

**FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERDE ERİME VE KATILAŞMA
SÜRECİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**

Mutlu OKCU

Yüksek Lisans Tezi

Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yasin VAROL

ARALIK- 2011

T.C.

FIRAT ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FAZ DEĞİŞTİREN MADDELERDE ERİME VE
KATILAŞMA SÜRECİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mutlu OKCU

Enstitü No: 091119101

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 12 Aralık 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 28 Aralık 2011

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yasin VAROL

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Cengiz YILDIZ

Doç. Dr. Mehmet Esen

ARALIK-2011

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında beni her konuda yönlendiren, bilgi ve tecrübesini esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Yasin VAROL' a, birçok konuda bana yardımcı olan ve yol gösteren değerli hocalarım Doç. Dr. H. Fehmi ÖZTOP' a, Arş. Gör. Müjdat FIRAT ve Öğr. Gör. Beşir KOK' a saygılarımı sunarım. Ayrıca maddi ve manevi yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme ve her zaman yanımda olan, desteğini hep hissettiren eşime teşekkür ederim.

Mutlu OKÇU

Elazığ-2011

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XI
SEMBOLLER LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
2. MATERYAL VE METOT	10
2.1. Isı Depolamanın Önemi.....	10
2.2. Isı Depolama Yöntemleri	11
2.2.1. Duyulur Isı Depolama	13
2.2.1. Gizli Isı Depolama.....	14
2.3. Faz Değıştiren Maddeler (FDM)	16
2.4. FDM' lerin Ömürleri.....	20
2.5. Gizli Isı Depolama Sistemleri Analizi	20
2.5.1. Tam Analitik Çözümler	21
2.5.2. İntegral Metot	21
2.5.3. Hareketli Isı Kaynağı Yöntemi.....	21
2.5.4. Pertürbasyon Yöntemi	21

2.5.5. Sayısal Yöntemler	22
2.6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	22
2.7. Sonlu Hacimler Metodu	25
2.8. Erime / Katılaşma ve FLUENT	26
2.9. Erime ve Katılaşma Teorisi	26
2.10. Sayısal Grid Oluşumu	27
2.11. Grid Kalitesi	28
2.12. Yönetici Denklemler	28
3. BULGULAR.....	31
3.1. Modelin Tanıtılması.....	35
3.1.1. Kanatçıksız Model	35
3.1.2. 5 Kanatçıklı Model	36
3.1.3. 10 Kanatçıklı Model	37
3.2. Dikey Olarak Yerleştirilen Modelde Katılaşma	38
3.2.1. Kanatçıksız Model İçin Katılaşma Sürecinin İncelenmesi	38
3.2.2. 5 Kanatçıklı Model İçin Katılaşma Sürecinin İncelenmesi.....	41
3.2.3. 10 Kanatçıklı Model İçin Katılaşma Sürecinin İncelenmesi.....	44
3.3. Dikey Olarak Yerleştirilen Modelde Erime	47
3.3.1. Kanatçıksız Model İçin Erime Sürecinin İncelenmesi	47
3.3.2. 5 Kanatçıklı Model İçin Erime Sürecinin İncelenmesi	50
3.3.3. 10 Kanatçıklı Model İçin Erime Sürecinin İncelenmesi	53
3.4. Katılaşma Süreci İçin Sıvı Oranı-Zaman Adımı Grafikleri.....	55

3.5.	Erime Süreci İçin Sıvı Oranı-Zaman Adımı Grafikleri.....	60
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	65
5.	ÖNERİLER.....	66
	KAYNAKLAR.....	67
	ÖZGEÇMİŞ	71

ÖZET

Günümüzde fosil yakıtların tüketimi, önemli çevre sorunlarının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca fosil yakıtlar, yenilenebilir bir enerji kaynağı olmadığından, araştırmacılar alternatif enerji kaynağı arayışına yönelmiştir.

Bu çalışmada, Faz Değiştiren Maddelerin (FDM) ısı transferini arttırmak için dikey bir modelde farklı sayılarda kanatçığın, FDM' nin erime ve katılaşma sürecine etkisi incelenmiştir. Sonuçlar 2 boyutlu olarak elde edilmiştir. Çalışmanın amacı farklı modellerde erime/katılaşma sürecini incelemek ve bu modellerin erime ve katılaşma süreci üzerindeki etkisini gözlemlemektir. Model üzerine yerleştirilen kanatçıklar FDM' lerin düşük ısı iletkenliğine karşı ısı transferini artırmayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda incelenen modeller; kanatçıksız, 5 kanatçıklı ve 10 kanatçıklı modeller olarak belirlenmiştir.

Çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kodu olan ANSYS-Fluent ticari yazılımı kullanılmıştır. Sonuç olarak, elde edilen verilere göre kanatçık sayısının FDM' nin erime/katılaşma sürecinde önemli etkilerinin olduğu belirlenmiştir. 10 kanatçıklı modelin kullanılan modeller arasında en etkin model olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Faz Değiştiren Madde (FDM), Erime ve Katılaşma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, FLUENT, Kanatçık.

SUMMARY

Numerical Investigation of Melting and Solidification Process of Phase Change Materials

Nowadays consumption of fossil fuel causes important environmental problems. In addition, because of fossil fuel is not renewable energy source, researchers have been in quest of alternative energy sources.

In this study, to increase the heat transfer of PCM' s, different numbers of fins in a vertical model have been examined effect on melting/solidification processes of PCM. Results were obtained as 2 dimensional. The aim of this study to examined the process of melting/solidification in different models and to observe the effects of different model on melting/solidification process. The fins which are placed on the model aimed to increase of heat transfer in case of low thermal conductivity FDM' s. For this purpose models which were examined were determined as; fin-free, 5 and 10-fins models.

In study, ANSYS-Fluent commercial software is code of Computational Fluid Dynamics (CFD) was used. In conclusion, it was determined that according to data was observed the numbers of fins have a dramatical effects on melting/solidification process of PCM. It was show that the 10-fin model is most effective one among the others was used.

Key words: Phase Change Material, Melting and Solidification, Computational Fluid Dynamics, FLUENT, Fin.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Kaynaklara göre toplam enerji tüketimi	1
Şekil 2.1. Isı depolama yöntemleri	12
Şekil 2.2. Gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklık-entalpi değişimi (a) İzotermal hal değiştirme (b) Sıcaklık aralığında hal değiştirme.....	15
Şekil 2.3. Faz değiştiren maddelerin sınıflandırılması	17
Şekil 2.4 Grid bileşenleri.....	27
Şekil 3.1. (a) Referans çalışmada 1800 sn sonraki buz oluşumu, (b) Referans çalışmada 1800 sn sonraki hız vektörü.....	33
Şekil 3.2. (a) Yapılan çalışmada 1800 sn sonraki buz oluşumu, (b) Yapılan çalışmada 1800 sn sonraki hız vektörü.....	34
Şekil 3.3. Kanatçıksız model.....	35
Şekil 3.4. 5 Kanatçıklı model	36
Şekil 3.5. 10 Kanatçıklı model	37
Şekil 3.6. 5000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	38
Şekil 3.7. 10000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	39
Şekil 3.8. 20000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	39
Şekil 3.9. 30000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	40
Şekil 3.10. 5000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	41
Şekil 3.11. 10000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	41
Şekil 3.12. 20000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	42
Şekil 3.13. 30000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	42

Şekil 3.14. 5000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	44
Şekil 3.15. 10000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	44
Şekil 3.16. 20000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	45
Şekil 3.17. 30000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	45
Şekil 3.18. 5000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	47
Şekil 3.19. 10000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	47
Şekil 3.20. 20000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	48
Şekil 3.21. 30000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	48
Şekil 3.22. 5000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	50
Şekil 3.23. 10000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	50
Şekil 3.24. 20000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	51
Şekil 3.25. 30000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	51
Şekil 3.26. 5000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	52
Şekil 3.27. 10000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	53
Şekil 3.28. 20000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	53
Şekil 3.29. 30000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı	54
Şekil 3.30. Yatay model için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılma süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	55
Şekil 3.31. Yatay model için 30000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılma süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	56
Şekil 3.32. Dikey model için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılma süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	57
Şekil 3.33. Dikey model için 30000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılma süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	58

Şekil 3.34. Dikey ve yatay modeller için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılma süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği.....	59
Şekil 3.35. Yatay model için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	60
Şekil 3.36. Yatay model için 30000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	61
Şekil 3.37. Dikey model için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	61
Şekil 3.38. Dikey model için 30000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	62
Şekil 3.39. Yatay ve dikey modeller için 30000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı-zaman adımı grafiği	62

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. FDM' lerin dönüşüm sıcaklıkları	19
Tablo 2.2. Kullanılan FDM' nin termofiziksel özellikleri	31

SEMBOLLER LİSTESİ

H	: Entalpi
h_{ref}	: Referans entalpi
T_{ref}	: Referans sıcaklık
C_p	: Sabit basınçta özgül ısı
ρ	: Yoğunluk
$\vec{v}$	: Akış hızı
S	: Momentum kaynak terimi
T_m	: Dönüşüm sıcaklığı
μ	: Dinamik viskozite
β	: Sıvı hacim oranı
Q	: Depolanan ısı
$T_{\text{katılaşma}}$	: Maddenin katılaşma sıcaklığı
T_{erime}	: Maddenin erime sıcaklığı

KISALTMALAR

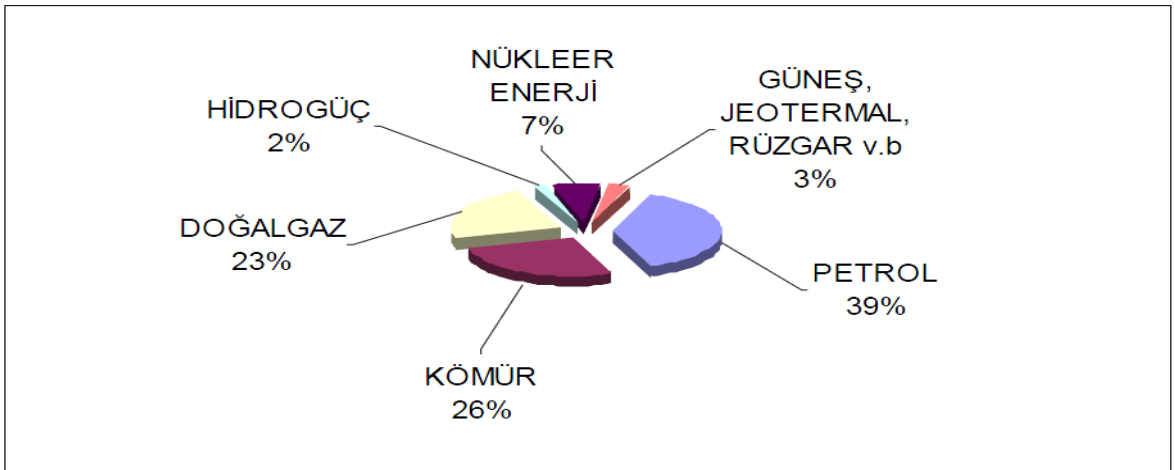
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	: Computational Fluid Dynamics
FDM	: Faz Değiştiren Madde

1. GİRİŞ

Günümüzde bütün dünya ülkeleri, enerji sorununa çözüm getirme çabası içerisine girmiştir. Kullanımdaki enerjinin mevcut durumunu devam ettirmek, sürdürülebilir bir kalkınma ve gelecek için, yeni ve yenilenebilir kaynakların etkili kullanımının şart olduğu artık herkes tarafından kabul görmektedir. Günlük yaşantımızda enerji, farklı çeşitleri ve kullanım alanlarıyla vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir. Artan nüfus, şehirleşme ve endüstrileşme enerji gereksiniminin daha da artmasına neden olmaktadır. Bu ihtiyaç neticesinde geliştirilmek istenen çözümler alternatif enerji kaynağı bulma, var olan enerjiyi depolama ve kullanılan kaynakların tasarrufu noktalarına yoğunlaşmıştır.

Dünya enerji gereksiniminin %78'i fosil yakıtlarla karşılanmaktadır [1]. Fosil yakıtların gün geçtikçe azalması, dünyanın enerji ihtiyaçlarının karşılanmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların ozon tabakasına verdiği zararları da göz ardı etmemek gerekir. Bu sebeplerden dolayı farklı enerji kaynakları araştırmak, bulmak ve kullanmak için çeşitli incelemeler yapılmaya başlanmıştır. Gelişmekte olan ve bu gelişmeyle birlikte enerji ihtiyacının günden güne arttığı ve bu ihtiyaçları karşılayacak alternatif enerji kaynakları olmayan ülkeler gerek ekonomik gerekse çevresel olarak zarara uğramaktadırlar. Bu durum ülkelerin siyasi ve ekonomik bakımdan güç kaybetmesine sebep olmaktadır.

Şekil 1.1 de görüldüğü gibi fosil yakıtlar 2000 yılı itibarı ile enerji ihtiyacının büyük bir bölümünü karşılamaktadır [33].



Şekil 1.1. Kaynaklara göre toplam enerji tüketimi [33].

Enerji üretim ve tüketimindeki bu tablo araştırmacıları ekonomik, temiz ve çevreyle dost olan yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını bulmaya yöneltmektedir. Yeni enerji kaynakları arasında rüzgâr, güneş, hidroelektrik, biyogaz ve jeotermal enerji sayılabilir. Enerji tasarrufunun ve verimliliğinin artırılması, yeni enerji kaynaklarının devreye sokulmasından daha ekonomiktir. Bu kapsamda yapılan enerji çalışmalarının son zamanlarda gözde alanlarından biriside Termal Enerji Depolama (TED) sistemleridir.

Termal enerji depolama sistemleriyle ozon tabakasına zarar veren kloroflorokarbonlara (CFC) gereksinim duymadan doğrudan soğutma-ısıtma yapılabilir. Elektrik enerjisine duyulan gereksinim azalmakta ve elektriğe en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda elektriğe aşırı yüklenme engellenebilmektedir. Böylece enerji santrallerine duyulan gereksinmeyi ve fosil yakıt kullanımını azaltarak çevreyi daha az kirleten çözümler sunmaktadır.

Termal enerji depolama teknikleri ile kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanımını azaltıp, enerji verimliliğini artırarak dünyada artan enerji talebine alternatif çözümler getirilir. Bu çalışmalarda, azalmakta olan fosil yakıtlar yerine, güneş gibi alternatif enerji kaynaklarından faydalanma oranı artırılmaya çalışılmaktadır. Böylece elde olan kaynaklar çok daha verimli kullanılmaktadır. Termal enerji depolama oldukça farklı şekilde ve farklı uygulama alanlarında uygulanabilir olup en yaygın termal enerji depolama yöntemi, faz değiştiren maddeler kullanılarak enerjinin depolandığı yöntemdir. Bu yöntemde ısı depolama kapasitesi yüksek olan kimyasal maddeler kullanılarak enerji depolanabilmektedir. Faz değiştiren maddeler yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en popüler olanlardandır [2]. FDM' ler belirli bir sıcaklık altında faz değiştirme yeteneğine sahiptirler. Ortam sıcaklığı faz değiştirme sıcaklığının üzerine çıktığında çevreden ısı alarak faz değiştirirler. Soğuma esnasında bu ısıyı tekrar ortama geri verirler. Bu alınan veya verilen ısı gizli ısı olarak adlandırılır

Yapılan literatür araştırmalarında FDM' ler ile ilgili gerek deneysel gerek sayısal olmak üzere birçok farklı uygulamayla karşılaşılmıştır. Bu doğrultuda konu ile alakalı olmak üzere genel olarak yapılan çalışmalar incelenmiştir.

Sönmez vd. [3], farklı silindir geometrilerinde dikdörtgensel geometriye sahip soğu depolama tankında, silindir etrafında oluşan katılaşmayı sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, su ile dolu dikdörtgen soğu depolama tankında silindirler tankın farklı bölgelerine konumlandırılarak, bunun katılaşma sürecine etkisi araştırılmıştır.

Sayısal sonuçlar FLUENT paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Geometrik farklılıkların katılma miktarını ciddi şekilde etkilediği görülmüştür.

Sasaguchi vd. [4], dikdörtgensel bir soğu depolama tankı içerisine dikey olarak yerleştirilen silindirin depo içerisinde konumunun ve depo içerisindeki su sıcaklığının değiştirilmesinin katılma etkisini zamana bağlı olarak incelemişlerdir. Çalışmada faz değiştiren madde olarak su kullanılmıştır. Silindirin yerleştirildiği fiziksel yere bağlı olarak sonuçlar üzerine etkisi incelenmiştir.

Dubovsky vd. [5], yaptıkları çalışmada, dikey eksenli bir silindirde FDM' nin katılma sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Simülasyonlarda kullanılan madde, ticari amaçlı birçok alanda kullanılan parafin mumudur. Çalışmada farklı silindir çapları parametre alınarak sonuçlar üzerine etkileri incelenmiştir. Kullanılan geometrik yapının tabanı adyabatiktir. Sonuçlar, FLUENT paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyonlar, FDM ve hava arasındaki düzensiz sınır, katılma dolayısı ile oluşan volümetrik daralma, sıvı fazdaki taşınım ve tüm katılma sürecini göstermiştir. Ayrıca katı yüzeyde oluşan eğrisel yapıda gözlemlenmiştir.

Assis vd. [6], küresel bir kap içerisinde FDM' lerin katılma sürecini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Başlangıçta kabın %98,5' i sıvı FDM ile doludur. Küresel kabın üst tarafında da %1,5' lik bir boşluk bulunmaktadır. FDM olarak ticari amaçlı olarak kullanılan parafin mumu kullanılmıştır. Çalışmada kap kalınlığı farklı çaplarda alınarak etkileri incelenmiştir. Simülasyonlar FLUENT ticari program ile elde edilmiştir. Sayısal sonuçların deneysel sonuçlara uyumlu olduğu saptanmıştır.

Assis vd. [7], küresel geometriye sahip bir kap içerisinde FDM' lerin erime sürecini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada gizli ısı depolama sistemlerinde sıkça kullanılan parafin mumu FDM olarak kullanılmıştır. Küresel kabın et kalınlıkları ve farklı çapları alınarak sonuçlara etkisi kontrol edilmiştir. Elde edilen sayısal çözümler FLUENT paket programı kullanılarak sonuçlandırılmıştır. Sayısal veriler ile deneysel veriler kıyaslanarak sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Hesaplamalar sonucunda parametrelerin sonuçlar üzerinde önemli etkisi olduğu vurgulanmıştır.

Başal [8], eş eksenli olarak iç içe yerleştirilmiş üç borudan oluşan bir ısı eşanjörü şeklindeki bir gizli ısı deposunun ısı davranışı sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, ısı deposunun karakteristik geometrik büyüklüklerinin ve ısı transfer akışkanının eşanjörü giriş sıcaklığı ve kütle debisi gibi parametrelerin ısı deposunun şarj edilme süresi ve ısı depolama kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Sonuç olarak maddenin yerleştirildiği aralığın kalınlığının artmasıyla akışkanın kütsel debisinin depo performansı üzerindeki etkisinin azalmakta olduğu belirlenmiştir.

Ismail ve Henriquez [9], yaptıkları çalışmada, küresel bir kap içerisinde FDM' nin katılma sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Matematiksel model küresel kabın dış yüzeyi üzerine taşınım ısı transferi veya sabit sıcaklık sınır şartlarına bağlı olarak saf iletim üzerine dayalıdır. Model benzer modellerle karşılaştırıldığında iyi sonuç verdiği görülmüştür. Çalışma esnasında farklı parametreler de kullanılmış ve kullanılan maddenin termal iletkenliğini katılma sürecinde önemli rol oynadığı görülmüştür. Ayrıca Biot (Bi) sayısının artırılması ile dış yüzeyde katılma sürecini geciktirdiği saptanmıştır.

Felix vd. [10], küresel kapsüllü FDM' lerin dolgu yatak oluşturup, FDM olarak parafin mumu kullanarak sayısal metot ile FDM performansını izlemişlerdir. Denklemler entalpi metodu kullanılarak oluşturulmuş ve sonuç analizi şarj ve deşarj olarak elde edilmiştir. Anahtar parametreler kapsül yarıçapı, akışkanın giriş sıcaklığı, kütle akış hızı ve faz değişim sıcaklığıdır. Bu parametrelere bağlı olarak çeşitli sonuçlar elde edilmiştir ve FDM performansı için bu değişimlerin önemli olduğu savunulmuştur.

Rabin ve Korin [11], sayısal metot kullanarak çok boyutlu ısı transfer problemlerinin erime ve katılma sürecini incelemişlerdir. Teknik olarak sonlu farklar entalpi metodu kullanılması önermişlerdir. Birçok sınır şartı için bu yöntemin etkin olarak kullanılabileceği belirtmişlerdir. Sıvı fazda ki taşınımın etkileri ihmal edilmiştir. Sıvı, katı ve ara faz olmak üzere 3 halde FDM' yi incelemişlerdir. Bu metodu kullanarak iki boyutlu problemlerin dört farklı durumda çözerek literatürde ki sonuçlarla mukayese edildiğinde bu sonuçlarla paralellik gösterdiği görülmüştür.

Bony ve Citherlet [12], yaptıkları çalışmada, FDM ile dolu bir tankta ısı transferini, gelişmiş nümerik model ile çözmeye çalışmışlardır. Model FDM ve depo suyu arasında ki ara yüzün yanı sıra, FDM içerisinde ki iletim ve taşınımı göz önüne alan entalpi metodu yaklaşımına dayalı olarak yapılmıştır. Aynı zamanda model su depolama tankını TRNSYS tip bir programa uygulanarak çalışılmıştır. Bu tip bir program, uygulamada çeşitli geometrilere sahip depolamaların hesaplanması için kolaylık sağlamaktadır. Elde edilen veriler ve simülasyonların karşılaştırılması sonucunda, sonuçların birbirlerine paralel olduğu ve gelecek için umut verici olduğu vurgulanmıştır.

Erek ve Acar [13], radyal kanatlı boru çevresinde faz değiştiren madde ile enerji depolama ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sayısal olarak yapılmıştır. Çözümler için kontrol hacmi sonlu farklar yaklaşımı ve yarı kapalı çözücü (SIS) kullanılmıştır.

Farklı kanat ve farklı sıcaklık parametreleri alınarak çözümler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalarla kıyaslandığında daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Mevcut eşitlikler ile enerji depolama için iyi bir sistem tasarlanabileceği savunulmuştur. Aynı zamanda bu eşitlikler ile farklı parametreler kullanarak benzer sistemler için sonuç alınabileceği belirtilmiştir.

Konuklu [14], yaptığı çalışmada mikrokapsüllenmiş FDM' nin termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufunu incelemiştir. Yapılan çalışmada FDM' nin mikrokapsüllenmiş olarak bir oda içerisinde ısıtma-soğutma yükünü inceleyerek genel ısıtma ve soğutma uygulamaları için vereceği verim incelenmiştir. Elde edilen sonuçların farklı uygulamalarda da geçerli olması için sayısal olarak incelenmiştir. Sonuçlar uygulamanın; kışın ısıtma için %10-15 arası ve yazın soğutma için %5-10 arası verim sağladığını göstermiştir. FDM' nin kapsül olarak kullanılmasının temel nedenini, hal değişimi sırasında ki hacim değişikliklerini kontrol etmek ve maddenin yayılarak etkinliğini kaybetmesini engellemek olduğu belirtilmiştir. Uygulamada kullanılacak FDM' nin yüksek gizli ısı, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek özgül ısı kapasitesi, küçük hacim değişimi, korozif olmama ve ani soğumama özelliklerine sahip olmaları gerektiği belirtilmiştir.

Shatikian vd. [15], FDM' nin erime sürecini dikey iç kanatlar ve tabanı sabit ısı akısı olan yatay bir soğutucuda incelemişlerdir. FDM kanatlar arasında depolanmıştır. Isı akısı, depo et kalınlığı, kanatların kalınlığı gibi parametreler dikkate alınmıştır. Sayısal çözümler FLUENT paket programı ile hesaplanmıştır. Sonuçlar faz değiştirme sürecinin FDM ısı kapasitesine, tabandan ısı akısına ve kanatların boyutlarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Sonuçların boyut analizi Rayleigh sayısı, Stefan sayısı, Fourier sayısı, Nusselt sayısı ve sıvı oranı bakımından yapılmıştır. Bütün bu boyutsuz sayıların sonuçlar üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Başka sistemlere de uygulanabileceği önerilmiştir.

Gemici [16], yaptığı çalışmada, dağlarda kışın bulunan karın küreler haline getirilerek uzak mesafelere taşınması için buzlaştırılması ve buzlaştırma sırasında kürelerde ki ısı transferini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Kar küreleri sıkıştırılarak farklı yoğunluklarda elde edildikten sonra su emdirilerek kapsül haline getirilmişlerdir. Bu işlemlerden sonra oluşan fiziksel yapı deneysel ve sayısal uygulamalarla test edilmiştir. Kürenin eksenel simetriye sahip olması nedeniyle çeyrek daire şeklinde iki boyutlu bir model üzerinde sayısal analizler yapılmıştır. Modelde faz değişiminin dikkate alınabilmesi için entalpi formülasyonu kullanılmıştır.

Lamberg ve Siren [17], yaptıkları çalışmada, birçok FDM' nin yüksek enerji depolama yoğunluğuna sahip olmasına rağmen, düşük ısı iletimi olmasından dolayı gizli ısı depolama uygulamaları için bu özelliği geliştirecek teknikleri incelemiş ve bir kanat kullanarak analitik çözümler elde etmişlerdir. Yarı sonsuz FDM depolama da sabit sonlu duvar sıcaklığı ile erime sürecinde kanadın sıcaklık dağılımı ve katı-sıvı ara yüzeyi ince-kanat denklemi, geçici rejim ve sanki-lineer odaklı çözümleri elde etmişlerdir. Sonuçlar nümerik sonuçlarla karşılaştırıldığı zaman, değerlerin birbirine uygun olduğu saptanmıştır.

Koca [18], FDM' lerin tek boyutlu geçici rejim ısı iletim problemleri üzerinde yaptığı deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda, her iki çalışmanın da yaklaşık değerler verdiğini saptamıştır. Sayısal çözümler için sonlu farklar metodunu kullanmıştır. Yaptığı çalışmalar sonunda analitik çözümlerin deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu saptamıştır. Sonuç olarak bu tür problem için analitik çözüm metodunu kullanılmasının daha uygun olacağını belirtmiştir.

Mazman [19], gizli ısı depolama ve uygulamaları çerçevesinde deneysel bir çalışma yapmıştır. Çalışma üç başlık altında toplanmıştır. Birinci olarak organik FDM' nin aşırı soğuma göstermemesi özelliği ve FDM' nin ısı iletkenliğinin artırılarak çeşitli uygulamalar yapmıştır. Bu uygulamalarda değişik organik FDM' ler kullanılmıştır. İkinci aşamada FDM' nin ısı transfer hızını arttırmak için FDM' nin bulunduğu tank içerisinde değişik geometrik şekiller kullanılmıştır. En son olarak depo içerisinde FDM' ler deponun üst kısmında kullanılarak maddenin gizli ısı depolama özelliğinden yararlanılmıştır.

Lamberg vd [20], yaptıkları çalışmada; faz değiştiren maddelerin erime ve katılaşma sürecini, hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Sayısal sonuçları FEMLAB paket programı kullanarak elde etmişler ve bu sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırarak sonuçların geçerliliğini ispat etmeye çalışmışlardır. Sayısal metot olarak entalpi ve etkin ısı kapasite metodu kullanmışlar. Deneysel çalışma sonuçları ile birlikte elde edilen veriler sayısal ortamda elde edilen veriler ile karşılaştırmışlardır. Her iki sayısal metot sonuçları erime ve donma sürecinde iyi sonuç vermiş. Fakat etkin ısı kapasite metodu deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir.

Agyenim vd. [21], gizli ısı depolamada kullanılan faz değiştiren madde problem formülasyonları ve ısı transferinin esas alındığı çalışmaların incelendiği bir çalışma yapmışlardır. Isı transferini arttırmak için yapılan değişikliklerin sonuçlar üzerine etkileri araştırılmıştır.

Bu etkileri inceleyen sayısal ve deneysel birçok çalışmanın yapıldığı vurgulanmıştır. İncelenilen FDM'lerin genel olarak sıcaklık değişiminin 0-60 °C arasında olduğu ve bunun yerel uygulamalar için kullanıldığı söylenmiştir. Problemlerin çözümünde entalpi formülasyonunun yoğun olarak kullanıldığı görülmüştür. Faz değiştirme probleminde ısı transferi başlangıçta saf iletimle olduğunu, daha sonra süreç ilerledikçe taşınımın da sürece dâhil olmasıyla daha karışık bir hal aldığı belirtilmiştir.

Costa vd. [22], yaptıkları çalışmada implicit sonlu farklar metodu ile entalpi formülasyonunu kullanarak gizli ısı depolamanın termal performansını sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışma, bir boyutlu modelde hem taşınım hem iletim ısı transferi, iki boyutluda ise sadece iletim göz önüne alınarak yapılmıştır. Modelin doğruluğu literatürden bulunan diğer sayısal ve analitik sonuçlarla kıyaslanarak sağlanmıştır. Sonuç olarak kullanılan yöntemin enerji depolama için faydalı olduğu vurgulanmıştır.

