
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FARKLI TİP OYUKLAR İÇEREN DÜZ BİR ISITICI YÜZEYDE HAVUZ KAYNAMA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Sajjad NEMATYANHAJIALILOU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Sajjad NEMATYANHAJIALILOU

23/01/2023

FARKLI TİP OYUKLAR İÇEREN DÜZ BİR ISITICI YÜZEYDE HAVUZ KAYNAMA ISI TRANSFERİNİN SAYISAL ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Sajjad NEMATYANHAJIALILOU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Büyük miktarlarda ısı aktarma kabiliyetine sahip olan havuz kaynama ısı transferi bugün ısıtma ve soğutma gibi endüstrinin çeşitli sektörlerinde sık sık karşılaşılan bir yöntemdir. Bu proseste büyük bir role sahip olan ısı transferi performansını attırmak son zamanlarda en çok ilgi gören konulardan biri olmuş, bu amaçla da geleneksel akışkanlar yerine iş akışkanı olarak nanoakışkanlar kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek termofiziksel özelliklere sahip nano boyuttaki katı parçacıklarının temel akışkanın içerisine karıştırılmasıyla elde edilen nanoakışkan çözeltisinin ısı transferindeki büyük iyileştirilmeler birçok çalışmada kanıtlanmıştır. Bu çalışmalar her ne kadar farklı etkenlerin ısıl performansı nasıl etkilediğini araştırsa da işlem süresinde kaynama kabarcıklarının nasıl oluştuğu ve ısıtıcı yüzeyden ayrılması konusunda hiçbir bilgi sunmamaktadır. Bu tez çalışmasında iş akışkanı olarak saf su ve %0,1 derişim oranına sahip alümina nanoakışkanı ile düz ve farklı geometrilere sahip oyuklar içeren ısıtıcı yüzeylerde kaynama kabarcıklarının oluşumu sayısal analizlerle incelenmiştir. Yapılan analizlerle havuz kaynamasının gerçekleştiği bölgeye ait sıcaklık ve hız dağılımları ortaya konulmuştur. Düz bir yüzey ve yarım daire ve üçgen oyuklu yüzeyler kullanılarak yapılan analizler sonucunda kaynama kabarcıklarının çekirdeklenmesinde ve oluşumunda oyuk geometrisinin büyük oranda etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca saf suya kıyasla alümina nanoakışkanı ilke yapılan analizlerde kaynama işleminin daha erken başladığı kaynama kabarcıklarının yüzeyden ayrılması ise daha uzun sürede gerçekleştiği görülmüştür.

Bilim Kodu	:	92807
Anahtar Kelimeler	:	Nanoakışkan, havuz kaynama, ısı transferi
Sayfa Adedi	:	51
Danışman	:	Doç. Dr. Erdem ÇİFTÇİ

POOL BOILING HEAT TRANSFER PROPERTIES OF NANOFLUID ON FALT HEATING SURFACE AND HEATING SURFACE WITH CAVITIES

(M. Sc. Thesis)

Sajjad NEMATYANHAJIALILOU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Pool boiling heat transfer, which has the ability to transfer large amounts of heat, is a method frequently encountered in various sectors of industry such as heating and cooling today. Increasing the heat transfer performance, which has a great role in this process, has been one of the most popular topics recently, and for this purpose, nanofluids have been used as working fluids instead of traditional fluids. Great improvements in the heat transfer of the nanofluid solution, which is obtained by mixing nano-sized solid particles with high thermophysical properties into the base fluid, have been proven in many studies. Although these studies investigate how different factors affect the thermal performance, they do not provide any information on how the boiling bubbles are formed during the process and their separation from the heating surface. In this thesis, pure water and alumina nanofluid with a concentration of 0.1% as the working fluid and the formation of boiling bubbles on flat surface heating surface and surfaces with cavities in different geometries were investigated by numerical analysis. By the analyzes made, the temperature and velocity distributions of the region where the pool boiling took place were presented. As a result of the analyzes using a flat surface and surfaces with half-circle and triangular cavities, it was observed that the cavity geometry was largely effective in the nucleation and formation of boiling bubbles. In addition, it was observed that the boiling process started earlier in the analyzes using the alumina nanofluid compared to pure water, and the separation of the boiling bubbles from the surface took place in longer period.

Science Code : 92807
Key Words : Nanofluid, pool boiling, heat transfer
Page Number : 51
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Erdem ÇİFTÇİ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince hem bilgisi hem deneyimleriyle tez danışmanlığının çok daha ötesinde gece gündüz demeden her an yanımda olan “Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölüm başkan yardımcısı” tez danışmanım sayın Doç. Dr. Erdem ÇİFTÇİ başta olmak üzere, hem zamanında enerji sistemleri yüksek lisansına başvuru yaptığım dönem hem de tüm yüksek lisans süresi boyunca desteklerini esirgemeyen sayın Prof. Dr. Kurtuluş BORAN (Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi) ve sayın Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ (Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi) ’e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

RESİMLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

2. NANOAKIŞKANLAR VE KAYNAMA – YOĞUŞMA ISI TRANSFERİ 13

2.1. Nanoakışkanlar 13

2.1.1. Nanoakışkanlarda termofiziksel özellikler 17

2.2. Kaynama ve Yoğuşma Isı Transferi 19

2.2.1. Kaynama ısı transferi 20

2.2.2. Yoğuşma ısı transferi 26

3. YÖNTEM VE SAYISAL ANALİZLER 29

3.1. Yöntem 29

3.1.1. Geometri 29

3.1.2. Ağ oluşturma 29

3.1.3. Setup ayarları 30

3.2. Sayısal Analizler 32

3.2.1. farklı ısıtıcı yüzeylerde saf su için su-buhar hacmi 32

3.2.2. Farklı ısıtıcı yüzeylerde alümina nanoakışkanı 34

3.2.3. Farklı yüzeylerde düz su ve alümina nanoakışkanın karşılaştırılması 37

3.2.4. Temel akışkan ve nanoakışkan için sıcaklık dağılımı 39

Sayfa

3.2.5. Temel akışkan ve alümina nanoakışkan için hız dağılımı 40

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 45

4.1. Sonuçlar 45

4.2. Öneriler 46

KAYNAKLAR 47

ÖZGEÇMİŞ 51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Düz bir ısıtıcı yüzeyde saf su için Su-buhar hacmi 32

Şekil 3.2. Yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde saf su için Su-buhar hacmi..... 33

Şekil 3.3. Üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde saf su için su-buhar hacmi 33

Şekil 3.4. Sırasıyla soldan sağa, düz bir ısıtıcı yüzeyde, üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde ve yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde saf su için son zaman adımı su-buhar hacim fraksiyonunun karşılaştırılması 34

Şekil 3.5. Düz bir ısıtıcı ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkanı için son zaman adımı alümina-buhar hacmi..... 35

Şekil 3.6. Yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkan için son zaman adımı alümina-buhar hacmi 35

Şekil 3.7. Üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkan için son zaman adımı alümina-buhar hacmi..... 36

