var olan ortamdaki ısı, sonraki süreçte kullanılmak üzere depolanabilmektedir (Ülker, 2021).

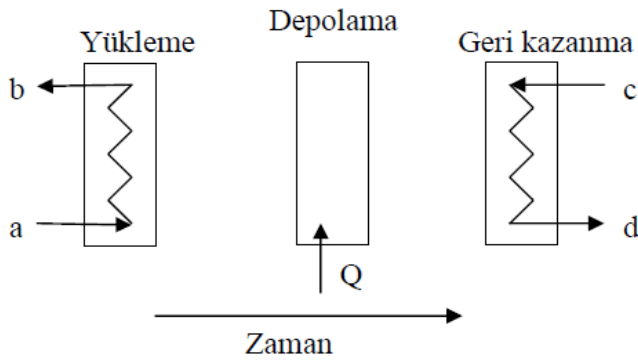
Isıl enerjiyi depolamak için temel olarak üç farklı yöntem bulunmaktadır (Şekil 2.2): duyulur ısı depolama, gizli ısı depolama ve termokimyasal ısı depolama. Bu yöntemler, birim hacimde depolayabildikleri enerji miktarına göre birbirlerinden ayrılmaktadır (Lane, 1983).

- 1) Duyulur ısı depolama yöntemi
- 2) Gizli ısı depolama yöntemi
- 3) Termokimyasal ısı depolama yöntemi



Şekil 2.2. Isı depolamasında uygulanan yöntemler (Abhat, 1983)

TED (Termal Enerji Depolama) sistemlerinin temel prensibi, enerji sağlanması, bu enerjinin depo edilmesi ve gerektiğinde depolanan enerjinin kullanılmasını içeren bir süreçten oluşmaktadır. Bu süreç, genellikle yükleme, depolama ve geri kazanma aşamalarından oluşmaktadır (Şekil 2.3) (Dinçer ve Rosen, 2002).



Şekil 2.3. Termal (ısı) enerji depolama sisteminin genel bileşenleri (Mazman, 2006)

TED sistemlerinin sağladığı avantajlar, enerji üretim kapasitesinin artırılması ve enerji verimliliğinin iyileştirilmesi gibi önemli katkıları içermektedir. Bu sistemler, aynı zamanda enerji şebekelerine destek olarak daha verimli bir enerji kullanımını mümkün kılar. Özellikle, kojenerasyon santrallerinin etkinliğini artırarak, bu santrallerin daha verimli çalışmasına olanak tanır. Ayrıca, elektrik fiyatlarının düşük olduğu dönemlerde enerji alımını sağlamak, maliyetlerin düşürülmesine katkı sunar. TED sistemleri, aynı zamanda

enerji sistemlerinin güvenilirliğini artırarak kesintisiz bir enerji teminini mümkün kılar. Mevcut sistemlere entegre edilebilir olmaları, sistemden atılan ısıнын kullanılmasını sağlar ve bu da enerji kayıplarını azaltır. Son olarak, bu sistemler, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılmasına katkıda bulunarak, sürdürülebilir enerji üretiminin teşvik edilmesine olanak tanır (Mazman, 2006).

2.1.1. Termokimyasal ısı depolama

Gerçekleşen kimyasal bir tepkime esnasında depo edilen veya verilen ısı enerjisinin ihtiyaç duyulan anlarda kullanılmak üzere depo edildiği yöntemdir. Termokimyasal ısı depolama, kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla ısı enerjisinin depolanmasını ifade eder. Bu yöntem, bir bağın oluşumu için gerekli enerjinin ortamdan alınarak reaksiyonun endotermik olmasını sağlayan veya mevcut bir kimyasal bağın ayrılması sırasında salınan enerjinin ortama verilmesini içeren ekzotermik reaksiyonlarla gerçekleşir. Termokimyasal ısı depolaması, endotermik bir reaksiyonun ısıyı alıp, ekzotermik reaksiyonlar aracılığıyla geri vermesini sağlar. Bu sayede, kimyasal değişimlerin bir sonucu olarak ısı enerjisi depolanabilir ve gerektiğinde tekrar kullanılabilir (Acar, 2014). Depolanan ısı miktarı aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$Q = a_r \cdot m \cdot \Delta H_r \quad (1)$$

a_r : Tepkiyen madde kesri

m : Maddenin kütlesi

ΔH_r : Birim kütlenin reaksiyon ısısı

Termokimyasal ısı depolama temelde endotermik/egzotermik bir reaksiyona dayanır ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Li ve Chan, 2017):



İstenildiği anda, reaksiyon yönü ters çevrilerek (böylece egzotermik bir reaksiyon elde edilir) ısı salınımı yoluyla enerji gereksinimi karşılanabilir (Li ve Chan, 2017). Termokimyasal ısı depolama sistemleri tasarlanırken, tepkimenin meydana gelme hızına ve

kontrolüne dikkat edilir. Tepkimenin bir katalizöre ihtiyaç duyup duymadığı da önemlidir. Bu sitemlerin maliyetinin belirlenmesinde ise uygulanacak olan teknolojiler ve tepkime sonucunda ayrışarak meydana gelen ürünlerin depo edilmesi önemli iki etkindir (Öztürk, 2008).

2.1.2. Duyulur ısı depolama

Duyulur ısı, bir maddenin sıcaklık değışimiyle ilişkili olarak ortaya çıkan ve enerji taşıyan ısıdır. Bu ısı, maddenin sıcaklık seviyesinde meydana gelen artış veya azalışa bağı olarak depolanır ve serbest bırakılır. Bu tür enerji depolama, maddenin sıcaklık değışimiyle doğrudan ilişkilidir ve faz değışimi gerçekleştirmeden sadece sıcaklık artışı veya azalması yoluyla gerçekleşir (Mazman, 2006). Duyulur ısı depolama sistemleri, kullanılan ortamın türüne göre farklı kategorilerde sınıflandırılabilir. Bunlar, sıvı ortamda depolama, katı ortamda depolama ve her iki ortamın bir kombinasyonu olan hibrid depolama sistemlerini içerir (Yılmazoğlu, 2010).

Bu yöntem, enerji depolama işleminin, maddenin sıcaklığını artırarak gerçekleştirilmesi esasına dayanır. Hem depolama hem de geri kazanım süreçleri, tersinir olarak gerçekleşir, dolayısıyla kullanılan materyalin özelliklerinde bir değışim meydana gelmez ve bu da sistemin uzun ömürlü olmasını sağlar. Ancak, bu süreçlerde enerji depolanırken ve geri alınırken, ısı kaybı yaşanabilir. Bu nedenle, ısı kayıplarını engellemek ve verimliliği artırmak amacıyla uygun bir izolasyon uygulaması gerekebilir. Depolama süresince, sistemin sıcaklığı artarken, geri kazanım sırasında sıcaklık düşüşü yaşanır. Bu durum, gizli ısı depolama yöntemlerine kıyasla daha düzensiz bir ısı akış dağılımı yaratır ve bu da kararsız bir ısı transferine yol açabilir (Acar, 2014).

Bu sistemin en önemli avantajlarından biri, birden fazla depolama ve geri kazanım çevriminin gerçekleştirilebilmesi ve hem sıcak hem de soğuk depolama işlemlerinin yapılabilmesidir (Paksoy, Mazman, Turgut ve Konuklu, 2002). Bununla birlikte, sistemin dezavantajı, gereksinim duyulan depo hacminin büyük olmasıdır. Bu, sistemin verimliliğini etkileyebilir ve uygulama alanında sınırlamalar oluşturabilir. Depolanan ısı miktarı aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$Q=m.C_p.(T_2-T_1) \quad (2)$$

Q = Depolanan toplam ısı (J)

T_1 = İlk sıcaklık (°C)

T_2 = Son sıcaklık(°C)

m = Kütle(g)

C_p = Özgül ısı (j/g-°C)

Duyulur ısının depolandığı uygulamalarda oluşabilecek bazı problemler şunlardır:

-Termal enerji depolama işlemi boyunca depolama sıcaklığı devamlı arttığından dolayı ısı kayıplarında artış olmaktadır. Bu da ısı deposunda yalıtımı gerektirdiğinden dolayı sistemin maliyetini arttırmaktadır.

-Isının geri kazanımı esnasında depolama sıcaklığı devamlı azaldığından dolayı ısı dağılımı gizli ısıya nazaran daha kararsız olur ve bunun yanında sistemin ısıl etkinliğinde de azalma meydana gelir (Dinçer ve Dost, 1996).

Bu problemleri elimine edebilmek için duyulur ısı depolama sistemlerinde ısı kapasitesi yüksek materyallerin kullanılması önerilmektedir. Ancak, bu materyallerin seçiminde dikkate alınması gereken bazı önemli kriterler vardır. Öncelikle, seçilen maddelerin yanıcı veya alevlenebilir olmaması gerekmektedir. Ayrıca, sistemin tersinir bir şekilde çalışması göz önünde bulundurularak, seçilen materyalin uzun ömürlü olması da önemlidir. Bunun yanı sıra, bu maddelerin zehirli ya da korozyif özellik taşıyamaları gerektiği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kriterlere uygunluk, ekonomik açıdan avantaj sağlaması ve temin edilme kolaylığı nedeniyle su ve çakıl taşı gibi maddeler, bu tür enerji depolama sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Dinçer,2002; Kılış ve Kakaç, 1989; Yang, 1989).

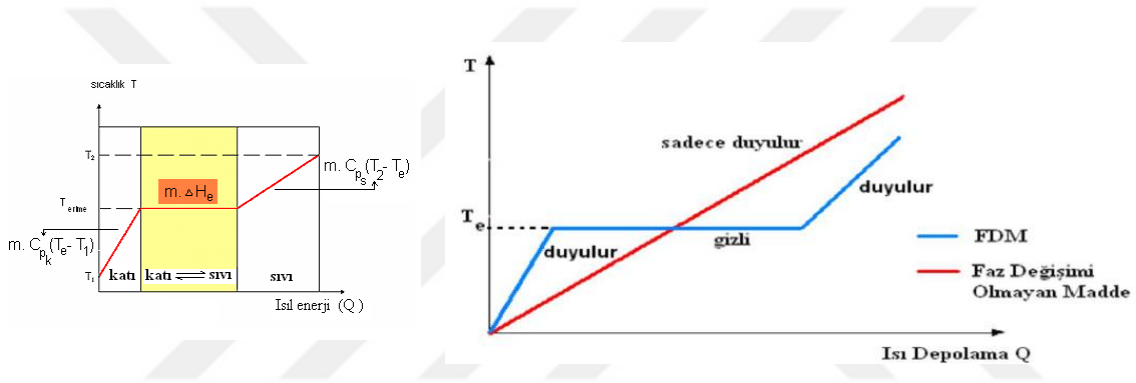
2.1.3. Gizli ısı depolama

Maddenin iç enerjisindeki önemli değişiklikler, maddenin faz değiştirmesine yol açar. Faz değişimi sırasında, madde çevresinden ısı alabilir veya çevresine ısı verebilir. Bu ısıya gizli ısı denir. Gizli ısı, faz değişimi sürecinde maddeye eklenen veya maddeden çıkarılan enerjiyi ifade eder, ancak bu enerji sıcaklık değişimine yol açmaz. Termal enerjiyi gizli ısı olarak depolamak için faz değiştirici maddeler (FDM) kullanılır. Bu maddeler, belirli sıcaklık aralıklarında faz değişimi yoluyla enerjiyi depolama kapasitesine sahip olup, termal enerjiyi gizli ısı olarak muhafaza edebilirler. Bu özellik, FDM'lerin enerji depolama sistemlerinde kullanımlarını özellikle verimli kılmaktadır (Konuklu, 2008). Gizli ısıнын temelinde faz değişimi yattığından dolayı moleküller arasındaki çekime bağlı olarak değişen bir kavram olmaktadır. Dolayısıyla bu faz değişimi anında düzensizliğin arttığı erime, kaynama durumlarında sistemden enerji alınırken katılaşma, düzensizliğin azaldığı yoğunlaşma durumunda ise ısı verir. Erime veya katılaşma işlemleri sabit bir sıcaklıkta meydana geldiğinden dolayı dar bir sıcaklık aralığı ve yüksek termal enerji depolama yoğunluğu sağlamaktadır (Şahan, 2011).

Bir madde faz değişimi sırasında katı-katı, katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar gibi farklı formlar arasında geçiş yapabilir (Konuklu, 2004). Katı haldeki bir madde, kristalleşerek başka bir katı faza dönüştüğünde (katı-katı faz değişimi), bu süreçte depolanan ısı, kristalleşme enerjisi olarak adlandırılır. Bu madde tekrar ilk katı fazına dönüştüğünde depolanan ısı geri kazanılır. Ancak katı-katı faz değişiminde açığa çıkan gizli ısı miktarı diğer faz değişimlerine göre oldukça düşüktür. Katı-buhar veya sıvı-buhar faz değişimlerinde ise daha fazla gizli ısı açığa çıkar. Bununla birlikte, buhar fazını muhafaza etmek için basınçlı depolama kaplarına ihtiyaç duyulması, katı-buhar ya da sıvı-buhar faz değişimi sırasında ortaya çıkan gizli ısıнын depolanmasını sınırlayan en büyük zorluklardan biridir. Ayrıca, bu faz değişimlerinde büyük hacim değişimleri gözlemlenir, bu da depolama sistemlerinin tasarımını karmaşık hale getirir ve uygulama zorluklarına yol açar (Lane, 1980; Sarıkaya, 2000).

Uygulamalarda, genellikle katı-sıvı faz değişiminden yararlanılır. Katı-sıvı faz değişimi, diğer faz değişimlerine göre daha düşük hacim değişimi ile gerçekleşir. Bu maddeler, sınırlı bir sıcaklık aralığında büyük hacim değişiklikleri olmadan enerji depolama yeteneğine sahiptirler (Öztürk, 1997).

Sonuçta gizli ısı depolamada duyulur ısı depolamanın aksine, ısı verildikçe maddenin sıcaklığı değişmezken; madde faz değiştirir. Madde faz değiştirirken yapısında büyük miktarda ısı depolar, bu ısıya faz “değişim ısısı” adı verilir (Cardenas ve Leon, 2013). Erime ve katılaşma işlemi sabit sıcaklıkta gerçekleşir. Erime sırasında ısı enerjisi malzemeye transfer edilirken, malzeme sıcaklığını Şekil 2.4’te verilen grafikteki gibi erime sıcaklığında korur. Malzeme katılaşırken ise ısı enerjisi açığa çıkar. Bu sıcaklığa faz değişimi sıcaklığı denir. Erime tamamlandıktan sonra, ısı transfer edilmeye devam edilirse sıcaklık artar dolayısıyla duyulur ısı olarak depolanır. Erime ısısının depolanması sıcaklık sensörüyle tespit edilemez. Çünkü erimede sıcaklık artmaz. Erime sırasında artan ısıya bu yüzden gizli ısı denir. Bu prosese ise gizli ısı depolama denir (Maral, 2024).



Şekil 2.4. Gizli ısı olarak ısı enerjisi depolama (Mehling ve Cabeza, 2008)

Gizli ısı ile depo edilen enerji, depolama materyalinin miktarına, ortamın özgül ısısına ve sıcaklık değişimine bağlıdır (Sharma, Tyagi, Chen, ve Buddhi, 2009). FDM içeren bir gizli ısı depolama sisteminin gizli ısı depolama kapasitesi:

$$Q = \int_{T_i}^{T_e} m C_p dT + m H_e + \int_{T_e}^{T_s} m C_s dT = m[H_e + C_k(T_e - T_i) + C_s(T_s - T_e)] \quad (3)$$

Denklemleri kullanılarak hesaplanır. Bu denklem birinci ve üçüncü terim duyulur ısıyı ikinci terim ise gizli ısıyı ifade eder. Yukarıdaki formüllerde; T_i (K) başlangıç sıcaklığı, T_e (K) erime sıcaklığını, T_s (K) son sıcaklığı, C_p (kJ/kgK) maddenin katı fazının sabit basınçtaki özgül ısısını, C_s (kJ/kgK) maddenin sıvı fazının sabit basınçtaki özgül ısısını, C_k (kJ/kgK) katı fazın sabit basınçtaki özgül ısısını ve H_e (kJ/kg) erime gizli ısısını temsil etmektedir (Mazman, 2006).

Gizli ısı depolama yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilir (Taşkıran, 2013):

- Gizli ısı depolama, diğer enerji depolama yöntemlerine kıyasla daha yüksek termal enerji depolama kapasitesine sahiptir. Bunun nedeni, kullanılan faz değişim malzemelerinin (FDM) birim kütle başına daha yüksek enerji depolama kapasitelerine sahip olmasıdır.
- Gizli ısı depolama yöntemi, diğer depolama yöntemlerine göre daha az depolama hacmi gerektirir.
- FDM'lerin faz değişim sıcaklıkları sabit sıcaklıkta depo etme ve geri kazanma için uygun aralıktadır. Yani enerji depolama süreci izotermiktir.
- Gizli ısı depolama sistemlerinde depolanan enerjinin geri verilmesinde küçük sıcaklık değişimleri meydana gelmektedir
- Bu yöntem, sabit sıcaklıkta ısı gereksinimi duyan maddeler için elverişlidir (Taşkıran, 2013).

Gizli ısı depolaması şu durumlarda uygulanmaktadır:

- Kısa vadeli depolamada
- Yüksek enerji kapasitesi veya yüksek enerji yoğunluğu ihtiyacında
- Depo hacminin küçük olması gerektiği uygulamalarda
- Enerji depolamak için sabit veya düşük bir sıcaklık aralığının olduğu durumlarda (Abhat, 1983).

2.2. Faz Değiştiren Maddeler

Faz değiştiren maddeler (FDM'ler), belirli bir sıcaklık aralığında faz değiştiren ve bu süreçte gizli ısı depolama kapasitesine sahip maddelerdir. FDM'ler, ortam sıcaklığı arttıkça katıdan sıvıya geçer ve endotermik olan faz değişim süreci ortamdan ısı enerjisini emerek depolar. Faz değişim sıcaklığına ulaşıldığında, depolanan ısı, maddenin erimesine yol açar. Bu süreç boyunca sabit kalan sıcaklıkta ısı enerjisi gizli ısı olarak depolar.

Günümüzde, 0-100 °C sıcaklık aralığında katı-sıvı faz değişimi ile gizli ısı depolama işlemleri için birçok organik ve inorganik FDM kullanılmaktadır (Mondal, 2008; Karaipekli, 2006; Farid, Khudhair, Razack ve Hallaj, 2004).

2.2.1. Faz değiştiren malzemelerin sınıflandırılması

Faz değişim sıcaklıkları ve bu süreçte depoladıkları gizli ısı açısından birçok organik, inorganik madde ve bunların ötektik karışımları, faz değişim malzemeleri (FDM'ler) sınıfına girmektedir. Bu maddeler, belirli sıcaklık seviyelerinde faz değiştirerek enerji depolayabilen özel maddelerdir. Ancak, bu FDM'lerin çoğunun faz değişim sıcaklıkları ve depolama ortamındaki bazı fiziksel özellikleri, ideal enerji depolama için gereken kriterlere her zaman tam olarak uymaz. Bazı FDM'ler istenen enerji depolama kapasitesine sahip olmayabilir veya çevresel koşullarla uyumlu çalışmayabilir. Bu durum, sistemin verimliliğini olumsuz etkileyebilir ve daha verimli bir enerji depolama çözümü için bazı iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır (Acar, 2014).

FDM'lerin bu zayıf yönlerini düzeltmek, ideal bir termal enerji depolama sistemi tasarlamak için mümkündür. FDM'lerin performansını artırmak ve verimliliklerini yükseltmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri, FDM'lerin ısı iletkenliğini arttırmaktır. FDM'lerin ısı iletkenliği düşük olduğunda, enerji transferi verimli bir şekilde gerçekleşmez. Bu sorunu çözmek için, FDM'lere ısıyı daha hızlı iletebilen metalik malzemeler gibi katkılar eklenebilir. Bu tür katkılar, faz değişim sırasında enerji aktarımını hızlandırarak sistemin genel verimliliğini artırabilir. FDM'lerde karşılaşılan bir diğer önemli problem ise aşırı soğumadır (supercooling). Bu durum, sıvıdan katıya geçişin engellenmesi olarak tanımlanabilir ve enerji depolama sürecinin düzgün işlemesine engel olabilir. Aşırı soğuma sorununu çözmek için, çekirdekleştirici maddeler eklemek etkili bir yöntemdir. Bu maddeler, faz değişimi sırasında sıvının katıya dönüşmesini başlatmak için gerekli çekirdekleri oluşturur, böylece aşırı soğumanın önüne geçilir. Düzensiz faz değişimi de başka bir önemli sorundur. Özellikle düzensiz erime, enerji depolama ve geri kazanım süreçlerinde verimsizliğe yol açabilir. Bu tür olumsuzlukları engellemek amacıyla, uygun kıvamda FDM'ler veya FDM karışımları kullanılabilir. Bu malzemeler, faz değişimi sırasında daha tutarlı bir davranış sergiler ve erime sürecini daha düzgün hale getirir. Sonuç olarak, FDM'lerin ısı iletkenliğini artırmak, aşırı soğumayı engellemek ve düzensiz faz değişimini önlemek için yapılan iyileştirmeler, termal enerji depolama sistemlerinin

etkinliğini artırır. Bu tür geliştirmeler, daha verimli ve sürdürülebilir enerji depolama çözümlerinin elde edilmesini sağlar. FDM'lerin özelliklerinin iyileştirilmesi, enerji tasarrufu sağlayan daha verimli sistemlerin tasarımına olanak tanımaktadır (Acar, 2014).

Faz Değişim Malzemeleri (FDM'ler), organik ve inorganik bileşiklerden veya bunların ötektik karışımlarından oluşan materyaller olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.5). Organik FDM'ler kullanılarak gerçekleştirilen termal enerji depolama uygulamalarında, bu malzemelerin düşük yoğunluklu yapıları nedeniyle büyük hacim değişiklikleri gözlemlenmektedir. Bu da, sistemin daha fazla depolama hacmi gerektirmesine yol açmaktadır. Organik FDM'lerin diğer bir dezavantajı ise, genellikle yanıcı olmaları ve düşük ısı iletkenliklere sahip olmalarıdır. Bununla birlikte, organik FDM'lerin bazı üstün özellikleri de bulunmaktadır. Bu özellikler arasında, kongruent (düzenli) ergime, aşırı soğuma olmadan donabilme ve kendiliğinden kristalleşme gibi avantajlar yer almaktadır. Bu özellikler, organik FDM'lerin diğer malzemelere göre daha avantajlı olmasını sağlayabilir. Çünkü bu özellikler, faz değişim sürecinde dengeyi sağlama ve verimli enerji depolama açısından olumlu etkiler yaratır (Feldman, Shapiro, ve Banu, 1986; Xiao, Feng ve Gong, 2002; Bugaje, 1997).

Çizelge 2.1. Faz değiştiren maddelerin gruplandırması

FAZ DEĞİŞTİREN MADDELER	Organik Bileşikler	Parafinler	
		Parafin Olmayanlar	Yağ Asitleri Diğerleri
	İnorganik Bileşikler	Tuz Hidratlar	Kalarit Hidratlar Yarı Kalarit Hidratlar
		Diğer İnorganikler	
		Ötektik Karışımlar	

Parafinler ve yağ asitleri, organik faz değişim malzemeleri (FDM) kategorisinde yer alırken, inorganik FDM sınıfı, tuzlar ve klatrat hidratları gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Organik FDM'ler, birçok avantaj sunmakla birlikte, özellikle kararlılıkları, toksik olmayan yapıları, koroziif etkilerinin bulunmaması, düşük buhar basıncı özellikleri ve aşırı soğuma eğilimi göstermemeleri gibi nitelikleriyle dikkat çekerler. Ancak, bu malzemelerin bazı zayıf yönleri de mevcuttur. Düşük ısı iletkenlikleri, yanıcılıkları ve faz değişimi sırasında meydana gelen

büyük hacim değişiklikleri, organik FDM'lerin enerji depolama verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle, organik FDM'lerin performansını optimize etmek amacıyla belirli iyileştirmelere ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer taraftan inorganik faz değişim malzemeleri (FDM), genellikle yüksek termal iletkenlik, yüksek ergime ısısı, yanıcı olmamaları ve ekonomik açıdan daha uygun olmaları gibi avantajlar sunmaktadır. Ancak, bu malzemeler bazı dezavantajlar da taşımaktadır. Aşırı soğuma eğilimi, korozif özellikler ve düşük faz dönüşüm sayısı gibi olumsuz özellikler, inorganik FDM'lerin verimli enerji depolama sistemlerinde kullanılmasını sınırlandıran faktörler arasında yer almaktadır. Bu nedenle, inorganik FDM'lerin uygulamalı kullanımı sırasında bu olumsuz özelliklerin yönetilmesi gerekmektedir.

FDM'ler, sistemlerde ısı enerjisi gereksinimi bulunmadığı durumlarda ısı depolama işlemi gerçekleştirirken, ısı ihtiyacı doğduğunda depolanan enerjiyi serbest bırakarak sisteme ısı verebilirler. FDM'lerin kapsüllemesi, kullanıldıkları sistemlere birçok avantaj sağlar. Kapsülleme, makro, mikro veya nano kapsülleme yöntemleriyle yapılabilir, bu da kullanılan sisteme göre seçilen kapsülleme tipinin farklı olabileceği anlamına gelir. FDM'lerin kapsüllemesi, çevrim sayısını artırarak daha verimli bir enerji depolama ve aktarma sağlar (Cruey, King ve Tingleff, 2006). FDM seçimi yaparken, seçilen malzemenin tasarlanan sisteme uygun olması önemlidir. FDM'lerin ısı depolama kapasitesi, faz değiştirme süreleri ve ısı transfer katsayıları, tasarlanan sistemin gereksinimlerine uygun olmalıdır (Kaplukan, 2014). Aşağıda Çizelge 2.2'de FDM türüne örnek maddeler ve özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 2.2. FDM türlerine örnek maddeler ve özellikleri (Kayabaşı ve Kaya, 2020)

FDM	Moleküler Formül	Erime Noktası(°C)	Erime Isısı(kj/kg)
Parafin	MERWAX B4-F	44-46	155
Oktadekan	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{CH}_3$	24,4	244
Tuz Hidratı	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	171
Trimetilolitan Tetrahidrat	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	29,8	185
Kalsiyum Klorür Hekzahidrat	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29,7	171

Bu kapsamda FDM'leri genel olarak parafinler, yağ asitleri, inorganik tuz hidratlar ve bunların ötektik karışımları şeklinde ele alabiliriz.

2.2.1.1. Parafinler

Organik FDM grubuna giren parafinler genelde petrol türevlerinden meydana gelirler ve çok sayıda alkanın meydana getirdiği doymuş hidrokarbonlardan oluşan karışımlardır. Erime ısıları ve erime noktaları molekül ağırlıklarıyla beraber arttığından dolayı karbon oranlarına bağlı olarak %14-40 aralığındaki alkanların erime noktaları 6-80 °C aralığında olup bu alkanlar parafin olarak adlandırılırlar (Beyhan, 2010). Genel olarak kimyasal formülü C_nH_{2n+2} ile ifade edilen parafinler birbirine çok benzer özelliklere sahiptir ve parafin mumlardaki alkan içeriği %75 ile %100 arasında değişmektedir.

Parafinlerin dikkat çeken bir özelliği, karbon zincirlerinin sayısındaki artışla birlikte erime noktaları ve erime sırasında depoladıkları gizli ısı miktarının artmasıdır. Ayrıca, arıtma süreçlerinden sonra, parafinler kokusuz, tatsız ve toksik olmayan maddelere dönüşürler. Parafinler genellikle düz zincirli (n-alkan) ve dallanmış zincirli (izo-alkan) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılabilir. Özellikle düz zincirli alkan karışımları, faz değişimi sırasında yüksek miktarda gizli ısı depolama ve salma kapasitesine sahip olmaktadır. İyi bir termal enerji depolama sistemi için geniş bir erime sıcaklık aralığına ve yüksek ısı depolama kapasitesine sahip parafinler, bu tür sistemlerde yaygın olarak tercih edilmektedir (Abhat, 1983). Resim 2.1'de parafin örnekleri yer almaktadır.



Resim 2.1. Parafin örnekleri

Parafinlerin faz değişim malzemesi (FDM) olarak kullanılmasının, gizli ısı depolama sistemlerinde sağladığı avantajlar şunlardır:

- ✓ Düzenli erime özellikleri sayesinde faz ayrımı yapmazlar,
- ✓ Faz değişimlerinin hızlı bir şekilde gerçekleşmesi sağlanır,
- ✓ Düşük yoğunlukları sayesinde erime esnasında meydana gelen hacim değişiklikleri minimaldir,
- ✓ Aşırı soğuma davranışı sergilemedikleri için ısı enerji depolama sistemlerine çekirdekleştirici madde eklenmesine gerek duymazlar,
- ✓ Toksik ve korozyon etki göstermezler,
- ✓ Kimyasal olarak son derece stabildirler,
- ✓ Dışarıdan herhangi bir etkiye ihtiyaç duymadan kendi kendilerine kristalleşebilirler,
- ✓ Buhar basınçları düşük seviyelerde kalır,
- ✓ Yüksek erime ısılarına sahiptirler,
- ✓ Geniş bir erime sıcaklık aralığına sahip olmaları, çeşitli uygulamalar için esneklik sağlar,
- ✓ Kolay temin edilebilir olmaları ve düşük maliyetleri, ekonomik açıdan avantaj sunar (Feldman vd., 1986; Xiao vd., 2002; Sarı, 2003; Bugaje, 1997; Gök ve diğerleri., 2008).

Bütün bunlara rağmen termal enerji depolama sistemlerinde parafinlerin kullanımlarında en temel problemler parafinlerin düşük ısı iletkenliği, sabit bir erime sıcaklığına sahip olmamaları ve yanıcı olmaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorunların özellikle ısı iletkenliğinin artırılması konusunda çeşitli çözüm önerileri geliştirilmiştir (Yılmaz, 2008; Xiao vd., 2002; Sarı, 2003; Gök ve diğerleri, 2008; Yılmaz, 2005). Bu çözüm yollarından biri, parafinlerin yüksek yoğunluklu polimerik ağ yapılı malzemelerle birleşerek, grafit gibi iletken maddelerle birlikte gözenekli yapılar içinde tutulmasıdır. Bu yöntem, parafinlerin ısı iletkenliğini iyileştirmeyi hedefler ve termal enerji depolama sistemlerinde daha verimli bir performans sağlamaktadır (Xiao vd., 2002; Sarı, 2003).

2.2.1.2. Yağ asitleri

Yağ asitleri, parafinlerle birçok benzer özelliği paylaşan organik yapılı faz değiştirici malzemelerdir. Kimyasal formülleri $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ şeklinde ifade edilen bu bileşikler, bitkisel ve hayvansal kaynaklardan elde edilir. Zincirlerinde 4 ila 24 arasında değişen sayıda

karbon atomu bulunur. Bu özellikleri sayesinde yağ asitleri, termal enerji depolama sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılabilir ve yüksek ısı depolama kapasitesi, geniş erime sıcaklık aralığı gibi avantajlar sunar. Bu nedenle, hem doğal kökenli olmaları hem de performansları açısından parafinlere alternatif olarak değerlendirilirler. Genellikle soğutma uygulamaları için tercih edilmekte ve çoğu oda sıcaklığı veya altındaki erime aralığına sahip olması sebebiyle düşük sıcaklıkta gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılmak için uygun özelliktedirler (Yılmaz, 2008). Bu asitlerin fiziksel halleri, hidrokarbon zincirlerinin uzunluğuna bağlı olarak değişir. Zincirlerinde düşük karbon sayısına sahip olan yağ asitleri, oda sıcaklığında sıvı halde bulunurken, karbon sayısı arttıkça viskoziteleri de artar. Bunun aksine, hidrokarbon zincirlerinde yüksek karbon sayısı bulunan yağ asitleri, genellikle oda sıcaklığında katı halde bulunurlar (Acar, 2014).

Sıvı halde bulunan yağ asitleri, su ile çözünme özellikleri sayesinde faz değiştiren madde olarak kullanıldığında, yüksek yüzey gerilimlerinden yararlanarak bir adsorban maddeye bağlanarak kullanılabilirler. Katı haldeki yağ asitleri ve yağ alkollerinin büyük çoğunluğu ise suyla çözünmediğinden, bu maddeler enerji depolamak için yapı malzemelerinde faz değiştirici malzeme olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir (Acar, 2014).



Resim 2.2. Yağ asidi bağlı polivinil alkol polimer

Yağ asitlerinin erime sıcaklıkları 30°C ile 70°C arasında değişirken, erime ısıları ise 153 kJ/kg ile 203 kJ/kg arasında farklılık göstermektedir. Yağ asitlerinden elde edilen yağ alkoller ve yağ asidi esterleri de termal enerji depolama sistemlerinde kullanıma uygundur (Mazman, 2006; Alay, 2010; Yılmaz, 2008; Karaipekli, 2006; Mondal, 2008).

Yağ asitlerinin düşük ısı iletkenlikleri ve yanıcı özellikleri bulunmasına rağmen, diğer faz değiştirici maddelere kıyasla bazı önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar arasında, erime süreçlerinde faz ayrımının gözlemlenmemesi, ısı enerji depolamak için uygun faz değişim sıcaklıklarına sahip olmaları, faz değişimi sırasında hacim değişikliklerinin minimal düzeyde gerçekleşmesi yer almaktadır. Ayrıca, yağ asitleri faz değişim dönüşümleri sonrasında termal ve kimyasal kararlılıklara sahip olup toksik etki göstermezler. Bu maddeler, herhangi bir çekirdekleştirici maddeye ihtiyaç duymadan kendi başlarına ekirdekleşebilme kapasitesine sahiptir. Diğer bir avantajları ise yüksek erime gizli ısıları ve erime ile katılaşma süreçlerinde sergiledikleri düzenli davranışlardır (Karaipekli, 2006).

2.2.1.3. İnorganik tuz hidratları

Faz değişim malzemesi (FDM) olarak yaygın olarak kullanılan tuz hidratları, inorganik bileşikler olup, $M.nH_2O$ genel formülüyle tanımlanır. Burada "M" harfi, inorganik tuzu simgeler. Tuz hidratları, katılaştıkları zaman kristal yapılarına inorganik tuz ve suyun birleşiminden oluşurlar. Bu malzemelerin FDM olarak önemli bir yer tutmasının başlıca nedeni, geniş bir sıcaklık aralığında kullanım imkanı sunmalarıdır. Tuz hidratları, 0°C ile 150°C arasındaki sıcaklıklar boyunca, düşük hacim değişiklikleriyle yüksek miktarda termal enerji depolama kapasitesine sahip olup, organik FDM'lerle kıyaslandığında daha yüksek ısı iletkenlik sergilerler (Kaygusuz, 2024).