Sönmez [23], soğu depolama tankına yerleştirilen dairesel kesitli boruların etrafındaki katılaşmayı sayısal olarak analiz etmiştir. Sayısal çözümleme FLUENT paket programı vasıtasıyla yapılmıştır. Problem iki boyutlu olarak ele alınmıştır. Silindir çapı sabit olmakla beraber, tankın farklı bölgelerine farklı sayılarda silindir yerleştirilerek tank içerisindeki sıcaklık dağılımını analiz etmiştir. Çalışmada FDM olarak su kullanmıştır. Tank üzerinde farklı parametreler deneyerek sonuçlar üzerindeki etkisini analiz etmiştir. Yapılan çalışmanın doğruluğunu daha önceki çalışmalarla kıyaslayarak sonuçların doğruluğunu analiz etmiş ve değerlerin mevcut çalışmalarla uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Shih vd. [24] dikey olarak konumlandırılan bir tankı model olarak alarak, sabit hacimde kademeli olarak model üzerine yerleştirilen silindirlerin etrafındaki katılaşma sürecini incelemişlerdir. Faz değiştiren madde olarak su kullanılmıştır. Geometri üzerine yerleştirilen silindirin sayısı ve model üzerindeki farklı konumlandırılmasının sonuçlar üzerinde etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca katılaşma boyunca ısı transferi karakterleri de belirlenmiştir.

Lacroix vd. [25], dikey bir duvara kanatçık yerleştirerek doğal taşınım etkili erime ve katılaşma süreçlerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada amacın, gizli ısı depolama sistemlerinde şarj ve deşarj sürecini hızlandırmak olduğu vurgulanmıştır. Modeli çözmek için entalpi formülasyonu kullanılmıştır. Sayısal çözüm deneysel verilerle kıyaslanarak problemin doğruluğu sağlanmıştır. Geometrik özellikler ve kanatçık uzunluğu gibi parametreler kullanılarak sonuç üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlarda, daha uzun kanatçıklı uygulamaların süreci olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.

Fang ve Li [26], bir dikdörtgensel geometrideki buz depolama tankında FDM' nin katılaşma özellikleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Analizleri Stefan sayısının farklı değerlerde alınmasıyla yapıp, sonuçlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Katı bölgede Stefan sayısının etkisinin az olduğu belirlenmiştir. Stefan sayısının artmasıyla buz kalınlığının da arttığı ifade edilmiştir. Kullanılan modelin buz depolama sistemleri için faydalı olarak kullanılabileceği belirtilmiştir.

Kandasamy vd. [27], yaptıkları çalışmada, yeni bir FDM paketi ile taşınabilir elektronik cihazların termal yönetimi için sistem üzerine etkili olabilecek parametrelerin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Parametre olarak; güç girişi, erime/katılaşma zamanı ve paket konumu belirtmişlerdir. İnceleme, iki boyutlu sayısal olarak da çözülerek deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Güç girişinin artmasıyla FDM' nin sıvı oranının da arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak bu uygulamanın cihazların pasif ısı kontrol sistemleri tasarımı için önemli olduğu belirtilmiştir.

Guo ve Zhang [28], direk buhar teknolojisini kullanarak güneş enerjisini daha etkin kullanmak ve yüksek sıcaklık gizli ısı depolama sisteminde alüminyum folyo kullanarak ısı transferini geliştirmek için çalışmışlardır. Problemi FLUENT paket programı kullanarak çözmüşlerdir. Geometri üzerinde yapılan değişikliklerin sistemin depolama performansını nasıl etkilediği ile ilgili parametrik incelemelerde yapmışlardır. Sonuçlara göre bu sistemlerde uygulanan metodun ısı transferini olumlu yönde etkilediği anlaşılmıştır.

Reddy [29], yaptığı çalışmada, su ısıtmak amaçlı kullanılan güneş kolektöründe FDM kullanarak, FDM' nin sistem üzerindeki etkinliğinin analizini yapmıştır. Sonuçları FLUENT paket programı kullanarak elde etmişlerdir. Temel olarak FDM' nin bulunduğu kısımda kanatçık kullanarak ısı transferi arttırmak amaçlanmıştır. 4,9 ve 19 sayılarında kanatçık sayıları denenmiş ve 9 kanatçıklı sistemin verimimin diğerlerinden daha iyi olduğu belirtilmiştir.

Moraes vd. [30], sabit yüzey sıcaklığında, farklı çaplarda alınan silindirik ve küresel geometrilerde kapsüllenmiş, farklı FDM' lerin katılaşması üzerine sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Amacın, FDM' lerin tamamen katılaştığı zamanı bulmak ve farklı parametrelerin sonuçlara etkisinin incelenmesi olduğu belirtilmiştir. FDM olarak su ve farklı oranlarda karıştırılan su-glikol karışımı kullanılmıştır. Karışımlarda glikol oranının artmasının faz değişim sıcaklığını düşürdüğü ifade edilmiştir.

Lamberg [31], FDM depolama sisteminde faz değişimi boyunca katı-sıvı ara yüzü ısı transferi yüzeyinden hareket eder ve erimiş veya katılaşmış ortamın artan termal direncinden dolayı yüzey ısı akısı azdığı ifade edilmiştir. Kanat veya petek ekleme gibi ısı transferi geliştirme tekniklerini içeren basitleştirilmiş bir analitik model geliştirilen çalışmada, boyutlu kanatalı bir depoda sabit sonlu duvar sıcaklığı ile katılaşma sürecinde kanatların sıcaklık dağılımı ve katı sıvı ara yüzünün yerinin tespiti amaçlandığı belirtilmiştir. Model sayesinde, sıcaklık dağılımı ve ara yüz tespiti hakkında olumlu veriler elde edildiği vurgulanmıştır.

Bilir ve İlken yaptıkları çalışmada [32], farklı sınır şartlarında silindirik/küresel konteynır da kapsüllü FDM' nin katılaşma problemini incelemişlerdir. Problemin sınır şartları ve yönetici boyutsuz denklemleri entalpi metodu kullanılarak formölüze etmişlerdir. FDM' nin toplam katılaşma zamanı üzerine etki eden birçok parametrenin etkilerini incelemişlerdir.

Shumeli vd. [33] yaptıkları çalışmada, dikey silindir bir tüp içerisinde erimenin sayısal incelenmesini yapmış ve deneysel verilerle karşılaştırmıştır. Çalışmadaki temel amaç daha önceki deney sonuçlarıyla karşılaştırılan sayısal simölasyonlar aracılığıyla termal ortam ve yerel akışın incelenmesidir. Sayısal analizler için entalpi-gözeneklilik formölasyonu kullanılmıştır. Ayrıca farklı parametrelerin sonuç üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Özellikle basınç ayırklaştırma şemaları, basınç-hız çifti ve momentum denklemindeki lapa bölgeyi açıklayan terimlerin etkisi incelenmiştir. Önceki çalışma sonuçları yerel sıvı oranı ve ısı transferi oranı hakkında verimli sayısal bilgiler vermiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Küresel ısınmanın, dünyamız üzerindeki olumsuz etkilerini hissedilmeye başlanmıştır. Yapılan literatür araştırmaları doğrultusunda olumsuz etkilerin azaltılabilmesi ve alternatif enerjiler bulunabilmesi için sayısız çalışmaya rastlanmaktadır. Çalışmalar doğrultusunda farklı enerji kaynakları bulmanın elzem olduğu belirlenmiştir. Tez çalışmaları kapsamında yürütülen araştırmalarda, deneysel olarak yapılan çalışmaların birçok alanda eksik kaldığı saptanmıştır. Bu doğrultuda farklı bir araştırma yapmak ve yapılan araştırmayı daha kolay konumlandırmak için sayısal bir çalışma yapmak gerektiği anlaşılmıştır. Deneysel çalışmaların yüksek maliyet gerektirdiği ve mevsimsel şartlara bağlı olarak yılın belirli zamanlarında yapılabildiği bilinmektedir. Uzayan deney sürelerin çalışmaları zorlaştırmakta ve maliyeti artırmaktadır. Buna karşılık sayısal çalışmalar hem süre hem de maliyet olarak deneysel çalışmalara nispeten daha uygulanabilir. Ayrıca erime katılaşma çalışmaları gibi hassas çalışmalarda, tüm geometrilerde çalışmak mümkün değildir veya oldukça zordur. Kapalı veya karmaşık geometrilerde deneysel olarak ölçüm yapmak oldukça zordur. Fakat sayısal çalışmalarda bu zorluklardan bahsedilmez. Araştırmacılar günümüzde, sayısal çalışmalara bu sebeplerden ötürü önem vermektedir. Yapılan çalışmada temel amaç, yüksek gizli ısı depolama özelliğine sahip olan FDM' nin farklı sayıda kanatçık kullanılarak düşük olan ısı transfer katsayısını arttırmak ve bu sayede erime veya katılaşma sürelerini istenilen seviyeye çekmektir. Çalışmalarda birçok sayısal yazılım kullanılmakla birlikte özellikler araştırmacıların kendi yazdığı kodlar ve paket programların bazıları daha fazla kabul görmektedir. Bu hazır kodların başında bu çalışmada da kullanılan FLUENT paket programı gelmektedir.

2.1. Isı Depolamanın Önemi

Alternatif enerji kaynaklarını daha etkin ve verimli kullanabilmek için, gerek mevcut sistemlerin geliştirilmesi gerekse teknolojik gelişmelerden yararlanılarak yeni sistemler ortaya konmuştur. Isıl enerji depolama sistemleri bir maddenin ısıtılması (veya soğutulması) veya faz değiştirmesi yoluyla enerji depolar. Bu doğrultuda günlük hayatımızda birçok alanda ısı depolama sistemleri ile sıklıkla karşılaşmaktayız. Bunlara en genel örnek, bina ısıtma sistemlerinde kullanılan güneş kolektörleridir.

Güneş enerjisi gündüz bir kolektör vasıtasıyla toplanıp depolanır ve gece olduğunda bu depolanan ısı ortama verilerek binanın ısıtılması sağlanır. Güneş enerjisi kısa dönemli (birkaç saat) olarak depolanabileceği gibi uzun dönemli olarak (mevsimlik) da depolanabilir [35].

Güneş enerjisini kullanan sistemlerde, gece güneş bulunmadığı için gündüz depolanan enerji miktarının daha fazla olması arzu edilir. Bu durum maliyeti de artırır. Çünkü ihtiyacı karşılayacak enerji az miktardadır. Dolayısıyla maliyet artmaktadır. Bu sebeple ısı depolama, güneş enerjisi kullanan sistemler için oldukça önemlidir. Güneş enerjisini daha etkin, verimli ve maliyeti daha az olan sistemler için araştırmalar yapılmaktadır. Güneş enerjisini depolamanın önemi aşağıda belirtilmiştir [36].

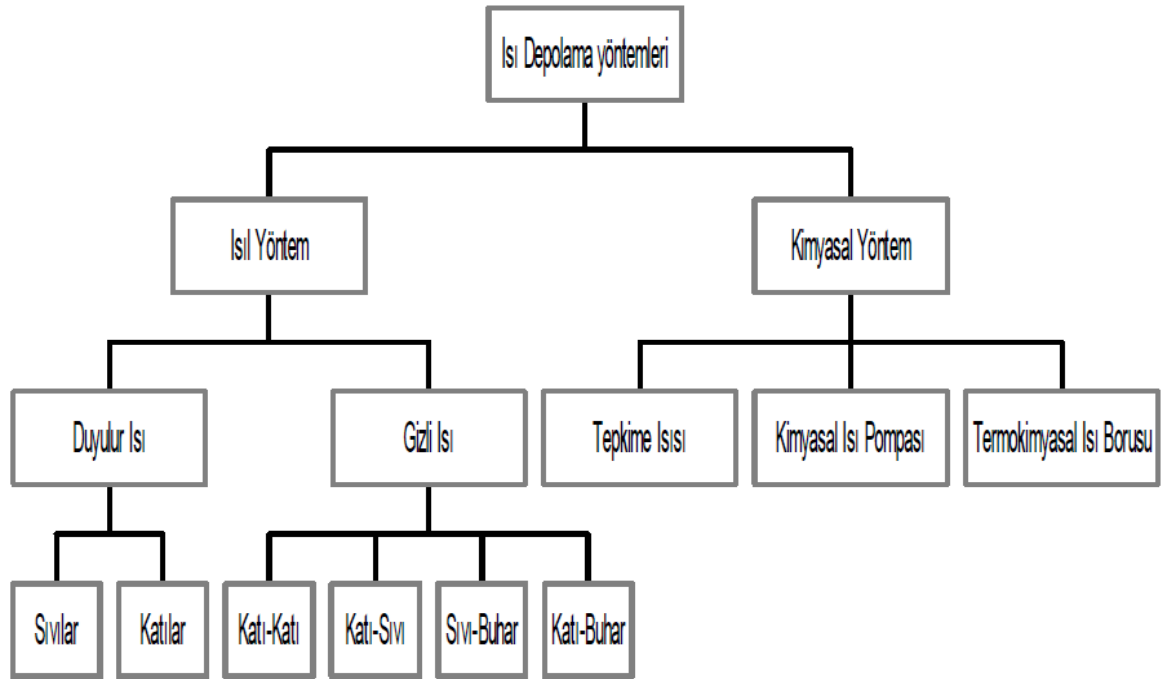
- Mevcut enerji miktarı gerekli enerji miktarını karşılayamamaktadır.
- Güneş ısıtım enerjisi gece-gündüz dönemlerinde farklıdır.
- Güneş enerjisi, güneş açılarının mevsimlere göre değişmesine bağlı olarak sabit değildir.
- Güneş bulunan dönemler ile enerji gereksinimi duyulan dönemler aynı değildir.

Güneş enerjisi bakımından önemli bir potansiyele sahip olan ülkemizde; güneşlenme süresi en fazla Temmuz ayında 365 h/ay ve en az Aralık ayında 103 h/ay olmak üzere, 2624 h/yıl'dır. Ortalama güneş ışıınımı yoğunluğu yaklaşık 3.67 kWh/m².gün (13.6 MJ/m².gün) değeriyle, toplam olarak yaklaşık 1311 kWh/m².yıl (4.72 GJ/m² yıl)'dır. Ülkemizin yüzeyine gelen güneş ışıınımı, diğer bir deyişle toplam enerji potansiyelimiz 3517 EJ/yıl (977 PWh/yıl)'dır [36]. Isı depolamada kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Isı depolama yöntemleri genel olarak aşağıdaki gibidir.

2.2. Isı Depolama Yöntemleri

Bir sistemin iş yapabilme kapasitesine enerji denir. Buna göre iş yapan sistemin enerjisi azalırken, iş alan bir sistemin enerjisi artar. Aynı şekilde ısı salan bir sistemin enerjisi azalır, ısıtılan bir sistemin enerjisi artar. Sistem ile ortam arasındaki sıcaklık farkından doğan enerji akışına ısı denir. Termal enerji ise bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır [2].

Isı depolama yöntemleri Şekil 2.1 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Isı depolama yöntemleri [2].

Termal enerji depolama sistemlerinin temelinde depolama sistemine enerji sağlanması, bu enerjinin depolanması ve depolanan enerjinin ihtiyaç duyulan zamanlarda kullanılması prensibi yatmaktadır. Bu kısaca; yükleme, depolama, geri kazanma olarak özetlenebilecek bir süreçtir [35].

Isı enerjisi depolama sistemlerinin faydaları şunlardır:

- Yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli kullanılmasını sağlar (Güneş enerjisi, vs.).
- Elektriğin ucuz olduğu zamanlarda depolama yapılabilir.
- Çok çeşitli sıcaklıklardaki atık ısıdan faydalanılmasına olanak sağlar.
- Enerji verimliliğini artırarak elektrik enerjisi tüketimini azaltır ve şebekeye destek olur.
- Kojenerasyon santrallerinin daha etkin çalışmasını sağlar.
- Özellikle elektronik cihazların güvenliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlar [2].

Güneş enerjisinin depolanabilmesi için öncelikle diğer enerji şekillerinden birine dönüştürülmesi gerekir. Güneş enerjisi aşağıda ki yollarla diğer enerjilere dönüştürülebilir.

- Soğurma

- Isıl dönüşüm
- Fotovoltaik sistemler

Cihaz ve dönüşüm şekillerine bağlı olarak elde edilen enerji, ısı veya elektrik enerjisi olabilir. Enerjiyi hemen kullanmak veya daha sonra kullanmakta dönüşümü etkiler. Bazen doğrudan güneş enerjisinden elde edilen enerji diğer bir sisteme gönderilerek ikincil enerji olarak kullanılabilir. Örneğin güneş toplaçlarından elde edilen yüksek sıcaklıkta ki buhar, bir türbine gönderilerek elektrik enerjisi olarak kullanılabilir [36].

Isıl enerji depolama genel olarak duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama olmak üzere ikiye ayrılır. Enerji, duyulur ısı depolamada maddenin sıcaklığının değişmesi yoluyla depolanırken, gizli ısı depolamada maddenin faz değiştirmesi yoluyla depolanır.

2.2.1. Duyulur Isı Depolama

Duyulur ısı depolama yönteminde, ısı depolayan materyalin sıcaklığındaki değişim sonucunda ortaya çıkan ısıdan yararlanılır. Isı depolama materyali olarak, sıcaklığı arttırıldığında duyulur ısı şeklinde ısı depolayabilen katı ve sıvı materyaller kullanılır. Duyulur ısı depolama materyallerinin birçoğu bol miktardadır ve ucuzdur [36]. Duyulur ısı depolama sistemleri en yaygın olarak kullanılan ısı enerji depolama sistemleridir. Bu sistemlerde maddenin ısı kapasitesinin yüksek olması, uzun süre (10-15 yıl) özelliklerini koruyabilmesi, korozif olmaması, kolay elde edilebilir ve ucuz olması istenir [8].

Depolanan ısı miktarı aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$Q = m * c * (T_{son} - T_{ilk}) \quad (2.1)$$

Q : Depolanan ısı

m : Depolanan maddenin kütlesi

c : Depolanan maddenin özgül ısısı

T_{son} : Son sıcaklık

T_{ilk} : İlk sıcaklık [36].

2.2.2 Gizli Isı Depolama

Isı depolama materyallerinin iç enerjisinin önemli oranda değişmesi, bu materyalin faz değiştirmesine neden olur. Faz değiştirmesiyle ortaya çıkan ısıya gizli ısı denir ve bu ısı depolanabilir. Bu nedenle ısı depolama amacıyla, belirli sıcaklıklarda ergime, buharlaşma veya diğer faz değişimlerine uğrayan ve ısı depolama kapasiteleri yüksek olan materyallerden yararlanılır. Bu ısı depolama yöntemi, ısı depolama kapasitesi yüksek olması ve ısı depolama materyali faz değiştirme sıcaklığının sabit sıcaklıkta ısı depolamak için uygun olması nedeniyle, diğer ısı depolama yöntemlerine göre istenen özelliklere sahiptir [36].

Maddenin gizli ısısı aşağıdaki denkleme göre hesaplanır;

$$Q = \int_{T_o}^{T_e} m * C_p * dT + mH_E + \int_{T_e}^{T_s} m * C_p * dT$$
$$= m[H_E + C_k(T_e - T_i) + C_s(T_s - T_e)] \quad (2.2)$$

C_k : Katı fazın sabit basınçta özgül ısısı (kJ/kgK)

C_s : Sıvı fazın sabit basınçta özgül ısısı (kJ/kgK)

T_o : Başlangıç sıcaklığı (K)

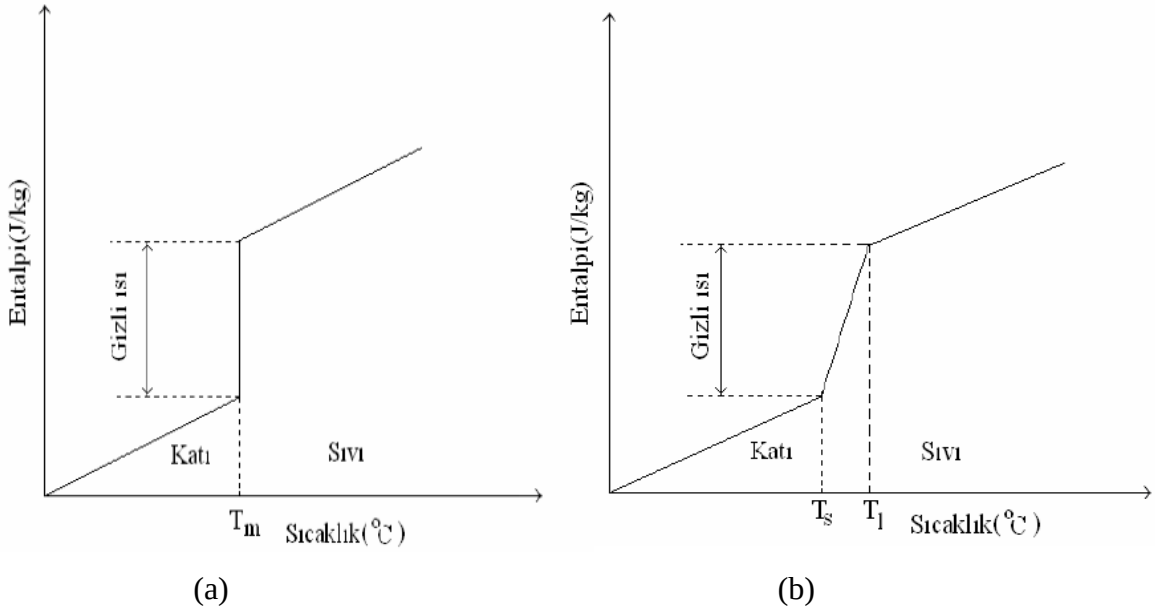
T_e : Erime sıcaklığı (K)

T_s : Son sıcaklık (K)

H_E : Erime gizli ısısı (kJ/kg) [37].

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan depolama maddelerine faz değiştiren maddeler denir. Gizli ısı depolama maddeleri enerjiyi, Şekil 2.2a’da gösterildiği gibi sabit bir T_m sıcaklığında veya Şekil 2.2b’deki gibi çok küçük bir $\Delta T = T_1 - T_s$ sıcaklık aralığında faz değiştirerek depolarlar. Saf maddeler sabit sıcaklıkta faz değiştirirken, karışımlar, alaşımlar ve saf olmayan maddeler belli bir sıcaklık aralığında faz değiştirirler. Dolayısıyla oluşan ara yüz iki fazlı olur. Ayrıca, duyulur ısı depolama sistemlerine göre çok daha yüksek miktarda enerji depolama yoğunluğuna sahiptirler [8].

Şekil 2.2’ de gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Gizli ısı depolama maddelerinin sıcaklık entalpi değişimi. (a) izotermal hal değiştirme (b) sıcaklık aralığında hal değişimi [8].

Gizli ısı depolamanın diğer termal enerji depolama tekniklerine göre üstün yönleri şu şekilde sıralanabilir:

- Duyulur ısı depolamaya göre termal enerji depolama kapasitesi yüksektir, ısı deposu hacmi daha küçüktür.
- FDM olarak kullanılan maddelerin birim kütlelerinin termal enerji depolama kapasiteleri daha yüksektir. Faz değiştirme sıcaklıkları, sabit sıcaklıkta depolama ve geri kazanma için uygundur.

Gizli ısı depolama sistemleri;

- FDM olarak kullanılacak maddenin seçimi,
- FDM de depolanan ısının uygulama ortamına aktarımı için ısı değiştirici tasarımıyla temelde iki aşamadır [8].

Gizli ısı yoluyla ısı enerji depolamanın yukarıda sözü edilen üstünlüklerinin yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir [8]:

- FDM' lerin düşük ısı iletkenliği,
- Depolama sırasında meydana gelen yoğunluk değişimi,
- Uzun süreli kullanım sonucunda maddenin yapısında ortaya çıkan kararsızlıklar,
- Faz ayrılması ve aşırı soğuma olarak ifade edilir.

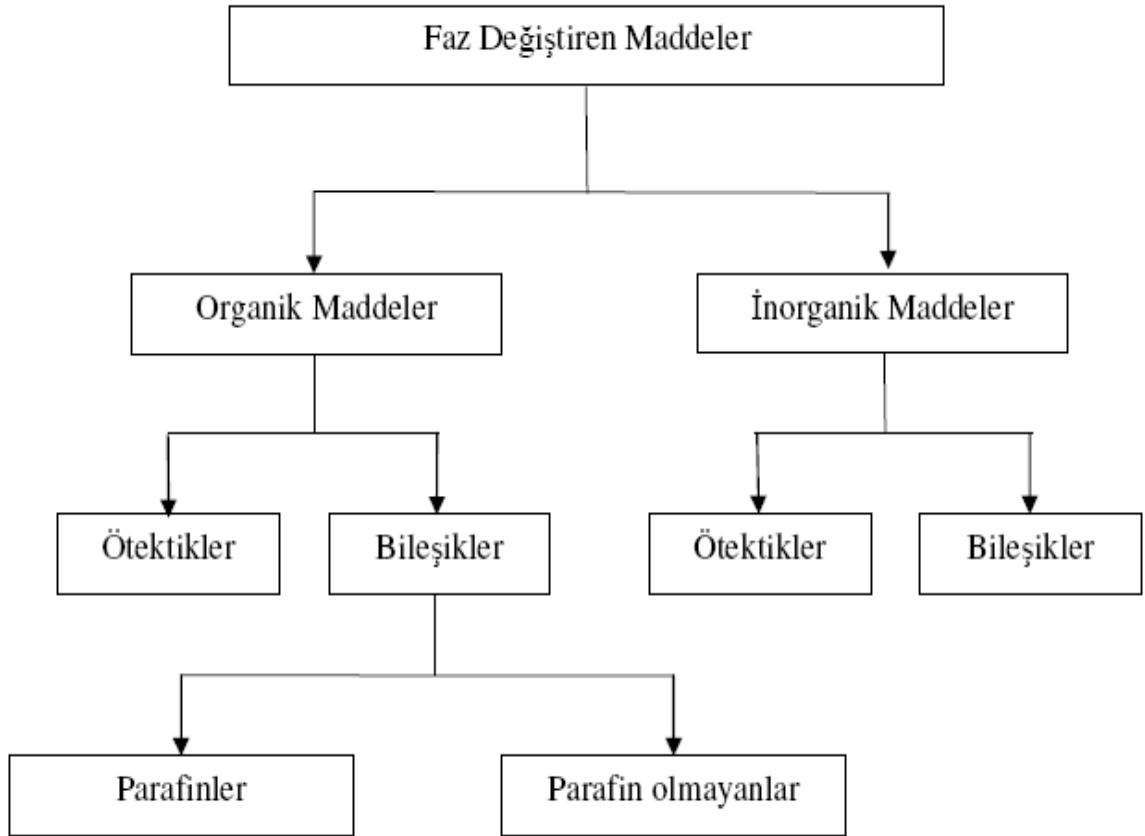
Katı-katı, sıvı-gaz ve sıvı-katı olarak üç değişik şekilde faz değiştiren FDM' ler mevcuttur.

Katıdan katıya faz değişimi geçiren FDM’ lerin çok azı ısı enerjisi depolama uygulamaları için uygundur. Sıvı-gaz faz değişimi geçiren FDM’ ler yüksek ısı depolama kapasitelerine sahip olmakla birlikte faz değiştirme sırasında büyük hacim değişimlerine maruz kalırlar. Dolayısıyla pratik uygulamalar için uygun değildirler. Sıvı-katı faz değiştiren FDM’ ler oldukça yüksek ısı depolama kapasitelerine sahiptirler ve faz değişimi sırasında hacimlerinde büyük değişimler olmaz. Gizli ısı depolama sistemlerinde çoğunlukla bu tür FDM’ ler kullanılır [8].

2.3. Faz Değiştiren Maddeler (FDM)

Faz değiştiren maddeler (FDM) düşük erime-katılaşma sıcaklığına ve yüksek enerji depolama özelliklerine sahip oldukları için son yıllarda birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Ortam sıcaklığı arttığı zaman FDM faz değişimine (katı-sıvı) uğrar. Faz değişim işlemi endotermiktir ve FDM, bu süreçte ısı absorbe eder. Faz değişim sıcaklığına ulaşıldığı zaman erimeye başlar ve bu işlem tamamlanıncaya kadar sıcaklık sabit kalır. Madde faz değişim işlemi (erime) esnasında enerjiyi gizli ısı olarak depolar [37].

FDM belirli miktarda ısıyı alarak faz değiştirir. Maddenin faz değiştirmesine neden olan ısıya gizli ısı denir. Bu süreç tersine çevrilirse, yani gaz fazından sıvıya ya da sıvı fazdan katı faza geçtiğinde, daha önce alınan ısı, madde saf ise izotermal olarak açığa çıkmaktadır. Maddelerin FDM olarak kullanılabilmesi için gerekli temel koşulların arasında, faz değiştirmedeki sabitlik ve maddenin hacminde az bir değişim meydana gelmesi yer alır [2]. Faz değişimi sırasında maddeye verilen veya maddeden alınan ısıya “Gizli ısı veya faz değişim ısıısı” adı verilir. Katı-sıvı faz dönüşümüyle ısı depolama uygulamaları için birçok organik ve anorganik FDM’ ler vardır [2]. FDM’ nin sınıflandırılması şekilde gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Faz değıştiren maddelerin sınıflandırılması [8].

FDM' lerin kullanım alanları çok çeşitlidir. Bu durum çalışma esnasında ki araştırmalarda da karşımıza çıkmıştır. Genel olarak kullanım alanları aşağıda ki gibi sınıflandırılabilir.

