

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANOPARTİKÜL KATKILI FAZ DEĞİŞTİREN
MALZEMELERİN ERİME VE KATILAŞMASININ SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

ENSAR TÜTÜNCÜ

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


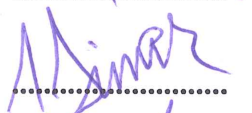
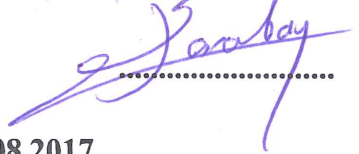
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANOPARTİKÜL KATKILI FAZ DEĞİŞTİREN
MALZEMELERİN ERİME VE KATILAŞMASININ SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ

ENSAR TÜTÜNCÜ

Doç. Dr. Müslüm ARICI
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. İbrahim DİNÇER
Jüri Üyesi, Yıldız Teknik Üniversitesi
Doç. Dr. Hasan KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 01.08.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda fikirlerinden ve bilgilerinden yararlandığım kıymetli hocam Doç. Dr. Müslüm Arıcı'ya gösterdiği ilgi ve anlayıştan dolayı çok teşekkür ederim.

Lisansüstü eğitimime destek veren değerli Prof. Dr. İsmail Teke, Prof. Dr. İbrahim Dinçer ve Doç. Dr. Hasan Karabay hocalarıma, Sayın Zafer Gemici'ye ve Mir Ar-Ge ailesine teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca maddi, manevi desteklerini esirgemeyen annem Emine Tütüncü, babam Aziz Tütüncü, abim Emre Tütüncü'ye ve kuzenim Batıkan Tütüncü'ye teşekkür ederim. Hem özel hayatımda hem de üniversite hayatımda bana inanan, güvenen ve desteğini esirgemeyen sevgili eşim Mine Tütüncü'ye çok teşekkür ederim.

Ağustos-2017

Ensar TÜTÜNCÜ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLOLAR DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
2. PROBLEMİN TANITILMASI	11
2.1. Birinci Çalışmada İncelenen Problemin Tanıtılması	11
2.2. İkinci Çalışmada İncelenen Problemin Tanıtılması	12
2.3. Üçüncü Çalışmada İncelenen Problemin Tanıtılması	13
2.4. Dördüncü Çalışmada İncelenen Problemin Tanıtılması.....	14
3. MATEMATİK MODEL VE SAYISAL METODOLOJİ.....	15
3.1. Kabuller	15
3.2. Yönetici Denklemler	15
3.3. Sayısal Modelin Doğrulanması	18
3.4. Uygun Ağ ve Zaman Adımı Seçimi	21
4. SAYISAL SONUÇLAR VE BULGULAR	23
4.1. Birinci Çalışma.....	23
4.1.1. Birinci çalışmanın sayısal sonuçları	23
4.1.2. Birinci çalışmanın bulguları.....	36
4.2. İkinci Çalışma	38
4.2.1. İkinci çalışmanın sayısal sonuçları	38
4.2.2. İkinci çalışmanın bulguları	46
4.3. Üçüncü Çalışma	47
4.3.1. Üçüncü çalışmanın sayısal sonuçları	47
4.3.2. Üçüncü çalışmanın bulguları.....	59
4.4. Dördüncü Çalışma.....	61
4.4.1. Dördüncü çalışmanın sayısal sonuçları.....	61
4.4.2. Dördüncü çalışmanın bulguları.....	65
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	75
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Birinci çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları.....	12
Şekil 2.2.	İkinci çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları.....	13
Şekil 2.3.	Üçüncü çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları.....	14
Şekil 2.4.	Dördüncü çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları.....	14
Şekil 3.1.	Farklı en-boy oranları için çeşitli zamanlardaki erime hatlarının daha önceki çalışmalar ile karşılaştırılması a)En-boy oranı 0,714 b)En-boy oranı 0,500.....	20
Şekil 3.2.	Üçüncü çalışmada hesaplanan ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması	21
Şekil 3.3.	Farklı mesh yapılarına sahip durumların zamana bağlı sıvı oranının karşılaştırılması	22
Şekil 4.1.	Yan duvar sıcaklığı 345 K olan ve $\phi=1\%$ Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemenin akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda).....	25
Şekil 4.2.	Alt duvar sıcaklığı 345 K olan ve $\phi=1\%$ Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemenin akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda).....	26
Şekil 4.3.	Farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin erime hatları ($T_{sıcak}=345$ K) a)Yan duvardan ısıtma b)Alttan ısıtma	28
Şekil 4.4.	Yan duvardan ve alttan 345 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin sıvı oranları.....	30
Şekil 4.5.	Yan duvardan ve alttan 345 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerde depolanan enerji miktarları	32
Şekil 4.6.	Farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin erime hatları ($T_{sıcak}=355$ K) a)Yan duvardan ısıtma b)Alttan ısıtma	34
Şekil 4.7.	Yan duvardan ve alttan 355 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin sıvı oranları.....	35
Şekil 4.8.	Yan duvardan ve alttan 355 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerde depolanan enerji	36
Şekil 4.9.	Yan duvardan ısıtılan saf faz değiştiren malzemenin farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda).....	39

Şekil 4.10. Alttan ısıtılan saf faz değiştiren malzemenin farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda).....	41
Şekil 4.11. Farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin erime hatları a)Yan duvardan ısıtma b)Altan ısıtma.....	43
Şekil 4.12. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin sıvı oranları.....	44
Şekil 4.13. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerde depolanan enerji.....	45
Şekil 4.14. Yan duvardan ısıtma durumunda sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları için karşılaştırılması.....	48
Şekil 4.15. Alttan ısıtma durumunda sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları için karşılaştırılması.....	49
Şekil 4.16. Yan duvardan ve alttan ısıtma durumlarında sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları için karşılaştırılması.....	50
Şekil 4.17. Yan duvardan ısıtılan saf faz değiştiren malzemenin $w/W=0,35$ kanatçık uzunluğu ve $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonu için farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda).....	52
Şekil 4.18. Alttan ısıtılan saf faz değiştiren malzemenin $w/W=0,35$ kanatçık uzunluğu ve $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonu için farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda).....	53
Şekil 4.19. Saf faz değiştiren malzemenin $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda çeşitli kanatçık uzunlukları için erime hatları a)Yan duvardan ısıtma b)Altan ısıtma.....	54
Şekil 4.20. Yan duvardan ısıtma durumunda sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.21. Alttan ısıtma durumunda sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması.....	57
Şekil 4.22. Yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarlarının farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.23. Alttan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarlarının farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.24. Yan duvardan (solda) ve alttan (sağda) soğutma durumlarında saf faz değiştiren malzeme için farklı zamanlardaki sıcaklık konturları.....	62
Şekil 4.25. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin katı oranları.....	64

Şekil 4.26. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemelerde serbest bırakılan enerji miktarları 65



TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Faz değiştiren malzemenin (parafin mumu), bakır kanatçığın, Al_2O_3 ve CuO nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri	15
Tablo 3.2. Dinamik viskozite katsayılarının değerleri	17
Tablo 3.3. Brownian hareketi parametresinin katsayılarının değerleri	18
Tablo 3.4. Birinci çalışmada hesaplanan ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması	19



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	:Mushy zone sabiti, (kg/m ³ s)
b	:Brownian hakereti sabiti
C	:Dinamik viskozite katsayıları
d	:Çap, (m)
f	:Sıvı oranı
g	:Yerçekimi, (m/s ²)
Gr	:Grashof sayısı
h	:Entalpi, (J/kg)
k	:Isı iletim katsayısı, (W/mK)
n	:Dalgalanma sayısı
Nu	:Ortalama Nusselt sayısı
P	:Basınç, (Pa)
S	:Kaynak terim, (N/m ³)
t	:Zaman, (s)
T	:Sıcaklık, (K, °C)
u,v	:Hız bileşenleri, (m/s)
v	:Kanat pozisyon uzunluğu, (m)
w	:Kanat uzunluğu, (m)
W	:Muhafazanın boyutu, (m)
x,y	:Kartezyen koordinatları, (m)
β	:Isıl genleşme katsayısı, (1/K)
γ	:Brownian hareketi parametresi
Δt	:Zaman adımı, (s)
ΔT	:Sıcaklık profil genliği, (K, °C)
κ	:Boltzmann sabiti, (J/K)
λ	:Faz değıştiren malzemenin gizli ısı, (J/kg)
μ	:Dinamik viskozite, (Pa s)
ρ	:Yoğunluk, (kg/m ³)
φ	:Nanopartikülün hacim oranı

Kısaltmalar

kf	:Katı Faz
NePCM	:Nanoparticle Enhanced Phase Change Material-(Nanopartikül Katkılı Faz Değiştiren Malzeme)
np	:Nanopartikül
PCM	:Phase Change Material-(Faz Değiştiren Malzeme)
ref	:Referans
sf	:Sıvı Faz

NANOPARTİKÜL KATKILI FAZ DEĞİŞTİREN MALZEMELERİN ERİME VE KATILAŞMASININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, kare bir kavite içerisindeki faz değıştiren malzemenin (Phase Change Material, PCM) erime ve katılaşma süreci sayısal olarak incelendi. PCM'in düşük ısı iletim katsayısına sahip olması erime ve katılaşma performansını önemli ölçüde etkilemektedir ve bu durum yüksek şarj veya deşarj hızı gerektiren uygulamaları kısıtlamaktadır. PCM'deki ısı transferini iyileştirmek için, faz değıştiren malzemeye yüksek termal iletkenliğe sahip parçacıkların katılması ve kanatçıkların eklenmesi gibi çeşitli teknikler önerilmektedir. Bu tez, farklı durumların incelendiği dört farklı sayısal çalışmadan oluşmaktadır. Bu çalışmalarda, nanopartikül farklı konsantrasyonlarının, ısısal olarak aktif olan duvar yönünün, farklı duvar sıcaklıklarının ve çeşitli kanatçık uzunluklarının ve konumlarının erime ve katılaşma süreci üzerindeki etkileri araştırıldı. Kavitenin bazı kısımları farklı sıcaklıklarda tutulurken diğer kısımları yalıtımlı olarak incelendi. Nanopartikül katkılı faz değıştiren malzemenin (Nanoparticle Enhanced Phase Change Material, NePCM) termofiziksel özellikleri hem sıcaklığa hem de faza bağlıdır. Hesaplanan sonuçlar, dikkate alınan parametrelerin erime/katılaşma hızı ve depolanan/serbest bırakılan enerji üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Doğal taşınım, erime ve katılaşma sürecince önemli bir rol oynamaktadır. Erime hızının, saf PCM'e nanopartikül ilave edildiğinde ve PCM içerisine kanatçık yerleştirildiğinde önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Buna ek olarak, ısıtılan duvar sıcaklığı arttırıldığında erime oranının önemli derecede arttığı görülmektedir. Isıtılan/soğutulan duvarın yönü değiştirildiği zaman hem erime hem de katılaşma oranı önemli ölçüde değişmektedir.

Anahtar Kelimeler: Erime ve Katılaşma, Kanatçık, Nanopartikül, NePCM, PCM.

NUMERICAL INVESTIGATION OF MELTING AND SOLIDIFICATION OF NANOPARTICLE ENHANCED PHASE CHANGE MATERIALS

ABSTRACT

In this thesis, melting and solidification of phase change material (PCM) in a square cavity are investigated numerically. Low conductivity of PCM may significantly affect the melting and solidification performance and so limits their applications where fast charging or discharging rate is required. In order to enhance heat transfer rate in PCM, several techniques have been proposed such as dispersing highly thermal conductive particles in PCM and adding fins. This thesis consists of four different numerical studies in which different situations are examined. In these studies, the effect of different concentrations of nanoparticle, orientation of thermally activated wall, different wall temperatures and various fin length and position on the melting and solidification process is investigated. Some parts of the cavity are kept at different temperatures while the other parts are insulated. The thermophysical properties of nanoparticle enhanced phase change materials (NePCM) are considered to be both temperature and phase dependent. The computed results showed that the considered parameters have significant effect on the melting/solidification rate and stored/released energy. The natural convection plays an important role in the melting and solidification process. Melting rates increase significantly by adding nanoparticles to the base PCM and by embedding the fin into the PCM. When the heated wall temperature increases the melting rate enhances considerably. When the direction of the heated/cooled wall is changed, both the melting and the solidification rate vary considerably.

Keywords: Melting and Solidification, Fin, Nanoparticle, NePCM, PCM.

GİRİŞ

Dünya nüfusundaki hızlı artış ve sanayileşme ile birlikte enerji tüketimini de hızla artmaktadır. Artan enerji tüketimi ile enerjinin etkin üretilmesi ve mevcut enerji kaynaklarının daha etkin bir şekilde kullanılması büyük bir önem oluşturmaktadır. Dünya’da enerji kaynaklarının güvenilirliği ve sürekliliği önem kazanması ile birlikte yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanan, enerjiyi etkili ve tasarruflu bir şekilde kullanan sistemlere de ilgi artmaktadır. Enerji talebindeki artışın karşılanması ve enerjinin sürdürülebilirliği için enerji tasarrufunu ve verimliliğini arttıran birçok çözümler üretilmeye çalışılmaktadır. Sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen enerjinin çevre dostu olması ve elde edilen enerjiyi uygun bir şekilde depolanmasını ve istenildiği zaman enerji talebini karşılamasını sağlayacak sistemlerin geliştirilmesi büyük ilerlemelere imkân sağlayacaktır.

Isıl enerjinin depolanması ile enerjinin üretildiği ve kullanıldığı sistemlerde meydana gelen atık ısı, tekrar kullanılarak verim arttırılmakta ve enerji tasarrufu elde edilebilmektedir. Ayrıca, ısıl enerjinin depolanması ile yenilenebilir enerji kaynaklarında belirli zamanlarda enerji elde edilmesinden dolayı enerji üretimi ve enerji talebi arasındaki zaman-konum farkının meydana getirdiği sıkıntılar giderilmektedir. Depolanan ısıl enerjinin, konut, endüstri, ulaşım gibi birçok sektörde uygulanma imkânı bulunmaktadır. Isıl enerjinin depolanması ile enerji daha yüksek bir verimle kullanılarak büyük bir tasarruf sağlanabilecektir. Böylelikle fosil yakıtlara duyulan ihtiyaç azalacak ve daha az fosil yakıt tüketilmesi ile birlikte atmosfere yayılan sera gazı miktarı azaltılarak çevreye verilen zararda minimuma indirilebilecektir.

Isıl enerji depolama yöntemi, kimyasal yöntem ve ısıl yöntem olarak ikiye ayrılmaktadır. Isıl yöntem; duyulur ısı depolama ve gizli ısı depolama olarak ikiye ayrılmaktadır. Isıl enerji depolama yönteminin seçimi; depolama süresi, yatırım ve işletme maliyetleri göz önünde bulundurularak tasarlanmaktadır. Isıl enerji depolama sisteminin sahip olması beklenen bazı özellikleri aşağıdaki gibidir [1]:

- Isıl enerji depolama sisteminde kullanılan malzemenin birim hacim/kütle başına düşen ısı depolama kapasitesi yüksek olmalıdır.
- Malzemenin özellikleri, kullanılan sistemin çalışma sıcaklığına uygun olmalıdır.
- Depolama sisteminde kullanılan malzemenin, yanıcı ve zehirleyici etkisi bulunmamalıdır.
- Malzemenin etkinliğini kaybetmeksizin çok sayıda ısı enerji depolama ve serbest bırakma çevrimi gerçekleştirebilmelidir.

Termokimyasal enerji depolama yöntemi, ısı enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürerek depolanmaktadır. Termokimyasal enerji depolama, tepkimeye giren iki veya daha fazla kimyasal bileşimin tersinir tepkimeler sayesinde ısı enerjisini kimyasal bağlarda uzun süre depolanmasına imkân sağlamaktadır. Kimyasal bağlarda ayrışma ve birleşme sırasında yüksek ısı değerine sahip kimyasal tepkimeler gerçekleştiğinden, enerji depolama kapasitesi yüksektir. Bu yöntem, ısı yöntem ile enerji depolama sistemlerine göre daha karmaşıktır. Termokimyasal enerji depolama yönteminde, tepkimenin tersinir olması en önemli özelliğidir. Tersinir kimyasal tepkimelere, absorpsiyonlu ısı pompası ve termokimyasal ısı boruları ile gerçekleştirilebilmektedir. Termokimyasal enerji depolamada, endotermik olarak depolanan enerji, ekzotermik olarak serbest bırakılmaktadır [1].

Duyulur ısı depolama, enerji depolamada kullanılan malzemenin sıcaklık değişimi yolu ile depolanmasıdır ve bu süre zarfında ortamın sıcaklığı değişmektedir. Depolanan enerjinin miktarı kullanılan malzemenin özgül ısısına, sıcaklık değişimine ve miktarına bağlıdır. Duyulur ısı depolama sistemlerinde kullanılan malzemenin ısı kapasitesinin yüksek olması gerekmektedir. Kullanılan malzemenin uzun süre özelliklerinin korunması, ucuz ve kolay temin edilebilir olması da gerekmektedir. Ayrıca, zehirli ve yanıcı olmamalıdır. Fakat düşük enerji yoğunluğuna sahiptirler ve enerji depolamak için yüksek miktarda hacim gerektirdiğinden sistem boyutlarını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bu nedenle ekonomik durum göz önünde bulundurulmuş sistemlerde tasarım, küçük boyutlarda yapılmaktadır. Bu sistemlerde genel olarak kullanılan malzemeler; su, çakıl taşları, kayalardır.

Gizli ısı depolama, sabit sıcaklıkta faz değişimi sonucu enerjinin depolanmasıdır. Gizli ısı depolama yöntemi, birim hacim/kütle başına daha yüksek enerji depolama

kapasitesine sahip olması ve enerji depolama sırasında sıcaklığın neredeyse sabit kalması nedeniyle duyulur ısı depolama yöntemine göre daha caziptir. Ayrıca, farklı uygulamalara uygulanabilecek geniş sıcaklık aralıklarına sahip malzemeler mevcuttur. Termal enerjiyi gizli ısı yoluyla depolayan malzemeler, faz değiştiren malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Faz değiştiren malzemelerin kullanıldığı gizli ısı depolama sistemlerinde, faz değiştiren malzemeleri kullanabilmek için faz değiştiren malzemenin; yüksek gizli ısı kapasitesine ve düşük hacim değişikliğine sahip olması, enerji depolama ve enerji serbest bırakma sırasında özelliklerinin stabil kalmasına, toksik ve yanıcı olmamasına, çevre açısından güvenli, maliyeti ucuz ve kolay temin edilebilir olmasına ve erime sıcaklığını sistemin ortalama sıcaklık aralığında bulunması gibi birçok özelliğe sahip olması gerekmektedir.

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan malzemelerin faz değişimi, katı-katı, katı-sıvı, sıvı-gaz, katı-gaz şeklindedir. Sıvı-gaz faz değişimi, gaz fazındaki malzemenin depolanmasında karşılaşılan basınçlı depolama kaplarının gereksinim gibi sorunlar nedeni ile gizli ısı depolamaya uygun değildir. Katı-katı şeklinde enerji depolama, katı fazdaki malzemenin kristalleşerek ısıyı depolamasıdır. Malzeme ilk halindeki katı fazına dönüştüğü zaman depolanan enerji geri kazanılır. Fakat bu faz değişimi sırasında açığa çıkan gizli ısı miktarı çok az olmaktadır [1]. Diğer faz değişimlerine kıyasla katı-sıvı faz değişiminde daha az hacim değişikliği meydana gelmektedir. Bu durumların arasında katı-sıvı faz değiştiren malzemeler gizli ısı depolama sistemleri için uygundur.

Faz değiştiren malzemeler; organik, inorganik ve ötektik karışımlar olarak üçe ayrılmaktadır [2]. Organik faz değiştiren malzemelerin avantajları; kimyasal olarak kararlı olmaları, aşırı soğuma eğilimi göstermemeleri, yüksek erime ısısına sahip olmaları, korozif ve toksik olmamaları, ucuz ve kolay temin edilebilmeleridir. Ayrıca, organik faz değiştiren malzemeler doğal olarak reaktif olmayan yapısından dolayı hemen hemen bütün kavite malzemeleri için uygundur. Organik faz değiştiren malzemelerin dezavantajı ise yanıcı özelliğe sahip olmaları, düşük ısıl iletkenliği ve faz değişimi sırasında büyük hacim değişikliği sahip olmalarıdır. Organik faz değiştiren malzemelere örnek olarak parafin ve yağ asitlerini gösterilebilir. İnorganik faz değiştiren malzemelerin; yüksek gizli ısı depolama kapasitesine, yüksek ısıl iletkenliğine ve faz değişimi sırasında küçük hacim değişikliğine sahip olmalarının

yanı sıra düşük maliyeti, kolay temin edilebilmesi ve yanıcı özelliğe sahip olmamaları en büyük avantajlarıdır. İnorganik faz değiştiren malzemelerin dezavantajları ise aşırı soğuma göstermeleri, faz bozulması meydana gelebilmesi ve korozif olmalarıdır. İnorganik faz değiştiren malzemelere örnek olarak tuz hidratlar verilebilir. Ötektik karışımlar ise genellikle yağ asidi, tuz hidrat ve parafınlerin karışımı ile elde edilir. Buradaki amaç organik-organik, inorganik-inorganik veya organik-inorganik karışımlar ile faz değiştiren malzemenin dezavantaj özelliklerinin giderilmesidir. Ötektik karışımların en önemli avantajı net faz değişim sıcaklığına sahip olmalarıdır.



1. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan faz değiştiren malzemeler belirli bir hacimde veya kütlede yüksek enerji depolama veya serbest bırakma yoğunluğu sebebiyle ve erime (enerji depolama) veya katılma (enerji serbest bırakma) işlemi neredeyse sabit bir sıcaklıkta gerçekleşmesinden dolayı son yıllarda giderek artan bir ilgi görmektedir [3-7]. Literatürde, faz değiştiren malzemeler ile ilgili bina ısı enerji depolamaları [8, 9-11], güneş kurutma sistemleri [12], ısıtma sistemleri [13], ev tipi soğutma sistemleri [6], elektronik cihazların ısı yönetimleri [14, 15], fotovoltaik cihazların ısı yönetimleri [7, 16], tekstil [17] ve birçok benzer uygulamalar üzerine olan çok sayıda araştırma mevcuttur. Bunun ile birlikte faz değiştiren malzemenin düşük ısı iletim katsayısına sahip olması erime veya katılma performansını önemli ölçüde etkilemektedir ve bu nedenle şarj (erime) veya deşarj (katılma) hızının önemli olduğu uygulamaları kısıtlamaktadır. [4, 6, 7, 11]. Erime veya katılma esnasında ısı transferini arttırmak için çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Isı transferini arttırmak için faz değiştiren malzemelerin mikrokapsüllenmesi [9, 10], faz değiştiren malzemelerin çok katmanlı kullanımı [11, 12], ısı borularının kullanılması [18-20], faz değiştiren malzemelere yüksek iletkenliğe sahip partiküllerin katılması [20-23] ve faz değiştiren malzeme dolu kavitiye farklı konfigürasyonlara sahip kanatçık eklenmesi gibi teknikler uygulanmaktadır [24-30]. Kapsamlı literatür taraması ile farklı konsantrasyonlardaki nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin ve farklı geometrilere sahip yapılarda kullanılan kanatçıkların erime ve katılma süreci üzerine olan etkisi ile ilgili çalışmaların olduğu görülmektedir.

Arasu ve arkadaşları [20], nanopartiküllerin (CuO ve Al_2O_3) hacim oranının parafin mumunun erime ve katılma oranları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Nanopartiküllerin daha küçük hacimsel oranlarda katılması ile ısı transfer oranının arttığı ve parafin mumunun ısı performansındaki artışın Al_2O_3 nanopartikülün CuO nanopartikülüne nazaran daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Wu ve arkadaşları [31], Cu nanopartikülü ekleyerek parafin mumunun erime ve katılma sürecini araştırmışlardır. Saf parafin mumunun içine kütlece %1 Cu nanopartikülü

ilavesiyle erime ve katılma sürelerinin yaklaşık %33,6 ve %31,6 oranında azaltılabileceği rapor edilmiştir. Arasu ve arkadaşları [32], eş merkezli çift borulu bir ısı eşanjöründe Al_2O_3 nanopartikülü katılan parafin mumunda elde edilen performans artışını sayısal olarak incelemiştir. Nanopartikül kullanarak ısı enerjinin şarj-deşarj oranlarının büyük oranda artabileceği sonucuna varmışlardır. Jesumathy ve arkadaşları [33], CuO partikülü katılan parafin mumunun erime ve katılmasını araştırmak için bir enerji depolama sistemi tasarlamışlardır. Parafin mumuna katılan optimal oranda CuO nanopartikülü ile enerji depolama uygulamalarının büyük bir potansiyele sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Harikrishnan ve Kalaiselvam [34], enerji depolama ve serbest bırakma işlemleri sırasında nano tabanlı faz değıştiren malzemenin erime ve katılma özelliklerini incelemiştir. Saf palmitik asitte göre %0,1, %0,2 ve %0,3 TiO_2 nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemenin tamamen erime sürelerinin sırasıyla %6,4, %14,6 ve %21,1 oranında ve tamamen katılması sürelerinin ise sırasıyla %6,2, %12,4 ve %20,1 oranında azaldığını gözlemlemiştir. Palmitik asit içine katılan nanopartikülün, saf palmitik aside kıyasla enerji depolamasını hızlandırması ve enerjiyi daha hızlı serbest bırakması sebebiyle ısı transfer karakteristiklerini katılan nanopartiküle bağı olarak geliştiğini rapor etmişlerdir. Arasu ve Mujumdar [35], Al_2O_3 nanopartikülü katılan parafin mumunun erimesini, kare bir kavite içerisinde yan duvardan ve alttan ısıtma durumları için incelemiştir. Hem yan duvardan ısıtma durumunda hem de alttan ısıtma durumunda parafin mumu içerisine katılan Al_2O_3 nanopartikülünün daha küçük hacimsel konsantrasyonu kullanıldığında erime hızının belirgin bir şekilde artabileceğini ifade etmişlerdir. Erime hızı ve depolanan enerji miktarı, yan duvardan ısıtmaya nazaran alttan ısıtma durumunda daha yüksek olduğunu rapor edilmiştir. Feng ve arkadaşları [23], alttan ısıtılan dikdörtgen bir kavitede suyun içine katılan Cu nanopartikülün erime süreci sayısal olarak araştırmışlardır ve nanopartikül katılan faz değıştiren malzemenin saf faz değıştiren malzemeye kıyasla daha yüksek oranda ısı transferi gerçekleştiği sonucunu rapor etmişlerdir. Nanopartikülün hacim oranı arttıkça sıcaklık alanının ve erime arayüzünün daha hızlı geliştiği bildirmişlerdir. Bundan dolayı erime oranının ve depolanan enerji miktarının arttığını rapor etmişlerdir. Aynı zamanda, belirli Grashof sayılarında ve nanopartikülün yüksek hacim oranlarında konveksiyon hücrelerinin asimetrik dağılımı nedeni ile asimetrik bir erime arayüzünün oluştuğunu göstermişlerdir. Dhaidan ve arkadaşları, CuO

nanopartikülü ile n-oktadekanın erimesi sabit bir ısı akısına maruz tutularak sırasıyla kare bir kaptan [36] ve yatay silindirik bir kapsülde [37] incelemiştir. Bu çalışmalardaki deneysel ve sayısal hesaplara dayanarak, nanopartikül katılması ile ısı transfer oranını arttırıldığı ve dolayısıyla şarj süresinin azaltıldığı ifade edilmiştir. Jourbian ve arkadaşları [38], Cu nanopartikülü katılan buzun erime sürecini incelemiştir. Doğal konveksiyonun hâkim olduğu erime boyunca nanopartikül katılan faz değıştiren malzemenin saf faz değıştiren malzemeye nazaran daha fazla ısı salınım oranı elde edilebileceğini göstermiştir. Dhaidan ve arkadaşları [39], CuO nanopartikül konsantrasyonunun ve Rayleigh sayısının, dairesel bir kap içinde bulunan faz değıştiren malzemenin erime süreci üzerindeki etkisini hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiştir. Faz değıştiren malzemeye daha yüksek nanopartikül konsantrasyonu katarak erimenin hızlandırıldığı rapor edilmiştir. Kashani ve arkadaşları [40], dikdörtgen ve silindir şeklindeki kavite içerisindeki Cu-CaCl₂·6H₂O'nun erime sürecini araştırmışlardır. İki kavitede (dikdörtgen ve silindirik) aynı hacim ve aynı ısı transfer alanı için dikdörtgen kavitede silindirik kaviteye kıyasla erime süresinin çok daha kısa olduğu ve nanopartikülün faz değıştiren malzemeye katılması ile erime süresini yaklaşık %15 kısalmış olduğu rapor edilmiştir. Altohamy ve arkadaşları [41], küresel bir kavitedeki suya katılan farklı hacim oranlarında Al₂O₃ nanopartikülün şarj sürecine olan etkisini deneysel olarak incelemiştir ve şarj süresinin, %2 Al₂O₃ nanopartikül konsantrasyonunda yaklaşık %30 oranında azaltılabileceğini rapor etmişlerdir. Khodadadi ve Hosseinizadeh [42], farklı yönlerden ısıtılan kare bir kavite içerisinde suya katılan Cu nanopartikülü ile katılma sürecini sayısal olarak incelemiştir. Nanopartikül ile iyileştirilmiş faz değıştiren malzemelerin (Nanoparticle Enhanced Phase Change Material, NePCM) ısı salınım oranının saf faz değıştiren malzemelerin ısı salınım oranına nazaran arttığını ve katılma süresinin kısaldığını bildirmişlerdir. Wu ve arkadaşları [43], soğutma sistemlerinin ısı enerji depolaması için su-Al₂O₃ nanopartikülü potansiyelini araştırmışlardır ve suyun toplam donma süresini, kütlece %0,2 Al₂O₃ nanopartikülü katılmasıyla %20,5 oranında azaltılabileceği sonucuna varmışlardır. Kalaiselvam ve arkadaşları [44], alümina ve alüminyum nanopartikülü katılan altı farklı faz değıştiren malzemenin katılmasını, saf faz değıştiren malzemenin katılması ile karşılaştırılmasını incelemiştir. Nanopartikül katılan faz değıştiren malzemelerin katılma süresinin, önemli ölçüde azaldığı rapor edilmiştir. Cu-su

nanosının katılaşmasının incelendiği, dalgalı bir yüzeye sahip dikey bir kavitede [45], küresel bir kavitede [46] ve trapez bir kavitede [47] benzer bir sonuç elde edilmiştir. Abdollahzadeh ve Esmailpour [45], bir kavite içerisindeki suyun katılaşma süresinin, Cu nanopartikülünün suya katılması ve kavitenin dalgalı yüzeyinin belirlenmesi ile önemli ölçüde azaltılabileceğini rapor etmişlerdir. Sharma ve arkadaşları [47], ikizkenar kavitedeki Cu-suyunun katılaşma sürecini incelemişlerdir. Eğilme açısının ve nanopartikül hacim konsantrasyonunun artmasıyla katılaşma süresinin azaldığını bildirmişlerdir. İsmail ve Morates [48], içerisinde faz değiştiren malzeme bulunan silindirik kavitenin farklı çaplarının ve faz değiştiren malzemeye katılan farklı glikol oranının, katılaşma oranına olan etkisini göz önünde bulundurarak tamamen katılaşması için gerekli olan zamanın belirlenmesini sayısal ve deneysel çalışmalar yaparak gerçekleştirmişlerdir. Faz değiştiren malzemedeki glikol içeriğinin artmasının, katılaşma süresinin uzamasına neden olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca, silindir çapı arttıkça katılaşmanın tamamlanması için gerekli olan zamanın arttığı ifade edilmiştir. Duan ve arkadaşları [49], dikdörtgen bir kavite içerisindeki saf bir n-hekzadekanın katılaşma sürecini enerji denkleminin entalpi formülasyonuna dayanan sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Soğutulan duvarın sıcaklığının ve kavitenin en-boy oranının katılaşma sürecine olan etkileri, katılaşma oranı ve katı-sıvı faz hattının şekli göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Kavitenin en/boy oranı, katı-sıvı arayüzü bakımından önemli bir etkiye sahip iken katılaşma oranı bakımından zayıf bir etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir.