Şekil 3.8. Soldan sağa düz bir ısıtıcı yüzeyde, üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde ve yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkan için son zaman adımı alümina-buhar hacmi karşılaştırılması 36

Şekil 3.9. Saf su (solda) ve nanoakışkan (sağda) için farklı durumların karşılaştırılması 38

Şekil 3.10. Alümina nanoakışkan için sıcaklık dağılımı..... 39

Şekil 3.11. Saf su için sıcaklık dağılımı..... 40

Şekil 3.12. Saf su ve nanoakışkan için hız dağılımı 41

Şekil 3.13. Nanoakışkan için hız dağılımı vektörleri..... 42

Şekil 3.14. Saf su ve temel akışkan için hız dağılımı karşılaştırılması..... 43

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Etilen glikole doğrudan buharlaştırmayla üretilen bakır nanoparçacıklarının parlak-alan TEM mikroskobik resmi 14

Resim 2.2. Yüzey aktif madde içeren ve içermeyen Karbon Nano-Tüp (CNT) nanoakışkanları 15

Resim 2.3. Akışkan yığın hareketine göre kaynama rejimleri 21

Resim 2.4. Akışkan yığın sıcaklığına göre kaynama rejimleri 22

Resim 2.5. Havuz kaynamada karşılaşılan rejimler 23

Resim 2.6. Isıtıcı yüzeyinde açılan oyuklar ile kabarcıklanma bölgelerinin arttırılması 25

Resim 2.7. Yoğuşma ısı transferi türleri 27

Resim 3.1. İki boyutlu geometri 29

Resim 3.2. Ağ yapısı 30

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
kPa	Kilo Pascal
SiO_2	Siloyum Dioksit
TiO_2	Titanyum Dioksit
$\boldsymbol{Ra}$	Pürüzlülük Değeri
$\boldsymbol{\mu m}$	Mikrometre
%	Yüzde
℃	Derece (Santigrat)

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AFM	Atomic Force Microscopy
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMC	Carboxy Methyl Cellulose
CTAB	Cetrimonium Bromide
DCM	Diklorometan
DLS	Dynamic Light Scattering
EDS	Energy Dispersive Spectrometer
EDX	Energy Dispersive X-Ray
EG	Etilen Glikol
FEG-SEM	Field-Emission Gun Scanning Electron Microscope
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IG	Isıtıcı Gücü
ppm	parts per million
RNG	Renormalizasyon Grup
SDBS	Sodyum Dodesil Benzen Sülfonat
SDS	Sodium Dodecyl Sulphate

Kısaltmalar	Açıklamalar
SEM	Scanning Electron Microscope
SER	Surfactant Enhancement Ratio
SLS	Sodium Laureth Sulfate
TDS	Total Dissolved Solids
TEM	Transmission Electron Microscopy
TMAH	Tetramethyl Ammonium Hydroxide
VOF	Volume-of-Fluid
XRD	X-Ray Diffraction

1. GİRİŞ

Isı transferi bir metodu olarak bilinen havuz kaynama son zamanlarda çok sayıda ilgi gören bir çalışma alanı haline gelmiştir. Farklı endüstri sektörlerinin hem makro hem de mikro boyutlarında kullanılan ve genellikle bir soğutma ve ısıtma yöntemi olarak karşılaşılan bu prosesin verimliliğini artırmaya çalışmak hayati bir öneme sahip olduğundan yıllardır havuz kaynama çalışmalarının en çok araştırılan konusuna dönmüştür. Doğal taşınım ve/ veya zorlanmış taşınım gibi benzer ısı transferi yöntemlerine kıyasla aşırı miktarda daha fazla ısı iletim kapasitesine sahip olan havuz kaynamada, ısı transfer performansını artırmanın odak noktaları olan kritik ısı akısı noktasını ve ısı transfer katsayısını iyileştirmek farklı yollarla yapılmaktadır. Bu yollardan biri ise temel akışkanın içerisine daha yüksek termofiziksel özelliklere sahip bir katı maddeyi eklemektir. Isı taşıma görevini yapan akışkana daha yüksek termofiziksel özelliklere sahip bir katı maddeyi eklemek her ne kadar uzun bir geçmişe dayansa da katı madde olarak nanoparçacıkları iş akışkanın içerisine karıştırmak dikkat çekici sonuçlar elde eden modern bir yöntem olarak düşünülmektedir. Büyük boyutlarda katı madde parçaları kullanan benzer eski prosese karşın tortu oluşturma ve tıkanıklığa sebep olma gibi problemlerin çözmesinin üstesinden gelen bu yeni metotta daha yüksek ısı iletkenlik özelliklerine sahip nano boyuttaki parçacıkları su gibi temel akışkanın içerisine karıştırmakla elde edilen süspansiyon nanoakışkanın ısı transferi performansının büyük derecede iyileştirildiği birçok araştırmada kanıtlanmıştır. Nonoakışkanlardaki nanoparçacıklar bahsedildiği özelliklerden dolayı hem kaynama kabarcıklarının oluşumunu ve ısıtıcı yüzeyinden ayrılmalarını hızlandırır hem de sayılarını artırır. Örneğin Çiftçi tarafından yapılan kapsamlı bir çalışmada dikolorometan esaslı hekzagonal bor nitrür ve silika nanoparçacıkları içeren nanoakışkanların havuz kaynama ve yoğuşma ısı transferi karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Hacimce 3 farklı derişimde hazırladığı nanoakışkanlar için kaynama eğrileri, ısı akısıyla basıncın değişimleri ve ısı transfer katsayılarını hesaplanmış, ayrıca diklorometan kullanarak hazırladığı her bir iş akışkanı için viskozite ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda hekzagonal bor nitrür içeren nanoakışkan için kaynama ve yoğuşma ısı transfer katsayılarında sırasıyla %38,1 ve %17,1; silika nanoparçacıkları içeren nanoakışkan için ise kaynama ve yoğuşma ısı transfer katsayılarında sırasıyla %26,1 ve %28'e varan oranlarda artış sağlandığını göstermiştir [1]. Başka bir çalışmada Ham ve diğerleri [2] pürüzlülüğün doğrudan kritik ısı akısını etkilediğini ve daha az pürüzlülüğe sahip yüzeyde kritik ısı akısının daha iyi olduğunu ortaya koymuşlar. Ayrıca daha az pürüzlü yüzeyde iş akışkanı

olarak nanoakışkan kullandıklarında kritik ısı akısında iyileşmenin iki kata çıktığını bildirmişlerdir. Havuz kaynama konusunda deneyimler için basınç etkisini araştıran çalışmalarla da karşılaşırız. Liu ve diğerleri [3] vakum basıncı başta olmak üzere düşük basınçlarda nanoakışkanla yapılan deneylerde ısı transfer katsayısında ve ısı akısında sırasıyla %130 ve % 200 oranlarında iyileştirmeyi gözlemlemişler ancak basınç arttıkça olumsuz etkileri bildirmişlerdir.