FDM' lerin kullanım alanları;

- Güneş enerjisinin termal depolanması
- Biyoklimatik binalarda pasif depolama
- Soğutma: buz bankası ve aşırı güç ihtiyacını azaltma uygulamaları
- Isıtma ve temiz su ihtiyacı
- Emniyet: bilgisayar ya da elektrik sistemlerinin bulunduğu odalarda sabit sıcaklığın sürdürülmesi
- Gıdaların ısı korunması: taşıma, dondurma ve pazarlama
- Gıda endüstrisi: Şarap ve süt üretimi, seracılık
- Elektronik parçaların termal korunması

- Tıbbi uygulamalar: kan taşınması, ameliyat masası, sıcak-soğuk terapi
- Motor soğutma (elektrik ve içten yanmalı)
- Araçlarda termal konfor
- Ekzotermik kimyasal reaksiyonlarda ani sıcaklık yükselmelerini engelleme
- Uzay araçlarının termal sistemleri
- Güneş enerji panelleri

Bir faz değiştiren maddede aranan özellikler; termodinamiksel, fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikler olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir [2]:

a) Termodinamik özellikler:

- Kullanılacağı yere uygun faz değiştirme sıcaklığına sahip olma
- Yüksek gizli ısı kapasitesine sahip olma
- Sıvı ve katı fazda yüksek ısı iletkenliğine sahip olma

b) Fiziksel özellikler:

- Faz değişimi sırasındaki yoğunluk değişiminin düşük olması
- Yüksek yoğunluğa sahip olma
- Katılaşma sırasında aşırı soğumaya uğramama

c) Kimyasal özellikler:

- Kararlı olma
- Faz ayrılmasına uğramama
- İçine konulduğu deponun malzemesi ile kimyasal reaksiyona girmeme
- Yanıcı ve zehirleyici olmama

d) Ekonomik özellikler:

- Ucuz olma
- Bol miktarda elde edilebilir olma

Uygulamada FDM' nin seçimi çok önemlidir. Bunun için FDM' nin dönüşüm sıcaklığı parametre olarak alınır. Bir mühendislik uygulaması için hangi FDM' nin seçileceğiyle ilgili en önemli parametre FDM' nin dönüşüm sıcaklığıdır. Tablo 2.1' de bazı FDM' lerin faz değiştirme sıcaklıklarına göre kullanıldıkları uygulamalar verilmiştir.

Tablo 2.1. FDM dönüşüm sıcaklıkları [2].

Faz değiştirme sıcaklığı (°C)	Uygulamalar
$5 \leq T_m \leq 25$	Binalarda iklimlendirme amacıyla kullanılırlar. Bu maddeler gece katılaşır ve gündüz ortamdan ısı çekerek ortamın soğutulmasını sağlarlar.
$25 \leq T_m \leq 30$	Binaların duvarlarına emdirilerek ortamın sıcaklığının gün içindeki çevre sıcaklığı değişimlerinden etkilenmemesi sağlanır. Bu tür maddeler ayrıca hava bazlı (ısı transfer akışkanı olarak havanın kullanıldığı) gizli ısı depolama sistemlerinde geceleyin ve gündüz erken saatlerde ortama ısı sağlamak amacıyla da kullanılabilirler.
$40 \leq T_m \leq 60$	Hava bazlı ısı depolama sistemlerinde gece ve gündüz ortam ısıtma uygulamalarında kullanılırlar.
$55 \leq T_m \leq 70$	Konutlarda kullanım suyunun önceden ısıtılmasında kullanılırlar.
$60 \leq T_m \leq 95$	Isı transfer akışkanı olarak suyun kullanıldığı gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılırlar.
$25 < T_m$	Elektrik ihtiyacının düşük olduğu dönemlerde elektrik enerjisinden yararlanılarak faz değiştiren maddenin eritilerek daha sonra ortam ısıtılması uygulamalarında kullanılırlar.
$90 < T_m$	Soğurmalı soğutma sistemleri gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar.
$0 < T_m$	Süt ve gıda endüstrisi, şişeleme ve bira fabrikaları, mezbaha, rafineriler, laboratuvarlar, büyük mutfaklarda, ilaç ve kimya sanayisi.

2.4. FDM' lerin Ömürleri

Bir FDM' nin ömrü, o FDM' nin tekrarlayan şarj/deşarj çevrimleri sonunda faz değiştirme sıcaklığı ve gizli ısı depolama kapasitesi gibi özelliklerinin ne kadar süre kararlı olarak kalabileceği ile ilgili bir kavramdır. FDM' ler laboratuvar ortamında çeşitli sayılarda erime/katılaşma çevrimine maruz bırakılır ve yukarıda bahsedilen özelliklerinin çevrim sayısı ile nasıl değiştiği belirlenir. Organik FDM' ler inorganik FDM' lere göre kimyasal olarak daha kararlı oldukları için ömürleri de daha uzundur. Örneğin faz değiştiren madde olarak bir organik FDM olan parafinlerin kullanıldığı ısı depolama sistemlerinin ömürleri 2000 şarj/deşarj çevrimini bulabilirken organik olmayan bir FDM kullanıldığında ise bu değer 1000 şarj/deşarj sayısına düşebilmektedir [8].

Yapacağımız çalışmalar, geçmişte yapılmış birçok çalışmayı dikkate alarak devam edecektir. Gizli ısı depolama sistem analizi için çok sayıda metot vardır. Bu metotlardan bizim çalışma sistemimiz ve şartlarımıza uygun olanı seçip işlemleri yapmak bize düşmektedir. Aşağıda bu sistemler için yapılan analizler bulunmaktadır.

2.5. Gizli Isı Depolama Sistemlerinin Analizi

Erime ve katılaşma içeren geçici rejimde ısı transferi problemleri literatürde genel olarak hareketli sınır problemleri veya Stefan problemleri olarak adlandırılır. Bu problemlerde katı-sıvı ara yüzü, ortamdan çekilen veya ortama verilen ısıya bağlı olarak yer değiştirir. Katı-sıvı ara yüzünün (hareketli uç) yerinin önceden bilinmemesi bu tür problemlerin çözümünü zorlaştırır. Tam analitik çözümlerin bulunamadığı durumlar için, yaklaşık, yarı analitik ve sayısal yöntemler kullanılmıştır.

Hareketli sınır problemleri için kullanılan bazı çözüm yöntemleri şunlardır [8]:

- Tam analitik çözümler
- İntegral metot
- Hareketli ısı kaynağı yöntemi
- Pertürbasyon yöntemi
- Sayısal yöntemler

2.5.1. Tam Analitik Çözümler

Hareketli sınır problemleri yapısı gereği lineer olmadığından, bu problemlerin tam analitik çözümleri sadece idealize edilmiş yarı sonsuz veya sonsuz ortamlar için, basit sınır ve başlangıç koşulları altında elde edilebilmektedir [8].

2.5.2. İntegral Metot

Pohlhausen ve Von Karman'ın sınır tabaka denklem analizlerine dayanan yaklaşık bir yöntem olup, tek boyutlu faz değiştirme problemleri için uygun sonuç verir. Bu yöntemde elde edilen integral denklemin çözülebilmesi için gerekli sıcaklık profilinin problem geometrisine uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Bu yöntemin iki boyutlu problemlere uygulanması için diğer çözüm yöntemleriyle birlikte kullanılması gerekmektedir [8].

2.5.3. Hareketli Isı Kaynağı Yöntemi

Bu yöntemde probleme; faz değişimi sırasında ortama verilen veya ortamdan çekilen ısıya hareketli bir ısı kaynağı neden oluyormuş gibi düşünülerek yaklaşılmaktadır. Problem bu şekilde, zamana bağlı faz değişimi problemi yerine, hareketli bir ısı kaynağı içeren zamana bağlı ısı iletimi problemi haline dönüşmektedir. Böylece katı ve sıvı fazlar ile ara yüzey için geçerli olan tek bir diferansiyel denklem elde edilir. Bu denklemin integral dönüşüm tekniği veya Green fonksiyonu yöntemiyle çözümü ve ara yüzey koşulunun sağlanması sonucu ara yüzeyin konumunu veren bir integral denklem elde edilir. Bu denklem basit bazı problemler için analitik olarak çözülebilmekle birlikte, çoğunlukla yarı analitik veya sayısal yöntemlerin kullanımı gerekmektedir [8].

2.5.4. Pertürbasyon Yöntemi

Bu yöntemde, sıcaklık dağılımı ve ara yüzey diferansiyel denklemleri, bir pertürbasyon parametresi (faz değiştirme problemleri için Stefan sayısı) içerecek şekilde boyutsuz hale getirilir ve bu parametre için seriye açılır.

Bu işlem boyunca bağımsız değişkenler genellikle ara yüzeyi zamandan bağımsız, başka bir deyişle hareketsiz kılan yeni bir ortama aktarılırlar. Bu yöntemin kullanılması, değişik koordinatlar ve koşullar için farklı formülasyonlar gerektirir [8].

2.5.5. Sayısal Yöntemler

Faz değiştirme problemlerinde analitik çözümler sınırlı koşullar altında elde edilebildiğinden, bu problemlerin çözümünde daha çok sayısal yöntemler kullanılır. Bu sayısal yöntemler ara yüz izleme ve bölge sabitleştirme sayısal yöntemleri olarak iki grupta toplanabilir. Birinci gruptaki sayısal yöntemlerde sıcaklık tek bağımlı değişken olarak alınır ve enerjinin korunumu denklemi katı ve sıvı fazlar için ayrı ayrı yazılır. Katı-sıvı ara yüzü ve sıcaklık dağılımının her zaman adımında izlenmesi gerekir. Bu nedenle bu yöntemlerin çok boyutlu problemlere uygulanması oldukça zordur. İkinci gruptaki sayısal yöntemlerde, ara yüzün değişiminin her zaman adımında izlenmesine gerek yoktur. Ayrıca çok boyutlu problemlere kolaylıkla uygulanabilir. Bu grupta en yaygın olarak kullanılan yöntem entalpi metodudur. Bu metotta, entalpi sıcaklığa bağlı bir değişken olarak tanımlanarak enerji denklemi her iki bölge (katı, sıvı) ve ara yüz için uygulanabilir hale getirilir. Böylece problem sabit bir bölgede çözülmüş gibi hareket edilebilir. Bu yöntem, faz değişiminin hem sabit sıcaklıkta hem de bir sıcaklık aralığında meydana geldiği problemlere uygulanabilir [8]. Entalpi metodunun en büyük avantajı sadece faz değiştiren madde ile değil herhangi bir madde ile de kullanılabilir olmasıdır. DSC ölçümlerinin sonuçlarına göre entalpi fonksiyonu belirlenir.

2.6. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)

CFD (Computational Fluid Dynamics) veya Türkçe kullanışı ile HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği), temel olarak akışkan davranışının etkili olduğu problemlerin, sayısal metot ve algoritmalar ile bilgisayar üzerinde çözülerek analiz edildiği, akışkanlar mekaniğinin bir koludur. Karmaşık geometriler, viskozite, sıcaklık farkları vb. etmenler klasik akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerine uygulandığında çözüm çok zor, hatta çoğunlukla imkânsızdır.

Klasik akışkanlar mekaniğinde ancak düz levhalar, dairesel kesitli borular gibi idealize edilmiş basit geometrilerde sonuca ulaşılabilir, geriye kalan gerçek problemlerin %99'un da sonuç elde edebilmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiğine başvurmak gerekir. Bunun için akış bölgesi, akışa ait temel diferansiyel denklemlerin çözüldüğü küçük düzgün elemanlardan ve noktalardan oluşmuş ağ yapısına ayrılır ve bu küçük elemanlardan iterasyonlarla adım adım bütün çözüme varılır.

Otomotiv endüstrisinden, uzay ve havacılığa, elektronikten, çevre, enerji ve medikal uygulamalarına kadar geniş bir kullanım sahası olan CFD, genel olarak aşağıdaki alanlarda işlem yapabilme olanağı sağlamaktadır.

- Kararlı rejim veya zamana bağlı akışkan davranışları
- Basınç, hız ve sıcaklık dağılımları
- Isı transferi
- Tek ve çok fazlı akışlar
- Sabit yoğunluklu ve sıkıştırılabilir akışkanlar
- Turbomakinalar
- Tanecik ve duman dağılımları [39].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda HAD birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda bu kadar kullanılmaya başlanmasına neden olan bazı avantajları şöyle sıralanabilir:

- CFD yazılımlarıyla yapılan sayısal simülasyon sayesinde, sonuçlar ve sanal deney ortamı simülasyondan sonra elimizin altında olur. Örneğin; basınç verisi elde etmek istenilen klasik bir deneyi, hız ölçümü için tekrar kurgulamak gerekir. Oysa CFD ile hız verisi dâhil olmak üzere daha birçok parametreye ait bilgiler de çözümün içindedir, yeni bir simülasyona, zahmetli kurulumlara gerek kalmaz.
- Klasik deneylerde kullanabileceğiniz ölçüm cihazları ve sensörler sınırlıdır. Oysa bir CFD analizinde, kullandığımız sayısal ağ elemanı kadar -çoğunlukla milyonlarca- ölçüm elemanı vardır ve veri dağılımlarını, deneylerdeki gibi sadece ayrı veriler halinde değil, gradyenler olarak geniş bir alanda görebiliriz.

- CFD, akış özelliklerini, akışı bozmadan incelememize olanak tanır. Geleneksel ölçüm yöntemleriyle bu çoğunlukla mümkün değildir. Şöyle ki; akış içerisinde hız ölçü yapmak istediğiniz bölgeye yerleştirilen pitot tüpü, aslında doğal akışı rahatsız ederek bozmaktadır, ya da bir pompa performansı ölçümü yaparken kullanılan debimetre, manometre gibi cihazlar akışın doğal davranışını etkilemektedir. CFD’ de her bir sayısal ağ elemanını başlı başına bir ölçüm noktası olduğundan, bu tip cihazların etkilerinden bağımsız veriler elde edebiliriz.
- CFD ile gözlemlenmesi tehlikeli veya ulaşılamaz bölgelerdeki akışkan davranışlarını inceleyebiliriz. Örneğin; bir yanma odasının içi ya da pompa, türbin gibi turbo makinelerin yüksek hızlı kanatlarının arasındaki akış gibi durumlar CFD ile rahatlıkla görselleştirilebilir.
- CFD, bir anlamda, bilgisayar üzerindeki esnek deney laboratuvarıdır. Doğrudan CAD datası ile çalışabilir, tasarımcı ve analizcilere sanal prototipler üzerinde deney yapma olanağı tanır. Örneğin; yeni tasarlanan bir otomobilin aerodinamik özelliklerini incelemek ve optimize etmek için yüzlerce protipe gerek kalmaz, ya da bir fan tasarım optimizasyonu için birbirinden küçük farkları olan onlarca çark prototipi üretilmeden, testler bilgisayar ortamında gerçekleştirilebilir ve sadece en iyi sonuç veren tasarımlar üretim için seçilebilir. Bu da size, günümüz rekabet koşullarında çok önemli olan zaman ve maliyet avantajını sağlar[40].

FDM’ ler ile ilgili olarak hem deneysel hem de sayısal birçok çalışma yapılmıştır. Deneysel sonuçların elde edilmesi aşamasında fazlaca zorluk bulunmaktadır. Deneysel çalışmalarda oluşabilecek sıkıntılar, doğa şartları, maddi zorluklar, zaman sıkıntısı vb. dış etkenlerdir. Deneysel çalışmalarda meydana gelen bu sıkıntılar araştırmacılara sayısal çalışmalar yapmayı daha çekici kılmaktadır. Fakat matematiksel olarak çözülemeyecek veya deneysel yöntemlerde olduğu gibi zaman kaybına neden olacak kadar zor problemler karşımıza sıkça çıkmaktadır. İşte bu noktada HAD yazılımları devreye girmektedir. Bu teknik makine, meteoroloji, biyomedikal, çevre mühendisliğindeki kirlilik ve atık su dağıtımı, gaz türbinleri, içten yanmalı motorlar, uçak ve araçların aerodinamiği, kimyasal metotlardaki ayrışma ve karışım gibi endüstriyel ve endüstriyel olmayan birçok alanda etkili bir uygulamadır.

HAD kodları Fortran, C++, Pascal gibi yazılım kodları ile kodlanabileceği gibi, yaygın olarak kullanılan STAR-CD, FLUENT, KIVA, FIRE ve VECTIS gibi ticari yazılımlarla da yapılabilir. Bunlardan biri olan FLUENT farklı birçok problem için bizlere kolaylık sağlamaktadır. Yapmayı planladığımız, FDM' lerde erime ve katılaşma problemlerinin çözümünde de, HAD yazılımları arasında en doğru sonuçlara sahip yazılım olduğu literatürle tespit edilmiştir. FLUENT sonlu hacim formülasyonunu kullanarak denklemleri sayısal olarak çözer ve cebirsel denklemlere dönüştürerek çözümlerin daha çabuk elde edilmesini sağlar.

Sonlu hacimler yöntemi çözülecek geometriyi parçalara bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma daha sonra bu çözümleri birleştirerek genel problemi çözme yöntemi olarak ifade edilebilir.

2.7. Sonlu hacimler metodu

Sonlu hacimler yöntemi, çözülecek geometriyi sonlu hacimlere bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünü bulma esasına dayanır. Sonlu hacimler yöntemi, korunum denklemlerini sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmek için kontrol hacim esaslı bir teknik kullanır. Bu teknik her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integrasyonunun alınması sonucunda, değişkenler için kontrol hacmini sağlayan ayrık eşitliklerin elde edilmesini içerir. Ayrık eşitliklerin doğrusallaştırılması ile elde edilen, doğrusal denklem sistemlerinin zamana bağlı çözümü ile hız, basınç ve sıcaklık gibi değişkenler verilen yakınsaklık ölçüsünü sağlayıncaya kadar güncellenir.

Sonlu hacimler yöntemi ile problem çözme işleminde genellikle şu adımlar kullanılır.

- Çalışılacak bölgenin ağ programları sayesinde oluşturulacak sayısal analize uygun ağ ile kontrol hacimlere bölünmesi.
- Sırasıyla momentum denkleminin, süreklilik denklemlerinin ve daha sonra enerji veya türbülans gibi diğer aranan denklemlerin çözümü.
- Sonuçlandırılan denklem takımlarının iteratif çözücü sayesinde daha doğru değerlere yükseltilmesi.
- Yakınsaklığın kontrolü.
- Çözümün elde edilmesi [23].

2.8. Erime/Katılaşma ve FLUENT

FLUENT, sabit bir sıcaklıkta veya sıcaklık dağılımı üzerinde meydana gelen erime veya katılaşma içeren akışkan problemlerini çözmek için kullanılabilir. FLUENT entalpi-gözeneklilik formülasyonunu kullanarak erime ve katılaşmayı modellemektedir.

FLUENT, erime ve katılaşma için aşağıdaki durumları sağlamaktadır.

- Alaşımların yanı sıra saf metallerin de erime ve katılaşmasının hesaplanması.
- Katılaşmış madde ve duvarlar arasında termal etki direncinin modellenmesi
- Erime/katılaşma ile geçiş türlerinin modellenmesi
- Sürekli döküm sürecinin modellenmesi
- Erime/katılaşma ile ilgili işlem sonrası nicelikleri (sıvı bölüm, çekme hızları v.s.)

Bu modelleme FLUENT' e çok geniş alanda hesaplama yapmak için olanak sağlar.

Model oluşturmada bazı kısıtlamalar da söz konusu olmaktadır. Bu kısıtlamalar aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

- Erime/katılaşma modeli sadece ayrık çözücü ile kullanılabilir.
- Erime/katılaşma modeli sıkıştırılabilir akışlar için kullanılamaz.
- Çok fazlı modellerden sadece VOF kullanılabilir.
- Bazı tür difüzyonların istisnası ile katı ve sıvı maddeleri için madde özellikleri ayrı olarak belirlenemez [38].

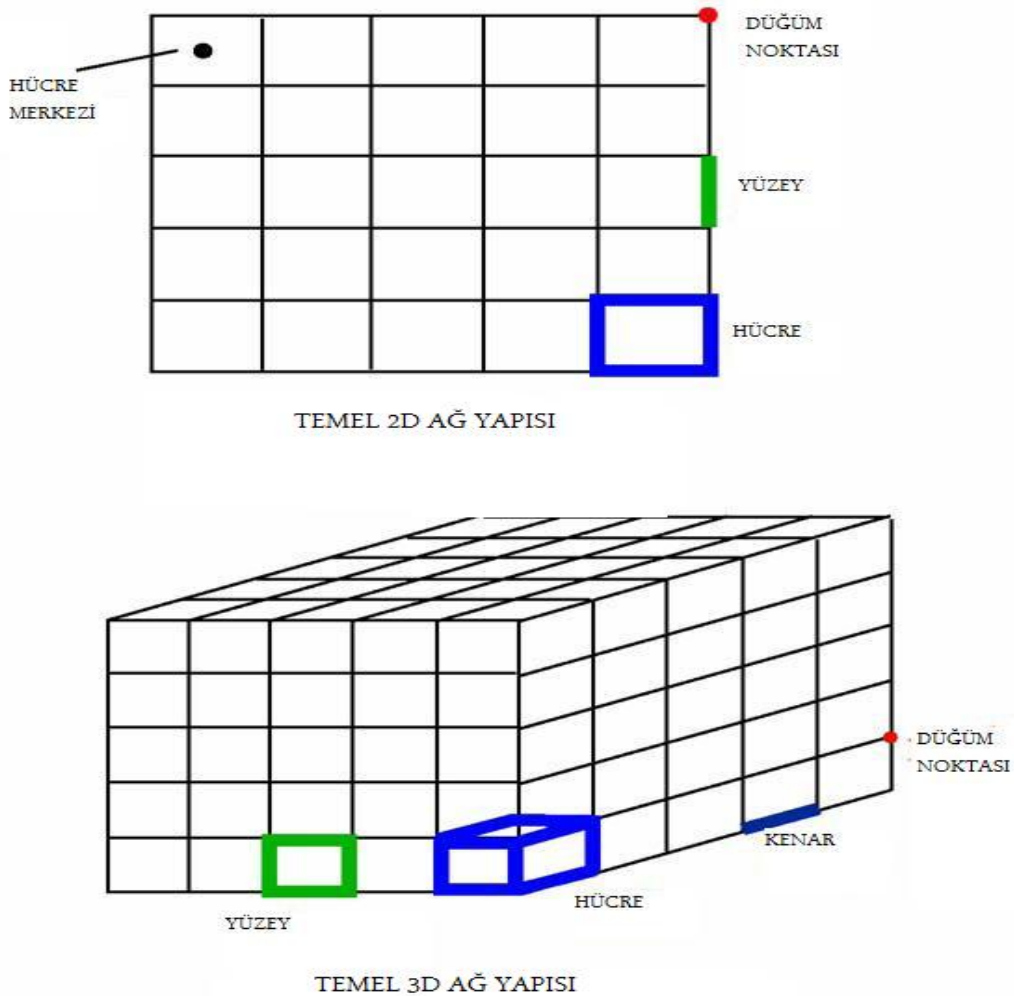
2.9. Erime ve Katılaşmanın Teorisi

Erime/katılaşma süreci modellenmesi için FLUENT' te entalpi-gözeneklilik tekniği kullanılır. Bu teknikte erime ara yüzü tamamen izlenmez. Onun yerine sıvı formda hücre hacmini gösteren sıvı oranı adında bir nicelik, işlem alanında her hücre ile ilişkilendirilir. Sıvı oranı her iterasyonda entalpi dengesine dayalı olarak hesaplanır. Lapa bölge diye tarif edilen bölge, sıvı oranının 0-1 arasında olduğu bir bölgedir. Lapa bölge gözenekliliğin birden sıfıra azaldığı gözenekli ortamda modellenir. Madde tamamen katılaştığı zaman gözeneklilik sıfır olur. Bu yüzden hızlar da sıfıra düşer.

Yapılacak sayısal çalışmalar için ağ yapısı sonuçlar üzerinde çok büyük etkiye sahiptir. Daha hassas çözümlerin elde edilebilmesi için bu düzenlemelerin etkin bir şekilde kontrol edilmesi, programın doğru sonuç vermesi açısından çok önemlidir [38].

2.10. Sayısal Grid Oluşumu

Birçok HAD çalışmasında yapılan hesaplamalarda fiziksel yüzeyler alt hücelere bölünür. Bu bölmeler yönetici denklemlerin çözümünde başlangıç noktalarını oluşturur. Ağ yapısı dik, silindirik veya problemin geometrik şekline uygun olacak koordinatlarda oluşturulabilir. Ağ yapısı oluşturulurken koordinat eksenleri ile ağ çizgileri uyıştırılır ve geometriye uyarlanır. Sonrasında bu çizgilerin kesişme noktalarında düğümler oluşur. Bu düğümler ise hücreleri belirler. Her bir hücre düğüm noktaları, hücre merkezi ve hücre sınırlarını belirleyen yüzeylerden oluşur.



Şekil 2.4. Grid bileşenleri [39].

Nümerik çalışmalar da çalışma alanı ayırma noktaları denilen gridlere ayrılır. Şekle uygun koordinatlar boyunca bu noktalarla yüzey bölünmüş olur. Çoğu HAD uygulamasında bu grid noktaları eşit aralıklı olarak uygulanır. Fakat geometrideki karışık bölgelerde çözüm kolaylığı sağlaması ve daha hassas çözüm alabilmek için düzensiz ağ yapısı veya sıkıştırılmış grid denilen metot kullanılır. Bu yapıda grid noktaları birbirine farklı uzaklıklarda konumlanır. Düzenli ağ yapısı gibi sıkıştırılmış ağ yapısında da iki ve üç boyutlu çalışmalarda kullanılır.

2.11. Grid kalitesi

Sayısal hesaplamalar da grid kalitesi çözüm uygunluğu ve doğruluğu için önemli bir rol oynar. Ağ yapısının kalitesi düğüm noktalarının yoğunluğu, dağılımı ve düzgünlüğüne bağlıdır. Yan yana olan hücreler arasında ki büyük hacim farklılıkları çözüm esnasında hatalara neden olur. Özellikle türbülanslı akışta sınır bölgelerde medyana gelen hataları önlemek için grid düzeni çok önemlidir. Hücrelerin yapısının da çözüme etkili bir diğer faktördür. Eşkenarlı ve hacimli elemanlar arasındaki büyük şekil değişiklikleri doğruluğu düşürür ve çözüm kararlılığını bozar. Üç boyutlu çalışmalar da ve iki boyutlu çalışmaların karmaşık bölgelerin de grid kalitesi çözümü direk etkileyen faktörlerdendir [39].

Uygun grid düzenekleri oluşturulması, problem çözümünde yararlı olacak. Aynı zamanda daha doğru ve hassas veriler sağlayarak uygulamada kolaylıklar sağlayacaktır.

2.12. Yönetici Denklemler

Bütün HAD uygulamalarında temel yönetici denklemler olarak akışkanlar dinamiğinin süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılır. Bu denklemler temel fizik kurallarına bağlı olarak farklı şekillerde türetilir. Bu şekilde probleme uygun çözüm geliştirilmiş olur.

FLUENT paket programı tarafından kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir.

FLUENT paket programı tarafından kullanılan süreklilik denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad 2.1$$

Burada; ρ yoğunluğu, V hız vektörünü (u,v), t zamanı ifade etmektedir.

FLUENT paket programı tarafından kullanılan enerjini korunumu denklemi aşağıdaki gibidir.

$$H = h + \Delta H$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$$

$$T < T_{katılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = 0$$

$$T < T_{sıvılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = 1$$

$$T_{katılaşma} < T < T_{sıvılaşma} \quad \text{ise} \quad \beta = \frac{T - T_{katı}}{T_{sıvı} - T_{katı}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad 2.2$$

Burada; H maddenin entalpisi, ρ yoğunluk, $\vec{v}$ hız vektörü.

Aşağıda program tarafından kullanılan momentum denklemi sunulmuştur.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i \quad 2.3$$

$$A_{\text{lapa}} = \frac{(1-\beta)^2 C}{(\beta^3 + \varepsilon)} \quad S = A_{\text{lapa}} * \vec{v}$$

Burada β sıvı hacim oranıdır, ε sıfır ile bölünmesini engellemek için 0.001'den küçük bir sayıdır, $\vec{v}$ hız vektörü, A_{lapa} porozite fonksiyonu ve C lapa bölge sabitidir [38].

3. BULGULAR

Yapılan literatür araştırmalarında, çalışmalarda kullanılacak modeller için ağ yapısı oluşumunun oldukça önemli olduğu görülmüştür. Bu bilgi ışığında, yapılan çalışmada kullanılan modelin ağ yapısı oluşumunda çok farklı ağ yapısı denemeleri yapılmış, bunlar arasından en doğru olduğu düşünülen ağ yapısı seçilerek çözüm aşamasına geçilmiştir.

Yapılan çalışma da amaç; gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan FDM' lerin düşük termal iletkenliklerinden kaynaklanan dezavantajı azaltmaktır. Bunun için belirlenen model de farklı kanatçık sayılarında erime ve katılaşma süreçleri ayrı ayrı incelenmiş ve olumlu veriler elde edilmiştir.

Bu çalışmada, faz değişen madde olarak parafin kullanılan dikdörtgen şekilli bir geometride, geometriye eklenen farklı sayıdaki kanatçıkların erime ve katılaşma sürecine etkileri analiz edilmiştir. Kanatçık eklenerek yüzey alanı arttırma işlemi sayesinde ısı transfer hızının arttığı bilinmektedir[40]. Bu nedenle, çalışmada farklı kanatçık sayılarının çözüm sürecindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sabit bir hacim içerisinde yapılmıştır. Çözüm aşamasında FLUENT paket programı kullanılmıştır. İlk olarak kanatçıksız ve dikey olarak yerleştirilen şekilde erime ve katılaşma süreci incelenmiştir. Daha sonra geometriye eklenen 5 ve 10 kanatçıkların sistem üzerindeki etkileri zamana bağlı olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan FDM 'nin termofiziksel özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.2. Kullanılan FDM' nin termofiziksel özellikleri

Erime aralığı	28-30 °C
Gizli ısı	179 kJ/kg
Katı halde Isı depolama kapasitesi	2400 J/kgK
Sıvı halde ısı depolama kapasitesi	1800 J/kg/K
Katı halde termal iletkenlik	0.24 W/mK
Sıvı halde termal iletkenlik	0.15 W/mk
Katı halde sabit yoğunluk	870 kg/m ³
Sıvı halde sabit yoğunluk	760 kg/m ³
Sıvı halde dinamik viskozite	3.42*10 ⁻³ kg/ms
Volümetrik genişleme katsayısı	0.5*10 ⁻³ K ⁻¹

Çalışmada takip edilen adımlar aşağıda ifade edilmiştir.