Lacroix ve Benmadda [26], kanatçıkların sayısını, boyutunu ve ısıtılan duvarın sıcaklığını göz önünde bulundurarak faz değiştiren malzemenin erime ve katılaşma sürecini incelemişlerdir. Erime sürecinin iyileştirilmesinde, kavitede birkaç uzun kanatçıkların bulunmasının çok sayıda kısa kanatçıkların bulunmasından daha etkili olduğu rapor edilmiştir. Aynı yazarlar dikey kanatçıkların üst ve alt duvarlara eklendiği dikdörtgen bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erimesini araştırmak için bir başka sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir [27]. Kanatçığın alt duvara eklenmesi ile erime süreci üzerindeki etkisinin daha çok olacağı rapor edilmiştir. Fan ve arkadaşları [28], elektronik bileşenlerin ısıl yönetimi için faz değiştiren malzeme tabanlı ısı emicinin performansını, erime sıcaklığının ve

kanatçıkların etkisini göz önünde bulundurarak deneysel olarak incelemiştir. Yapılan testlere dayanarak, kanatçık kullanılan ısı emici için maksimum 10°C'ye kadar sıcaklığın düşürülebileceği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, seçilen faz değıştiren malzemedен bağımsız olarak ısı emici performansının, faz değıştiren malzeme ile geliştiğı ifade edilmiştir. Sharifi ve arkadaşları [29], kanatçık sayısının, uzunluğunun, kalınlığının ve ısıtılan duvarın sıcaklığının erime süreci üzerindeki etkisini incelemek için bir model geliştirmişlerdir. Yatay kanatçıklar ile erime hızının, faz değışiminin ilk evrelerinde hızlı ilerlediğini ve bunu sonradan yavaş bir erime hızı izlediğini rapor etmişlerdir. Gharebaghi ve Sezai [30], farklı kanatçık kalınlıkları ve duvar sıcaklıkları göz önünde bulundurularak faz değıştiren malzeme ile dolu olan bir ısı depolama ünitesi için erime hızının artırılmasını sayısal olarak incelemiştir. Faz değıştiren malzeme modülüne bir kanatçık dizisi ekleyerek ısı transfer hızının 80 kat kadar artırılabilceğini rapor etmişlerdir. Ayrıca, yüksek sıcaklık farkları için minimum iyileştirme oranı, dar aralıklı kanatçıklara kıyasla geniş aralıklı kanatçıklarda üç kat fazla olduğu ifade edilmiştir. Bilen ve arkadaşları [50], dikey iki eş merkezli boru şeklindeki enerji depolama sisteminde faz değıştiren malzemenin erime ve katılma karakteristiğini deneysel olarak araştırmışlardır. Ayrıca, faz değıştiren malzeme içindeki kanatçık sayısı, kütle akış hızı ve ısı transfer hızının giriş sıcaklığı gibi farklı tasarım ve çalışma parametreleri incelenmiştir. Tasarım parametrelerinin etkisinin, çalışma parametrelerinin etkisinden çok daha fazla olduğunu rapor edilmiştir. Bauer [51], gizli ısı depolama sistemlerinde kullanılan faz değıştiren malzemelerde yüksek şarj ve deşarj performansı elde etmek için analitik bir model geliştirmiştir. Bu çalışmada, iki temel kanatçık ile geometrilerin katılma süresine olan etkisi incelenmiştir. Mosaffa ve arkadaşları [52], radyal kanatçıklara sahip bir eşanjör içerisindeki faz değıştiren malzemenin katılma sürecini, iki boyutlu analitik bir model ile incelemiştir. Faz değıştiren malzemenin katılma sürecini incelemek amacıyla aynı hacim ve ısı transfer alanına sahip iki geometrik konfigürasyonu (silindirik ve dikdörtgen) karşılaştırmışlardır. Faz değıştiren malzemenin, dikdörtgen şeklindeki depoya nazaran silindirik yapıdaki depoda daha hızlı katıldığını rapor etmişlerdir. İsmail ve arkadaşları [53], dikey eksenel kanatçıkların; sayısı, uzunluğu ve kalınlığı gibi farklı tasarım parametrelerinin katılma sürecine etkilerini araştırmışlardır. Kanatçıkların radyal uzunluğunun ve sayısının faz değışimine güçlü bir etkisi olduğunu rapor etmişlerdir.

Mevcut literatür dikkatlice gözden geçirildiğinde, örneğin güneş enerji sistemlerinde gölgelenme veya diğer etkilerden dolayı sistemin bir kısmının ani sıcaklık değişimlerine maruz kaldığı durumlar ile ilgili olarak veya elektronik bileşenlerin soğutulmasında sadece mikroişlemciye temas eden kısımda gerçekleşen ısı transferini araştıran birkaç çalışma bulunmaktadır [54-56]. Fakat literatürde erime sürecini, kısmen ısıtılan veya soğutulan bir kavite için araştıran herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bir diğer dikkat edilmesi gereken husus ise sınır koşullarında düzensiz sıcaklık dağılıma sahip sistemlerin, akış davranışının ve gerçekleşen ısı transferinin daha iyi anlaşılmasının gerekliliğidir. Düzensiz sıcaklık dağılıma sahip sistem olarak güneş kolektörleri örnek verilmektedir. Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarda sınır koşulları genellikle izotermal sıcaklık dağılımına göre yapılırken, pratik uygulamaların çoğunda sıcaklık dağılımı sabit değildir [57]. Güneş kolektörlerinde, emici/soğurucu boyunca sıcaklık değişimi meydana gelmektedir. Isıl olarak aktif olan kısımlarda meydana gelen sıcaklıktaki bu değişiklikler sinüzoidal denklem ile simüle edilmektedir [57-60]. Bu tür ısıtma durumu, cam teknolojisinde, mısır ve pirinç gibi ürün kurutma uygulamalarında görülmektedir [61]. Literatür dikkatlice incelendiğinde faz değiştiren malzeme tabanlı enerji depolama sistemlerinde daha iyi bir ısı yönetimi için kanatçık kullanılmaktadır. Kanatçık sayısı, uzunluğu, kalınlığı ve konumu gibi parametreler güncel bir araştırma alanıdır [26-30, 50-53]. Kanatçık uzunluğunun, konumunun faz değiştiren malzeme üzerindeki etkisi kapsamlı olarak araştırılmaktadır ki bu da gizli ısı depolama sistemlerinin ısıl yönetimi için gerekli bir durumdur.

Yukarıda bahsedilen durumlar nedeniyle bu tez çalışmasının bir bölümünde faz değiştiren malzemenin erime süreci, kısmen ısıtılan duvara sahip bir kavite için ve izotermal olmayan sınır koşuluna sahip bir kavite için incelendi. Bir diğer bölümde ise kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin kanatçık uzunluğunun ve pozisyonunun erime sürecine olan etkisi incelendi. Ayrıca, kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin katılma süreci de incelendi.

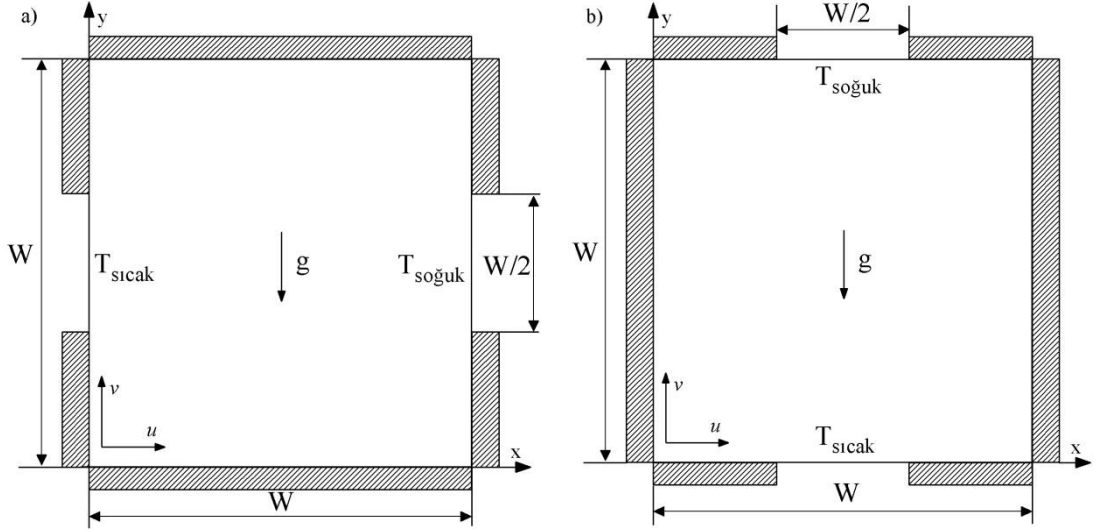
2. PROBLEMİN TANITILMASI

Bu tez çalışması, faz değiştiren malzemelerin erime ve katılaşma performanslarının geliştirilmesinin incelenmesi amacıyla gerçekleştirildi. Bu tez 4 farklı çalışmadan oluşmaktadır. Bu çalışmalarda, kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime ve katılaşma sureci sayısal olarak incelendi. alışmalar, hakkında zet bilgiler aşağıda bahsedilmektedir:

- Birinci çalışmada; kısmen ısıtılan duvarlara sahip kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime sureci, farklı ısıtma yonleri ve Al_2O_3 nanopartikülünün farklı hacim oranları dikkate alınarak sayısal olarak incelendi.
- İkinci çalışmada; izotermal olmayan sınır koşuluna sahip kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime sureci, farklı ısıtma yonleri ve CuO nanopartikülünün farklı hacim oranları dikkate alınarak sayısal olarak incelendi.
- nc çalışmada; kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime sureci, farklı kanatçık uzunlukları ve pozisyonları, farklı ısıtma yonleri ve CuO nanopartikülünün farklı hacim oranları göz önünde bulundurularak sayısal olarak incelendi.
- Dördüncü çalışmada; kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin katılaşma sureci, farklı soğutma yonleri ve CuO nanopartikülünün farklı hacim oranları göz önünde bulundurularak sayısal olarak incelendi.

2.1. Birinci alışmada İncelenen Problemin Tanıtılması

Birinci çalışmada, farklı yonlerden ısıtılan $20mm \times 20mm$ boyutlarındaki kare kavite içerisindeki Al_2O_3 nanopartikülü katılan parafin mumunun erimesinin incelendiği problemin geometrisi ve sınır Şartları Şematik olarak Şekil 2.1'de gösterildi. Kavitenin farklı kısımlarına farklı sabit üniform sıcaklıklar uygulandı. Kavitenin soğuk duvar sıcaklığı 300 K ile muhafaza edilirken sıcak duvar sıcaklığının erime sureci ve depolanan enerji üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 345 K ve 355 K olmak üzere iki farklı sıcaklık değeri uygulandı. Kavitenin diğer kısımları ise ısı yalıtımlıdır. Başlangıç sıcaklığı, erime sureci incelendiğinden dolayı 300 K alındı.



Şekil 2.1. Birinci çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları

Kavitedeki ısı olarak aktif kısımları kavite kenar uzunluğunun yarısına eşittir.

2.2. İkinci Çalışmada İncelenen Problemin Tanıtılması

İkinci çalışmada, farklı yönlerden ısıtılan 20mm×20mm boyutlarındaki kare bir kavite içerisindeki CuO nanopartikülü katılan parafin mumunun erimesinin incelendiği problemin geometrisi ve sınır şartları şematik olarak Şekil 2.2'de gösterildi. Duvar boyunca sinüsoidal olarak değişen sıcaklık dağılımları, yan duvardan ısıtma durumu ve alttan ısıtma durumu için sıcak duvara aşağıdaki gibi uygulandı.

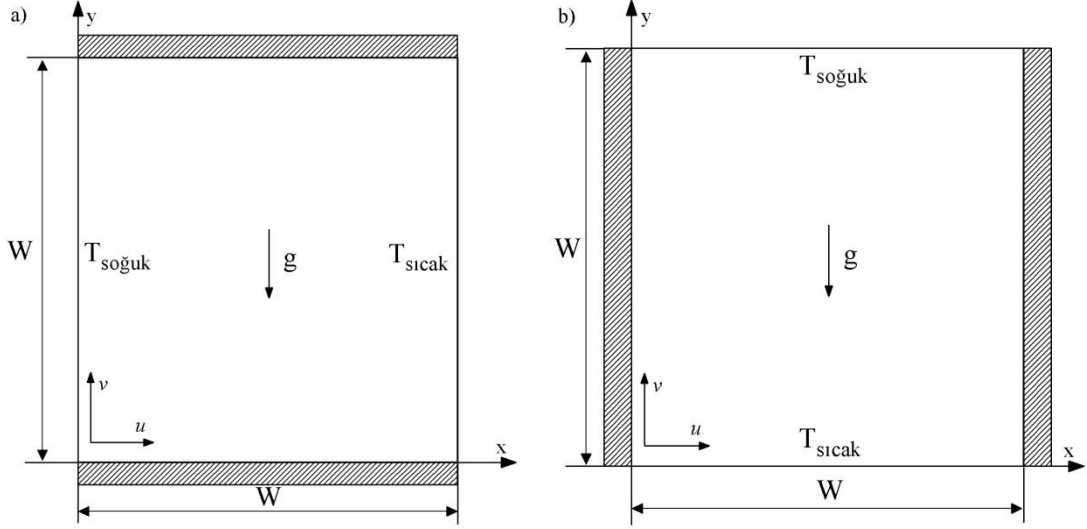
Yan duvardan ısıtma durumunda;

$$T_{\text{sıcak}}(y) = T_{\text{ref}} + \frac{\Delta T}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi ny}{1}\right) \right] \quad (2.1)$$

Alttan ısıtma durumunda;

$$T_{\text{sıcak}}(x) = T_{\text{ref}} + \frac{\Delta T}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi nx}{1}\right) \right] \quad (2.2)$$

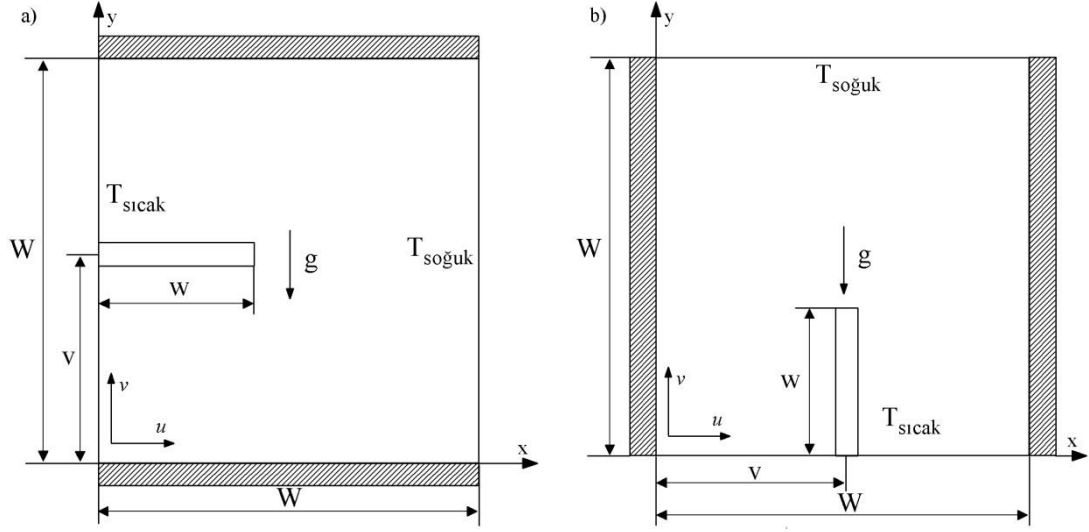
burada T_{ref} referans sıcaklığı, $\Delta T/2$ sıcak duvarın sıcaklık profilinin genliğidir. Bu çalışmada T_{ref} ve $\Delta T/2$, sırasıyla 355 K ve 5 K alınırken soğuk duvar ise 300 K olarak sabit bir sıcaklıkta tutuldu. Diğer duvarlar ise ısı yalıtımlıdır. Dalgalanma sayısı (n) ise 3 alındı. Faz değiştiren malzemenin başlangıç sıcaklığı, erime süreci incelendiğinden dolayı 300 K olarak alındı.



Şekil 2.2. İkinci çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları

2.3. Üçüncü Çalışmada İncelenen Problemin Tanıtılması

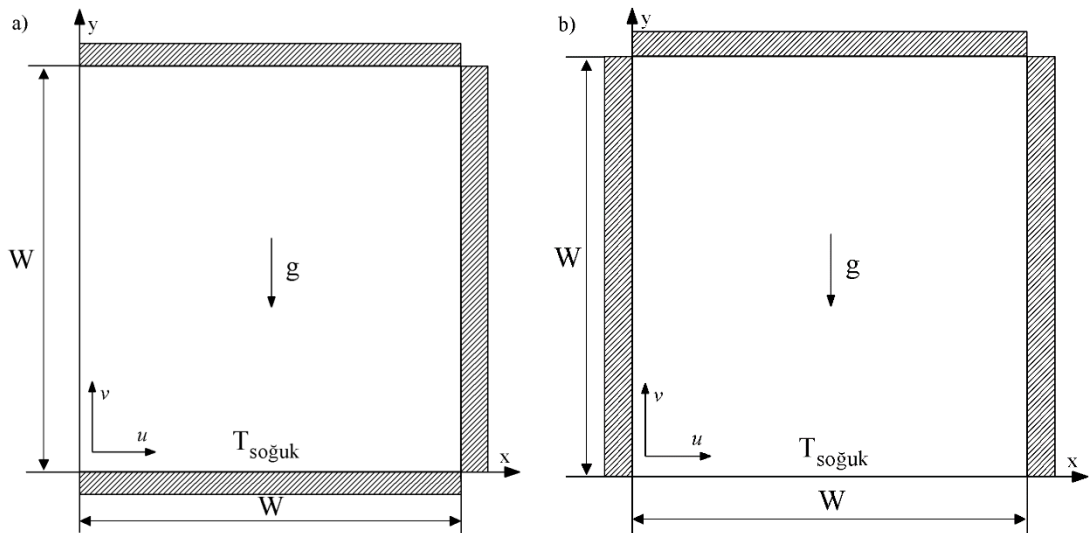
Üçüncü çalışmada, farklı yönlerden ısıtılan $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ boyutlarındaki kare kavite içerisindeki CuO nanopartikülü katılan parafin mumunun erimesinin ve kanatçığın uzunluğunun ve pozisyonunun incelendiği problemin geometrisi ve sınır şartları şematik olarak Şekil 2.3’de gösterildi. Kavitenin sıcak ve soğuk kısımları sırasıyla 350 K ve 300 K olarak sabit sıcaklıkta tutuldu. Diğer kısımlar ise ısı yalıtımlıdır. Sıcak duvara eklenen kanatçık kalınlığı 0,5 mm olarak alındı. Kanatçık uzunluğunun (w) erime süreci üzerindeki etkisini incelemek için, $w=4$ mm, $w=7$ mm ve $w=10$ mm için hesaplamalar yapıldı. Anlatımın kolay yapılması için kanatçık uzunluğu kavitenin boyutuna bölünerek boyutsuz hale getirildi ve sonuç olarak $w/W=0,20$, $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ boyutsuz kanatçık uzunlukları elde edildi. Kanatçık pozisyonunun (v) erime süreci üzerindeki etkisini incelemek için, $v=5$ mm, $v=10$ mm ve $v=15$ mm için hesaplamalar yapıldı. Anlatımı kolaylaştırmak için kanatçık uzunluğunda uygulanan boyutsuz hale getirme işleminin aynısı kanatçık pozisyonu için de uygulandı ve sonuç olarak $v/W=0,20$, $v/W=0,50$ ve $v/W=0,75$ boyutsuz kanatçık pozisyonları elde edildi. Sadece $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=1\%$ CuO nanopartikülü katılması durumu incelendi. Kanatçığın sağladığı iyileşmeyi değerlendirmek için yan duvardan ve alttan ısıtma durumları için referans durum olarak kavite (kanatçıksız) için de hesaplamalar gerçekleştirildi. Başlangıç sıcaklığı, erime süreci incelendiğinden dolayı 300 K olarak alındı.



Şekil 2.3. Üçüncü çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları

2.4. Dördüncü Çalışmada İncelenen Problemin Tanıtılması

Dördüncü çalışmada, farklı yönlerden soğutulan 20mm×20mm boyutlarındaki kare bir kavite içerisindeki CuO nanopartiküli katılan parafin mumunun katılaşmasının incelendiği problemin geometrisi ve sınır şartları şematik olarak Şekil 2.4'de gösterildi. Katılaşma sürecinde farklı soğutma konfigürasyonu için (yan duvardan soğutma ve alttan soğutma) soğuk duvar 300 K olarak alınırken kavitenin diğer kısımları ısı yalıtımlıdır. Başlangıç sıcaklığı, katılaşma süreci incelendiğinden dolayı 340 K olarak alındı.



Şekil 2.4. Dördüncü çalışmadaki iki farklı durumun şematik gösterimi ve sınır koşulları

3. MATEMATİK MODEL VE SAYISAL METODOLOJİ

3.1. Kabuller

Faz değiştiren malzeme olarak kullanılan parafin mumunun, bakır kanatçığın, Al₂O₃ ve CuO nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri Tablo 3.1'de sunuldu.

Tablo 3.1. Faz değiştiren malzemenin (parafin mumu), bakır kanatçığın, Al₂O₃ ve CuO nanopartiküllerin termofiziksel özellikleri [20]

Özellikler	Parafin mumu	Al ₂ O ₃	CuO	Bakır Kanatçıık
ρ (kg/m ³)	$\frac{750}{0,001(T-319,15)+1}$	3600	6510	8978
c_p (J/kgK)	2890	765	540	381
k (W/mK)	0,21 eğer $T < T_{\text{katılaşma}}$ 0,12 eğer $T > T_{\text{sıvılaşma}}$	36	18	378,6
μ (Ns/m ²)	$0,001 \exp\left(-4,25 + \frac{1790}{T}\right)$	–	–	–
λ (J/kg)	173400	–	–	–
$T_{\text{katılaşma}}$ (K)	319,15	–	–	–
$T_{\text{sıvılaşma}}$ (K)	321,15	–	–	–

Erimiş sıvının Newtonian akışkan [23, 27, 28, 35] ve sıkıştırılmaz olduğu varsayıldı. Sıvı hareketi laminar ve iki boyutludur. Parafin mumunun ve nanopartiküllerin termodinamik denge içerisinde olduğu ve aynı hızda hareket ettiği varsayıldı. Faz değiştiren malzemenin homojen ve izotropik olduğu varsayıldı. Ayrıca, nanopartikül katılan faz değiştiren malzemenin termofiziksel özellikleri hem sıcaklığa hem de katı-sıvı fazına bağlıdır.

3.2. Yönetici Denklemler

Yukarıda bahsedilen kabuller göz önüne alınarak kütle, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial \rho_{\text{nepcm}}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} v)}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} uv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{nepcm}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{nepcm}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + S_x \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} vv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{\text{nepcm}} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{nepcm}} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + (\rho\beta)_{\text{nepcm}} g(T-T_m) + S_y \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} uH)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{\text{nepcm}} vH)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{\text{nepcm}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{\text{nepcm}} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.4)$$

Yukarıdaki Denklem (3.2) ve (3.3)'de belirtilen S terimi Denklem (3.5) ve (3.6)'da tanımlanan kaynak terimini temsil etmektedir [62]:

$$S_x = \frac{(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} A_{\text{mush}} u \quad (3.5)$$

$$S_y = \frac{(1-f)^2}{f^3 + \varepsilon} A_{\text{mush}} v \quad (3.6)$$

Burada ε sıfıra bölünmeyi önlemek için küçük bir sayıdır ($\varepsilon=0,001$). A_{mush} , mushy zone sabitidir ve değeri $10^8 \text{ kg/m}^3\text{s}$ 'dir. f, sıcaklığa bağlı olarak Denklem (3.7), (3.8) ve (3.9)'da tanımlanan sıvı oranıdır:

$$f = 0 \text{ eğer } T < T_{\text{katılaşma}} \quad (3.7)$$

$$f = \frac{T - T_{\text{katılaşma}}}{T_{\text{sıvılaşma}} - T_{\text{katılaşma}}} \text{ eğer } T_{\text{katılaşma}} < T < T_{\text{sıvılaşma}} \quad (3.8)$$

$$f = 1 \text{ eğer } T > T_{\text{sıvılaşma}} \quad (3.9)$$

Entalpi h, duyulur ısının ve gizli ısının toplamıdır:

$$h = h_{\text{duyulur}} + h_{\text{gizli}} \quad (3.10)$$

burada

$$h_{\text{duyulur}} = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p dT \quad (3.10a)$$

h_{ref} referans entalpi ve T_{ref} , referans sıcaklıktır. Faz değiştiren malzemenin gizli ısı içeriği Denklem (3.10b)'de gösterildi:

$$h_{\text{gizli}} = f \lambda \quad (3.10b)$$

burada λ , faz değiştiren malzemenin gizli ısısidır. Nanopartikül katılan faz değiştiren malzemenin yoğunluğu, özgül ısısı, gizli ısısı ve dinamik viskozitesi sırasıyla Denklem (3.11), (3.12), (3.13) ve (3.14)'deki gibi belirlendi [63]:

$$\rho_{\text{nepcm}} = \phi_{\text{np}} \rho_{\text{np}} + (1 - \phi_{\text{np}}) \rho_{\text{pcm}} \quad (3.11)$$

$$(\rho c_p)_{\text{nepcm}} = \phi_{\text{np}} (\rho c_p)_{\text{np}} + (1 - \phi_{\text{np}}) (\rho c_p)_{\text{pcm}} \quad (3.12)$$

$$(\rho \lambda)_{\text{nepcm}} = (1 - \phi_{\text{np}}) (\rho \lambda)_{\text{pcm}} \quad (3.13)$$

$$\mu_{\text{nepcm}} = C_1 \mu_{\text{pcm}} \exp(C_2 \phi_{\text{np}}) \quad (3.14)$$

Dinamik viskozitedeki C_1 ve C_2 katsayıları kullanılan nanopartiküle ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CuO}$) göre değerleri değişmektedir. Bu değerler aşağıdaki Tablo 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.2. Dinamik viskozite katsayılarının değerleri [20]

Dinamik viskozite katsayıları	Al_2O_3	CuO
C_1	0,9830	0,9197
C_2	12,9590	22,8539

Nanopartikül katılan faz değiştiren malzemenin ısı iletim katsayısı, statik kısmı için Maxwell modeli ve dinamik kısmı için Brownian hareketini dikkate alan Vajjha ve arkadaşları tarafından geliştirilen korelasyon Denklem (3.15) ile belirlendi [64]:

$$k_{nepcm} = \frac{k_{np} + 2k_{pcm} - 2(k_{pcm} - k_{np})\phi_{np}}{k_{np} + 2k_{pcm} + (k_{pcm} - k_{np})\phi_{np}} k_{pcm} + f b \gamma \phi_{np} \rho_{pcm} c_{p,pcm} \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_{np} d_{np}}} f(T, \phi_{np}) \quad (3.15)$$

$$\gamma = \gamma_1 (100\phi_{np})^{\gamma_2} \quad (3.15a)$$

$$f(T, \phi_{np}) = (0,028217\phi_{np} + 0,003917) \frac{T}{T_{ref}} + (-0,030669\phi_{np} - 0,00391123) \quad (3.15b)$$

burada b, Brownian hareketinin sabitidir ve değeri 5×10^4 'dir. κ , Boltzmann sabitinin değeri ise $1,381 \times 10^{-23}$ J/K'dür. d_{np} , nanopartikül çapı değeri 59×10^{-9} m ve T_{ref} , referans sıcaklığının değeri ise 298,15 K olarak alındı. γ , Brownian hareketi parametresidir ve kullanılan nanopartiküle (Al_2O_3 -CuO) göre değerleri değişmektedir. Bu parametrelerin değerleri aşağıdaki Tablo 3.3'de verildi.

Tablo 3.3. Brownian hareketi parametresinin katsayılarının değerleri [20]

Brownian hareketi parametresinin katsayıları	Al_2O_3	CuO
γ_1	8,4407	9,881
γ_2	-1,07304	-0,9446

Nanopartikül katılan faz değiştiren malzemenin ısı iletim katsayısı faza bağlı olarak Denklem (3.16), (3.17) ve (3.18)'deki gibi ifade edilmektedir:

$$k_{pcm} = k_{kf} \quad \text{eğer } T < T_{katılaşma} \quad (3.16)$$

$$k_{pcm} = (1-f)k_k + f k_s \quad \text{eğer } T_{katılaşma} \leq T \leq T_{sıvılaşma} \quad (3.17)$$

$$k_{pcm} = k_{sf} \quad \text{eğer } T > T_{sıvılaşma} \quad (3.18)$$

Buradaki k_{kf} ve k_{sf} sırasıyla katı ve sıvı fazlardaki nanopartikül katılan faz değiştiren malzemenin ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

3.3. Sayısal Modelin Doğrulanması

Erime ve katılaşma sürecini modellemek amacıyla enthalpy-porosity yaklaşımı [45] kullanıldı. Momentum denklemi ve enerji denklemleri ikinci dereceden upwind yaklaşımı ile ayrıklaştırılarak çözümler elde edildi. Basınç ve hız denklemleri

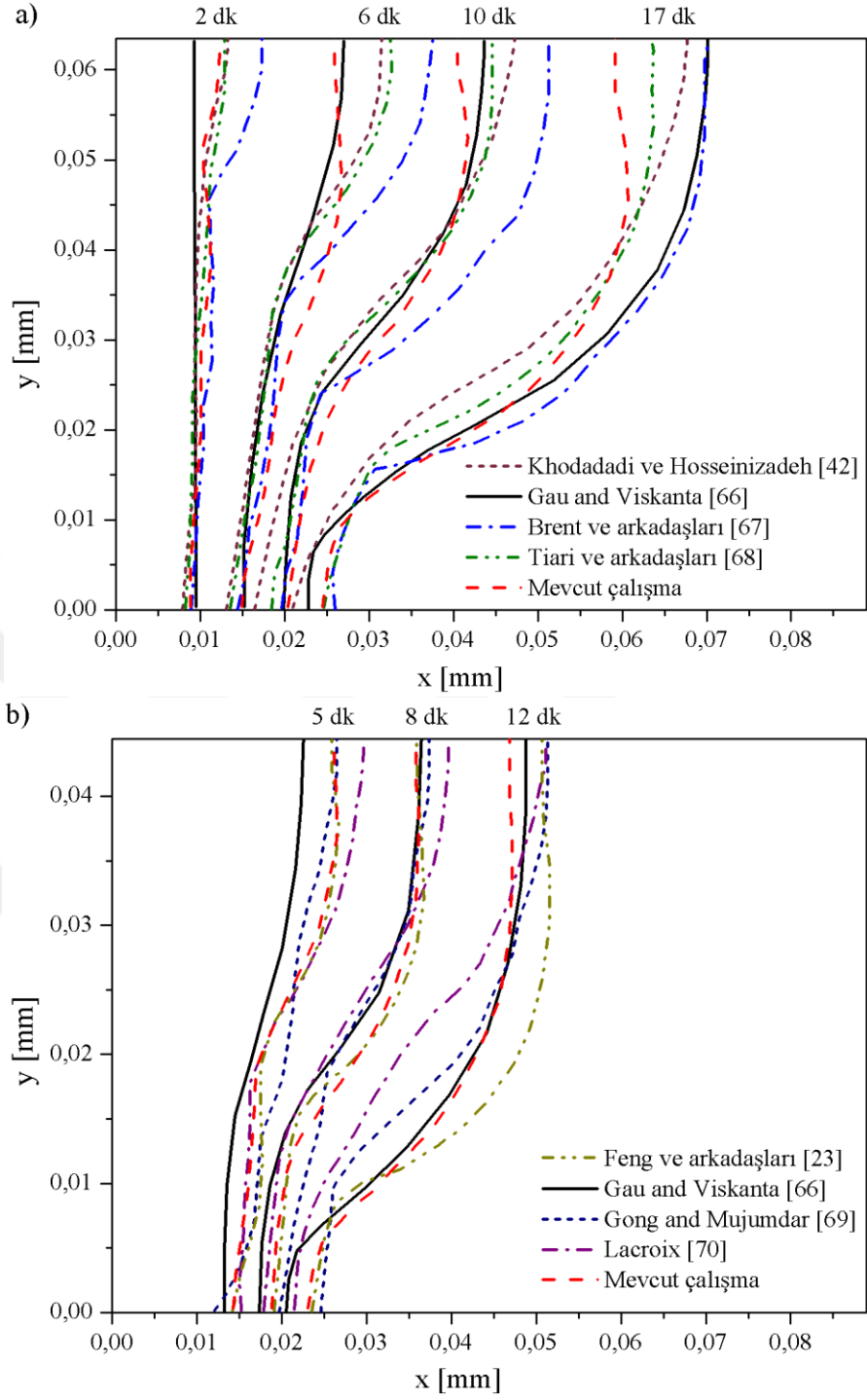
arasındaki ilişki SIMPLE algoritması ile sağlanırken, basınç enterpolasyonu için PRESTO kullanıldı. Problemin sayısal olarak incelenmesinde sonlu hacim yöntemine dayanan ANSYS Fluent 15,1 paket programı kullanıldı. Süreklilik, momentum ve enerji denklemleri için yakınsama kriterleri 10^{-5} , 10^{-6} ve 10^{-8} olarak alındı. Zaman adımındaki maksimum iterasyon 2000 olarak ayarlandı. User Defined Function (UDF), nanopartikül katılan faz değiştiren malzemenin sıcaklık ve faza bağlı termofiziksel özelliklerini ANSYS Fluent'e dâhil etmek üzere yazıldı.