Çalışmanın geçmişi

Nanoakışkan kullanarak ısı performansını geliştirmeyi araştıran çalışmalarda, nanoparçacıkların malzemeleri ve derişim oranı, yüzey pürüzlülüğü, ıslanabilirlik, yüzeydeki temas açısı, yüzey aktif madde, yüzeyle temas alanının artırılması gibi incelenmesi gereken birçok etken ile karşılaşılır. Aşağıda bu çalışmaların bazısı özet olarak sunulmuştur:

Gupta ve diğerleri, hacimce %0,001, %0,005, %0,01 ve %0,05 oranlara sahip alümina-su nanoakışkanı üzerinde havuz kaynama ısı transferi karakteristiklerini sayısal analizlerle incelemişlerdir. İki boyutlu kaynama hücresi modeliyle temsil edilen ısıtıcıya farklı ısı akıları uygulayarak ısı transfer katsayısındaki değişimleri atmosferik ve vakum olarak iki farklı basınç şartları altında araştırmışlardır. Isı akısı sabit tutularak hem basıncın hem de nanoparçacık derişiminin artmasıyla ısı transfer katsayısında artış olduğunu bildirmişlerdir. Kaynama ısı transferinde görülen ve nanoparçacık derişimine bağlı olan bu artışın sebebini su ile karşılaştırıldığında nanoakışkanın ısıl iletkenliğinde gerçekleşen artış ile açıklamışlardır. Zamana bağlı Euler çok fazlı akış modelini çözüm metodu olarak seçmişler ve sayısal analizler sonucunda bulduklarını deneysel verilerle doğrulamışlardır [4].

You ve diğerleri, düz yüzeyli bir ısıtıcı kullanarak faklı derişimlerde (0,001 g/l, 0,005 g/l, 0,01 g/l, 0,025 g/l ve 0,05 g/l) Alümina nanoparçacıklarıyla su temelli nanoakışkan hazırlamış ve havuz kaynama şartlarında kritik ısı akısı değişimlerini araştırmışlardır. 60℃ doyma sıcaklığında nanoakışkanlar ve saf su için kaynama eğrilerini elde ettikten sonra nanoakışkan kullanıldığı durumda kritik ısı akısında %200 oranlık bir artış elde edilebileceğini bildirmişlerdir. En az nanoparçacık derişimine (0,001g/l) sahip olan nanoakışkan ile kritik ısı akısının %24 oranında arttığını göstermişlerdir. Son olarak saf suya

kıyasla nanoakışkan kullandıkları analizlerde kaynama kabarcıklarının ortalama boyutunun arttığına rağmen kabarcık oluşum frekansının düştüğünü saptamışlardır [5].

Modi ve diğerleri, hacimce %0,005 ve %0,01 konsantrasyon oranlarına sahip alümina nanoparçacıkları içeren su temelli nanoakışkanlar hazırlamışlar ve tekil kaynama kabarcığı üretimi esaslı araştırma yöntemi kullanarak saf su ile nanoakışkan için havuz kaynama karakteristiklerinin değişimlerini incelemişlerdir. Deneylerini düz ve nanoparçacık birikmiş iki farklı yüzey üzerinde yapmışlar ve kaynama kabarcık oluşum parametrelerini anlık olarak incelemişlerdir. Temassız ölçüm yapılabilme özelliğine sahip olan rainbow schlieren optik tanılama yöntemi aracığıyla kaynama kabarcıklarının oluşumunu ve bu oluşum bölgelerdeki ısıl değişimleri araştırmışlardır. Saf suya kıyasla nanoakışkan kullanımıyla hem kaynama kabarcıklarının oluşum sıklığında hem büyüme süresinde hem de kabarcık çaplarında azalmayı bildirmişlerdir. Kaynama süresi uzadıkça nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyinde birikmesi ısıtıcı yüzeyinde değişikliklere yol açtığına şahit olmuşlardır. Daha sonra saf su için de aynı ısıtıcı ile deneyler yapmışlar ve bu nanoparçacık tabakasının kaynama karakteristiklerini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Son olarak saf suya kıyasla akışkandaki nanoparçacıkların ısıl gradyanının daha geniş bir alana yayıldığını anlatmışlardır [6].

Ham ve diğerleri farklı nanoparçacık konsantrasyonlara sahip nanoakışkanları pürüzlülüğü $Ra = 177{,}5\,nm$ ve $Ra = 292{,}8\,nm$ olan farklı iki ısıtıcı yüzeyde kullanarak havuz kaynama karakteristiklerindeki değişimi incelemişlerdir. Deney sonuçları nanoakışkan derişimi ve pürüzlülüğün doğrudan ilişkili olduğunu ve kritik ısı akısında önemli derecede iyileşmeyi ortaya koymuştur. Nanoakışkan derişimi arttıkça kritik ısı akısı daha az pürüzlü ısıtıcı yüzeyde %224 ;diğer yüzeyde ise %138,5 oranında iyileştirilmeye sebep olmuştur. Bununla birlikte pürüzlülüğün kaynama ısı transfer katsayısıyla da doğrudan ilişkili olduğunu ve daha az pürüzlülüğe sahip olan ısıtıcı yüzeyde daha yüksek olduğunu ispatlamışlardır. Ayrıca temas açısı ölçümleri yaparak nanoparçacık konsantrasyonunun %0'dan %0,05'e yükseldiğinde her iki ısıtıcı yüzeyde de temas açısının azaldığını bulmuşlardır. Nanoparçacık derişiminin %0,05'den daha fazla arttiği durumlarda ise temas açısının çoğaldığına şahit olmuşlardır [7].

Kim ve kim, kritik ısı akısı performanslarını ve ısı transferi iyileştirme oranlarını inceleme amacıyla TiO_2, Al_2O_3 ve SiO_2 için sırasıyla 85, 47 ve 90 nm büyüklüğündeki nanoparçacıklara sahip farklı derişimli nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlardır. Ayrıca

yüzey pürüzlülüğünü ve yüzey ıslanabilirliğinin kaynama ısı transferi karakteristiklerini nasıl etkilediğini incelemek amacıyla biri düz diğeri nanoparçacık kaplı yüzeylere sahip iki farklı ısıtıcı yardımıyla su ve nanoakışkan üzerinde deneyler yapmışlardır. Benzer çalışmalardaki gibi onlar da nanoparçacıkların eklenmesiyle kritik ısı akısının artma sonucuna varmışlardır. Diğer taraftan nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyde birikiminin bir katman oluşumuna neden olmasını ve dolaysıyla bu katmanın ısı transferi karakteristiklerinin iyileştirilmesine yardımcı olduğunu gözlemlemişlerdir. Nanoparçacık kaplı ısıtıcı yüzey ile nanoakışkan çözeltileri kullanan deneyleri ile de yüzey ıslanabilirliğinin ve yüzey pürüzlülüğünün ısı transferi performansını etkin bir derecede iyileştirdiğini göstermişlerdir [8].

Kwark ve diğerleri, düz bir ısıtıcı yüzeyde saf su ve düşük konsantrasyonlarla hazırlanmış alümina nanoakışkanı için ısıtıcı yüzey boyunca nanoparçacık tabakanın oluşumuna neden olan etkenlere ve bu tabakanın havuz kaynama ısı transferi karakteristikleri nasıl ekileceğine odaklanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda gözlemledikleri mikrotabaka buharlaşmasının ısıtıcı yüzeyinde nanoparçacıkların birikmesine neden olduğunu ifade etmişlerdir [9].