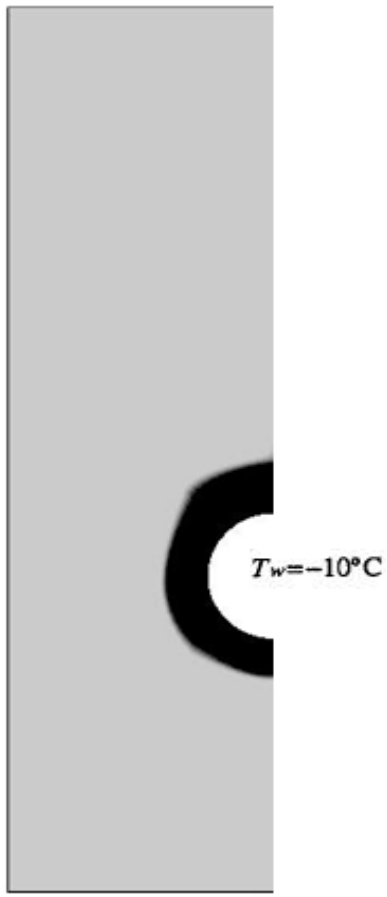
- Kullanılacak geometriler GAMBİT paket programı ile oluşturulmuştur.
- Model için belirlenen ağ yapısı FLUENT programında gözden geçirilmiş ve test edilmiştir.
- Kullanılacak denklemler ve sınır şartları FLUENT ortamında belirlenmiştir.
- Başlangıç şartları belirlenmiş ve daha sonra iterasyon yapılmıştır

Problem çözümünde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

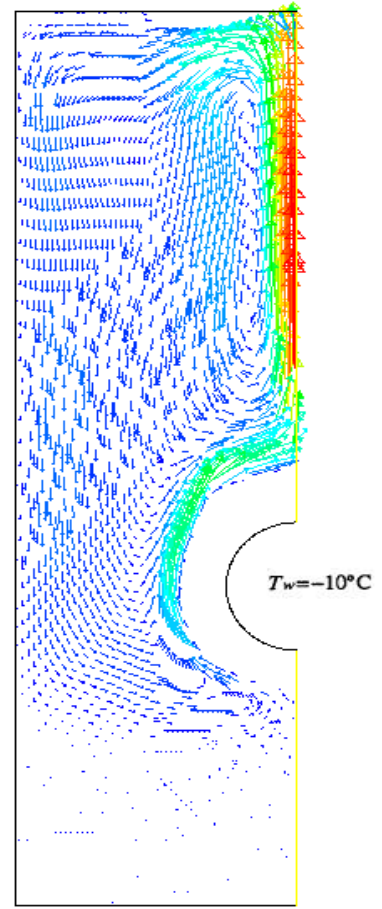
- Akış iki boyutlu ve laminardır.
- Sıvı faz Newtonian olarak kabul edilmiştir.
- Isı iletim katsayısı k ve özgül ısı c katı ve sıvı için ayrı ayrı alınmıştır.
- Kullanılan modelin sol, üst ve alt cidarları yalıtılmıştır.
- $T = 0$ anında FDM durağandır.
- Kanatçık yüzeylerinde kaymama sınır koşulu ($u=0, v=0$) kabul edilmiştir.

Programın çalışmasını ve sonuçların doğruluğunu test etmek için referans bir çalışma dikkate alınmıştır. Çalışmada yapılan kıyaslama izlenilen yolun doğruluğunu vurgulamaktadır. Elde edilen çözümler referans çalışmadaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan bu karşılaştırmalar sonucunda referans çalışma ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Böylece kullanılan sayısal yöntemin doğru olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 3.1 ve 3.2 'de referans çalışma ile yapılan çalışmanın 1800 sn sonraki sıvı oranı ve hız vektörü bileşenleri ifade edilmiştir. Sıvı oranı; depo içerisinde bulunan sıvı miktarının başlangıçtaki toplam sıvı miktarına oranıdır. Yani sıvı oranın 0 olması FDM 'nin tamamen buza dönüştüğü bölgeyi, 1 olması ise katılaşmanın olmadığı bölgeyi gösterir.

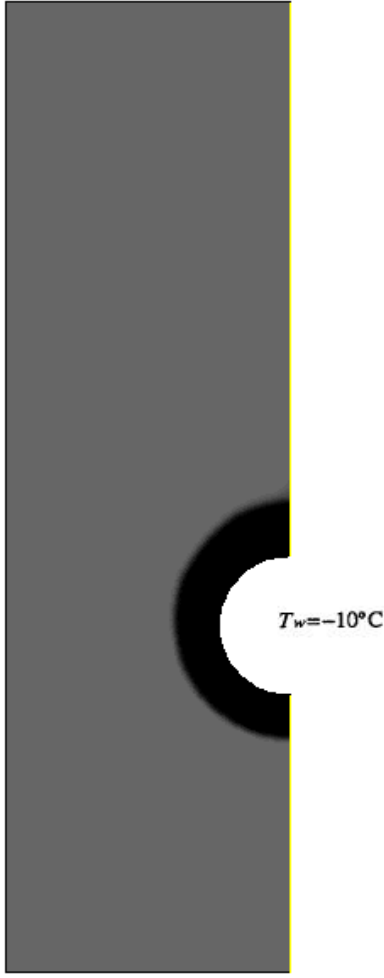


(a)

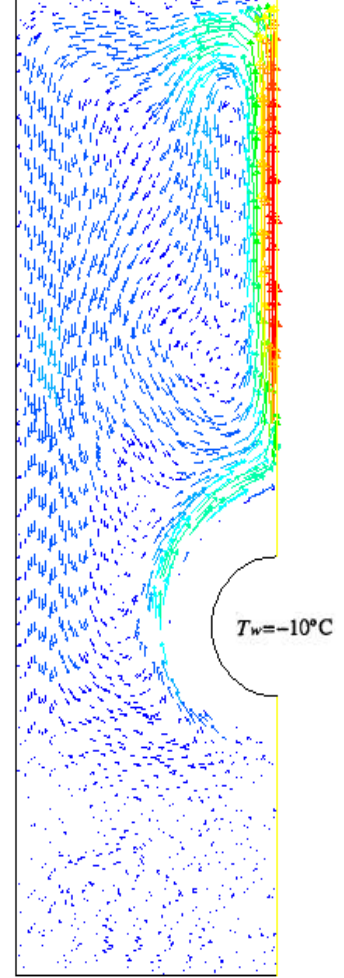


(b)

Şekil 3.1. (a)Referans çalışmada 1800 sn sonraki buz oluşumu, (b) referans çalışmada 1800 sn sonraki hız vektörü [3].



(a)



(b)

Şekil 3.2. (a)Yapılan çalışmada 1800 sn sonraki buz oluşumu (b) yapılan çalışmada 1800 sn sonraki hız vektörü

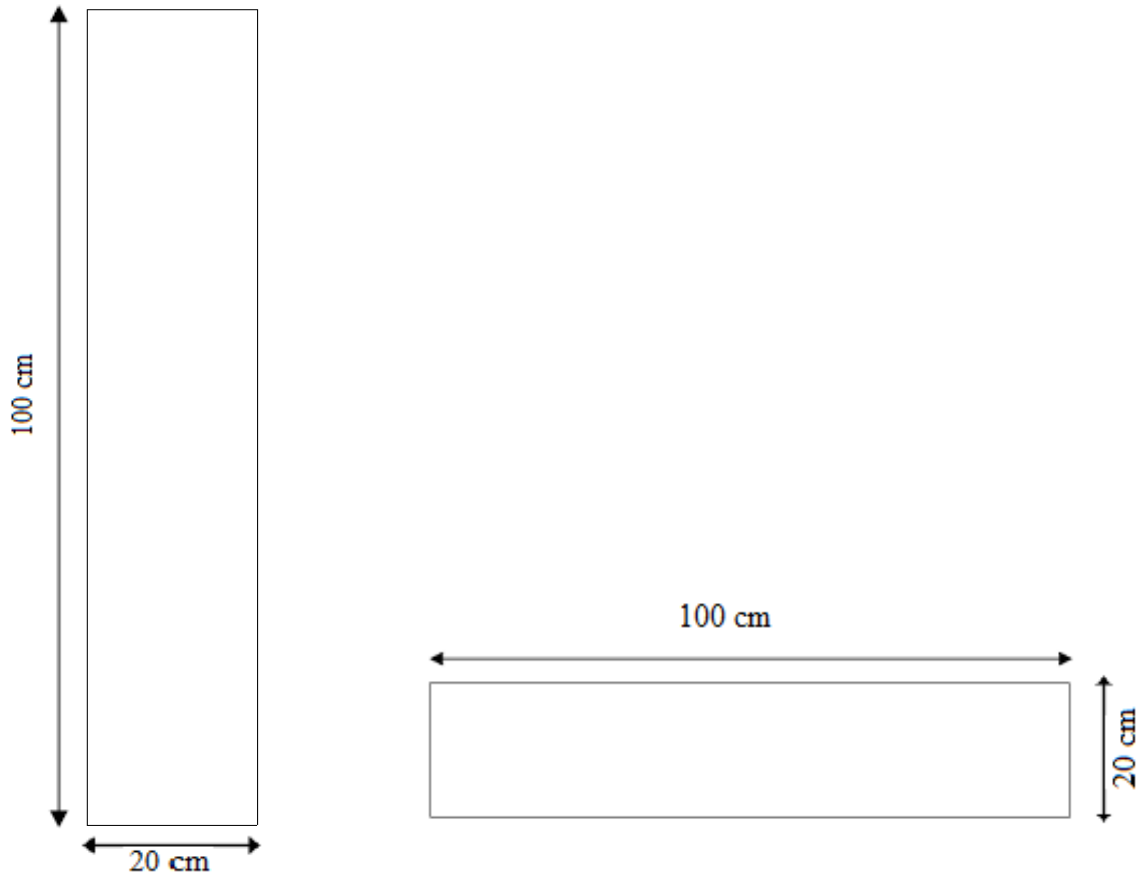
Referans çalışmayla yapılan çalışma sonuçların birbirlerine oldukça yakın oldukları şekilden de görülebilmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi soğuyan akışkan yoğunluk farkından dolayı yukarı yönde hareket etmektedir. Bunun sonucunda silindirin üst tarafında oluşan katı miktarı alt taraftakinden daha fazladır.

3.1. Modelin tanıtılması

Erime ve katılaşma sürecinin inceleneceği fiziksel model olarak kanatçıklı ve kanatçıksız yüzeylere sahip geometriler kullanılmıştır. Model geometrisinde kullanılan farklı kanatçık sayılarının erime ve katılaşma sürecine etkisi analiz edilmiştir. İlk olarak Şekil 3.3’ de boyutları verilmiş dikey modelde çalışma yapılmıştır. Çalışmada, kullanılan model 100 cm yüksekliğinde ve 20 cm genişliğindedir. Kanatçıklı modelin boyutları ise; 5 kanatçıklı model için kanatçık genişliği 10 cm ve yüksekliği de 2 cm olarak alınmıştır. 10 kanatçıklı sistemde, kanatçık genişliği 10 cm ve kanatçık genişliği yine 2 cm olarak alınmıştır. Kanatçıklı ve kanatçıksız model boyutları Şekil 3.3-3.5 arasında gösterilmiştir.

3.1.1. Kanatçıksız Model

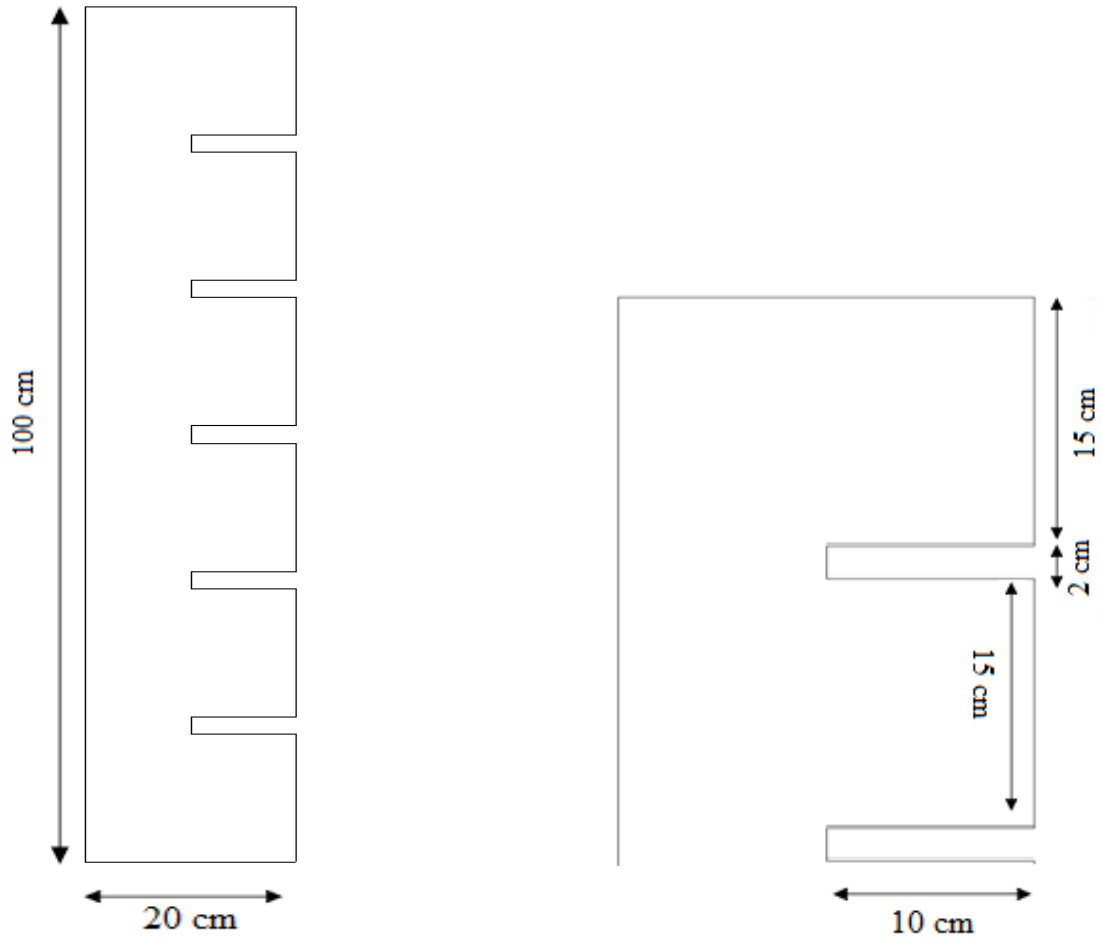
Şekil 3.3’ de çalışmada kullanılan modellerin kanatçıksız halleri görülmektedir. Dikey ve yatay halde görülen modeller için ayrı ayrı erime ve katılaşma süreci incelenmiştir.



Şekil 3.3. Kanatçıksız model

3.1.2. 5 Kanatçıklı Model

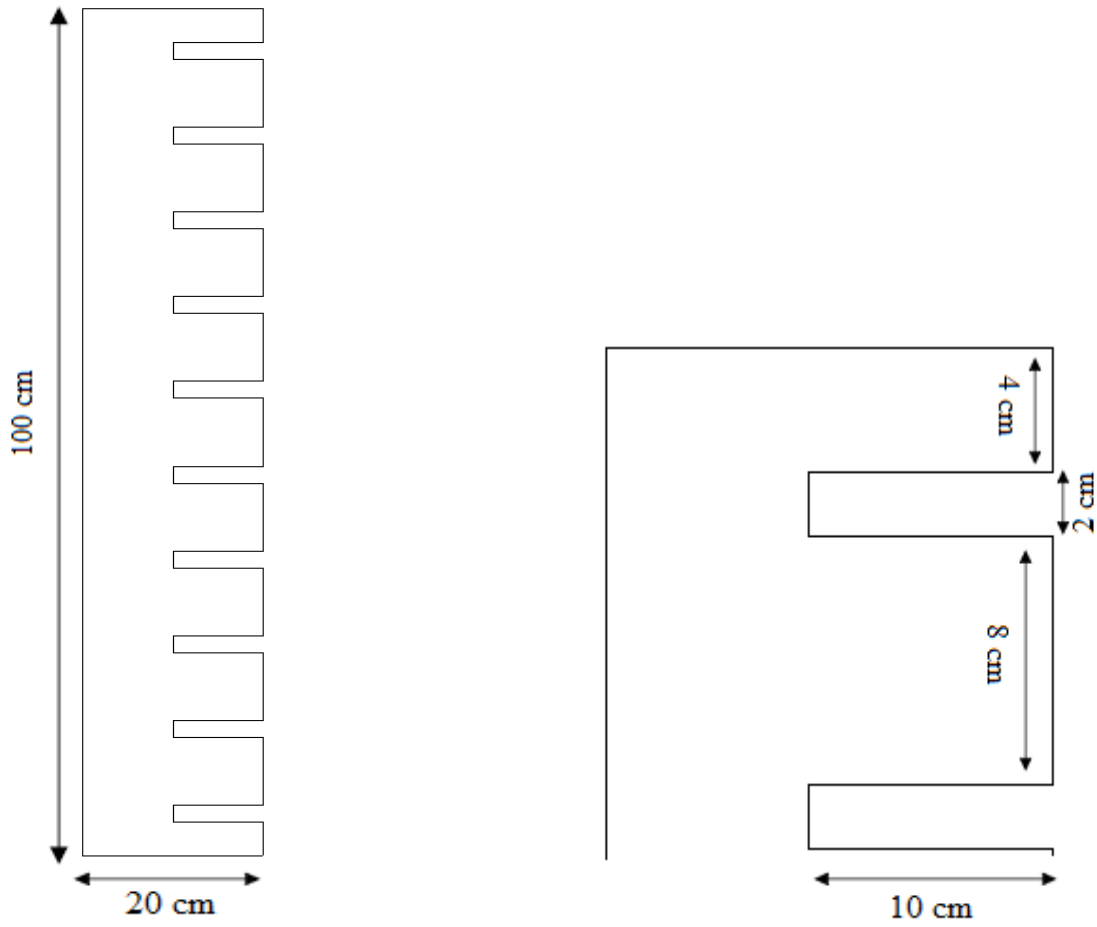
Şekil 3.4’ de çalışmada kullanılan modellerden biri olan 5 kanatçıklı hali görülmektedir. Modelin dikey konumlandırılması ve bir kesit görüntüsünden oluşan gösterimi şekildeki gibidir. Bu model üzerinde erime/katılaşma süreçleri ayrı ayrı ele alınmış ve sonuçlarının analizi yapılmıştır.



Şekil 3.4. 5 kanatçıklı model

3.1.3. 10 Kanatçıklı Model

Şekil 3.5’ de çalışmalarda kullanılan 10 kanatçıklı modelin dikey olarak konumlandırılmış ve kesit görüntüsünden oluşan halleri gösterilmiştir. Erime/katılaşma süreci 10 kanatçıklı model için de diğer modellerde olduğu gibi incelenmiş ve sonuçların analizi ilerleyen kısımlarda sunulmuştur.



Şekil 3.5. 10 kanatçıklı model

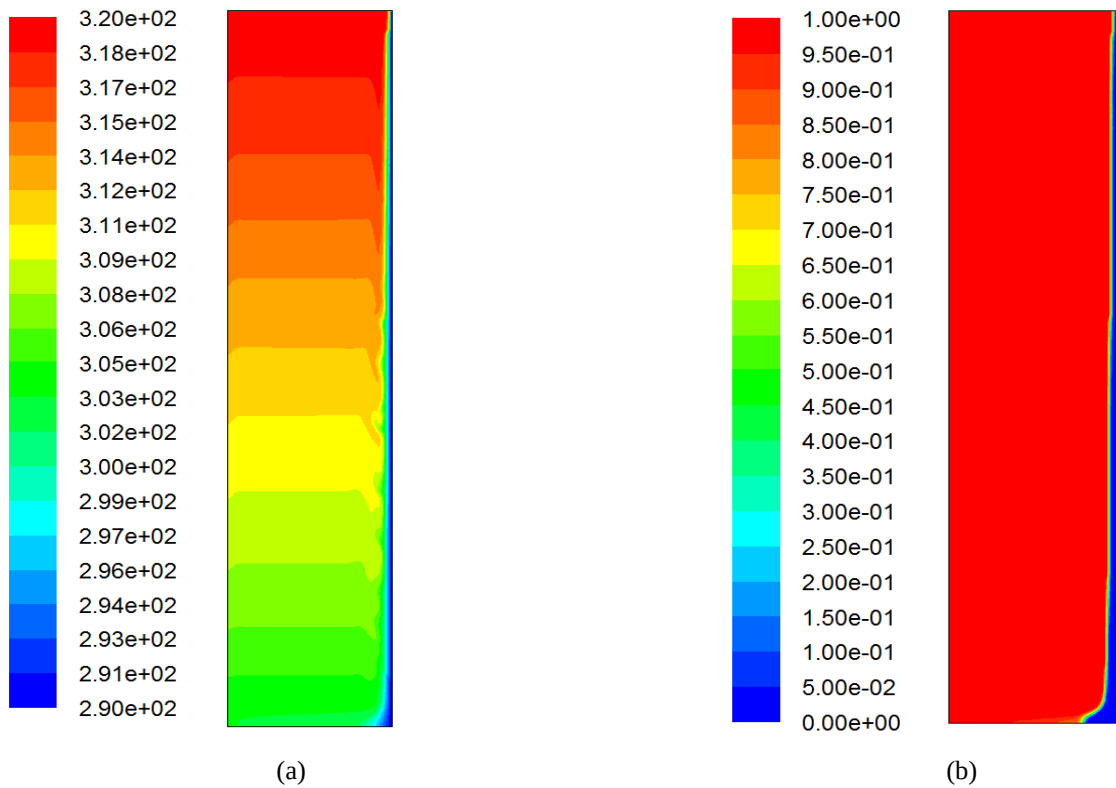
Yukarıda belirtilen 3 farklı modelde, erime/katılaşma süreçleri ayrı ayrı incelenerek süreçler üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

3.2. Dikey Olarak Yerleştirilen Modelde Katılaşma

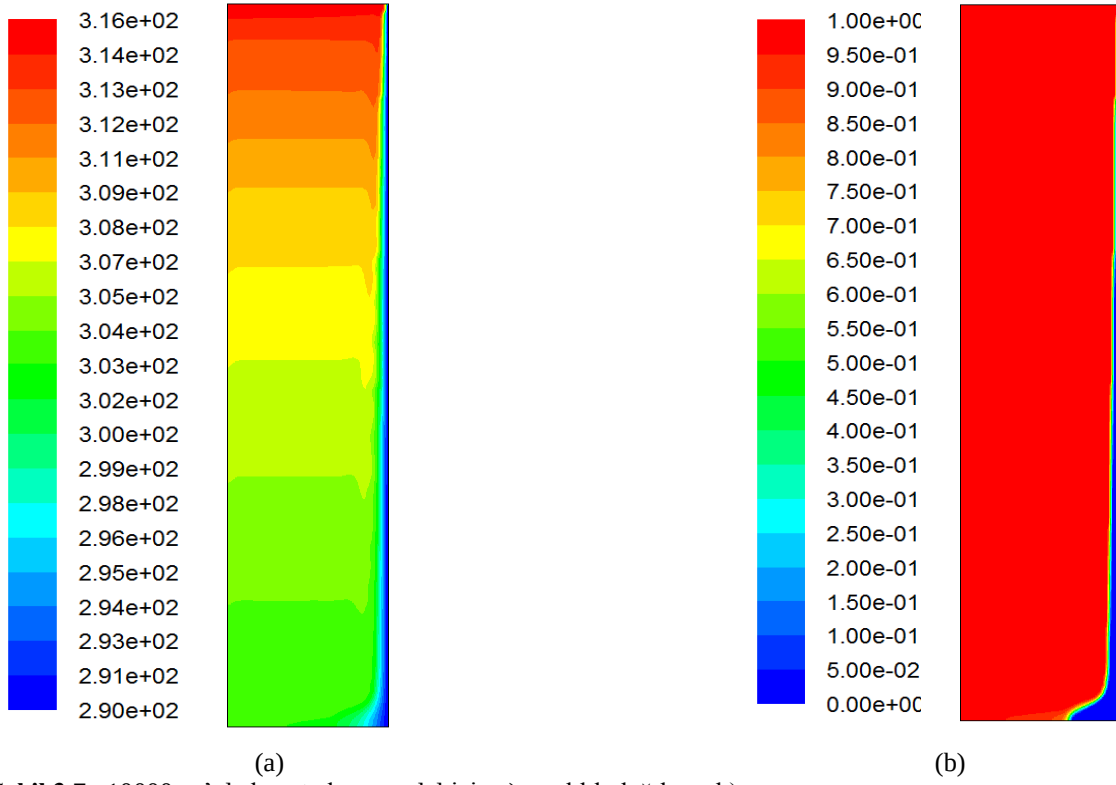
Çalışmada katılaşma sürecini incelemek için dikey olarak yerleştirilen modelin sağ tarafı gerçek çalışma şartlarına uygun olarak 290 K ve model içerisindeki FDM başlangıç 320 K sıcaklığı olarak alınmıştır. 3 farklı durum için katılaşma süreci incelenmiştir. Birinci olarak kanatçıksız modelde katılaşma, ikinci olarak 5 kanatçıklı modelde katılaşma ve son olarak 10 kanatçıklı modelde katılaşma süreci incelenmiştir.

3.2.1. Kanatçıksız Model İçin Katılaşma Sürecinin İncelenmesi

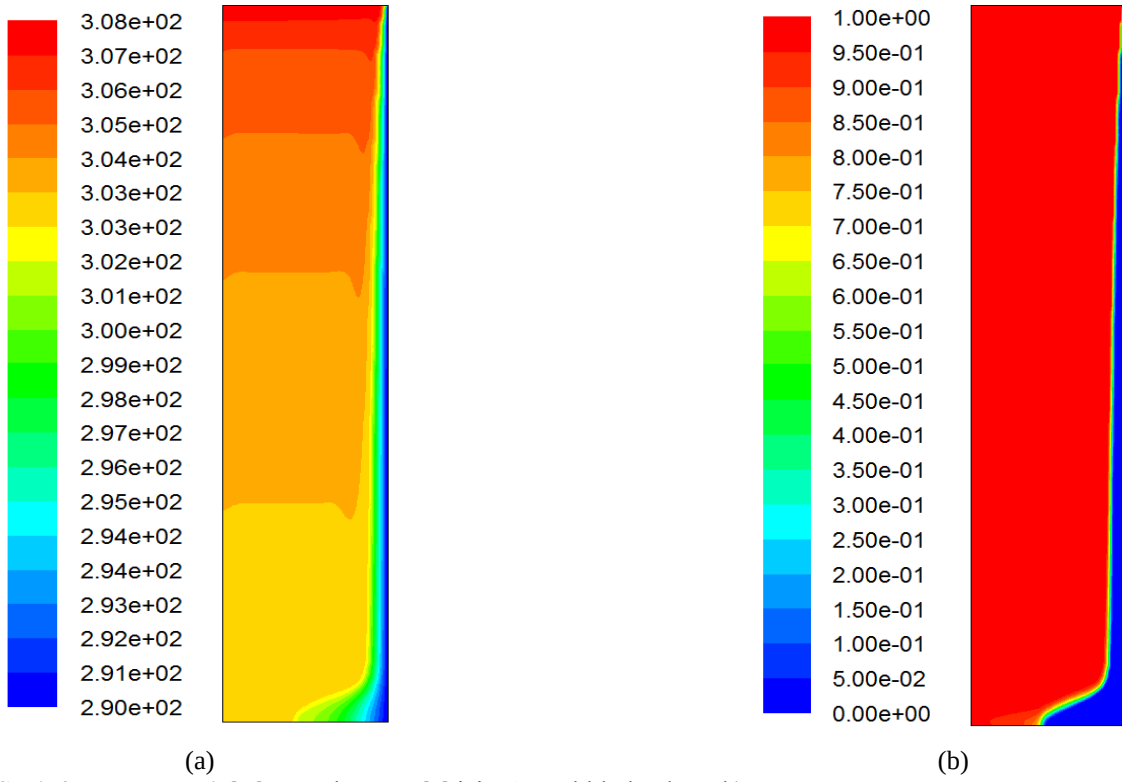
Çalışmada kullanılan kanatçıksız model 100 cm yüksekliğinde ve 20 cm genişliğinde çizilmiştir. Katılaşma süreci için geometrinin sağ taraf yüzeyi 290 K ve şekil içerisindeki FDM sıcaklığı 320 K olarak alınmıştır. Çalışma için zamana bağlı olarak katılaşma başlangıcından 5000, 10000, 20000 ve 30000 sn sonraki sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları verilmiştir.