Sayısal modelin geçerli kılınması için literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmak üzere üç adet çalışma gerçekleştirildi. İlk çalışmada gerçekleştirilen nümerik modellemenin mevcut sonuçları ile Khanafer ve arkadaşlarının [65] sonuçları karşılaştırıldı. Kare bir kavite içerisindeki Cu-su nanoakışkanın gösterdiği davranış araştırıldı. Nanosivilerin farklı Rayleigh sayıları ve nanopartikülün farklı hacim oranları için elde edilen sonuçlar Tablo 3.4'de verilmektedir. Elde edilen sonuçlar ile Khanafer ve arkadaşlarının [65] sonuçlar arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.

İkinci çalışmada, dikdörtgen bir kavite içerisindeki galyumun erimesi incelendi. Soğuk duvar 28°C sabit sıcaklıkta tutulurken, sıcak duvar 38°C (diğer bir durumda $38,3^{\circ}\text{C}$ alındı) sabit sıcaklıklarında tutuldu ve yatay duvarlar ise izole kabul edildi. Farklı en-boy oranlarına (0,714 ve 0,500) sahip dikdörtgen kaviteler için çeşitli zamanlardaki erime hatları daha önceden yayınlanan çalışmaların sonuçları ile Şekil 3.1'de karşılaştırıldı. Çeşitli zamanlardaki erime hatları çizgiler ile ifade edildi. Çizgilerin sol tarafı erimiş kısmı (sıvı) ve çizgilerin sağ tarafı ise erimemiş kısmı (katı) ifade etmektedir. Erime, zaman ifadelerinden de anlaşılacağı üzere soldan sağa doğru ilerlemektedir. Yapılan çalışmanın sonuçları ile literatürde bildirilen mevcut sonuçlar arasında bir uyum olduğu görülmektedir.

Tablo 3.4. Birinci çalışmada hesaplanan ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması

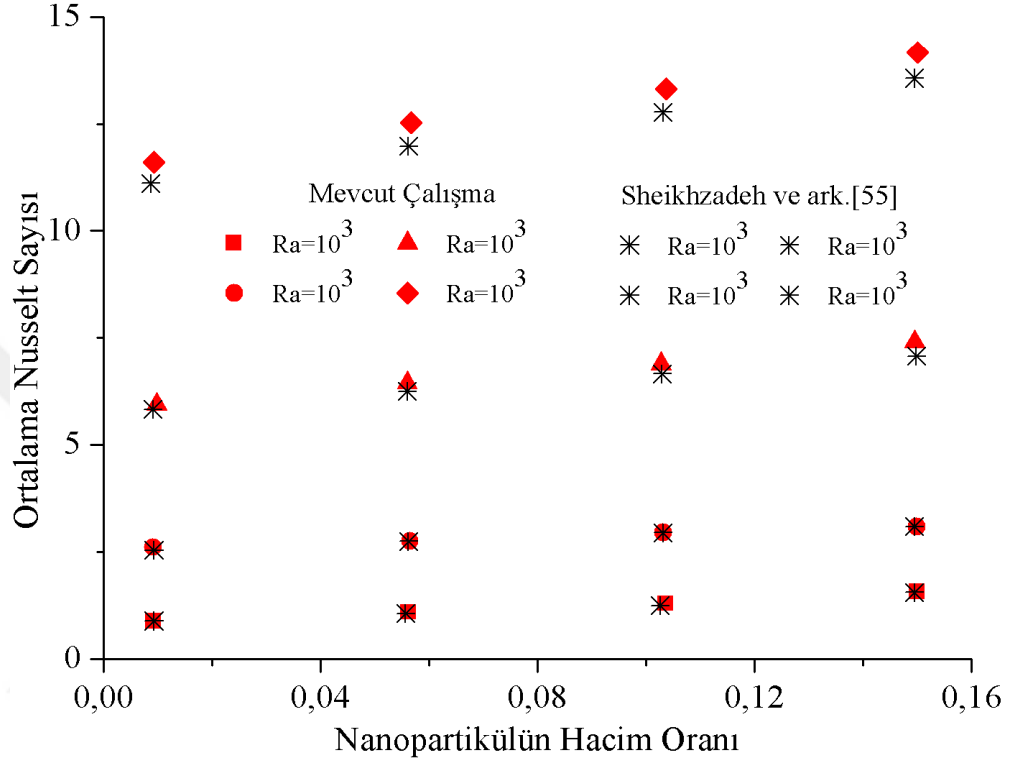
	Gr	$\phi = \%0$	$\phi = \%4$	$\phi = \%8$	$\phi = \%12$
Khanafer ve ark.[65]	10^3	2,0	2,1	2,3	2,4
Mevcut çalışma		1,9	2,1	2,2	2,3
Khanafer ve ark.[65]	10^4	4,1	4,3	4,7	5,0
Mevcut çalışma		4,1	4,4	4,7	4,9
Khanafer ve ark.[65]	10^5	8,3	8,9	9,6	10,2
Mevcut çalışma		8,1	8,7	9,3	9,9



Şekil 3.1. Farklı en-boy oranları için çeşitli zamanlardaki erime hatlarının daha önceki çalışmalar ile karşılaştırılması a)En-boy oranı 0,714 b)En-boy oranı 0,500

Üçüncü incelenen çalışmada kısmen ısıtılan ve soğutulan kare bir kavitede, su-Cu nanoakışkanın kaldırma kuvveti tarafından tahrik edilen sıvı akışı ve ısı transferi incelendi. Farklı Rayleigh sayıları ve nanopartikül farklı hacim oranları için duvarın sıcak bölümünün hesaplanan ortalama Nusselt sayısı Şekil 3.2'de karşılaştırıldı.

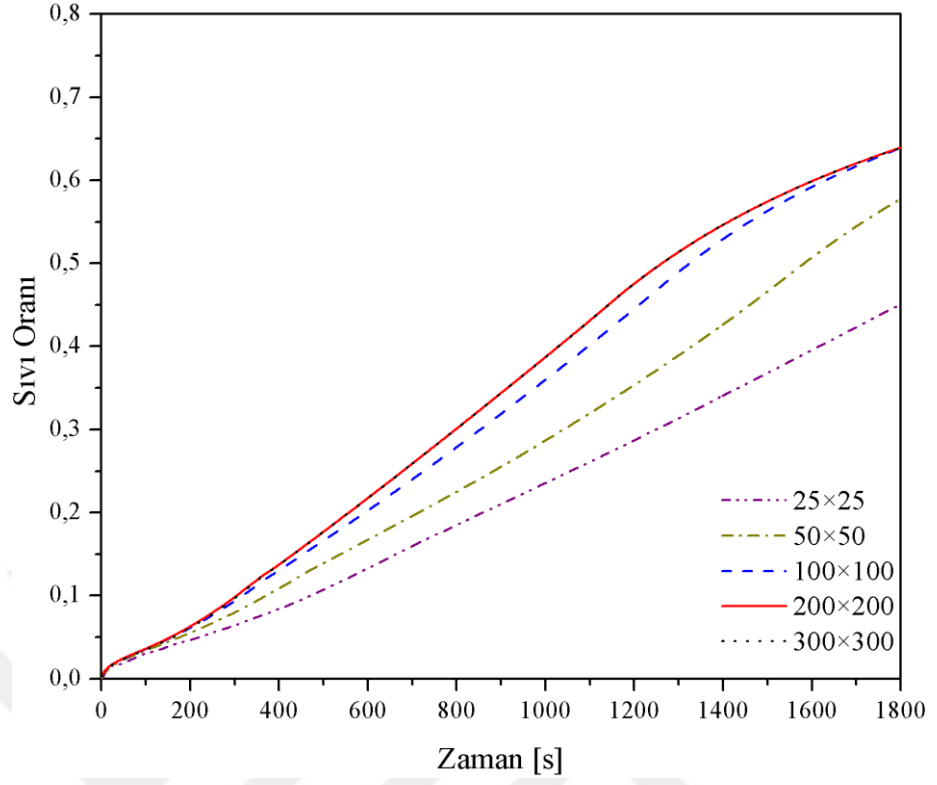
Şekilde görüldüğü gibi, yapılan çalışmanın sonuçları ile Sheikhzadeh ve arkadaşları [55] tarafından yapılan çalışmanın sonuçları arasında çok iyi bir uyum bulunmaktadır. Üçüncü çalışmadan elde edilen sonuçlar ile Sheikhzadeh ve arkadaşlarının [55] elde ettiği sonuçlar arasındaki fark maksimum %4'tür.



Şekil 3.2. Üçüncü çalışmada hesaplanan ortalama Nusselt sayılarının karşılaştırılması

3.4. Uygun Ağ ve Zaman Adımı Seçimi

Uygun ağ boyutunu ve zaman adımını belirlemek amacıyla ağ bağımsızlık çalışması gerçekleştirildi. Kare kavitenin, yan duvardan biri 345 K sabit sıcaklıkta tutulurken diğer yan duvar 300 K sabit sıcaklıkta tutuldu. Diğer kısımlar ise ısı yalıtımdır. Bu şartlar altında $\Delta t=0,05$, $\Delta t=0,01$, $\Delta t=0,005$ saniye için üç farklı zaman adımı ve 25×25 , 50×50 , 100×100 , 200×200 ve 300×300 yapılarındaki beş farklı üniform ağ yapıları için sayısal hesaplamalar yapıldı. İzleme değişkeni olarak sıvı oranı seçildi. Uygun zaman adımı olan $\Delta t=0,01$ saniye için farklı ağ boyutlarıyla elde edilen anlık sıvı oranı Şekil 3.3'de gösterildi. Şekilde görüldüğü gibi, 200×200 ve 300×300 üniform ağ ile elde edilen sonuçlar aynıdır. Çözüm süresini azaltmak amacıyla 200×200 ağ yapısının seçilmesi daha uygundur. Dolayısıyla, tüm çalışmalar için $\Delta t=0,01$ zaman adımı ile 200×200 üniform ağ yapısı uygulandı.



Şekil 3.3. Farklı mesh yapılarına sahip durumların zamana bağlı sıvı oranının karşılaştırılması

4. SAYISAL SONUÇLAR VE BULGULAR

4.1. Birinci Çalışma

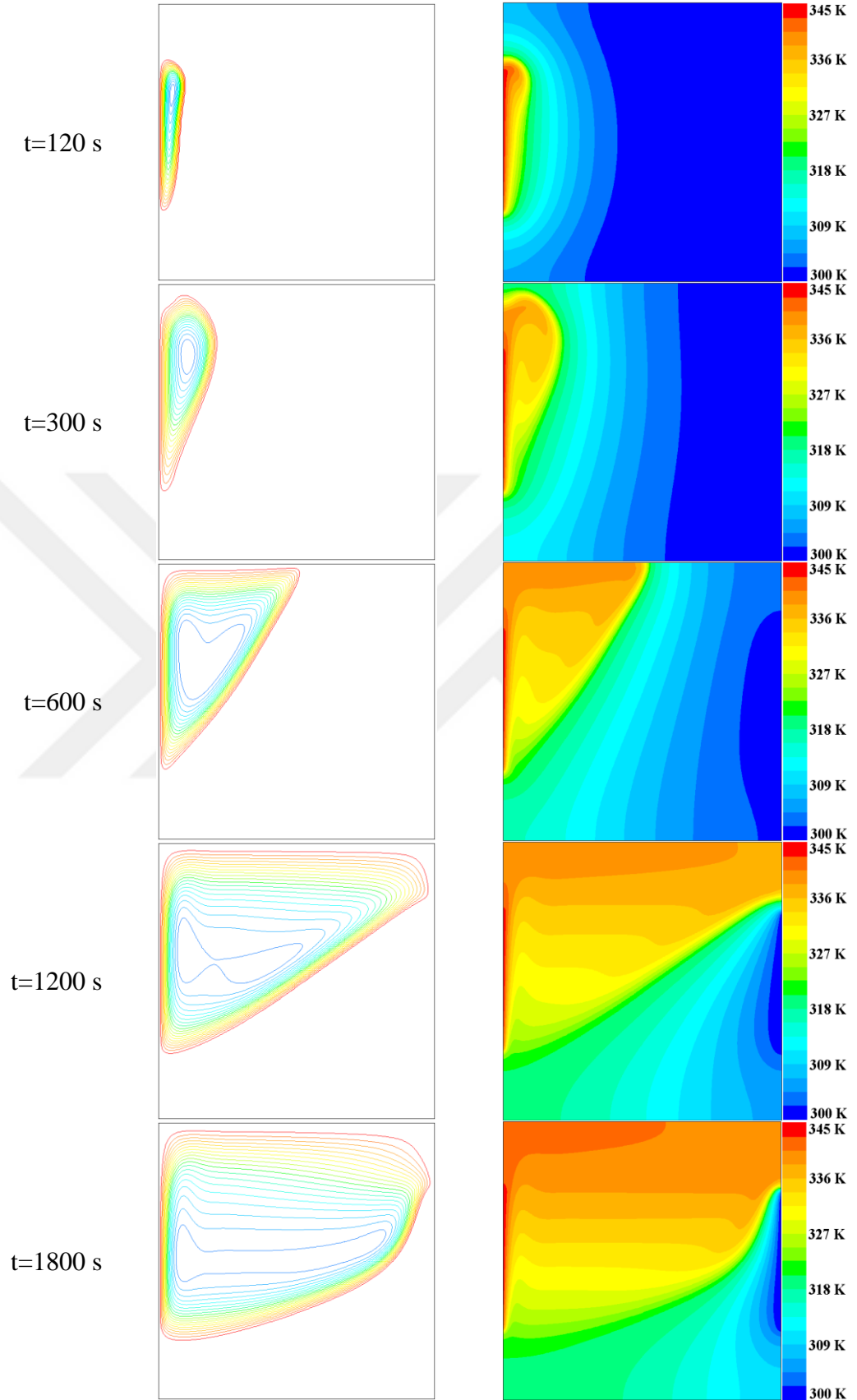
4.1.1. Birinci çalışmanın sayısal sonuçları

Kısmen sıcak ve soğuk duvarlara sahip kare bir kavitedeki parafin mumunun erimesi, sıcak ve soğuk duvarların yönü (dikey ve yatay olarak) ve Al_2O_3 nanopartikülün farklı hacim oranları ($\phi=0\%$, $\phi=1\%$, $\phi=2\%$ ve $\phi=3\%$) göz önünde bulundurularak, sayısal olarak incelendi. Ayrıca, sıcak duvar sıcaklığının erime ve depolanan enerji üzerindeki etkisi analiz edildi ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunuldu.

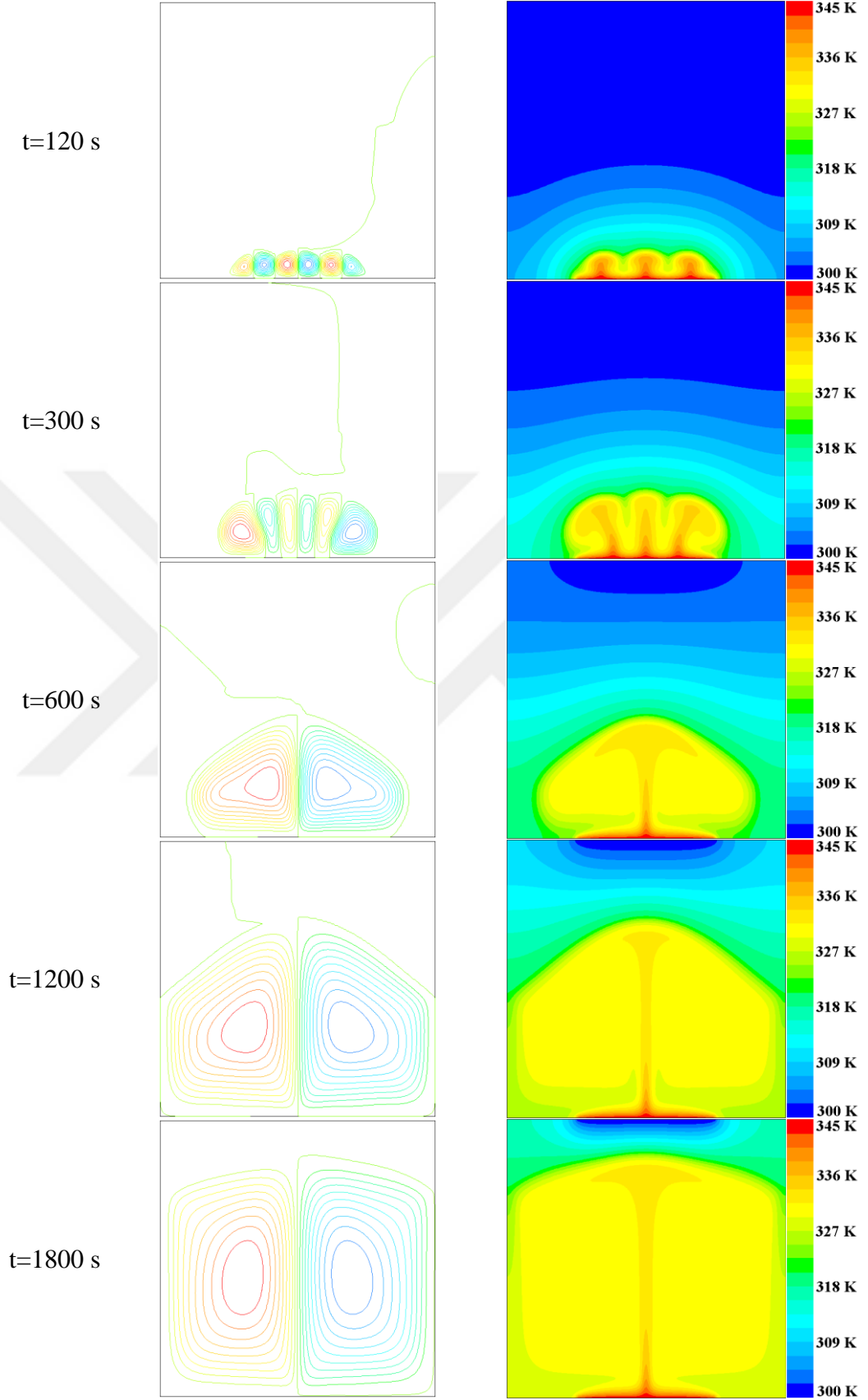
Yan duvar sıcaklığı 345 K olan ve hacimsel olarak $\phi=1\%$ Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemenin (parafin mumu) akım çizgileri ve sıcaklık konturları farklı saniyelerdeki değişimi Şekil 4.1'de gösterildi. Erime işleminin ilk safhalarında ($t < 120$ s) sabit sıcaklık eğrileri, duvarın sıcak kısmına paralel bir şekilde kademeli olarak ilerlemektedir. Erimiş parafin mumunun bulunduğu kısımdaki sabit sıcaklık eğrileri neredeyse dikeydir ve zaman ilerledikçe eşit aralıklarla ilerlemektedir. Bu da taşınımın ısı transferinin tam olarak gelişmediğini ve kavite içerisindeki ısı transferinin esasen iletimle ısı transferine dayandığını göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi 120. saniyede, sol duvarın sıcak kısmı tarafından eritilen parafin mumu, sıcak duvar boyunca yukarı doğru hareket etmektedir. Yoğunluğu azalan erimiş parafin mumu, katı parafin mumuna teması ile soğuyarak sıvı-katı arayüzü boyunca aşağı doğru akmaktadır. Böylelikle saat yönünde dönen tek hücreli bir akışın oluştuğu görülmektedir. Bu saniyede, sabit sıcaklık eğrilerinin bükülmesi ile kaldırma kuvvetinin etkisinin görüldüğü anlaşılmaktadır. $t=300$. saniyede, akış şiddetlenip kavitenin üst kısmındaki parafin mumuna nüfuz ederken kavitenin alt kısmında ilerlemenin neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Erimiş parafin mumunun bulunduğu kısımdaki sabit sıcaklık eğrileri bükülmeye devam etmektedir. Zaman $t=600$. saniyeye kadar çıktığında, yükselen erimiş parafin mumu üst duvara ulaşmaktadır ve üst duvar boyunca sağ duvara doğru ilerlemektedir. Ardından üçgen şeklinde bir döngü oluşturan ve peltemsi bölge (mushy zone)

boyunca aşıya doğru akan bir akış olmaktadır. İlerleyen zaman ile erime, üst kısımdaki katı parafin mumu boyunca artmaya devam etmektedir ve $t=1200$. saniyede erimenin sağ duvara ulaştığı gözlenmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, üçgen şeklindeki döngü sağ duvara doğru büyümektedir. $t=1800$. saniyede parafin mumunun erimesi, duvarın soğuk kısmına ulaşmaktadır ve aşağıdaki katı parafin mumuna doğru ilerlemektedir. Kavitenin üst kısmı tamamen erirken, soğuk duvara yakın bölgelerin erimesi için daha uzun süre gerekmektedir.

Alt duvar sıcaklığı 345 K olan ve hacimsel olarak $\phi=1\%$ Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemenin (parafin mumu) farklı zamanlardaki akım çizgileri ve sıcaklık konturları Şekil 4.2'de gösterildi. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 karşılaştırıldığında, ısı olarak aktif duvarların yönü değıştirildiğinde kavitedeki akışın tamamen değıştiği görülmektedir. $t=120$. saniyede, altı hücreli sirkülasyon bölgelerinin oluştuğu ve alttan ısıtılan kısım ile bağlantılı olarak üç adet mantar şeklinde ısı dalganın (thermal plumes) oluştuğu gözlenmektedir. Şekilde gösterilen akım çizgileri, sıcak bölge çevresindeki Rayleigh-Bénard konveksiyon hücrelerinin gelişimini göstermektedir. Kaldırma kuvveti, alt kısımdaki erimiş parafin mumunu dikey olarak üstteki katı parafin mumuna doğru yükselmektedir. Erimiş parafin mumunun sıcaklığı, katı parafin mumuna temas ettiği yüzeyde azalmaktadır ve akış sıvı-katı arayüzeyi (mushy zone) boyunca aşağı doğru akmaktadır. Bu da erimiş bölgede, zamanla çok hücreli bir akışa neden olmaktadır. $t=300$. saniyede, kaldırma kuvvetinin etkisi ile hücreler giderek büyümektedir. Sıvı-katı arayüzü, Rayleigh-Bénard konveksiyon hücrelerinden kaynaklanan dalgalı bir görünüme sahiptir. Sonraki 5 dakika içerisinde ($t=600$ s), kavitedeki konveksiyon hareketleri şiddetlenerek kavitenin düşey eksenine simetrik olarak sol ve sağ taraflarında bulunan her üç hücre birleşerek bir hücreye dönüşmektedir. Böylece kavitenin düşey eksenine göre simetrik olan bir çift büyük ve zıt yönlerde dönen hücreler oluşmaktadır. Sabit sıcaklık eğrilerinde görülen dalgalı arayüz kaybolmakta ve büyük bir mantar şeklinde ısı dalga oluşmaktadır. Zaman ilerledikçe ($t=1200$ s), konvektif hücre çiftleri yavaş yavaş büyümektedir ki bu da kaldırma kuvvetinin etkisinin giderek daha yoğunlaşmakta olduğunu göstermektedir. $t=1800$. saniyede erime, üst duvarın soğutulmuş kısmı nedeniyle çok fazla ilerleyememekte ancak adyabatik duvarlara doğru ilerlemektedir.



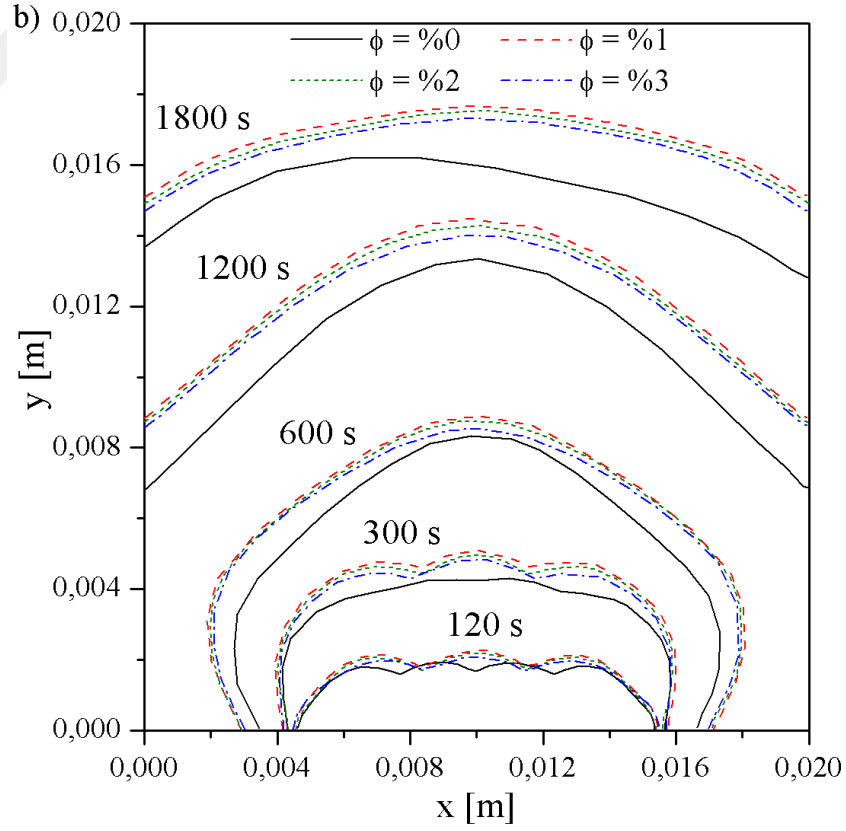
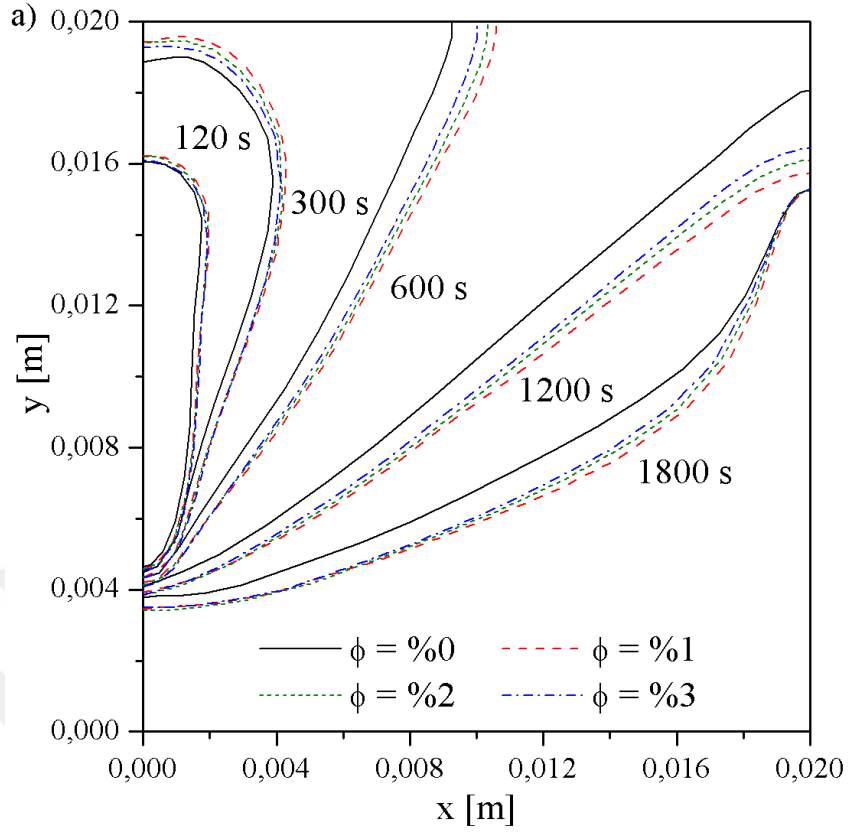
Şekil 4.1. Yan duvar sıcaklığı 345 K olan ve $\phi=1\%$ Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemenin akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)



Şekil 4.2. Alt duvar sıcaklığı 345 K olan ve $\phi=\%1$ Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemenin akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

Çeşitli zamanlardaki faz değıştiren malzemenin erime hatları, 345 K sıcaklığındaki duvarın hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için nanopartiküllerin farklı hacim oranları göz önünde bulundurularak Şekil 4.3'de gösterildi. Yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları için farklı saniyelerde gösterilen çeşitli çizgiler erime hattını yani sıvı-katı arayüzünü ifade etmektedir. Yan duvardan ısıtma durumundaki erime hatlarının sol tarafında kalan kısım erimiş faz değıştiren malzemeyi, sağ tarafında kalan kısım ise katı faz değıştiren malzemeyi ifade etmektedir. Alttan ısıtma durumunda ise erime hatlarının alt tarafındaki kısım erimiş faz değıştiren malzemeyi ifade ederken çizgilerin üst kısmı katı faz değıştiren malzemeyi ifade etmektedir. Erimenin ilk safhalarında Al_2O_3 nanopartikülleri katılan faz değıştiren malzemelerin erime hatları, saf faz değıştiren malzemenin erime hattının biraz ilerisinde olduğu görölmektedir. Zaman ilerledikçe, Al_2O_3 nanopartikülleri katılan faz değıştiren malzemelerin erime hatlarının hızlı ilerlemesi daha çok belirginleşmektedir. Nanopartiküllerin farklı hacimsel oranlardaki ilavesi ile erime hatlarında, saf faz değıştiren malzemeye göre önemli ölçüdeki iyileşme açıkça görölmektedir. Nanopartikül konsantrasyonunun hacimsel olarak $\phi=1\%$ 'in üzerine çıkması, hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumlarının erime hızını, $\phi=1\%$ oranında nanopartikül katılan faz değıştiren malzemeye göre yavaşlatır. Erime hızındaki bu yavaşlama $\phi=3\%$ nanopartikül konsantrasyonunda daha fazla olduğu görölmektedir. Benzer bir durum Arasu ve arkadaşları [20] tarafından gerçekleştirilen çalışmada rapor edilmiştir. Nanopartikül konsantrasyonunun artması ile viskozite de artmaktadır. Viskoz kuvvetten kaynaklanan direncin üstesinden gelmek için daha yüksek kaldırma kuvveti gerekmektedir. Sonuç olarak, nanopartikülün yüksek hacim konsantrasyonu sıvı akışını güçleştirmektedir ve konveksiyon ile ısı transferini azaltmaktadır. Bu sebepten ötürü erimenin ilk safhası dışında (ki bu safhada nanopartikül farklı konsantrasyonları arasında önem arz eden bir fark yoktur) hacimsel olarak $\phi=1\%$ oranında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemedeki erime hızının, saf faz değıştiren malzeme ve hacimsel olarak $\phi=2\%$, $\phi=3\%$ oranında Al_2O_3 nanopartikül konsantrasyonlarına göre daha hızlı olduğu görölmektedir.