White ve diğerleri, Isıtıcı yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmak amacıyla kaplanmış veya düz yüzeylerde ZnO nanoakışkanı ve saf su kullanmışlar hem de kaynama ısı transferi karakteristiklerinin nasıl değiştirildiğini incelemişlerdir. Hazırladıkları %2,3 derişimli nanoakışkan düz bir ısıtıcı yüzeyde saf su ile karşılaştırılınca önce kaynama ısı transferinde %24 oranında iyileşmeye neden olmuş ancak zamanla nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyde birikmesi ısı transferini olumsuz olarak etkilemiştir. AFM görüntüleme tekniği ile ısıtıcı yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüş bu değerlerde artışı bildirmişlerdir [10].

Liu ve diğerleri, nanoakışkan ve saf su kullanarak geniş bir çalışmada başta farklı basınçlar uygulamak olmak üzere havuz kaynama ısı transferi karakteristiklerini ve temas açısını incelemişlerdir. Önce kritik ısı akısı ve kaynama ısı transfer katsayısındaki değişimleri hem doyma hem de doyma altındaki sıcaklıklarda incelemişlerdir. Sonra yaptıkları farklı deneylerde basınç ve ısı transferi ilişkisini araştırıp kritik ısı akısı ve ısı transfer katsayısının farklı basınçlarda kayda değer şekilde değiştiğini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları deneylerde su ve nanoakışkanı karşılaştırılınca atmosferik basınçta ısı transfer katsayısında %60 ve ısı akısında %63 artış gözlemlemişlerdir. Daha sonra basıncı vakum basıncına (7,4 kPa)

ayarlayarak suya kıyasla nanoakışkanla yapılan deneylerde ısı transfer katsayısında ve ısı akısında sırasıyla %130 ve % 200 oranlarında dikkat çekici artışları saptamışlar ancak basıncın artmasıyla bu iki değerin azalmasını da bildirmişlerdir. Ayrıca farklı nanoakışkan derişimleriyle deneyler yaptıktan sonra en iyi ısı transfer katsayısı ve ısı akısına özel derişimi optimum olarak kaydetmişlerdir. Son olarak temas açısı ölçümleri yaparak yüzey karakteristiğinin kaynama ısı transferi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [11].

Kwark ve diğerleri, havuz kaynama ısı transfer karakteristiklerini incelemek amacıyla nanoparçacık kaplı yüzeyler üzerinde su ve nanoakışkan için deneyler yapmış kaynama eğrilerini oluşturmuş ve kritik ısı akısındaki değişimleri gözlemlemişlerdir. Nano akışkan olarak alümina-su/ etanol akışkanı kullandıkları bu çalışmada yüzey ıslanabilirliğini de temas açıları ölçerek araştırmışladır. Sonuç olarak her ne kadar nanokaplama kritik ısı akısını arttırsa da nanoakışkandaki nanoparçacıkların katılımıyla da yüzeyde oluşan tabaka katmanının ısı akısını düşürdüğünü bildirmişlerdir [12].

Manetti ve diğerleri, deneysel bir çalışmada saf su ve Al_2O_3-saf su nanoakışkanının havuz kaynama prosesinde ısı transfer katsayısına odaklanmışlar. Hazırladıkları %0,0007 ve %0,007 nanoparçacık konsantrasyonuna sahip iki nanoakışkanla ve pürüzlülüğü ($Ra = 0{,}05\ \mu m\ ve\ Ra = 0{,}23\ \mu m$) iki ısıtıcı yüzeyde pürüzlülüğünün havuz kaynama karakteristiğine olan etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Kullandıkları nanoparçacıklar ortalama 10 nm büyüklüğüne sahip olan bu deneylerde ısı akısı aralığını 100-800 KW/m^2'e ayarlamışlardır. Saf suya kıyasla nanoakışkanla yaptıkları analizlerde ısı transfer katsayısında daha az pürüzlülüğe sahip yüzeyde %75 oranında ve pürüzlülüğü daha büyük olan yüzeyde %15 oranında artış sonucu elde etmişlerdir [13].

Kumar ve diğerleri, Kritik ısı akısı değişimlerini araştırmak amacıyla alümina, demir oksit ve bakır oksit ile derişimleri %0,01 ile %0,1 arasında değişen su temelli nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlardır. 100°C sıcaklık ve 0,10325 MPa basınçta yaptıkları deneylerde kritik ısı akısını ölçmüş her akışkana ait kaynama eğrilerini oluşturmuşlardır. Buldukları değerleri birbiriyle karşılaştırdıktan sonra derişim oranı arttıkça kritik ısı akısının arttığını gözlemlemişler Ancak optimum bir konsantrasyon oranından sonra ısı akısında azalma eğilimini açıklamışlardır. Sonuç olarak artan yüzey ıslanabilirliğini, nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyde birikmesini ve ısı transfer katsayısını kritik ısı akısındaki artışın esas sebepleri olarak bildirmişlerdir [14].

Reddy ve Venkatachalapathy, deneysel bir çalışmada kritik ısı akısı ile kaynama ısı transferi üzerine olan etkileri incelemek amacıyla, Zeta potansiyel ölçümleriyle alümina ve bakır oksit nanoparçacıklarından derişimleri %0,01 ile %0,1 arasında değişen su temelli hibrid nanoakışkan hazırlamışlardır. Bu deneyler sonucunda hibrid nanoakışkanların kritik ısı akısı değerlerinin tek bileşenli (su ve nanoparçacık) akışkandan daha yüksek olduğunu saptamışlar. %0,1 konsantrasyon ile hazırlanan hibrid bir akışkanın kritik ısı akısında %49,84 oranıyla en yüksek iyileştirmeye sahip olduğu açıklanmıştır. Ayrıca bu akışkanın ısı iletim katsayısında %15,72 oranında bir iyileştirmeyi sağladığını bildirmişlerdir. %0,01 ve %0,3 derişim oranlarında hazırlanan iki diğer hibrid nanoakışkan sırasıyla %7,1 ve %6,72 oranlarında ısı transfer katsayısında katkıda bulunduklarını gözlemlemişlerdir. Deneylerinde statik temas açılarını da inceleyen bu araştırmacılar 27℃'de saf su, bakır oksit nanoakışkanı, alümina nanoakışkanı ve hibrid nanoakışkan için sırasıyla 82.74°, 72.71°, 70.91° ve 58.41° temas açısı bildirmişlerdir. Nanoparçacık derişiminin artmasıyla bakır oksit nanoakışkanının statik açı değerlerinin arttığına rağmen alümina nanoakışkanının statik temas açısının azaldığını saptamışlardır [15].