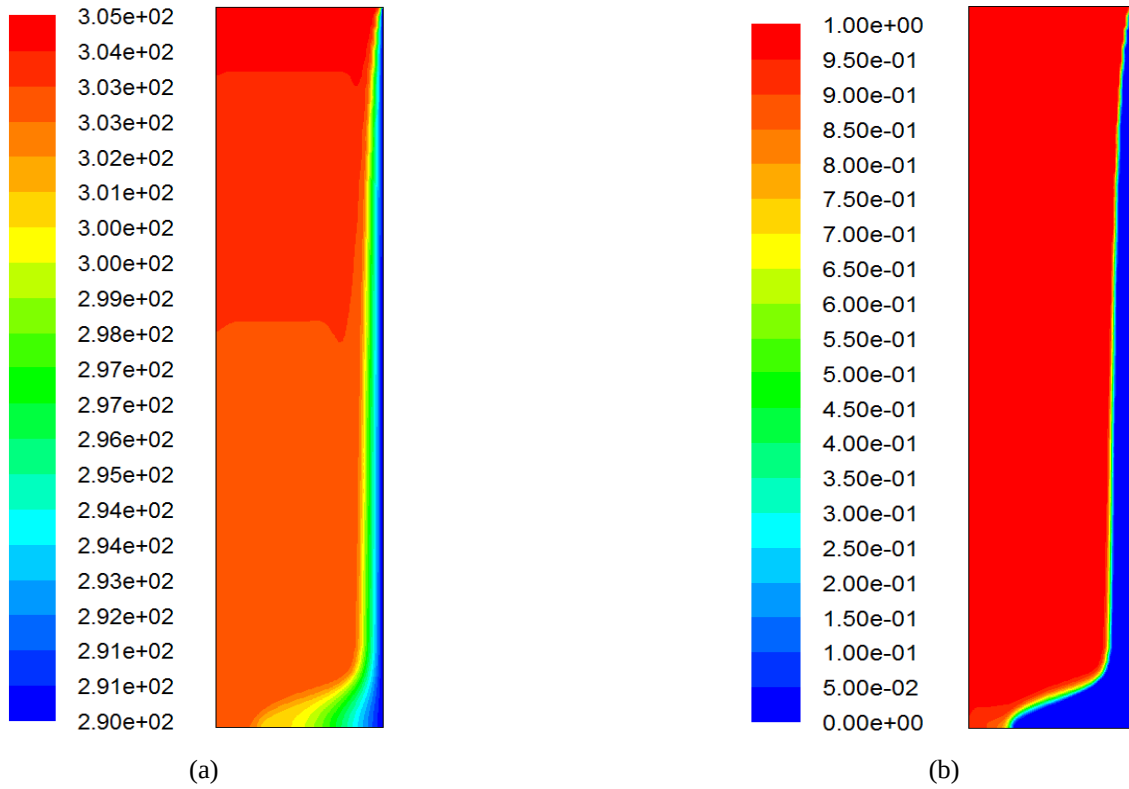
Şekil 3.6. 5000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.7. 10000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



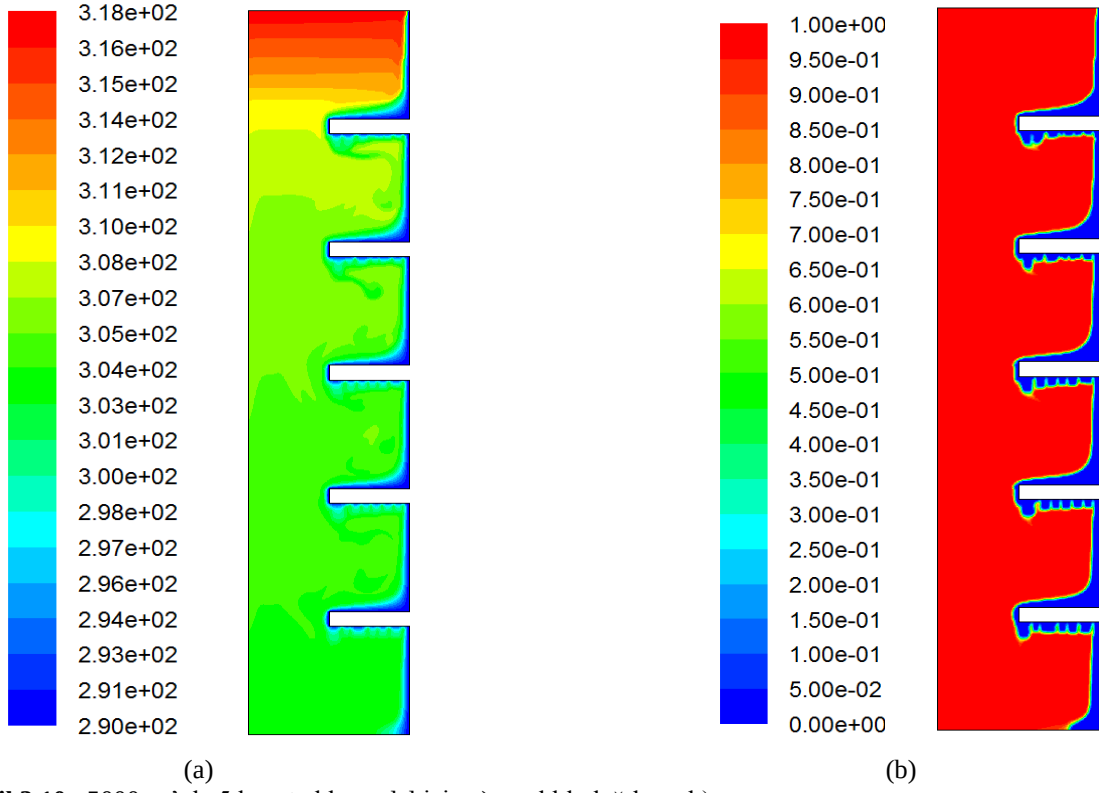
Şekil 3.8. 20000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



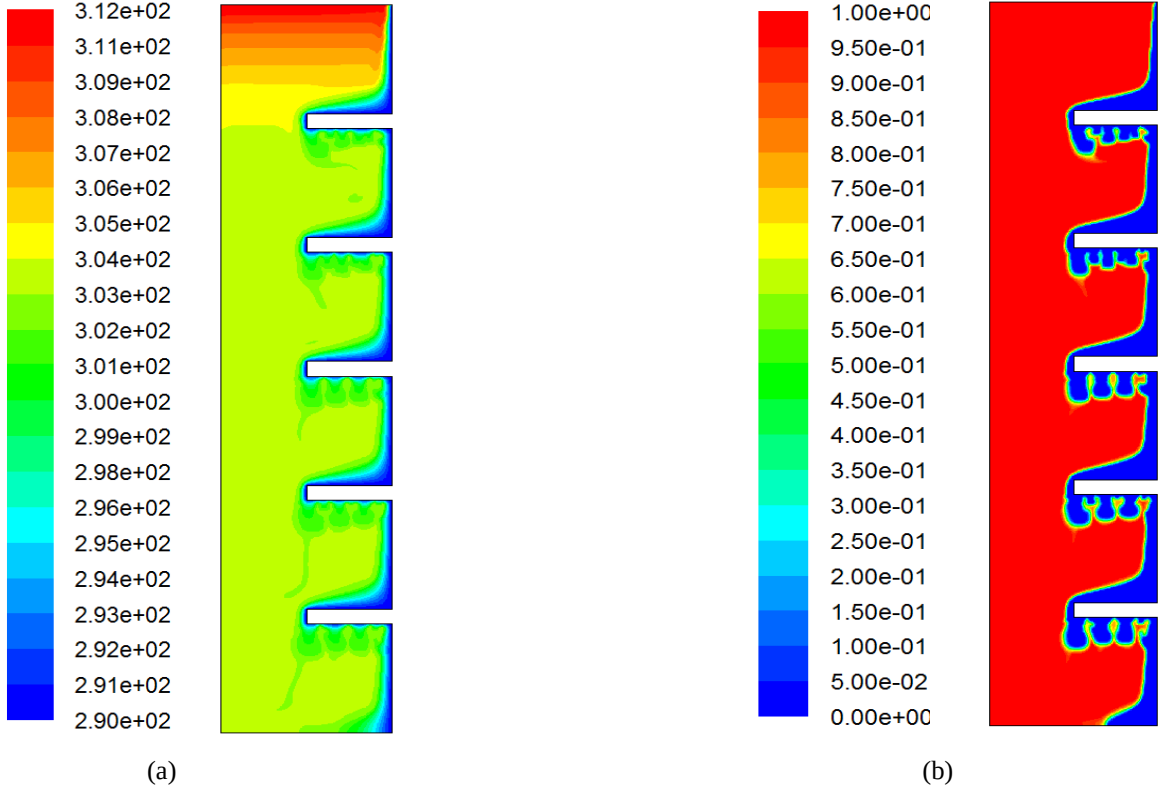
Şekil 3.9. 30000 sn' de kanatçıksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

Şekil 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9 'da sırasıyla 5000, 10000, 20000 ve 30000 sn sonraki sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları verilmiştir. Kanatçıksız model için katılaşma süreci analizinde, başlangıçta şekil içerisinde sıcaklık dağılımlarının eşit olduğu görülmektedir. 5000 sn sonraki sıcaklık dağılımına (Şekil 3.6.) bakıldığında, sıcaklığın şeklin üst bölgesinden başlayarak aşağı doğru indikçe kademeli olarak azaldığı ve ısı katmanlar oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 3.7' de ise ısı katman sayısı azalmakta ve model içerisindeki sıcaklığın gittikçe düştüğü şekilden anlaşılmaktadır. Şekil 3.8 ve 3.9' da ise yine ısı katmanlar ve sıcaklık azalmakta, fakat şekil 3.6 ve 3.7' de olduğundan daha yavaş olduğu rahatça gözlenmektedir. Bunun sebebi, zamanla cidarda meydana gelen katılaşma miktarının artmasıyla yüzeydeki ısı transfer oranının katılaşma ile orantılı olarak gitgide azalmasıdır. İlerleyen zamanda şekil içerisindeki sıcaklığın kademeli olarak azaldığı görülmektedir. 30000 sn sonraki sıcaklık dağılımına (Şekil 3.9) bakıldığında ise üst bölgedeki FDM sıcaklığının 305 K 'ye kadar düştüğü görülmektedir. Sıvı oranlarına bakıldığında ise, soğuyan yüzeye yakın yerlerde katılaşma oranı zamanla artmaktadır. Bu katı oranının şeklin alt kısmında daha kalın olduğu görülmektedir. Bu durum soğuyan FDM' nin yoğunluk etkisiyle aşağı doğru hareket etmesinden dolayı soğuk FDM alt tarafta yığılmasının bir sonucudur.

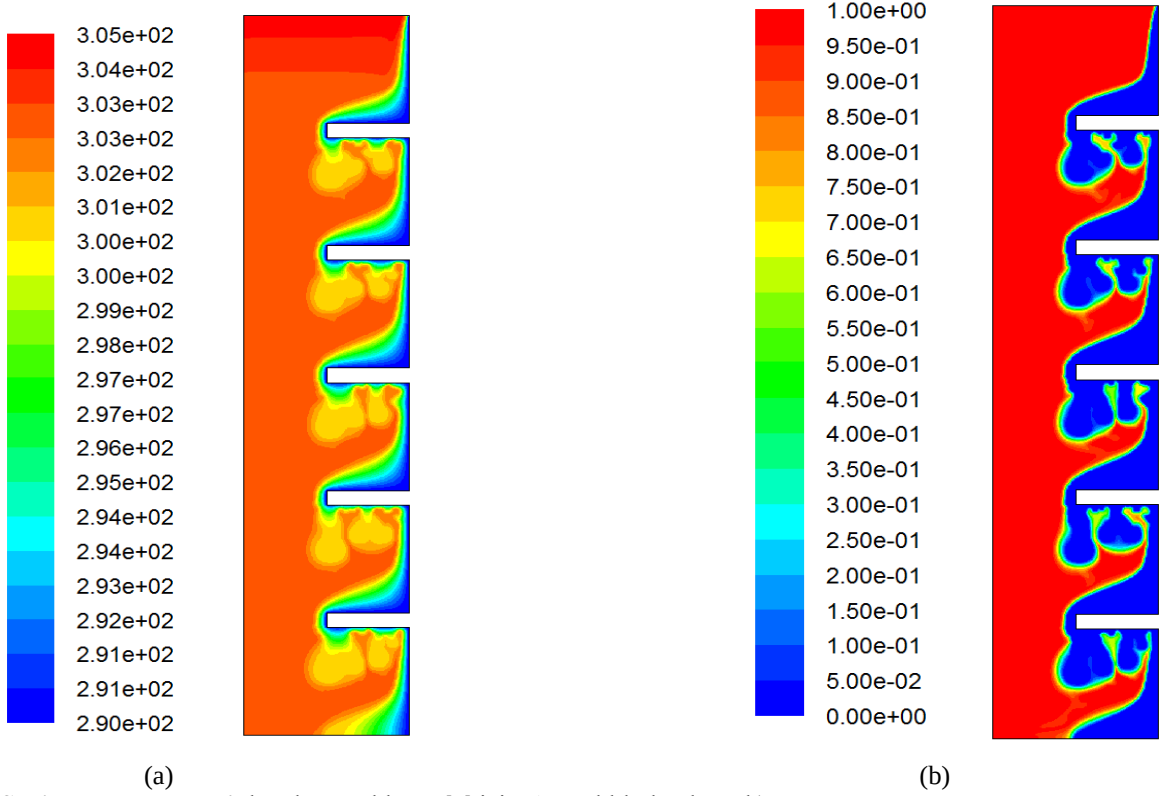
3.2.2. 5 Kanatçıklı Model İçin Katılaşma Sürecinin İncelenmesi



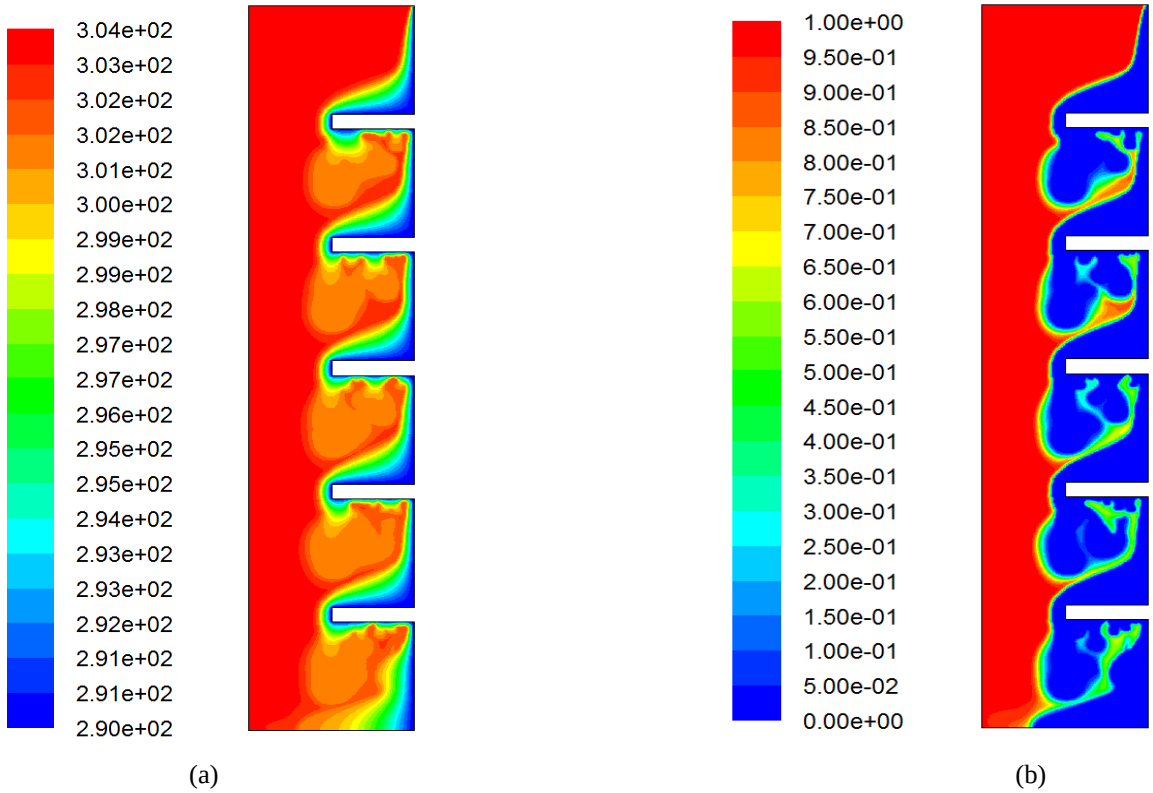
Şekil 3.10. 5000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.11. 10000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.12. 20000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



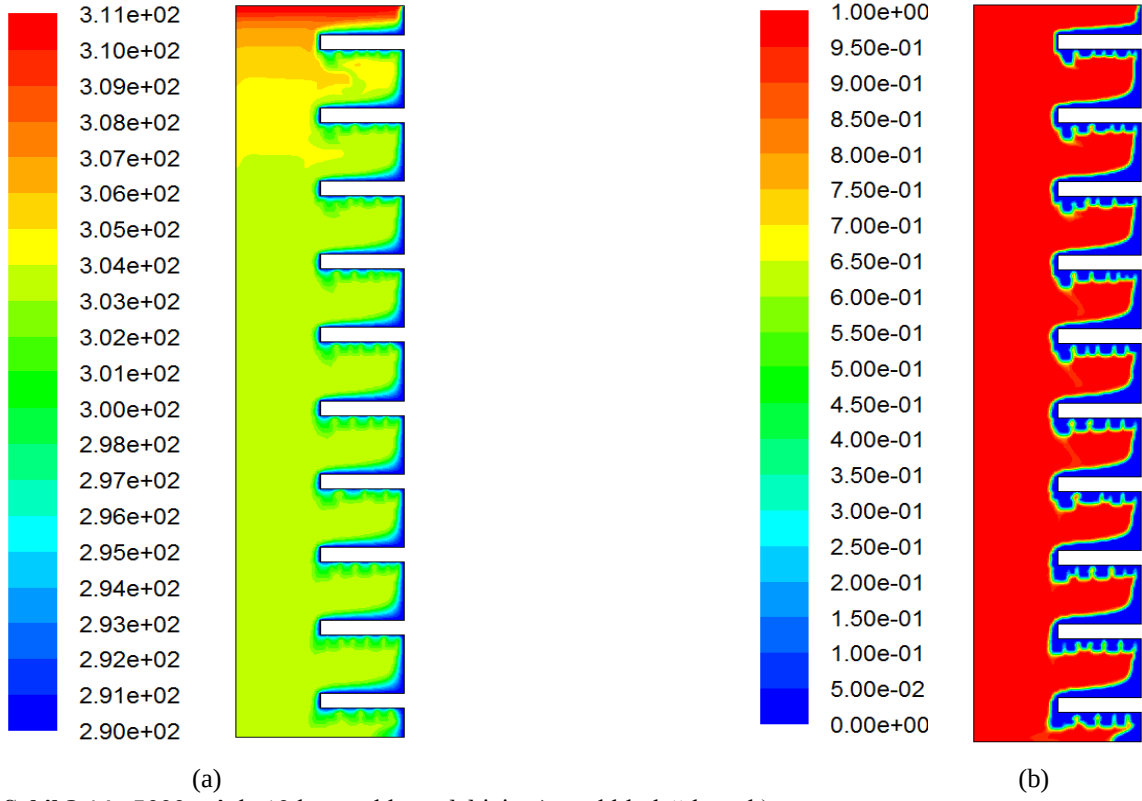
Şekil 3.13. 30000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

Çalışmada kullanılan 5 kanatçıklı model de kanatçıksız modelde olduğu gibi aynı çalışma şartlarını taşımaktadır (Şekil 3.10-3.13).

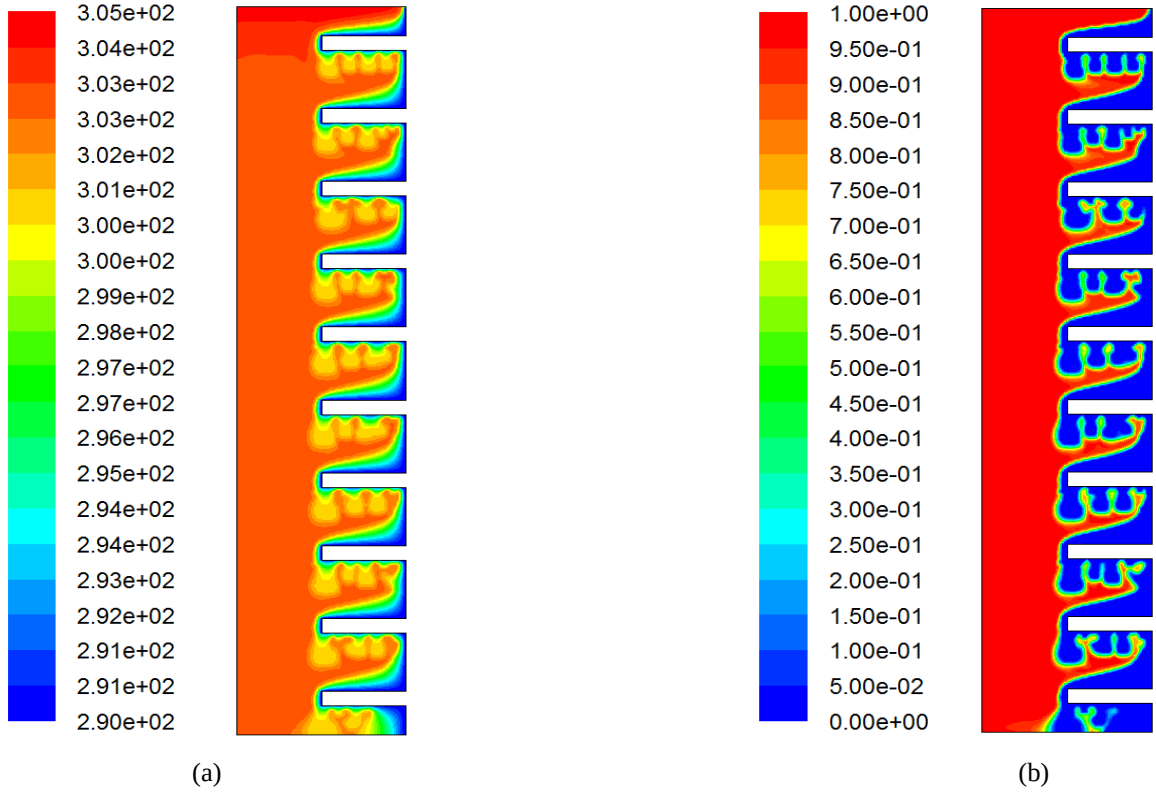
Çalışma için sürecin başlangıcından itibaren 5000, 10000, 20000 ve 30000 sn sonraki sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları verilmiştir.

5 kanatçıklı modelde katılma süreci analizi yapıldığında, başlangıçta tüm sistem sıcaklığı 320 K' dir. Ancak ilerleyen zamanda soğuyan FDM' nin yoğunluğunun sıcak FDM' nin yoğunluğundan daha büyük olması sebebiyle aşağı yönde hareket eder ve sıcaklığı daha yüksek olan FDM şeklin üst noktasında toplanmaktadır. Sıvı oranına bakıldığında ise soğutulan yüzeyde katılma oranının alt tarafta daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin soğuyan FDM' nin yoğunluğun etkisiyle model alt tarafına hareket ederek burada birikmesidir. Kanatçıklar incelendiğinde, soğuk FDM' nin aşağı yönde hareket etmesinden dolayı kanatçıkların alt kısmında toplanan FDM, kanatçıkları aşır modelin en alt kısmına hareket etmek istediğinden kanatçık uçlarından aşağı yönde sarkmaları oluşturduğu düşünülmektedir. Bu sarkmalar hareketin yönü hakkında önemli bir gösterge oluşturmaktadır. Ayrıca 5 kanatçıklı modelde katılma hızının, kanatçıksız modele göre daha hızlı olduğu da şekillerden anlaşılmaktadır. Ancak zamanla model içerisinde ısı transfer hızı git gide azalmaktadır. Bunun da katı kalınlığının artması ve kanatçık etkisinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekillerden de anlaşıldığı gibi şekil içerisindeki FDM, kanatçık eklenerek arttırılan yüzey alanı sayesinde daha hızlı katılmaktadır. Kanatçıksız modelde aynı zaman adımı göz önüne alındığında, model içerisindeki maksimum sıcaklığın, 5 kanatçıklı modeldeki sıcaklıktan daha fazla olduğu yani daha geç katıldığı anlaşılmaktadır. Bu kıyaslamada kanatçık etkisinin net olarak belirlendiği düşünülmektedir.

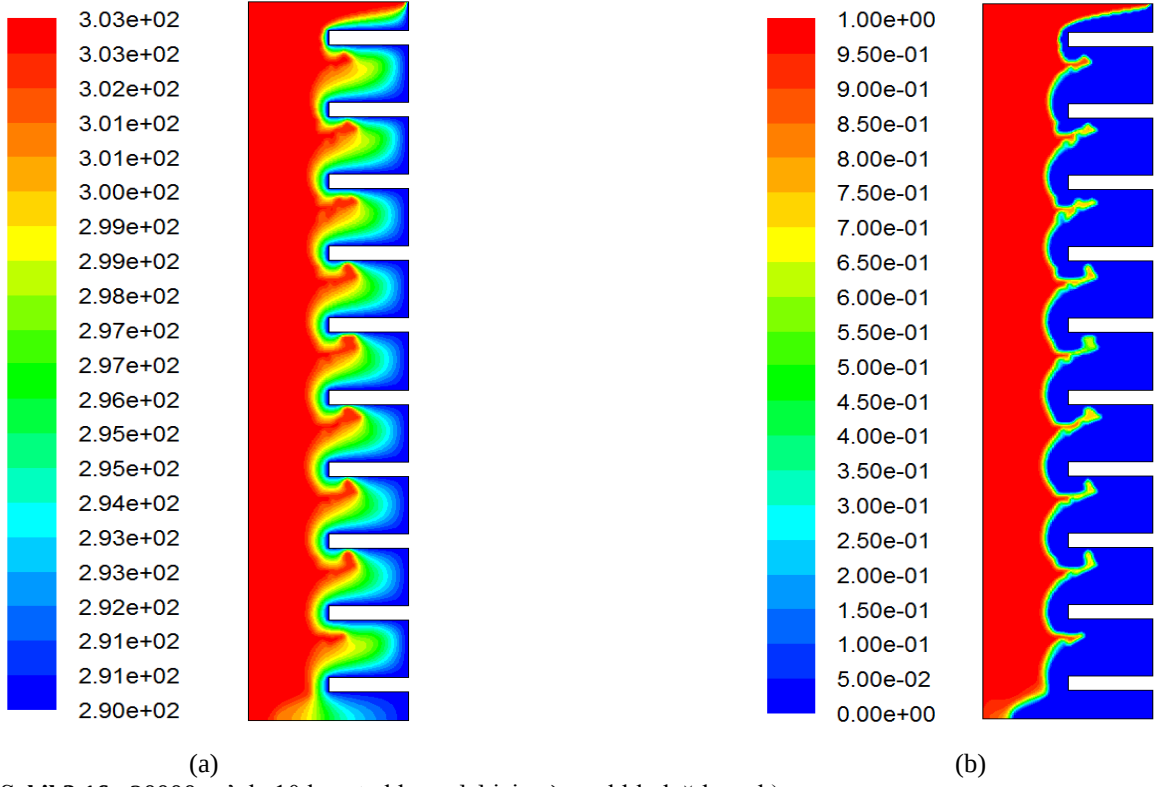
3.2.3. 10 Kanatçıklı Model İçin Katılaşma Sürecinin İncelenmesi



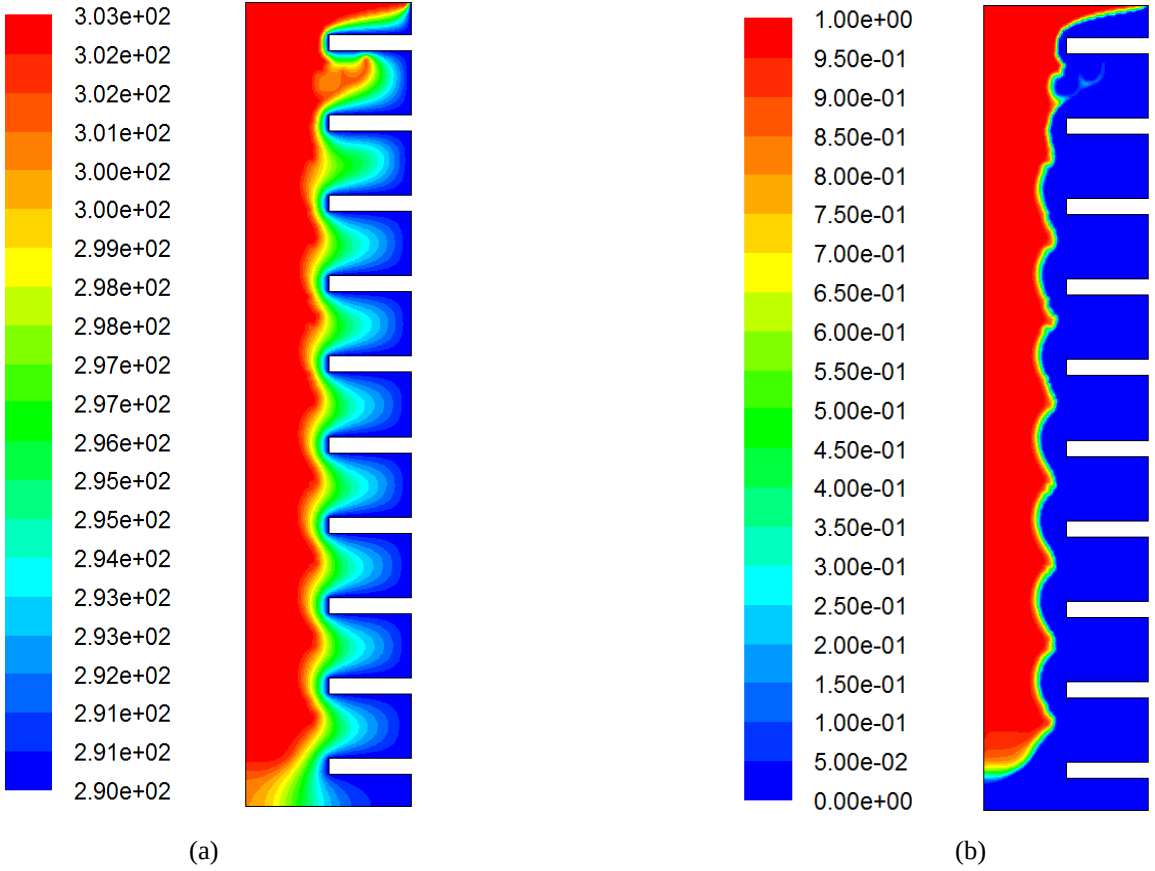
Şekil 3.14. 5000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.15. 10000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.16. 20000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.17. 30000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