Resim 2.3. Kalsiyum klorür hekzahidrat

İnorganik tuz hidratlarının avantajları ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

Avantajları:

- ✓ Yüksek erime ısisına sahip olmaları, bu malzemelerin termal enerji depolama kapasitesini artırır.
- ✓ Diğer faz değişim malzemelerine kıyasla daha yüksek termal iletkenlik sunarlar, bu da ısının daha verimli iletilmesini sağlar.
- ✓ Yanıcı özellikleri bulunmadığı için güvenli bir kullanım imkanı sunar.
- ✓ Faz değişimi sırasında küçük hacim değişiklikleri gözlemlenir, bu da depolama sistemlerinde daha stabil bir performans sağlar.

Dezavantajları:

- ✓ Korozi özellik gösterdikleri için bazı yapı malzemelerinde kullanımları sınırlı olabilir.
- ✓ Aşırı soğuma davranışı sergileyebilirler, bu da istenmeyen sonuçlara yol açabilir.
- ✓ Bazı tuz hidratları düzensiz erime davranışı gösterebilir, bu da faz değişim sürecinde dengesizliklere neden olabilir.
- ✓ Faz ayrımı gözlemlenebilir, bu da enerji depolama verimliliğini olumsuz yönde etkileyebilir.
- ✓ Hidrat sayısındaki değişim, malzemenin yapısal kararlılığını etkileyebilir ve verimliliği düşürebilir (Yılmaz, 2008; Abhat, 1983; Konuklu, 2004; Karaipekli, 2006; Akçay, 2006).

Kısacası maliyetlerinin düşük olması temin edilebilme kolaylığı sağlarken (Akçay, 2006); inorganik tuz hidratlarının yüksek termal iletkenlikleri, ısı transferini artırarak depolama kabının içindeki ve dışındaki ısı akışını iyileştirir. Ayrıca, erime gizli ısılarının yüksek olması, küçük hacimlerde daha fazla enerji depolanmasına olanak tanır, bu da ısı depolama sisteminin toplam hacminin daha küçük olmasını da sağlar. Hal değişimi sırasında diğer faz değişim malzemelerine kıyasla daha az hacim değişikliği gözlemlenmesi, depolama

sisteminin tasarımında esneklik ve kolaylık sağlar (Mazman, 2006; Yılmaz, 2008; Konuklu, 2004).

Tuz hidratların en temel dezavantajı ise diğer faz değişim malzemelerinden (FDM) farklı olarak, donma noktasında kristalleşmeye başlamamalarıdır. Bunun sonucunda, aşırı soğuma davranışı gözlemlenir, çünkü donma noktası dışında kristalleşmek için gizli ısıнын bir kısmını kullanmak zorunda kalırlar. Bu durum, depolanan termal enerjinin bir miktar azalmasına yol açar. Ancak, bu sorunun, ısı depolama sistemi içerisine uygun bir çekirdekleştirici madde eklenerek engellenebileceği düşünülmektedir. Bir diğer yaygın sorun ise faz ayrımıdır. Faz ayrımı sırasında, hidrat sayısı farklı olan tuz hidratları kaybolarak dehidrat oluşumu meydana gelir. Bu da, ısı depolama kapasitesinde azalmaya yol açar. Bu sorunu önlemek amacıyla tuz hidratına ya da ötektik karışımlarına jelleştiriciler ya da kalınlaştırıcılar eklenmesi önerilmektedir (Akçay, 2006; Mazman, 2006).

2.2.1.4. Ötektik karışımlar

Gerekli olan erime sıcaklığını elde edebilmek için iki ya da daha fazla FDM'nin karıştırılmasıyla oluşan karışımlardır. Bu karışım organik ve inorganik maddelerle elde edilebilir ve oluşturulan ötektik karışımlar tıpkı saf madde de olduğu gibi sabit bir erime ve donma noktası olup, hemen hemen her zaman faz ayrışması olmadan dönüşümü gerçekleştirir ve FDM'lerin faz değişim sıcaklığı aralığını arttırmaktadır (Alva, Fang, ve Lin, 2018; Konuklu, Ersoy, Ömür, Halime ve Toraman, 2017).

Saf bir madde, donma noktasının altına kadar soğutulduğunda, bu maddenin karışım oranı, erime sıcaklığı ve faz değişim entalpisi gibi fiziksel özellikleri sabit kalır. Bununla birlikte, bir bileşen birden fazla bileşenden oluştuğunda, faz değişim davranışı farklılıklar arz eder. Bir karışımın faz ayrımı olmadan hal değiştirebilmesi için, tüm bileşenlerin aynı anda ve aynı sıcaklıkta faz değiştiriyor olması gereklidir. Bu koşullar altında, karışımlar "ötektik karışımlar" olarak adlandırılır (Coşkun, Durmaz, ve Özkol, 2013; Mehling ve Cabeza, 2008). Ötektik karışımında yer alan bileşenler, ötektik noktada eşzamanlı olarak ve aynı sıcaklıkta hal değiştirirler; bu süreçte bileşenler birbirlerinden ayrılmazlar ve buna bağlı olarak karışımın termal özellikleri sabit kalır (Acar, 2014).

Ötektik karışım, kristallenme sırasında bileşen kristallerinin bir karışım oluşturduğu ve her bileşenin belirli bir erime noktasında düzenli bir şekilde eridiği veya katılaştığı karışımdır (Karaipekli, 2006; Lane, 1989; Bugaje, 1997). Bu tür karışımlar, saf maddeler gibi davranarak belirli bir sıcaklıkta sabit erime noktası etrafında hal değiştirirler. Çeşitli sıcaklıklarda termal enerji depolamak için uygun erime noktalarına sahip ötektik faz değişim madde karışımları, sıklıkla tercih edilmektedir. (Karaipekli, 2006; Tunçbilek, 2005).

Literatürde en çok yer alan FDM'ler bina yalıtımında geniş kullanım alanlarına sahip tuz hidratların ötektik karışımlarıdır (Abhat, 1983; Karaipekli, 2006; Tunçbilek, 2005; Zalba, Marín, Cabeza, ve Mehling, 2003). Yağ asitleri, düzenli erime özellikleri, kristallenmek için herhangi bir çekirdekleştiriciye ihtiyaç duymamaları, daha fazla gizli ısı depolama kapasiteleri ve faz değişimi sırasında ufak hacimsel değişiklikler göstermeleri nedeniyle, diğer faz değişim malzemelerine (FDM) göre önemli avantajlar sunar. Bu özellikler, termal enerji depolama sistemlerinin tasarımında önemli bir avantaj sağlar. Farklı sıcaklık aralıklarında termal enerji depolamak için, farklı yağ asitlerinin ötektik karışımlarının kullanımı yaygındır. Özellikle geniş bir sıcaklık aralığında hal değişimi geçiren yağ asitleri, ısıtma ve soğutma amacıyla enerji depolama sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Mazman, 2006; Lane, 1983b).

Bu tez çalışmasında N-eikosan FDM kullanılmıştır. N-eikosan ($C_{20}H_{42}$), organik bir parafin olup organik faz değişim malzemeleri sınıfına girmektedir. Özellikle lineer alkanlar (parafinler) grubunda yer alan N-eikosan, düşük süblimleşme ve buharlaşma eğilimleri, kimyasal kararlılığı ve yüksek gizli ısı kapasitesi nedeniyle tercih edilmiştir.

2.2.2. Faz değiştiren malzemelerin kullanılma potansiyeli olan alanlar

Yapılan araştırmalar, termal enerji depolama alanında kullanılabilecek yeni malzemelerin keşfi ve geliştirilmesine yönelik sürekli bir çaba olduğunu ortaya koymaktadır. Faz değiştiren maddelerin (FDM) kullanıldığı uygulamalar için yapılan çalışmalar, bu malzemelerin kullanım alanlarını genişletmeye yönelik çeşitli stratejiler üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Faz değişim malzemelerinin (FDM) kullanım alanları oldukça geniştir ve çeşitli sektörlerde termal enerji yönetimini iyileştirmek için çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Çizelge 2.3’de FDM’lerin ana kullanım potansiyeli olan alanlar belirtilmiştir.

Çizelge 2.3. FDM'lerin kullanım potansiyeli olan alanlar (Zalba, vd., 2003; Konuklu, 2008; Aydın, 2010; Oró, De Gracia, Castell, Farid, ve Cabeza, 2012)

- ✓ Soğutma sistemlerinde enerji tüketiminin düşürülmesi
- ✓ Güneş enerjisinin depo edilmesi
- ✓ Tıbbi alanda, kan, organ ve ilaç taşımacılığı
- ✓ Soğuk muhafaza gerektiren ürünlerin, örneğin ilaç ve gıda malzemelerinin serin tutulması
- ✓ İçten yanmalı, hybrid ve elektrik motorların soğutulması
- ✓ Isınma ve sıcak su ihtiyacı
- ✓ Kimyasal tepkimelerde ekzotermik tepki piklerinin etkilerinin düşürülmesi
- ✓ İnşaat dış yapı malzemelerinde ısıtma ve soğutma yüklerinin hafifletilmesi
- ✓ Yaşam alanlarında sıcaklık kontrolünün sağlanması
- ✓ Arabalarda termal konforun artırılması
- ✓ Elektrikli cihazların aşırı ısınmasının önlenmesi
- ✓ Uzay mekiği gibi özel termal uygulamalar
- ✓ Tekstil endüstrisinde sıcak ve soğuk iklim kıyafetlerinde kullanımı
- ✓ Elektronik cihazların ısınmasının engellenmesi

2.2.3. Faz değiştiren malzemelerin sahip olması gereken özellikler

Faz değiştiren maddelerin (FDM) seçimi ve kullanımı için bazı temel kriterler bulunmaktadır. İlk olarak, malzemenin sıcaklığı sabitken aldığı ısı miktarının yüksek olması gerekir. Bu, termal enerji depolama sistemlerinin verimli çalışabilmesi için önemlidir. Ayrıca, faz değiştirme sıcaklığının seçilen ortam için uygun olması, malzemenin kullanım

alanını belirleyen bir diğer önemli faktördür (Mehling ve Cabeza, 2008). Bununla birlikte, FDM'lerin belirli termodinamik, kinetik, kimyasal ve ekonomik özelliklere sahip olması gerekir.

Termodinamik özellikler, FDM'nin seçilmesinde en kritik unsurlardan biridir. Malzeme, istenilen sıcaklık aralığında faz değiştirebilmeli ve yüksek faz değişim gizli ısıya sahip olmalıdır. Ayrıca, ısı iletkenliği yüksek olmalı, düzenli bir faz değişim davranışı göstermeli ve öz ısı da yüksek olmalıdır. Öz kütleinin yüksek olması, malzemenin daha az hacim kaplamasına ve daha verimli termal depolama sağlanmasına olanak tanır. Termal iletkenlik katsayısının yüksek olması, ısı transferinin etkin olmasını sağlar. Bunun yanı sıra, hal değişimi sırasında hacim değişikliklerinin minimum olması ve katı ile sıvı arasındaki sıcaklık farkının az olması gerekir (Tyagi ve Buddhi, 2007; Sharma vd., 2009). Kinetik özellikler açısından, faz değiştiren maddeler hızlı çekirdekleşme ve kristal büyüme hızlarına sahip olmalıdır. Yüksek çekirdekleşme hızı, sıvı fazın aşırı soğumasını engeller, bu da maddeyi daha verimli hale getirir. Kristal büyüme hızının yüksek olması ise ısıya daha hızlı ve verimli bir şekilde geri kazanılmasını sağlar (Acar, 2014).

Kimyasal özellikler de faz değiştiren maddelerin performansı açısından önemlidir. Malzeme hem eriyip hem de donabilme yeteneğine sahip olmalıdır. Uzun kullanım ömrüne sahip olan bu maddeler, yaşam döngüsü boyunca kimyasal bileşiminde herhangi bir bozulma yaşamamalıdır. Çevreye duyarlı olması ve kimyasal olarak kararlı olması gereklidir (Tyagi ve Buddhi, 2007). Ayrıca, malzemenin çok sayıda faz değişim döngüsünden sonra bile kararlılığını koruması ve uzun ömürlü olması önemlidir. Korrozif, yanıcı, patlayıcı veya zehirleyici özellikler göstermemelidir (Acar, 2014). Ekonomik açıdan, FDM'lerin düşük maliyetli olması, geri dönüştürülebilir olmaları ve temin edilebilirliklerinin kolay olması gerekir (Kenisarin ve Mahkamov, 2007). Bu özellikler, malzemenin sürdürülebilir ve ekonomik açıdan verimli bir şekilde kullanılabilmesini sağlar. Faz değiştiren maddelerin bu dört ana kategorideki özellikleri, onların çeşitli termal enerji depolama sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için belirleyici rol oynar.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Enerji depolama enerjinin verimli ve etkin bir şekilde kullanımı için oldukça önemli bir husustur. Enerji depolama için günümüzde duyulur ve gizli ısı enerjisi depolama yöntemleri mevcut olup, faz değişim malzemeleri gizli ısı enerjisi depolamada tercih edilme potansiyeli yüksek olan malzemelerdendir. Bunun sebebi FDM'lerin enerji depolama yoğunluğu yüksek olan maddeler olmasıdır. Bu malzemeler, belirli bir sıcaklıkta eriyerek veya katılaşılarak faz değiştirmekte ve bu süreçte büyük miktarda ısıyı depolamakta veya serbest bırakabilmektedir. Literatürde fazlarına bağlı olarak ifade edilen FDM yapıları katı-katı, sıvı-katı ve sıvı-gaz şeklindedir. Araştırmacılar, katı-katı ve sıvı-gaz FDM'lerinin pratik uygulanabilirliğinin zor olduğunu ve verimliliklerinin düşük olduğunu göstermiştir (Seddegh, Wang, Henderson ve Xing, 2015; Hasnain, 1998). Bu nedenle, sıvı-katı FDM yönteminin farklı uygulama alanlarına uygulanabilirliği üzerine çalışmalar devam etmektedir.

FDM'lerin dezavantajlı yönü düşük ısıl iletkenlik değerine sahip olmalarıdır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Literatürde, FDM'in ısıl iletkenliğini artırmak için ısı transfer yüzeyini genişletme (kanatçık kullanımı), nanoparçacık ekleme ve metal köpük kullanımı gibi yöntemler uygulanmıştır. Isı transfer yüzey alanını genişletmek için kullanılan kanatçıklar üzerinde, boyut, geometri ve malzeme parametreleri dikkate alınarak çalışmalar yapılmış ve bu parametre değerlerine bağlı olarak farklı oranlarda ısı transferi artışı elde edilmiştir (Verma ve Rakshit, 2022; Fan, Zheng ve Sun, 2021; Weng, Ouyang, Yang, Chen, Zhang, ve Wang, 2020). FDM'e nanoparçacık eklenmesiyle ise nanoparçacıkların yüksek ısıl iletkenliği sayesinde FDM + nanoparçacık bileşiğinin ısıl iletkenliği artırılmaktadır. Ancak, belirli sayıda erime-katılaşma çevriminden sonra nanoparçacıkların homojen dağılımının bozulması ve sıvı içinde çökmeleri ile bir araya toplanmaları, bu yöntemin pratik uygulanabilirliği açısından bir engel oluşturmaktadır. Metal köpükler, geniş temas alanı, hafiflik ve gözeneklilikleri sayesinde iyi ısıl iletkenlik gibi bazı avantajlara sahiptir. Metal köpüğün ısı transfer performansı esas olarak yapısal parametrelerin (gözeneklilik, gözenek yoğunluğu, gözenek dağılımı, vb.), çalışma akışkanı özelliklerinin ve çalışma koşullarının etkileşiminden etkilenir. Araştırmacılar, teorik ve deneysel çalışmalar yoluyla metal köpükler tarafından faz değişimi ısı transferi performansını etkileyen faktörleri ortaya çıkarmaya amaçlamışlardır. Aynı zamanda, gömülü metal köpüğün doğal taşınımı engellemesi ve basınç düşüşünü artırması sorunlarını

ele almak için gradyan metal köpük, V-oluk yapısı, nano gözenek yüzeyi, metal köpüğün yüzey ıslanabilirliğini değiştirme, nano parçacıklar ve yüzey aktif maddeler ekleme gibi bazı iyileştirme yöntemleri de önerilmiştir (Shi, Du, Chen ve Lei, 2022). Metal köpük yapısının kapladığı hacim nedeniyle ısı depolama kapasitesini düşürmesi ve sistemi ağırlaştırması ısı performans ve maliyet açısından dezavantajlı yönler olarak ele alınabilir. Ayrıca, bu ısı transferini artırma yöntemleri, birbirlerinin dezavantajlarını gidermek amacıyla birleştirilerek de kullanılmıştır (Sarani, Payan, Payan, ve Nada, 2020; Mahdi ve Nsofor, 2017). Metal köpük yapısına nanopartikül ilavesi ve metal köpükle kanatçık birleşimi bu hibrit yöntemlere örnek verilebilir.

Kanatçık kullanımının diğer yöntemlere göre daha yaygın olması ekonomik ve uygulama kolaylığı gibi sebeplere dayanmaktadır. Kanatçıkların pozisyonu ve boyutlarının FDM'lerin erime ve katılma performansına etkilerini inceleyen çalışmalar günümüzde mevcuttur. Wang ve diğerleri (2016) FDM ile çift borulu bir enerji depolama sisteminde farklı kanat dağılımı ve uzunluklarının erime performansına etkilerini incelemişlerdir (Wang, Yao, Lan, Peng, Huang ve Ding, 2016). Çalışma ile kanat dağılımının erimiş FDM'deki doğal konveksiyon akışını ve şarj süresini etkilediğini ortaya koymuşlardır. Deng, Nie, Wei ve Ye (2019) ve Kazemi, Hosseini, Ranjbar ve Bahrampoury'nin (2018) yaptıkları çalışmada da benzer şekilde iki ve üç kanat kullanımı için kanat pozisyonlarının erime performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Khan ve Khan'ın (2020) çalışmasında ise kanat pozisyonları boru yüzeyinde sabit kalmış, ancak borunun kendi eksenini etrafında döndürülüp konumlandırılması ile farklı şarj süreleri elde edilmiştir. Bu çalışmalara benzer şekilde farklı geometri, sayı ve boyutlara sahip kanatların boru yüzeyine uniform ve uniform olmayan şekilde radyal ve eksenel olarak yerleştirilmiş olduğu ve bu yerleşimlerin FDM'nin erime performansına etkilerinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur (Low, Qin, ve Duan, 2024).

Choi ve Kim (1992) çift borulu bir sistemde düşey bir halka aralığında depolanan magnezyum klorür heksahidratın katılma sürecini, kanatçıklı ve kanatçıksız halleri arasında deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Araştırmalarında, kanatçıklı durumun, kanatçıksız duruma oranla ısı performansının 3,5 kat daha yüksek olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu sonuç, kanatçıklı yapıların faz değişim süreçlerini daha verimli hale getirerek termal enerji depolama sistemlerinde önemli iyileşmeler sağlayabileceğini göstermektedir.

Lacroix (1993), yatay olarak konumlandırılmış çift borulu yapıda n-octadecane'nin ısı depolama davranışını, farklı akışkan giriş sıcaklıkları ve debi değerleri için incelemiştir. Çalışmada, kanatçiksız ve kanatçıklı olmak üzere iki farklı geometrik model sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın bulguları, Choi ve Kim (1992)'nin araştırmasında olduğu gibi, kanatçık ilavesinin ısı transferini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

İsmail ve diğerleri (2001), bir ısı depolama ve geri kazanım sisteminin soğutma performansını sayısal yöntemlerle incelemiştir. Sistem, düşey olarak yerleştirilmiş bir ısı deposu ve üzerine aksel kanatçıklar eklenmiş bir ısı transfer borusundan oluşmaktadır. Çalışmada, kanatçıkların uzunluğu, kalınlığı, sayısı ve depo en-boy oranı gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, kanatçık sayısı ve uzunluğunun artması, ısı transferini iyileştirerek katılma süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. Ayrıca, depo en-boy oranının 2'den 5'e yükseltilmesi, katılma süresini 8 kat kadar azaltmaktadır. Bu bulgular, ısı depolama sistemlerinin verimliliğini artırmak için kanatçıkların ve depo geometrisinin kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (İsmail, Alves ve Modesto, 2001).

Stritih (2004), dikdörtgen kesitli bir depo ile düşey doğrultuda düzenlenmiş dikdörtgen kesitli kanatçıkların oluşturduğu bir ısı depolama sisteminin performansını deneysel biçimde değerlendirmişlerdir. Çalışmalarında, kanatçık etkinliğinin Fourier sayısı ile ilişkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlar, erime sürecinde Fourier sayısının artışıyla birlikte kanatçık etkinliğinin belirgin şekilde yükseldiğini, ancak katılma sürecinde ise bu etkinliğin karmaşık ve belirsiz bir davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Bu bulgular, kanatçıkların ısı süreçlerindeki rolünü ve Fourier sayısının bu süreçlerdeki etkisini daha kapsamlı bir şekilde incelemek için önemli bir temel sunmaktadır.

Mat, Al-Abidi, Sopian, Sulaiman, ve Mohammad (2013), yatay ve eş merkezli üç borulu bir ısı depolama sistemin ortasında yer alan faz değiştirici maddenin (FDM) erime sürecini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, FDM'nin yerleştirildiği bölgenin yüzeylerinde üç farklı ısıtma koşulu (iç, dış ve iç dış kombinasyonu) belirlemiş ve her bir ısıtma koşulu için farklı uzunluklardaki dikdörtgen kesitli kanatçıkların ısı performans etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, ısıtma koşulu ile kanatçık uzunluğunun, doğal taşınım mekanizmasının ısı transferine önemli derecede etki ettiğini ortaya koymuştur. İç ve dış yüzeylerden eş zamanlı ısıtma uygulandığında, 42 mm kanat uzunluğunda, kanatçık

eklenmesi durumunda erime süresinin kanatçiksız duruma göre %43,3 oranında kısaldığı gözlemlenmiştir.

Rathod ve Banerjee (2015), düşey konumda yerleştirilmiş çift borulu sistemde depolanan faz değiştirici maddelerin erime ve katılaşma zamanlarını, ısı transfer borusunun kanatçıklı (üç dikdörtgen kesitli kanatçık) ve kanatçiksız durumlarını deneysel şekilde karşılaştırmışlardır. Isı transfer giriş sıcaklıklarının 80°C ve 85°C olduğu durumlarda, kanatçıklı yapının erime sürelerini, kanat olmayan duruma kıyasla sırasıyla %12,5 ve %24,52 oranında kısalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, her bir akışkan giriş sıcaklığı için kanatçıkların eklenmesinin, katılaşma süresini %46 oranında düşürdüğünü göstermişlerdir.

Sciacovelli ve diğerleri (2015), Y şeklinde tasarlanmış kanatçık profiline sahip silindirik bir ısı depo sisteminin ısı performansını sayısal yöntemlerle değerlendirmişlerdir. Bu araştırmada, kanatçıkların sayısı ve profil dizilimi belirleyici parametreler olarak ele alınmıştır. Y profil kanatçıkların farklı biçimlerde dallandırılmasıyla gerçekleştirilen bu tasarımların erime ve katılaşma süreçlerine olan etkileri incelenmiştir. Kısa süreli çalışma süreleri göz önüne alındığında, geniş açılı kanatçık tasarımının, dar açılı tasarımlara oranla daha verimli olduğu bulunmuştur (Sciacovelli, Gagliardi ve Verda, 2015).

Li ve Wu (2015), yatay konumda yerleştirilen silindirik bir çift borulu ısı depolama sisteminde saf NaNO_3 ve kompozit NaNO_3 'ün erime ve katılaşma süreçlerini sayısal yöntemlerle incelemişlerdir. Çalışmada, kanatçıklı ve kanatçiksız ısı transfer borularının yanı sıra iki farklı ısı transfer akışkanı (sentetik yağ ve eriyik tuz) ile gerçekleştirilen deneyler, değişik akışkan debileri altında karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, saf NaNO_3 kullanıldığında kanatçıklı düzenekte erime ve katılaşma sürelerinin kanatçiksız düzeneğe göre %14 oranında azaldığı, kompozit NaNO_3 kullanıldığında ise bu oranının %20'ye kadar düştüğü görülmüştür.

Khan, Khan ve Tabeshf (2016), yatay konumda yerleştirilen silindirik bir ısı deposunun ısı verimliliğini; kanatçık kalınlığı, kanatçık uzunluğu, ısı transfer borusu sayısı ve diğer parametreleri değiştirerek sayısal analizle incelemişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre, depo içerisindeki ısı transfer boru sayısının 12'den 21'e çıkarılması, erime süresinde %48,5'lik bir azalma sağlamıştır. Ayrıca, kanat uzunluğunun 12,7 mm'den 38,1 mm'ye

artırılmasıyla bu süre %57,32 oranında kısalmış, 1 mm'den 5 mm'ye yükseltilen kanatçık kalınlığında ise %5,7'lik bir azalma gözlemlenmiştir.

Darzi, Jourabian ve Farhadi (2016), yatay şekilde yerleştirilmiş çift borulu bir ısı değiştiricide gizli ısı depolamak için kullanılan faz değiştiren maddelerin (FDM) erime ve katılaşma süreçlerini sayısal modelleme ile incelemiştir. Araştırmada, ısı transfer borusuna farklı sayılarda yerleştirilen dikdörtgen kesitli kanatçıklar ile FDM'ye eklenen nano partiküllerin bu süreçlere olan etkisi analiz edilmiştir. Kanatçık sayısının artışı, erime ve katılaşma sürelerini sırasıyla %82 ve %85 oranında kısaltırken, nano partikül yüzdesinin yükseltilmesiyle bu süreler sırasıyla %46 ve %16 azalmıştır. Bunun yanı sıra, ısı transfer borusunun boyut oranlarının ve yukarıya doğru eliptik bir kesite sahip olmasının erime süresini kısaltırken katılaşma süresini uzattığı gözlemlenmiştir.

Raul ve diğerleri (2020), kanatçık kalınlığının ve sayısının, erime fraksiyonu üzerindeki etkisini inceledi. Çalışmada 12, 24, 36 ve 48 kanatçık sayısı kullanıldı. Buna karşılık gelen maksimum erime fraksiyonunun sırasıyla 0,40, 0,48, 0,50 ve 0,52 olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, 36'dan 48'e artışa kıyasla, kanat sayısını 12'den 24'e çıkarıldığında daha büyük bir iyileşme gösterdiği belirtilmiştir. Buna ek olarak kanat sayısını doygunluk noktasının ötesine çıkarmanın (bu çalışma için $N = 36$), iletimi daha da teşvik ettiği ancak daha sonraki artışlar için erime süresindeki artış oranını azalttığı vurgulanmıştır. Bu sonucun muhtemelen kısıtlanmış doğal konveksiyon yoğunluğundan kaynaklandığı belirtilmiştir. Kanat sayısındaki artışın FDM hacmini ve dolayısıyla depolanan toplam enerjiyi azalttığı görülmüştür. Çalışma, kanat kalınlığını 1 mm aralıklarla 1 mm'den 4 mm'ye değiştirilmiş ve karşılık gelen erime fraksiyonları sırasıyla 0,4, 0,45, 0,47 ve 0,48 olarak tespit edilmiş bu da 2 mm kalınlığın ötesinde marjinal bir iyileştirme olduğunu göstermiştir (Raul, Saha ve Jain, 2020).

Yazıcı ve diğerleri (2019), sağ yan duvarlı ısıtmalı gizli ısı termal enerji depolaması kullanarak kanatçık sayısı ve eğimin etkilerini deneysel olarak araştırmış ve ısıtıcı tarafına 1,2 mm kalınlığında dikey, uzunlamasına alüminyum kanatçık(lar) takılarak, kurulumu saat yönünde $\theta = 0^\circ$ (dikey) ile 90° (yatay) arasında eğerek yedi eğim açısı değerlendirmişlerdir. Deneyler, kanatçık sayılarını bir ile beş arasında değiştirerek tekrarlanmış ve sonuçlar, 60° 'lik bir eğim açısının tüm kanatçık sayıları için en iyi termal performansı sağladığını göstermiştir. Kanatçık sayısı üçün üzerine çıkarıldığında ise kanatçıkların termal

performansında sınırlamalar fark edilmiş; bu sonucun muhtemelen kanatçık sayısının artmasıyla oluşan akışa karşı artan dirençten kaynaklandığı belirtilmiştir (Yazıcı, Avcı ve Aydın, 2019).

Ji ve diğerleri (2017), faz değişim malzemeleri içeren bir termal enerji depolama sistemi üzerinde sayısal araştırmalar yapmış, ısı transferi ve erime davranışlarını incelemek için doğal konveksiyonu hesaba katan bir sayısal model geliştirmişlerdir, FDM erime hızı artışı için 0° , $+15^\circ$, $+30^\circ$, -15° ve -30° eğimli kanatçıklar önermişlerdir. Sonuç olarak yaptıkları analizde, aşağı doğru 15° açılı kanatçık tasarımının FDM erimesinin diğer kanatçık modellerine göre daha hızlı gerçekleştirdiğini, çünkü ısıнын bir kısmının kanatçıklar boyunca sistemin tabanına iyi bir şekilde aktarıldığını ve doğal konveksiyonun neden olduğu başlangıçtaki düzensiz erimenin azaldığı belirtilmektedir. Bunun aksine, yukarı doğru kanatçıklar 0° kanat tasarımına göre düzensiz ısı dağılımını derinleştirdiği ve erimeyi yavaşlattığı saptanmıştır. -15° eğimli kanatlar kullanıldığında, erime süresi 0° eğimli kanatlara göre %23,8 oranında azalırken, $+15^\circ$ ve $+30^\circ$ eğimli kanatlarla bu süre sırasıyla %45,2 ve %71,4 oranında artmaktadır. Kanat uzunluğu ve ısı akışı da FDM erimesi için incelenmiştir. Kanat uzunluğunun, eğimli kanatlar kullanıldığında FDM erimesi üzerinde önemli bir etkisi olduğu bulunmuştur.

Huang ve diğerleri, iç boru yüzeyinde yenilikçi bir ağaç şekilli kanat geometrisi kullanarak FDM'nin erime ve katılaşma performansını incelemiştir (Huang, Song, Wu ve Liu, 2022). Bu tasarım sayesinde, şarj vedeşarj sürelerinde sırasıyla %29,4 ve %22,8 oranında azalma sağlanmıştır. Nie ve diğerleri ise taç yaprak şekilli 16 kanat konfigürasyonunun FDM'nin katılaşma süreci üzerindeki etkisini araştırmıştır (Nie, Chen, Li, Liu, Liu, ve Rao, 2025). Yapılan analizler sonucunda, taç yaprak konfigürasyonu kullanıldığında katılaşma süresinde %4,1 ile %23,6 arasında bir azalma elde edilmiştir.

Tang ve diğerleri, gövde-boru tipi bir gizli ısı depolama ünitesinde sürekli eksenel kanatlar yerine kesintili kanatlar kullanarak kanat geometrisinin optimizasyonunu gerçekleştirmiştir (Tang, Song, Liu, Wu, Xu, Zhou ve Li, 2025). Optimum tasarım sonucunda, %100 erime süresi, yekpare kanat tasarımına kıyasla %21 oranında azaltılmıştır. Luo ve diğerleri ise, gövde-boru tipi bir gizli ısı depolama sisteminde uniform kanat dağılımı kullanarak veri odaklı bir topoloji tasarımı gerçekleştirmiştir (Luo, Yaji, Chen ve Tao, 2025). Bu çalışma kapsamında, uygun kanat sayısı ile kanatların birbirine göre boyutlarının ve geometrilerinin

erime ve katılaşma süreçlerine etkileri incelenmiş, topoloji optimizasyonu sonucunda erime ve katılaşma sürelerinde sırasıyla %21 ve %9 oranlarında azalma sağlandığı belirlenmiştir.

Ayrıca, literatürde balık kılçığı şekilli biyonik kanat tasarımlarının erime performansı üzerindeki etkilerini ele alan çalışmalar da bulunmaktadır (Fang ve Zhao, 2025; Wang, Yao, Chen, ve Yan, 2025). Bu çalışmalar, geleneksel düz kanat tasarımına kıyasla, biyonik kanat kullanımıyla şarj süresinde %47,1 ve %23,08 oranında iyileşme sağlandığını göstermektedir. Tao ve He tarafından yürütülen bir çalışmada ise, farklı sayıda kanatların tamamen dış borunun alt bölgesine yerleştirilmesinin doğal konveksiyon akışını artırdığı gözlemlenmiştir (Tao ve He, 2015). Ayrıca, optimum ısı transferi için alt bölgeye yerleştirilmesi gereken ideal kanat sayısının yedi olduğu sonucuna varılmıştır.

Literatürde, FDM ile gizli ısı depolama uygulamalarında kanat kullanımı ve kanat yerleşim düzenine yönelik çeşitli çalışmalar bulunmasına rağmen, kanatların FDM haznesinin alt ve üst bölgelerinde farklı yoğunluklarda dağıtılmasının erime ve katılaşma performansına etkilerini birlikte ele alan araştırmalar oldukça sınırlıdır. Literatürdeki bu bilgi eksikliği dikkate alınarak, tez çalışmasında, çift borulu bir ısı depolama sisteminde kanatçıklar iç borunun alt ve üst bölgelerinde farklı oranlarda yoğunlaştırılmış ve bu düzensiz kanat dağılımının doğal konveksiyon akışı ile şarj ve deşarj süreleri üzerindeki etkileri birlikte incelenmiştir. Böylece, fiziksel mekanizmalara dayalı olarak düzensiz kanat yerleşimi sırasında dikkate alınması gereken hususlara dair literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, altı farklı kanat yerleşim düzeni içeren çift borulu enerji depolama tasarımları için sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Her bir kanat yerleşim düzeninde kanatlar arasındaki açılar değiştirilerek kanatlar arası açılarının erimiş FDM'deki doğal konveksiyon akışına etkileri gözlenmeye çalışılmıştır. Elde edilen bulgular sıvı fraksiyonları, ısı verim, şarj ve deşarj süreleri açısından değerlendirilmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde öncelikle sayısal analizler için oluşturulan fiziksel modellere yer verilmiştir. Sonrasında ise erime ve katılaşma analizleri için kullanılan matematiksel model, sınır koşulları ve sayısal çözüm yönteminden bahsedilmektedir.

Bu tez çalışmasında N-eikosan FDM kullanılmıştır. N-eikosan ($C_{20}H_{42}$), organik bir parafin olup organik faz değişim malzemeleri sınıfına girmektedir. Özellikle lineer alkanlar (parafinler) grubuna dahil olan N-eikosan, düşük süblimleşme ve buharlaşma eğilimi, kimyasal kararlılığı ve yüksek gizli ısı kapasitesi nedeniyle tercih edilmiştir. Kullanılan FDM'nin termofiziksel özellikleri aşağıdaki tabloda detaylı olarak belirtilmiştir (Çizelge 4.1).