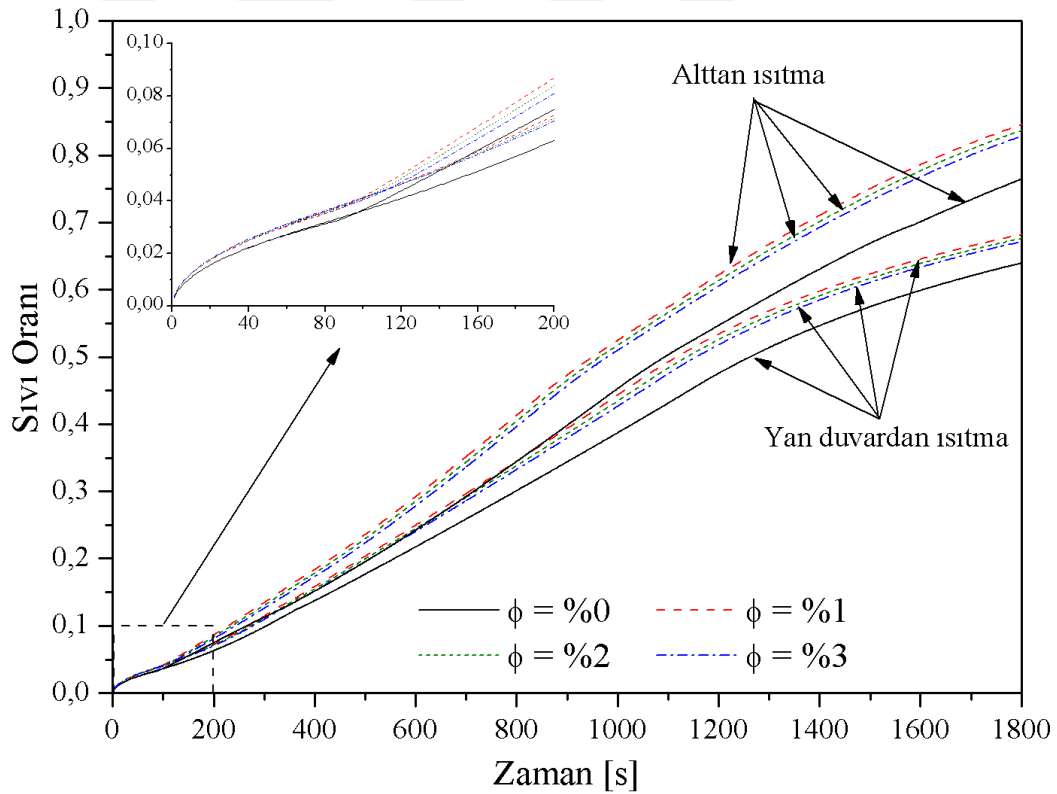
Saf ve nanopartikül katılan faz değıştiren malzemelerin zamana bağlı olan sıvı oranı, 345 K duvar sıcaklığı ile hem yan duvardan ısıtma durumu hem de alttan ısıtma



Şekil 4.3. Farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikül katılan faz değıştiren malzemelerin erime hatları ($T_{\text{sıcak}}=345 \text{ K}$) a) Yan duvardan ısıtma b) Alttan ısıtma

durumu için Şekil 4.4’de gösterildi. Erime sürecinin erken safhasında ($t < 100$ s) yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları için saf faz değiştiren malzemenin eğrileri örtüşmektedir. Çünkü hâkim olan ısı transferi iletimlidir. Faz değiştiren malzemeye yüksek iletim katsayısına sahip nanopartikül katılması ile aynı zamanda sıvı oranında saf faz değiştiren malzemeye göre biraz iyileşme görülmektedir. Bu aşamada, iyileşmenin biraz görüldüğü nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin eğrileri de iletim ile ısı transferi gerçekleştiği için örtüşmektedir. Bu zamandan sonra sıcak duvarın yönü, konveksiyonun başlamasına bağlı olarak erime üzerinde önemli bir rol oynamaktadır ve sıvı oranı eğrileri farklı davranışlar göstermektedir. Erime hızı, yan duvardan ısıtmaya nazaran alttan ısıtma durumunda çok daha hızlıdır. Saf faz değiştiren malzemenin erime süresinin 2. dakika ile 20. dakika arası göz önüne alındığında erime oranı, yan duvardan ısıtma için 0,02415 f/dk iken alttan ısıtma için 0,02795 f/dk’dir. Özellikle alttan ısıtma durumu için erime hızı, faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi = \%2$ ve $\phi = \%3$ oranında Al_2O_3 nanopartikülü katılmasına kıyasla hacimsel olarak $\phi = \%1$ oranında Al_2O_3 nanopartikülü eklenmesi ile önemli ölçüde artmaktadır. Nanopartikül konsantrasyonu artması ile viskozite de artmaktadır. Viskozitedeki bu artış akış hızını azaltmaktadır ve bu da erime hızını yavaşlatmaktadır. $120 \leq t \leq 1200$ saniyelerde yan duvardan ısıtma için erime hızı, $\phi = \%1$, $\phi = \%2$ ve $\phi = \%3$ için sırasıyla 0,02709 f/dk, 0,02665 f/dk ve 0,02622 f/dk iken alttan ısıtma için sırasıyla 0,03178 f/dk, 0,03139 f/dk ve 0,03101 f/dk’dir. Erime hızı $t = 1200$. saniyeden sonra azalmasına rağmen sıcak duvarın yönlerinin etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Belirli bir sıvı oranına ulaşması için gereken süre, alttan ısıtma durumu ile yan duvardan ısıtma durumu kıyaslandığında alttan ısıtma durumunda daha az olduğu görülmektedir. Örneğin; yan duvardan ısıtma durumunda saf faz değiştiren malzemenin sıvı oranınının 0,60’a ulaşması için gereken süre alttan ısıtma durumuna ek olarak 260 saniyedir. Aynı zamanda, saf faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ile erime süresi önemli ölçüde düşmektedir. Örneğin, sıvı oranınının 0,60 olduğu durumda saf faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ile hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için erime süresindeki iyileşme neredeyse aynı olmaktadır. Saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi = \%1$, $\phi = \%2$ ve $\phi = \%3$ oranında katılan Al_2O_3 nanopartikülü ile sağlanan iyileşme sırasıyla yaklaşık %12, %11 ve %10’dur. Erimesinin sürecinin sonunda saf faz değiştiren malzemenin sıvı oranı yan duvardan

ısıtma için 0,64 iken alttan ısıtma için 0,76'ya ulaşmaktadır. Görüldüğü gibi kavitenin ısıtma yönünü değiştirerek saf faz değiştiren malzemenin sıvı oranında %20,0 oranında artma elde edildi. Nanopartikülün hacimsel olarak ϕ =%1 oranında saf faz değiştiren malzemeye katılması ile erime sürecinin sonunda ($t=1800$ s) sıvı oranı, yan duvardan ısıtma için 0,64'ten 0,68'e ve alttan ısıtma için 0,76'dan 0,85'e yükselmektedir. Kavitenin ısıtma yönünün değiştirilmesi ve parafin mumuna hacimsel olarak ϕ =%1 oranında Al_2O_3 nanopartikül katılması ile sıvı oranında %23,9 artma elde edilmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye ϕ =%2 ve ϕ =%3 oranlarında Al_2O_3 nanopartikül katılması ile sıvı oranı yan duvardan ısıtma durumunda 0,67 ve 0,66 iken alttan ısıtma sonunda 0,83 ve 0,82'dir. Saf faz değiştiren malzemeye ϕ =%2 ve ϕ =%3 oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan durumlar için kavitenin ısıtma yönünü değiştirerek sıvı oranında %23,6 ve %23,0 oranında artış elde edilmektedir.



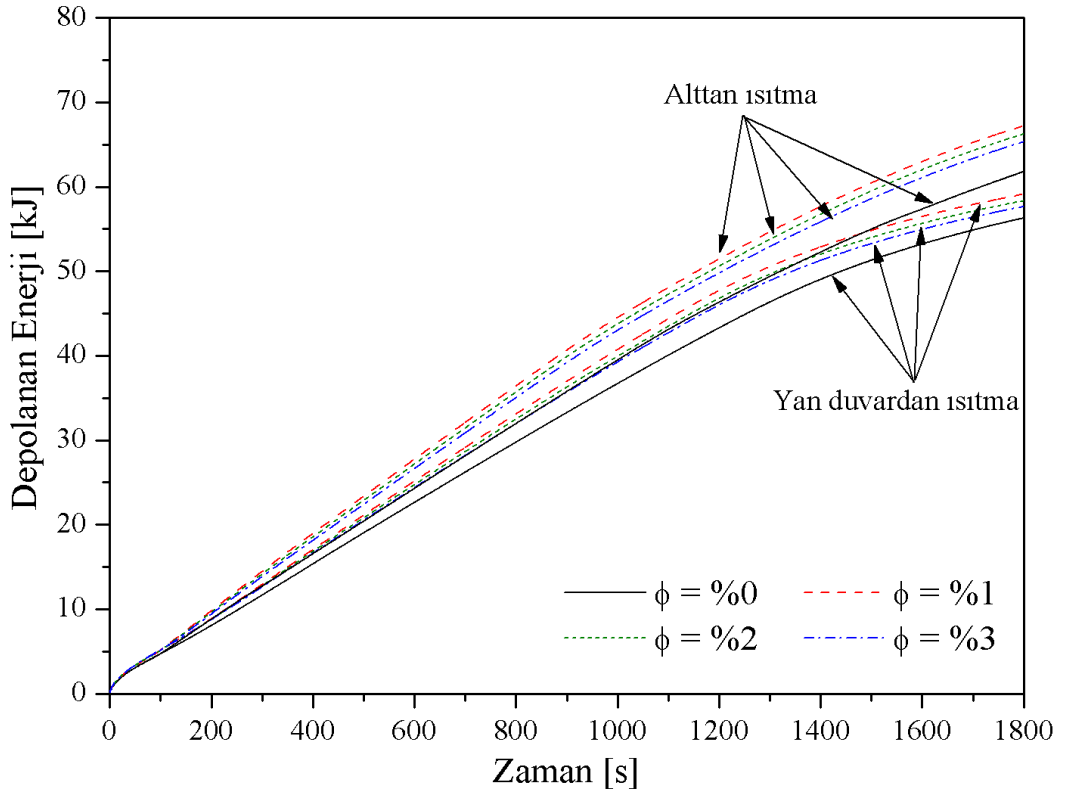
Şekil 4.4. Yan duvardan ve alttan 345 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin sıvı oranları

Erime sürecinde depolanan enerji miktarı, 345 K ile ısıtılan duvarın hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumlarının her iki yönü için nanopartikülün farklı konsantrasyonları göz önünde bulundurularak Şekil 4.5'de gösterildi.

Depolanan enerji miktarı, sıcak ve soğuk duvarlardaki ısı akısı arasındaki farktan hesaplanmaktadır. Erime sürecinin ilk safhalarında ($t < 50$ s), sıcak duvar yönünün ve nanopartikül konsantrasyonunun depolanan enerji üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Zaman ilerledikçe sıcak duvarın yönü ve nanopartikülün konsantrasyonunun etkisi belirgin bir hale gelmektedir. Depolanan enerji bakımından yan duvardan ısıtma durumuna kıyasla alttan ısıtma durumunda daha yüksek miktarda enerji depolandığı görülmektedir. Örneğin, 20. dakikada saf faz değiştiren malzeme için depolanan enerji yan duvardan ısıtma için 43,3 kJ iken sıcak duvarın yönünü değiştirerek depolanan enerji 46,3 kJ'le yükseltilebilmektedir. Ayrıca, saf faz değiştiren malzeme için ısıtma duvarının yönü değiştirilerek depolanan enerji miktarı, 10. ve 30. dakikada sırasıyla %7,3 ve %9,8 oranında artmaktadır. Saf faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ile daha fazla enerji depolanmaktadır. Örneğin 20. dakikada yan duvardan ısıtma durumunda saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi = \%1$ Al_2O_3 nanopartikülün katılması ile depolanan enerji 43,3 kJ'den 47,7 kJ'le yükseldiği görüldü. Ayrıca, depolanan enerji miktarı faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi = \%2$ oranında Al_2O_3 nanopartikülü katılması ile 46,8 kJ ve hacimsel olarak $\phi = \%3$ oranında nanopartikül katılması ile 46,0 kJ'le yükseltilebilmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi nanopartikülün hacimsel olarak $\phi = \%1$ 'in üzerinde faz değiştiren malzemeye katıldığında erime hızı, viskoz kuvvetler nedeniyle azaldığından depolanan enerji de azalmaktadır. Erime sürecinin sonunda, saf faz değiştiren malzeme için yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji 56,3 kJ iken alttan ısıtma durumunda depolanan enerji 61,8 kJ olduğu görülmektedir. Bu durumda depolanan enerji, hacimsel olarak $\phi = \%1$ Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzeme ile yan duvardan ısıtma durumu için 59,1 kJ'le yükseltilebilirken alttan ısıtma durumu için 67,2 kJ yükseltilebilmektedir. Erime sürecinin sonunda, saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi = \%2$ ve $\phi = \%3$ oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan durumlar için yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı sırasıyla 58,3 kJ, 57,6 kJ iken, alttan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı sırasıyla 66,3 kJ ve 65,3 kJ'dür. Erime sürecinin sonunda saf faz değiştiren malzemeye kıyasla yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi = \%1$, $\phi = \%2$ ve $\phi = \%3$ oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan durumlar için sırasıyla %5,0, %3,6

ve %2,4 artmaktadır. Alttan ısıtma durumunda ise depolanan enerji miktarı saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak ϕ =%1, ϕ =%2 ve ϕ =%3 oranlarında Al_2O_3 nanopartiküli katılan durumları için sırasıyla %8,7, %7,2 ve %5,7 artmaktadır.

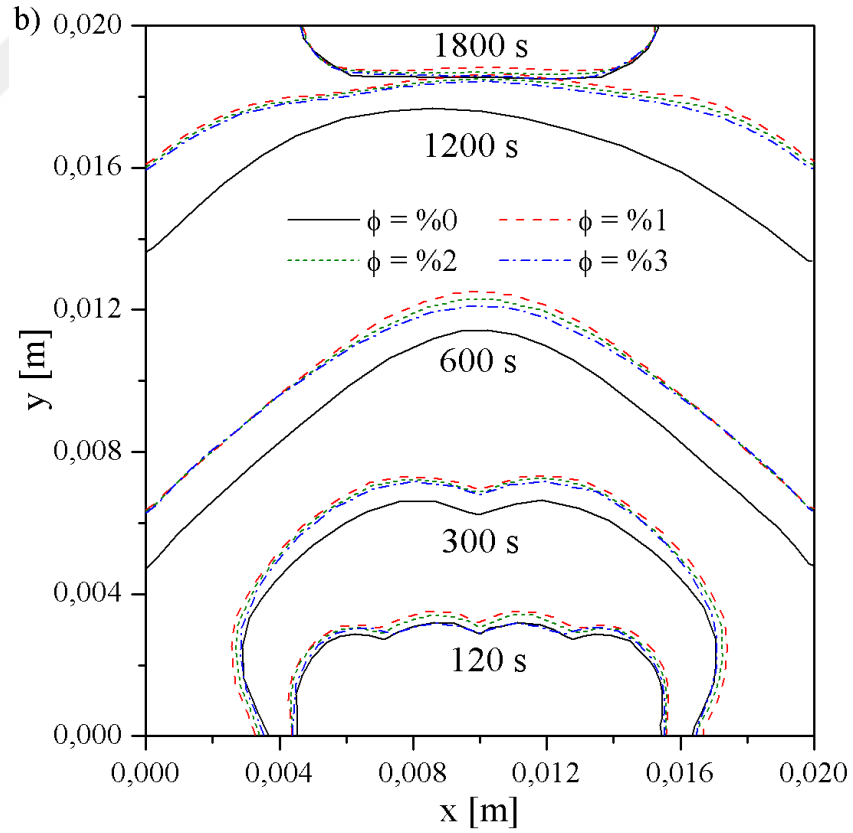
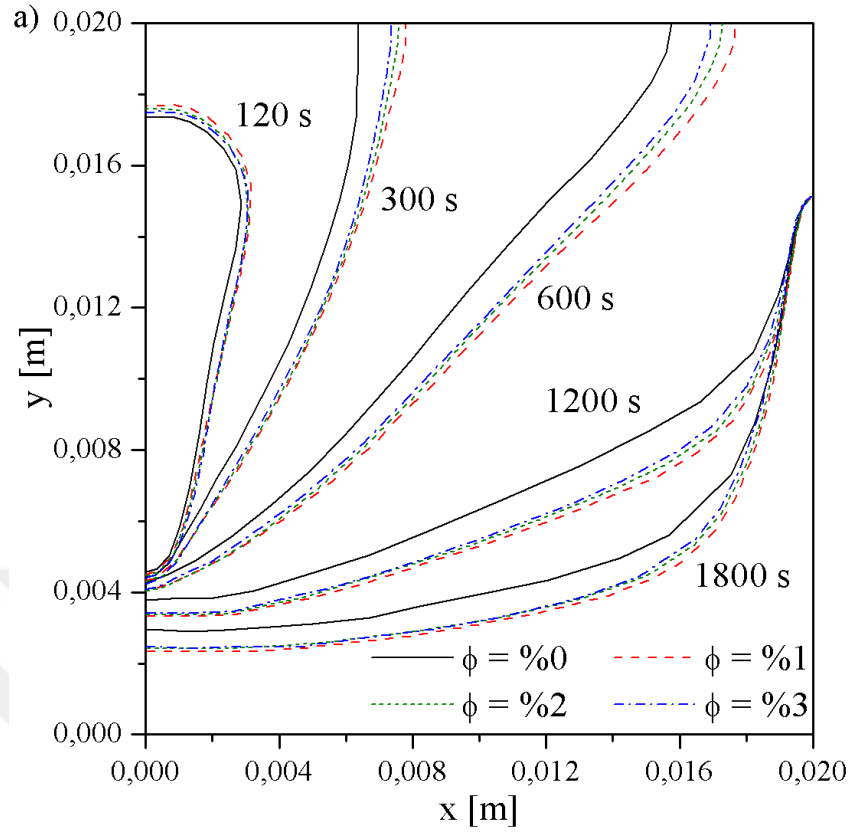
Sıcaklığın, erime ve depolanan enerji üzerindeki etkisini incelemek amacıyla diğer tüm parametreler sabit tutularak, ısıtılan duvar sıcaklığı 345 K'den 355 K'ye yükseltildi. Erime hattı, sıvı oranı ve depolanan enerji ile ilgili sonuçlar aşağıda sunuldu. Kavitenin sıcak duvar sıcaklığının 355 K olduğu duvarın hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için nanopartiküllerin farklı hacim oranları göz önünde bulundurularak Şekil 4.6'da faz değiştiren malzemenin çeşitli zamanlardaki erime hatları gösterilmektedir. Yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları için farklı zamanlarda gösterilen çeşitli çizgiler erime hattını yani sıvı-katı arayüzünü ifade etmektedir. Sıcak duvar sıcaklığı 345 K'den 355 K'ne yükseltildiğinde aynı zamandaki erime oranı miktarı artmaktadır. Nanopartikül konsantrasyonunun hacimsel olarak ϕ =%1'in üzerine çıkması erime hızını, ϕ =%1 oranında nanopartikül



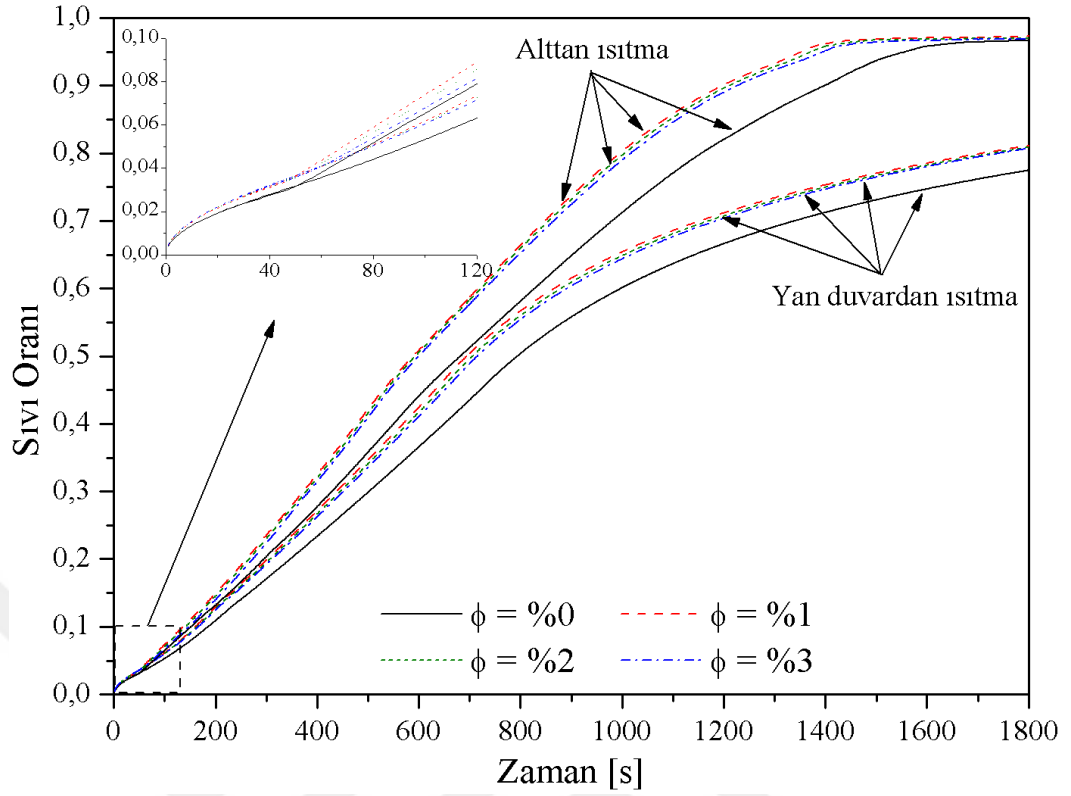
Şekil 4.5. Yan duvardan ve alttan 345 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartiküli katılan faz değiştiren malzemelerde depolanan enerji miktarları

katılan faz değiştiren malzemeye göre viskoz kuvvetlerin artmasından dolayı erime hızını yavaşlatmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi yan duvardan ısıtma durumunda adyabatik alt duvar ve soğuk duvar çevresindeki faz değiştiren malzemenin erimemiş halde kaldığı görülmektedir. Fakat alttan ısıtma durumunda üst duvarın soğuk kısmının çevresindeki faz değiştiren malzeme haricinde parafin mumunun sıvı halde olduğu görüldü. Ayrıca, erime sürecinin sonunda ($t=1800$ s) saf faz değiştiren malzemenin ve nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin erime hatlarının çakıştığı gözlemlendi.

Saf faz değiştiren malzemenin ve nanopartikül katılan faz değiştiren malzemenin zamana bağlı olan sıvı oranı, 355 K ile ısıtılan duvarın hem yan duvardan ısıtma durumu hem de alttan ısıtma durumu için Şekil 4.7’de verildi. Yakınlaştırılmış grafikte görüldüğü gibi sıvı oranı, erime sürecinin 60. sayesinde sonra farklılaşmaktadır ve bu da sıcak duvar sıcaklığı 345 K olan duruma nazaran daha erken bir zamanda konveksiyon hareketlerinin başladığını göstermektedir. Sıcak duvar sıcaklığının 345 K olduğu durumda olduğu gibi duvar sıcaklığının 355 K olduğu durumda da zamanın ilerlemesi ile birlikte sıcak duvarın yönü ve Al_2O_3 nanopartikülün farklı konsantrasyonlarının etkisi belirgin bir hale gelmektedir. Depolanan enerji miktarı bakımından alttan ısıtma durumu ile yan duvardan ısıtma durumu kıyaslandığında alttan ısıtma durumunda daha yüksek miktarda enerji depolanmaktadır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.7 karşılaştırıldığında yani sıcak duvar sıcaklığın artırılması ile saf faz değiştiren malzeme için erime sürecinin sonunda ($t=1800$ s) sıvı oranı, yan duvardan ısıtma için 0,64’den 0,77’ye (yaklaşık %21,1 artma) yükselirken alttan ısıtma için 0,76’dan 0,97’ye (yaklaşık %26,5 artma) yükselmektedir. Şekilde görüldüğü gibi saf faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ile bir iyileşme elde edilmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=2\%$ ve $\phi=3\%$ oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılmasına nazaran saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=1\%$ oranında Al_2O_3 nanopartikülü eklenmesi ile daha yüksek bir iyileşme olmaktadır. Erime sürecinin sonunda ($t=1800$ s), saf faz değiştiren malzeme ve farklı hacim oranlarında nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin yan duvardan ısıtma durumlarında yaklaşık dörtte biri erimemiş halde bulunurken, alttan ısıtma durumunda yaklaşık %96’si erimiş halde olduğu görülmektedir.

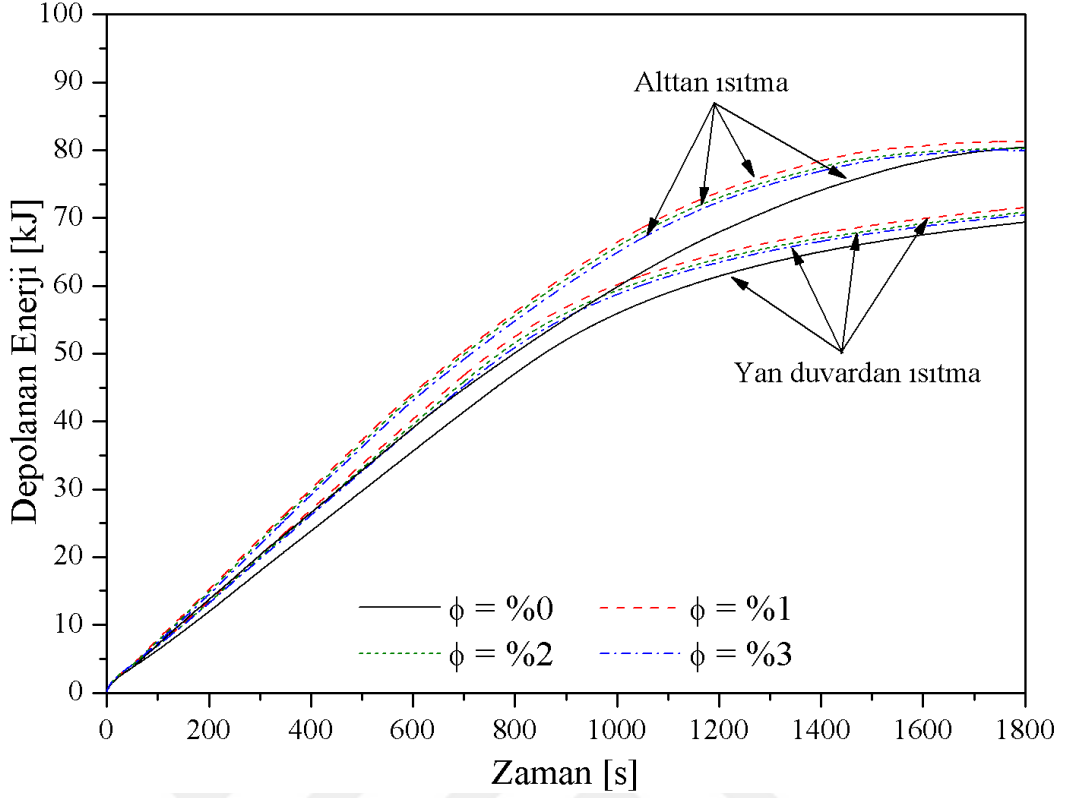


Şekil 4.6. Farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemelerin erime hatları ($T_{\text{sıcak}}=355 \text{ K}$) a)Yan duvardan ısıtma b)Altan ısıtma



Şekil 4.7. Yan duvardan ve alttan 355 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemelerin sıvı oranları

Erime işleminde depolanan enerji miktarı, 355 K ile ısıtılan duvarın hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için nanopartikülün farklı konsantrasyonları göz önünde bulundurularak Şekil 4.8’de gösterildi. Şekilde görüleceği üzere Şekil 4.5’deki gibi erimenin ilk evrelerinde ısıtılan duvarın yönünün ve nanopartikülün farklı konsantrasyonlarının depolanan enerji üzerinde herhangi bir etkisi bulunmazken zaman ilerledikçe depolanan enerji üzerindeki etkisi artmaktadır. Ayrıca, alttan ısıtma durumunda yan duvardan ısıtma durumuna nazaran daha yüksek miktarda enerji depolaması yapılabildiği görülmektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.8 (ısıtılan duvar sıcaklıkları) karşılaştırıldığında saf faz değıştiren malzeme için depolanan enerji miktarı, yan duvardan ısıtma durumunda 56,3 kJ’den 69,3 kJ’le yükseldiği (yaklaşık %23,1 iyileşme) ve alttan ısıtma durumunda 61,8 kJ’den 80,3 kJ’le yükseldiği (yaklaşık %30,0 iyileşme) görülmektedir. Aynı grafikler karşılaştırıldığında hacimsel olarak $\phi = \%1$ oranında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değıştiren malzeme için yan duvardan ısıtma durumunda 59,1 kJ’den 71,6 kJ’le yükseldiği (%21,1 iyileşme) ve alttan ısıtma durumunda ise 67,2 kJ’den 81,2 kJ’le yükseldiği (%20,8 iyileşme) görülmektedir.



Şekil 4.8. Yan duvardan ve alttan 355 K ile ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerde depolanan enerji miktarları

4.1.2. Birinci çalışmanın bulguları

Bu sayısal çalışmada, Al_2O_3 nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemenin (parafin mumunun) kare bir kavite içerisinde erimesi, ısıtılan duvarların yönleri (yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları), nanopartikülün farklı hacim oranları ($\phi=0\%$, $\phi=1\%$, $\phi=2\%$ ve $\phi=3\%$) ve farklı duvar sıcaklıkları (345 K ve 355 K) göz önünde bulundurulularak incelendi. Bu çalışmadan elde edilen ana bulgular aşağıda verilmektedir:

- Yan duvardan ısıtma durumunda, erimiş parafin mumunun kavitenin st kısmına doğru ilerlediği ve saat yönünde dönen tek hücreli bir akışın olduğu görülmektedir. Fakat alttan ısıtma durumunda çok hücreli bir akışın olduğu ve neredeyse tüm kaviteyi kapladığı görülmektedir. Ayrıca, alttan ısıtma durumunda Rayleigh-Bnard konveksiyon hücreleri birleşerek kavitenin düşey eksenine göre simetrik olan bir çift büyük ve zıt yönlerde dönen hücreler oluşurmaktadır.
- Erime sürecinin ilk safhalarında, yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları için saf faz değiştiren malzemenin ve nanopartikülü katılan faz değiştiren

malzemelerin eğrileri kendi aralarında örtüşmektedir. Erimenin ilk safhalarında ısı transferi, iletim ile gerçekleştiğinden dolayı ısıtma yönünün erime hızı üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır. Fakat zaman ilerledikçe, yan duvardan ısıtma yerine alttan ısıtma durumunda sıvı oranında ve depolanan enerji miktarında daha yüksek performans elde edilmektedir. Farklı ısıtma yönleri göz önünde bulundurularak erimenin sonunda sıvı oranı ve depolanan enerji miktarı için iyileşme en az %16,0 ve %9,0'dur.