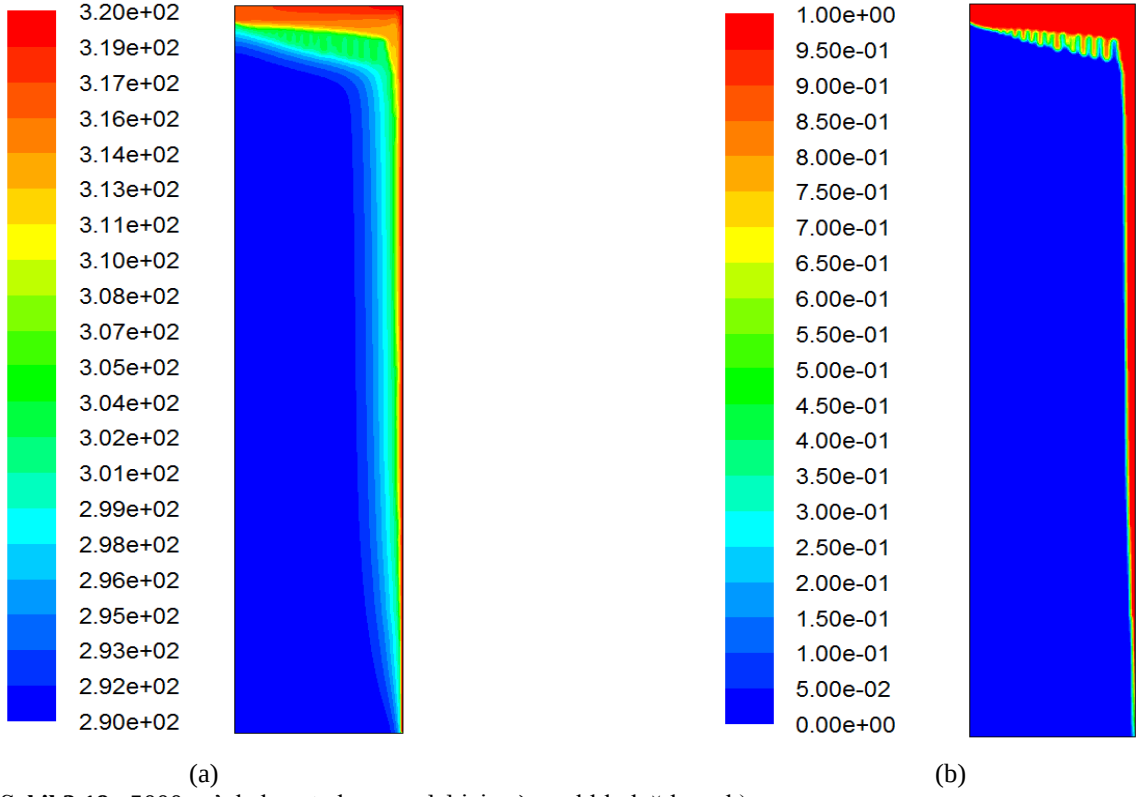
10 kanatçıklı model için yapılan çalışmada sürecin başlangıcından itibaren 5000, 10000, 20000 ve 30000 sn sonraki sıcaklık dağılımı ve sıvı oranı şekil 3.14-3.17’de ifade edilmiştir. Sürecin başlangıcında model içerisindeki madde sıcaklığı homojendir. Zaman adımı sonucunda bu homojenlik kaybolmakta ve modelin üst kısmından alt kısma gidildikçe sıcaklık dağılımı katmanlar halinde azalmaktadır.

10 kanatçıklı model için katılma süreci diğer modellerle mukayese edildiğinde, diğer modellere göre katılma hızının oldukça hızlı olduğu şekillerden anlaşılmaktadır. Fakat sistemin kendi içerisinde ilerleyen zaman adımların katılma hızının düştüğü anlaşılmaktadır. Örneğin, 5000-10000 sn arası katılma ile 10000-20000 sn arası katılma hızının karşılaştırılması sonucunda 10000-20000 sn arası katılma hızının düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin katılma oranının artmasıyla ısı transfer hızı azalmakta ve bunun sonucunda da katılma hızının azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca katılan bölgenin kanatçıklı bölgeden çıkmasıyla kanatçık etkisinin de azaldığı ve bu nedenle ısı transfer hızının da azaldığı düşünülmektedir. Zamanın ilerlemesiyle katılma hızının oldukça düştüğü ve sıcaklık dağılımının da neredeyse sabitleştiği yine şekillerden anlaşılmaktadır. Durumun azalan sıcaklık farkının bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

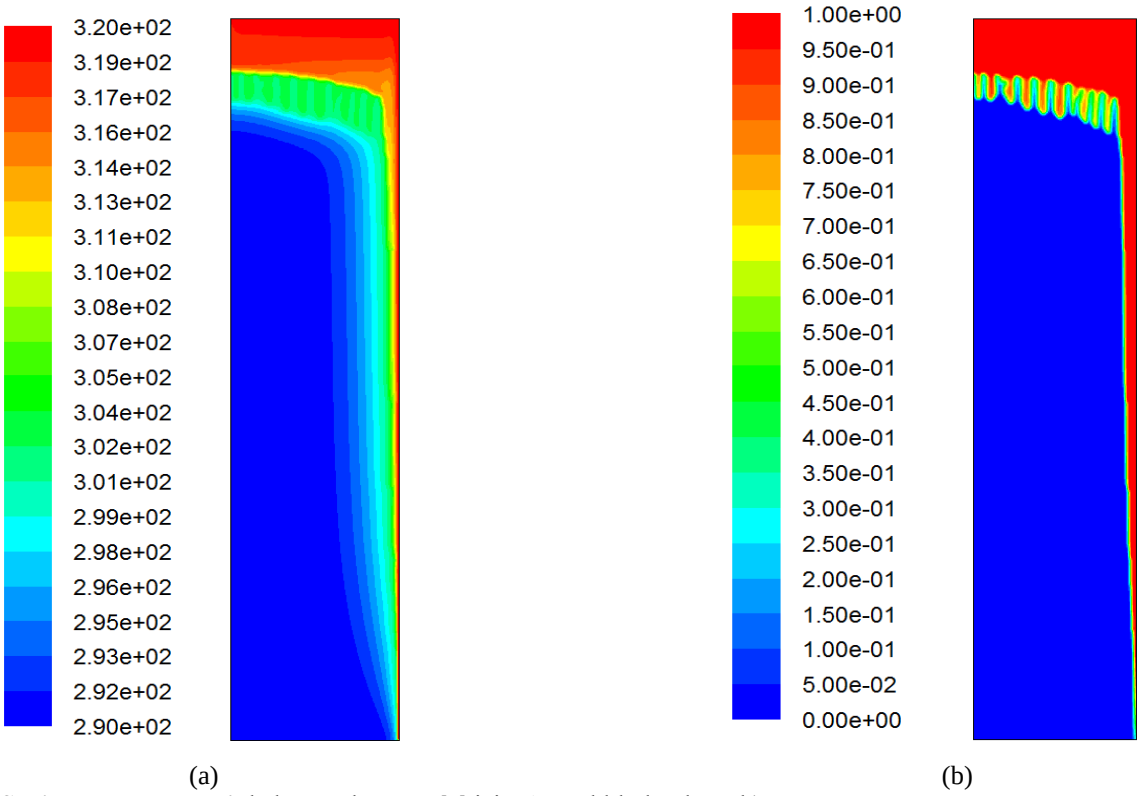
3.3. Dikey Olarak Yerleştirilen Modelde Erime

Kanatçıksız model için FDM’ nin erime süreci incelenmiştir. Erime için modelin sağ tarafı (T_{duvar}) 320 K ve model içerisindeki FDM başlangıç sıcaklığı 290 K olarak alınmıştır. 3 farklı durum için erime süreci incelenmiştir. Birinci olarak kanatçıksız modelde erime, ikinci olarak 5 kanatçıklı modelde erime ve son olarak 10 kanatçıklı modelde erime süreci incelenmiştir.

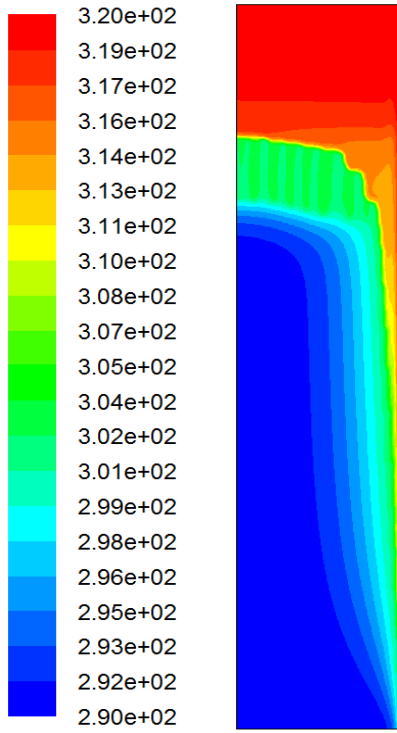
3.3.1. Kanatçksız Model İçin Erime Sürecinin İncelenmesi



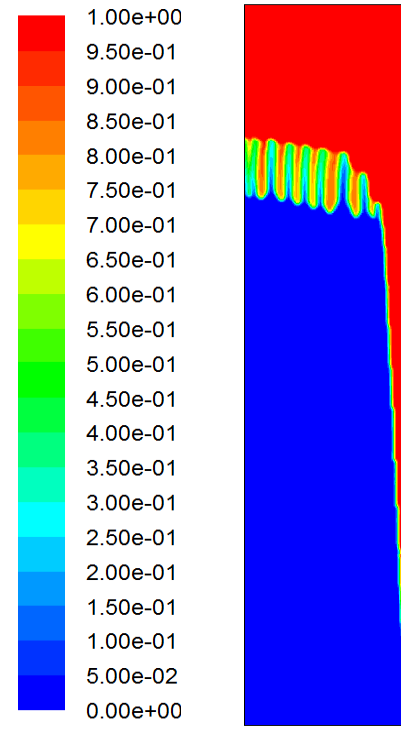
Şekil 3.18. 5000 sn' de kanatçksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.19. 10000 sn' de kanatçksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

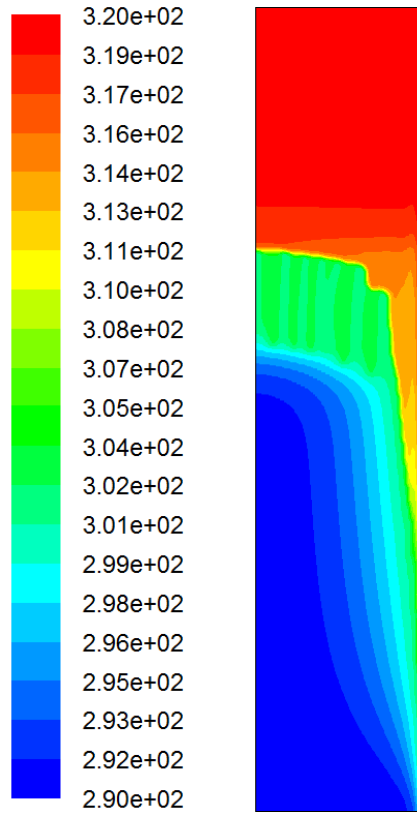


(a)

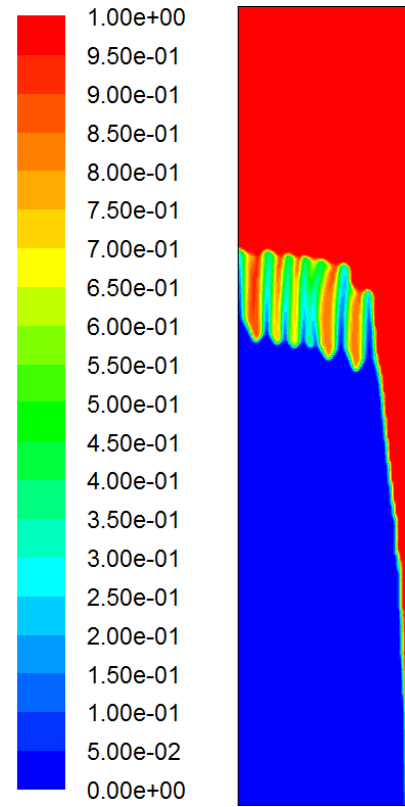


(b)

Şekil 3.20. 20000 sn' de kanatçiksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



(a)



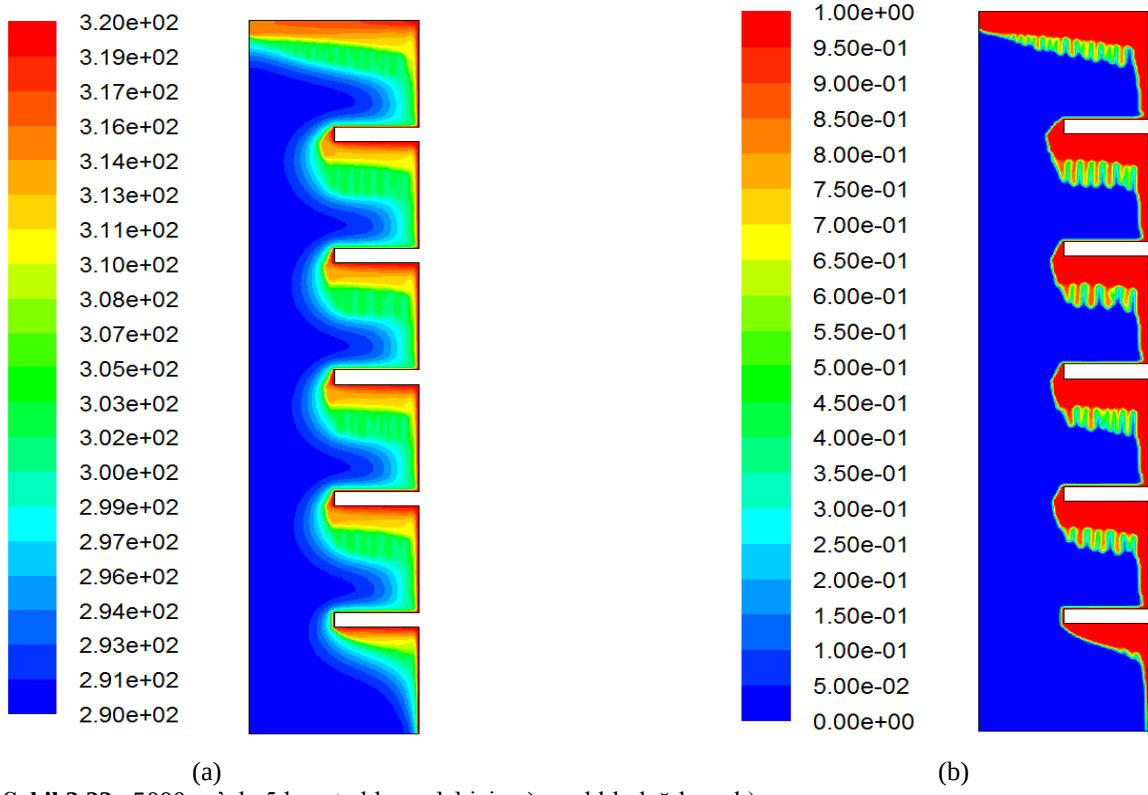
(b)

Şekil 3.21. 30000 sn' de kanatçiksız model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

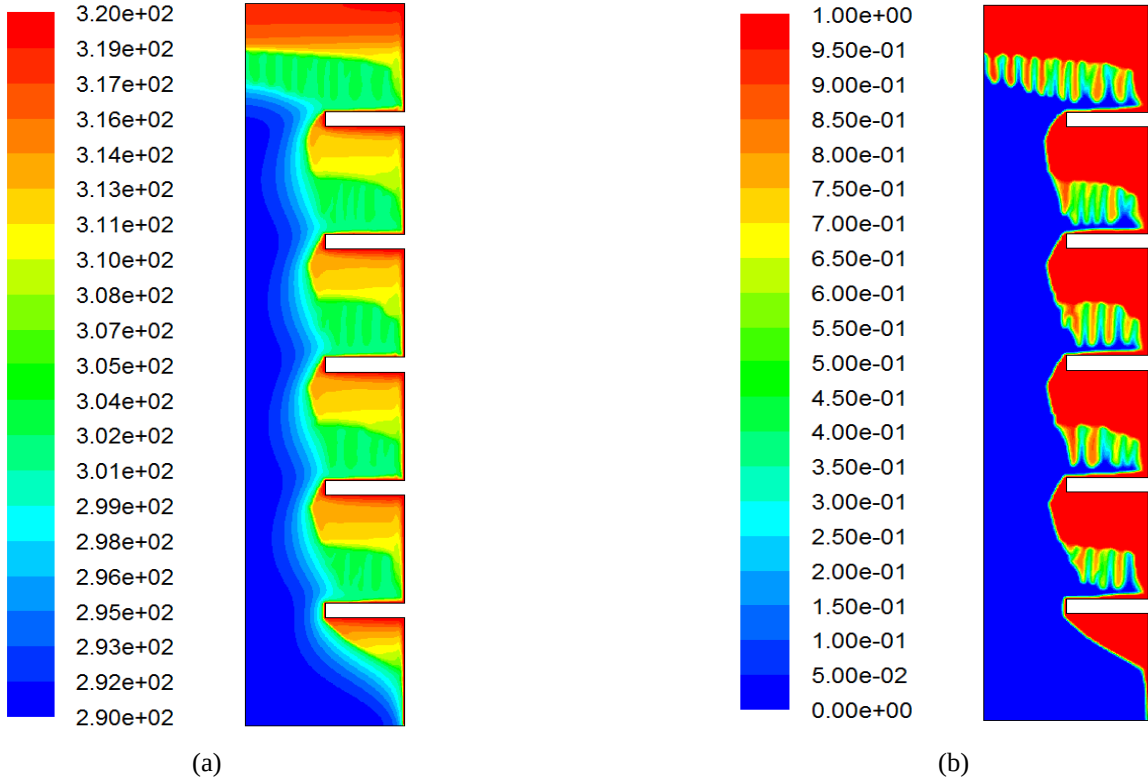
Çalışmada, modelin sağ yüzeyi 320 K sıcaklık sabit tutularak FDM erimeye tabi tutuluyor. Erime sürecinin incelendiği modelin sol, üst ve alt kısımları yalıtımlı olarak kabul edilmiştir. Sistemin başlangıç sıcaklığı 290 K olarak alınmıştır. Erime sürecinin başlangıcından itibaren 5000, 10000, 20000 ve 30000 sn sonraki sıvı oranı ve sıcaklık dağılımlarına göre veriler elde edilmiştir.

Kanatçıksız model için yapılan erime süreci incelenmesine ait sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları yukarıda sunulmuştur. Şekil 3.18- 3.21’ deki sıvı oranları ve sıcaklık dağılımları, erime sürecini ifade etmektedir. Elde edilen sonuçların FDM ‘nin erime süreci hakkında uygun değerler verdiği düşünülmektedir. 320 K’ lik bir sıcaklığa maruz bırakılan modelin sağ tarafından başlayan erime süreci, ısıtılan yüzeye yakın olan FDM ‘nin ısınmasıyla beraber, yoğunluğun etkisiyle yukarı yönde harekete geçmesiyle başlamaktadır. Yukarı yönde hareket eden madde üst cidara çarparak tekrar aşağı yönlü bir harekete başladığı şekillerden anlaşılmaktadır. Bu hareket sonucunda katı FDM üzerindeki sarkmaların meydana geldiği görülmektedir. Erime sürecinde zamanla katı maddenin şeklin alt tarafında biriktiği ve sıcak maddenin yukarıda toplandığı belirlenmiştir. Şekillerde ifade edilen erime sürecinde, kanatçıksız modelin diğer modellere oranla erime hızında yavaş olduğu saptanmıştır.

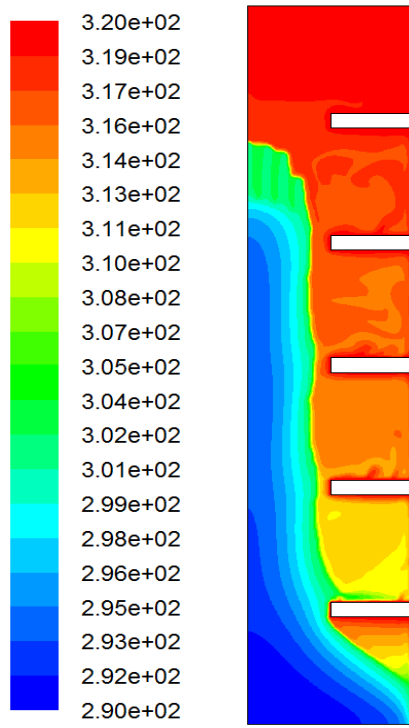
3.3.2. 5 Kanatçıklı Model İçin Erime Sürecinin İncelenmesi



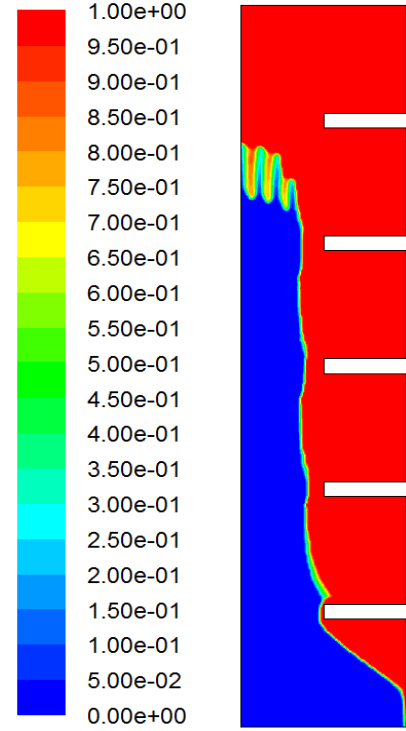
Şekil 3.22. 5000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.23. 10000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

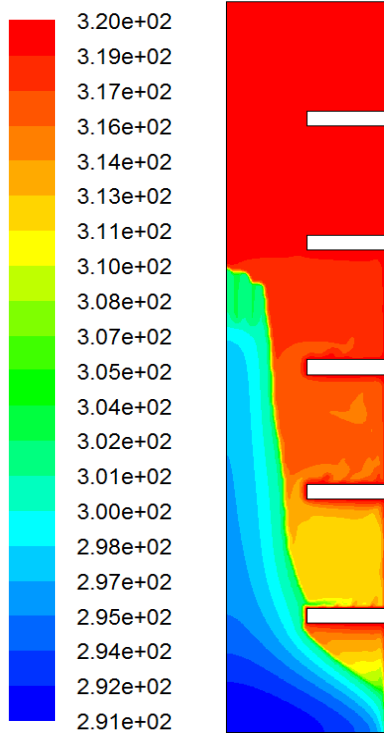


(a)

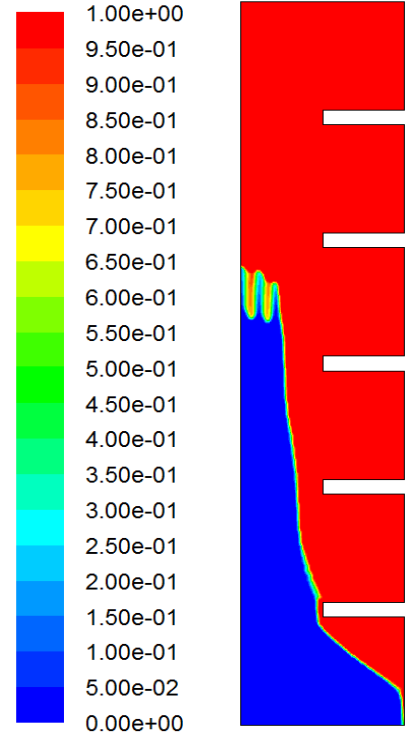


(b)

Şekil 3.24. 20000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



(a)

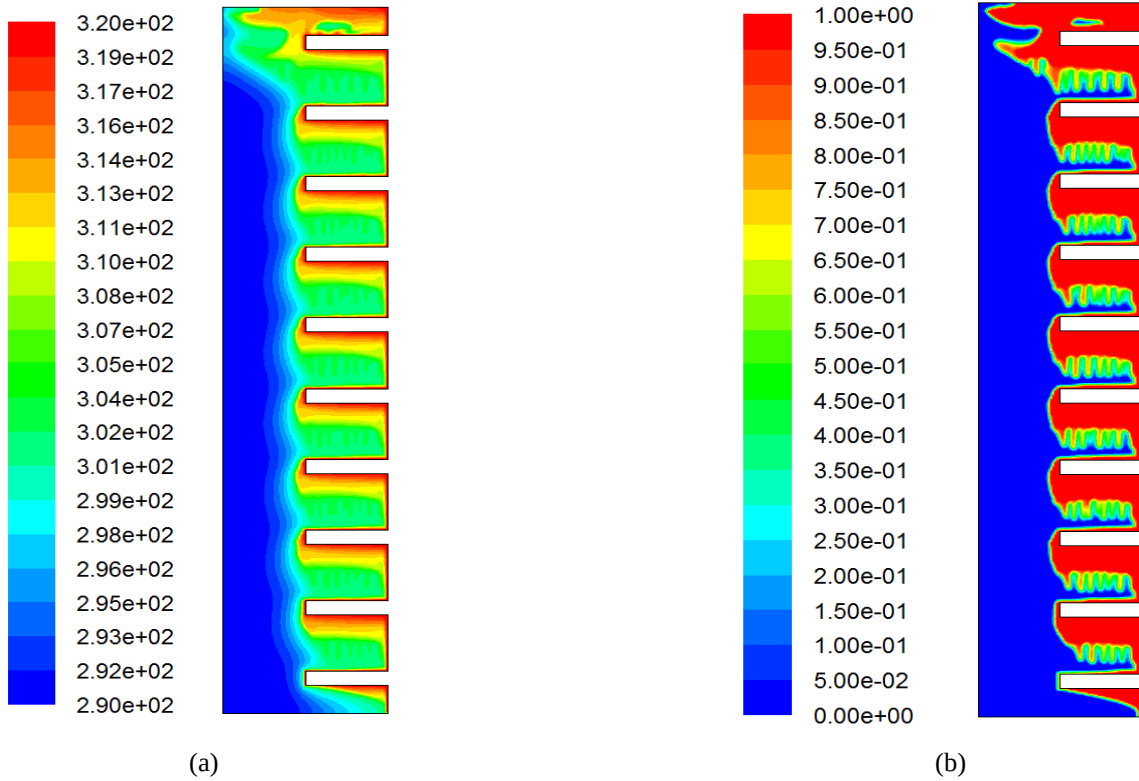


(b)

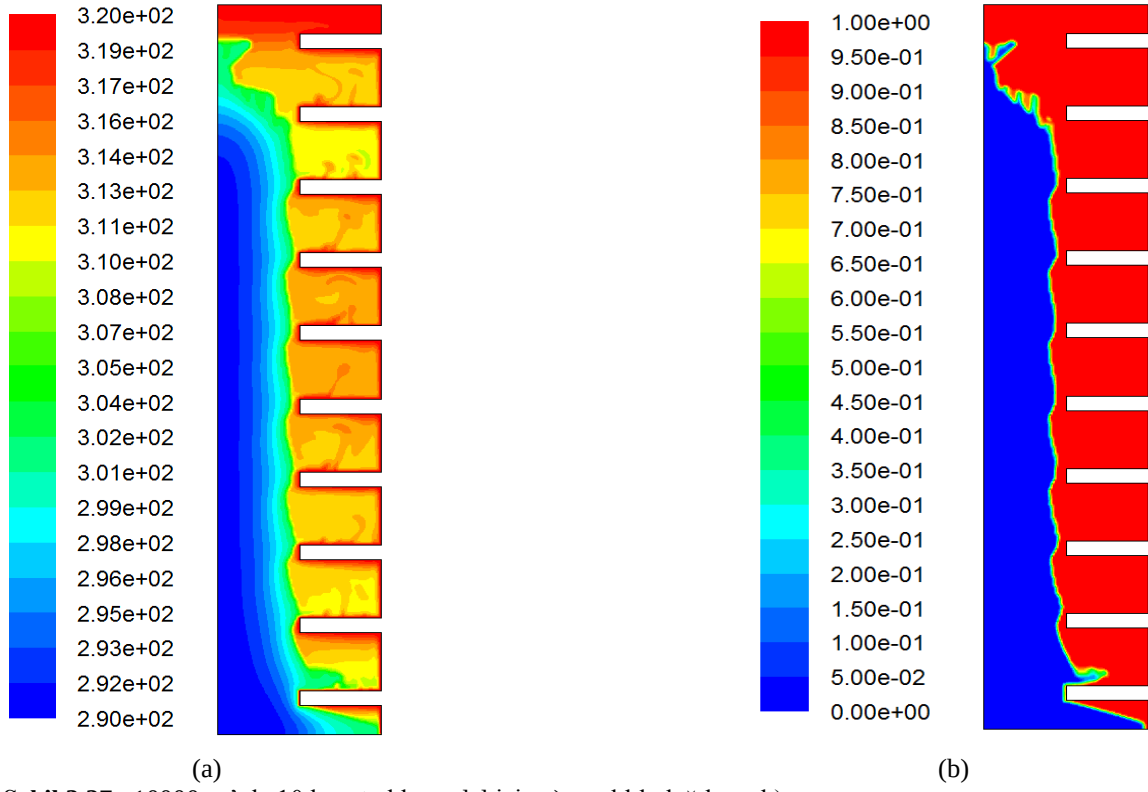
Şekil 3.25. 30000 sn' de 5 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

5 kanatçıklı model için erime sürecinin analizi, erime sürecinin başlangıcından itibaren 5000, 10000, 20000 ve 30000 sn sonraki sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları yukarıda şekillerle ifade edilmiştir (Şekil 3.22-3.25). Sürecin başlangıcında FDM durağandır. Zamanın ilerleyen safhalarında sıcak yüzeye yakın olan FDM yoğunluğunun etkisiyle yukarı yönde harekete başlamaktadır. Sürecin devamında sıcak maddenin yukarıda, soğuk maddenin aşağıda konumlanması sonucunda, modelin alt kısmında oluşan katılaşma miktarı modelin üst kısmındaki katılaşma miktarına oranla daha fazladır. Sıcak maddenin yukarı yöndeki hareketinin devamında, sıcak madde üst cidara çarparak tekrar aşağı yönde bir harekete başlamaktadır. Bunun sonucunda şekillerde de görülen katı yüzeydeki sarkmalar oluşmaktadır. Şekil 3.22- 3.25’ de gösterilen zaman adımları göz önüne alınarak kanatçısız modelle kıyaslanırsa, 5 kanatçıklı modelin erime sürecinin kanatçısız modele oranla oldukça hızlı olduğu görülmektedir. Kanatçık kullanılarak artırılan yüzey alanı sayesinde artan ısı transfer hızının süreci hızlandığı belirlenmiştir.