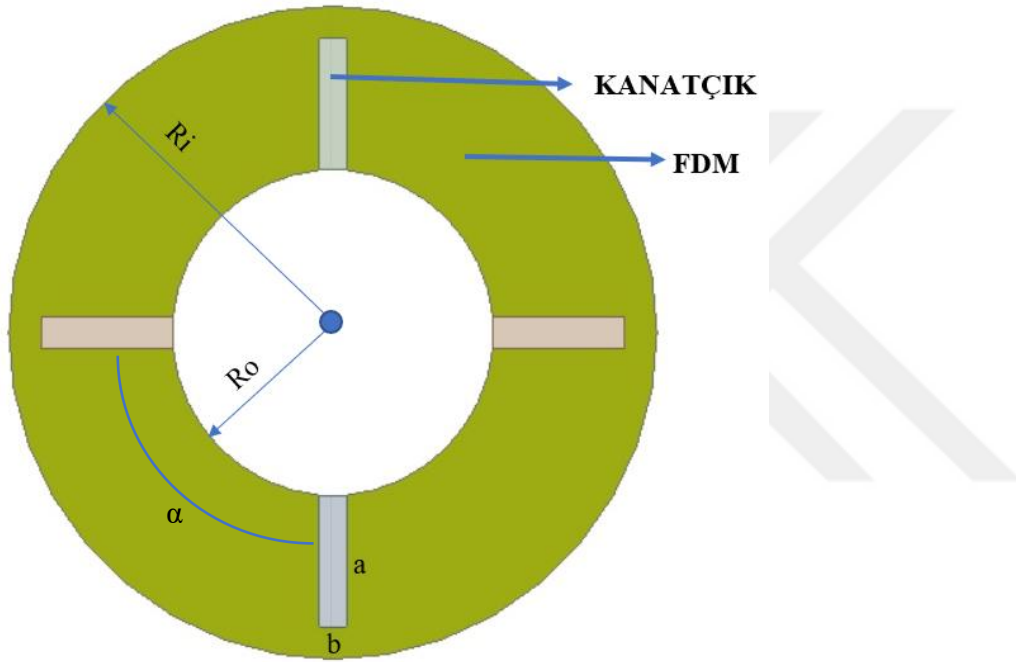
Çizelge 4.1. N-eikosan FDM'nin termofiziksel özellikleri

Termofiziksel özellikler	Değer
Katılaşma Sıcaklığı (K)	308,15
Sıvılaşma Sıcaklığı (K)	310,15
Sıvı Yoğunluğu (kg/m^3)	770
Özgül Isı Kapasitesi (J/kgK)	2460
Gizli Füzyon Isısı (J/kg)	247600
Isıl İletkenlik (W/mK)	0,1505
Termal Genleşme Katsayısı (1/K)	0,0009
Dinamik Viskozite (kg/ms)	0,00385

4.1. Fiziksel Model

Sayısal analizler için altı farklı kanat yerleşim düzeni içeren çift borulu enerji depolama tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarımlar iki boyutlu olarak modellenmiş ve her bir kanat yerleşim düzeninde kanatlar arası açılar için üç farklı açı değeri kullanılmıştır. Kanat yerleşim düzenleri düzgün ve düzgün olmayan dağılımlar içermektedir. Düzgün dağılımlı olmayan modellerde kanatçıklar iç borunun alt ve üst bölgelerine farklı oranlarda dağıtılmıştır.

Kanatçıklı çift borulu enerji depolama modellerinde iç borular 20 mm ve dış borular 40 mm çapındadır. Kullanılan kanatçık sayısı her model için aynı olup dört adettir. Her bir kanatçık dikdörtgen olup uzun kenarı $a = 8$ mm kısa kenarı $b = 2$ mm uzunluğundadır. Kanatlar arası açı α olarak ifade edilmiştir. Referans modelimizde kanat açıları $\alpha = 90^\circ$ olacak şekilde kanatlar konumlandırılmıştır. FDM yüzey alanı her bir model için $878,34 \text{ mm}^2$ 'dir. Şekil 4.1'de tüm modellerin oluşturulmasında baz alınan düzgün dağılımlı kanat yerleşim düzenine sahip referans model verilmiştir.

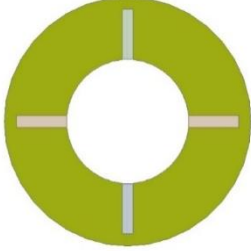


Şekil 4.1. Tasarlanmış referans model

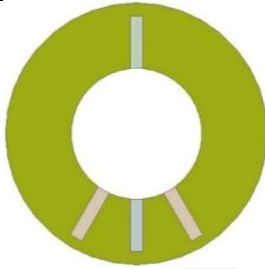
Şekil 4.2'de sayısal analizlerde kullanılan tüm modellere yer verilmiştir. Model 1 üniform kanat dağılımına sahip olan ve diğer sistemler ile karşılaştırma yapılacak olan referans model olarak tasarlanmıştır. Kanatçıkların alt bölgeye toplanması ile erime prosesinde doğal konveksiyon akışında artış sağlayacağı düşünülen Model 2 ve Model 6 tasarlanmış ve bu iki modelde iç borunun alt ve üst bölgesinde farklı kanat yoğunlukları kullanılmıştır. Model 3 ise Model 2 ye zıt şekilde kanatçıkların üst bölgeye toplandığı bir sistem olarak tasarlanmıştır. Model 4 de Model 1 gibi üniform kanat dağılımına sahip bir sistemdir ancak kanatların konumlandırılmasında farklılık vardır. Model 5 ise Model 4'deki kanatlar arası açının değiştirilmesi ile elde edilmiştir. Aynı zamanda sıvı faza sahip FDM'deki doğal

konveksiyon akışında kanatlar arası açılar önemli olduğundan her modelde kanatlar arası açılar farklılaştırılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır.

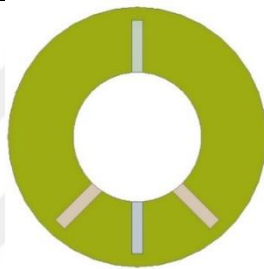
Model 1



Model 2



$\alpha=30^\circ$

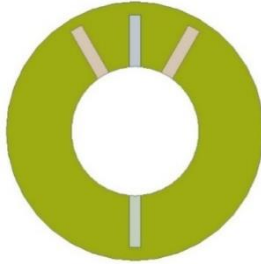


$\alpha=45^\circ$

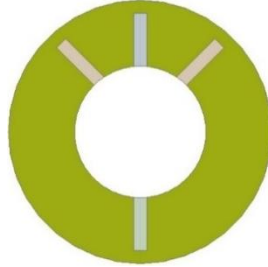


$\alpha=60^\circ$

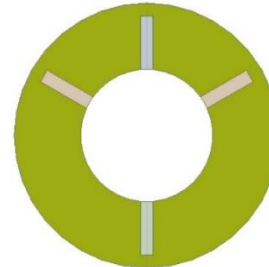
Model 3



$\alpha=30^\circ$



$\alpha=45^\circ$



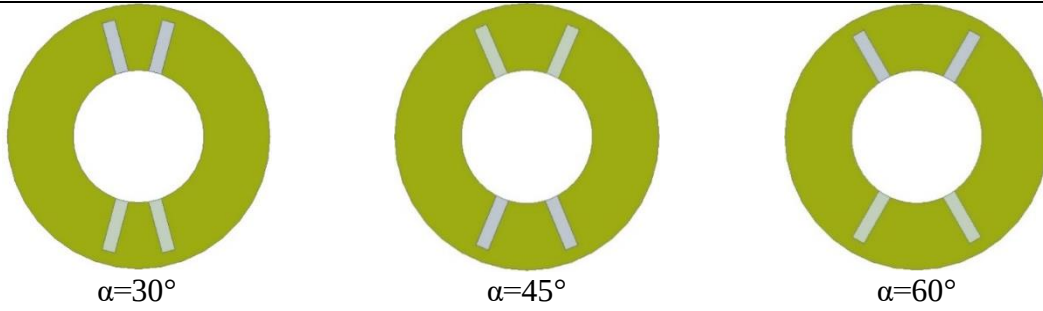
$\alpha=60^\circ$

Model 4

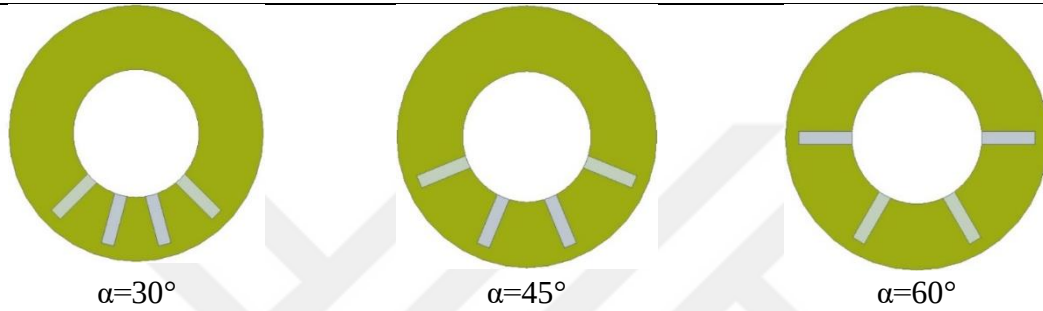


Şekil 4.2. Sayısal analizde kullanılan tüm modeller

Model 5



Model 6



Şekil 4.2. (devamı)

4.2. Matematiksel Model

Faz değişim prosesinin matematiksel olarak modellenmesinde entalpi-porozite yaklaşımı kullanılmıştır. Entalpi-porozite yaklaşımında analiz üç farklı bölge dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu bölgeler katı bölge, sıvı bölge ve iki faz arası (yarı erimiş) bölgedir. Entalpi-porozite yaklaşımı ile tek fazlı yapılarda kullanılan korunum denklemlerinin faz değişimi problemlerine uyarlanması mümkün olmaktadır. Faz değişiminin matematiksel modellenmesinde aşağıdaki varsayımlar kullanılmıştır:

- Akışın iki boyutlu, sıkıştırılamaz, zamana bağlı ve Newton tipi olduğu varsayılmıştır.
- Sıvı bölgedeki sıcaklık farklılıklarından kaynaklanan yoğunluk değişiminin ve kaldırma kuvvetlerinin etkisini dikkate almak için Boussinesq yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımda FDM'nin yoğunluk dışında tüm termofiziksel özelliklerinin sabit olduğu varsayılmaktadır.
- Erime ve katılaşma süreçlerinde iç ve dış boru malzemesindeki genleşme ihmal edilmiştir.
- Isıl enerji depolama sisteminin dış yüzeyinden ısı kayıplarının olmadığı varsayılmıştır.

Kütlenin korunumu (Denklem 1) ve x ve y eksenleri yönündeki momentumun korunumu denklemleri (Denklem 2 ve 3) aşağıda verilmiştir. Denklemler sırasıyla:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + uA \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v v)}{\partial y} \\ &= - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + vA + \rho g \beta (T - T_m) \end{aligned} \quad (3)$$

Denklemlerde ρ yoğunluk, g yer çekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/s}^2$), μ dinamik viskozite, β termal genleşme katsayısı, T sıcaklık, denklemde u ve v ise sırasıyla x ve y yönleri için akışkan hızlarıdır. Denklem 3'ün sağ taraftaki son ifade Boussinesq yaklaşımındaki kaldırma kuvveti etkisini ifade etmektedir. A değeri aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır (Kadivar, Moghimi, Sapin ve Markides, 2019):

$$A = - A_{\text{Lapa}} \frac{(1 - \lambda)^2}{\lambda^3 + \varepsilon} \quad (4)$$

Denklemde λ sıvı fraksiyonu temsil etmektedir (Yan ve diğerleri, 2022).

$$\lambda = \begin{cases} 0 & ; \quad T < T_s \\ (T - T_s)/(T_l - T_s) & ; \quad T_s < T < T_l \\ 1 & ; \quad T > T_l \end{cases} \quad (5)$$

Denklemdeki l ve s alt simgeleri sırasıyla sıvı durumu ve katı durumu ifade etmektedir. $A_{\text{yari_erimiş}}$, katılaşma sırasında akışkan hızının azaltılmasına ilişkin lapa bölge için kullanılan katsayıdır ve 105-1012 arasında değerler alabilir. Bu değerın büyümesi sayısal analizde erime ya da katılaşmanın daha yavaş şekilde gerçekleşmesine neden olur. Sayısal sonuçların doğrulanması için deneme-yanılma yöntemi ile uygun değer seçilir. Bu çalışmada

$A_{yarı_erimiş} = 10^5$ olarak seçilmiştir. ε sifıra bölünmeyi önleyecek küçük sayıdır ve değeri $\varepsilon = 0,001$ 'dir. (Kadivar ve diğerleri, 2019).

Enerji denklemi aşağıdaki denklem ile ifade edilmiştir:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (6)$$

Denklemde k iletimle ısı transfer katsayısıdır ve h entalpidir. h aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır (Yan ve diğerleri, 2022).

$$h = \begin{cases} \int_{T_{ref}}^T c_p dT & ; \quad T < T_s \\ \int_{T_{ref}}^T c_p dT + \lambda H & ; \quad T_s < T < T_l \\ \int_{T_{ref}}^{T_s} c_p dT + \int_{T_l}^T c_p dT & ; \quad T > T_l \end{cases} \quad (7)$$

Denklemde C_p özgül ısı kapasitesi, H gizli ısı ve T_{ref} referans sıcaklığıdır ($T_{ref} = 298,15$ K). T aşağıdaki denklem ile bulunur (Yang, Tan ve Liu, 2016).

$$T = \lambda(T_l - T_s) + T_s \quad (8)$$

İç boruda varsayılan akış nedeni ile boru yüzeyi ve akışkan arasındaki konveksiyon ısı transfer katsayısı (h_{konv}), Dittus-Boelter korelasyonu (Denklem (9)) ile hesaplanmıştır (Dittus ve Boelter, 1985).

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (9)$$

h_{konv} , Nusselt (Nu) ve Reynolds sayısını (Re) hesaplamak için aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır.

$$Re = \frac{\rho V D_H}{\mu} \quad (10)$$

$$D_H = \frac{4A_k}{p} \quad (11)$$

$$Nu = \frac{h_{konv} D_H}{k} \quad (12)$$

Denklemlerde ρ yoğunluğu, V (m/s) ortalama akış hızını, μ akışkanın viskozitesini temsil etmektedir. Denklem 11’de D_H hidrolik çapı temsil etmektedir. Hidrolik çap hesabında kullanılan A_k , FDM yüzey alanı (878,34 mm²), p ise akışkanın temas ettiği ıslak çevre uzunluğudur.

Tasarlanan modellerle elde edilen enerji depolama verimleri hem erime hem de katılaşma süreçlerini içerecek şekilde aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır.

Modellerin verimi için kullanılan denklemler aşağıdaki şekildedir.

$$H_{FDV} = 1 - \frac{F_0 \text{ Şarj}}{F_0 \text{ Şarj} + F_0 \text{ Deşarj}} \quad (13)$$

Denklemden F_0 Fourier sayısını temsil etmektedir ve birimsizdir. Şarj ve deşarj periyodlarındaki F_0 sayıları hesaba katılmıştır. F_0 sayısı ise Denklem 14 ile bulunmuştur.

$$F_0 = \frac{\alpha \cdot t}{D_H^2} ; \quad \alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad D = \frac{4 \cdot A}{\zeta} \quad (14)$$

Burada t saniye cinsinden erime veya katılaşma sürelerini temsil etmektedir. α ise ısı yayılım katsayısıdır.

4.3. Sınır Şartları

Korunum denklemlerinin çözümlenmesinde FDM’nin ortalama erime sıcaklığı 309,15 K olarak alınmıştır. Ayrıca, başlangıç sınır koşulu olarak, FDM sıcaklığının, şarj periyodu için erime sıcaklığının 1°C altında ve deşarj periyodu için katılaşma sıcaklığının 1°C üzerinde olduğu varsayılmıştır (Denklem (17)). Enerji depolama sisteminin dış yüzeyi adyabatik

kabul edilmiştir (Denklem (15)). Boru iç yüzeyine ise denklemde verildiği gibi taşınım ile ısı transferi sınır koşulu uygulanmıştır. İç borudaki ortalama akışkan sıcaklığı, şarj işleminde FDM'nin erime sıcaklığının 20°C üzerinde (329,15 K) vedeşarj işleminde FDM'nin katılaşma sıcaklığının 20°C altında (289,15 K) alınmıştır.

$$|\dot{q}_{\text{iletim}}|_{DY} = 0, t(s) = t \quad (15)$$

$$\begin{aligned} |\dot{q}_{\text{iletim}}|_{iY} &= h_{\text{konv}}(T_{\text{ort,akışkan}} - T_d), \text{erime için} \\ |\dot{q}_{\text{kond}}|_{iY} &= h_{\text{konv}}(T_d - T_{\text{ort,akışkan}}), \text{katılaşma için} \end{aligned} \quad (16)$$

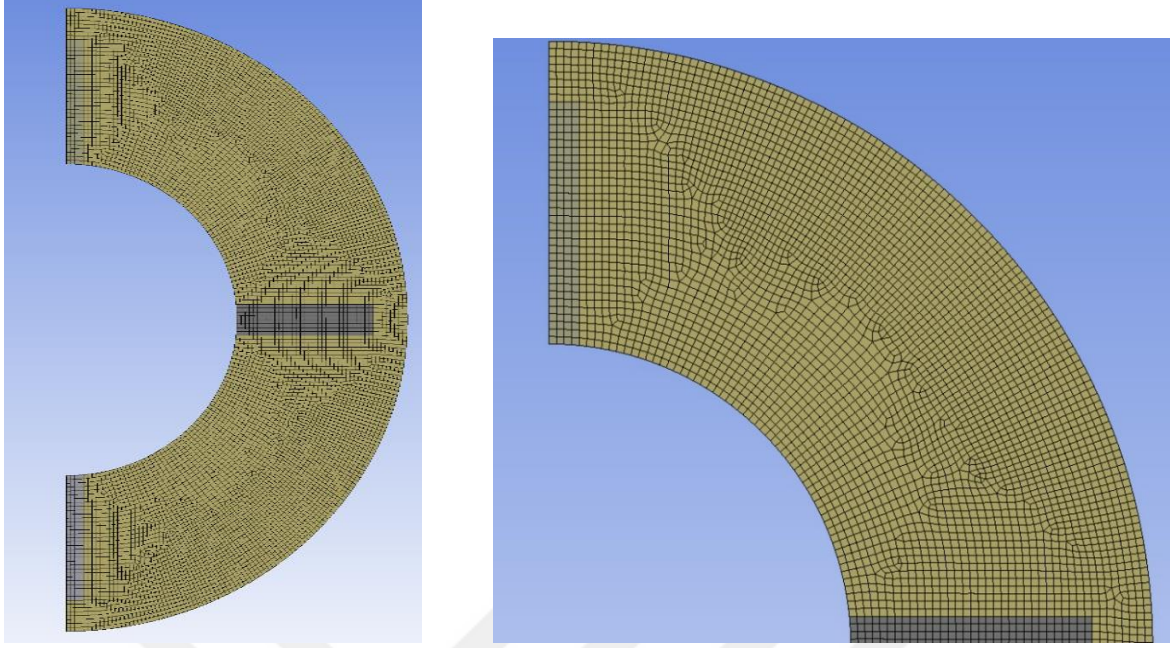
$$\begin{bmatrix} T_{\text{FDM}} = 308,15 \text{ K}, t(s) = 0, & \text{erime} \\ T_{\text{FDM}} = 310,15 \text{ K}, t(s) = 0, & \text{katılaşma} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Denklemlerde T_d duvar sıcaklığı, $T_{\text{ort,akışkan}}$ ortalama akışkan sıcaklığı, h_{konv} ise konveksiyonla ısı transfer katsayısı, iY iç yüzey ve DY dış yüzeydir.

4.4. Sayısal Yöntem

Sayısal analizler, ANSYS-Fluent 2022 R1 yazılımı kullanılarak sonlu hacimler yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Basınç ve hız çifti için PISO algoritması uygulanmış, basınç düzeltme işlemleri için ise PRESTO yöntemi tercih edilmiştir. Momentum ve enerji denklemlerinin ayrıklaştırılmasında QUICK şeması kullanılmış, zamana bağlı denklemler için birinci dereceden geçiş formülü uygulanmıştır. Kalıntı değerleri, kütle ve momentum korunum denklemleri için 10^{-6} , enerji korunum denklemi için ise 10^{-8} değerine ulaşana kadar analizler devam etmiştir.

Sayısal analizlerde kullanılan ağ yapısı Şekil 4.3. ile sunulmuştur. Hem FDM bölgesinde hem de kanatlarda hegzahedral ağ yapısı kullanılmıştır. Diğer geometrik kombinasyonların ağ yapıları benzer şekilde oluşturulmuştur. Simetrik koşullar var olduğundan analizlerde hesaplama alanının yarısı modellenmiştir.



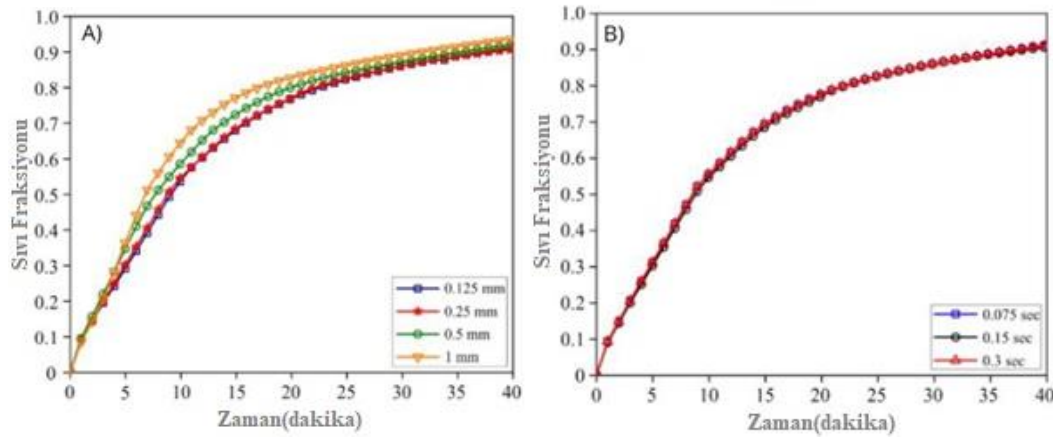
Şekil 4.3. FDM ve kanat hesaplama bölgeleri için kullanılan ağ yapısı ve dağılımı

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölüm üç ana kategoride ele alınmıştır. Birinci kısımda sayısal sonuçların doğruluğunu test etmek için yapılan doğrulama analizlerinin sonuçları değerlendirilmiştir. İkinci ve üçüncü kısımda ise çift borulu gizli ısı depolamada kanat yerleşim konfigürasyonlarının FDM'nin erime ve katılaşma performansı üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular erime/katılaşma oranını, sıcaklık dağılımını, akışkan hızını ve enerji depolama verimliliğini veren şekiller, grafikler ve tablolar halinde sunulmuştur.

5.1. Sayısal Sonuçların Doğrulanması

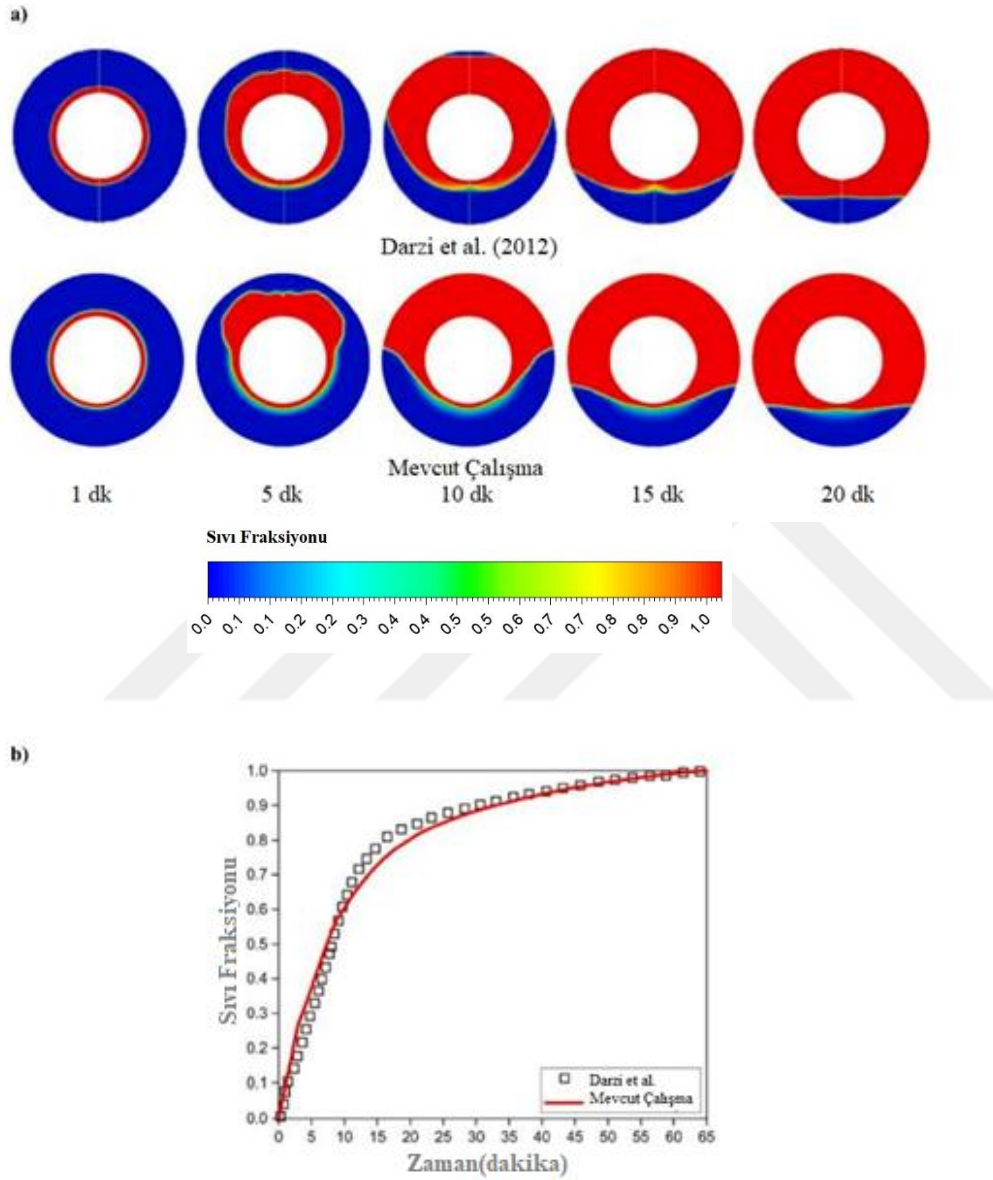
Doğrulama işlemleri için öncelikle hücre boyutu ve zaman adımından bağımsızlık testleri yapılmıştır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, 0,25 mm'den küçük hücre boyutu ve 0,15 saniyeden küçük zaman adımı için sıvı fraksiyonundaki değişiklik ihmal edilebilir düzeyde kalmıştır (Şekil 5.1a ve 5.1b). Bu nedenle sayısal analizlerde hem sonuçlarda hassasiyet sağlanabilmesi hem de analiz süresinden tasarruf edilebilmesi için 0,25 mm'lik bir ızgara boyutu ve 0,15 saniyelik zaman adımı seçilmiştir.



Şekil 5.1. Izgara boyutundan (a) ve zaman adımından (b) bağımsızlık testi sonuçları

Sıvı fraksiyon konturlarının karşılaştırması Şekil 5.2a'da verilmiştir. Şekilde mavi bölge katı fraksiyonu, kırmızı bölge ise sıvı fraksiyonu temsil etmektedir. 65 dakikalık erime süresi için sıvı fraksiyon eğrilerinin karşılaştırması ise Şekil 5.2b'de gösterilmiştir. Şekil 5.2a'da görüldüğü gibi erime sürecinde katı sıvı arayüz geometrisinde belirli zaman aralıklarında farklılıklar oluşmuştur. Bu farklılıklara rağmen Şekil 5.2b'den anlaşılabileceği gibi Darzi,

Farhadi, ve Sedighi'nin çalışmaları (2012) ve bu çalışmadaki zamana bağlı sıvı fraksiyonu eğrileri arasındaki en yüksek fark %6,5 olarak ölçülmüştür. Bu hata oranı, kullanılan sayısal modelin belirli bir erime ve katılaşma periyodu için uygulanabilir olduğunu göstermiştir.

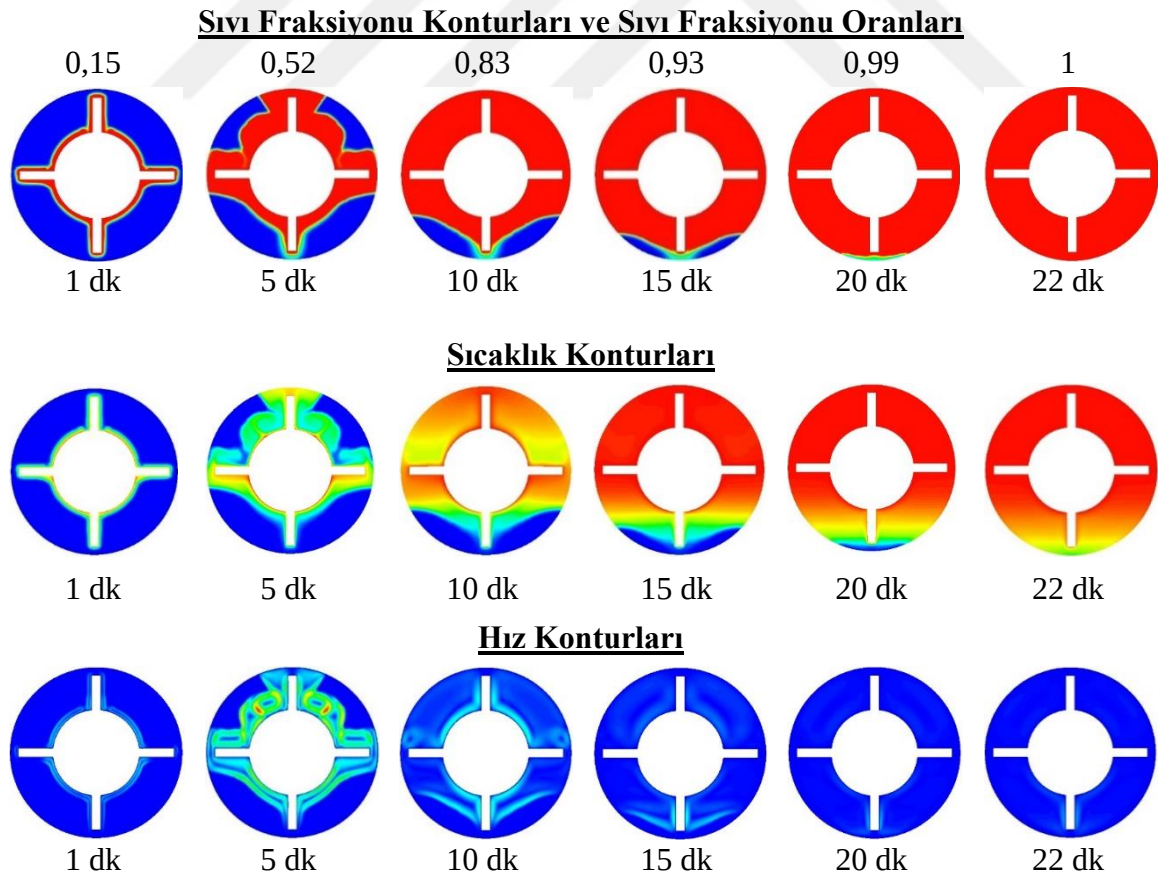


Şekil 5.2. Literatür çalışması (Darzi ve diğerleri, 2012) ile karşılaştırma sonuçları a) Sıvı fraksiyonu konturları b) Sıvı fraksiyon eğrilerinin zamana göre karşılaştırılması (Darzi ve diğerleri, 2012)

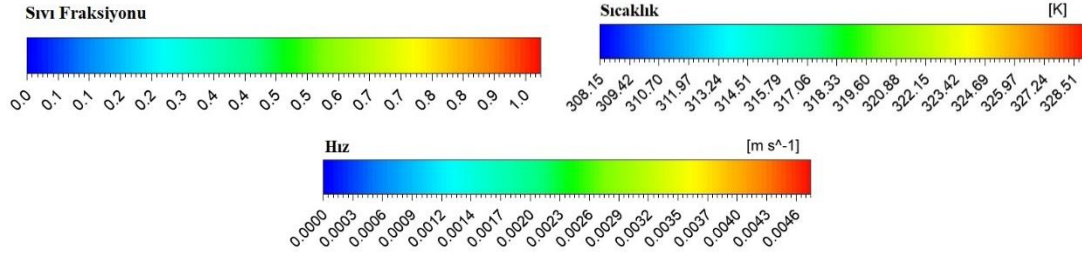
5.2. Erime Analizi Bulguları

Şekil 5.3’de Model 1 için zamana bağlı oluşan sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları sunulmuştur. Erime süreci iç boru ve kanat yüzeylerinden başlamış ve erime sonucu oluşan sıvı fazdaki FDM doğal konveksiyon etkisi ile dış boru üst yüzeyine doğru yönlenmiştir. Böylece %100 sıvı faza geçiş öncelikle dış borunun üst yüzeyinde meydana gelmiştir. Zamana bağlı olarak alt bölgedeki FDM’de erimiş ve tüm FDM’nin erimesi (şarj süresi) 22 dakika sürmüştür. Erime bulgularına paralel olarak dış boru üst bölgesindeki FDM sıcaklığının diğer bölgelere nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir. Doğal konveksiyon akışının en belirgin olduğu zaman aralığının hız konturları incelendiğinde 5.-10. dakikalar olduğu gözlenmektedir. 10. dakikadan sonra doğal konveksiyon kaynaklı akışkan hareketi azalmış ve ısı enerjisi moleküler difüzyondan daha çok ısı difüzyon mekanizması ile yayılmıştır.