- Saf faz değiştiren malzemeye yüksek iletim katsayısına sahip nanopartikül katılması ile saf faz değiştiren malzemeye nazaran erime oranında ve depolanan enerji miktarında bir artma görülmektedir. Faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=1\%$ 'lik nanopartikül eklenmesi ile erime hızında ve depolanan enerji miktarında yan duvardan ısıtma durumu ve alttan ısıtma durumu için %6,7 ve %10,6 oranında bir artma meydana gelmektedir.
- Saf faz değiştiren malzemeye kıyasla nanopartikül katılan faz değiştiren malzeme erime ve depolanan enerji miktarında iyileşme gözlemlenmesine rağmen nanopartikül konsantrasyonunun $\phi=1\%$ 'in üzerine çıkması erime hızı ve enerji depolama performansını azaltmaktadır. Bunun nedeni, nanopartikül konsantrasyonu artması ile viskozitenin artmasıdır. Bundan dolayı viskoz kuvvetten kaynaklanan direncin üstesinden gelebilmek için daha yüksek kaldırma kuvveti gerekmektedir. Sonuç olarak, nanopartikülün yüksek hacim konsantrasyonu akış hızını ve dolayısıyla konveksiyonla ısı transferini azaltmaktadır. Bu da erime hızını ve enerji depolama performansını düşürmektedir.
- Sıcak duvarın sıcaklığının artırılması ile sıvı oranında ve depolanan enerji miktarında bir artış meydana gelmektedir. Sıvı oranında artış yan duvardan ısıtma için en az %21, alttan ısıtma için en az %26'dır. Depolanan enerji miktarında artış yan duvardan ısıtma durumunda en az %23, alttan ısıtma için en az %30'dur.
- Faz değiştiren malzemenin erime oranı ve enerji depolama performansı, kavitenin sıcak duvarının yönünü değiştirerek, nanopartikül ekleyerek ve sıcak duvar sıcaklığını yükselterek artırılabilir. Sıcak duvarın yönünü değiştirerek, hacimsel olarak $\phi=1\%$ oranında Al_2O_3 nanopartikülü ekleyerek ve sıcak duvar sıcaklığını yükselterek sıvı oranında %53 artma ve enerji depolama miktarında ise %44 artma elde edilmektedir.

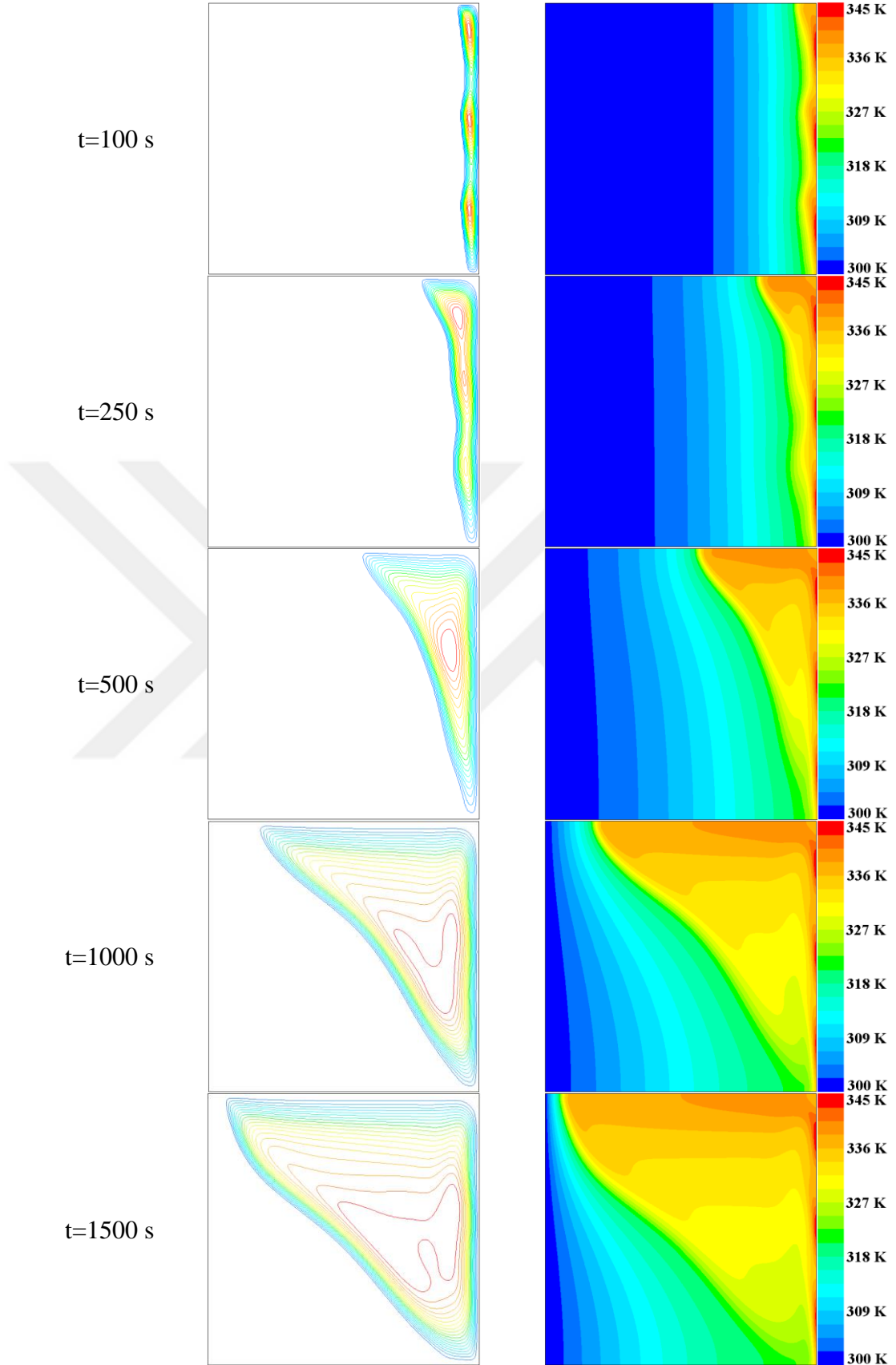
4.2. İkinci Çalışma

4.2.1. İkinci çalışmanın sayısal sonuçları

İzotermal olmayan sınır koşullarına sahip bir kare kavite içerisindeki parafin mumunun erimesi süreci farklı ısıtma yönleri (yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma) ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları ($\phi=0$, $\phi=1$ ve $\phi=3$) dikkate alarak sayısal olarak incelendi. Elde edilen sonuçlar aşağıda sunuldu.

Yan duvardan ısıtılan saf faz değiştiren malzemenin (parafin mumu) çeşitli zamanlardaki akım çizgilerinin ve sıcaklık konturlarının gelişimi Şekil 4.9'da gösterildi. Şekilde görüldüğü gibi ($t=100$ s), erimiş parafin mumu sıcak duvar boyunca yukarı doğru hareket etmektedir ve ardından erimiş parafin mumu sıvı-katı arayüzü (mushy zone) boyunca aşağı doğru akmaktadır. Bu süreçte erimiş bölgede (sıvı parafin mumu), içerisinde üç tane ikincil hücre bulunan birincil sirkülasyon hücresi görülmektedir. Bu sirkülasyon bölgesi, ilk çalışmadan farklı olarak uygulanan dalgalı sınır koşulu sebebiyle oluşmaktadır. Ayrıca, kaldırma kuvvetinin viskoz kuvvetlerin üstesinden geldiği ve konveksiyon hareketlerinin şiddetlenmeye başladığı görülmektedir. Bu durumu, sabit sıcaklık eğrilerindeki bükülmelerden de anlaşılabilir. Zaman ilerledikçe ($t=250$ s), ikincil hücreler birleşerek tek bir sirkülasyon hücresi meydana getirmektedir. Erime sürecinin ilerleyen evrelerinde ($t=500$ s), bu dalgalı sıvı-katı ara yüzü kaybolmakta ve saat yönüne ters yönde dönen tek hücreli bir akış meydana gelmektedir. Bu çalışma, ilk çalışmadan farklı bir sınır koşuluna sahip olmasına rağmen zaman ilerledikçe konveksiyon hareketlerinin etkisi ile benzer üçgen şeklinde bir döngü oluşmaktadır. Faz değiştiren malzemenin erimesi, kare kavitenin üst kısmındaki katı parafin mumu boyunca devam etmekte iken kavitenin alt kısmında neredeyse durağandır. Zaman ilerledikçe şiddetlenen konveksiyon akımlarının etkisi ile birlikte parafin mumunun erimesi, kavitenin üst kısmına doğru ilerlemektedir ve ardından sürecin sonuna doğru erime, kavitenin orta bölgesine doğru genişlemektedir.

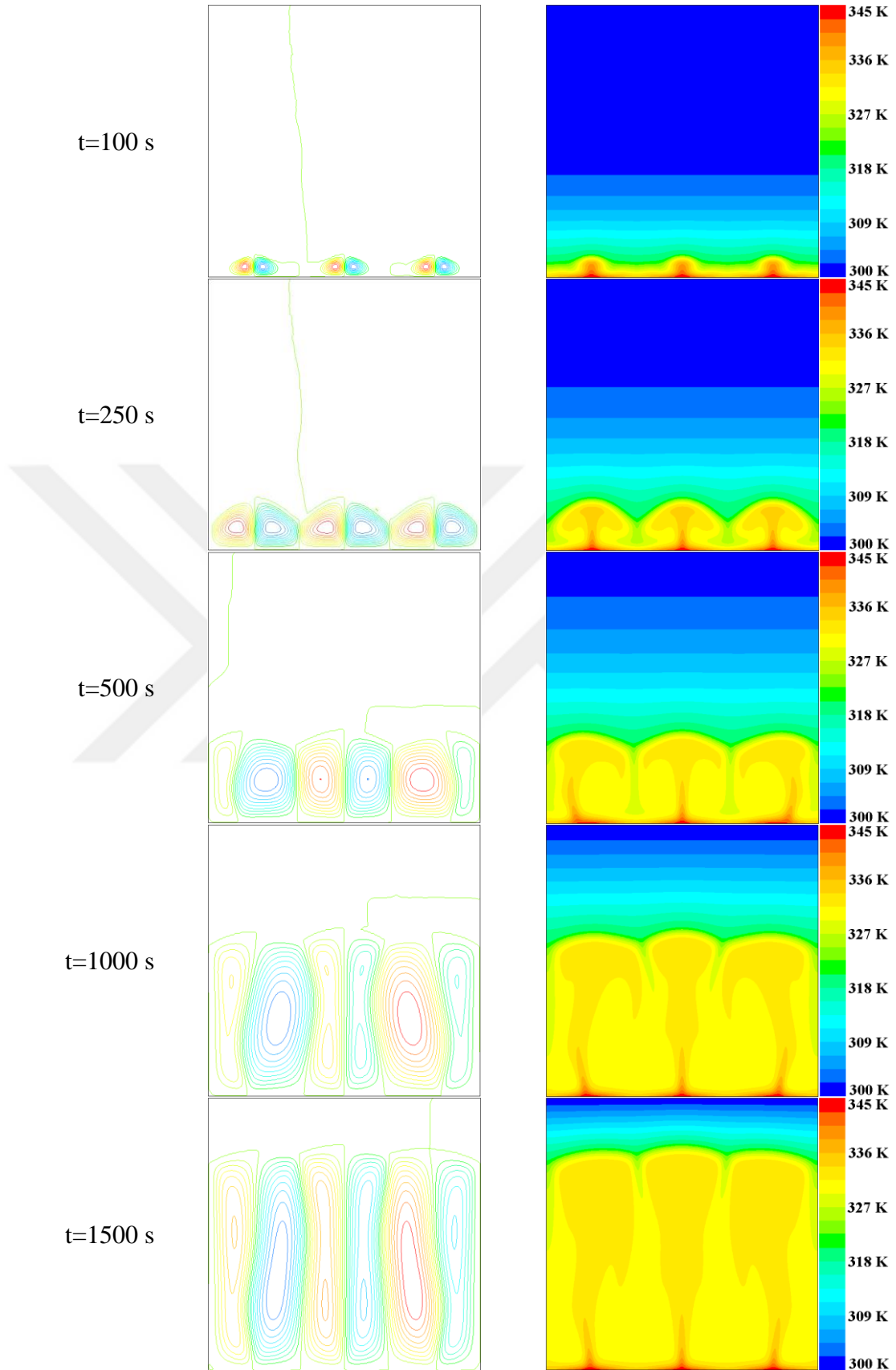
Altan ısıtma durumunda saf faz değiştiren malzemenin (parafin mumu) çeşitli zamanlardaki akım çizgileri ve sıcaklık konturları Şekil 4.10'da gösterildi. Şekilde görüldüğü gibi ($t=100$ s), dalgalı sıcaklık profiline bağlı olarak erimiş parafin mumunun bulunduğu bölgede altı hücreli sirkülasyon bölgeleri oluşmaktadır. Erimiş



Şekil 4.9. Yan duvardan ısıtılan saf faz değıştiren malzemenin farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

parafin mumu, dikey olarak yukarıdaki katı parafin mumuna yani soğuk yüzeye doğru yükselmektedir ve sonra soğuk yüzeyde soğuyarak konveksiyon hücrelerini oluşturan bir alçalma gerçekleşmektedir. Erime sürecinin başlangıcından sonuna kadar hücre sayısının aynı kaldığı görülmektedir. Fakat erimiş bölgede şiddetlenmiş olan konveksiyon hareketleri nedeniyle hücrelerin yüksekliği artmaktadır. Yakından incelendiğinde sinüzoidal olarak değişen sıcaklık profilinin her dalgalanması, hücre şekillerini çarpıklaştırmasına rağmen zıt yönde dönen bu hücrelerin birleşmesini önlediği ve ikili hücreler halinde tuttuğunu ortaya koymaktadır. Birinci ve ikinci çalışmanın ilk evrelerinde aynı sayıda Rayleigh-Bénard konveksiyon hücreleri oluşmaktadır. Fakat birinci çalışmada zamanın ilerlemesi ile birlikte bu hücreler konveksiyon hareketlerinin etkisi ile birleşerek birbirine zıt yönde dönen büyük bir hücre çifti oluşurken, ikinci çalışmada bu hücreler yukarıda bahsedildiği gibi sıcaklık profili (sınır koşulu) sebebiyle birleşmemektedir. Zaman ilerledikçe, şiddetlenen konveksiyon hareketlerinin etkisiyle bu hücreler giderek büyümekte ve tüm kavitedeki faz değiştiren malzemeyi bir bütün halinde aşağıdan yukarıya doğru erimekte olduğu görülmektedir.

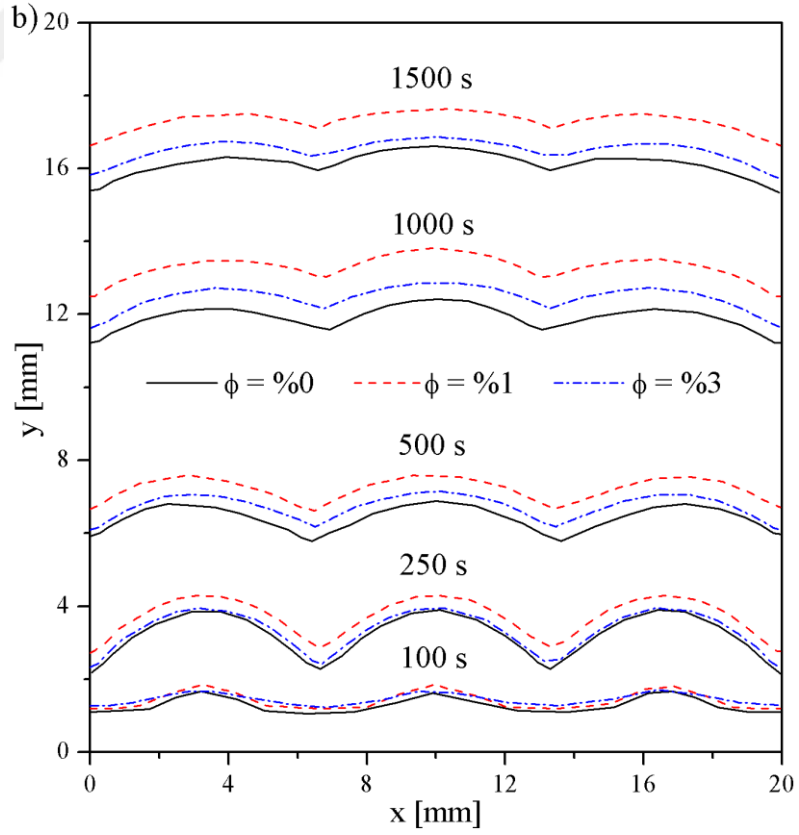
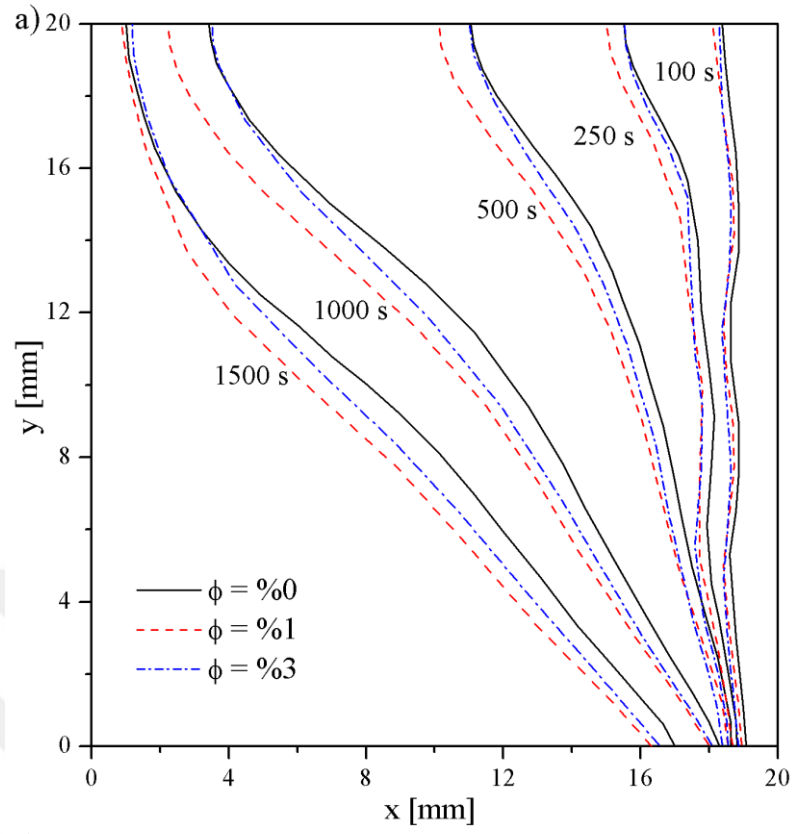
Isıtma durumunun her iki yönü için faz değiştiren malzemeye katılan farklı hacim oranlardaki nanopartiküllerin erime hatları Şekil 4.11'de gösterildi. Yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları için farklı zamanlarda gösterilen çeşitli çizgiler erime hattını yani sıvı-katı arayüzünü ifade etmektedir. Yan duvardan ısıtma durumundaki erime hatlarının sağ tarafında kalan kısım erimiş faz değiştiren malzemeyi, sol tarafında kalan kısım ise katı faz değiştiren malzemeyi ifade etmektedir. Alttan ısıtma durumunda ise erime hatlarının alt tarafındaki kısım erimiş faz değiştiren malzemeyi ifade ederken, çizgilerin üst kısmı katı faz değiştiren malzemeyi ifade etmektedir. Nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin erime hatları, saf faz değiştiren malzemenin erime hattına hemen hemen paraleldir ancak daha ilerde olduğu görülmektedir. Sıvı alt bölge ile katı üst bölge arasında kısa bir mesafe oluşturan çok hücreli akış nedeniyle yan duvardan ısıtmaya kıyasla alttan ısıtma durumunda daha iyi bir erime performansı elde edilmektedir. Zaman ilerledikçe, saf faz değiştiren malzemenin erime hattı ile nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin erime hatları arasındaki fark daha belirgin hale gelmektedir. Bununla birlikte, nanopartikülün hacimsel oranının $\phi=1\%$ 'den $\phi=3\%$ 'e artmasının bir



Şekil 4.10. Alttan ısıtılan saf faz değıştiren malzemenin farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

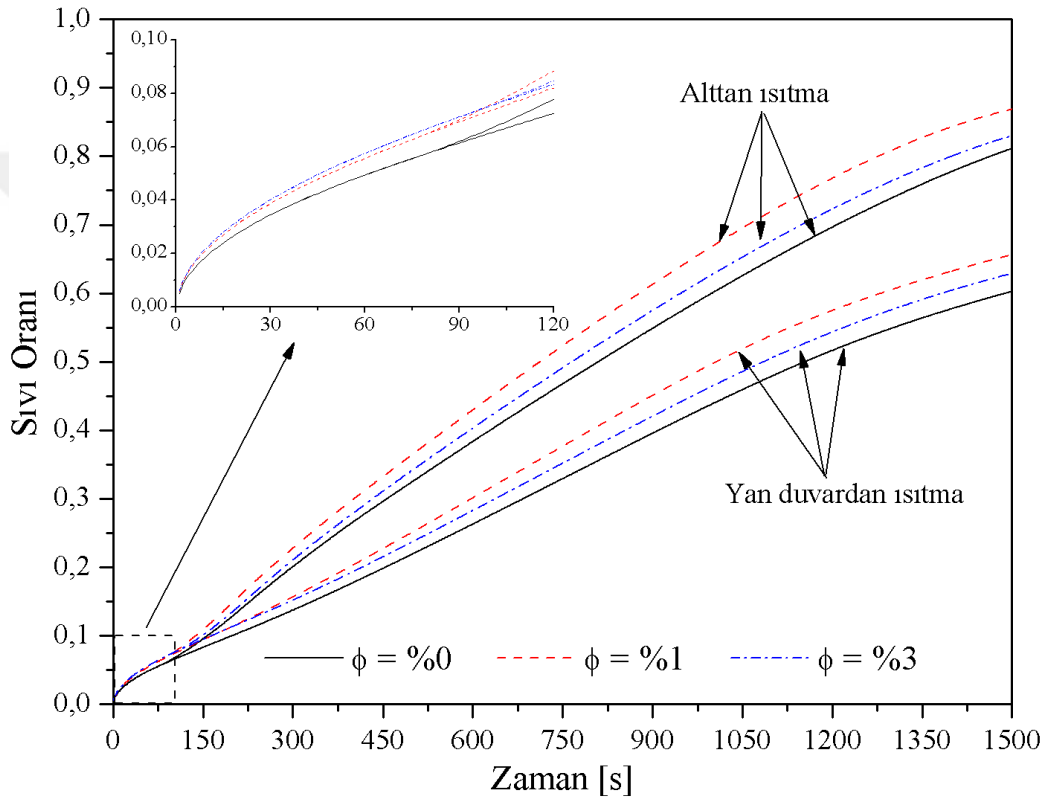
sonucu olarak $\phi=3\%$ nanopartikül katılan faz değiştiren malzemede meydana gelen viskozitedeki göreceli artış iletkenlikteki artışa göre çok daha büyüktür. Faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=1\%$ oranında nanopartikül katıldığı duruma nazaran taşınımınla ısı transferini düşürdüğünden dolayı erimenin saf faz değiştiren malzemeye kıyasla iyileşmesinde bir azalmaya neden olmaktadır.

Saf ve nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin zamana bağlı olan sıvı oranı, ısıtma durumunun her iki yönü için Şekil 4.12’de gösterildi. Erime işleminin erken safhalarında ($t \leq 80$ s) sıvı oranı, nanopartikülün hacimsel oranının artışı ile birlikte artmaktadır. Erimenin bu evrelerinde baskın olan ısı transfer mekanizması iletim ile olduğu için ısıtılan duvarın yönünün erime hızına herhangi bir etkisinin olmadığı gözlemlenmektedir. Fakat zaman ilerledikçe konveksiyon hareketlerinin başlamasına bağlı olarak ısıtma yönünün erime üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır ve sıvı oranı eğrilerinin farklılık göstermeye başladığı görülmektedir. Bu süreçte sıvı oranı için yan duvardan ısıtma ile alttan ısıtma durumları karşılaştırıldığında alttan ısıtma durumunda sıvı oranının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. $t=1500$. saniyede saf faz değiştiren malzeme için sıvı oranı, yan duvardan ısıtma için yaklaşık 0,60 iken alttan ısıtma için 0,81’e kadar ulaşmaktadır. Böylelikle sadece ısıtma yönünü değiştirerek %35,0’lik bir artış elde edilmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye katılan yüksek iletkenliğe sahip CuO nanopartikül ile erime sürecinin başından sonuna kadar sıvı oranında bir artış gözlemlenmektedir. Isı iletim katsayısı (k) ile ısıl kapasitenin (ρc_p) oranı olan ve bir malzemede sıcaklığın ne kadar hızlı yayıldığını gösteren parametre ısıl yayılma (ısıl difüzyon) özelliğidir. Nanopartikül konsantrasyonunun artması ile gizli ısı depolama kapasitesi azalmaktadır. Sonuç olarak ısıl difüzyon artmaktadır. Dolayısıyla sıvı oranının, hacimsel olarak $\phi=3\%$ oranında CuO katılan faz değiştiren malzemede daha yüksek olması beklenmektedir. Bu durum erime sürecinin erken safhalarında gerçekleşmektedir. Fakat konveksiyon hareketlerinin başlangıcı ile birlikte sıvı oranının, hacimsel olarak $\phi=1\%$ oranında CuO nanopartikül katılan faz değiştiren malzemeye nazaran $\phi=3\%$ oranında CuO nanopartikül katılan faz değiştiren malzemede daha az olduğu görülmektedir. Çünkü nanopartikül konsantrasyonunun hacimsel olarak artışı ile viskozite de artmakta ve bu artış akış hızını yavaşlatmaktadır. Bu yavaşlama taşınımınla ısı transferini azalmakta ve dolayısıyla erime hızında bir azalmaya meydana gelmektedir. Saf faz



Şekil 4.11. Farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin erime hatları a)Yan duvardan ısıtma b)Altan ısıtma

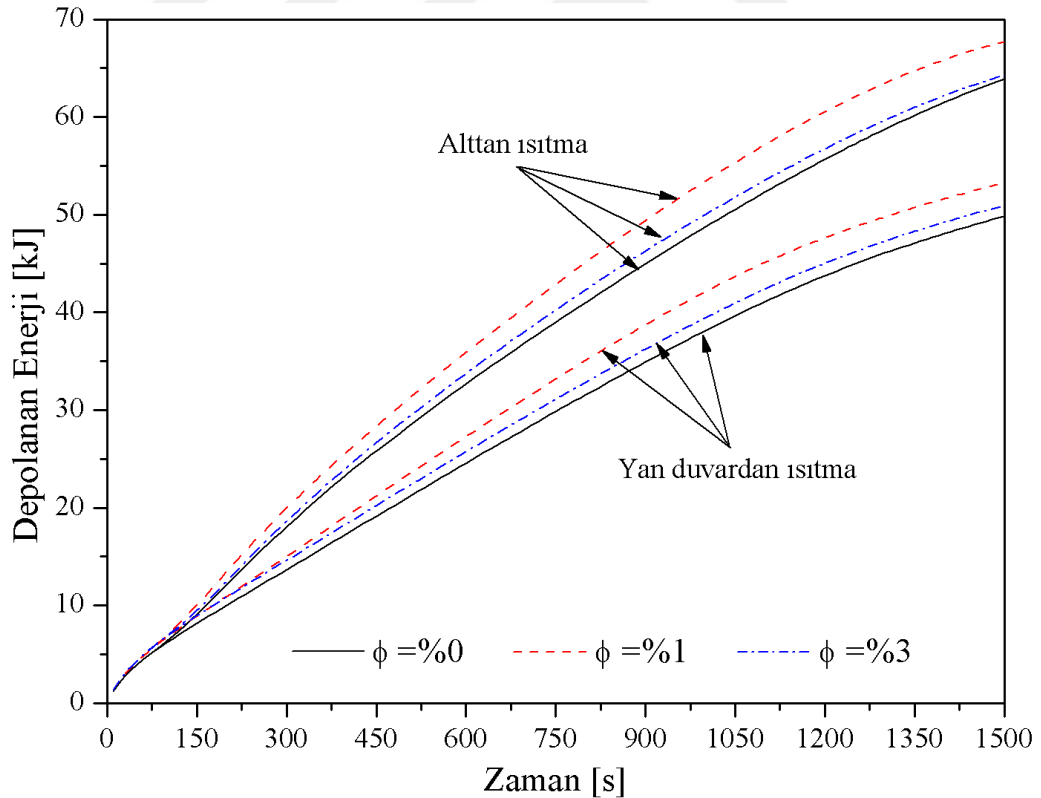
değiştiren malzemeye $\phi=0\%$ oranında CuO nanopartikülü eklenmesi ile erime sürecinin sonunda sıvı oranı, yan duvardan ısıtma durumunda 0,66 iken alttan ısıtma durumunda 0,88 değerine ulaşmaktadır. Nanopartikül eklenmesi ile saf faz değiştiren malzemeye göre sağlanan sıvı oranındaki artış, yan duvardan ısıtma için %8,9 iken alttan ısıtma için %7,1'dir. Aynı durum, saf faz değiştiren malzemeye $\phi=3\%$ oranında CuO nanopartikülü eklenmesi ile kıyaslandığında sıvı oranı, yan duvardan ısıtma durumunda 0,63 iken, alttan ısıtma durumunda 0,83'tür.



Şekil 4.12. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin sıvı oranları

Farklı nanopartikül konsantrasyonlarında hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumu için erime süresince depolanan enerji Şekil 4.13'de gösterildi. Zaman ilerledikçe, konveksiyon hareketlerinin başlaması ile birlikte ısıtma duvar yönünün ve nanopartikül konsantrasyonunun depolanan enerji üzerindeki etkisi belirginleşmektedir. Yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarına nazaran alttan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarının çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Erime sürecinin sonunda ($t=1500$ s), saf faz değiştiren malzeme için yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı 49,8 kJ iken

alttan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı 63,9 kJ'dür. Depolanan enerji miktarı, her iki konfigürasyon için faz değıştiren malzemeye CuO nanopartikül katılması ile saf faz değıştiren malzemeye nazaran önemli ölçüde artmaktadır. Fakat saf faz değıştiren malzemeye katılan nanopartikülün konsantrasyonu hacimsel olarak $\phi=0\%$ 'den $\phi=3\%$ 'e çıkması ile depolanan enerji miktarı azalmaktadır. Ayrıca, saf faz değıştiren malzemeye katılan nanopartikül konsantrasyonunun artması ile gizli ısı depolama kapasitesi azalmakta ve dolayısıyla depolanan enerji miktarı düşmektedir. Saf faz değıştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=1\%$ CuO oranında nanopartikül katılması ile depolanan enerji miktarı, yan duvardan ısıtma durumunda 49,8 kJ'den 53,3 kJ'e (yaklaşık %7,1 artma) ve alttan ısıtma durumunda 63,9 kJ'den 67,7 kJ'e (yaklaşık %6,0 artma) yükselmektedir. Saf faz değıştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=3\%$ CuO oranında nanopartikül katılması ile erime sürecinin sonunda yan duvardan ısıtma durumunda 50,9 kJ'le ve alttan ısıtma durumunda 64,3 kJ'le yükselmektedir.