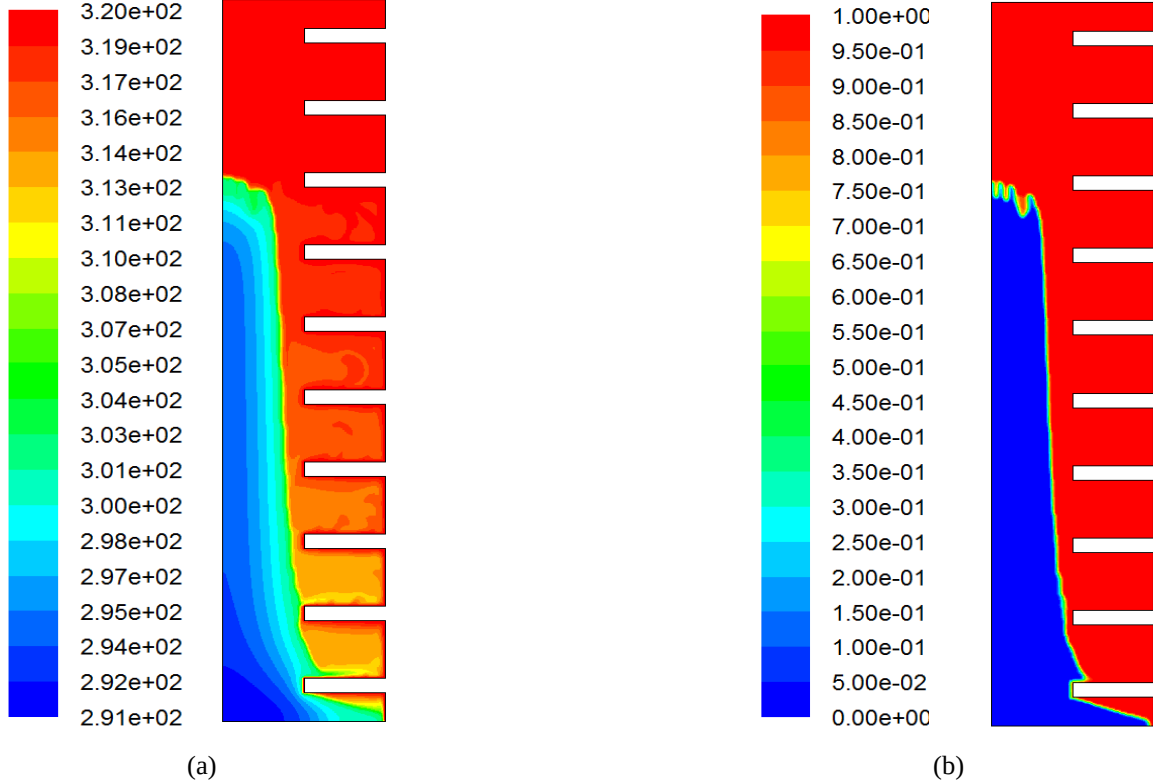
3.3.3. 10 Kanatçıklı Model İçin Erime Sürecinin İncelenmesi



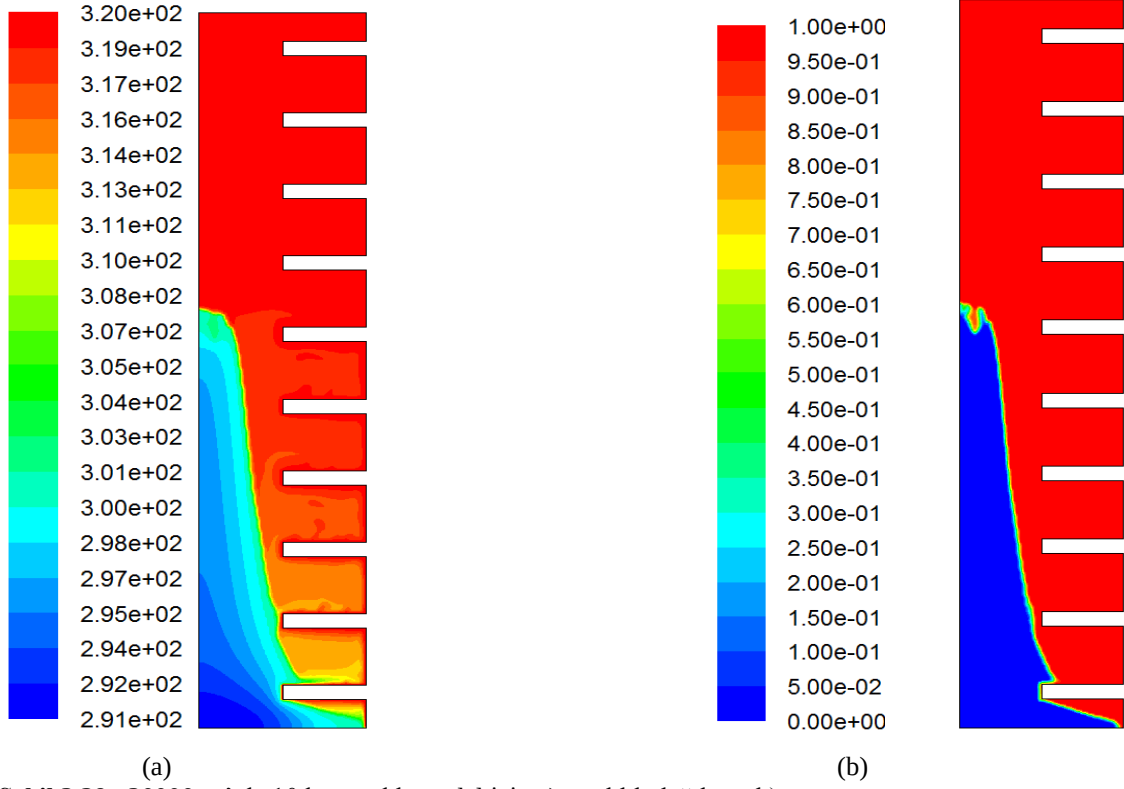
Şekil 3.26. 5000 sn’ de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.27. 10000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.28. 20000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı



Şekil 3.29. 30000 sn' de 10 kanatçıklı model için a) sıcaklık dağılımı, b) sıvı oranı

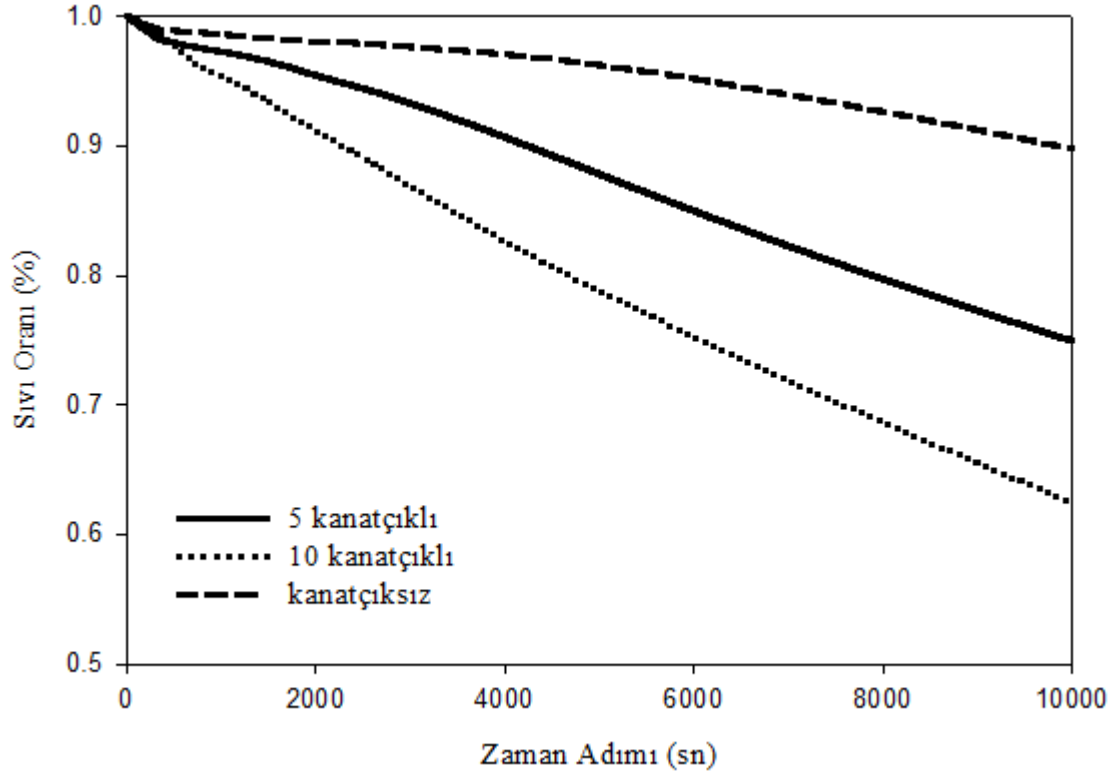
10 kanatçıklı model için erime sürecinin analizi, başlangıçtan itibaren 5000, 10000, 20000 ve 30000 sn sonraki sıcaklık dağılımları ve sıvı oranları göz önüne alınarak yapılmıştır (3.26-3.29). 10 kanatçıklı modelde erime sürecinin zamana bağlı olarak değişimi yukarıdaki şekillerde gösterilmiştir. Diğer modellerde olduğu gibi sıcak madde yukarı yönde hareket ederek modelin üst kısmında, soğuk madde de modelin alt kısmında toplanmaktadır. Fakat bu modeldeki erime sürecinin diğer iki modele nazaran daha hızlı olduğu şekillerden anlaşılmaktadır. Sürecin başlangıcında ($t=0$, $T=290K$) sistem katı haldedir. Kanatçıkların da etkisiyle daha hızlı eriyen FDM yukarı yönlü hareketini sürdürmektedir. Fakat ilerleyen zamanla birlikte kanatçıkların direkt katı yüzeyle olan etkileşimi azalması ve azalan sıcaklık farkı nedeniyle erime sürecinin gittikçe yavaşladığı belirlenmiştir. Bu durum daha sonra gösterilecek olan sıvı oranı-zaman adımı grafiklerinden oluşan bir kıyaslama ile daha iyi ifade edilecektir.

Erime ve katılaşma süreçlerinin ayrı ayrı ele alındığı, tüm farklı modellerde erime ve katılaşma süreci analizlerinde daha iyi fikir vereceği düşünülen bir kıyaslama aşağıda ifade edilmiştir.

Bu kıyaslama; erime ve katılaşma süreçleri boyunca kanatçıksız, 5 kanatçıklı ve 10 kanatçıklı modeller için elde edilen sıvı oranı-zaman adımı grafiklerinden oluşmaktadır. Bu veriler ışığında kanatçık etkilerinin süreçleri nasıl etkilediği çok daha rahat anlaşılmaktadır.

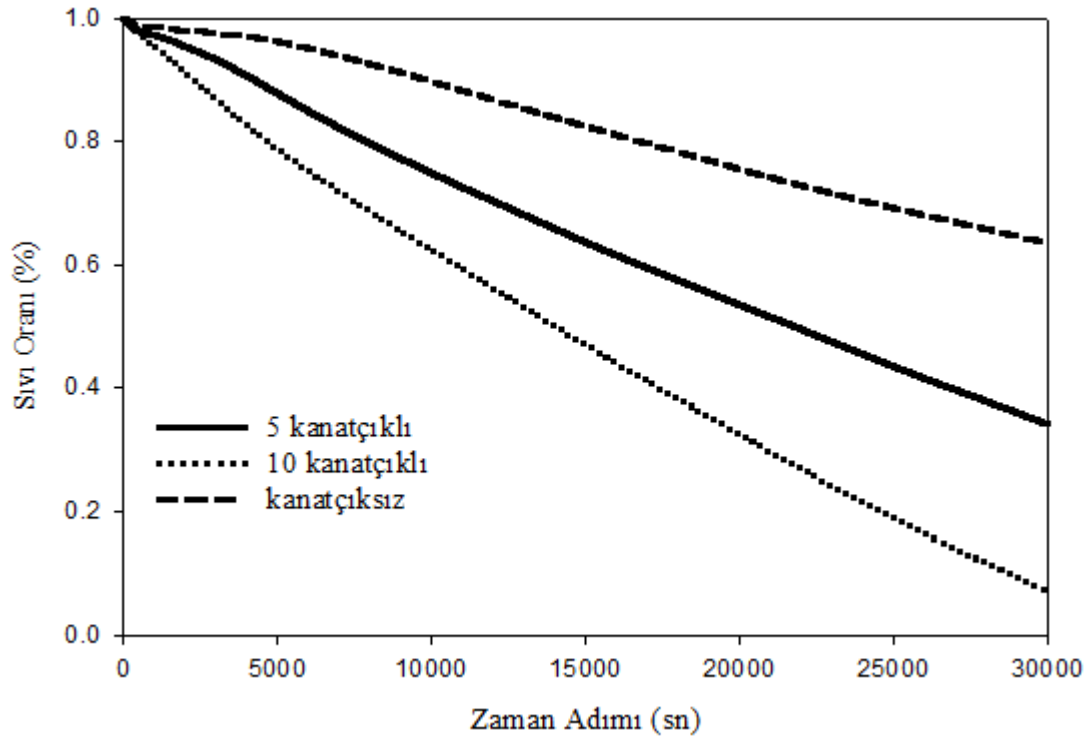
3.4. Katılaşma Süreci İçin Sıvı Oranı-Zaman Adımı Grafikleri

Çalışmada kullanılan farklı modellerde erime ve katılaşma süreçleri analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda elde edilen bazı veriler, kullanılan farklı modellerin kıyaslanması bakımından önemli ipuçları vermiştir. Bu verilerden biri olan sıvı oranı grafikleri katılaşma süreci için aşağıda ifade edilmiştir. Bu şekillerde sıvı oranının zamana bağlı değerleri sunulmuştur. Şekil 3.30 ve 3.31’ de yatay ve dikey modellerde katılaşma sürecinde zaman içerisindeki değişimini gösteren ve öncelikli olarak 10000 sn sonraki sıvı oranı değerlerinden oluşan grafik, ardından 30000 sn sonraki sıvı oranı grafikleri sunulmuştur. Model üzerinde kullanılan farklı sayıdaki kanatçıkların sonuçlar üzerindeki etkilerini gösterilmektedir.



Şekil 3.30. Yatay model için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılaşma süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

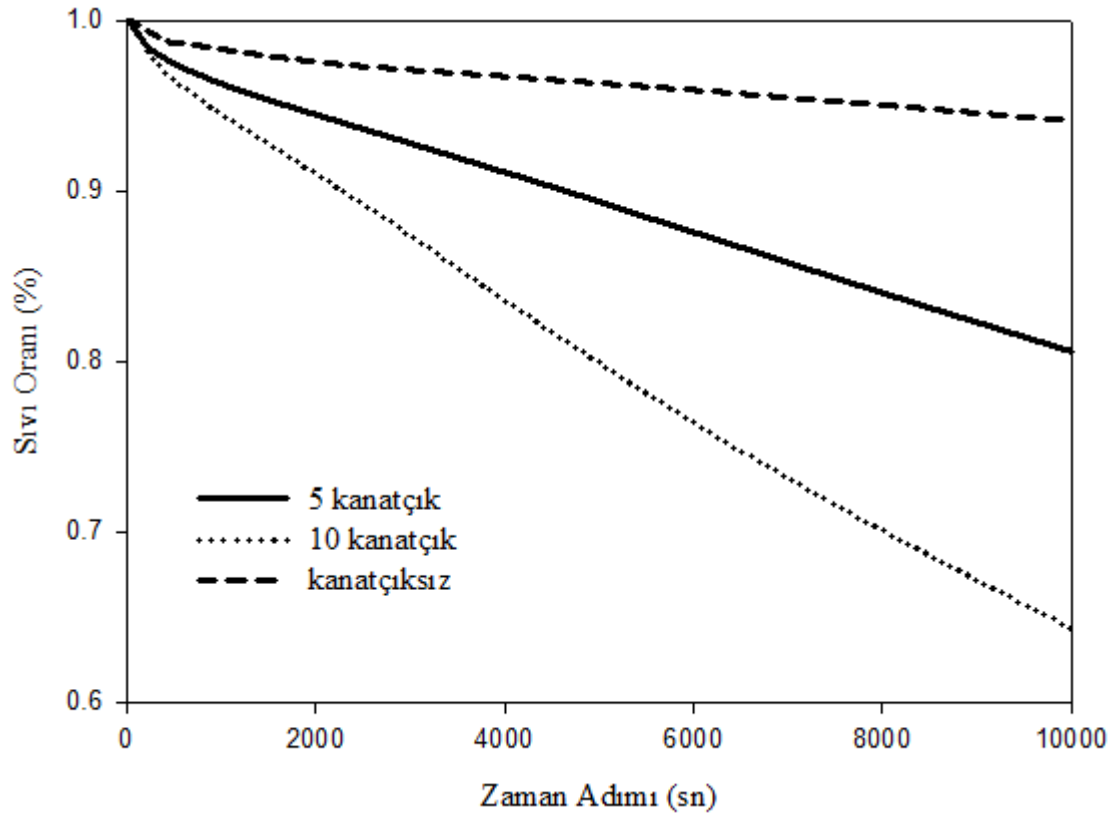
Şekil 3.30’ daki grafikte sıvı oranının zamanla gelişimi gösterilmiştir. Grafikte de gösterildiği gibi, katılaşma sürecinde tüm modellerin sürecin başında yavaş ilerlediği fakat zamanla 10 kanatçıklı ve 5 kanatçıklı modellerin kanatçıkların etkisiyle katılaşma hızlarının arttığı, kanatçıksız modelin ise çok daha yavaş katılaştığı olduğu görülmektedir. Bu zorlanmanın sebebi olarak, katılaşma sürecinde katılaşma üst cidardan başlamakta ve yoğunluğu daha düşük olan sıvı FDM yukarı yönde hareket etmek istemektedir. Bu sıvı FDM’ nin yukarı yönde hareket etme isteği süreci başlangıçta zorlamaktadır. Fakat zamanla katılaşan FDM miktarı süreçte daha etkili olarak bu zorlanmayı yenmektedir. Aşağıda sunulmuş olan grafiklerden bu durum daha net görülebilmektedir.



Şekil 3.31. Yatay model için 30000 sn sonraki 5 kanatçıklı, 10 kanatçıklı ve kanatçıksız modellerde katılaşma süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

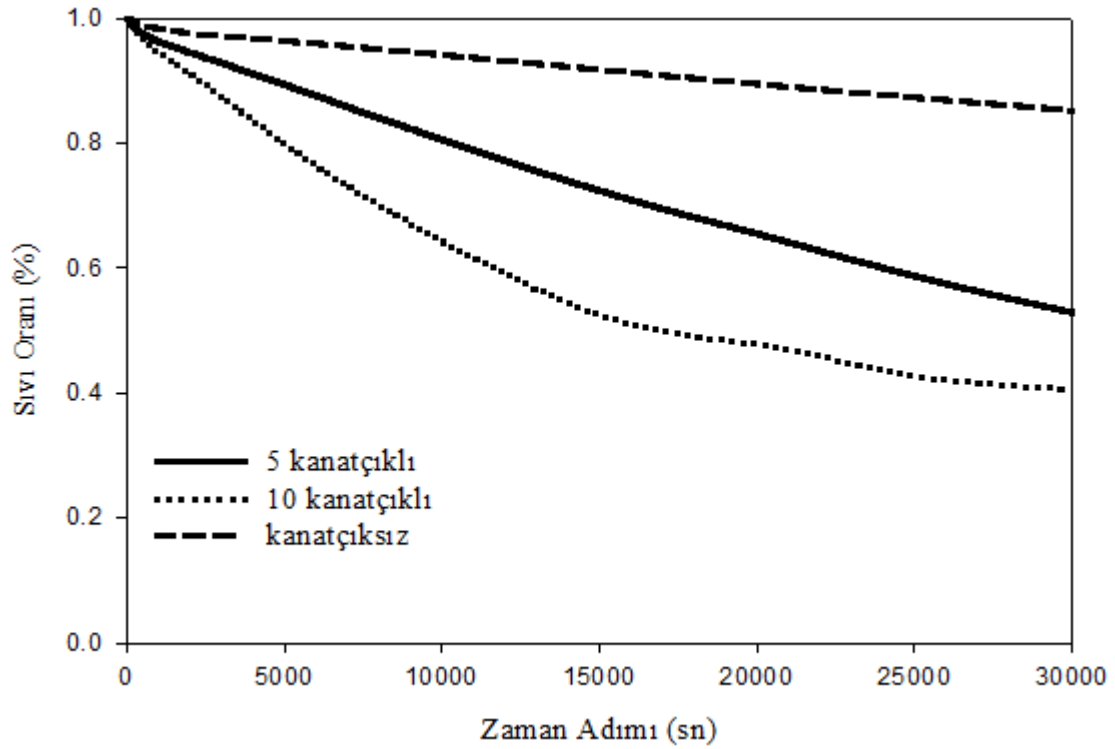
Şekil 3.31’ deki grafik sıvı oranının 30000 sn sonraki son durumunu göstermektedir. Daha öncede belirtildiği gibi katılaşma sürecinin başlangıcında zorlanan modeller zamanla kanatçıkların etkisiyle sürece olumlu yönde etki etmişlerdir.

Aşağıda dikey modelde katılaşma süreci için 10000 sn ve 30000 sn sonraki sıvı oranı zamanla değişiminden oluşan verilerden oluşturulan grafikler sunulmuştur.



Şekil 3.32. Dikey model için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılaşma süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

Şekil 3.32’ de dikey modelde 10000 sn sonraki katılaşma süreci için sıvı oranı – zaman grafikleri sunulmuştur. Dikey modelin yatay modelle katılaşma süreçlerinin kıyaslanması ilerleyen kısımlarda şekillerle ifade edilmiştir. Dikey modelde katılaşma süreci başlangıcında zorlanma çok düşük seviyede olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, sıvı FDM’ nin yoğunluk farkından dolayı yukarı yönlü hareketini engelleyen herhangi bir engelin olmaması olduğu düşünülmektedir. Bu model için sürecin zamanla değişimi Şekil 3.33’ de sunulmuştur.

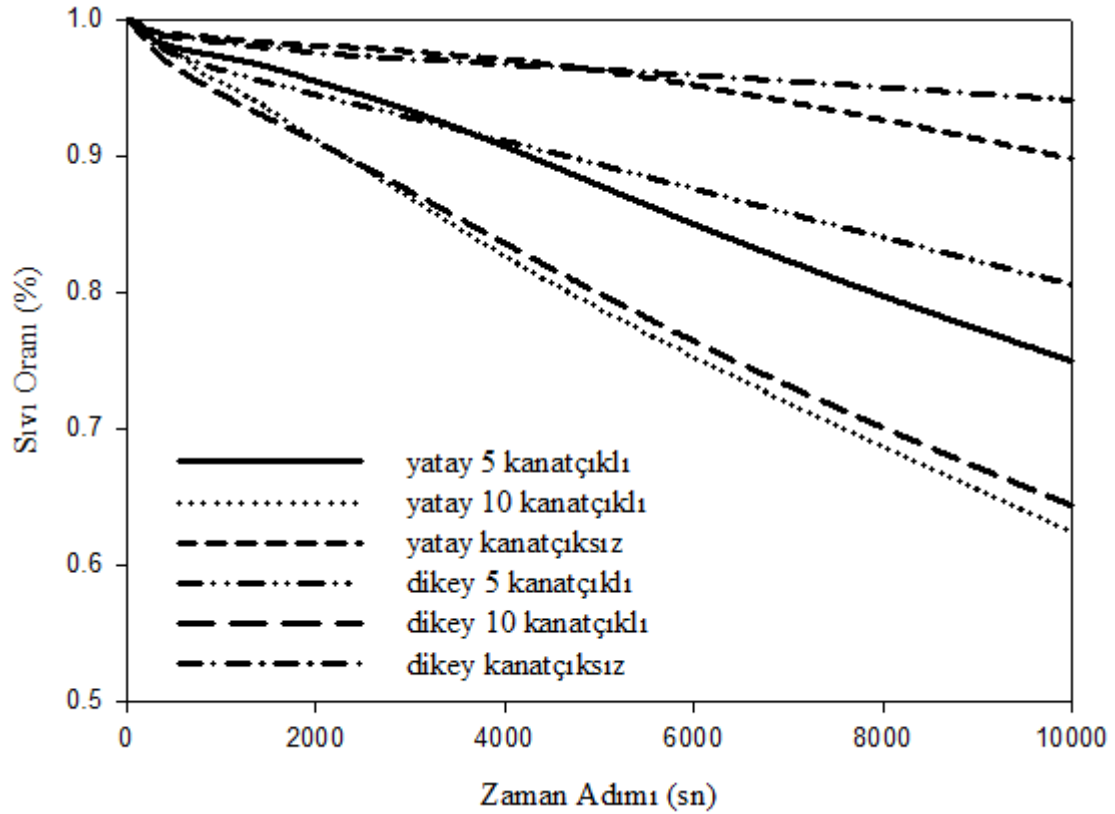


Şekil 3.33. Dikey model için 30000 sn sonraki 5 kanatçıklı, 10 kanatçıklı ve kanatçıksız modellerde katılaşma süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

Şekil 3.33’ de dikey modelde katılaşma süreci için 30000 sn sonraki sıvı oranının zamanla değişimini içeren grafik sunulmuştur. Kanatçık sayısının değiştirilerek oluşturulan farklı modellerin katılaşma süreci üzerindeki etkisini net olarak görülmektedir.

Yukarıdaki grafiklerde de gösterildiği gibi katılaşma süreci yatay ve dikey olarak konumlandırılan modellerde incelenmiş ve elde edilen sıvı oranının zamana bağlı değişimini gösteren verilerin kullanılmasıyla oluşturulan grafiklerde ifade edilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak, sıvı oranının ilerleyen zamanla birlikte değişimleri, farklı modeller için sunulmuştur. Bu farklı modellerdeki katılaşma hızlarının kıyaslanması sonucunda, katılaşma hızının en yüksek olduğu modelin 10 kanatçıklı model olduğu belirlenmiştir. Grafikten elde edilen verilere göre, kanatçık sayısının artması katılaşma sürecini olumlu yönde etkilemiştir. Sonuçların katılaşma sürecindeki kanatçık etkisini net bir şekilde gösterdiği düşünülmektedir.

Katılaşma sürecinde kullanılan farklı modellerin etkileri yukarıda ifade edilmeye çalışılmıştır. Yatay ve dikey modellerden elde edilen katılaşma sürecine ait 10000 sn sonraki sıvı oranı verilerinden oluşan grafiklerin kıyaslanması Şekil 3.34’ de sunulmuştur.