Model 1



Şekil 5.3. Model 1 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları

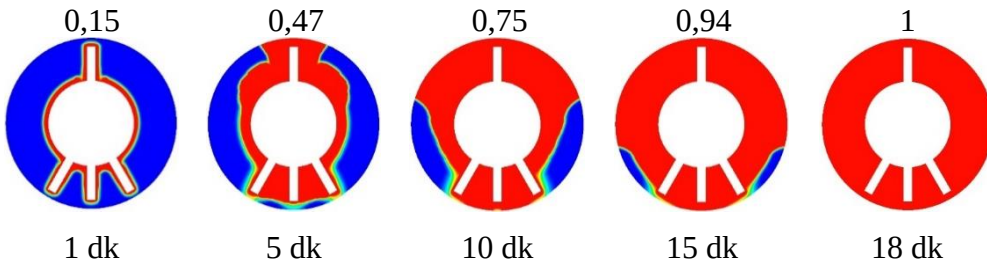


Şekil 5.3. (devamı)

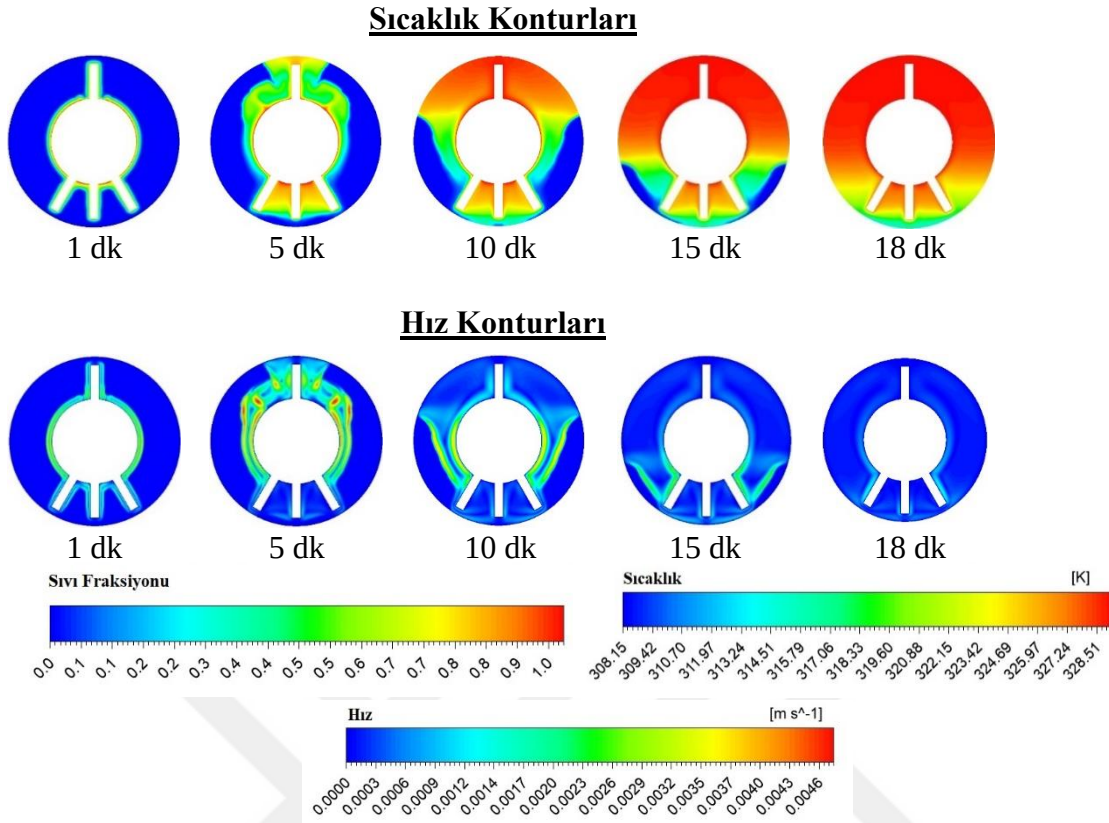
Şekil 5.4.'de ise uniform olmayan kanat dağılımına sahip Model 2 için elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Model 2'de üç kanat iç borunun alt yüzeyine yerleştirilmiş ve üst bölgede de erimeye katkı sağlaması için bir kanat iç borunun üst yüzeyinde bırakılmıştır. Alt bölgedeki kanatlar arasına üç farklı açı değeri verilmiştir. Tüm açı değerleri için sıvı fraksiyonu konturlarından anlaşıldığı gibi en hızlı erime kanat sayısının yoğun olduğu alt bölgede meydana gelmiştir. Bu durum doğal konveksiyon etkisini belirli ölçüde artırdığından üç açı değeri dikkate alındığında Model 1'e göre 3-4 dakika arası daha düşük şarj süresi (%100 erime) elde edilmiştir (18 ve 19 dakika). Alt bölgedeki kanatlar arası açının 30°'den 45° ve 60°'ye çıkarılması kanatlar arasındaki akışkan hareketini artırmıştır (hız konturları). Ancak bu durum alt bölgedeki erime hızını düşürmüştür ve dolayısıyla doğal konveksiyon mekanizması ile olan ısı transferini de düşürmüştür. Bu nedenle 45° ve 60° kanat açılarında 30° kanat açısına göre 1 dakika daha geç %100 erimeye ulaşılmıştır.

a) Model 2 30°

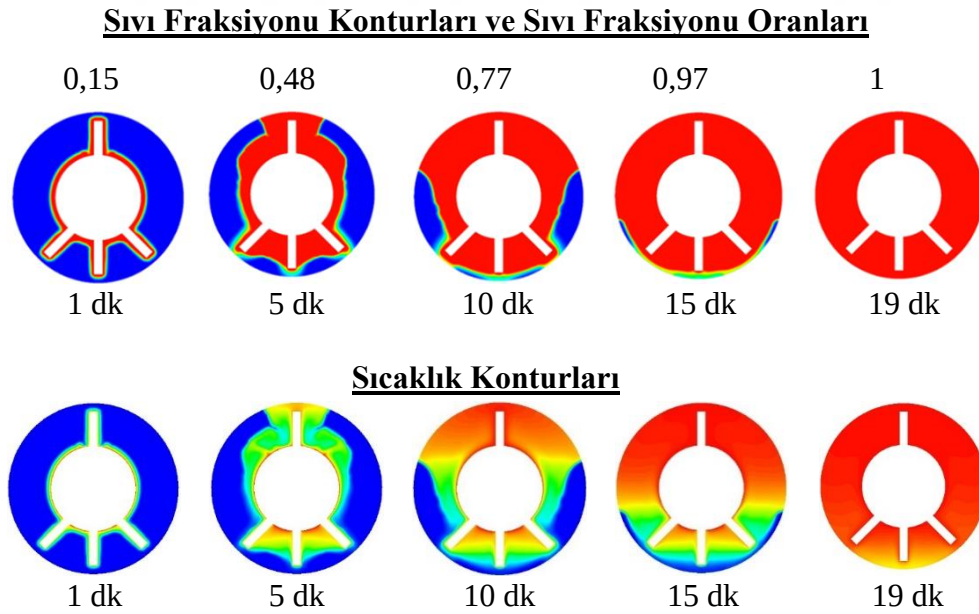
Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları



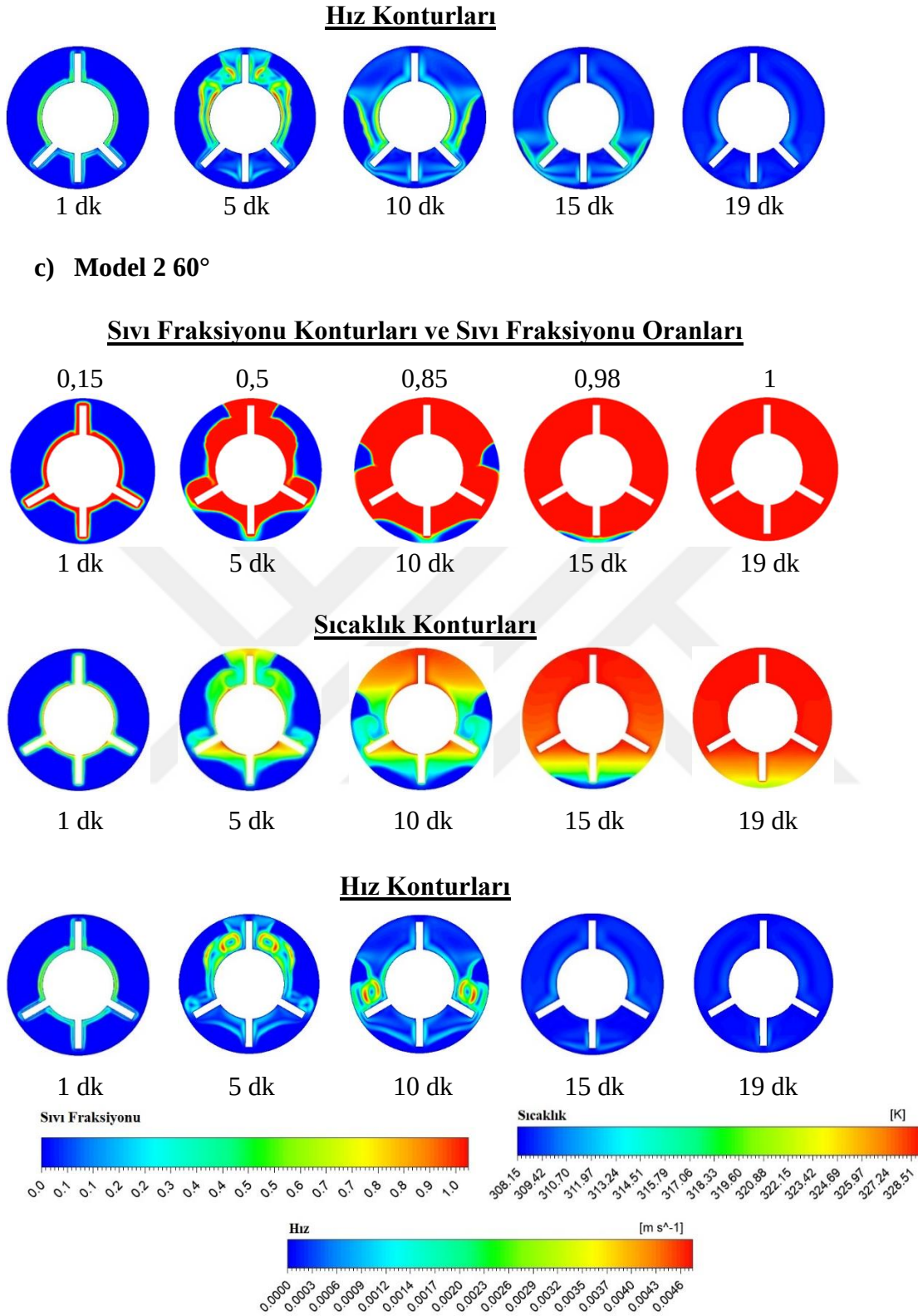
Şekil 5.4. Model 2 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları
a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$



b) Model 2 45°



Şekil 5.4. (devamı)

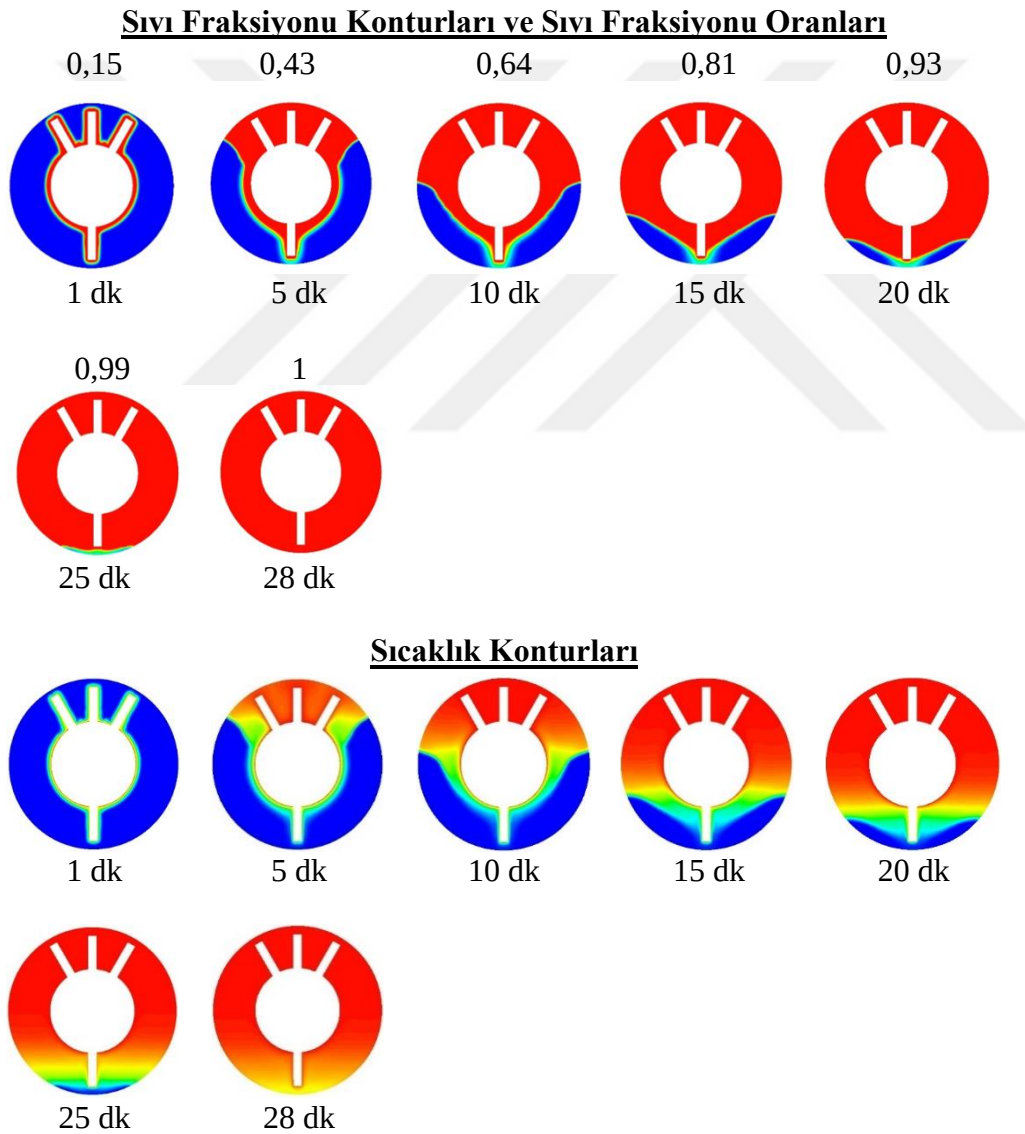


Şekil 5.4. (devamı)

Model 3’de ise Model 2’nin tam tersi bir yaklaşım uygulanmıştır (Şekil 5.5). Üç kanat iç borunun üst yüzeyine yerleştirilmiş ve bir kanat alt yüzeyde bırakılmıştır. Bu kanat yerleşim

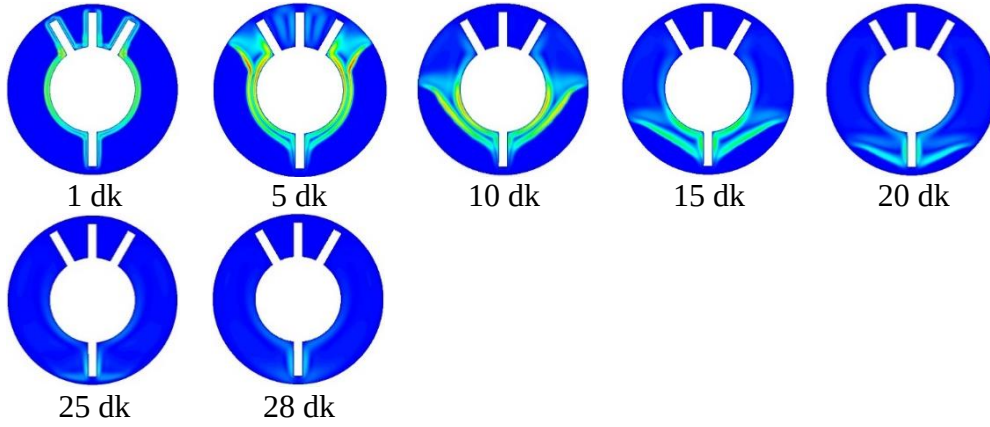
konfigürasyonu üst bölgedeki erime hızını artırmış ve dolayısıyla doğal konveksiyon akışı en çok üst bölgede etkili olmuştur. Bu durum alt bölgedeki FDM'nin erime hızında önemli ölçüde düşüş meydana getirmiştir. Böylece Model 1 ve Model 2'ye göre %100 erime süresinde artış meydana gelmiştir. Kanatlar arası açının artırılması üst bölgedeki kanatlar arasındaki akışkan hızının da artmasına neden olduğundan Model 3 için en düşük şarj süresi 25 dakika ile $\alpha=60^\circ$ 'de elde edilmiştir. Kanat dağılımının bir sonucu olarak en yüksek FDM sıcaklıkları da FDM haznesinin üst bölgesinde elde edilmiştir.

a) Model 3 30°



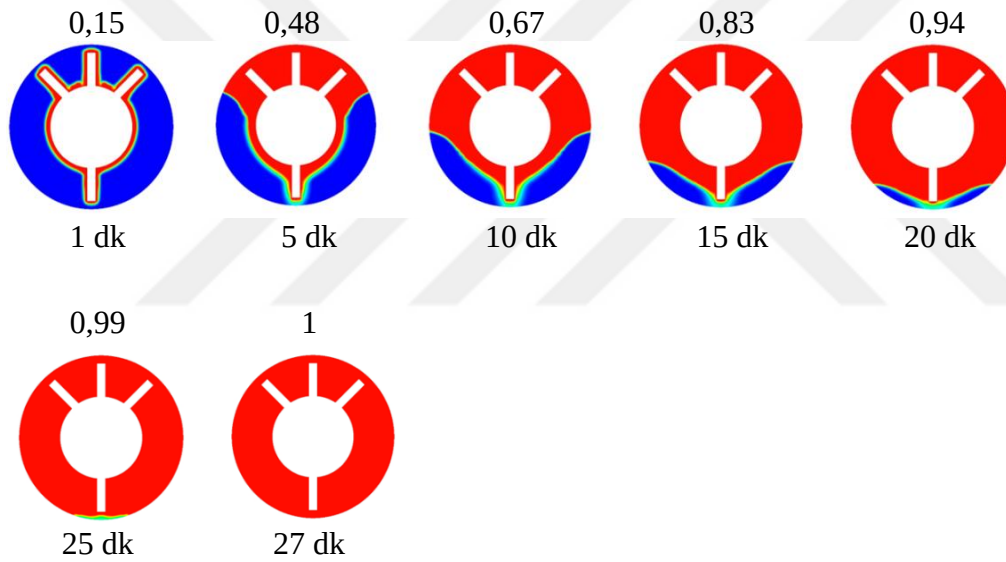
Şekil 5.5. Model 3 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları
a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$

Hız Konturları

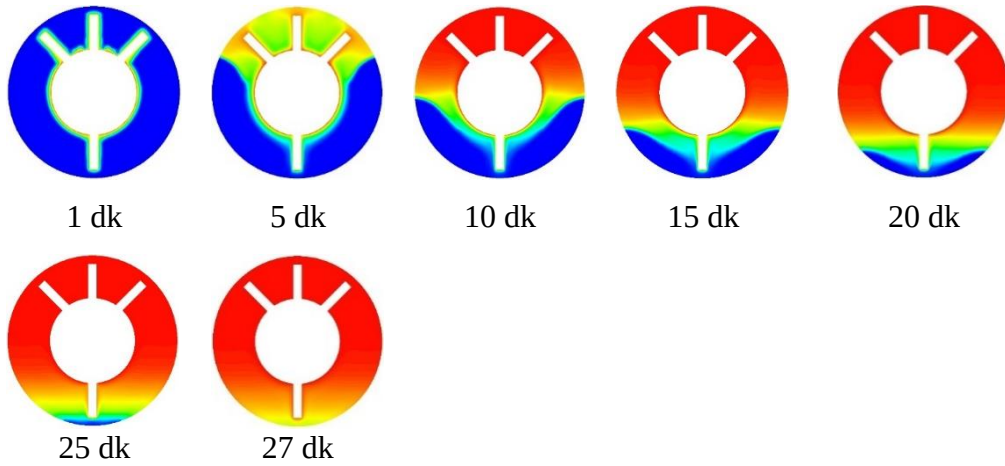


b) Model 3 45°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları

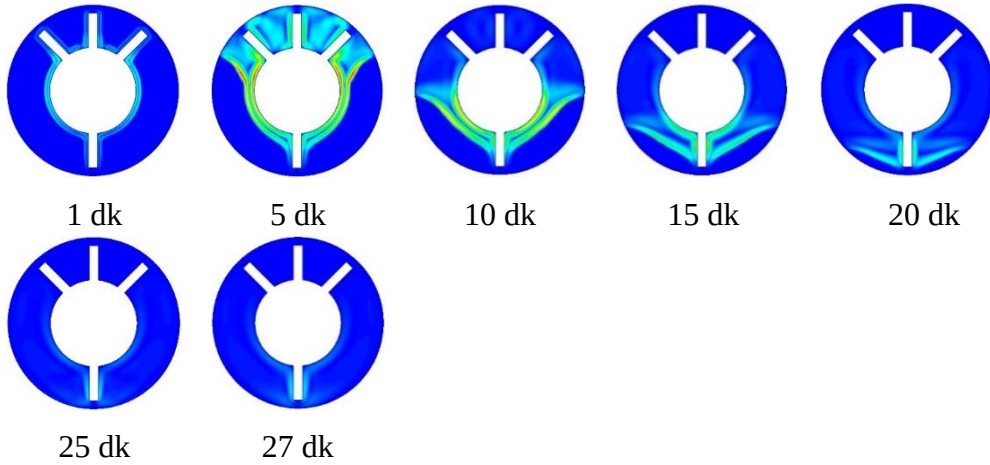


Sıcaklık Konturları



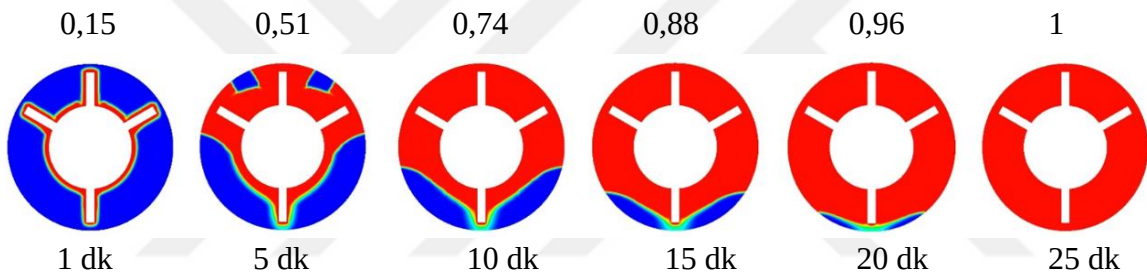
Şekil 5.5. (devamı)

Hız Konturları

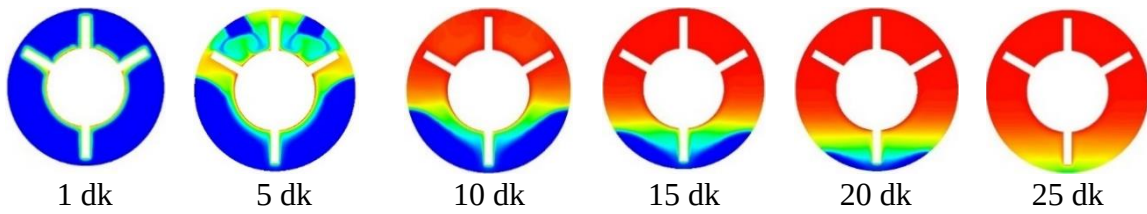


c) **Model 3 60°**

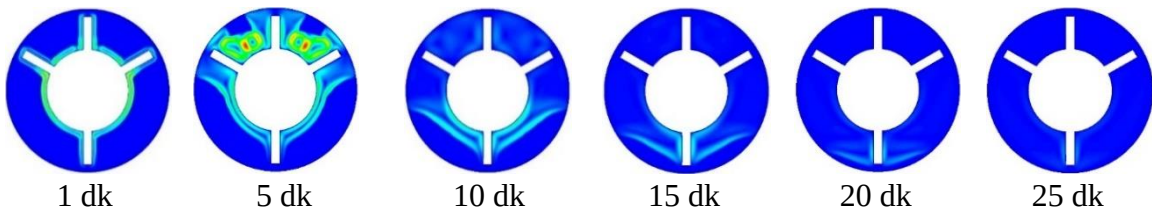
Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları



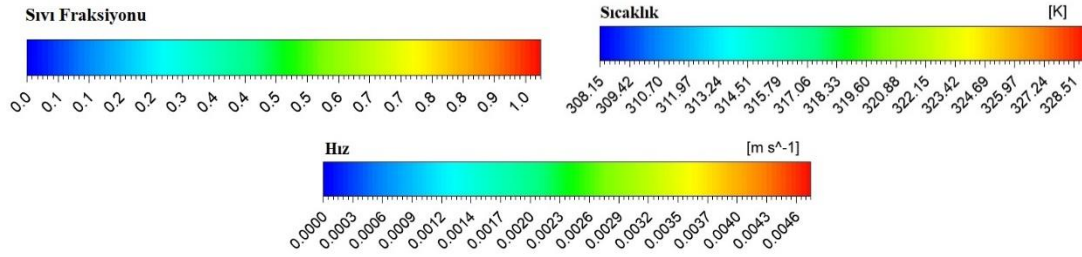
Sıcaklık Konturları



Hız Konturları



Şekil 5.5. (devamı)



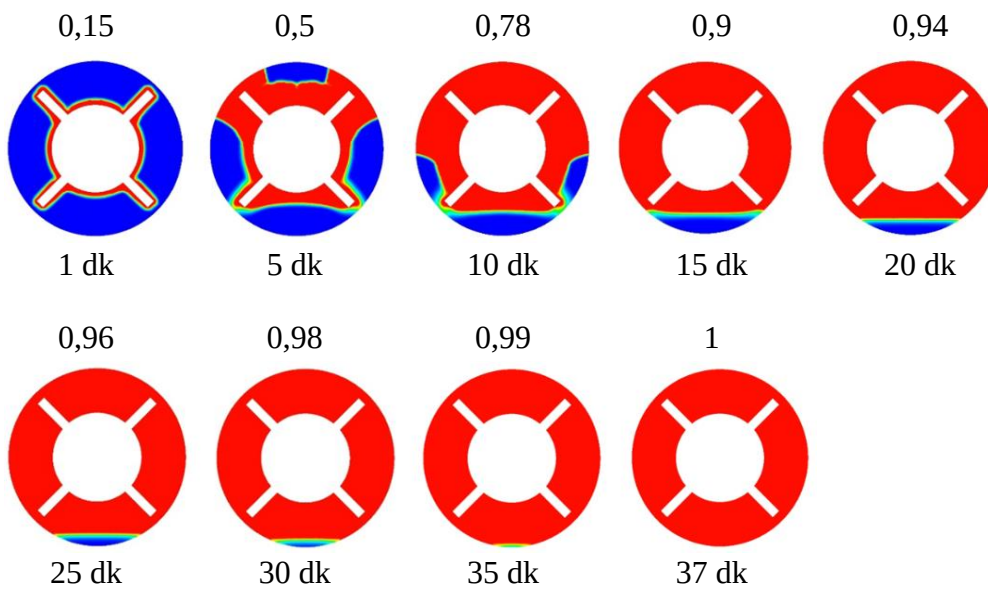
Şekil 5.5. (devamı)

Şekil 5.6.'da verilen Model 4, Model 1'deki kanat yerleşiminin 45° açıyla döndürülmesi sonucu elde edilmiştir. Ancak bu yerleşim alt bölgedeki erime hızını büyük oranda düşürdüğünden diğer tüm modellere göre en yüksek şarj süresi elde edilmiştir (37 dakika).

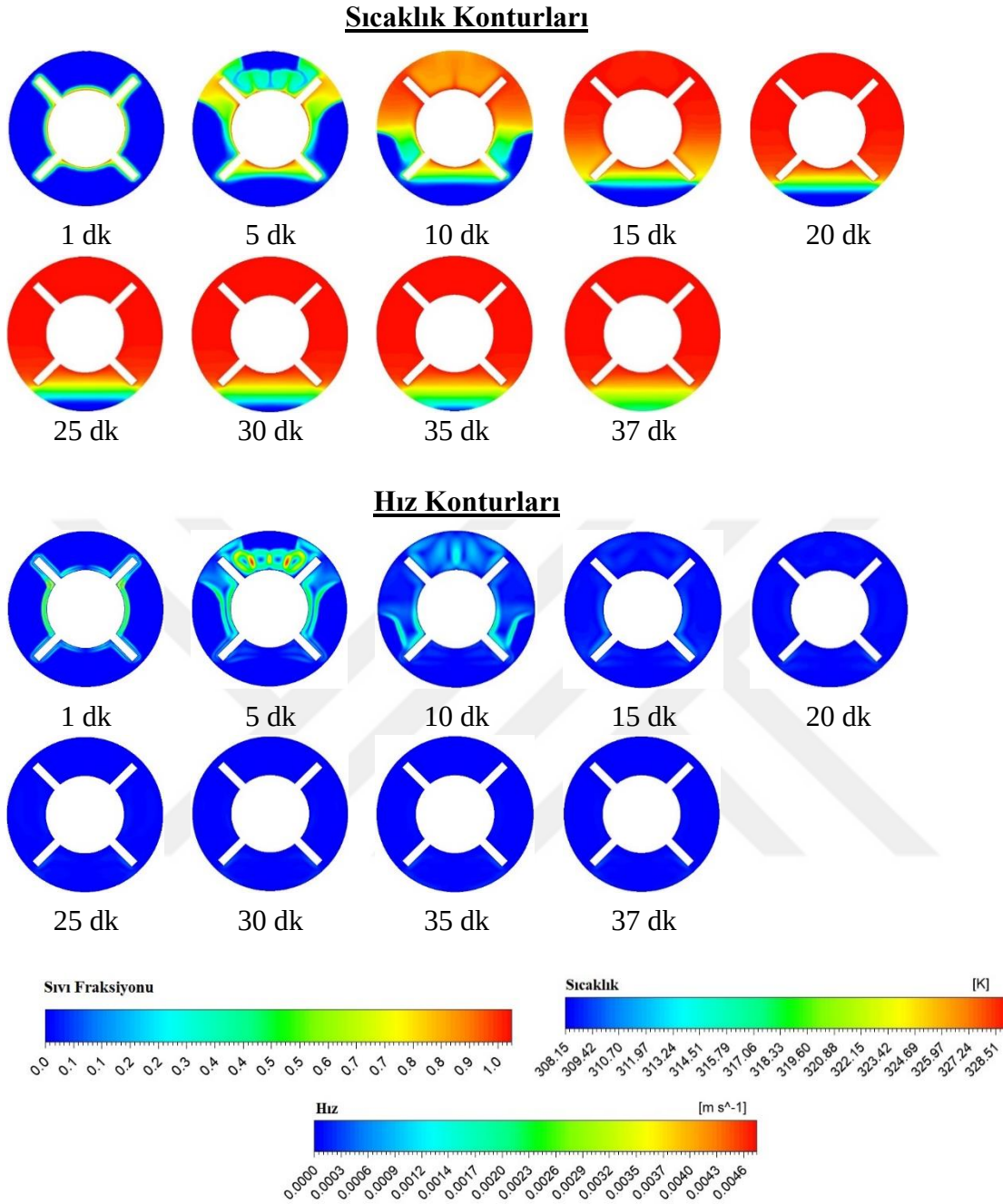
Hız konturlarından akışkan hareketinin yalnızca üst bölgede belirgin olduğu görülmektedir. Yani üst bölgede ısı transferi konveksiyon mekanizması ağırlıklı gerçekleşirken diğer bölgelerde iletim mekanizmasının daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca FDM haznesinin alt ve üst bölgesi arası en yüksek sıcaklık farkının da bu modelde meydana geldiği gözlenmiştir. Bu durum depolanan enerjinin geri kazanımında ısı performansının düşük olmasına neden olabilir.