Şekil 4.13. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değıştiren malzemelerde depolanan enerji miktarları

4.2.2. İkinci çalışmanın bulguları

Bu çalışmada, izotermal olmayan bir sınır koşuluna sahip kare bir kavite içerisinde farklı hacimsel oranlarda CuO nanopartikülü katılan parafin mumunun erime süreci incelendi. Farklı ısıtma yönünün (yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları) ve CuO nanopartikülün farklı hacim konsantrasyonları ($\phi=0\%$, $\phi=1\%$ ve $\phi=3\%$) göz önünde bulundurularak, sıvı oranı ve depolanan enerji üzerindeki etkisi incelendi. Bu çalışmadan elde edilen ana bulguları aşağıda verilmektedir:

- Erimenin ilk safhasında yan duvar ısıtma durumunda, içerisinde üç tane ikincil hücre bulunan birincil sirkülasyon bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Bu şekilde meydana gelen sirkülasyon bölgesi sinüzoidal olarak değişen sıcaklık profilinden dolayı oluşmaktadır. Fakat zaman ilerledikçe konveksiyon hareketlerinin şiddetlenmesiyle birlikte bu ikincil hücreler birleşerek kavitede saat yönüne ters yönde dönen üçgen şeklinde tek hücreli bir akış meydana gelmektedir. Alttan ısıtma durumunda ise erimenin başlangıcından sonuna kadar altı hücreli sirkülasyon bölgesi gözlemlenmektedir. Alttan ısıtma durumunda sinüzoidal olarak değişen sıcaklık profilinin her dalgalanması hücrelerin birleşmesini önleyen ikili hücreler meydana getirdiği görülmektedir ve parafin mumunun erimesi, aşağıdan yukarıya doğru bir bütün halinde gerçekleşmektedir.
- Alttan ısıtma durumundaki sıvı oranının, yan duvardan ısıtmaya nazaran önemli derecede yüksek olduğu görülmektedir. 25 dakikalık erime sürecinin sonunda faz değiştiren malzemenin ısıtma yönünü değiştirerek sıvı oranında en az %35'lik bir artış görülebilmektedir.
- Erime süresi boyunca nanopartikül katılan faz değiştiren malzemelerin sıvı oranının, saf faz değiştiren malzemeye kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Baskın olan ısı transfer mekanizmasının iletim olduğu erime sürecinin ilk safhasında, faz değiştiren malzemeye katılan CuO nanopartikül konsantrasyonu arttıkça sıvı oranı da artmaktadır. Fakat konveksiyon hareketlerinin başlangıcı ile birlikte saf faz değiştiren malzemeye katılan $\phi=1\%$ oranında CuO nanopartikülü ile sıvı oranında daha yüksek bir artış elde edilmektedir. Çünkü saf faz değiştiren malzemeye katılan $\phi=3\%$ oranında CuO nanopartikülü için viskozite daha çok artmaktadır ve bu artış akış hızını yavaşlatmaktadır. Bu yavaşlama aynı zamanda taşınım ile ısı transferini azaltmasından dolayı sıvı oranını düşürmektedir.

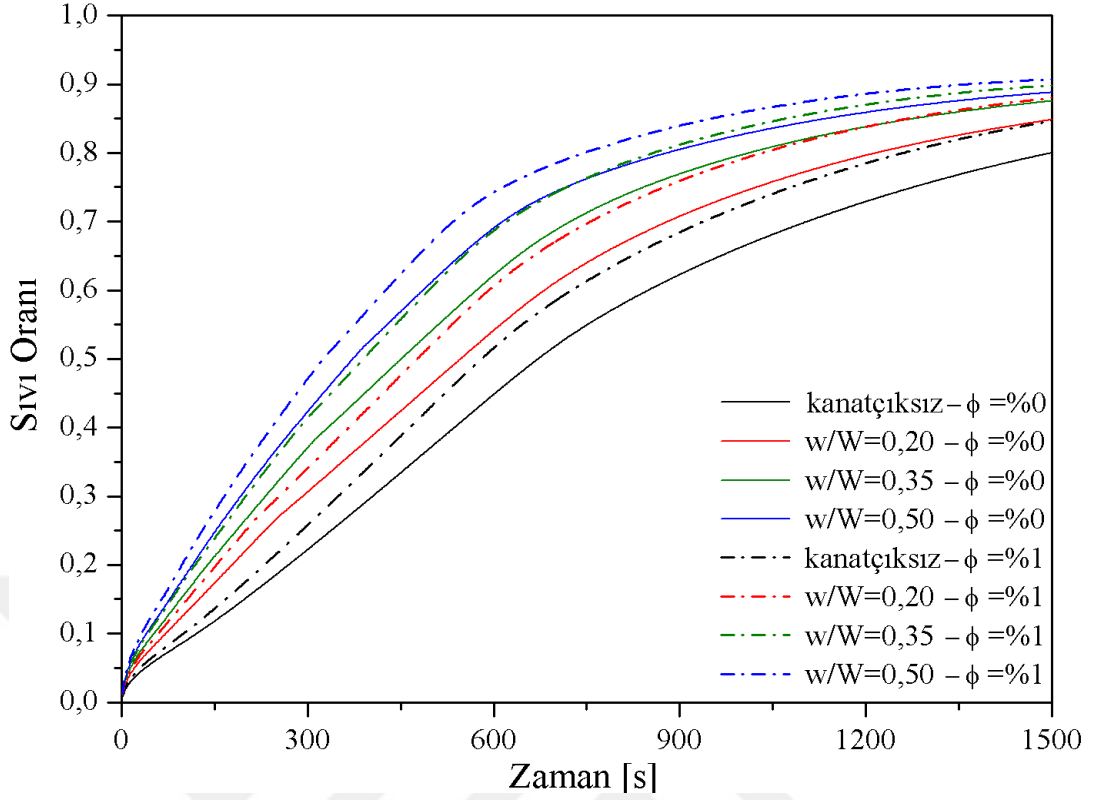
- Erime sürecinin sonunda saf az değiştiren malzemeye $\phi=1\%$ oranında CuO nanopartikülü katılması ile sıvı oranında en az %7'lik bir artış elde edilmektedir.
- Alttan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı, yan duvardan ısıtma ile karşılaştırıldığında en az %26 daha yüksek olduğu görülmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye CuO nanopartikülü katılması ile depolanan enerji miktarı belirgin bir şekilde artmaktadır. Faz değiştiren malzemeye $\phi=1\%$ oranında CuO nanopartikülü katılması ile kıyaslandığında $\phi=3\%$ oranında CuO nanopartikülü katılması ile depolanan enerji miktarında bir azalma meydana gelmektedir. Erime süresine bağlı olarak CuO nanopartikülü ile sağlanan bu iyileşme %11'e kadar çıkabilmektedir.

4.3. Üçüncü Çalışma

4.3.1. Üçüncü çalışmanın sayısal sonuçları

Kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime ve enerji depolama süreci, farklı yönlerden ısıtma (yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma), farklı kanatçık uzunlukları ($w/W=0,20$, $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$), farklı kanatçık pozisyonları ($v/W=0,20$, $v/W=0,50$ ve $v/W=0,75$) ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları ($\phi=0\%$, $\phi=1\%$) göz önünde bulundurularak sayısal olarak incelendi. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sunuldu.

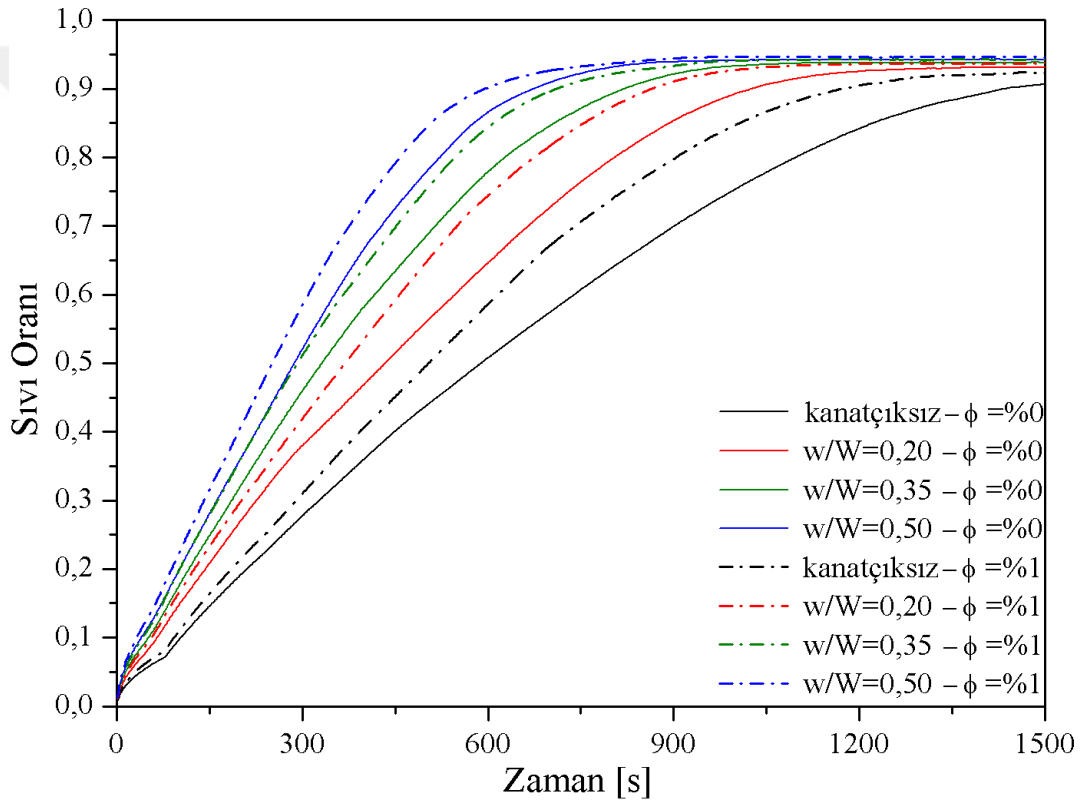
Yan duvardan ısıtılan ve kanatçığın $v/W=0,50$ pozisyonunda bulunduğu kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin sıvı oranı, farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim konsantrasyonları göz önünde bulundurularak Şekil 4.14'de gösterildi. Şekilde görüldüğü gibi, saf faz değiştiren malzeme ve hacimsel olarak $\phi=1\%$ oranında CuO nanopartikül katılan faz değiştiren malzeme için en yüksek sıvı oranı, ısı transfer alanı daha yüksek olduğundan dolayı $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edildi. Saf faz değiştiren malzemeye, yüksek iletkenliğe sahip hacimsel olarak $\phi=1\%$ CuO nanopartikülü katılması ile erime hızı artmaktadır. Örneğin, $t=800$. saniyede $w/W=0,20$ kanat uzunluğu için saf faz değiştiren malzemenin sıvı oranı 0,66 iken, hacimsel olarak $\phi=1\%$ CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemenin sıvı oranı 0,72'dir. Benzer bir durum $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için de görüldü.



Şekil 4.14. Yan duvardan ısıtma durumunda sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları için karşılaştırılması

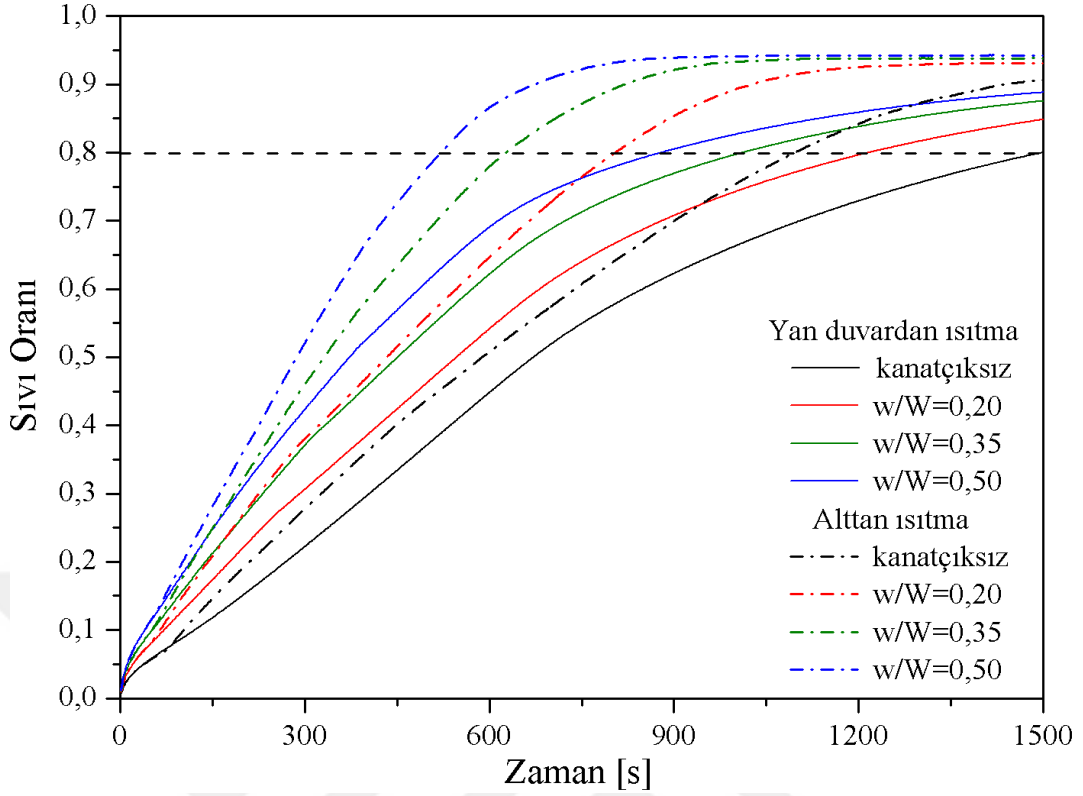
Farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim konsantrasyonları göz önünde bulundurularak alttan ısıtılan ve kanatçığın $w/W=0,50$ pozisyonunda bulunduğu kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime süreci boyunca zamana bağlı olan sıvı oranı Şekil 4.15'te gösterildi. Yan duvardan ısıtma durumunda olduğu gibi saf faz değiştiren malzeme ve hacimsel olarak %1 CuO oranında nanopartikül katılan faz değiştiren malzemede en yüksek sıvı oranı miktarı, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edildi. Aynı erime süresinde, saf faz değiştiren malzemeye nazaran faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi = \%1$ CuO nanopartikülü katılmasıyla daha yüksek miktarda sıvı oranı elde edildi. Örneğin, $w/W=0,35$ kanatçık uzunluğunda sıvı oranının $0,80$ 'e ulaşması için gerekli olan zaman saf faz değiştiren malzeme için 627 saniye iken hacimsel olarak $\phi = \%1$ CuO nanopartikül katılan faz değiştiren malzeme için 547 saniyedir (yaklaşık %13 azalma). Fakat zaman ilerledikçe, bazı durumlar için kanatçık uzunluğunun etkisini kaybettiği gibi saf faz değiştiren malzemeye katılan nanopartikülün etkisi de kaybolmaktadır.

Saf faz değiştiren malzemelerin erime süreci sırasındaki zamana bağlı olan sıvı oranı, $w/W=0,50$ kanatçık pozisyonun alttan ısıtma ve yan duvardan ısıtma durumları için Şekil 4.16'da gösterildi. Şekilde görüldüğü gibi erime hızı, yan duvardan ısıtma durumuna nazaran alttan ısıtma durumunda daha yüksektir. Örneğin, sıvı oranın 0,80'ne ulaşması için gereken süre, $w/W=0,50$ uzunluğundaki yatay kanatçık için 900 saniye iken aynı uzunluğundaki düşey kanatçık için 500 saniyedir. Aynı zamanda $t \geq 1200$. saniyeden sonra kanatçık uzunluğunun erime hızına ve sıvı oranına etkisi alttan ısıtma durumunda azalırken, yan duvardan ısıtma durumunda kanatçık uzunluğunun etkisinin erime sürecinin sonunda kadar devam ettiği görülmektedir.



Şekil 4.15. Alttan ısıtma durumunda sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları için karşılaştırılması

Saf faz değiştiren malzemeye katılan hacimsel olarak $\phi=1$ CuO nanopartikülü ile erime hızında az da olsa bir iyileşme elde edilmektedir. Nanopartikülün sağladığı az miktardaki iyileşmeden dolayı aşağıda paylaşılan sonuçlar, saf faz değiştiren malzeme ile ilgili sonuçlardır. Farklı yönlerden ısıtılan kare bir kavite içerisindeki saf faz değiştiren malzemenin erime süreci, farklı kanatçık uzunlukları ve pozisyonları göz önünde bulundurularak incelendi ve elde edilen sonuçlar aşağıda sunuldu.



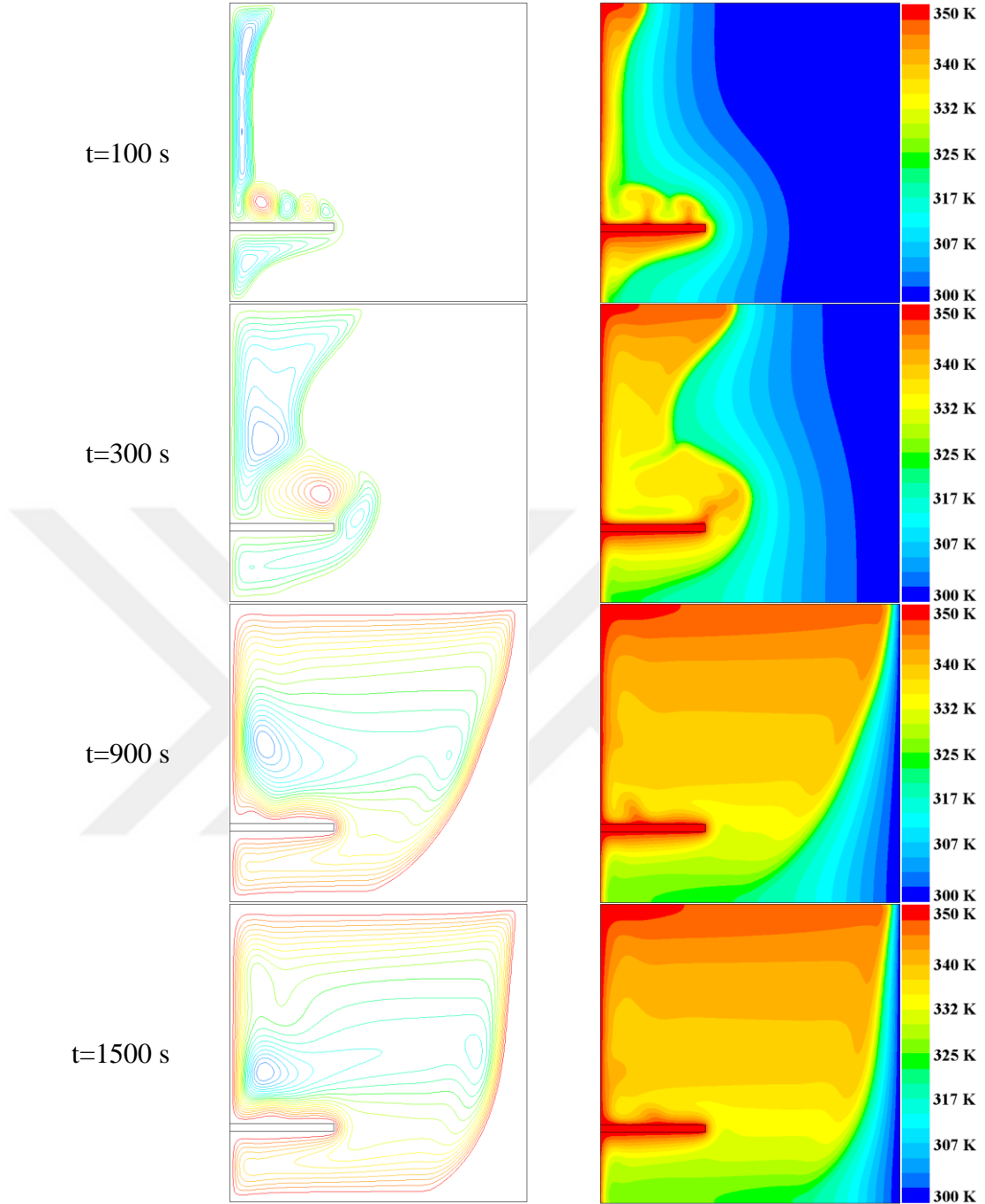
Şekil 4.16. Yan duvardan ve alttan ısıtma durumlarında sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları için karşılaştırılması

Yan duvardan ısıtılan saf faz değiştiren malzemenin $w/W=0,35$ kanatçık uzunluğu ve $w/W=0,25$ kanatçık pozisyonu için akım çizgilerinin ve sıcaklık konturlarının farklı zamanlardaki gelişimi Şekil 4.17'de gösterildi. $t=100$. saniyede kanatçığın üst ve alt yüzeylerinde birbirinden bağımsız iki eriyik bölgenin mevcut olduğu görülmektedir. Ayrıca, erimiş faz değiştiren malzeme (parafin mumu) sıcak duvar boyunca yukarı doğru hareket etmektedir. Erimiş parafin mumu üst duvara ulaştıktan sonra katı parafin mumuna teması ile soğuyarak sıvı-katı arayüzü (mushy zone) boyunca aşağı doğru akmaktadır ve burada saat yönünde dönen tek hücreli dikey bir sirkülasyon bölgesi oluşmaktadır. Ayrıca, kanatçığın üst yüzeyinde Rayleigh-Bénard hücreleri oluşurken kanatçığın alt yüzeyinde ise tek bir hücreli bir akış oluşmaktadır. Zaman ilerledikçe ($t=300$. s), sıcak duvar boyunca yükselen erimiş parafin mumunun oluşturduğu tek hücreli sirkülasyon bölgesinin giderek genişlediği ve üst duvar boyunca sola doğru ilerlediği görülmektedir. Bu süreçte, konveksiyon hareketlerinin etkisi ile kanatçığın üst yüzeyindeki Rayleigh-Bénard hücreleri birleşmekte ve kanatçığın alt yüzeyindeki tek hücreli akış ile temas etmektedir. $t=900$. saniyede bu

hücrelerin tamamı birleşerek saat yönünde dönen tek hücreli bir akış oluşturmaktadır. Parafin mumunun erimesi, soğuk olan sol duvara doğru ilerlemektedir. Erime sürecinin sonunda, soğuk duvarın alt kısmında parafin mumunun katı halde kalmaktadır.

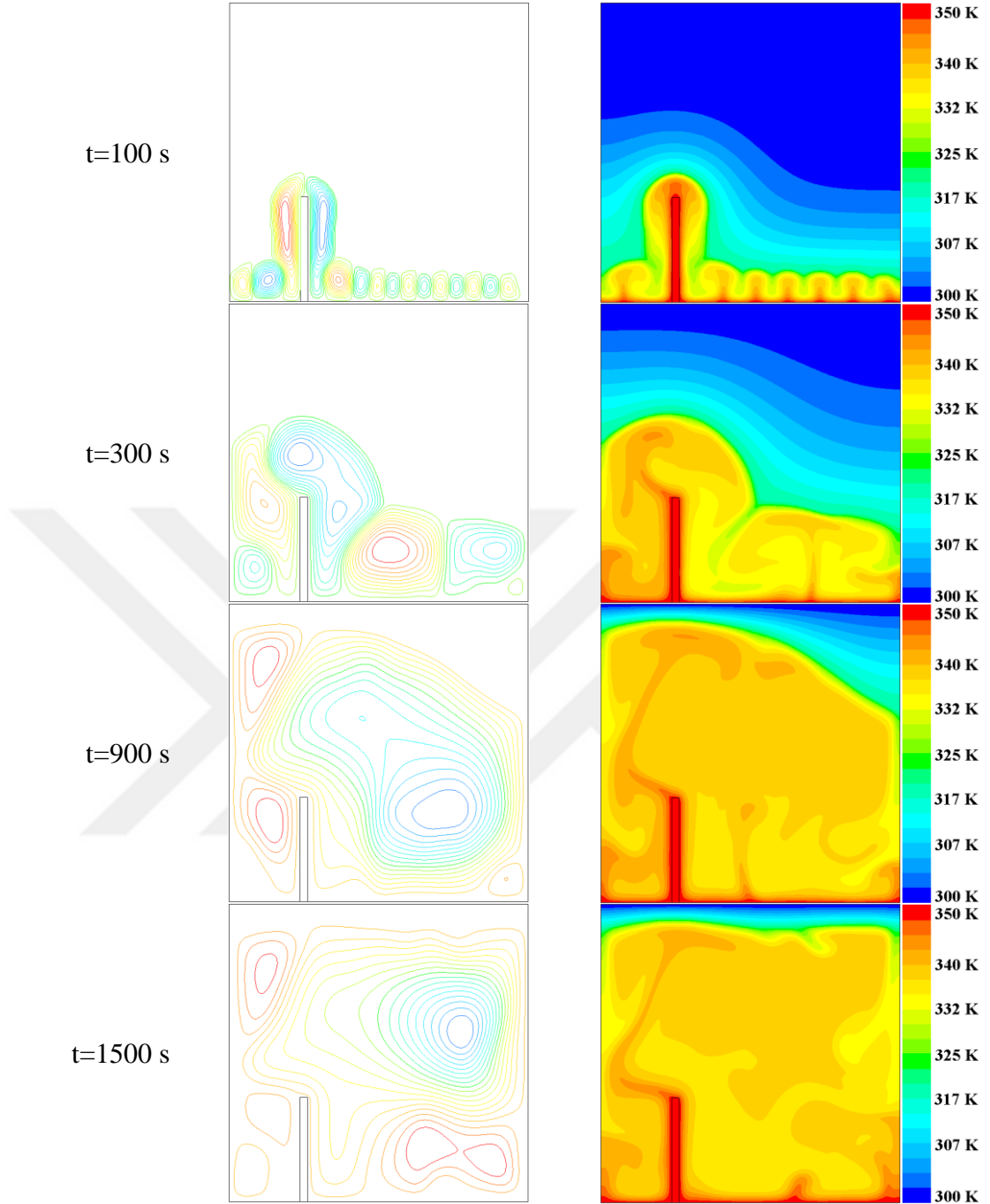
Alttan ısıtılan saf faz değiştiren malzemenin (parafin mumu) $w/W=0,35$ kanatçık uzunluğu ve $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonu için çeşitli zamanlardaki akım çizgileri ve sıcaklık konturları Şekil 4.18'de gösterildi. Şekilde görüldüğü gibi, kavitenin ısıtılan alt kısmında Rayleigh-Bénard hücreleri oluşmaktadır. Sıcak alt kısımdaki yoğunluğu azalan erimiş parafin mumu, üstteki katı parafin mumuna doğru yükseldiği görülmektedir. Yükselen erimiş parafin mumunun sıcaklığı, katı parafin mumuna teması ile soğuyarak sıvı-katı arayüzeyi boyunca (mushy zone) aşağı doğru akmaktadır. Bundan dolayı erimiş parafin mumu bölgesinde çok hücreli bir sirkülasyon bölgesi meydana gelmektedir. Ayrıca, ısıtılan kanatçığın yüzeyi boyunca erimiş parafin mumu yükselmektedir ve kanatçığın iyi yan yüzeyinde dikey uzun hücreler oluşmaktadır. Zaman ilerledikçe, erimiş bölgedeki konveksiyon hareketlerinin şiddetlenmesiyle hücreler birleşmekte ve genişlemekte olduğu görülmektedir. Kanatçığın sağ ve sol tarafındaki hücrelerin kanatçık sebebiyle birleşmemektedir.

Çeşitli zamanlardaki saf faz değiştiren malzemenin erime hatları, $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için Şekil 4.19'da gösterildi. Yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma durumları için farklı zamanlarda gösterilen çeşitli çizgiler erime hattını yani sıvı-katı arayüzünü ifade etmektedir. Yan duvardan ısıtma durumundaki erime hatlarının sol tarafında kalan kısım erimiş parafin mumunu, sağ tarafında kalan kısım ise katı parafin mumunu ifade etmektedir. Alttan ısıtma durumunda erime hatlarının alt tarafındaki kısım erimiş parafin mumunu ifade ederken, çizgilerin üst kısmı katı parafin mumunu ifade etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kanat uzunluğunun, hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için erime süresine önemli bir etkisi olmaktadır. Kanatçık uzunluğunun artmasıyla daha yüksek miktarda sıvı oranı elde edilmektedir. Şekil 4.19a'da $t=900$. saniyede $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğundaki erime hattı, $t=1500$. saniyedeki $w/W=0,20$ kanatçık uzunluğundaki erime hattı ile çakışmaktadır. Hatta daha fazla sıvı oranı elde edilmektedir. Zaman ilerledikçe kanatçık uzunluğunun erime sürecine etkisi azalmaktadır.



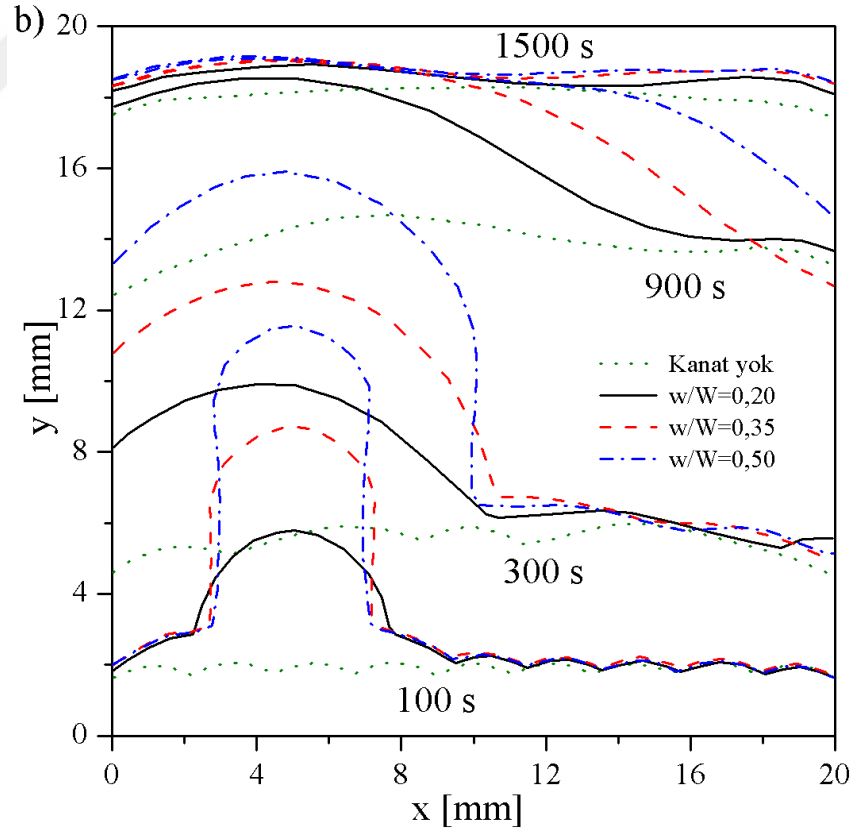
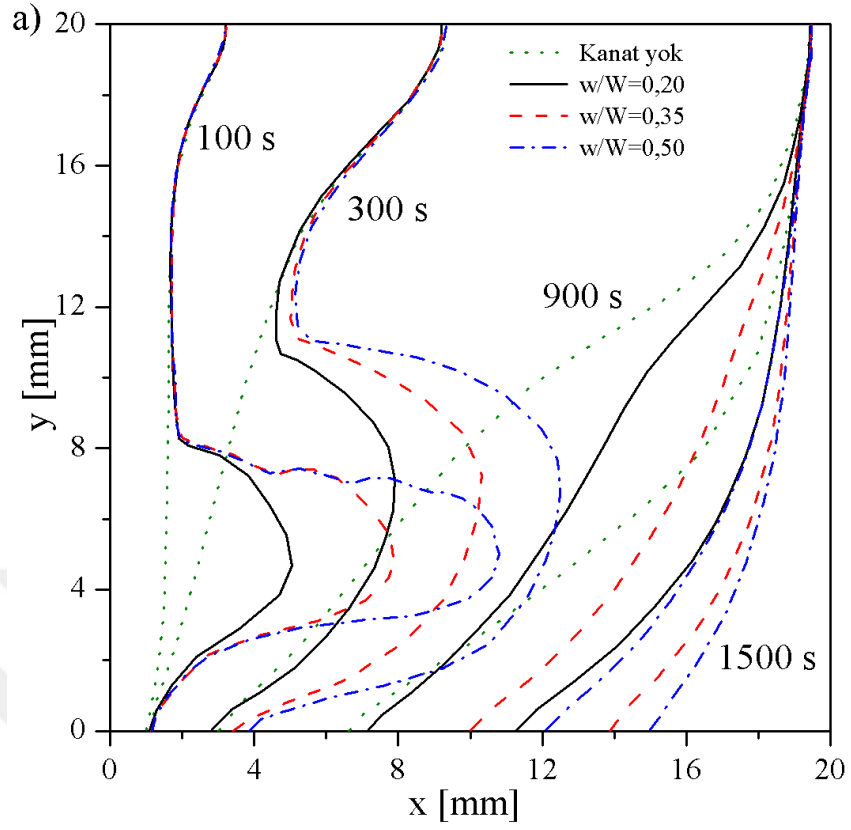
Şekil 4.17. Yan duvardan ısıtılan saf faz değıştiren malzemenin $w/W=0,35$ kanatçık uzunluğu ve $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonu için farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

Yan duvardan ısıtma durumu için kanatçık uzunluğunun ve pozisyonunun sıvı oranına olan etkisinin incelendiği tüm durumlar Şekil 4.20'de gösterildi. Kanatçık uzunluğu arttıkça erime süresi daha da kısaltılmaktadır. Örneğin, $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda sıvı oranının 0,75 ulaşması için gerekli olan süre $w/W=0,20$, $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sırasıyla 921, 725, 614 saniyedir.