Park ve diğerleri, alümina-su nanoakışkanının yüzey ıslanabilirlik özelliklerini ve kaynama kabarcıklarının karakteristiğini incelemek amacıyla X-ray görüntüleme tekniğiyle deneyler yapmışlardır. Derişim oranları ağırlıkça %0,05, %0,1 ve %0,5 olan hazırladıkları nanoakışkanlar üzerinde deneyler başlamadan önce statik temas açısı ölçümleri yapmışlar ve hidrodinamik boyutlarını DLS yöntemiyle elde etmişlerdir. Nanoakışkan derişimi arttıkça kabarcık oluşum hızını ısıtma işleminden önce 1,4 kat arttığına rağmen işlemden sonra 0,78 kat azaldığını bildirmişlerdir. Nanoparçacıkların çökelmesi başladıktan sonra ısıtıcı yüzeyde biriken nanoparçacıkların yüzey morfolojisini değiştirdiğine, dolaysıyla da akışkanın kabarcık oluşum ve yüzey ıslanabilirlik karakteristiğini değiştiğine şahit olmuşlardır. Ayrıca alümina derişimi arttıkça ısı transfer karakteristiklerini olumsuz yönde etki bıraktığını bildirmişlerdir [16].

Bang ve Chang, alümina nanoparçacıkları içeren ve hacimce %0,5, %1, %2 ve %4 oranına sahip farklı dört nanoakışkan hazırlamış ve havuz kaynama ısı transferi özelliklerini düz yüzeyli bir ısıtıcıda araştırmışlardır. Nanoparçacık konsantrasyon oranının çekirdek kaynama ısı transferi, doğal taşınım ve ısı transferi katsayısı karakteristiklerini ne kadar etkileyeceğini bulmak maksat ile karşılaştırma amaç ile su ile de deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda nanoparçacıkların çekirdek kaynama ve doğal taşınım ısı transferi

özelliklerini negatif etkilediğini gözlemlemişlerdir. Aksine, nanoakışkanla yaptıkları analizlerde kritik ısı akısı için hem yatay hem de dikey doğrultulardaki büyük derecelerde iyileştirilmeyi bulmuşlardır. Birçok benzer çalışmada da karşılaşıldığı gibi, nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyinde birikmesini kritik ısı akısındaki bu artışa esas neden olarak belirtmişlerdir. Son olarak Rhosenow korelasyonları ile analizlerindeki bulduğu farklı deneysel verilerini karşılaştırdıktan sonra kayda değer derecede birbirleriyle uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir [17].

Xue ve diğerleri, deneysel bir çalışmada su temelli karbon nanotüp nanoakışkanları hazırlayıp bu nanoakışkanların kaynama ısı transferi özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmada kalorimetre olarak 25 mm çapındaki nikel kaplı bakır bir küre kullanmışlar ve %1 oranında hazırladıkları bu nanoakışkandaki karbon nanotüpler 7.5 nm yarıçapa ve 10 μm uzunluğa sahip olduğunu açıklamışılardır. Saf su ve nanoakışkanla yaptıkları deneylerde, suya kıyasla nanoakışkan kullanımıyla kritik ısı akısı, film kaynamadaki ve geçiş kaynamasındaki minimum ısı akısı (Leidenfrost noktası) değişkenlerinde artış gerçekleştiğini saptamışlardır. Nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyinde birikmesi, dolayısıyla da daha iyi ıslanabilirlik temin etmelerinin yanı sıra, genel su kaynama eğrisine kıyasla nanoakışkan için elde ettikleri kaynama eğrisinde bazı değişiklikler olduğunu gözlemlemişlerdir [18].

Kim ve diğerleri, esas akışkan olarak su kullandıkları bir çalışmada silisyum dioksit, zirkonyum dioksit ve alüminyum oksit nanoparçacıkları içeren hacimce %0,001, %0,01 ve %0,1 oranlarında farklı seyreltik nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlar ve bu nanoakışkanların havuz kaynama ısı transfer özelliklerini araştırmışlardır. Silisyum dioksit, zirkonyum dioksit ve alüminyum oksit nanoparçacıklarının boyutunu DLS tekniği kullanarak sırasıyla 20-40 nm, 110-250 nm ve 110-210 nm arasında değiştiğini saptamışlardır. Deneyler yaparak her bir nanoakışkan çözeltisi için viskozite, ısıl iletkenliğini ve yüzey gerilimi ölçümleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda saf suya kıyasla silika, zirkonya ve alümina nanoakışkanları için kritik ısı akısında sırasıyla %80, %75 ve %52 oranında iyileşme temin ettiklerini göstermişlerdir. Ayrıca Kaynama işlemi sonrası temas açısı ölçümleri yapmışlar ve düz bir yüzey üzerindeki temas açısını nanoakışkanlar için incelemişler ve sonuç olarak açıların saf suya kıyasla daha küçük olduğunu, dolayısıyla da nanoakışkan kullanıldığında ıslanabilirliğin arttırılabileceğini bildirmişlerdir [19].

Shi ve diğerleri, yatay düz bir plaka üzerinde alümina-su ve demir-su nanoakışkanlarının kaynama ısı transfer özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmaları için sırasıyla 28 nm ve 26 nm ortalama boyutlarına sahip alümina ve demir nanoparçacıkları tercih etmişlerdir. Yaptıkları deneylerle önce nano boyuttaki parçacıkların ısıl iletkenliği değerinin arttırdığını ve dolaysıyla da kaynama ısı transferinde iyileşme temin edileceğini incelemişlerdir. İkinci olarak da yüzeye odaklanmış ve yüzey etkin faktörleri olarak tanımlanan nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyinde bazı bölgelere topladığını, üstelik yüzeydeki mevcut bazı boşlukları doldurduğunu ve bundan dolayı da bir ısıl direnç ortaya çıkardığını, oluşan bu ısıl direncin ise kaynama ısı transferini olumsuz bir yönde etkilediğini analiz etmişlerdir. Sonuç olarak da nanoakışkan hazırlanmasında daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip nanoparçacıkların seçilmesiyle ve yüzey etkilerinin kontrol altında tutulması şartıyla kaynama ısı transferini arttıracağını bildirmişlerdir [20].

Kim ve diğerleri, havuz kaynama ısı transferi özelliklerini incelemek amçıyla alümina-su, silika-su ve zirkonyum-su nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlardır. Hacimce %0,001, %0,01 ve %0,1 konsantrasyon oranlarında nanoakışkan çözeltileri üzerinde deneyler yaptıktan sonra elde ettikleri sonuçları saf suyun verileri ile karşılaştırmışlardır. Saf suya göre nanoakışkan çözeltilerinin kritik ısı akısı değerlerinin daha yüksek olduğunu fakat kritik ısı akısı için mantıklı değerlerin konsantrasyon oranı %0,1'ın altında olduğu şartlarda bulunduğunu raporlamışlardır. Deneysel süreç boyunca ısıtıcı yüzeyinde nanoakışkan içerisindeki nano boyuttaki parçacıkların birikmesi ve burada gözenekli bir tabaka oluşturduğundan dolayı yüzey ıslanabilirliğinin arttığını bildirmişlerdir. Isıtıcı yüzeyinin kaynama ısı transferine nasıl bir etki bırakacağını incelemek amacıyla paslanmaz çelik malzemeden yapılmış bir direnç teli ve düz bir plaka kullanmışlar ve ayrı ayrı deneyler yaptıktan sonra SEM ve EDS analizleri ile bu iki farklı yüzeyde ortaya çıkan değişimleri araştırmışlardır. Daha sonra yüzey ıslanabilirliği yorumlayabilmek için farklı konsantrasyon oranlarına sahip nanoakışkanların statik temas açılarını ölçmüşler ve saf suya göre nanoakışkan çözeltilerinde daha küçük temas açıları saptamışlardır. Başta kritik ısı akısı değerleri olmak üzere elde ettikleri sonuçları benzer çalışma sonuçlarıyla kıyaslamışlar ve buldukları sonuçların daha önceki çalışmalarla uyumlu olduğunu raporlamışlardır [21].