Model 4

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları



Şekil 5.6. Model 4 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları

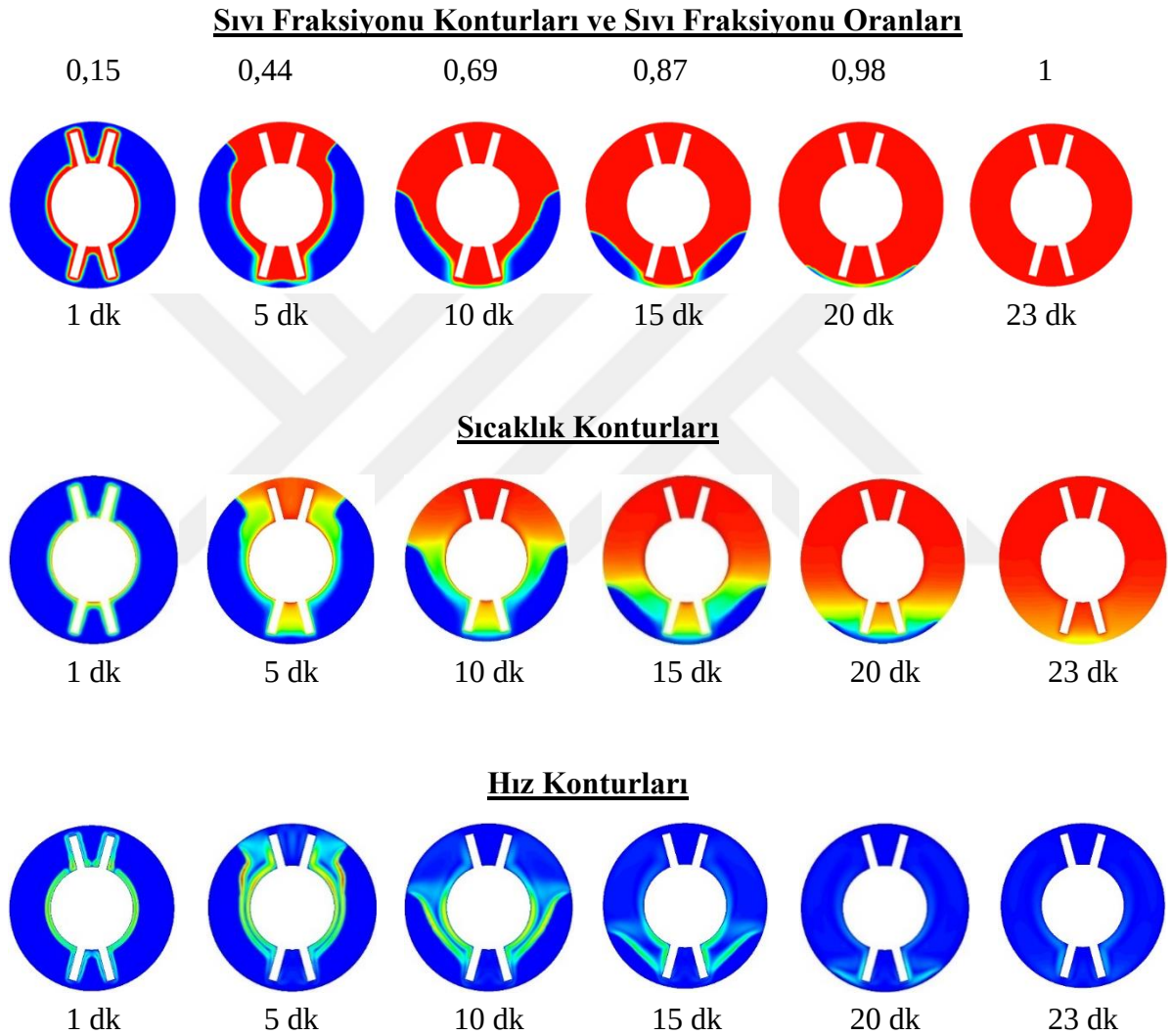


Şekil 5.6. (devamı)

Model 5’de ise iç borunun alt ve üst yüzeyine ikişer kanat yerleştirilerek üniform bir kanat dağılımı gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.7.). Bu kanat yerleşim düzeni ile hem alt bölgede oluşan doğal konveksiyonun akımının artırılması hem de üst bölgedeki erimenin de hız kaybetmemesi amaçlanmıştır. Kanatlar arası açının 30°’den 45°’ye çıkarılması ile özellikle üst bölgedeki kanatlar arasındaki erimiş FDM’nin hareketinin arttığı hız konturlarından gözlenmektedir. Bu durum şarj süresinin 23 dakikadan 22 dakikaya düşmesini sağlamıştır. Ancak α değeri 60°’ye çıktığında üst bölgedeki kanatlar arası doğal konveksiyon hızı daha

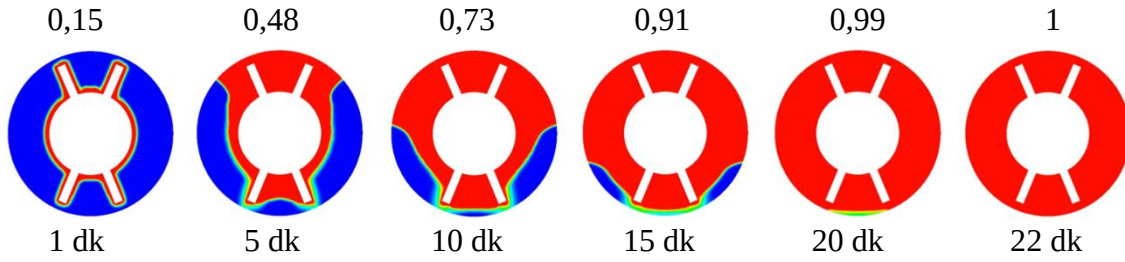
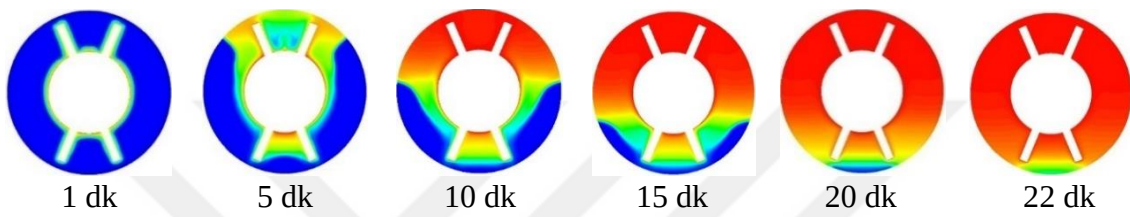
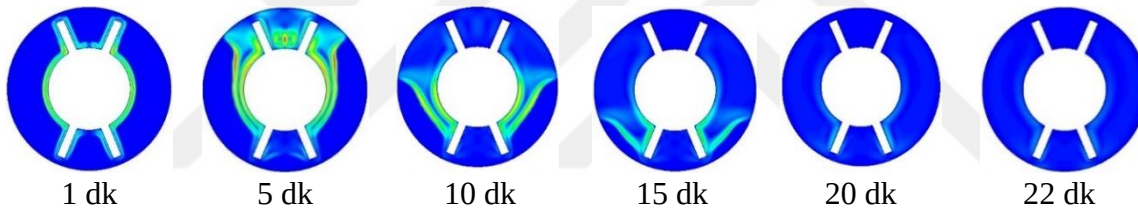
da artmasına rağmen şarj süresinde artış meydana gelmiştir (25 dakika). Bu durum alt bölgedeki kanatlar arası açının 60° olmasının alt bölgedeki doğal konveksiyon akışının etkisini düşürmesi sonucu oluşmuştur. Model 5 için şarj süresi açısından en uygun yerleşimin $\alpha=45^\circ$ olduğu anlaşılmaktadır.

a) Model 5 30°

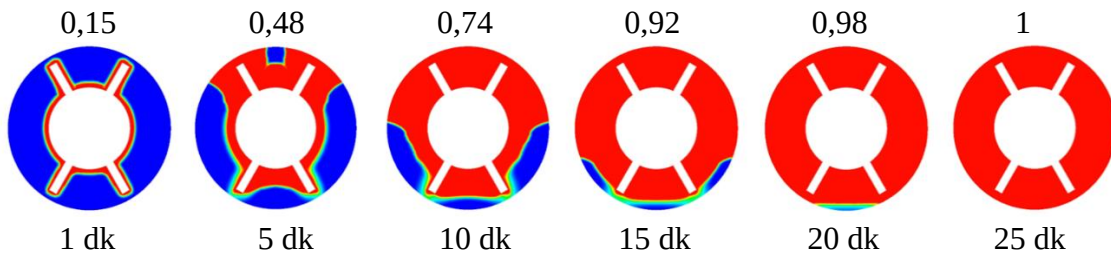
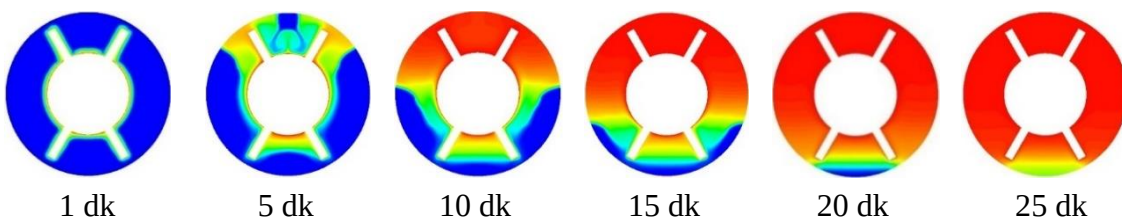


Şekil 5.7. Model 5 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları
a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$

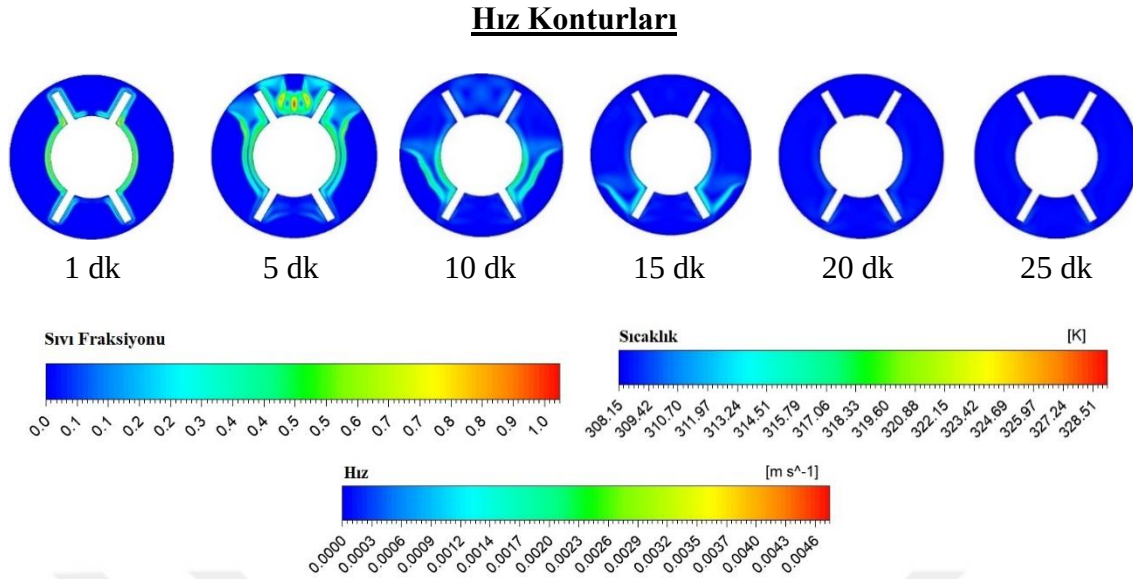
b) Model 5 45°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu OranlarıSıcaklık KonturlarıHız Konturları

c) Model 5 60°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu OranlarıSıcaklık Konturları

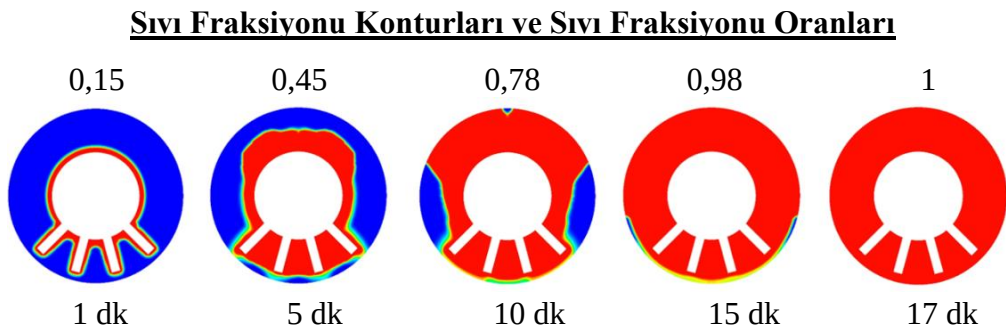
Şekil 5.7. (devamı)



Şekil 5.7. (devamı)

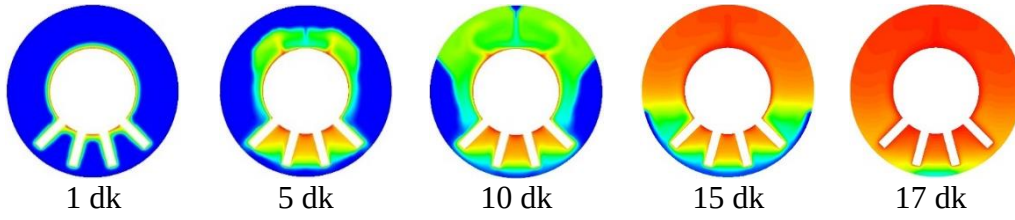
Tüm kanatların iç borunun alt yüzeyine yoğunlaştırıldığı konfigürasyon ise Model 6 ile ifade edilmiştir (Şekil 5.8.). Kanatların FDM haznesinin alt bölgesinde yoğunlaşması o bölgedeki erimeyi hızlandırırken aynı zamanda doğal konveksiyon akışının da önemli ölçüde artmasını sağlamıştır. Bu nedenle diğer modellerle kıyaslandığında en düşük şarj süreleri Model 6 ile elde edilmiştir (16-17 dakika). Kanatlar arası açının 30°'den 45°'ye çıkması kanatların olduğu bölgedeki akışkan hareketinin artmasını sağlamış ve böylece şarj süresinde bir dakikalık düşüş meydana gelmiştir. 60°'lik kanatlar arası açı değeri kanatlar arasındaki akışkan hareketini artırmasına rağmen iç borunun alt bölgesindeki erime hızının düşmesine neden olmuştur. Bu nedenle şarj süresi 21 dakikaya çıkmıştır.

a) Model 6 30°

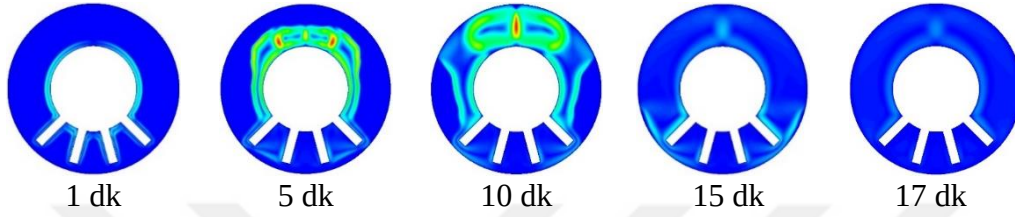


Şekil 5.8. Model 6 erime analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları
a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$

Sıcaklık Konturları

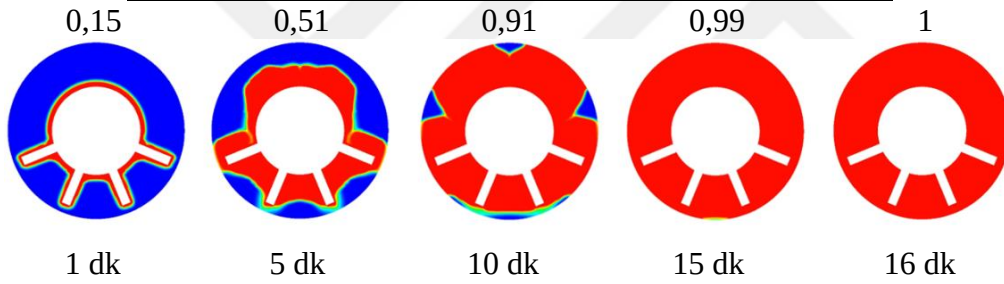


Hız Konturları

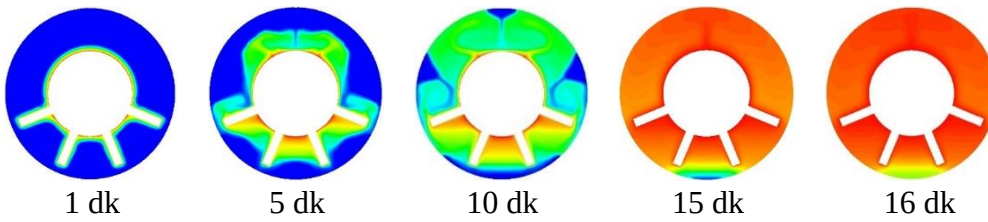


a) Model 6 45°

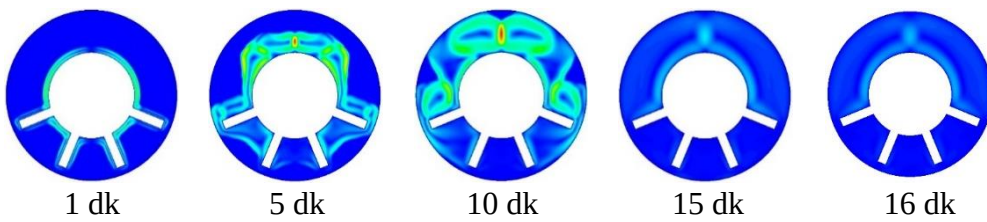
Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları



Sıcaklık Konturları

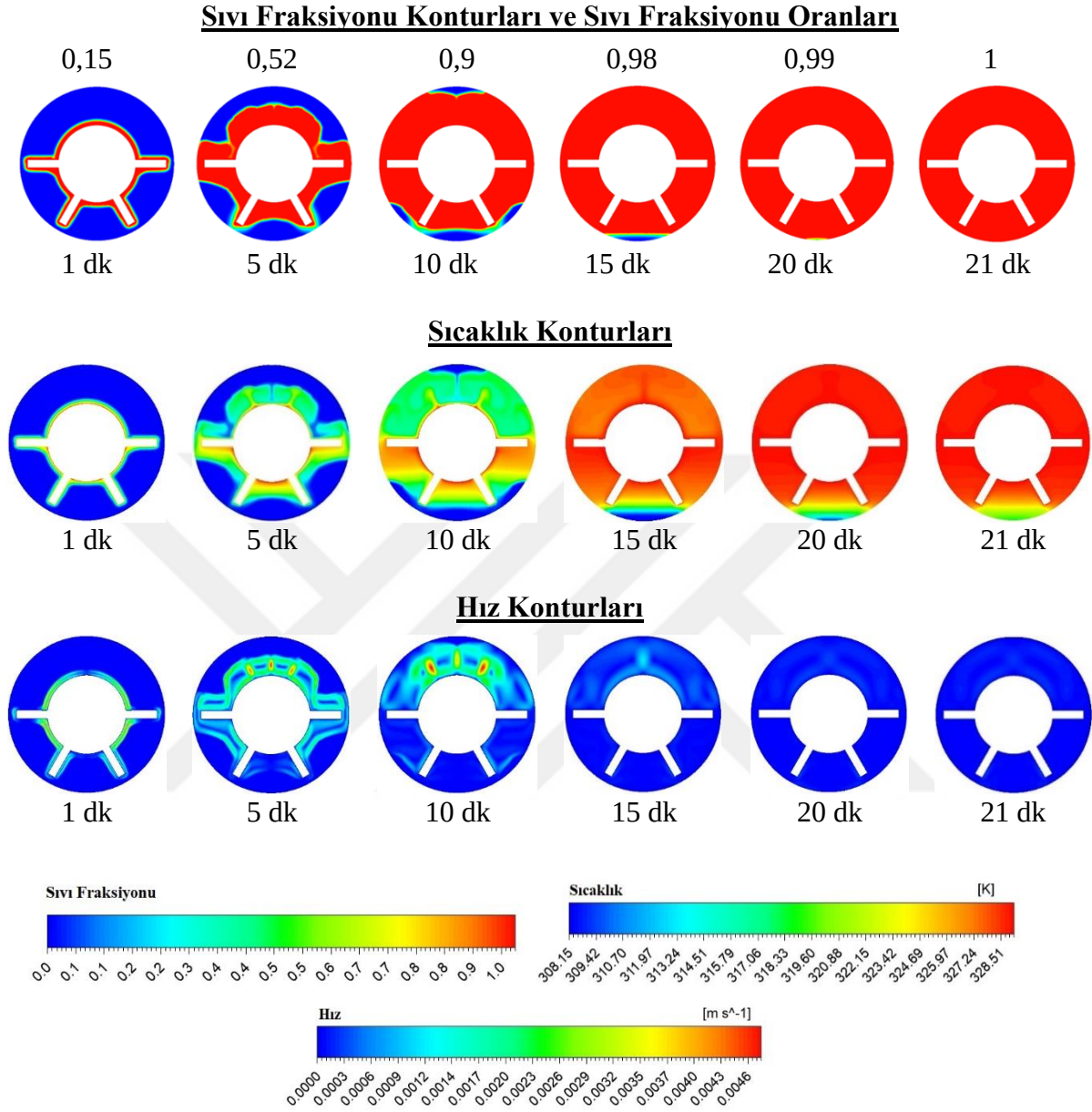


Hız Konturları



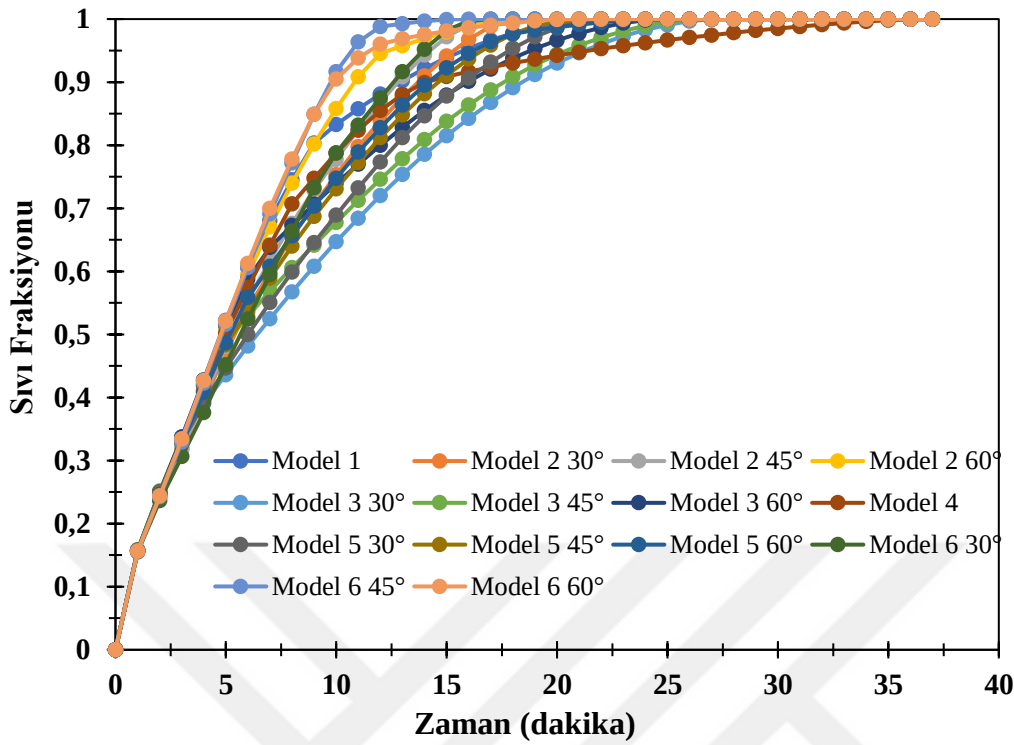
Şekil 5.8. (devamı)

b) Model 6 60°



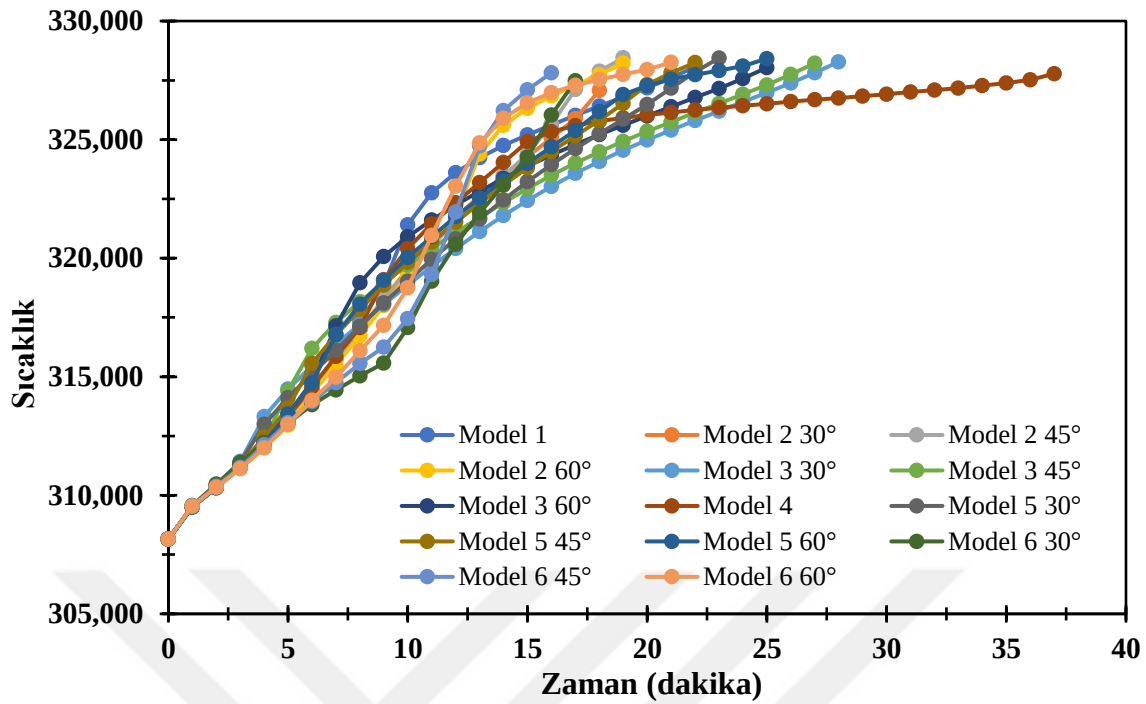
Şekil 5.8. (devamı)

Şekil 5.9.'da tüm kanat yerleşim konfigürasyonlarında zamana bağlı oluşan sıvı fraksiyonu eğrileri verilmiştir. Kanat yerleşim düzenleri erime hızının farklı zamanlarda farklı davranışlar sergilemesine neden olmuştur. Model 6'daki kanat yerleşim konfigürasyonları için sıvı fraksiyonu eğrisinin eğimi diğer eğrilere göre oldukça yüksektir. Bu durum Model 6 ile %100 erimeye hızlı bir şekilde ulaşıldığını göstermektedir. Model 4'de diğer modellere göre sıvı fraksiyonunun 1'e ulaşması (%100 erime) daha uzun sürmüştür. Ancak Model 4, 20. dakikaya kadar birçok modele göre daha hızlı erime davranışı sergilemiştir.



Şekil 5.9. Tüm modeller için erime periyodundaki sıvı fraksiyonunun zamana bağlı değişim grafiği

Erime periyodunda FDM'in zamana bağlı ortalama sıcaklık değişimi ise Şekil 5.10 ile sunulmuştur. %100 erime sonunda ulaşılan sıcaklık enerji depolama kapasitesinin bir ölçüsüdür. Tüm modeller için şarj süresi sonunda ulaşılan sıcaklık değeri birbirine oldukça yakındır ve 327-328 K civarındadır. Sıcaklık artış hızları Şekil 5.9 verilen sıvı fraksiyonu eğrilerine paralel bir karakteristik sergilemiştir. Fark çok düşük olsa da en yüksek FDM sıcaklığına $\alpha=30^\circ$ açılı Model 3 ile ulaşılmıştır (328,282 K). Ancak diğer modellerdeki oluşan sıcaklık değerleri ile arasındaki fark %0,5'in altında kalmıştır. Bu nedenle tüm modellerin eşit enerji depolama kapasitesine sahip olduğu söylenebilir. Böylece şarj süresi en düşük olan Model 6'nın enerji depolama için tercih edilmesi gerektiği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.10. Tüm modelleri için erime periyodundaki ortalama FDM sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği

Çizelge 5.1.'de tüm modeller için elde edilen şarj süreleri ve referans modele göre şarj sürelerindeki artış veya azalma topluca verilmiştir. Tablo incelendiğinde kanatlar arası açısı 45° olan Model 6 ile en düşük şarj süresine ulaşılmış (16 dakika) ve referans modele göre şarj süresinde %27,2 düşüş sağlanmıştır. En yüksek şarj süresi ise Model 4'de oluşmuş (37 dakika) ve referans modele göre şarj süresi %68,2 oranında artmıştır.

Çizelge 5.1. Modeller ve erime süreleri

Çalışma Modelleri	Şarj Süreleri	Artış/Azalma (%)
Model 1 (Referans Model)	22 dk	-
30° 45° 60° Model 2 $\alpha=30^\circ$ Model 2 $\alpha=45^\circ$ Model 2 $\alpha=60^\circ$	18 dk 19 dk 19 dk	18,1 ↓ 13,6 ↓ 13,6 ↓
30° 45° 60° Model 3 $\alpha=30^\circ$ Model 3 $\alpha=45^\circ$ Model 3 $\alpha=60^\circ$	28 dk 27 dk 25 dk	27,2 ↑ 22,7 ↑ 13,6 ↑

Çizelge 5.1. (devamı)

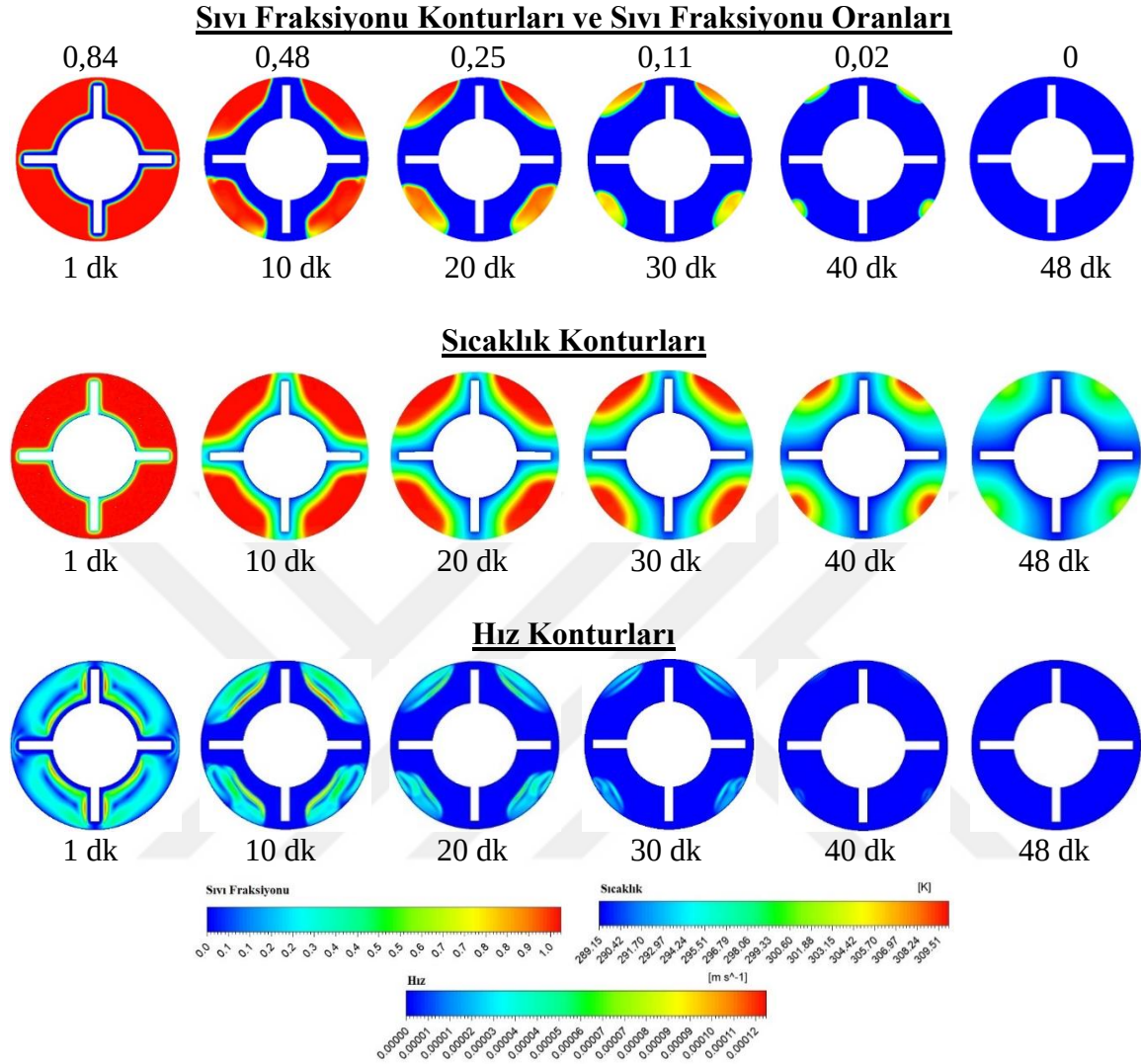
	Model 4	37 dk	68,1 ↑
   30° 45° 60°	Model 5 $\alpha=30^\circ$ Model 5 $\alpha=45^\circ$ Model 5 $\alpha=60^\circ$	23 dk 22 dk 25 dk	4,5 ↑ 0 13,6 ↑
   30° 45° 60°	Model 6 $\alpha=30^\circ$ Model 6 $\alpha=45^\circ$ Model 6 $\alpha=60^\circ$	17 dk 16 dk 21 dk	22,7 ↓ 27,2 ↓ 4,5 ↓

5.3 Katılaşma Analizi Bulguları

Katılaşma mekanizması erime mekanizmasına göre daha uzun süren bir prosestir. Katılaşma katı yüzeylerden başlamakta ve zamanla sıvı FDM ve iç boru arasındaki katı FDM kalınlığı giderek artmaktadır. FDM kalınlığındaki bu artış ısı direnç oluşturarak iç boru ve sıcak olan sıvı fazdaki FDM arasındaki ısı geçişinin yavaşlamasına neden olmaktadır. Böylecedeşarj süreci şarj sürecine göre daha uzun zaman almaktadır. Ayrıca katılaşma sırasında sıvı FDM'deki doğal konveksiyon akışının kanat yüzeylerinden uzakta gerçekleşmesi, kanat dağılımının doğal konveksiyon akışına etkisini de ihmal edilebilecek seviyeye düşürmektedir. Bu nedenle katılaşma hızı doğal konveksiyon mekanizmasından çok iletimle ısı transferi mekanizmasına bağlı hale dönüşmektedir. Deşarj sürecinin uzun sürmesi daha uzun süre iç borudaki akışkana enerji sağlayacağından nispeten tercih edilen bir durumdur.

Kanatların uniform ya da uniform olmayan yerleşim düzenine bağlı olarak iç boru ve sıvı FDM arasındaki katı bölge kalınlığı değişmektedir. İki yüzey arasındaki iletimle ısı transferi yüzeyler arası mesafenin artmasıyla azalır. Bu fiziksel olguya bağlı olarak farklıdeşarj süreleri ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Şekil 5.11'de referans geometri için elde edilen bulgular yer almaktadır. Model 1'deki düzenli kanat yerleşimi FDM haznesinin her bölgesinde hemen hemen eşit katılaşma hızı sağlamış ve 48 dakika sonunda %100 katılaşma gerçekleşmiştir. Sıcaklık konturlarından görüldüğü gibi kanat ve iç boru yüzeyi en soğuk bölgeler olduğundan bu bölgelerdeki FDM diğer bölgelerdeki FDM'ye göre daha düşük sıcaklıktadır. %100 katılaşmaya ulaşmaya kadar sıvı fazdaki FDM'nin bulunduğu bölgelerde akışkan hareketi devam etmiştir.