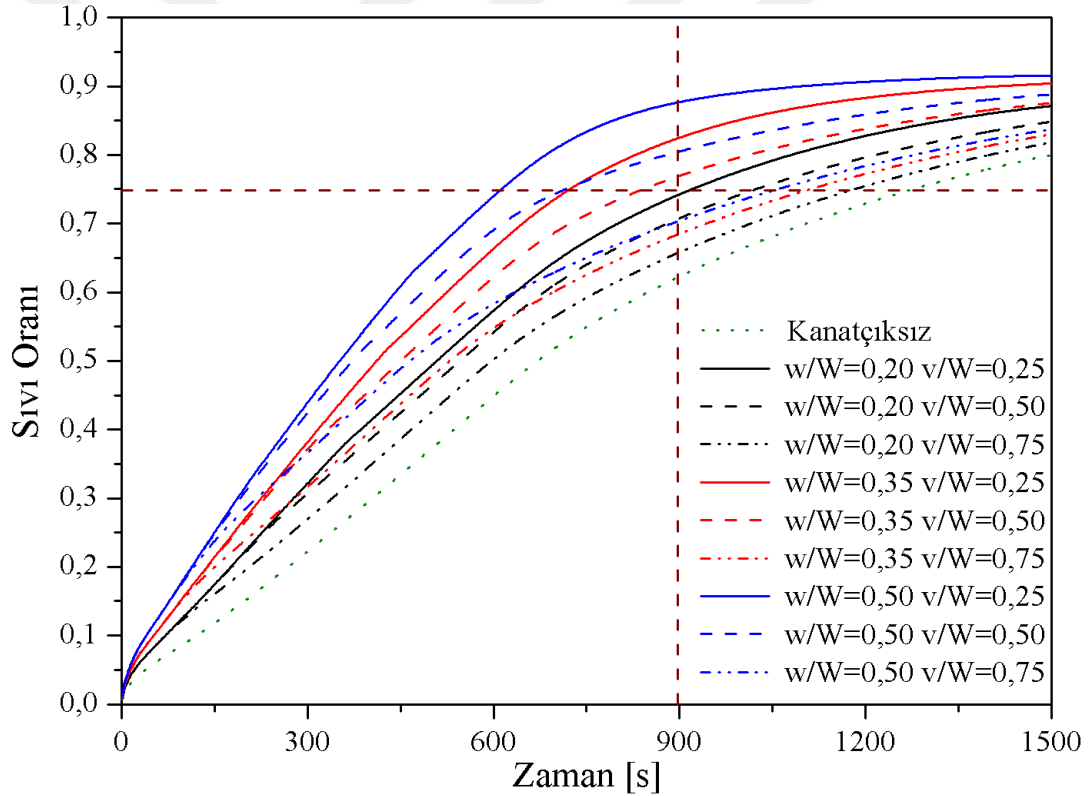
Şekil 4.18. Alttan ısıtılan saf faz değıştiren malzemenin $w/W=0,35$ kanatçık uzunluğu ve $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonu için farklı zamanlardaki akım çizgileri (solda) ve sıcaklık konturları (sağda)

Erime süresinin kısalmasıyla $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunluklarında sağlanan iyileşme oranı, $w/W=0,20$ kanatçık uzunluğuna göre kıyaslandığında sırasıyla %21 ve %34'tür. Bu durum, kanatçiksız durum (sıvı oranı 0,75'e ulaşması için 1277 saniye gerekmektedir) ile kıyaslandığında $w/W=0,20$, $w/W=0,35$ $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sürenin kısalmasıyla sağlanan iyileşme sırasıyla



Şekil 4.19. Saf faz değiştiren malzemenin $w/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda çeşitli kanatçık uzunlukları için erime hatları
a)Yan duvardan ısıtma b)Altan ısıtma

%28, %43 ve %53'tür. Görüldüğü gibi en iyi sonuç, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edilmektedir. Aynı kanatçık uzunlukları için $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonundaki sıvı oranının, $v/W=0,50$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonlarına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin, 900. saniyede ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda, $v/W=0,25$, $v/W=0,50$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları için sıvı oranı sırasıyla 0,87, 0,80 ve 0,70'dir. Bu durum, kanatçiksiz durum (900. saniyede sıvı oranı 0,62'dir.) ile kıyaslandığında sıvı oranında sağlanan artış sırasıyla %29, %23 ve %11'dir. Buradan anlaşıldığı üzere en iyi sonuç, $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda elde edilmektedir. Yan duvardan ısıtma durumunda en iyi performans, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda ve $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda elde edilmektedir.

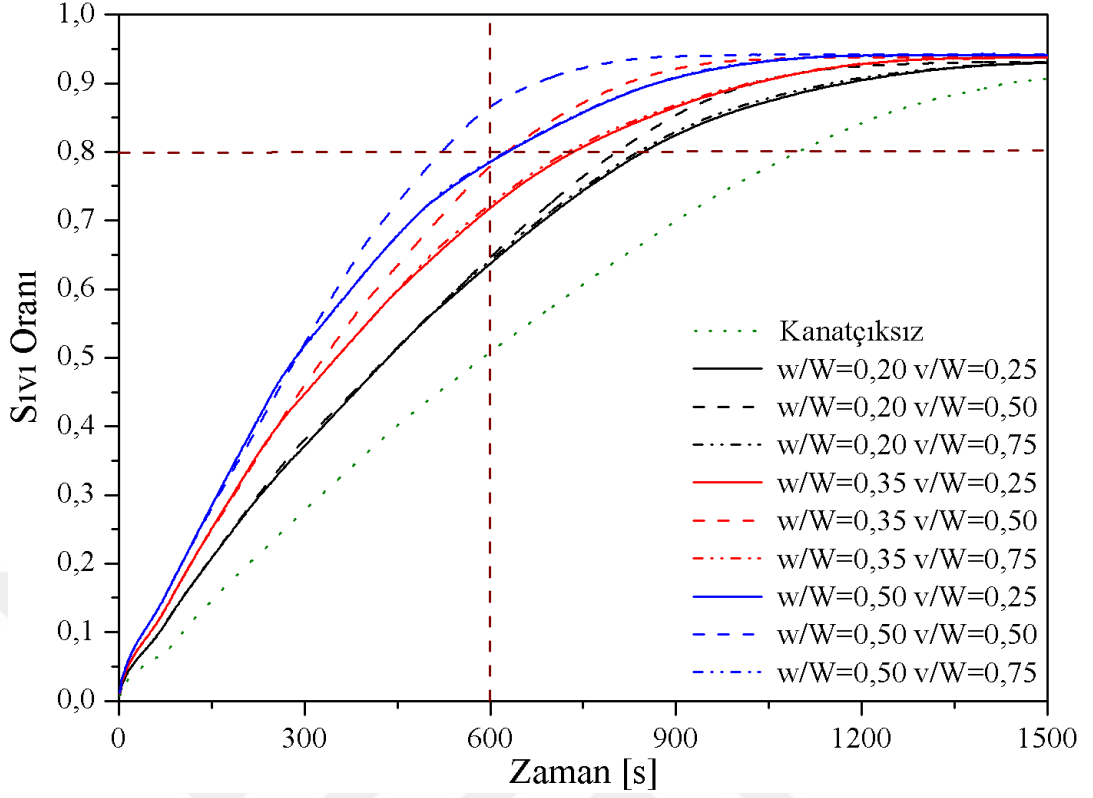


Şekil 4.20. Yan duvardan ısıtma durumunda sıvı oranlarının, farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması

Alttan ısıtma durumunda kanatçık uzunluğunun ve kanatçık pozisyonunun erime süreci boyunca sıvı oranına olan etkisinin incelendiği tüm durumlar Şekil 4.21'de gösterildi. Yan duvardan ısıtma durumunda olduğu gibi, alttan ısıtma durumu için de en iyi erime hızı $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edilmektedir. Kanatçık uzunluğunun artmasıyla erime süresinin kısaldığı görülmektedir. Örneğin, $v/W=0,50$

kanatçık pozisyonunda sıvı oranının 0,80 ulaşması için gerekli olan süre $w/W=0,20$, $w/W=0,35$, $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sırasıyla 805, 627, 522 saniyedir. Erime süresindeki kısalmasıyla $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunluklarında sağlanan iyileşme, $w/W=0,20$ kanatçık uzunluğuna ile kıyaslandığında sırasıyla %28 ve %35'tir. Bu durum, kanatçiksız durum (sıvı oranı 0,80'ne ulaşması için 1098 saniye gerekmektedir) ile kıyaslandığında $w/W=0,20$, $w/W=0,35$, $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sürenin kısalmasıyla sağlanan iyileşme sırasıyla %27, %43 ve %52'dir. Görüldüğü gibi en iyi sonuç, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edilmektedir. Alttan ısıtma durumunda $v/W=0,25$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları kavitenin orta düşey eksenine göre simetrik ve bu sebepten dolayı sıvı oranı eğrileri şekilde görüldüğü gibi çakışmaktadır. Aynı kanatçık uzunlukları için $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda elde edilen sıvı oranı, $v/W=0,25$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonlarına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin, 600. saniyede ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda, $v/W=0,25$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları için sıvı oranı değeri 0,78 iken, $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonu için sıvı oranı değeri 0,86'dir. Bu durum, kanatçiksız durum (600. saniyede sıvı oranı 0,51'dir.) ile kıyaslandığında $v/W=0,25$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları için sıvı oranında sağlanan artış %52 iken $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda ise %68'dir. Aynı kanat uzunluğunda en iyi sonuç $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonu için elde edilmektedir. Sonuç olarak alttan ısıtma durumunda en iyi performans, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda ve $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda elde edilmektedir.

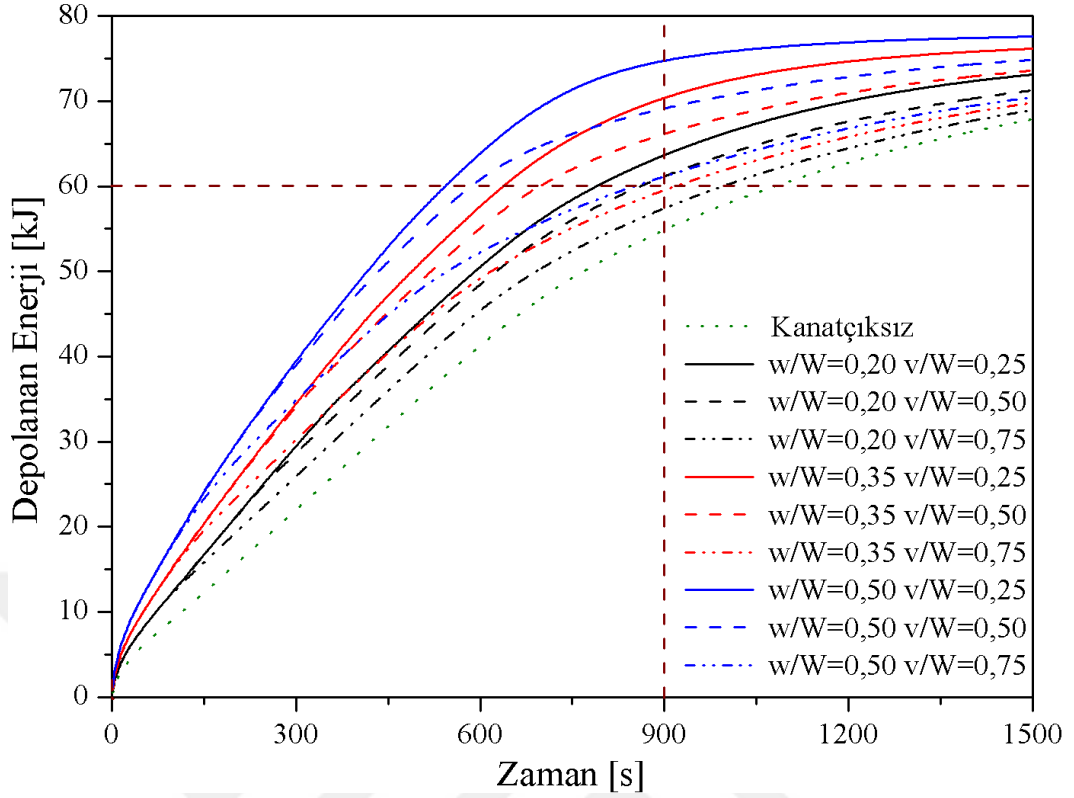
Yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı, farklı kanatçık uzunluklarını ve pozisyonlarını göz önünde bulundurarak Şekil 4.22'de gösterildi. Yandan ısıtma durumunda en hızlı enerji depolama $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edilmektedir. Kanatçık uzunluğunun artması ile aynı miktarda depolanan enerji için gerekli olan süre kısalmaktadır. Örneğin, $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda depolanan enerji miktarının 60 kJ'le ulaşması için gerekli olan süre $w/W=0,20$, $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sırasıyla 790, 639 ve 544 saniyedir. Aynı miktarda depolanan enerjinin daha kısa sürede elde edilmesi ile $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları ile sağlanan iyileşme oranı, $w/W=0,20$ kanatçık uzunluğu ile kıyaslandığında sırasıyla %19 ve %31'dir. Bu durum ile kanatçiksız durum (depolanan enerji miktarının 60 kJ'le ulaşması için 1080 saniye



Şekil 4.21. Alttan ısıtma durumunda sıvı oranlarının farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması

gerekmektedir) kıyaslandığında ise $w/W=0,20$, $w/W=0,35$, $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sürenin kısalması ile sağlanan iyileşme sırasıyla %27, %41 ve %50'dir. Görüldüğü gibi en iyi sonuç, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edilmektedir. Aynı kanatçık uzunlukları için $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda depolanan enerji miktarı, $v/W=0,50$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonlarına nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin, 900. saniyede ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda, $v/W=0,25$, $v/W=0,50$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları için depolanan enerji miktarı sırasıyla 74,5 kJ, 69,1 kJ ve 61,2 kJ'dür. Bu durum, kanatçiksız durum (900. saniyede depolanan enerji miktarı 54,8 kJ'dür.) ile kıyaslandığında $v/W=0,25$, $v/W=0,50$, $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları için depolanan enerji miktarında sağlanan artış sırasıyla %36, %26 ve %11'dir. Buradan anlaşıldığı üzere en iyi sonuç, $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda elde edilmektedir. Sonuç olarak yan duvardan ısıtma durumunda en iyi performans, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda ve $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonunda elde edilmektedir.

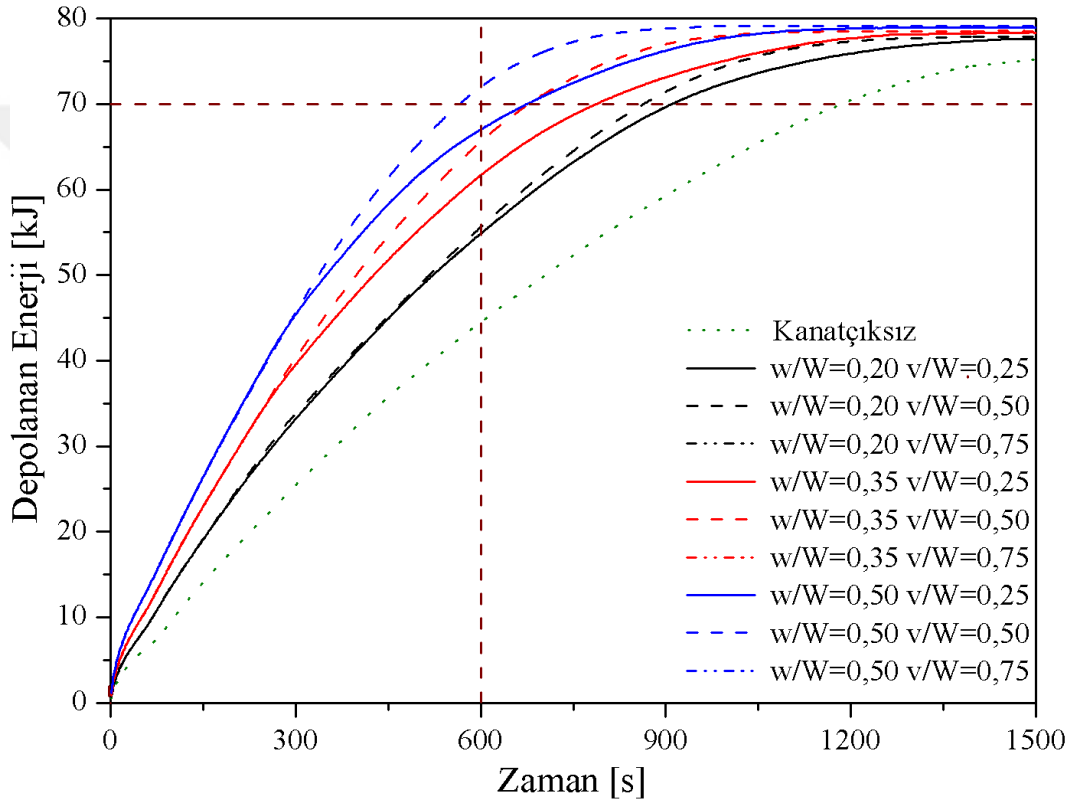
Altan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarı, farklı kanatçık uzunlukları ve pozisyonları göz önünde bulundurularak Şekil 4.23'de gösterildi. Altan ısıtma



Şekil 4.22. Yan duvardan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarlarının farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması

durumunda en hızlı enerji depolama $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edilmektedir. Örneğin, $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda depolanan enerji miktarının 70 kJ 'e ulaşması için gerekli olan süre $w/W=0,20$, $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sırasıyla 865 , 678 ve 566 saniyedir. Aynı miktarda depolanan enerjinin daha kısa sürede elde edilmesiyle $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları ile sağlanan iyileşme oranı, $w/W=0,20$ kanatçık uzunluğu ile kıyaslandığında sırasıyla $\%22$ ve $\%35$ 'dir. Bu durum, kanatçıksız durum (depolanan enerji miktarının 70 kJ 'e ulaşması için 1185 saniye gerekmektedir) ile kıyaslandığında $w/W=0,20$, $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$ kanatçık uzunlukları için sürenin kısılması ile sağlanan iyileşme sırasıyla $\%27$, $\%43$ ve $\%52$ 'dir. Görüldüğü gibi en iyi sonuç, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda elde edilmektedir. Alttan ısıtma durumunda $v/W=0,25$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları kavitenin orta düzey eksenine göre simetriktir ve bu sebepten dolayı depolanan enerji eğrileri şekilde görüldüğü gibi çakışmaktadır. Aynı kanatçık uzunlukları için $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda depolanan enerji miktarı, $v/W=0,25$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonlarına göre daha fazla olduğu görülmektedir. Örneğin, 600 . saniyede ve

$w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda, $v/W=0,25$ ve $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları için depolanan enerji miktarı 67,1 kJ iken $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonu için depolanan enerji miktarı 72,0 kJ'dür. Bu durum, kanatçiksız durum (600. saniyede depolanan enerji miktarı 44,5 kJ'dür.) ile kıyaslandığında $v/W=0,25$, $v/W=0,50$, $v/W=0,75$ kanatçık pozisyonları için depolanan enerji miktarında sağlanan artış sırasıyla %51, %62 ve %51'dir. En iyi sonuç $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda elde edilmektedir. En iyi enerji depolanma performansı, $w/W=0,50$ kanatçık uzunluğunda ve $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonunda elde edilmektedir.



Şekil 4.23. Alttan ısıtma durumunda depolanan enerji miktarlarının farklı kanatçık uzunlukları ve farklı kanatçık pozisyonları için karşılaştırılması

4.3.2. Üçüncü çalışmanın bulguları

Bu sayısal çalışmada, kare bir kavitenin sıcak kısmına yerleştirilen kanatçığın faz değiştiren malzemenin erime süresine olan etkisi farklı kanatçık uzunlukları ($w/W=0,20$, $w/W=0,35$ ve $w/W=0,50$), farklı kanatçık pozisyonları ($v/W=0,25$, $v/W=0,50$ ve $v/W=0,75$) ve kavitenin farklı ısıtma yönleri (yan duvardan ısıtma ve alttan ısıtma) dikkate alınarak incelendi. Ayrıca, sadece $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonu için hacimsel olarak $\phi=1\%$ CuO nanopartikül katılan faz değiştiren

malzemenin erime süreci boyunca sıvı oranı ve depolanan enerji miktarı üzerindeki etkisi de incelendi. Elde edilen bulgular aşağıda verilmektedir:

- Saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=1\%$ CuO nanopartikülü katılması ile sıvı oranı miktarında bir iyileşme elde edilmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye $\phi=1\%$ CuO nanopartikülü katılması ile sıvı oranı miktarında elde edilen iyileşme yan duvardan ısıtma durumunda zamana bağlı olarak %1 ile %9 arasında, alttan ısıtma durumunda ise %2 ile %10 arasında değişmektedir.
- Yan duvardan ısıtma durumunda kanatçığın üst yüzeyindeki Rayleigh-Bénard hücreleri ile diğer bölgelerdeki akış hücreleri zaman ilerledikçe birleşmekte ve saat yönünde dönen tek hücreli bir sirkülasyon bölgesinin oluştuğu görülmektedir. Erimenin ilk safhalarında alttan ısıtma durumunda ise birbirine zıt yönde dönen çok hücreli bir sirkülasyon bölgesinin gözlemlendiği ve zamanın ilerledikçe bu hücrelerinin bazılarının birleştiği bazılarının ise kanatçık sebebiyle birleşemediği görülmektedir.
- Sıvı oranı ve depolanan enerji miktarının, bütün durumlar için yan duvardan ısıtma durumuna nazaran alttan ısıtma durumunda daha yüksek olduğu görülmektedir.
- Kaviteye eklenen kanatçığın, ısı transfer alanının arttırmasından dolayı aynı miktarda sıvı oranı elde etmek için gerekli olan erime süresi kısalmaktadır. Erime süresindeki kısalma kullanılan kanatçık uzunluğunun bağlı olarak kanatçiksiz duruma göre hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumları için %20 ile %55 arasında değişmektedir.
- Kaviteye eklenen kanatçığın, pozisyonuna bağlı olarak sıvı oranı miktarı ciddi bir şekilde etkilenmektedir. Kanatçığın pozisyonunda bağlı olarak kanatçiksiz duruma kıyasla sıvı oranı miktarında sağlanan artış yan duvardan ısıtma durumunda %10 ile %40 arasında, alttan ısıtma durumunda ise %10 ile %50 arasında değişmektedir.
- Kaviteye eklenen kanatçığın uzunluğuna bağlı olarak depolanan enerji miktarında önemli bir artış görülmektedir. Aynı miktarda depolanan enerji için gerekli olan süre, kanatçiksiz duruma nazaran kullanılan kanatçığın uzunluğuna bağlı olarak kısalmaktadır. Burada sağlanan iyileşme hem yan duvardan ısıtma hem de alttan ısıtma durumlarında %25 ile %52 arasında değişmektedir.

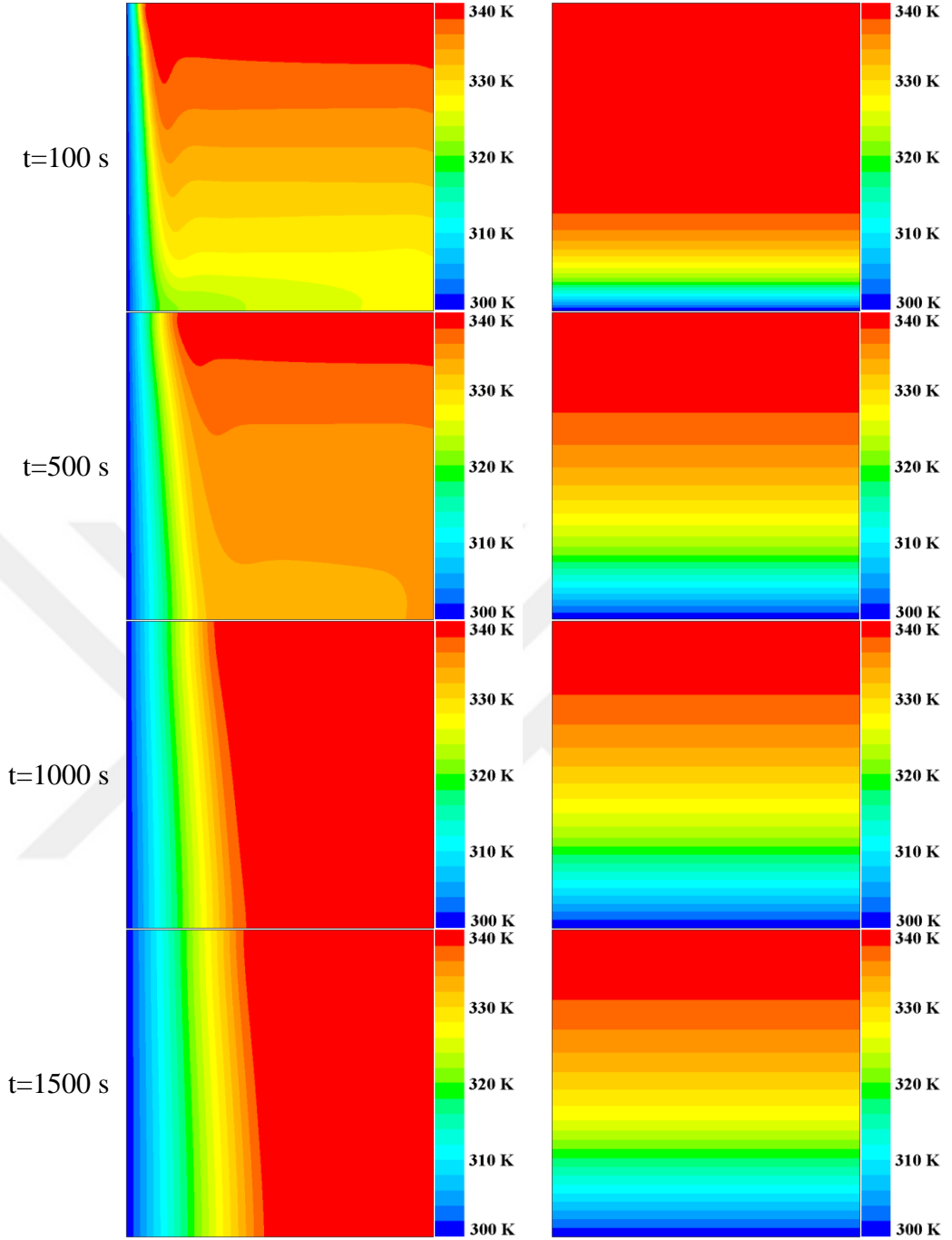
- Kaviteye eklenen kanatçığın pozisyonunun depolanan enerji miktarına önemli bir etkisi olduğu görülmektedir. Kanatçık pozisyonuna bağlı olarak kanatçiksiz duruma nazaran depolanan enerji miktarında sağlanan artış, yan duvardan ısıtma durumunda %10 ile %36 arasında alttan ısıtma durumunda ise % 30 ile %60 arasında değişmektedir.
- En yüksek sıvı oranı ve en fazla enerji depolama miktarı, yan duvardan ısıtma durumunda $v/W=0,25$ kanatçık pozisyonu ve $w/W=0,50$ kanatçık yüksekliğinde elde edilirken, alttan ısıtma durumunda ise $v/W=0,50$ kanatçık pozisyonu ve $w/W=0,50$ kanatçık yüksekliğinde elde edilmektedir.

4.4. Dördüncü Çalışma

4.4.1. Dördüncü çalışmanın sayısal sonuçları

Kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin katılma sürecinin farklı yönlerden soğutma durumu (yan duvardan soğutma ve alttan soğutma) ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları ($\phi=0\%$, $\phi=1\%$, $\phi=2\%$ ve $\phi=3\%$) göz önünde bulundurularak sayısal olarak incelendi. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunuldu.

Yan duvardan soğutma durumu ile alttan soğutma durumu kıyaslandığında erimiş haldeki parafin mumunun akış hız değerleri, yan duvardan soğutma durumunda daha yüksektir. Hatta alttan soğutma durumunda kavitede içerisindeki erimiş parafin mumunun akış hız değerleri çok küçüktür. Yan duvardan soğutma ve alttan soğutma durumlarında saf faz değiştiren malzeme için farklı zamanlardaki sıcaklık konturları Şekil 4.24'te gösterildi. Yan duvardan soğutma durumunda sıvı bölgedeki konveksiyon hareketlerinin etkisi ile katılma, kavitenin sol üst ve sol alt kısımlarında farklı hızlarda gerçekleşmektedir. Zaman ilerledikçe, katılmanın sağ tarafa doğru ilerlediği görülmektedir. Alttan soğutma durumunda katılma sürecinin başlangıcından sonuna kadarki süreçte katılma, kavitenin soğutulan alt duvarından kademeli bir şekilde yukarı doğru ilerlediği ve sabit sıcaklık eğrilerinin birbirine paralel olduğu görülmektedir. Sabit sıcaklık eğrilerine bakarak alttan ısıtma durumunda baskın olan ısı transferinin iletim ile gerçekleştiğini anlaşılmaktadır. Kavite içerisinde faz değiştiren malzemenin tamamen katılması için hem alttan soğutma hem de yan duvardan soğutma için daha fazla süre gerekmektedir.