Liu ve diğerleri, basınç esaslı bir çalışmada %0,1, %0,2, %0,5, %1,0 ve %2,0 kütlece farklı derişimlerden hazırladıkları su-bakır oksit nanoakışkanlarının 7,4 kPa, 20,0 kPa, 31,2 kPa ve 100 kPa çeşitli basınç şartları altındaki çekirdek kaynama ısı transferi özelliklerini

araştırmışlardır. Basıncın kritik ısı akısını önemli derecede etkilediğini açıkladıkları bu araştırmada saf su ve hazırladıkları nanoparçacık içeren nanoakışkanlar ile deneyler yapmışlar ve farklı akışkanlar için kritik ısı akılarını ve ısı taşınım katsayılarını bulmuşlardır. Basıncın azalmasıyla birlikte saf suya göre nanoakışkan çözeltileri için kritik ısı akısı değerlerinin önemli ölçüde arttığını saptamışlardır. Atmosferik basınç şartları altında yaptıkları deneyler sonucuna göre saf su yerine nanoakışkan kullanınca kritik ısı akısı ve ısı transfer katsayısı değerlerinde sırasıyla %50 ve %25 oranlarında artış olduğunu, basıncın 7,4 kPa düştüğü durumda ise bu artış rakamlarının sırasıyla %150 ve %100 oranına yükseldiğini bildirmişlerdir. Daha küçük derişime sahip nanoakışkan çözeltileri ile deneyler yapınca ise derişim oranı artmasıyla kritik ısı akısı ve ısı transfer katsayısı değerlerinde çok küçük artışlar gerçekleştiğine şahit olmuşlardır. Kaynama ısı transferini nanoparçacık konsantrasyon oranının nasıl etkilediğini inceledikleri deneyler sonucunda ise ısı transfer katsayısı ve kritik ısı akısı değerlerinin, ikisinde de en yüksek artış miktarlarını sağlayan optimum bir nanoparçacık konsantrasyonu olduğunu ve bu değerin kendi çalışmalarındaki oranının %1 olduğunu raporlamışlardır [22].

Liu ve Liao, su esaslı ve alkol esaslı nanoakışkan çözeltilerini silisyum dioksit ve bakır oksit nanoparçacıklarını kullanarak hazırlamışlar ve ağırlıkça %0,5 oranında hazırlanmış olan bu nanoakışkan çözeltilerinin havuz kaynama karakteristiklerini araştırmışlardır. Ayrıca SDBS yüzey aktif maddesi kullanarak nanoakışkanlar içindeki nanoparçacıkların topaklanmasını ve çökelmesini geciktirmeye çalışmışlardır. Sürekli ısıtılan düz bakır bir yüzeyde oluşturdukları kaynama şartları altında yüzey sıcaklığının 112℃'yi aştığı durumlarda ısıtıcı yüzeyinde nanoakışkan içerisindeki parçacıkların birikmeye başladığını ancak gerçekleştirdikleri deneyler sonucunda karalı bir çekirdek kaynama rejimi elde etmekte başarısız olduklarını raporlamışlardır. Nanoparçacıkların ısıtıcı yüzey üzerinde düzenli bir şekilde birike bilmediğinden gözenekli bir yapı oluşumunu çekirdek kaynama rejimindeki bu kararsızlığın nedeni olarak bildirmişlerdir. Çoğu diğer araştırmaların tersine, suya kıyasla hazırlamış oldukları nanoakışkan çözeltilerinin kaynama ısı transferi özelliklerini daha iyileştirilmiş olmak yerine biraz daha kötü durumda olduğunu (herhangi bir iyileştirme sağlamadığını) saptamışlardır. Buna rağmen nanoakışkanları iş akışkanı olarak kullanınca nanoparçacıkların ısıtıcı yüzeyinde oluşturduğu ince katman sonucunda, kritik ısı akısında önemli derecede artışa sebep olduğunu bildirmişlerdir [23].

Coursey ve Kim, nanoakışkanla yapılmış bir çalışmada yüzey ıslanabilirliğinin kaynama ısı transferi karakteristiklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Yapmış oldukları araştırmada kritik ısı akısındaki değişimleri incelemek amacıyla, konsantrasyonları %0,0001 ile %10 g/l arasında değişen, su ve etanol temel akışkan olarak kullanarak alümina nanoparçacıkları içeren farklı seyreltik nanoakışkanlar hazırlamışlar. Önce ısıtıcı yüzey özelliklerini sabit tutup her bir akışkanla deney yaptıktan sonra üç aşamada akışkanlar için yüzey temas açısı ölçümleri yapmışlardır. Ayrıca oksidasyon işlemleri ile ısıtıcı yüzeyi üzerinde değişiklikler yaparak kaynama ısı transferi özelliklerinin ısıtıcı yüzey özellikleriyle nasıl değiştirileceğini araştırmışlar ve kaynama eğrilerini hem su hem etanol hem de hazırlamış oldukları nanoakışkan çözeltileri için çizmişlerdir. Deneyler sonucunda kritik ısı akısının artan nanoparçacık konsantrasyonlarıyla orantılı olarak arttığını ve en büyük artış oranının %37 olduğunu raporlamışlardır. Nanoakışkan kullandıkları deneylerde gözlemledikleri kritik ısı akısı değerlerindeki bu artışın sebebini ise temel akışkanlara kıyasla nanoakışkanın ısıtıcı yüzeyindeki ıslanabilirliğinin daha fazla olduğu olarak izah etmişlerdir [24].

Buongiorno ve diğerleri, nanoakışkan çözeltilerinin hafif su reaktörlerinde tank içi tutma kapasitesini artırmasını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Alümina nanoparçacıklarıyla 3 farklı konsantrasyonda (%0,001, %0,01 ve %0,1) nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlar ve reaktör sistemi dışında bu çözeltilerle ayrı bir nanoakışkan enjeksiyon sistemi yaratmışlardır. Sonuç olarak atık(çürük) ısı atımı kritik ısı akısında %40 oranında bir artış elde ettiklerini bildirmişlerdir [25].