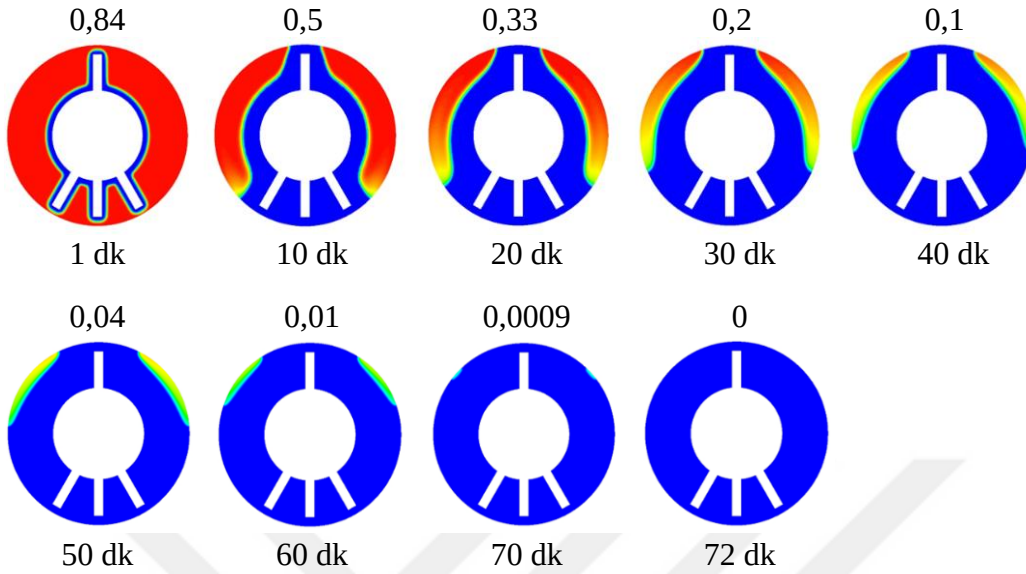
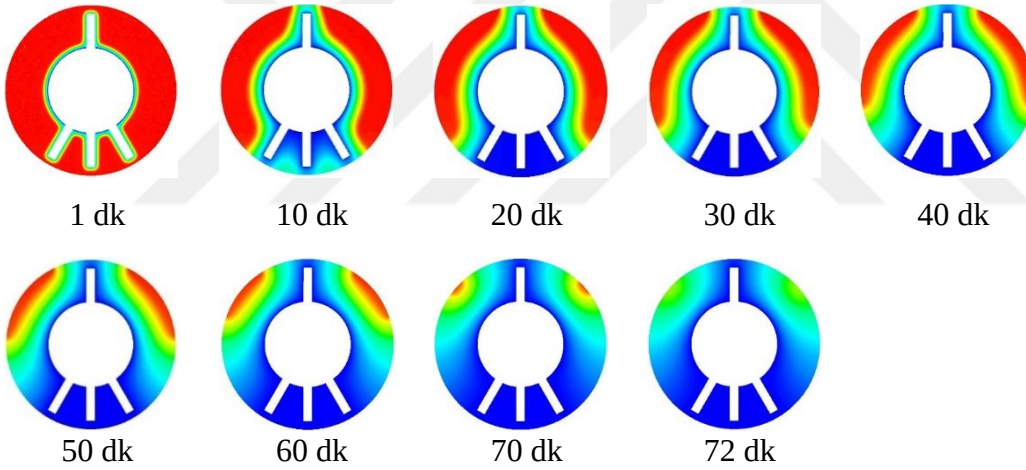
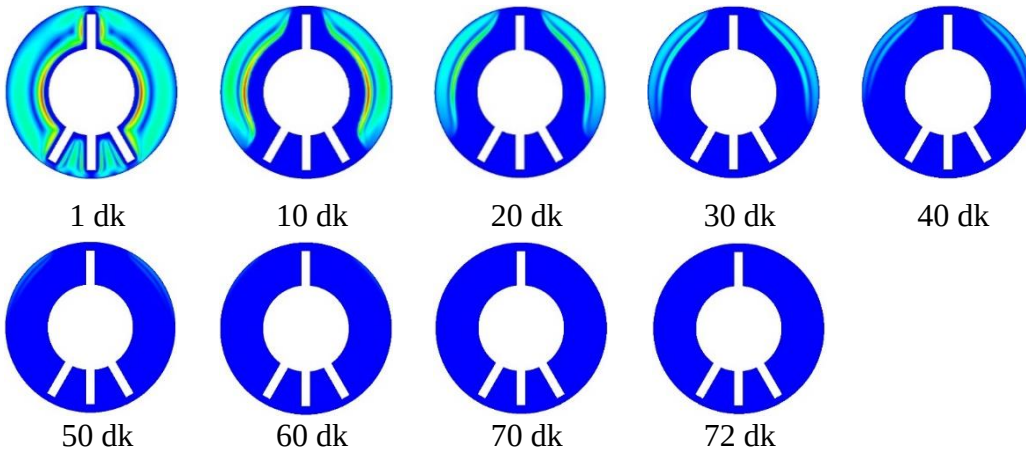
Model 1



Şekil 5.11. Model 1 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları

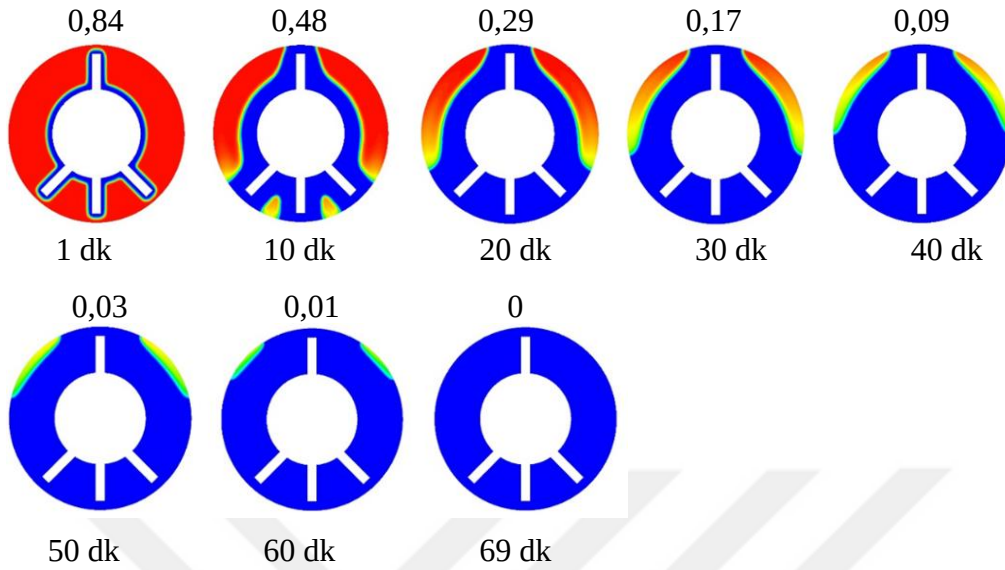
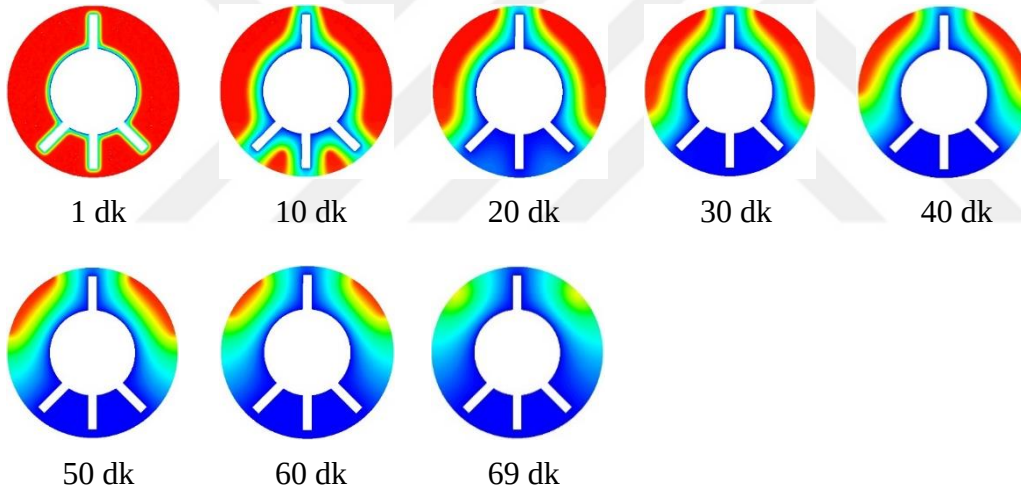
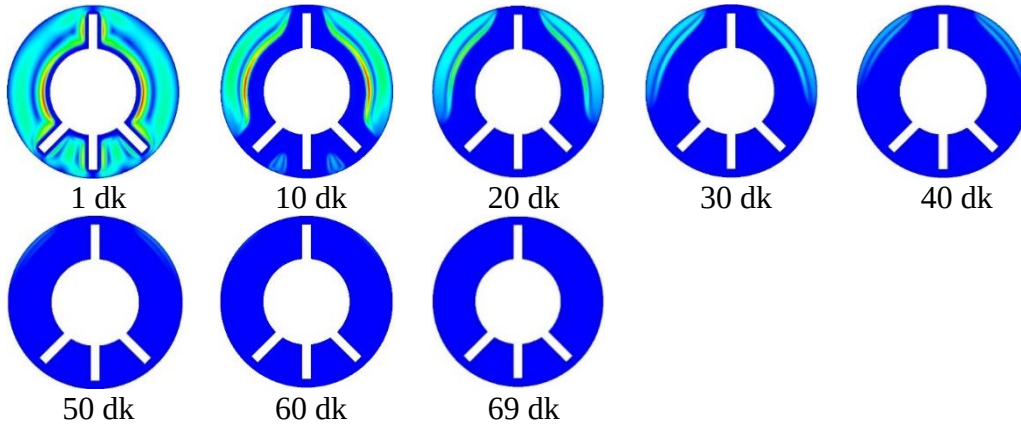
Model 2'deki kanat yerleşim düzenlerinde alt bölgelerdeki katılaşma hızı üst bölgeye göre daha hızlı gerçekleşmiştir. Kanatlar arası açının $\alpha=30^\circ$ değeri için en düzensiz kanat dağılımı meydana gelmiş ve en uzun deşarj süresi de bu konfigürasyonda oluşmuştur (72 dakika). Açı değerinin $\alpha=45^\circ$ ve $\alpha=60^\circ$ değerine çıkmasıyla deşarj süreside sırasıyla 69 dakikaya ve 64 dakikaya düşmüştür. Tüm açı değerleri için deşarj sonunda FDM ortalama sıcaklıklarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmektedir.

a) Model 2 30°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları**Sıcaklık Konturları****Hız Konturları**

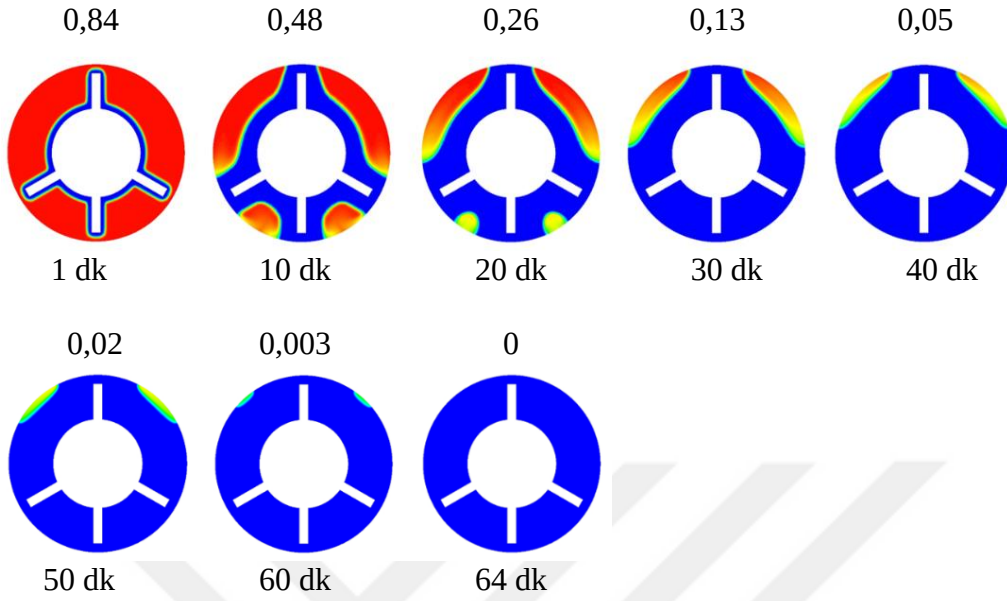
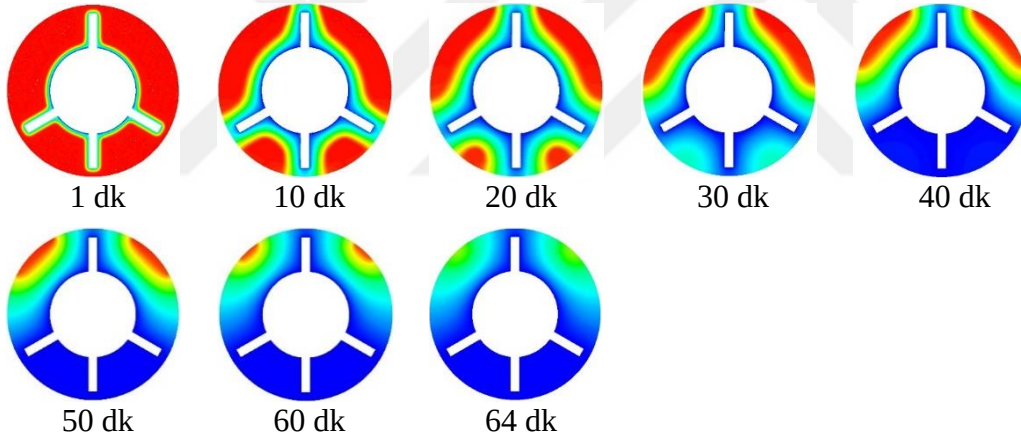
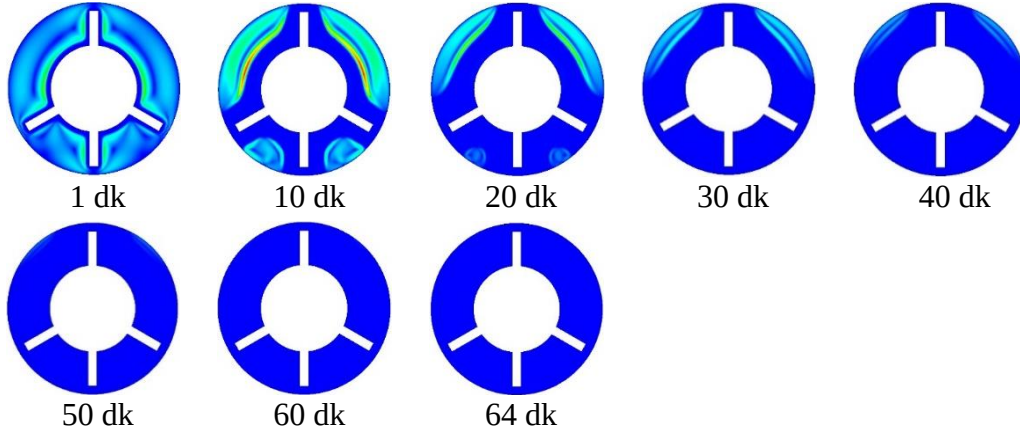
Şekil 5.12. Model 2 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$

b) Model 2 45°

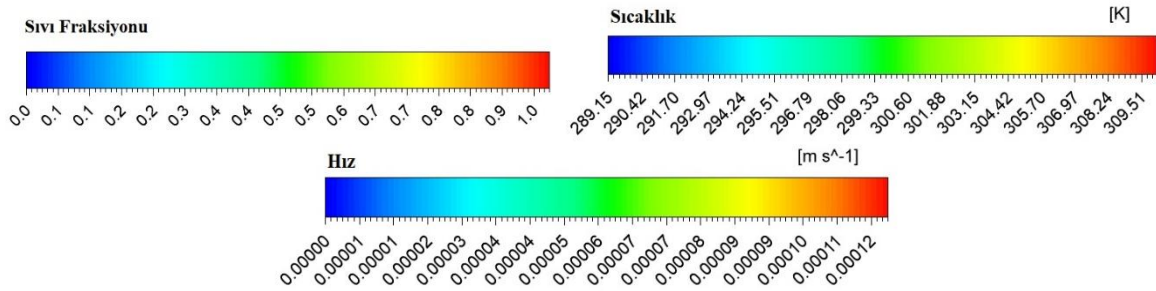
Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları**Sıcaklık Konturları****Hız Konturları**

Şekil 5.12. (devamı)

c) Model 2 60°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları**Sıcaklık Konturları****Hız Konturları**

Şekil 5.12. (devamı)

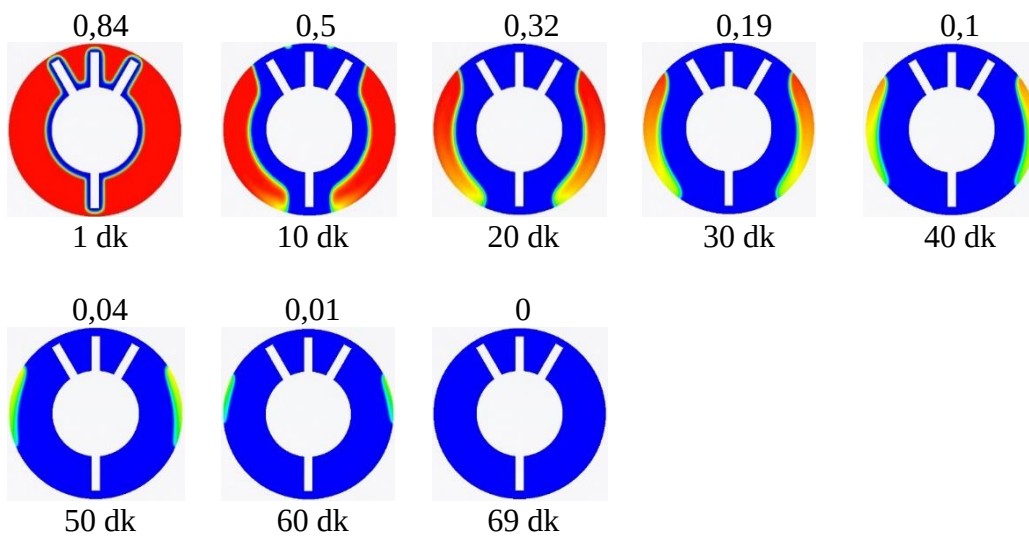


Şekil 5.12. (devamı)

Şekil 5.13’de verilen Model 3, Model 2’nin tersi düzende kanat dağılımına sahiptir. Ancak Model 2’deki bulgulara benzer şekilde bir katılaşma karakteristiği sergilemiştir. Doğal konveksiyonla ısı transferi etkisinin katılaşmada düşük olması bu benzer karakteristiğin oluşumundaki temel faktördür. Model 2’de olduğu gibi, Model 3’de de kanatlar arası açı değerinin artışı daha uniform bir kanat dağılımı sağlamış ve %100 katılaşma süresini düşürmüştür. Tüm açı değerlerindekideşarj süreleri incelendiğinde Model 2’ye göre düşük seviyede de olsa daha kısadeşarj süreleri elde edilmiştir. Bu durum iç borunun alt yüzeyinde bir kanat olmasına rağmen kanat etrafındaki sıvı FDM’de doğal konveksiyon akışı ile soğuma hızlanmıştır. Böylece tek kanat olan bölgede de katılaşma hızı bir miktar artarak Model 2’ye göre 2-3 dakika arası daha düşükdeşarj süreleri meydana gelmiştir.

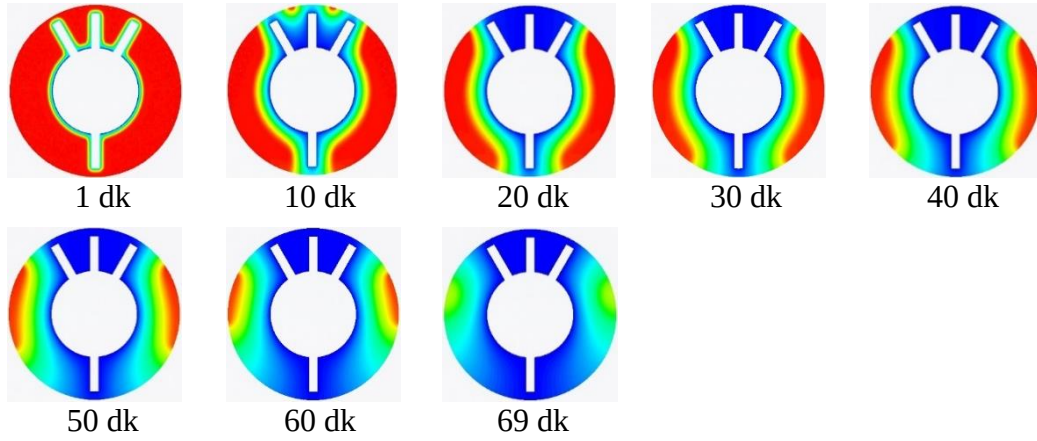
a) Model 3 30°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları

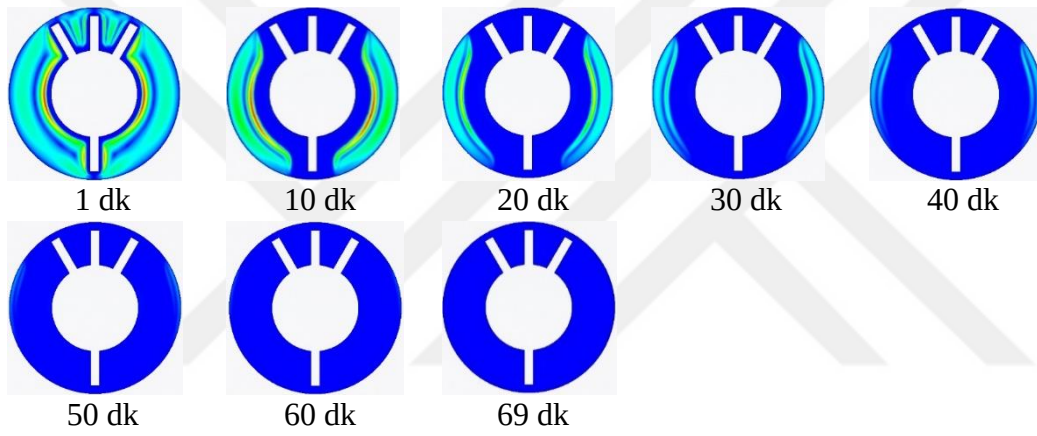


Şekil 5.13. Model 3 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$

Sıcaklık Konturları

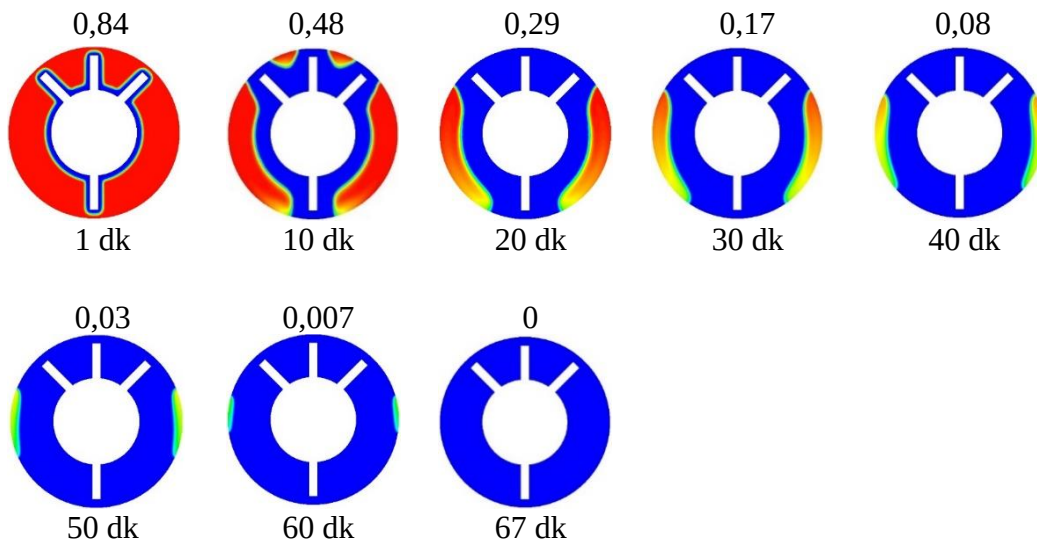


Hız Konturları



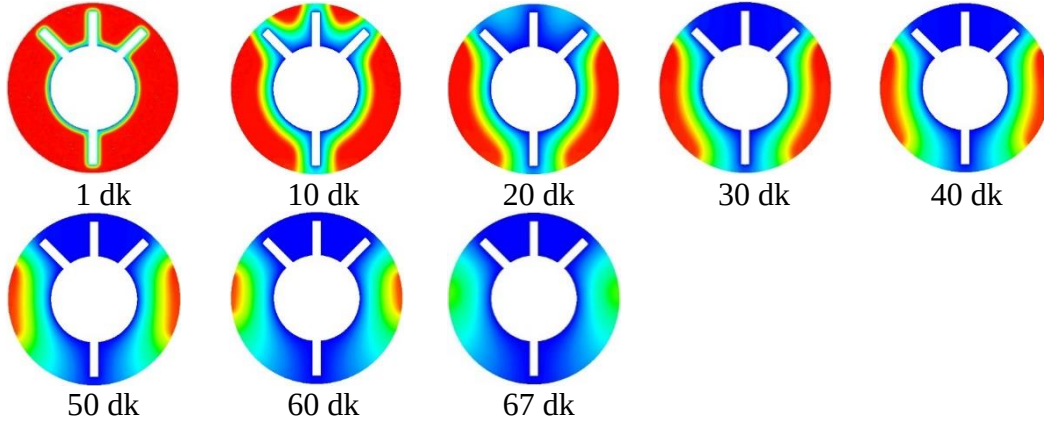
b) Model 3 45°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları

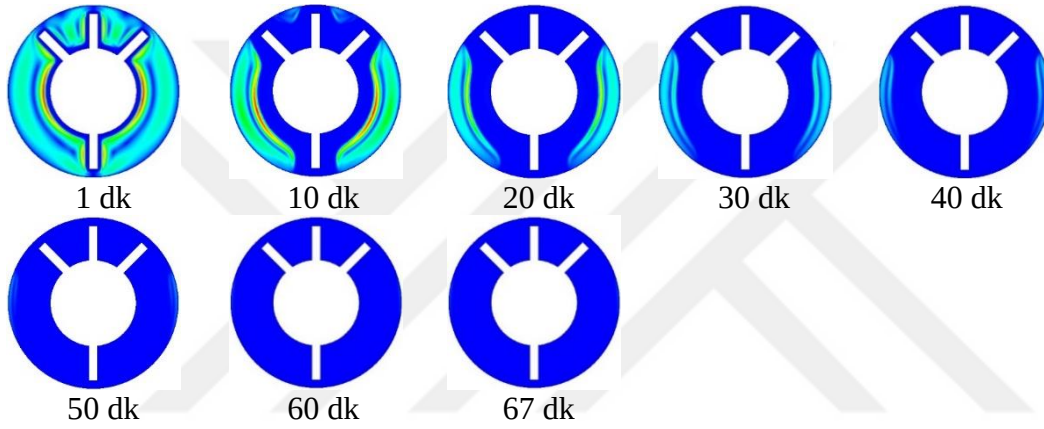


Şekil 5.13. (devamı)

Sıcaklık Konturları

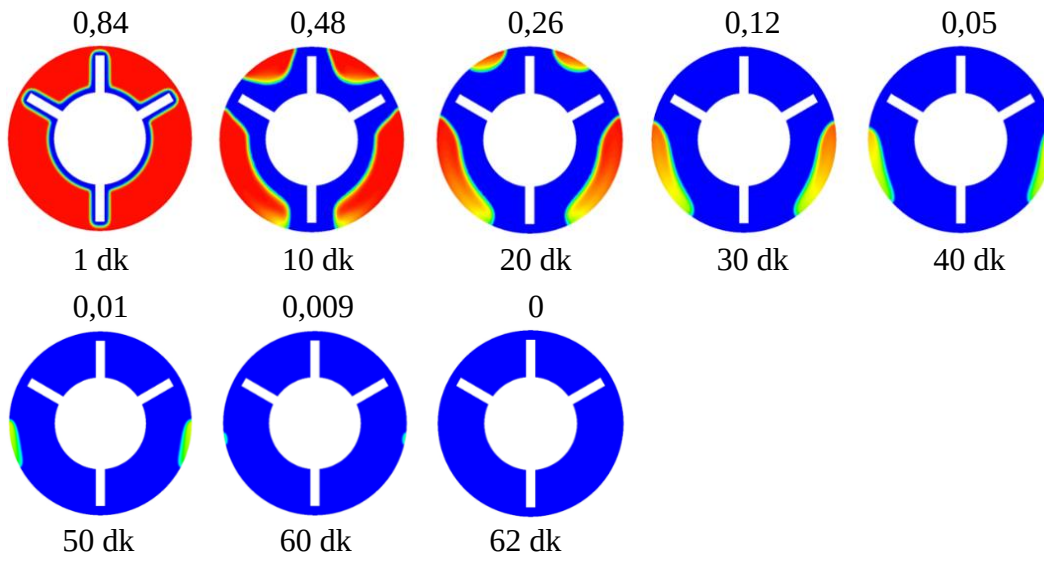


Hız Konturları

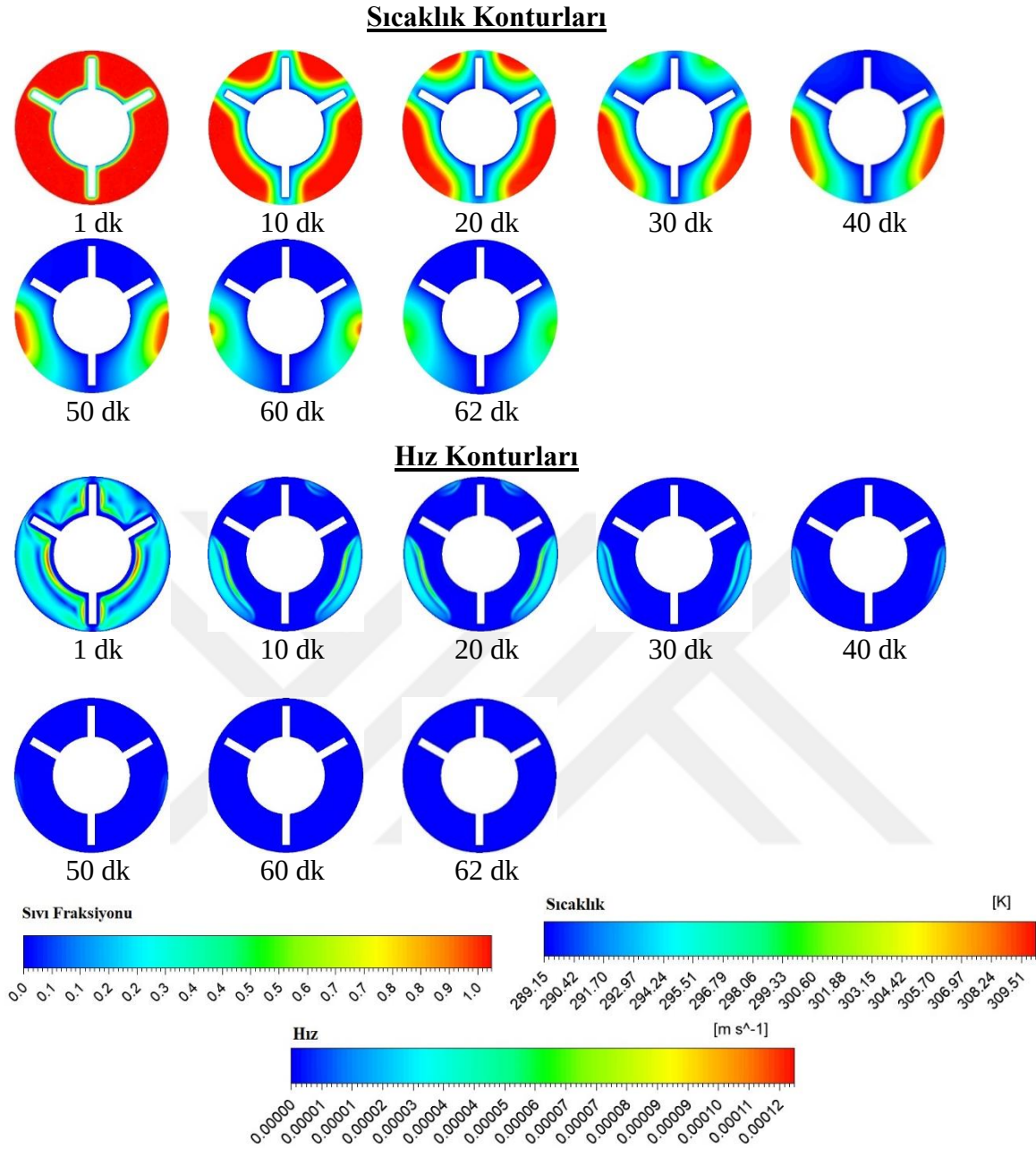


c) Model 3 60°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları



Şekil 5.13. (devamı)

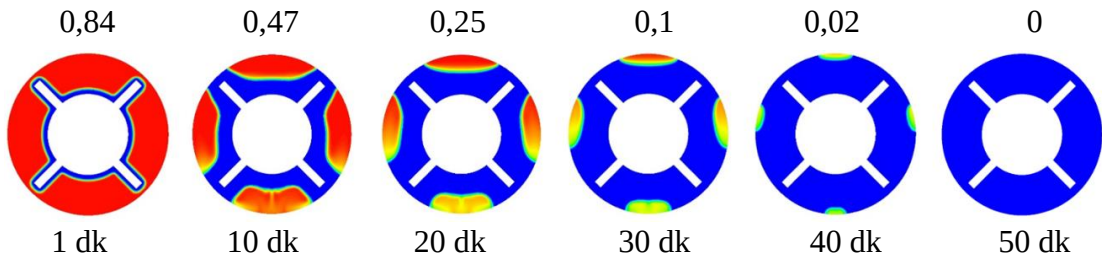


Şekil 5.13. (devamı)

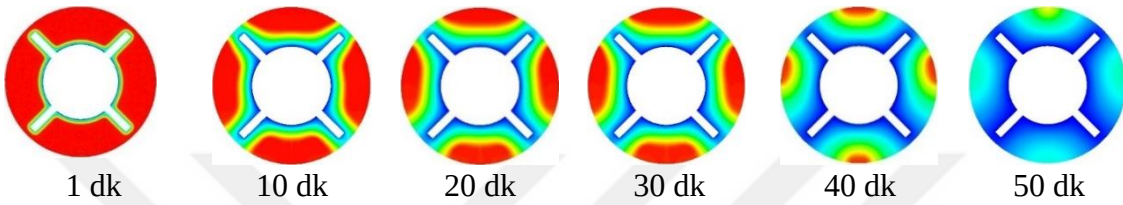
Model 4’de de Model 1’de olduğu gibi homojen bir kanat yerleşim düzeni mevcuttur (Şekil 5.14). Model 1’den farkı kanatların düşey eksenle 45° açı yapacak şekilde konumlandırılmasıdır. Model 4 ile 50 dakika sonunda %100 katılaşmaya ulaşılmıştır. Model 1’e göre deşarj süresi 2 dakika daha uzun sürmüştür. Kanatların 45° açılı yerleşimi neticesinde hız konturları incelendiğinde üst bölgedeki kanatlar arasında sıvı FDM’nin hareketinde Model 1’e göre azalma meydana geldiği görülmektedir. Bu azalma sıcak sıvı fazdaki FDM’den katı fazdaki FDM’ye ısı geçiş hızını da bir miktar düşürmüştür. Bu fiziksel olgu deşarj süresinde 2 dakikalık bir artışa neden olmuştur.