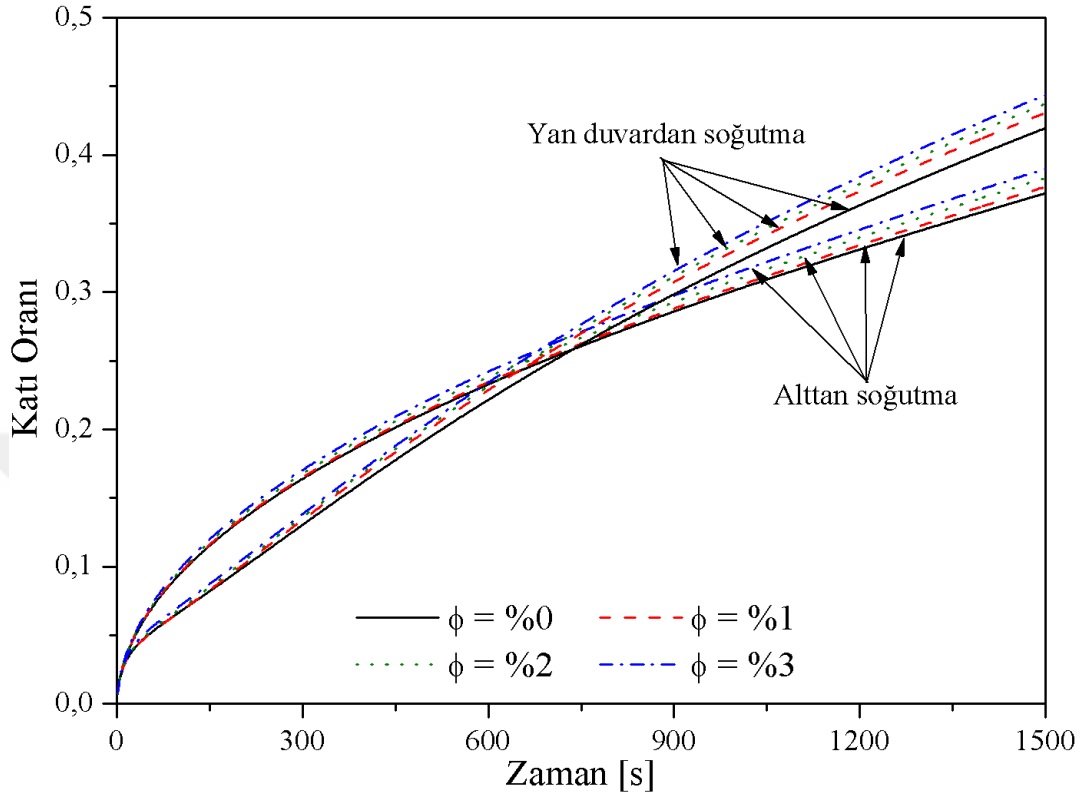


Şekil 4.24. Yan duvardan (solda) ve alttan (sağda) soğutma durumlarında saf faz değiştiren malzeme için farklı zamanlardaki sıcaklık konturları

Farklı yönlerden soğutma durumları ve CuO nanopartikülün farklı hacim oranları göz önünde bulundurularak faz değiştiren malzemelerin katı oranları Şekil 4.25’de gösterildi. Katılaşma işleminin erken evrelerinde, yan duvardan ve alttan soğutma durumlarının katı oranı eğrilerinin örtüştüğü görülmektedir. Bu aşamada soğutma yönünün katılaşma sürecine herhangi bir etkisi bulunmamaktadır. Fakat zaman ilerledikçe soğutma yönünün katılaşma süreci üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve

bu nedenle katı oranı eğrilerinin farklı davranışlar gösterdiği görülmektedir. Saf değiştiren malzeme için katılaşma sürecinin 750. saniyelerine kadar katı oranı, alttan soğutma durumunda daha yüksektir. Başlangıçta erimiş halde bulunan parafin mumun akış hızı değeri, alttan soğutma durumuna nazaran yan duvardan soğutma durumunda daha yüksektir. Bundan dolayı yan duvardan soğutma durumunda kavite içerisindeki erimiş parafin mumunda oluşan konveksiyon hareketlerinin katılaşmaya bir etkisi bulunurken, alttan soğutma durumunda sıvı kısımdaki akış hız değerleri önem arz eden bir büyüklükte olmadığı için bu hareketlerin katılaşma sürecine bir etkisi bulunmamaktadır. Yan duvardan soğutma durumunda, konveksiyon hareketlerinin etkisiyle sıvı kısımdaki akış bütün kavitede sirküle olmaktadır. Bundan dolayı yan duvardan soğutma durumundaki katılaşma, bütün kavite içerisindeki faz değiştiren malzemeye etki etmektedir ve ısı transferi iletim ile gerçekleşen alttan soğutma durumuna göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Fakat katılaşma sürecinin ilerleyen evrelerinde ($t > 750$ s), yan duvardan soğutma durumunda faz değiştiren malzemenin hala sıvı olan kısmında artan konveksiyon akımının etkisiyle erimiş parafin mumundaki akış daha hızlı hareket etmektedir. Bu da katılaşma sürecine önemli bir etki oluşturmaktadır. Sıvı kısımdaki sirkülasyonun daha hızlı hareket etmesinden dolayı yan duvardan soğutma durumundaki katı oranının, alttan soğutma durumuna göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin, $t=300$. saniyede saf faz değiştiren malzeme için yan duvardan soğutma durumunda katı oranı 0,12 iken alttan soğutma durumunda ise katı oranı 0,18'dir. Fakat $t=900$. saniyede saf faz değiştiren malzeme için yan duvardan soğutma durumunda 0,30 iken alttan soğutma durumunda 0,28'dir. Bu sonuçlardan anlaşılacağı gibi $t < 750$ saniyeye kadar katı oranı miktarı alttan soğutma durumunda daha yüksek iken, $t > 750$ saniyeden sonra katı oranı yan duvardan soğutma durumunda daha yüksektir. Katılaşma sürecinin sonunda saf faz değiştiren malzemenin katı oranı, alttan soğutma durumunda 0,36 iken, yan duvardan soğutma durumunda 0,41'dir. Saf faz değiştiren malzemeye katılan CuO nanopartikülü ile hem yan duvardan soğutma durumunda hem de alttan soğutma durumunda katı oranı miktarına bir artış görülmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye CuO nanopartikülü eklenmesi ile katılaşma sürecinin sonunda katı oranı miktarı, yan duvardan soğutma durumunda $\phi = \%1$ için 0,37, $\phi = \%2$ için 0,38 ve $\phi = \%3$ için 0,39 iken alttan soğutma durumunda $\phi = \%1$ için 0,43, $\phi = \%2$ için 0,44 ve $\phi = \%3$ için 0,45'dir. Hacimsel olarak $\phi = \%3$ oranında CuO nanopartikül

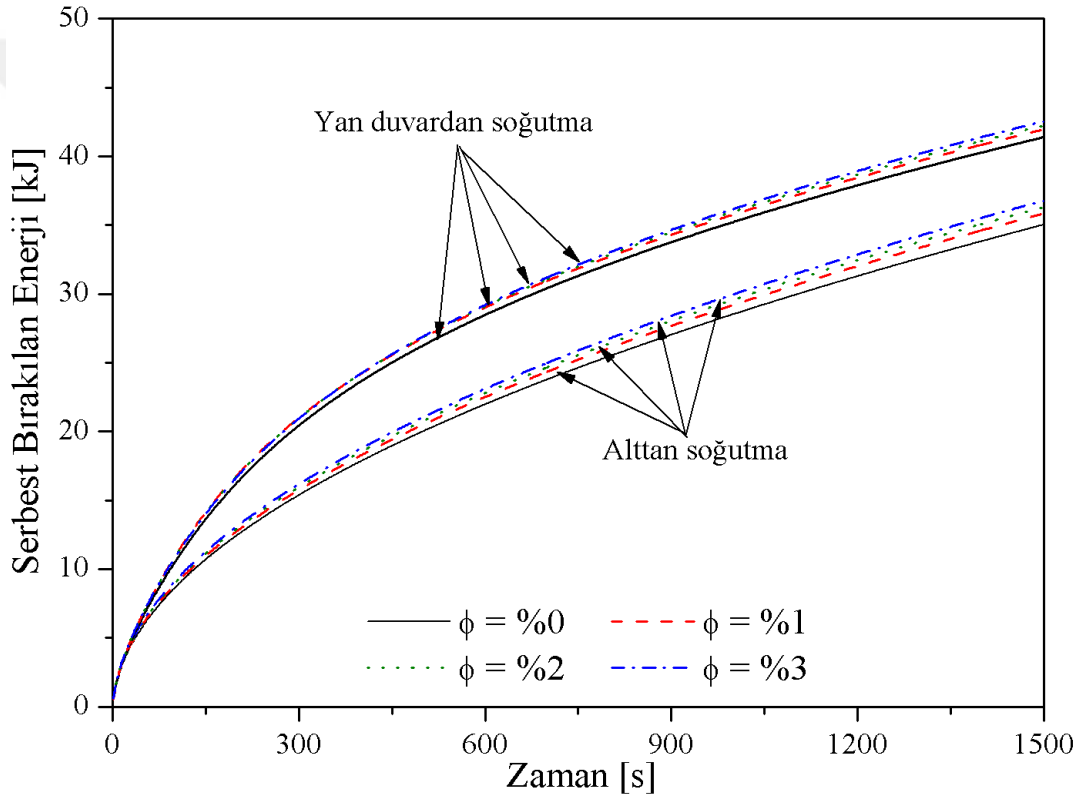
eklenmesi ile burada saf faz değiştiren malzemeye göre katı oranında sağlanan artış yan duvardan soğutma durumunda %4,8 ve alttan soğutma durumunda %5,8'dir.



şekil 4.25. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerin katı oranları

Katılmaşma işlemi sırasında serbest bırakılan enerji, farklı yönlerden soğutma durumları ve nanopartikülün farklı konsantrasyonları göz önünde bulundurularak şekil 4.26'da gösterildi. Katılmaşmanın ilk safhalarında ($t < 40$ s), alttan soğutma veya yan duvardan soğutma ile nanopartikülün farklı konsantrasyonunun, serbest bırakılan enerji üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmektedir. Fakat zaman ilerledikçe, faz değiştiren malzemeye katılan nanopartiküllerin etkisi belirgin hale gelmektedir ve saf faz değiştiren malzemeye $\phi = \%3$ CuO nanopartikülü katılması durumunda daha yüksek miktarda enerji serbest bırakılmaktadır. Örneğin, $t = 600$ saniyede saf faz değiştiren malzeme için serbest bırakılan enerji, alttan soğutma durumu için 22,0 kJ iken yan duvardan soğutma durumu için 28,5 kJ'dr. Aynı saniyede, saf faz değiştiren malzemeye katılan $\phi = \%3$ CuO nanopartikülü ile serbest bırakılan enerji, alttan soğutma durumunda 23,1 kJ'e yükselirken yan duvardan soğutma durumunda 29,2 kJ'e yükselmektedir. Katılmaşma süresinin sonunda ($t = 1500$

s) saf faz değiştiren malzeme için serbest bırakılan enerji, alttan soğutma durumunda 35,0 kJ iken yan duvardan soğutma durumunda 41,4 kJ'dür. $t=1500$. saniyede, faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=3\%$ CuO nanopartikülü katıldığında serbest bırakılan enerji, alttan soğutma durumunda 36,8 kJ'e yükselirken yan duvardan soğutma durumunda 42,5 kJ'e yükselmektedir. Elde edilen sonuçlardan anlaşılacağı üzere 25 dakikalık katılma sürecinin sonunda soğutma yönünü değiştirerek ve saf faz değiştiren malzemeye $\phi=3\%$ CuO nanopartikülü katarak serbest bırakılan enerjiyi 35,0 kJ'den (saf faz değiştiren malzeme için alttan soğutma durumu) 42,5 kJ'e yükselmektedir.



Şekil 4.26. Yan duvardan ve alttan ısıtılan durumlar için farklı hacim oranlarında CuO nanopartikülü katılan faz değiştiren malzemelerde serbest bırakılan enerji miktarları

4.4.2. Dördüncü çalışmanın bulguları

Bu sayısal çalışmada, soğuk duvarın yönü (yan duvardan soğutma ve alttan soğutma) ve CuO nanopartikülün farklı hacim konsantrasyonları ($\phi=0\%$, $\phi=1\%$, $\phi=2\%$ ve $\phi=3\%$) dikkate alınarak kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin katılma performansı incelendi. Elde edilen bulgular aşağıda verilmektedir:

- Saf değiştiren malzeme için katılaşma sürecinin 750. saniyeye kadar katı oranı miktarının, alttan soğutma durumunda daha yüksek olduğu görülmektedir. Fakat katılaşma sürecinin 750. saniyesinden sonra bu durum değişmektedir ve yan duvardan soğutma durumunda katı oranı miktarı daha yüksek olmaktadır.
- Saf faz değiştiren malzemeye CuO nanopartikülü katılması ile hem alttan soğutma hem de yan duvardan soğutma durumlarında saf faz değiştiren malzemeye nazaran daha yüksek miktarda katı oranı elde edilmektedir. En yüksek katı oranı miktarı, saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak $\phi=3\%$ oranında CuO nanopartikülü katılması ile elde edilmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye kıyasla faz değiştiren malzemeye $\phi=3\%$ oranında CuO nanopartikülü katılması ile 4% lk bir iyileşme elde edilmektedir. Soğutma yönünü değiştirerek ve faz değiştiren malzemeye nanopartikülü katarak katı oranında $19,3\%$ lk bir artış elde edilmektedir.
- Katılaşma sürecinde alttan soğutma durumuna kıyasla yan duvardan soğutma durumunda daha fazla enerjinin serbest bırakıldığı görülmektedir. Saf değiştiren malzemeye katılan hacimsel olarak $\phi=3\%$ oranında CuO nanopartikülü ile daha fazla enerji serbest bırakılmaktadır. Soğutma yönünün değiştirilmesi ve saf faz değiştiren malzemeye nanopartikülü katılmasıyla serbest bırakılan enerjide $21,5\%$ lik bir artış elde edilmektedir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, kare bir kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime ve katılaşma süreci sayısal olarak incelendi. Duvarların farklı ısıtma ve soğutma yönleri, nanopartikülün farklı hacim konsantrasyonları, farklı duvar sıcaklıkları ve farklı kanatçık uzunlukları ve pozisyonları göz önünde bulundurularak incelendi. Elde edilen sonuçlar, dikkate alınan parametrelerin sıvı/katı oranı miktarı ve depolanan/serbest bırakılan enerji miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gösterdi. Sayısal sonuçlar konveksiyon hareketlerinin, erime sürecinde önemli rol oynadığını gösterdi. Buna ek olarak, sıcak duvar sıcaklığı arttırıldığında konveksiyon hareketlerinin daha erken başlaması sebebiyle sıvı oranı miktarı ciddi derecede yükselmektedir. Sıvı ve katı oranı miktarı, ısıtılan duvarın yönünü değiştirerek önemli ölçüde arttırılabileceği sonucuna varıldı. Yan duvardan ısıtma yerine alttan ısıtma durumunda konveksiyon hareketlerinin etkisiyle daha yüksek sıvı oranı ve enerji depolama miktarı elde edildi. İzotermal olmayan sınır şartı uygulanan kavite içerisindeki faz değiştiren malzemenin erime süreci incelendiğinde yan duvardan ısıtma durumunda erime sürecinin ilk safhaları haricinde izotermal sınır şartı ile arasında belirgin bir fark görülmedi. Fakat alttan ısıtma durumunda, izotermal olmayan sınır şartı çok hücreli sirkülasyon hücrelerinin birleşmesini önlediği ve erimenin, aşağıdan yukarıya doğru bir bütün halinde hareket ettiği görüldü. Saf faz değiştiren malzemeye katılan nanopartikül ile sıvı oranı ve depolanan enerji miktarında artış gözlemlendi. Fakat nanopartikül konsantrasyonunun $\phi=1\%$ 'in üzerine çıkması ile viskozite de artmaktadır. Viskozitedeki bu artış akış hızını azaltmaktadır ve bu da erime hızını yavaşlamaktadır. Bu nedenle, hacimsel olarak $\phi=1\%$ nanopartikül katılması durumuna kıyasla $\phi=2\%$ ve $\phi=3\%$ oranında nanopartikül katılması durumunda sıvı oranı miktarında ve depolanan enerji miktarında azalma görüldü. Kanatçık kullanımının sıcak duvarın her iki yönü için de ısı transfer alanını attırmasından dolayı erime hızlarının önemli ölçüde arttığı görüldü. Erime sürecinin ilk safhalarında daha uzun kanatçık ile daha yüksek sıvı oranı elde edilirken zaman ilerledikçe kanatçık uzunluğunun etkisinin azaldığı görüldü. Ayrıca, kanatçık pozisyonun erime hızına önemli bir etkisinin olduğu

görüldü. En yüksek sıvı oranı yan duvardan ısıtma durumunda yatay olarak alt duvara en yakın kanatçık pozisyonunda elde edilirken alttan ısıtma durumunda kanatçık pozisyonunun kavitenin düşey orta düzleminde bulunduğu pozisyonda elde edildi. Faz değiştiren malzemenin katılma sürecinde, yan duvardan soğutma durumu ile alttan soğutma durumu kıyaslandığında erimiş haldeki faz değiştiren malzemenin akış hız değerleri, yan duvardan soğutma durumunda daha yüksektir. Hatta alttan soğutma durumunda kavitede bulunan erimiş haldeki faz değiştiren malzemenin akış hız değerleri çok küçüktür. Yan duvardan soğutma durumunda sıvı faz değiştiren malzeme bölgesindeki konveksiyon akımlarının etkisi ile katılma, kavitenin farklı kısımlarında farklı bir hızda gerçekleşmektedir. Saf faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ile katı oranı miktarında hem yan duvardan soğutma hem de alttan soğutma durumlarında bir artış gözlemlendi. Katılma boyunca alttan soğutma durumunda kıyasla yan duvardan soğutma durumunda daha fazla enerji serbest bırakıldı. Katılma sürecinde saf faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ile daha fazla miktarda enerji serbest bırakıldı. Erime ve katılma süreci incelendiğinde, erime sürecinde saf faz değiştiren malzemeye hacimsel olarak %1 nanopartikül katılması durumunda en yüksek sıvı oranı miktarı elde edilirken soğutma durumunda en iyi katı oranı miktarı saf faz değiştiren malzemeye %3 nanopartikül katılması durumunda elde edildi. Sonuç olarak faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ve kavitede kanatçık kullanılması ile faz değiştiren malzemenin, erime ve katılma performansının arttığı görüldü. Ayrıca, enerji depolama (şarj etme) ve serbest bırakma (deşarj etme) performansı da uygulanan bu yöntemlerle artırıldı. Buna ek olarak, ısıtma/soğutma yönünün değiştirilmesi ile erime ve katılma performansında dolayısıyla enerji şarj etme vedeşarj etme performansında iyileşme görüldü.

Bu tez çalışmasında faz değiştiren malzemenin, erime ve katılma performansının artırılması için uygulanan tekniklerden olan faz değiştiren malzemeye nanopartikül katılması ve kavitede kanatçık kullanılması ile elde edilen sonuçlara bakılarak bu çalışmaların deneysel olarak incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Konuklu Y., Mikrokapsüllenmiş Faz Değiştiren Maddelerde Termal Enerji Depolama ile Binalarda Enerji Tasarrufu, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2008, 178648.
- [2] Tyagi V. V., Buddhi D., PCM Thermal Storage in Buildings: A State of Art, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, **11**, 1146-1166.
- [3] Farid M. M., Khudhair A. M., Razack S. A. K., Al-Hallaj S., A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications, *Energy Conversion and Management*, 2004, **45**, 1597–1615.
- [4] Zalba B., Marín J. M., Cabeza L. F., Mehling H., Review on Thermal Energy Storage with Phase Change: Materials, Heat Transfer Analysis and Applications, *Applied Thermal Engineering*, 2003, **23**, 251–283.
- [5] Cabeza L. F., Castell A., Barreneche C., Gracia A. de, Fernández A. I., Materials Used As PCM in Thermal Energy Storage in Buildings: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**, 1675–1695.
- [6] Joybari M. M., Haghghat F., Moffat J., Sra P., Heat and Cold Storage Using Phase Change Material in Domestic Refrigeration Systems: The State-of-The-Art Review, *Energy and Buildings*, 2015, **106**, 111-124.
- [7] Browne M. C., Norton B., McCormack S, J., Phase Change Materials for Photovoltaic Thermal Management, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **47**, 762–782.
- [8] Soares N., Costa J. J., Gaspar A. R., Santos P., Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems Towards Buildings' Energy Efficiency, *Energy and Buildings*, 2013, **59**, 82–103.
- [9] Zhou D., Zhao C. Y., Tian Y., Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (PCMs) in Building Applications, *Applied Energy*, 2012, **92**, 593–605.
- [10] Pomianowski M., Heiselberg P., Zhang Y., Review of Thermal Energy Storage Technologies Based on PCM Application in Buildings, *Energy and Buildings*, 2013, **67**, 56–69.
- [11] Waqas A., Din Z. U., Phase Change Material (PCM) Storage for Free Cooling of Buildings-A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, **18**, 607–625.

- [12] Shalaby S. M., Bek M. A., El-Sebaei A. A., Solar Dryers with PCM As Energy Storage Medium: A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, **33**, 110–116.
- [13] Wang Z., Qiu F., Yang W., Zhao X., Applications of Solar Water Heating System with Phase Change Material, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **52**, 645-652.
- [14] Baby R., Balaji C., Experimental Investigations on Phase Change Material Based Finned Heat Sinks for Electronic Equipment Cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, **55**, 1642–1649.
- [15] Wang Y.-H., Yang Y.-T., Three-Dimensional Transient Cooling Simulations of a Portable Electronic Device Using PCM (phase change materials) in Multi-Fin Heat Sink, *Energy*, 2011, **36**, 5214-5224.
- [16] Hasan A., McCormack S. J., Huang M. J., Norton B., Evaluation of Phase Change Materials for Thermal Regulation Enhancement of Building Integrated Photovoltaics, *Solar Energy*, 2010, **84**, 1601–1612.
- [17] Mondal S., Phase Change Materials for Smart Textiles–An Overview, *Applied Thermal Engineering*, 2008, **28**, 1536-1550.
- [18] Shabgard H., Bergman T.L., Sharifi N., Faghri A., High Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage Using Heat Pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, **53**, 2979–2988.
- [19] Sharifi N., Bergman T. L., Allen M. J., Faghri A., Melting and Solidification Enhancement Using a Combined Heat Pipe, Foil Approach, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, **78**, 930–941.
- [20] Arasu A. V., Sasmito A. P., Mujumdar A. S., Thermal Performance Enhancement of Paraffin Wax with Al₂O₃ and CuO Nanoparticles – A Numerical Study, *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 2011, **2**, 043005.
- [21] Siegel R., Solidification of Low Conductivity Material Containing Dispersed High Conductivity Particles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1977, **20**, 1087–1089.
- [22] Mettawee E. S., Assassa G. M. R., Thermal Conductivity Enhancement in a Latent Heat Storage System, *Solar Energy*, 2007, **81**, 839–845.
- [23] Feng Y., Li H., Li L., Bu L., Wang T., Numerical Investigation on The Melting of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials (NePCM) in a Bottom-Heated Rectangular Cavity Using Lattice Boltzmann Method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **81**, 415–425.
- [24] Velraj R., Seeniraj R. V., Hafner B., Faber C., Schwarzer K., Heat Transfer Enhancement in a Latent Heat Storage Systems, *Solar Energy*, 1999, **65**, 171–180.

- [25] Al-Abidi A. A., Mat S., Sopian K., Sulaiman M. Y., Mohammad A. T., Internal and External Fin Heat Transfer Enhancement Technique for Latent Heat Thermal Energy Storage in Triplex Tube Heat Exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 2013, **53**, 147–156.
- [26] Lacroix M., Benmadda M.; Numerical Simulation of Natural Convection-Dominated Melting and Solidification from a Finned Vertical Wall, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 1997, **31**, 71-86.
- [27] Lacroix M., Benmadda M., Analysis of Natural Convection Melting from a Heated Wall with Vertically Oriented Fins, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 1998, **8**, 465-478.
- [28] Fan L.-W., Xiao Y.-Q., Zeng Y., Fang X., Wang X., Xu X., Yu Z.-T., Hong R.-H., Hu Y.-C., Cen F.-F., Effects of Melting Temperature and The Presence of Internal Fins on The Performance of a Phase Change Material (PCM)-Based Heat Sink, *International Journal of Thermal Sciences*, 2013, **70**, 114-126.
- [29] Sharifi N., Bergman T. L., Faghri A., Enhancement of PCM Melting in Enclosures with Horizontally-Finned Internal Surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**, 4182-4192.
- [30] Gharebaghi M., Sezai I., Enhancement of Heat Transfer in Latent Heat Storage Modules with Internal Fins, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2008, **53**, 749-765.
- [31] Wu S., Wang H., Xiao S., Zhu D. S., An investigation of Melting/Freezing Characteristics of Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2012, **110**, 1127-1131.
- [32] Arasu A. V., Sasmito A. P., Mujumdar A. S., Numerical Performance Study of Paraffin Wax Dispersed with Alumina in a Concentric Pipe Latent Heat Storage System, *Thermal Science*, 2013, **17**, 419-430.
- [33] Jesumathy S., Udayakumar M., Suresh S., Experimental Study of Enhanced Heat Transfer By Addition of CuO Nanoparticle, *Heat and Mass Transfer*, 2012, **48**, 965-978.
- [34] Harikrishnan S., Kalaiselvam S., Experimental Investigation of Solidification and Melting Characteristics of Nanofluid As PCM for Solar Water Heating Systems, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, **3**, 628-635.
- [35] Arasu A. V., Mujumdar A. S., Numerical Study on Melting of Paraffin Wax with Al₂O₃ in a Square Enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, **39**, 8–16.
- [36] Dhaidan N. S., Khodadadi J. M., Al-Hattab T. A., Al-Mashat S. M., Experimental and Numerical Investigation of Melting of Phase Change Material/Nanoparticle Suspensions in a Square Container Subjected to a

- Constant Heat Flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **66**, 672–683.
- [37] Dhaidan N. S., Khodadadi J. M., Al-Hattab T. A., Al-Mashat S. M., Experimental and Numerical Study of Constrained Melting of *n*-octadecane with CuO Nanoparticle Dispersions in a Horizontal Cylindrical Capsule Subjected to a Constant Heat Flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **67**, 523–534.
- [38] Jourabian M., Farhadi M., Sedighi K., on the Expedited Melting of Phase Change Material (PCM) Through Dispersion of Nanoparticles in The Thermal Storage Unit, *Computers & Mathematics with Applications*, 2014, **67**, 1358-1372.
- [39] Dhaidan N. S., Khodadadi J. M., Al-Hattab T. A., Al-Mashat S. M., Experimental and Numerical Investigation of Melting of NePCM Inside An Annular Container Under a Constant Heat Flux Including The Effect of Eccentricity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **67**, 455–468.
- [40] Kashani S., Lakzian E., Lakzian K., Mastiani M., Numerical Analysis of Melting of Nanoenhanced Phase Change Material in Latent Heat Thermal Energy Storage System, *Thermal Science*, 2014, **18**, 335-345.
- [41] Altohamy A., Abd Rabbo M. F., Sakr R. Y., Attia A. A. A., Effect of Water Based Al₂O₃ Nanoparticle PCM on Cool Storage Performance, *Applied Thermal Engineering*, 2015, **84**, 331-338.
- [42] Khodadadi J. M., Hosseinizadeh S. F., Nanoparticle-Enhanced Phase Change Materials (NePCM) with Great Potential for Improved Thermal Energy Storage, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, **34**, 534–543.
- [43] Wu S., Zhu D., Li X., Li H., Lei J., Thermal Energy Storage Behavior of Al₂O₃-H₂O Nanofluids, *Thermochimica Acta*, 2009, **483**, 73-77.
- [44] Kalaiselvam S., Parameshwaran R., Harikrishnan S., Analytical and Experimental Investigations of Nanoparticles Embedded Phase Change Materials for Cooling Application in Modern Buildings, *Renewable Energy*, 2012, **39**, 375-387.
- [45] Abdollahzadeh M., Esmaeilpour M., Enhancement of Phase Change Material (PCM) Based Latent Heat Storage System with Nano Fluid and Wavy Surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, **80**, 376–385.
- [46] Chandrasekaran P., Cheralathan M., Kumaresan V., Velraj R., Enhanced Heat Transfer Characteristics of Water Based Copper Oxide Nanofluid PCM (phase change material) in a Spherical Capsule During Solidification for Energy Efficient Cool Thermal Storage System, *Energy*, 2014, **72**, 636-642.

- [47] Sharma R. K., Ganesan P., Sahu J. N., Metselaar H. S. C., Mahlia T. M. I., Numerical Study for Enhancement of Solidification of Phase Change Materials Using Trapezoidal Cavity, *Powder Technology*, 2014, **268**, 38–47.
- [48] Ismail K. A. R., Morates R. I. R., A Numerical and Experimental Investigation of Different Containers and PCM Options for Cold Storage Modular Units for Domestic Applications, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, **52**, 4195-4202.
- [49] Duan Q., Tan F.L., Leong K.C., A Numerical Study of Solidification of n-hexadecane Based on The Enthalpy Formulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, **120**, 249-258.
- [50] Bilen K., Takgil F., Kaygusuz K., Thermal Energy Storage Behavior of $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ During Melting and Solidification, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental*, 2008, **30**, 775-787.
- [51] Bauer T., Approximate Analytical Solutions for The Solidification of PCMs in Fin Geometries Using Effective Thermophysical Properties, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**, 4923-4930.
- [52] Mosaffa A. H. Talati F., Basirat Tabrizi H., Rosen M. A., Analytical Modeling of PCM Solidification in a Shell and Tube Finned Thermal Storage for Air Conditioning Systems, *Energy and Buildings*, 2012, **49**, 356-361.
- [53] Ismail K. A. R., Alves C. L. F., Modesto M. S., Numerical and Experimental Study on The Solidification of PCM Around a Vertical Axially Finned Isothermal Cylinder, *Applied Thermal Engineering*, 2001, **21**, 53-77.
- [54] Nithyadevi N., Kandaswamy P., Lee J., Natural Convection in a Rectangular Cavity with Partially Active Side Walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**, 4688-4697.
- [55] Sheikhzadeh G. A., Arefmanesh A., Kheirkhah M. H., Abdollahi R., Natural Convection of Cu–Water Nanofluid in a Cavity with Partially Active Side Walls, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2011, **30**, 166-176.
- [56] Sankar M., Bhuvaneshwari M., Sivasankaran S., Do Y., Buoyancy Induced Convection in a Porous Cavity with Partially Thermally Active Sidewalls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, **54**, 5173–5182.
- [57] Gilly B., Bontoux P., Roux B, Influence of Thermal Wall Conditions on The Natural Convection in a Vertical Rectangular Differentially Heated Cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, **24**, 829–841.
- [58] Chao P., Ozoe H., Churchill S.W., Effect of a Non-Uniform Surface Temperature on Laminar Natural Convection in a Rectangular Enclosure, *Chemical Engineering Communications*, 1981, **9**, 245–254.

- [59] Jian L., Inghaam D.B., Pop I., Natural Convection from a Vertical Flat Plate with a Surface Temperature Oscillation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**, 2311–2322.
- [60] Adjlout L., Imine O., Azzi A., Belkadi A., Laminar Natural Convection in an Inclined Cavity with a Wavy Wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, **45**, 2141–2152.
- [61] Shukla V., Murtugudde R., Prasad V., Cane M., Natural Convection in a Horizontal Cavity with a Linear Temperature Variation on The Top, *27th National Heat Transfer Conference*, Minneapolis, United States of America, 1991.
- [62] ANSYS FLUENT Theory Guide Release 15.0, ANSYS Inc., 2013.
- [63] Chow L. C., Zhong J. K., Thermal Conductivity Enhancement for Phase Change Storage Media, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1996, **23**, 91–100.
- [64] Vajjha R. S., Das D. K., Namburu P. K., Numerical Study of Fluid Dynamic and Heat Transfer Performance of Al₂O₃ and CuO Nanofluids in The Flat Tubes of a Radiator, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2010, **31**, 613–621.
- [65] Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, **46**, 3639–3653.
- [66] Gau C., Viskanta R., Melting and Solidification of a Pure Metal on a Vertical Wall, *Journal of Heat Transfer*, 1986, **108**, 174–181.
- [67] Brent A. D., Voller V. R., Reid K. J., Enthalpy-Porosity Technique for Modeling Convection-Diffusion Phase Change: Application to The Melting of a Pure Metal, *Numerical Heat Transfer*, 1988, **13**, 297-318.
- [68] Tiari S., Qiu S., Mahdavi M., Numerical Study of Finned Heat Pipe-Assisted Thermal Energy Storage System with High Temperature Phase Change Material, *Energy Conversion and Management*, 2015, **89**, 833–842.
- [69] Gong Z. X., Mujumdar A. S., Flow and Heat Transfer in Convection-Dominated Melting in a Rectangular Cavity Heated from Below, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1988, **41**, 2573-2580.
- [70] Lacroix M., Predictions of Natural-Convection-Dominated Phase-Change Problems By The Vorticity-Velocity Formulation of The Navier-Stokes Equations, *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, 1992, **22**, 79-93.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Arıcı M., **Tütüncü E.**, Kan M., Karabay H., Melting of Nanoparticle-Enhanced Paraffin Wax in a Rectangular Enclosure with Partially Active Walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **104**, 7-17.
- [2] Arıcı M., **Tütüncü E.**, Campo A., Numerical Investigation of Melting of Paraffin Wax Dispersed with CuO Nanoparticles Inside a Square Enclosure, *Heat Transfer Research*, (Yayınlanmak üzere kabul edildi).
- [3] Arıcı M., **Tütüncü E.**, Karabay H., Campo A., Investigation on The Melting Process of PCM in a Square Cavity with A Fin Attached at The Heated Wall, *International Conference on Materials & Energy*, Tianjin, CHINA, 6-9 July 2017.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Konya’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara ve Tokat’ta tamamladı. 2010 yılında Kocaeli Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünü kazandı. Bir yıl süren hazırlık programından sonra lisans eğitimine başladı ve 2015 yılında mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’ndan Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Haziran 2016’da Mir Ar-Ge’de Makina Mühendisi olarak işe başladı ve hala çalışmaktadır.