Xiao ve diğerleri, nanoparçacıkların oransal dağılımını ve kaynama yüzeyindeki çekirdek oluşumları temel alarak nanoakışkanlardaki havuz kaynama ısı transfer özellikler için oransal bir model yaratmışlar. Geliştirdikleri model ile kaynama ısı transferindeki ısı akısının hangi parametrelerden etkilendiğini araştırmışlar ve sonuç olarak nanoparçacık boyutu, nanoakışkanın sıcaklığı, nanoparçacıkların hacimsel konsantrasyon oranı ve temel akışkanın özellikleri gibi parametrelerin ısı akısını etkilendiğini bildirmişler. Bu model ile yaptıkları analizler doğrultusunda nanoakışkan çözeltileri proseslerinde normal akışkanlara kıyasla doğal taşınım sürecinin daha uzun sürdüğünü ve nanoparçacıkların akışkan içerisine katılmasının kaynama ısı transferini kötüleştirdiğini göstermişlerdir. Son olarak artan nanoparçacık konsantrasyon oranına bağlı olarak kaynama ısı transfer katsayısında düşüş olduğunu ifade etmişler ve deneysel analizleriyle geliştirdikleri modeli esas alan bu tahminlerini doğruladıklarını raporlamışlardır [26].

Dominguez-Ontiveros ve diğerleri, nanoakışkanların kaynama ısı transferi özelliklerini belirlemek amacıyla saf su temelli nanoakışkan için havuz kaynama deneyleri yapmışlardır. Deneysel çalışma için 7,5 cm × 26 cm × 28 cm boyutlarında camdan yapılmış dikdörtgen bir test hücresi kullanmışlardır. Alümina nanoparçacıkları açısından hacimce %0,001 ve %0,002 derişim oranlarında hazırlanan bu nanoakışkanlar ile hem kaynama ısı transfer karakteristiğini hem de kaynama kabarcıkların oluşumunu incelemişlerdir. Ölçüm tekniği olarak hareketli parçacık görüntü velosimetresi kullanarak nokta sıcaklık ve hız alanı ölçümleri incelemişler ve kaynama esnasında oluşan kaynama kabarcıklarının oluşum hidrodinamiğini araştırmışlardır. Yapmış oldukları ölçümler sonucunda nanoparçacık konsantrasyonu ve duvar sıcaklığı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir [27].

Kim ve diğerleri, su esaslı hacimce %0,01 oranında alümina ve titanyum nanoakışkanları hazırlamış bakır malzemeli disk tipi bir ısıtıcıda atmosferik basınç ve doyma sıcaklığı koşullarında kaynama ısı transferi karakteristiklerini incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda nanoakışkan çözeltilerinin kritik ısı akısını olumlu yönde etkileyerek artışa sebep olduğunu ifade etmişler ve bunun nedenini de akışkan içerisindeki nanoparçacıkların disk üzerinde birikmesi olarak bildirmişlerdir. Ayrıca farklı sıcaklık şartlarında çeşitli akışkan türleri için temas açılarını ölçmüşler, titanyum, alümina ve saf su nanoakışkanları için statik temas açılarının sırasıyla 14°, 15° ve 78° olduğunu gözlemlemişlerdir. Daha sonra her bir akışkan için kaynama eğrilerini oluşturarak elde edilen sonuçları kıyaslamışlardır. Son olarak hem saf su hem de nanoakışkan çözeltilerinin kaynadığı yüzeylerin SEM görüntülerini almışlar ve oluşan nanoparçacık katmanının kalınlığını ölçmüşlerdir [28].

Yukarıdaki çalışmalarda görüldüğü gibi nanoparçacıklar elde edilen nanoakışkanın termofiziksel özelliklerini geliştirerek kabarcıkların sayısını ve oluşumunu artırır ve onların yüzeyden ayrılmasını hızlandırır. Isıtıcı yüzeyin kendisinin de kabarcıkların oluşumunda ve ayrılmasında etkili olduğu yukarıdaki araştırmalarda kanıtlandığından, bu çalışma farklı ısıtıcı yüzeylerde ve çalışma akışkanı olarak hem saf su hem de alümina nanoakışkan (%1) kullanılarak ısı transferi performansları arasındaki farkları araştırmaya ve karşılaştırmaya çalıştı. Hem su hem de alümina nanoakışkan için düz bir ısıtıcı yüzey, üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzey ve yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzey olmak üzere üç farklı ısıtıcı yüzey kullanılmış ve CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) simülasyonu kullanılarak buhar hacim konsantrasyonları ve hız dağılımları sayısal olarak incelenmiştir.

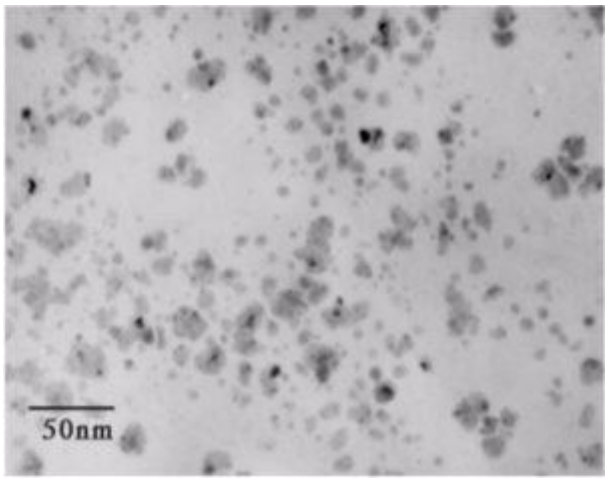
2. NANOAKIŞKANLAR VE KAYNAMA – YOĞUŞMA ISI TRANSFERİ

2.1. Nanoakışkanlar

Soğutma ve ısıtma, hem mikro düzeyde (bilgisayar çiplerinin soğutması gibi) hem de makro düzeyde (araba motorlarının soğutması gibi) bugün her zamankinden daha fazla birçok endüstriyel teknolojinin en acil ihtiyaçlarından biridir. Ancak hava, su, etilen glikol ve yağ gibi geleneksel ısı transfer akışkanları, katılara kıyasla çok düşük ısıl iletkenlik gösterir. Bir ısı geçiş mekanizması olan taşınımla ısı transferi bu sistemlerde çok temel bir rol oynamaktadır. Bu mekanizmada ısı transferini iyileştirmek için akışkanın termofiziksel özellikleri başta olmak üzere, sınır şartları, akış türü ve bazı diğer parametreleri değiştirmek olası yolların birkaç örneğidir. Katı parçacıklar ekleyerek akışkanların zayıf termal iletkenliğini artırmak için yapılan çalışmalar, bir asırdan fazla bir süre önce, James Clerk Maxwell'in heterojen katı parçacıkların elektriksel iletkenliğine ilişkin teorik bir model geliştirmesiyle başladı. O zamandan beri, katı parçacık ve akışkan karışımlarının termal iletkenliği araştırılırken klasik Maxwell modeli uygulanmaktadır. Isı transferi mekanizması açısından ise özellikle son yıllarda sayısı günden güne artan ısı transferi iyileştirme araştırmalar ve çalışmalarda metal oksitler başta olmak üzre katı haldeki küçük parçacıklar geleneksel iş akışkanları içerisine karıştırılarak akışkanın ısıl iletkenliğinin iyileştirilmesini temin etmektedirler. Akışkan içerisine bu iletkenliği yüksek mikron boyuttaki katı parçacıkların eklenmesi ısı transfer performansının iyileştirilmesine büyük ölçüde katkıda bulunsa da işletim esnasında göz ardı edilemez sorunlara da sebep olur. En büyük sorun ise, akışkanlarda çok hızlı bir şekilde çökmeleridir. Ayrıca aşınmaya, tıkanmaya ve ek basınç düşüşlerine de neden olurlar. Ayrıca, bu süspansiyonların termal iletkenliklerinde kayda değer iyileştirmeler elde etmek için yüksek parçacık konsantrasyonları gereklidir. İlk başlarda bu mikro parçacıkların kullanım alanı sadece araştırmalarıyla sınırlı kaldığı için bu sorunu aşmak çok zor değildi ancak teknolojinin hızla gelişmesiyle ve endüstride, özellikle soğutma ve ısıtma sistemlerinde, daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip akışkanlara duyulan ihtiyaçtan dolayı daha fazla mikro parçacık üretmek sorununa bir çözüm bulmak artık bir şarta dönüştü. Bu çözüm ise daha fazla mikro parçacık üretmekle değil günün teknolojisi beraberinde getirdiği daha küçük parçacıklar üretimi, yani nanoparçacıkların ortaya koyulması ile çözüldü. Genellikle iş akışkanı olarak saf su veya etil alkol ile modern teknolojinin sunduğu nano boyuttaki bu katı parçacıkların homojen olarak karıştırılmasıyla hazırlanan bu süspansiyonlara nanoakışkan adı veriliyor. Nanoakışkanları hazırlamak için