Model 4

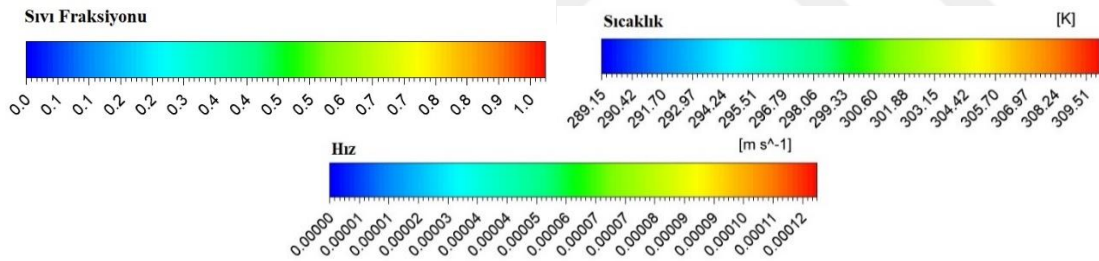
Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları



Sıcaklık Konturları



Hız Konturları

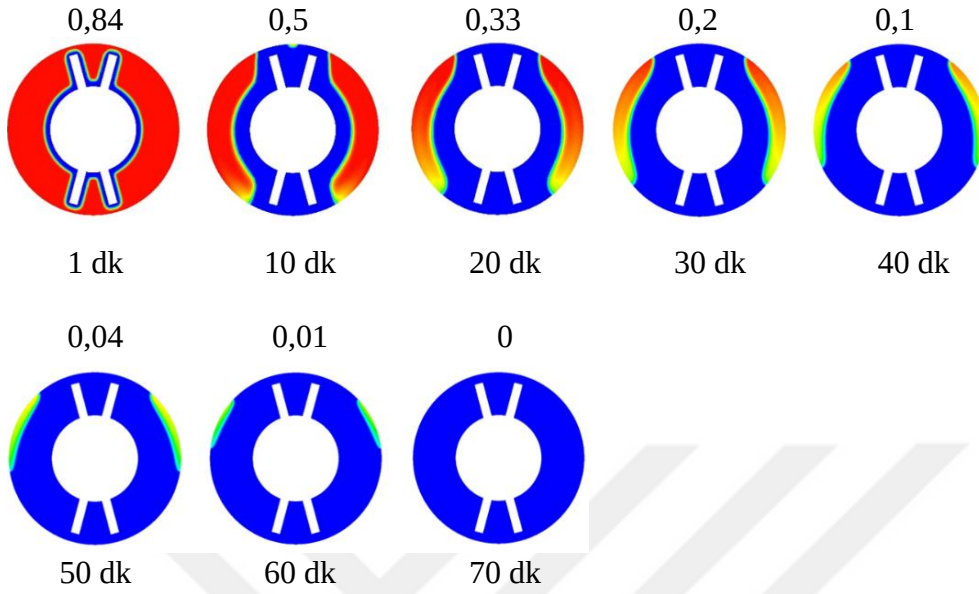


Şekil 5.14. Model 4 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları

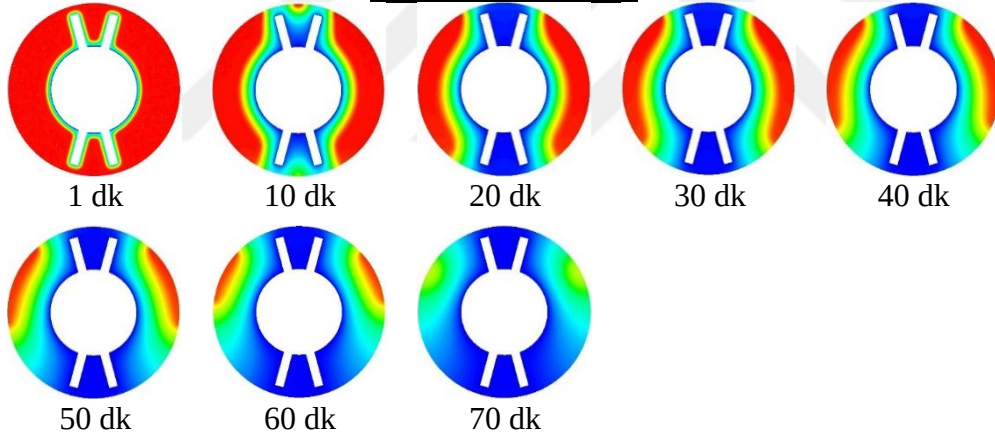
Model 5’de iç borunun alt ve üst yüzeylerine ikişer adet ve aralarında 30° , 45° ve 60° açı olacak şekilde kanat yerleşimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.15). Daha önceki düzgün kanat dağılımına sahip olmayan modellerde olduğu gibi Model 5’de de kanatlar arası açının artışı nispeten daha düzgün bir kanat dağılımı sağlamış ve deşarj süresinin düşmesine neden olmuştur. $\alpha=30^\circ$, 45° ve 60° için sırasıyla 70, 66 ve 62 dakikalık deşarj süreleri elde edilmiştir. Bu deşarj sürelerinin Model 2 ve 3’deki sonuçlara oldukça yakın olduğu görülmektedir.

a) Model 5 30°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları



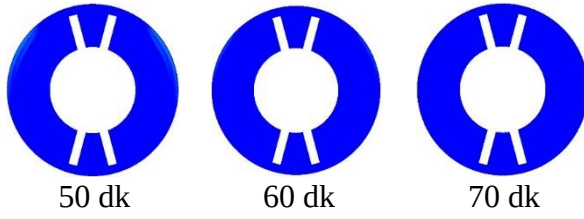
Sıcaklık Konturları



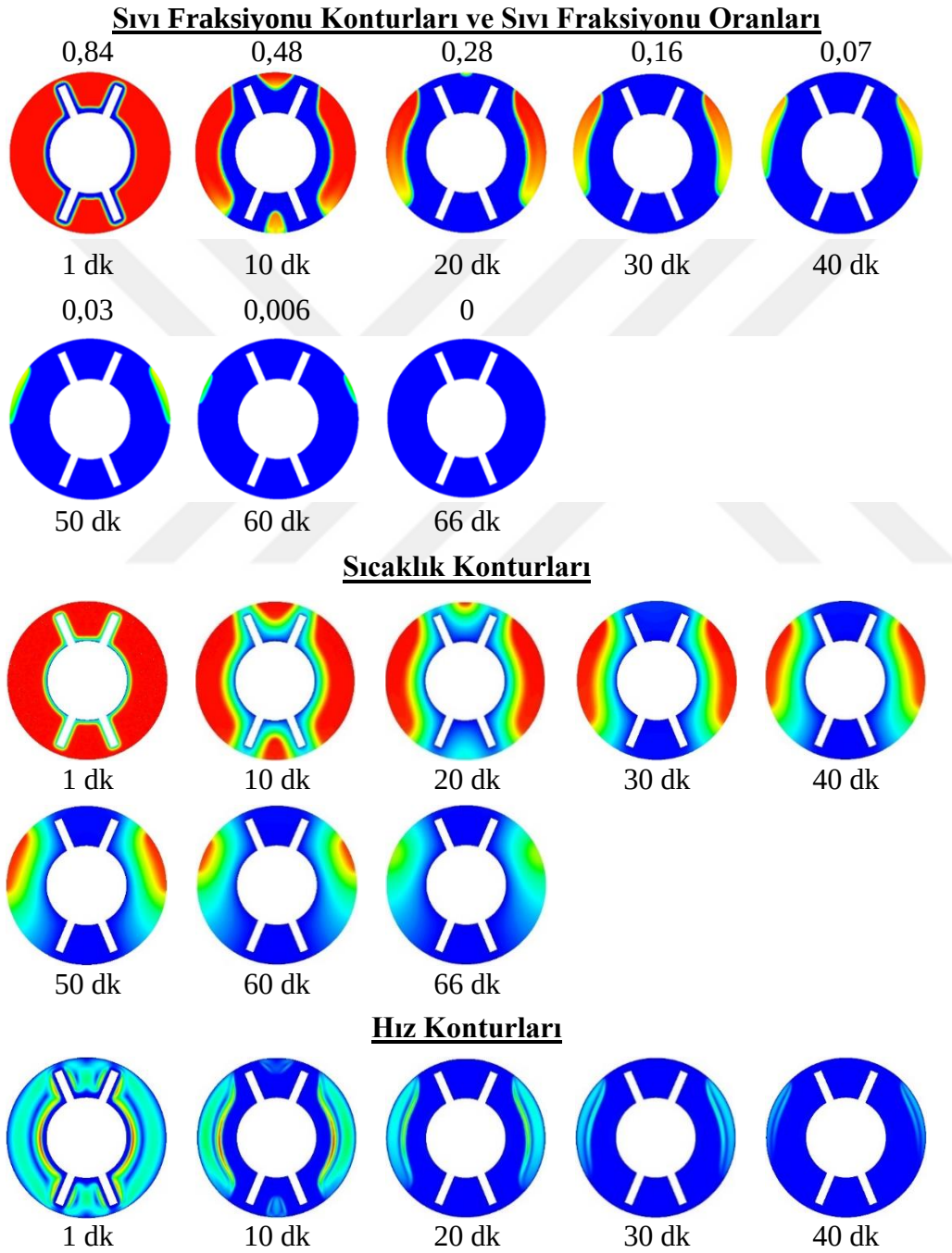
Hız Konturları



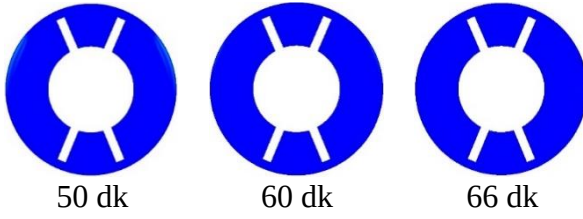
Şekil 5.15. Model 5 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$



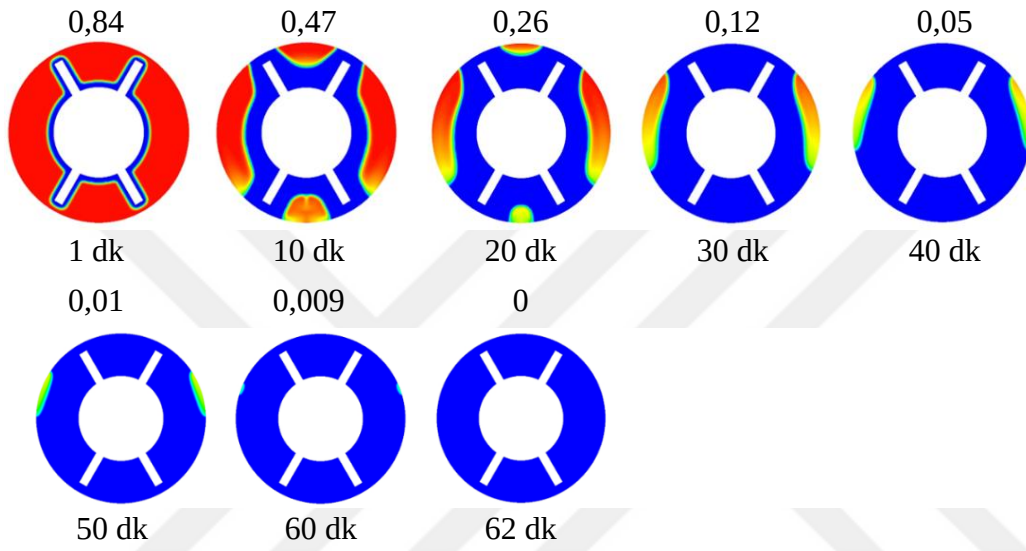
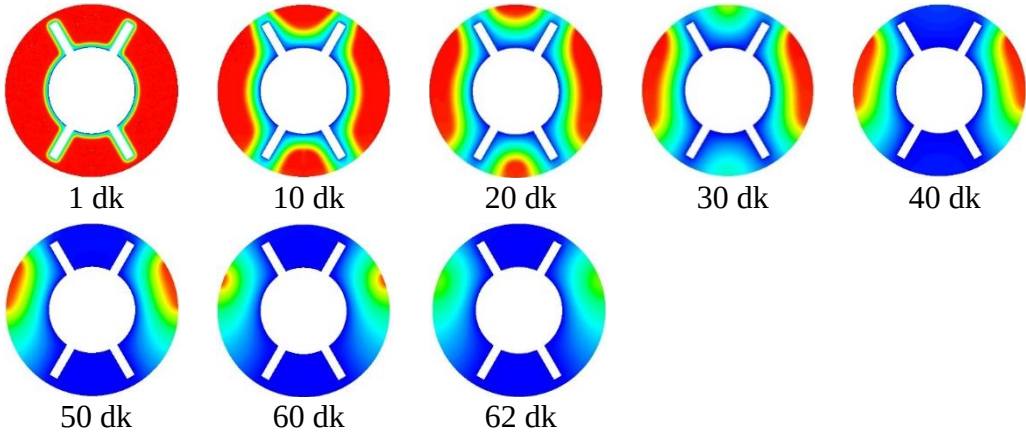
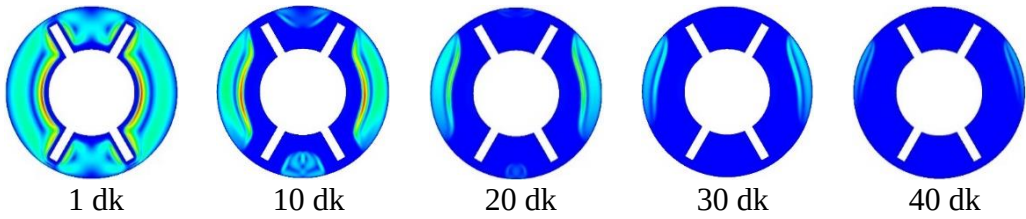
b) **Model 5 45°**



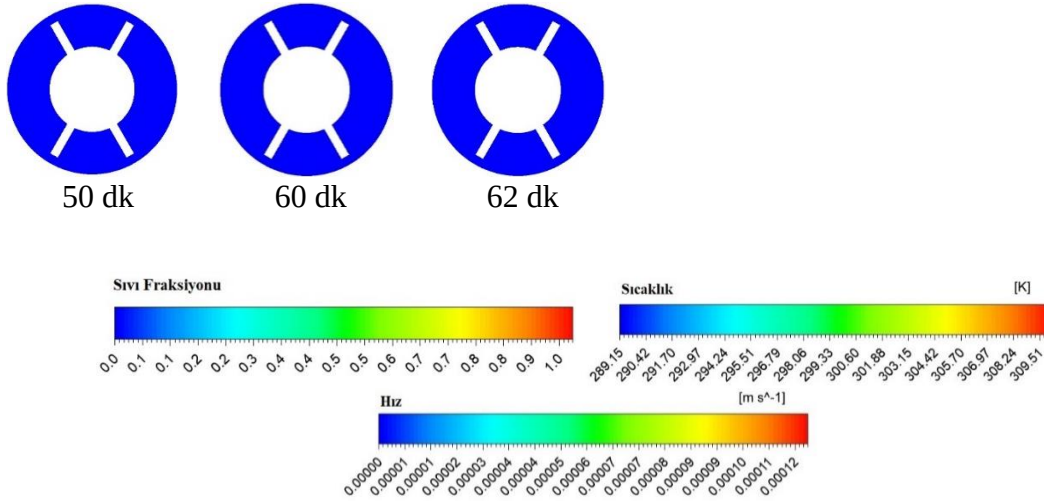
Şekil 5.15. (devamı)



c) Model 5 60°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları**Sıcaklık Konturları****Hız Konturları**

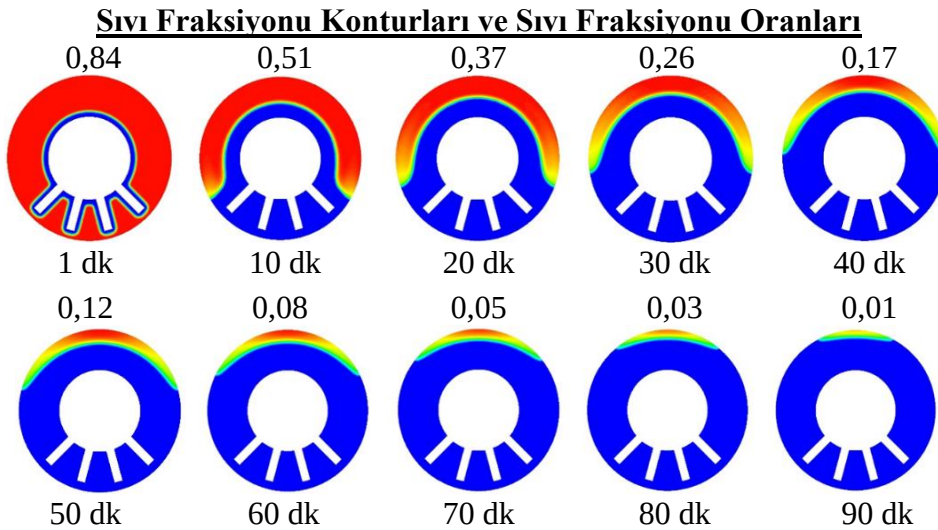
Şekil 5.15. (devamı)



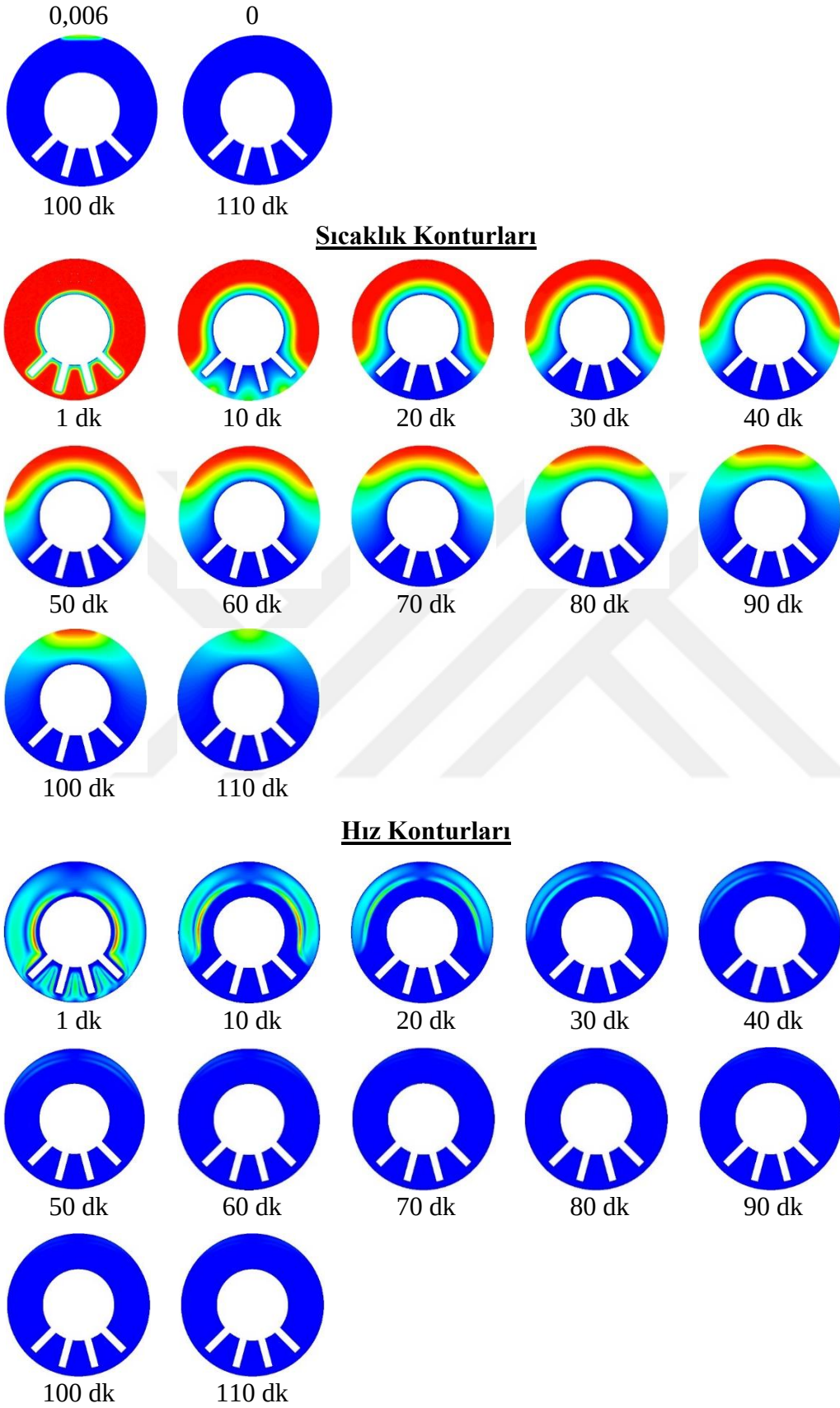
Şekil 5.15. (devamı)

Model 6, Şekil 5.16'dan görüldüğü gibi en düzgün olmayan kanat dağılımına sahip olan konfigürasyondur. Tüm kanatların iç borunun alt yüzeyinde yoğunlaşması alt bölgedeki katılaşma hızının önemli ölçüde artırmıştır. Ancak sıvı FDM'deki doğal konveksiyonla ısı transfer mekanizmasının katılaşma hızına etkisinin oldukça düşük olması kanatsız olan üst bölgedeki katılaşmanın önemli ölçüde yavaşlamasına neden olmuştur. Bu nedenle en yüksek deşarj süreleri Model 6'da elde edilmiştir. Model 6 ile $\alpha=30^\circ$, 45° ve 60° açıları için sırasıyla 110, 107 ve 102 dakikalık deşarj süreleri elde edilmiştir. Daha önceki modellerdeki duruma benzer şekilde kanatlar arası açı artışının deşarj süresini düşürücü etkisi olmuştur.

a) Model 6 30°

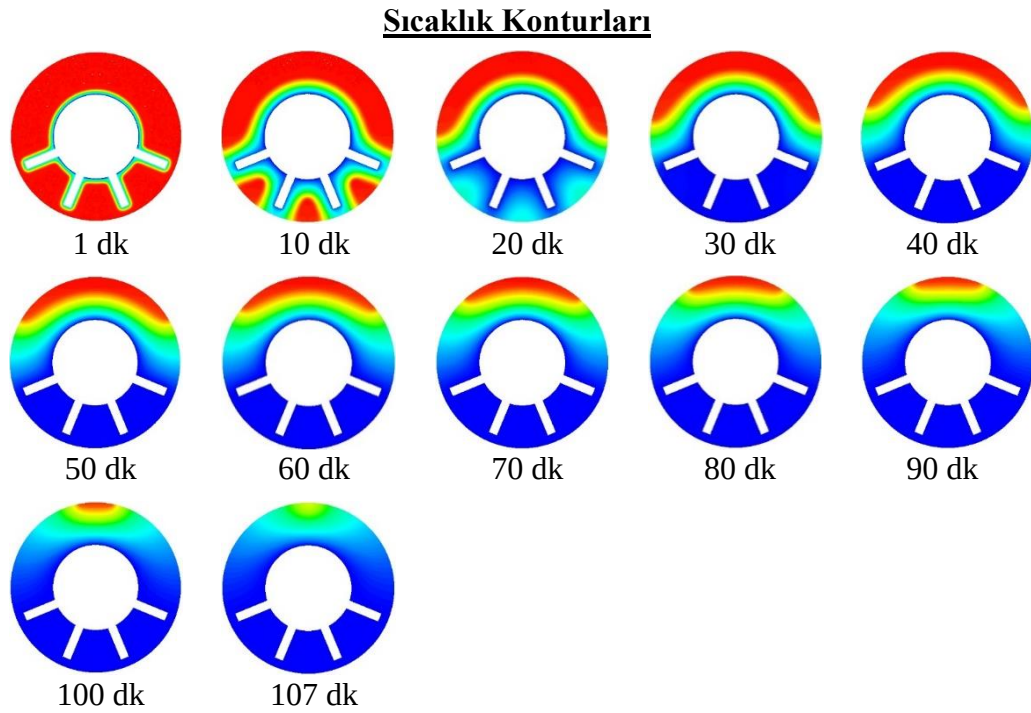
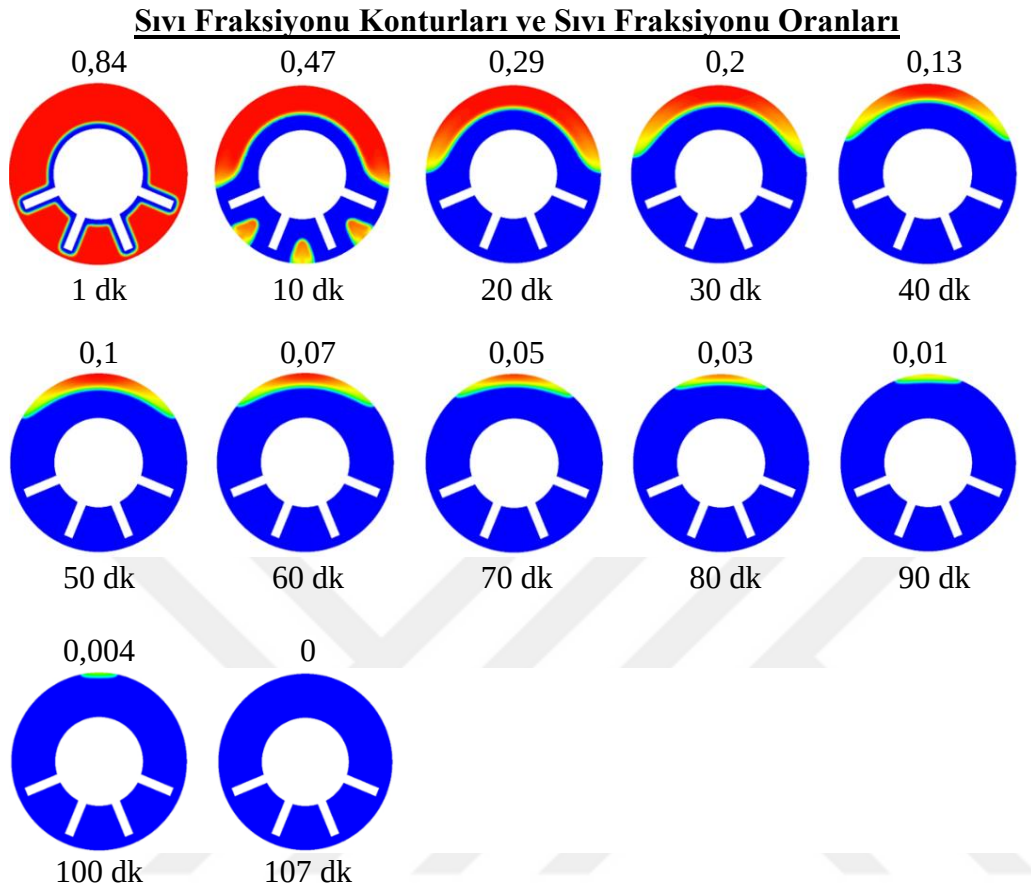


Şekil 5.16. Model 6 katılaşma analizi için zamana bağlı sıvı fraksiyonu, sıcaklık ve hız konturları a) $\alpha=30^\circ$, b) $\alpha=45^\circ$, c) $\alpha=60^\circ$



Şekil 5.16. (devam)

b) Model 6 45°



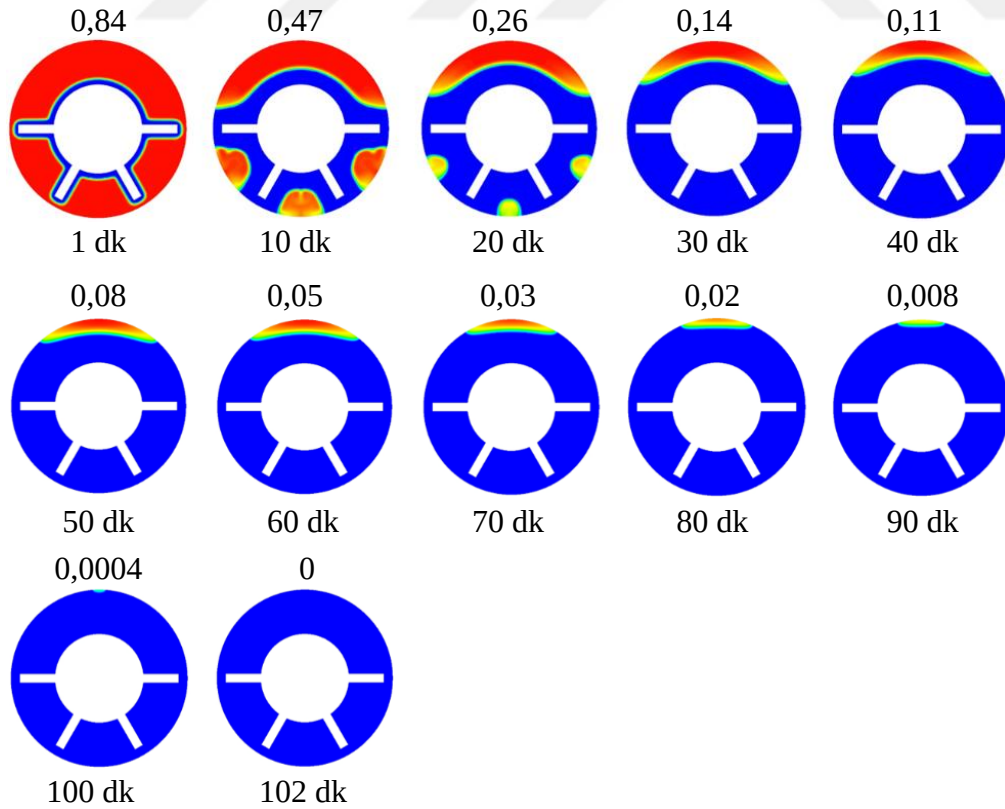
Şekil 5.16. (devamı)

Hız Konturları



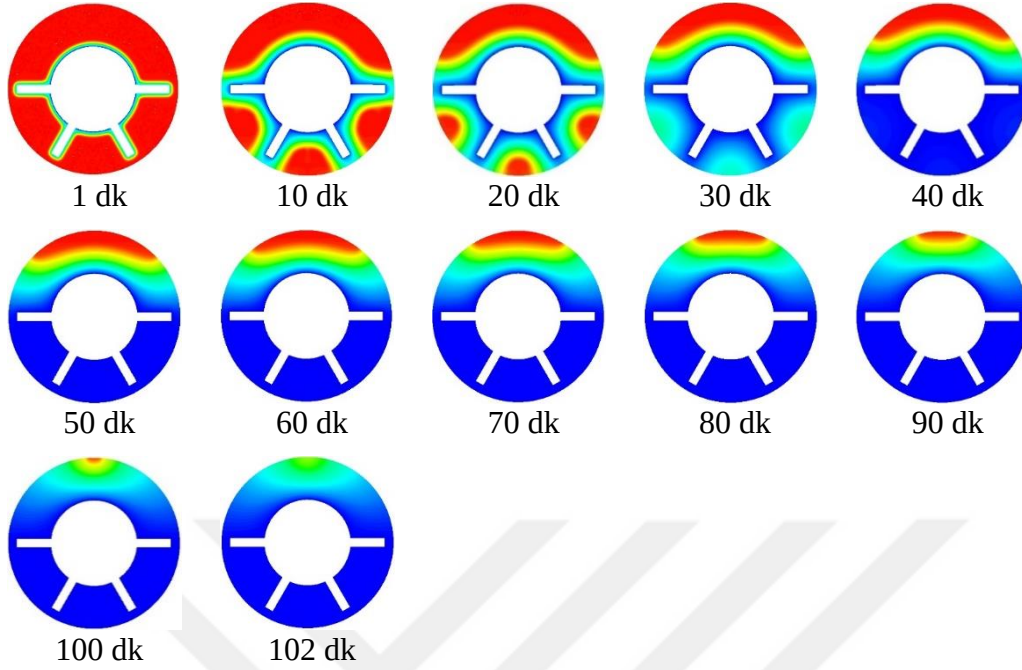
c) Model 6 60°

Sıvı Fraksiyonu Konturları ve Sıvı Fraksiyonu Oranları

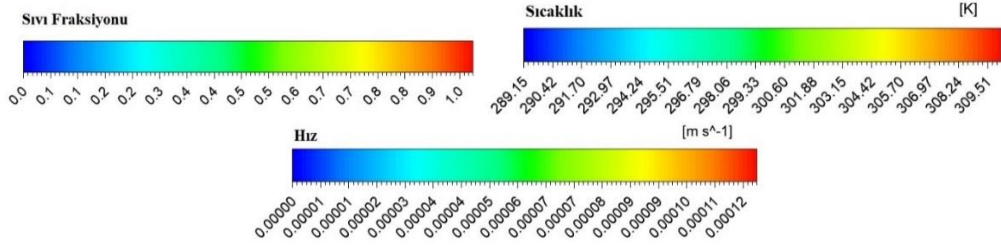
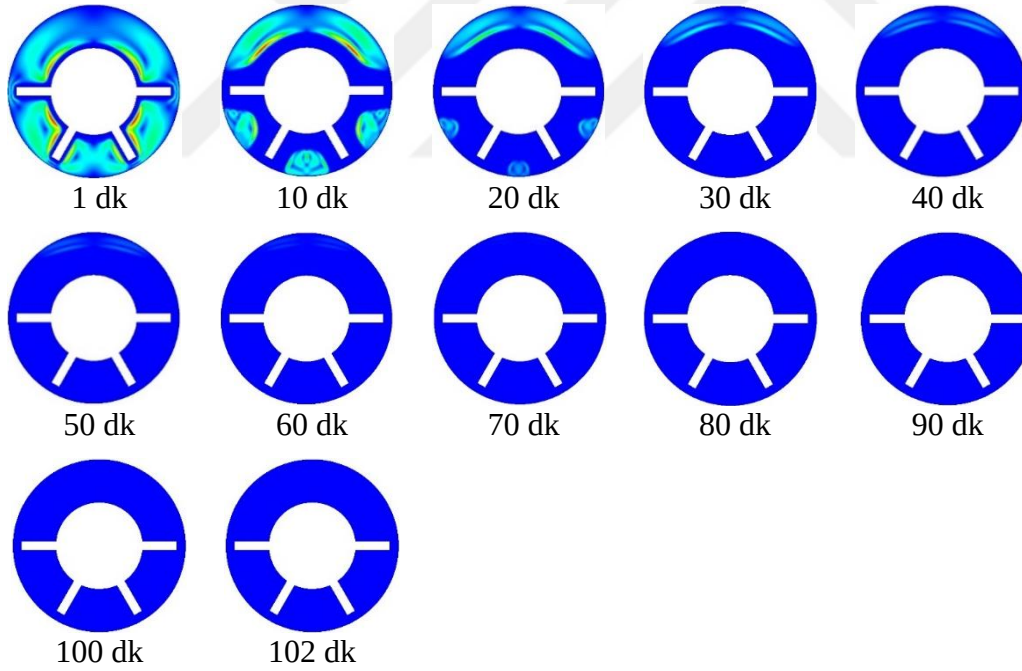