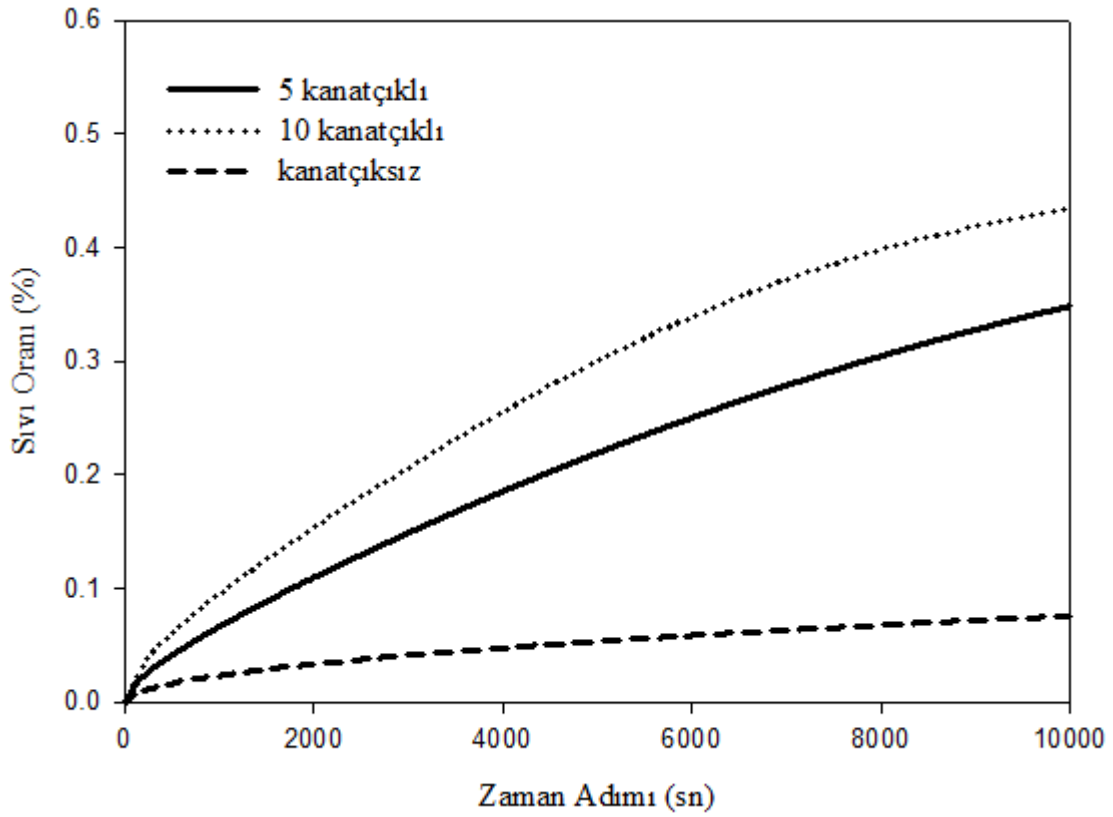


Şekil 3.34. Dikey ve yatay modeller için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde katılma süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

Şekil 3.34’ de dikey ve yatay modeller için katılma sürecine ait sıvı oranı-zaman adımı grafiği sunulmuştur. Katılma sürecinin başlangıcında dikey modellerin tümünde süreç yatay modele nazaran daha hızlı olmaktadır. Bunun sebebinin, yatay modeldeki sıvı hareketi ile dikey modeldeki sıvı hareketi arasındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Fakat yine tüm modeller için geçerli olan bir sonuç daha görülmektedir. Bu sonuca göre; sürecin ilerlemesiyle yatay modellerdeki katılma hızları gitgide artmakta ve dikey modelde olduğundan daha hızlı ilerlemektedir. Buna sebep olarak; yatay modeldeki kanatçık etkisinin dikey modele nazaran süreç içerisinde çok daha etkin olduğu ve bunun sonucunda da katılma hızının da arttığı düşünülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi yatay modellerin tümü dikey modellerdeki katılma hızlarını geçmektedir. Zamanla hızlar arasındaki farkın gittikçe arttığı yine grafikten gözlenebilmektedir.

3.5. Erime Süreci için Sıvı Oranı-Zaman Adımı Grafikleri

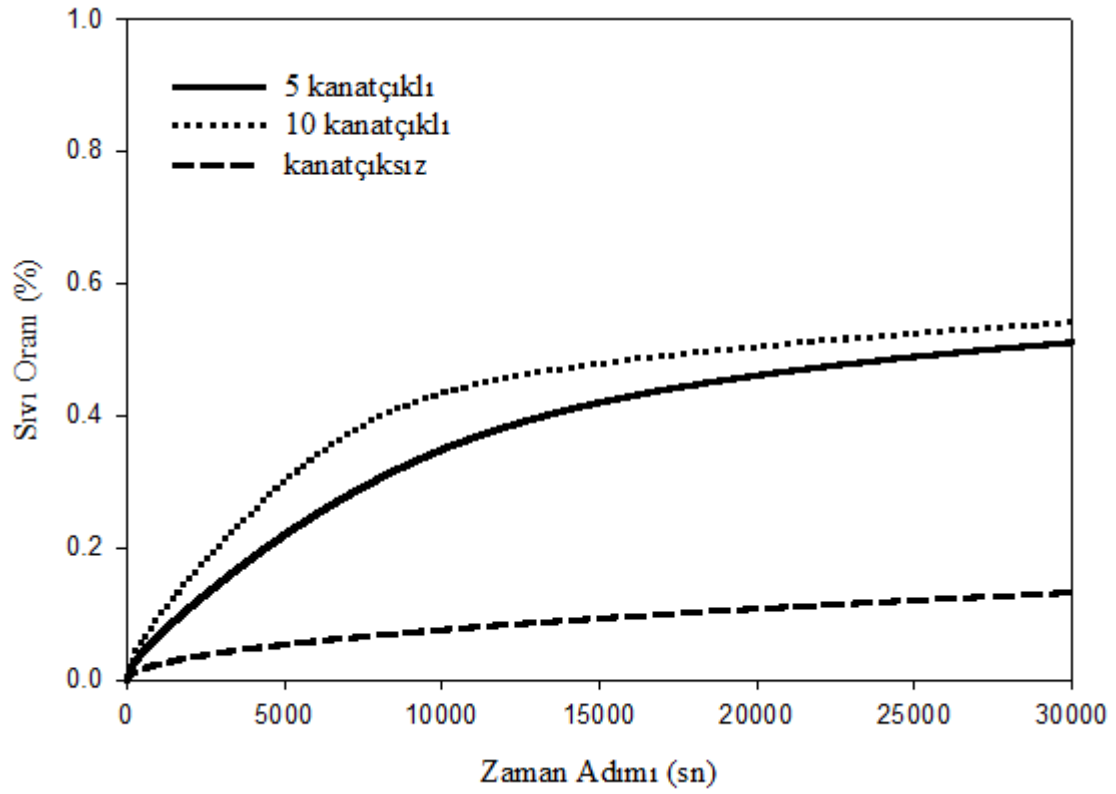
Erime süreci üzerine yapılan incelemeler yatay ve dikey modeller için ayrı ayrı incelenmiş ve modeller üzerinde kullanılan kanatçık etkileri hakkında daha iyi yorum yapma şansı vereceğini düşünülen sıvı oranı grafikleri aşağıda sunulmuştur. Sırası ile yatay ve dikey modellerde 10000 sn ve 30000 sn sonraki sıvı oranı grafikleri ayrı ayrı verilir, daha sonra dikey ve yatay modeller arasındaki kıyaslamayı içeren grafikler sunulmuştur. Böylece kanatçık sayılarının farklı modellerdeki erime süreçleri üzerindeki etkileri analiz edilecektir.



Şekil 3.35. Yatay model için 10000 sn sonraki 5 kanatçıklı, 10 kanatçıklı ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

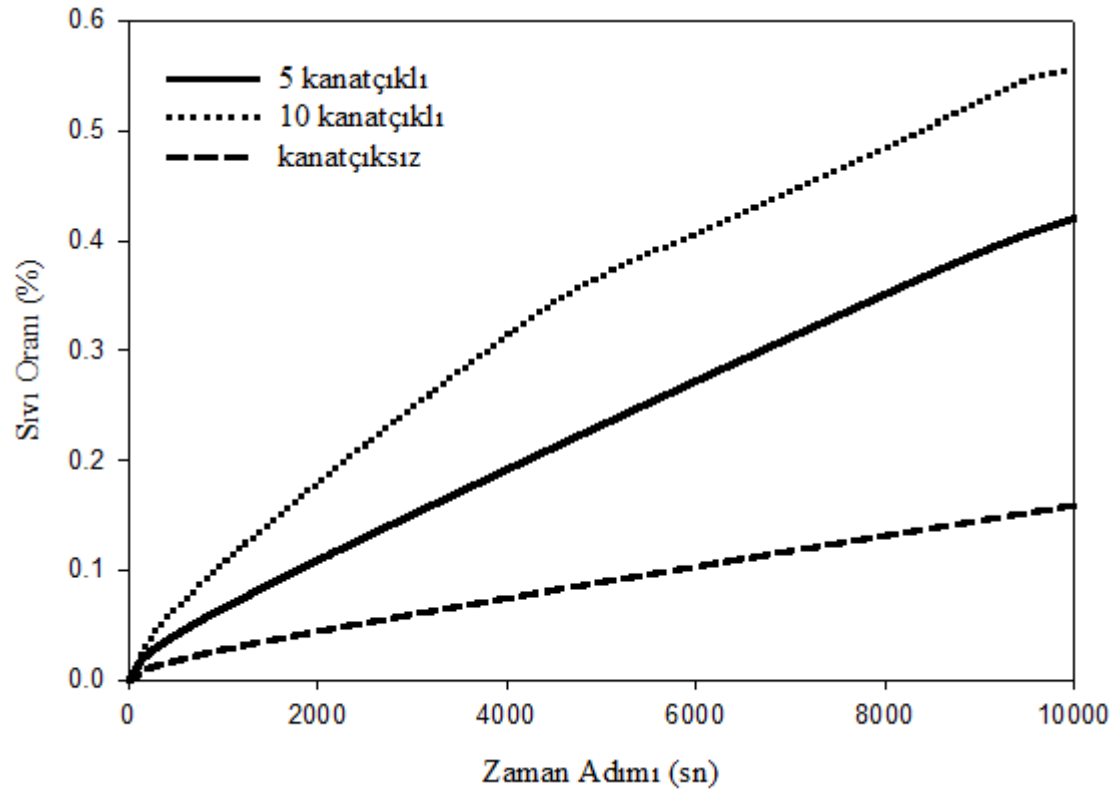
Şekil 3.35’ de yatay modelde erime süreci için elde edilen 10000 sn sonraki sıvı oranının zamanla değişimini gösteren grafik sunulmuştur. Grafikte erime sürecinde en aktif modelin 10 kanatçıklı model olduğu görülmektedir.

Şekil 3.36’ da yine yatay model için erime sürecinin, başlangıçtan itibaren 30000 sn sonraki değişimini içeren sıvı oranı-zaman adımı grafik sunulmuştur.

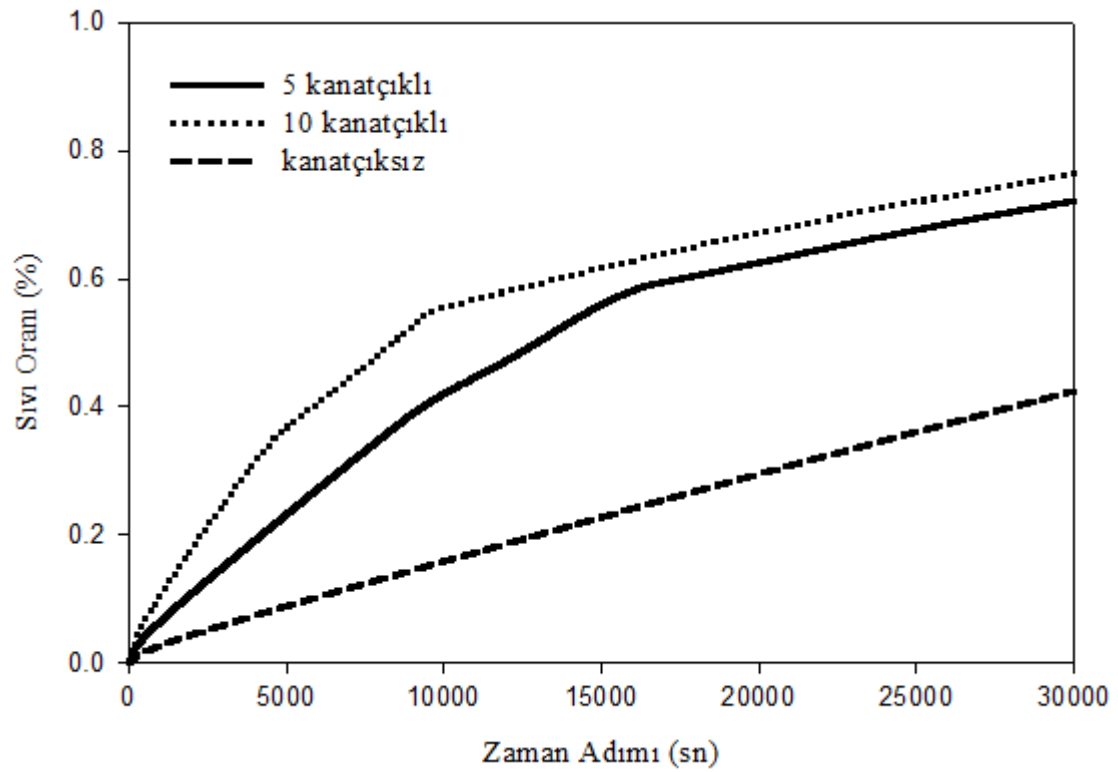


Şekil 3.36. Yatay model için 30000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

Şekil 3.36’ da yatay model için farklı kanatçık sayılarında erime sürecinin incelenmesi sonucunda elde edilen sıvı oranının zamanla değişimini içeren grafik sunulmuştur. Grafikte 5 ve 10 kanatçıklı modelin erime sürecine önemli oranda katkı sağladıkları görülmektedir. Kanatçıksız modelin ise diğer modellere oranla oldukça pasif kaldığı yine grafikten rahatlıkla görülebilmektedir.

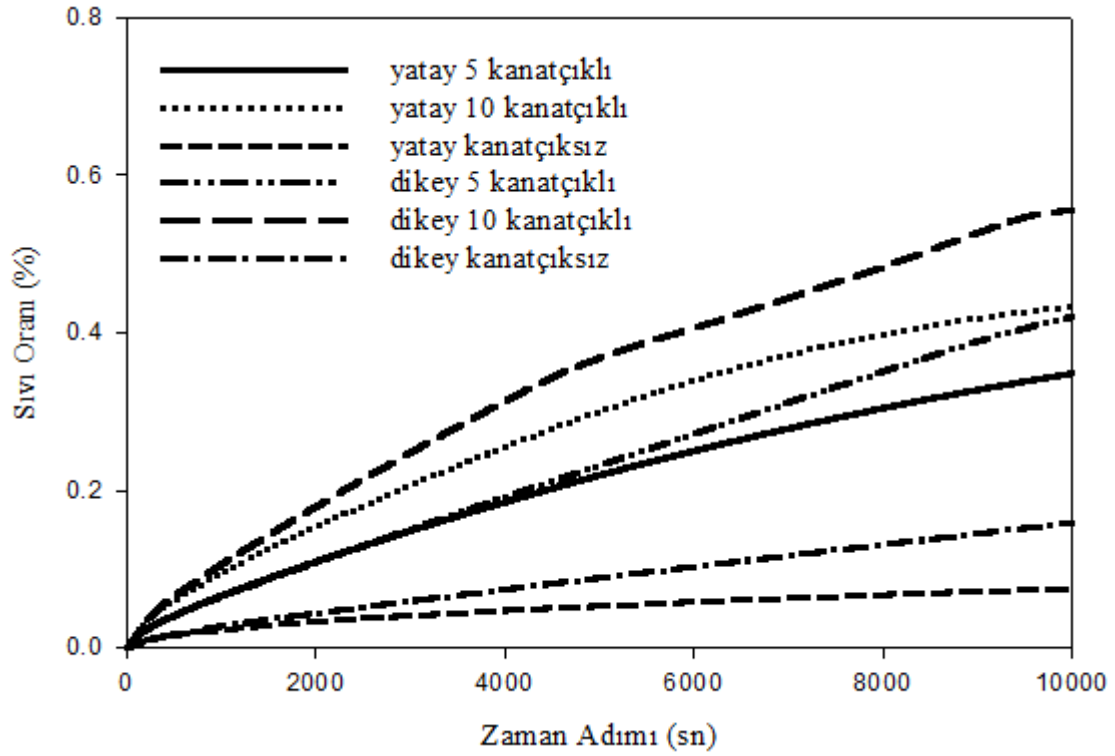


Şekil 3.37. Dikey model için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği



Şekil 3.38. Dikey model için 30000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

Şekil 3.37 ve 3.38’ de dikey modelde erime sürecinin analizi için yapılan çözümler doğrultusunda elde edilen sıvı oranının zamanla değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. Yatay modelde olduğu gibi dikey modelde de erime süreci için, 5 kanatçıklı ve 10 kanatçıklı modellerin önemli rol oynadıkları ve sürece olumlu yönde etki ettikleri belirlenmiştir.



Şekil 3.39. Yatay ve dikey modeller için 10000 sn sonraki 5 kanatçık, 10 kanatçık ve kanatçıksız modellerde erime süreci sıvı oranı – zaman adımı grafiği

Şekil 3.35-3.39 arasında sırasıyla yatay modelde erime sürecinin zamanla değişim, dikey modelde erime sürecinin zamanla değişim ve dikey – yatay modellerde erime sürecinin zamanla değişim grafikleri sunulmuştur. Bu grafiklerde dikkat çekici nokta, katılma sürecindeki sıvı oranının incelenmesi sonucu ortaya çıkan yatay modelin dikey modele olan üstünlüğünün, erime sürecinde tam tersi olarak değişmesi ve dikey modeldeki erime hızının yatay modele nazaran çok daha iyi olmasıdır. Bunun sonucunda erime sürecinde, dikey modelin sürece verdiği olumlu etkinin yatay modele oranla daha iyi olduğu düşünülmektedir.

Şekil 3.38 ve 3.36’ da farklı kanatçık sayılarında göz önüne alınarak oluşturulan modellerin yatay ve dikey olarak konumlandırılması sonucu elde edilen 30000 sn sonraki erime sürecine ait sıvı oranı – zaman adımı grafikleri sunulmuştur.

Daha önceki kısımlarda sunulan yatay ve dikey modeller arası katılaşma süreci kıyaslamasında, yatay modelin süreçte daha etkin rol oynadığı ifade edilmiştir. Aynı kıyaslamayı erime süreci için yaptığımızda ise tam tersi bir sonucun çıktığını görmekteyiz. Yani; dikey modeldeki erime hızı yatay modeldeki erime hızından oldukça çok daha büyüktür. Bu durum sıvı oranı grafiklerinden net olarak görülebilmektedir.

Erime ve katılaşma süreçlerinde sıvı oranının zamanla değişimini veren grafikler yukarıdaki şekillerde yukarıda sunulmuştur. Bu grafiklerin erime ve katılaşma süreçlerinde kanatçık etkilerini net olarak ifade ettiği düşünülmektedir. Erime ve katılaşma süreçlerinde 10 kanatçıklı modelin en etkin model olduğu görülmektedir. Zamanla kanatçık etkilerinin azalması sonucunda katılaşma hızı azalsa da, yinede sürece en olumlu etki yapan modelin 10 kanatçıklı model olduğu belirlenmiştir. Erime süreci analizinde de aynı durum geçerlidir, fakat ilerleyen zamanla erime hızı 10 kanatçıklı modelin erime sürecindeki etkinliği kanatçıkların etkinliğini yitirmesiyle 5 kanatçıklı model neredeyse aynı seviyeye gelmektedir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sunulan ayrıntılı literatür araştırması neticesinde yapılan çalışmada, farklı modellerde FDM' lerin erime ve katılma süreci incelenmiştir. Elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Kanatçıksız model erime ve katılma süreçlerinin en yavaş olduğu modeldir.
- 5 ve 10 kanatçıklı modeller erime ve katılma süreçlerine olumlu yönde etki etmişlerdir.
- 5 ve 10 kanatçıklı modeller için, erime ve katılma süreçlerinde kanatçık etkilerinin yitirilmesi sonucunda kanatçıklı modellerin katılma/erime hızlarında belirli bir sabitleşme olduğu görülmektedir.
- Isı transfer yüzey alanındaki artış, ısı transferini artırmış ve erime-katılma sürecini hızlandırmıştır.
- Sıvı oranı grafikleri sayesinde erime ve katılma grafikleri hakkında daha net verilere ulaşılmıştır.
- Elde edilen sıcaklık dağılımlarıyla, erime katılma oranları uygundur.

5. ÖNERİLER

Yukarıda ayrıntılı olarak sunulan literatür araştırması ve matematiksel alt yapı ışığında erime ve katılma süreçleri incelenmiştir. Gerek yapılan çalışmalar incelendiğinde gerekse elde edilen sayısal sonuçlara göre bu çalışma ile ilgili aşağıda sıralanan bazı öneriler yapılabilir;

- ❖ Deneysel olarak çözülen birçok problem sayısal metotlarla da çözülebilir. Elde edilen sonuçlar kıyaslanarak sonuçların güvenilirliği kontrol edilebilir.
- ❖ Farklı geometrilere sahip modellerin erime ve katılmaya etkisi incelenebilir.
- ❖ Çalışmalarda, farklı FDM' ler kullanılarak sayısal sonuçlarla birçok FDM' nin erime ve katılma süreci modellenebilir.
- ❖ Farklı sayısal yöntemler kullanılarak çözümler karşılaştırılabilir.
- ❖ Başka bir sayısal program kullanılarak, bu programlarla elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.
- ❖ Modelin üzerindeki kanatçık sayısı ve ölçüleri değiştirilerek, uygulanan yeni metodun sonuçlar üzerindeki etkisi analiz edilebilir.
- ❖ Yapılan çalışmanın deneysel olarak oluşturulacak modelde de incelenmesi yapılabilir.
- ❖ Eğimli bir modelde erime ve katılma süreçleri ayrıca incelenebilir. Sonuçla yapılan çalışma ile kıyaslanabilir.
- ❖ Farklı kanatçık geometrileri kullanılarak oluşturulan modellerde inceleme yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Yılmaz, O.M.**, 2005. Yeraltı termal enerji depolamada kullanılan farklı dolgu maddelerinin termal özelliklerinin araştırılması, *Doktora Tezi*, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [2] **Yılmaz, S.**, 2008. Soğutma uygulamaları için faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama, *Doktora Tezi*, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [3] **Sonmez, N., Fertelli A., Buyruk E.**, 2009. Numerical investigation for solidification around various cylinder geometries, *Journal of Science & Industrial Research*, **68**, 122-129.
- [4] **Sasaguchi, K., Kusano, K. and Viskanta, R.**, 1997. A numerical analysis of solid-liquid phase change heat transfer around a single and two horizontal , vertically spaced cylinders in a rectangular cavity, *International Journal of Heat Mass Transfer*, **40**, 3143-3154.
- [5] **Dubovsky,V., Assis, E., Kochavi, E., Ziskind, G., and Letan, R.**, 2008. Study of solidification in vertical cylindrical shells, *Proceedings of the Fifth European Thermal Sciences Conference, Eindhoven, The Netherlands*.
- [6] **Assis, E., Ziskind, G., Letan, R.**, 2009. Numerical and experimental study of solidification in a spherical shell, *Journal of Heat Transfer*, **131**, 024502-1.
- [7] **Assis, E., Katsman, L., Ziskind L., and Letan, R.**, 2007. Numerical and experimental study of melting in a spherical shell, *International Journal Of Heat and Mass Transfer*, **50**, 1790-1804.
- [8] **Basal, B.**, 2007. Eş eksenli üç borulu ısı eşanjörlerinde faz değiştiren madde kullanarak ısı enerji depolanmasının incelenmesi, *Yüksek lisans Tezi*, K.A.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- [9] **Ismail, K.A.R., and Henriquez, J.R.**, 2000. Solidification of pcm inside a spherical capsule, *Energy Conversion & Management*, **40**, 173-187.
- [10] **Felix, R.A., Solanki, S.C., and Saini JS.**, 2009. An analysis of packed bed latent heat thermal energy storage system using PCM capsules: Numerical investigation, *Renewable Energy*, **34**, 1765-1773.
- [11] **Rabin, Y., Korin, E.**, 1993. An efficient numerical solution fort the multidimensional solidification (or melting) problem using a microcomputer, *International Journal Of Heat and Mass Transfer*, **36**, 673-683.
- [12] **Bony, C., Citherlet, S.**, 2007. Numerical model and experimental validation of heat storage with phase change metarials, *Enerji and Buildings*, **39**, 1065-1072.

- [13] **Erek, A., Acar, M.A.,** 2003. Radyal kanatlı boru çevresinde faz değişimi ile enerji depolanması, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **2**, 61-71.
- [14] **Konuklu, Y.,** 2008. Mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddelerde termal enerji depolama ile binalarda enerji tasarrufu, *Doktora tezi*, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [15] **Shatikian, V., Ziskind, G., Letan, R.,** 2008. Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins: Constant heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **51**, 1488-1493.
- [16] **Gemici, Z.,** 2008. Termal enerji depolama sistemlerinde kullanılan ve faz değişimi yapan kapsüllerde ısı transferinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Lamberg, P., Siren, K.,** 2003. Analytical model for melting in a semi-infinite PCM storage with an internal fins, *Heat and Mass Transfer*, **39**, 169-176.
- [18] **Koca, A.,** 2005. FDM olarak kalsiyum klorid hegzahidratın ısı karakteristiğinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırması*.
- [19] **Mazman, M.,** 2006. Gizli ısı depolaması ve uygulamaları, *Doktora Tezi*, Ç.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- [20] **Lamberg, P., Lehtiniemi, R., Henell, A.M.,** 2004. Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage, *International Journal of Thermal Sciences*, **43**, 277-287.
- [21] **Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, P and Smyth, M.,** 2010. A review of metaterials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage system (LHTESS), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 615-628.
- [22] **Costa, M., Buddhi, D. and Oliva, A.,** Numerical simulation of latent heat thermal energystorage system with enhanced heat conduction, *Energy Convers. Mgmt*, **39**, 319-330.
- [23] **Sonmez, N.,** 2007. Buz depolamalı sistemlerde ısı transfer yapılarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, C. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- [24] **Shih, Y.H., Chou, H. and** 2005. Numerical study of solidification around staggered cylinders in a fixed space, *Numerical Heat Transfer*, **48**, 239-260.
- [25] **Lacroix, M. and Benmadda, M.,** 2010. Numerical simulation of natural convection-dominated melting and solidification from a finned vertical wall, *Numerical Heat Transfer*, **31**, 71-86.

- [26] Fang, G.Y. and Li, H., 2002. Study on solidification properties of ice storage in a flat and rectangular capsule, *International Journal on Architectural Science*, **3**, 135-139.
- [27] Kandasamy, R., Wang, Q.X. and Mujumdar, S.A., 2007. Application of phase change materials in thermal management of electronics, *Applied Thermal Engineering*, **27**, 2822-2832.
- [28] Guo, C., Zhang, W., 2008. Numerical simulation and parametric study on new type of high temperature latent heat thermal energy storage system, *Energy Conversion and Management*, **49**, 919-927.
- [29] Reddy, K.S., 2007. Thermal modeling of pcm-based solar integrated collector storage water heating system, *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, **129**, 458-464.
- [30] Moraes, R.I.R. and Ismail, K.A.R., 2009. A numerical and experimental investigation of different containers and PCM options for cold storage moduler units for domestic applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **52**, 4195-4202.
- [31] Lamberg, P., 2004. Approximate analytical model for two-phase solidification problem in a finned phase-change material storage, *Applied Energy*, **77**, 131-152.
- [32] Bilir, L. ve İlken Z., 2005. Total solidification time of a liquid phase change material enclosed in cylindrical/spherical containers, *Applied thermal Engineering*, **25**, 1488-1502.
- [33] Shumeli, H., Ziskind, G. and Letan, R. 2010. Melting in a vertical cylindrical tube: Numerical investigation and comprasion with experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **53**, 4082-4091.
- [34] TÜBİTAK, 2003. Vizyon 2023 Teknoloji Öngörü Projesi Enerji ve Doğal Kaynaklar Paneli Raporu, Ankara.
- [35] Dinçer, I. and Rosen, M.A., Thermal Energy Storage: Systems and Applications, John Wiley&Sons, West Sussex, 2002.
- [36] Ozturk, H.H., 2008. *Isı Depolama Tekniği*, Söz Kesen Matbaacılık, Ankara.
- [37] Karaipekli, A., 2006. Faz değişimli enerji depolama maddelerinde ısıl iletkenliğin zenginleştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- [38] ANSYS-Fluent User Guide, 2009.

- [39] **Fırat, M.**, 2010. Yeni nesil yanma odalarında akış ve ısı transferinin sayısal olarak modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [40] http://www.desica.com.tr/neden_cfd.html Neden CFD. 20 Ağustos 2011.
- [41] **Incropera, F.P., and Dewitt, D.P.**, 2001. *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri*, Literatür Yayıncılık(Çeviri).

ÖZGEÇMİŞ

Mutlu OKÇU Kars ilinin Arpaçay ilçesinde doğdu. İlköğretimini Kars ve İstanbul'daki farklı okullarda tamamladıktan sonra ortaöğretimini İstanbul Halkalı Anadolu Ticaret Meslek Lisesinde bitirdi. 2005-2009 yılları arasında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Otomotiv Öğretmenliği programından mezun oldu. Aynı yılın güz döneminde yüksek lisans eğitimine başladı. 2010 yılı Eylül ayında Ardahan Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen aynı bölümde görev yapmaktadır.