Şekil 5.16. (devamı)

Sıcaklık Konturları



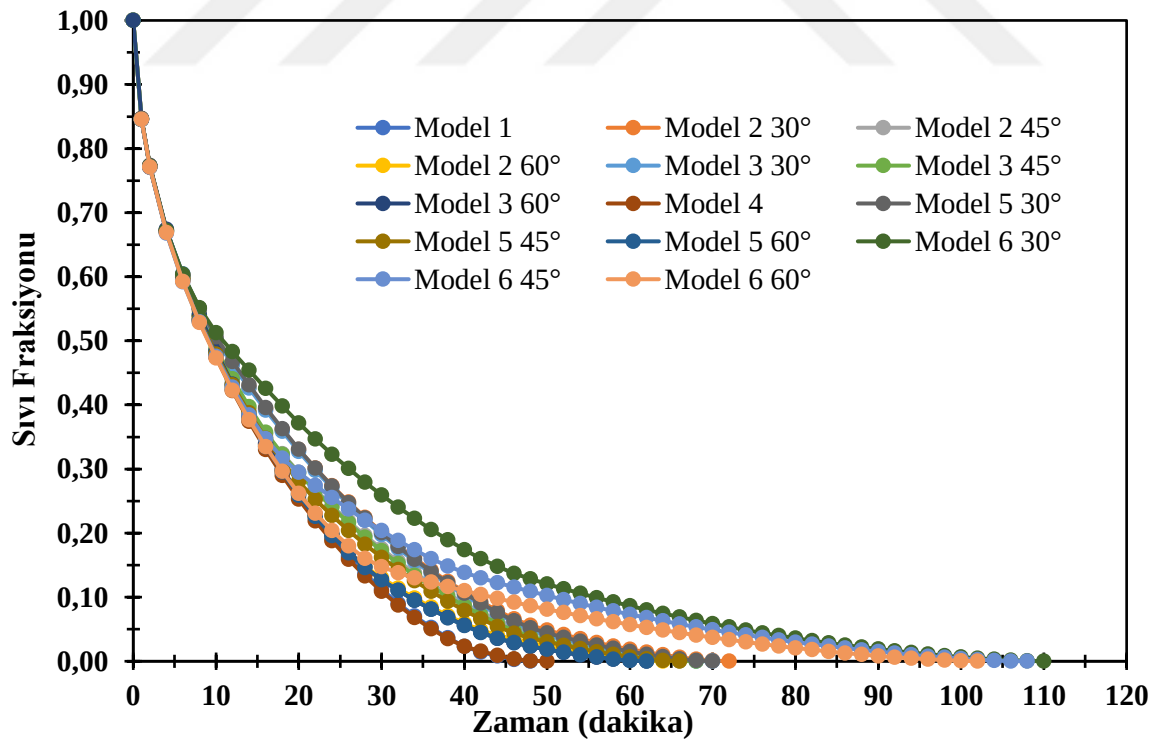
Hız Konturları



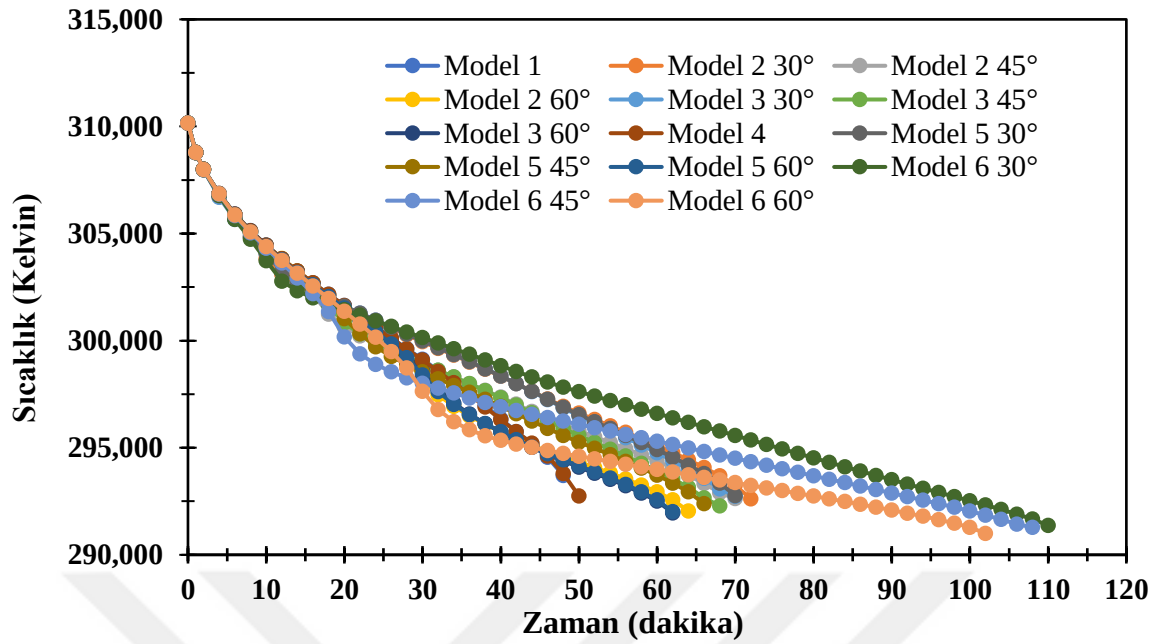
Şekil 5.16. (devamı)

Şekil 5.17’de tüm modeller için elde edilen zamana bağlı sıvı fraksiyonu eğrileri verilmiştir. Bölümün başında bahsedilen katılma mekanizmasının fiziksel yapısına bağlı olarak tüm modellerde katılmanın başlangıçta hızlı ancak sonrasında yavaşlayarak devam ettiği gözlemlenmektedir. Kanat dağılımının uniform olup olmamasına bağlı olarak deşarj süreleri değişmiştir. Uniform kanat dağılımlarına sahip Model 1 ve Model 4’de diğer tüm modellere göre daha düşük deşarj süreleri elde edilmiştir. En düzgün olmayan kanat dağılımına sahip Model 6 ile de en yüksek deşarj süresi elde edilmiştir.

Şekil 5.18’de %100 katılma periyodu boyunca FDM’deki ortalama sıcaklık değişimi görülmektedir. Deşarj süresi sonunda düşük FDM sıcaklıklarının elde edilmesi enerji salınımının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum depolanan enerjinin daha verimli şekilde geri kazanıldığının bir göstergesidir. 60° kanatlar arası açısı değerine sahip Model 6 ile deşarj süresi sonunda en düşük ortalama FDM sıcaklığına ulaşılmıştır (292 K). Model 4’de ise %100 katılma sonunda 292,74 K ile en yüksek sıcaklık değeri elde edilmiştir.

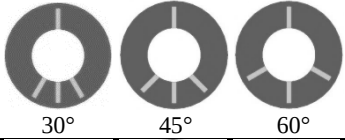
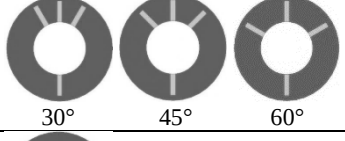
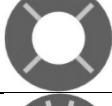
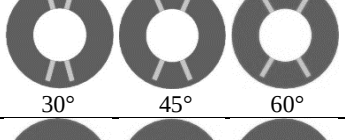
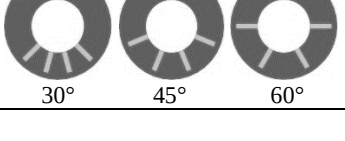


Şekil 5.17. Tüm modeller için katılma periyodundaki sıvı fraksiyonunun zamana bağlı değişim grafiği



Şekil 5.18. Tüm modeller için katılma periyodundaki ortalama FDM sıcaklığının zamana bağlı değişim grafiği

Çizelge 5.2. Modeller ve katılma süreleri

Çalışma Modelleri	Deşarj Süreleri	Artış (%)
 Model 1 (Referans Model)	48 dk	-
 Model 2 30° Model 2 45° Model 2 60°	72 dk 69 dk 64 dk	50 ↑ 43,7 ↑ 33,3 ↑
 Model 3 30° Model 3 45° Model 3 60°	69 dk 67 dk 62 dk	43,7 ↑ 39,5 ↑ 29,1 ↑
 Model 4	50 dk	4,1 ↑
 Model 5 30° Model 5 45° Model 5 60°	70 dk 66 dk 62 dk	45,8 ↑ 37,5 ↑ 29,1 ↑
 Model 6 30° Model 6 45° Model 6 60°	110 dk 107 dk 102 dk	129,1 ↑ 122,9 ↑ 112,5 ↑

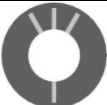
Çizelge 5.2.'de tüm modeller için elde edilen deşarj süreleri ve referans modelle karşılaştırılması verilmiştir. Dikkat edilirse tüm modellerin deşarj süresinde referans modele

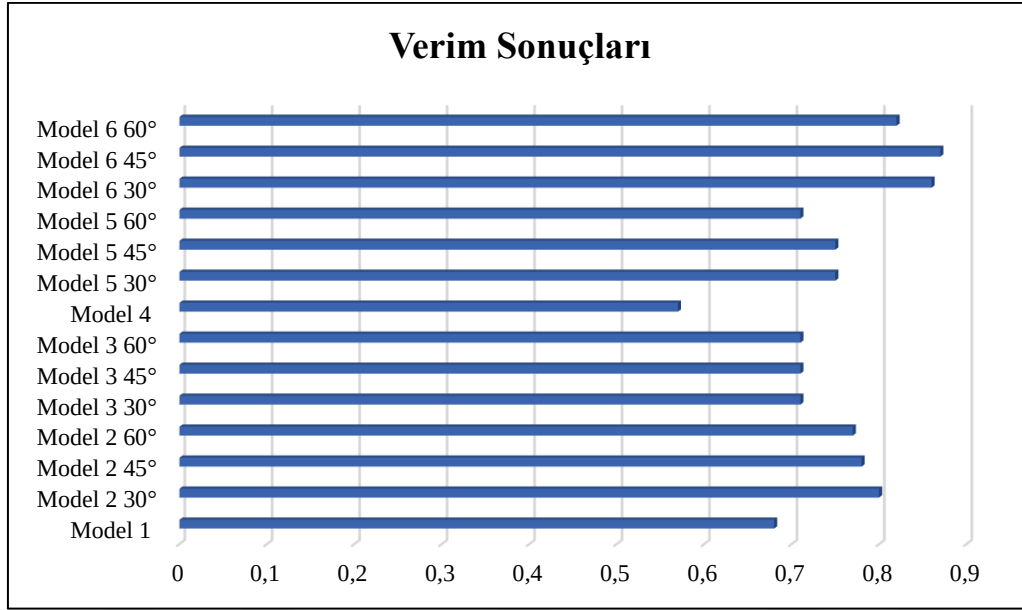
göre artış meydana geldiği görülmektedir. Kanat dağılımının düzensizliğindeki artışa bağlı olarak deşarj süresinde de artış meydana gelmiştir. Kanatlar arası açının 30° olduğu Model 6'daki kanat yerleşim düzeni ile referans modele göre deşarj süresinde %129,1'lik bir artış oluşmuştur.

5.4 Enerji Depolama Verimi Bulguları

Enerji depolama veriminin hesaplanmasında hem erime hem katılaşma süreleri baz alınmıştır. Enerji depolama sisteminden yüksek verim alınabilmesi için en kısa şarj en uzun deşarj süresine sahip olması daha uygun bir seçenek olmaktadır. Çizelge 5.3'de tüm kanat yerleşim modelleri için elde edilen enerji depolama verimleri görülmektedir. Sonuçlar hem erime hem de katılaşma performansları dikkate alındığında en yüksek enerji depolama veriminin 45° kanatlar arası açıyla sahip Model 6 ile elde edildiğini ortaya koymaktadır (%87). Şekil 5.19 ise enerji depolama verimleri arasındaki farkın görselleştirilmesi için ayrıca sunulmuştur. En düşük enerji depolama verimi ise %57 ile Model 4'de elde edilmiştir.

Çizelge 5.3. Enerji depolama verimi sonuçları

Çalışma Modelleri			Verim Sonuçları
	Model 1 (Referans Model)		%68
	Model 2 $\alpha=30^\circ$		%80
	Model 2 $\alpha=45^\circ$		%78
	Model 2 $\alpha=60^\circ$		%77
	Model 3 $\alpha=30^\circ$		%71
	Model 3 $\alpha=45^\circ$		%71
	Model 3 $\alpha=60^\circ$		%71
	Model 4		%57
	Model 5 $\alpha=30^\circ$		%75
	Model 5 $\alpha=45^\circ$		%75
	Model 5 $\alpha=60^\circ$		%71
	Model 6 $\alpha=30^\circ$		%86
	Model 6 $\alpha=45^\circ$		%87
	Model 6 $\alpha=60^\circ$		%82



Şekil 5.19. Enerji depolama verimi sonuçlarının grafiksel gösterimi

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında FDM ile çift borulu gizli ısı depolamada kanatçık yerleşim düzenlerinin FDM'nin erime ve katılaşma performansına etkileri sayısal olarak incelenmiş ve enerji depolama verimi açısından en uygun kanat yerleşim düzeni belirlenmeye çalışılmıştır. Sayısal analizler neticesinde elde edilen temel sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Tüm erime analizi bulguları dikkate alındığında FDM'nin erime hızını artıran ve sistemin şarj süresini kısaltan en önemli fiziksel mekanizmanın sıcak ve soğuk akışkan arasındaki yoğunluk farkından kaynaklanan doğal konveksiyon akışı olduğu anlaşılmıştır. Enerji depolama sisteminde doğal konveksiyonla ısı transferinin en etkin olduğu durum tüm kanatların iç borunun alt yüzeyine yoğunlaştırıldığı Model 6 olmuştur. Alt yüzeydeki kanatlar arası açının hem alt bölgedeki erime hızını hem de doğal konveksiyonla yukarı yönlenecek sıvı fazdaki FDM miktarını etkilemesi erime performansının artırılabilmesi için kanatlar arası açının da uygun şekilde belirlenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. 45° kanatlar arası açıya sahip Model 6 kanat yerleşim düzeni ile şarj süresinde referans modele göre %22,7 oranında düşüş sağlanmıştır. Enerji depolama verimi tasarımında diğer bir önemli husus enerji depolama kapasitesidir. Şarj süresi sonunda tüm modellerdeki ortalama FDM sıcaklığının birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle de en düşük şarj süresine sahip Model 6'nın enerji depolama için tercih edilmesi makul olacaktır.
- Katılaşma analizlerinden elde edilen sonuçlar katılaşma periyodunda iletimle ısı transfer mekanizmasının daha baskın olduğunu ortaya koymuştur. Katılaşma sürecinde sıvı FDM ile kanatlar arasındaki katı bölge kalınlığı arttıkça iletimle ısı geçişi hızı azalmakta ve deşarj işlemi şarj işlemine göre daha fazla zaman almaktadır. Kanat dağılımının homojenlik seviyesinin artışı deşarj süresinde kısalmaya neden olmuştur. Düzgün olmayan kanat dağılımına sahip Model 2, 3, 5 ve 6'da kanatlar arası açının artışı daha homojen bir kanat dağılımı yapısı sağladığından açı artışı ile deşarj süresi kısalmıştır. Bu fiziksel olgular nedeni ile en yüksek deşarj süresi referans modelin deşarj süresine göre %129,1 artış ile 30° kanatlar arası açıya sahip Model 6 ile elde edilmiştir. En düşük deşarj süresi ise uniform bir kanat dağılımına sahip referans modelde (Model 1) olmuştur. Diğer yandan %100 katılaşma sonunda ortalama FDM sıcaklığı ne kadar

düşükse enerji salınım kapasitesinin de o ölçüde yüksek olduğu anlaşılmalıdır. Katılma analizlerindeki ortalama FDM sıcaklıkları incelendiğinde enerji salınım kapasitesi en yüksek modelin 60° kanatlar arası açısıya sahip Model 6 olduğu anlaşılmaktadır.

- Şarj süresi, deşarj süresi, enerji depolama kapasitesi ve enerji salınım kapasitesi açısından farklı kanat yerleşim modelleri daha iyi performans sergilese de enerji depolama veriminin değeri uygun kanat yerleşim düzeninin seçilmesinde kısıtlayıcı faktör olmuştur. Enerji depolama veriminin hesaplanmasında hem erime hem katılma süreleri baz alınmıştır. Enerji depolama sisteminden yüksek verim alınabilmesi için en kısa şarj en uzun deşarj süresine sahip olması daha uygun bir seçenek olmaktadır. Sonuçlar hem erime hem de katılma performansları dikkate alındığında en yüksek enerji depolama veriminin 45° kanatlar arası açısıya sahip Model 6 ile elde edildiğini ortaya koymuştur (%87).

Tez çalışması FDM ile gizli ısı depolamada kanatçık kullanımı ile ısı transferinin artırılması yönteminde kanat yerleşim düzeninin enerji depolama verimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar kanatlı gizli enerji depolama sistem tasarımları için önemli bir katkıdır. Enerji depolama veriminin belirlenmesinde hem erime hem de katılma performansının dikkate alınması gerektiği de bir diğer önemli husustur. Gelecekteki çalışmalarda kanatlar arası açılarının, kanat uzunluğunun ve kalınlığının optimizasyonu yapılarak enerji depolama veriminin daha da artırılması mümkün olabilir. Ayrıca farklı FDM'ler kullanılarak bu konfigürasyonların verim üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abhat, A. (1983). Low temperature latent heat thermal energy storage materials. *Solar Energy*, 30, 313–332.
- Acar, S. Ş. (2014). *Faz değıştirici maddeler ve uygulamaları*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Akçay, M. (2006). *Isıl enerji depolama amaçlı bazı polimer/yağ asidi karışımlarının hazırlanması ve ısı özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir araştırma*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Alay, S. (2010). *Isıl enerji depolama özellikli mikrokapsüller içeren akıllı tekstil ürünlerinin geliştirilmesi üzerine bir araştırma*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Alva, G., Fang, G. and Lin, Y. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144, 341–378.
- Beyhan, B. (2010). *Sera uygulamaları için faz değıştiren maddelerde termal enerji depolama*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Anabilim Dalı, Adana.
- Bilen, K., Işık, B., Gezer, S. ve Kıyık, F. (2021). Hava soğutmalı fotovoltaiik panellerde kanatçık tipinin soğutmaya etkisinin teorik olarak incelenmesi. *Politeknik Dergisi*. 25(2), 711-722.
- Bugaje, IM. (1997). Enhancing the thermal response of latent heat storage systems, *International Journal Of Energy Research* 65, 759-766.
- Cardenas, B. and Leon, N. (2013). High temperature latent heat thermal energy storage: Phase change materials, design considerations and performance enhancement techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 724-737.
- Choi, J. and Kim, D. (1992). Heat-transfer characteristics of a latent heat storage system using $MgCl_2 \cdot 6H_2O$. *Energy*, 17(12), 1153-1164.
- Cruey, B., King, J. and Tingleff, B. (2006, December 7). *Cooling of photovoltaic cells*.
- Coşkun, Ç., Durmaz, G. ve Özkol, Ü. (2013). *Ev tipi bir buzdolabının kararlı durum altında sayısal olarak incelenmesi*. 11. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, Türkiye.
- Darzi, A. R., Farhadi, M. and Sedighi, K. (2012). Numerical study of melting inside concentric and eccentric horizontal annulus. *Applied Mathematical Modelling*, 36(9), 4080–4086.
- Darzi, A. A R., Jourabian, M. and Farhadi, M. (2016). Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus. *Energy Conversion and Management*, 118, 253–263.

- Deng, S., Nie, C., Wei, G. and Ye, W. B. (2019). Improving the melting performance of a horizontal shell-tube latent-heat thermal energy storage unit using local enhanced finned tube. *Energy and Buildings*, 183, 161-173.
- Dikici, D. (2004). *Doğal soğuk kaynaklardan yararlanan yer altı kanallarında termal enerji depolanması (KTED)*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Dinçer, I. and Dost, S. (1996). A perspective on thermal energy storage systems for solar energy applications. *International Journal of Energy Research*, 20(6), 547–557.
- Dinçer, İ. and Rosen, M. A. (2002). *Thermal energy storage: Systems and applications*. John Wiley and Sons.
- Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K. (1985). Heat transfer in automobile radiators of the tubular type. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 12(1), 3-22.
- Fan, R., Zheng, N. and Sun, Z. (2021). Evaluation of fin intensified phase change material systems for thermal management of Li-ion battery modules. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 166, 120753.
- Fang, Z. and Zhao, C. (2025). Thermal performance analysis of novel bionic fins in a concentric three-tube latent heat storage system. *Renewable Energy*, 122607.
- Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K. and Hallaj, S., (2004). A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. *Energy Conversion and Management*, 45, 1597-1615.
- Feldman D., Shapiro M.M. and Banu D. (1986). Organic phase change materials for thermal energy storage, *Solar Energy Mater*, 13, 1-10.
- Gök, Ö., Yılmaz, M. Ö., Yılmaz, S., Turgut, B., Mazman, M., Beyhan, B., Şahan, N., Paksoy, H. Ö. ve Evliya, H. (2008). *Beyaz eşyalarda faz değiştiren maddelerde gizli ısı depolama yöntemi ile enerji verimliliğinin araştırılması*. VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, Türkiye.
- Hasnain, S. M. (1998). Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy conversion and management*, 39(11), 1127-1138.
- Huang, Y., Song, L., Wu, S. and Liu, X. (2022). Investigation on the thermal performance of a multi-tube finned latent heat thermal storage pool. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117658.
- İnternet: Leblebicioğlu. (2020). Enerji depolama nedir? Enerji depolama yöntemleri nelerdir? *Muhendistan*. URL: <https://muhendistan.com/enerji-depolama-nedir>. Son Erişim Tarihi: 22.06.2024.

- İnternet: Sara Enerji. (2021). Enerjisi Depolama Sistemleri. URL: <http://www.saraenerji.com.tr/index.php/tr/enerjisi-depolama-sistemleri>. Son Erişim Tarihi: 12.09.2024.
- İsmail, K. A., Alves, C.L.F. and 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.
- Ji, C. Z., Qin, Z., Low, Z. H., Dubey, S., Choo, F. H. and Duan, F. (2017). Transient numerical study on enhancement of phase change material thermal storage with angled parallel fins. *Proceedings of the 13th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Portorož, Slovenia.
- Kadivar, M. R., Moghimi, M. A., Sapin, P. and Markides, C. N. (2019). Annulus eccentricity optimisation of a phase-change material (PCM) horizontal double-pipe thermal energy store. *Journal of Energy Storage*, 26, 101030.
- Kapluhan, E. (2014). Enerji coğrafyası açısından bir inceleme: Güneş enerjisinin Dünya'daki ve Türkiye'deki kullanım durumu. *Coğrafya Dergisi*, 29, 70-98.
- Karaipekli, A. (2006). *Faz değiştiren enerji depolama maddelerinde ısı iletkenliğinin zenginleştirilmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Karakoç, H., Karakoç, N., Erbay, B. ve Aras, H. (2012). *Enerji analizi*. Y. Ergün ve M. Tanışlı, (Editörler). T. C. Anadolu Üniversitesi.
- Kayabaşı, R. and Kaya, M. (2020). Effect of phase changing material use on the efficiency of photovoltaic modules. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Part C, 8(2), 262-278.
- Kaygusuz, K. (ed.) (2024). *Interdisciplinary studies on contemporary research practices in engineering in the 21st century- VI*. Özgür Publications.
- Kazemi, M., Hosseini, M. J., Ranjbar, A. A. and Bahrampoury, R. (2018). Improvement of longitudinal fins configuration in latent heat storage systems. *Renewable Energy*, 116, 447-457.
- Kenisarin, M. and Mahkamov, K. (2007). Solar energy storage using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(9), 1913–1965.
- Khan, L. A. and Khan, M. M. (2020). Role of orientation of fins in performance enhancement of a latent thermal energy storage unit. *Applied Thermal Engineering*, 175, 115408.
- Khan, Z., Khan, Z. A. and Tabeshf, K. (2016). Parametric investigations to enhance thermal performance of paraffin through a novel geometrical configuration of shell and tube latent thermal storage system. *Energy Conversion and Management*, 127, 355–365.

- Kılıkış, B. and Kakaç, S. (1989). Importance of energy storage. In *Energy Storage Systems, NATO ASI Series* (pp. 1-10). Kluwer Academic Pub.
- Konuklu, Y. (2004). *Düşük sıcaklıkta termal enerji depolamasına uygun faz değiştiren maddelerin mikrokapsüllenmesi* Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Konuklu, Y. (2008). *Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu*. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Konuklu, Y., Ersoy, O., Ömür, P., Halime, E. Ç. ve Toraman, O. (2017). Termal enerji depolama materyali olarak diyatomit/faz değiştiren madde kompozitlerinin üretilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6, 238-243.
- Kozak, M. ve Kozak, Ş. (2012). Enerji depolama yöntemleri. *SDU International Technologic Science*, 4(2), 17-29.
- Lacroix, M. (1993). Study of heat transfer behavior of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36(8), 2083-2092.
- Lane, G. A. (1980). Low temperature heat storage with phase change materials. *International Journal of Ambient Energy*, 1, 155–168.
- Lane, G. A. (1983). *Solar heat storage latent heat material*, Volume I, CRC Pres Inc. Boca Raton, Florida.
- Lane, G. A. (1983b). *Solar heat storage latent heat material*, Volume II, CRC Pres Inc. Boca Raton, Florida.
- Lane, G. A. (1989). *Phase change thermal storage materials*. In C. Guyer (ed.), *Handbook of Thermal Design*. McGraw-Hill Book Co.
- Li, P. W. and Chan, C. L. (2017). *Thermal energy storage analyses and designs*. Academic Press. London.
- Li, Z. and Wu, Z. G. (2015). Analysis of HTFs, PCMs, and fins effects on the thermal performance of shell–tube thermal energy storage units. *Solar Energy*, 122, 382–395.
- Low, Z. H., Qin, Z. and Duan, F. (2024). A review of fin application for latent heat thermal energy storage enhancement. *Journal of Energy Storage*, 85, 111157.
- Luo, J. W., Yaji, K., Chen, L. and Tao, W. Q. (2025). Data-driven multi-fidelity topology design of fin structures for latent heat thermal energy storage. *Applied Energy*, 377, 124596.
- Mahdi, J. M. and Nsofor, E. C. (2017). Solidification enhancement in a triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination. *Energy*, 126, 501-512.

- Maral, T. (2024). *Gizli ısı depolama sistemlerinde erime ve katılaşma proseslerinin farklı geometrilerde incelenmesi*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Mat, S., Al-Abidi, A. A., Sopian, K., Sulaiman, M. Y. and Mohammad, A. T. (2013). Enhanced heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins. *Energy Conversion and Management*, 74, 223–236.
- Mazman, M. (2006). *Gizli ısı depolaması ve uygulamaları*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Mazman, M. (2018). Enerji depolamada gelecek beklentileri. In *11. Uluslararası Enerji Kongresi ve Fuarı*. Elektrik Mühendisleri Odası.
- Mazman, M. ve Yılmaz, C. H. (2019). Enerji depolama çözümleri ve genel eğilimler. *Elektrik Mühendisliği Bilimsel Dergisi*, (466), 32–40.
- Mehling H. and Cabeza L.F. (2008). *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications*. New York: Springer.
- Mondal, S. (2008). Phase change materials for smart textiles—An overview. *Applied Thermal Engineering*, 28, 1536–1550.
- Nie, C., Chen, Z., Li, H., Liu, X., Liu, J. and Rao, Z. (2025). Petal-shaped fin configurations for enhancing phase change material solidification in a horizontal shell and tube thermal energy storage unit. *Journal of Energy Storage*, 113, 115685.
- Oró, E., De Gracia, A., Castell, A., Farid, M. M. and Cabeza, L. F. (2012). Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Applied Energy*, 99, 513-533.
- Öztürk, H. (1997). *Sera ısıtma için güneş enerjisinin faz değiştiren maddelerde depolanması üzerine bir araştırma*. Yayınlanmamış Doktora Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Öztürk, H. H. (2008). *Güneş enerjisi ve uygulamaları*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Paksoy, H. Ö., Mazman, M., Turgut, B. and Konuklu (Özonur), Y. (2002). Cooling with thermal energy storage in different climates. In *World Renewable Energy Congress VII* (pp. 963). 29 June–5 July, Cologne, Germany.
- Rathod, M. K. and Banarjee, J. (2015). Thermal performance enhancement of shell and tube latent heat storage unit using longitudinal fins. *Applied Thermal Engineering*, 75, 1084–1092.
- Raul, A., Saha, S. K. and Jain, M. (2020). Transient performance analysis of concentrating solar thermal power plant with finned latent heat thermal energy storage. *Renewable Energy*, 145, 1957–1971.

- Sarani, I., Payan, S., Payan, A. and Nada, S. A. (2020). Enhancement of energy storage capability in RT82 phase change material using strips fins and metal-oxide based nanoparticles. *Journal of Energy Storage*, 32, 102009.
- Sarı, A. (2003). Thermal characteristics of a eutectic mixture of myristic and palmitic acids as phase change material for heating applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(8), 1005–1017.
- Sarı, A. (2011). Faz değişimi yoluyla ısı enerjisinin depolanması ve bu alanda yapılan çalışmalar. *Kimya Lisans Öğrencileri Araştırma Projesi Çalıştayı* (20–28 Temmuz), Çanakkale.
- Sarıkaya, Y. (2000). *Fizikokimya*. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Sciacovelli, A., Gagliardi, F. and Verda, V., (2015). Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. *Applied Energy*, 137, 707–715.
- Seddegh, S., Wang, X., Henderson, A. D. and Xing, Z. (2015). Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: a review. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 49, 517-533.
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R. and Buddhi, D. (2009). Faz değişim malzemeleri ve uygulamaları ile ilgili termal enerji depolama üzerine bir inceleme. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.
- Shi, J., Du, H., Chen, Z. and Lei, S. (2022). Review of phase change heat transfer enhancement by metal foam. *Applied Thermal Engineering*, 219, 119427.
- Stritih, U. (2004). An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM thermal storage. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 2841-2847.
- Şahan, N. (2011). *Faz değiştiren maddelerin nano malzemelerle kullanımının araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Tang, S., Song, Y., Liu, P., Wu, X., Xu, Y., Zhou, J. and Li, X. (2025). Design and optimization of a vertical shell-and-tube latent heat thermal energy storage system via discontinuous fins. *Renewable Energy*, 122568.
- Tao, Y. B. and He, Y. L. (2015). Effects of natural convection on latent heat storage performance of salt in a horizontal concentric tube. *Applied Energy*, 143, 38-46.
- Taşkıran, A. (2013). *Nano boyutlu parçacık katkılı yeni nesil faz değiştiren maddelerin deneysel olarak incelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Tunçbilek, K. (2005). *Laurik-palmitik asit ötektik karışımının enerji depolama karakteristiklerinin belirlenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.

- TÜBA. (2020). *TÜBA-Enerji Depolama Teknolojileri Raporu*. (İ. Dinçer & Mehmet. Akif. Ezan, Editörler). Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları.
- Tyagi, V. V. and Buddhi, D. (2007). PCM thermal storage in buildings: A state of art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(6), 1146–1166.
- Ülker, N. (2021). *Nanopartikül katkılı parafinin ısı performansının deneysel analizi* Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Harran Üniversitesi, Şanlıurfa.
- Verma, A. and Rakshit, D. (2022). Performance analysis of PCM-fin combination for heat abatement of Li-ion battery pack in electric vehicles at high ambient temperature. *Thermal Science and Engineering Progress*, 32, 101314.
- Wang, C., Yao, S., Chen, X. and Yan, X. (2025). Thermal performance analysis of new bionic “fishbone” fins in a triplex-tube latent heat storage system with single cycle process. *Applied Thermal Engineering*, 259, 124902.
- Wang, P., Yao, H., Lan, Z., Peng, Z., Huang, Y. and Ding, Y. (2016). Numerical investigation of PCM melting process in sleeve tube with internal fins. *Energy Conversion and Management*, 110, 428-435.
- Weng, J., Ouyang, D., Yang, X., Chen, M., Zhang, G. and Wang, J. (2020). Optimization of the internal fin in a phase-change-material module for battery thermal management. *Applied Thermal Engineering*, 167, 114698.
- Xiao M., Feng B. and Gong K. (2002). Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity, *Energy Conversion and Management*, 43, 103-108
- Yan, P., Fan, W., Yang, Y., Ding, H., Arshad, A. and Wen, C. (2022). Performance enhancement of phase change materials in triplex-tube latent heat energy storage system using novel fin configurations. *Applied Energy*, 327, 120064.
- Yang, W. J. (1989). Thermal energy storage systems and their dynamic behavior. In *Energy Storage Systems, NATO ASI Series* (pp. 1-12). Kluwer Academic Pub.
- Yang, X. H., Tan, S. C. and Liu, J. (2016). Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 100, 899-907.
- Yazıcı, M. Y., Avci, M. and Aydın, O. (2019). Combined effects of inclination angle and fin number on thermal performance of a PCM-based heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113956.
- Yılmaz, M. Ö. (2005). *Yeraltı termal enerji depolamadan kullanılan farklı dolgu maddelerinin termal özelliklerinin araştırılması*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

- Yılmaz, S. (2008). *Soğutma uygulamaları için faz değıştiren maddelerde termal enerji depolaması üzerine bir araştırma*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Yılmazoğlu, M. Z. (2010). Isı enerjisi depolama yöntemleri ve binalarda uygulanması. *Politeknik Dergisi*, 13(1), 33–42.
- Zalba, B., Marín, J. M., Cabeza, L. F. and Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, 23(3), 251-283.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Orçun ALTINOK
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1992- Ankara
Medeni hali : Evli

Eğitim Derecesi	Okul/Program	Mezuniyet Yılı
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi	2014