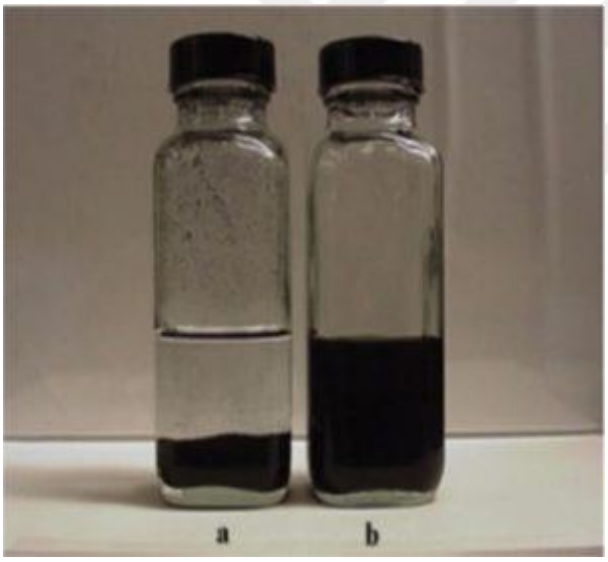
sırasıyla iki aşamalı ve tek aşamalı yöntemi olarak adlandırılan iki ana prosedür vardır. İki aşamalı yöntem en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Önce nanoparçacıklar, nanolifler, nanotüpler veya diğer nanomalzemeler kimyasal veya fiziksel işlemlerle kuru tozlar olarak üretilir. Daha sonra, nano boyutlu toz, yoğun manyetik kuvvetli çalkalama, ultrasonik çalkalama, yüksek gerilimli karıştırma, homojenleştirme ve bilyeli öğütme gibi işlemlerden biri ile ikinci aşamada temel akışkana karıştırılır. Bu yöntem, nanoakışkanları büyük ölçekte üretmek için en ekonomik yöntemdir, çünkü nano toz sentez teknikleri halihazırda endüstriyel üretim seviyelerine kadar ölçeklendirilmiştir. İki aşamalı yöntem beraberinde nanoparçacıkların akışkana daha homojen karıştırılmasını ve bu homojenliğin kontrol edilebilmesini getirdiği için ortaya daha kararlı nanoakışkan koymaktadır.

Yüksek yüzey alanı ve yüzey aktivitesi nedeniyle, nanoparçacıklar topaklaşma eğilimindedir. Bu yöntem ile kararlı nanoakışkanlar hazırlamanın zorluğu nedeniyle, tek aşamalı yöntem de dahil olmak üzere nanoakışkanlar üretmek için birkaç gelişmiş teknik geliştirilmiştir. Tek aşamalı yöntemde, parçacıkları sıvı içinde aynı anda yapmak ve dağıtmaktan oluşur. Bu yöntemle nanoparçacıkların kurutulması, depolanması, taşınması ve dağılması gibi işlemlerden kaçınılır, böylece nanoparçacıkların topaklaşması en aza indirilir ve akışkanların kararlılığı artırılır. Tek adımlı işlemler, düzgün dağılmış nanoparçacıklar hazırlayabilir ve parçacıklar, aynı anda temel akışkan içinde kararlı bir şekilde süspanse edilebilir. Tek adımlı fiziksel yöntem nanoakışkanları büyük ölçekte oluşturamaz ve maliyeti de çok yüksektir, bu nedenle alternatif tek adımlı kimyasal işlemler hızla gelişmektedir. Tek adımlı yöntem kullanılarak hazırlanan bir nanoakışkanın bir örneği Resim 2.1'de verilmiştir.



Resim 2.1. Etilen glikole doğrudan buharlaştırmayla üretilen bakır nanoparçacıklarının parlak-alan TEM mikroskobik resmi [29]

Nanoakışkanlarla ilgili en önemli konulardan biri, nanoparçacık süspansiyonunun kararlılığıdır, ki bu da doğrudan yüzey gerilimiyle ilgilidir. Nanoparçacıkların çökelip yeniden birleşmesi, mikro kanalların tıkanmasına ve ayrıca nanoakışkanların termal iletkenliğinin azalmasına neden olur. Çökelen parçacıkların yeniden birleşmesini engellemek, nanoparçacıkların nanoakışkan çözeltisinde asılı kalma süresini artırmak ve yüzey gerilimini azaltmak için ekonomik bir olası çözüm, aynı zamanda dağıtıcılar olarak da adlandırılan yüzey aktif madde kullanmaktır. Yüzey aktif maddeler, hidrofobik bir kuyruk kısmından, genellikle uzun zincirli bir hidrokarbondan ve bir hidrofilik polar baş gruptan oluşur. Yüzey aktif madde, bazen ıslanabilirlik olarak bilinen iki malzemenin temasını arttırmak için kullanılır. Bu madde seçimi hem temel akışkana hem de çalışma şartlarına bağlıdır ve uygun madde bulunduktan sonra süspansiyona eklenmesi gereken doğru bir konsantrasyon oranına karar vermek büyük öneme sahiptir. Resim 2.2'de, uygun yüzey aktif madde kullanımının nanoparçacık çökmesi üzerindeki etkisini görebiliriz.



Resim 2.2. Yüzey aktif madde içeren ve içermeyen Karbon Nano-Tüp (CNT) nanoakışkanları [29]

Sözen ve diğerleri, yaptıkları çalışmada neden ısı transferi nanoakışkan kullanımıyla iyileştiriliyor sorusunu şu şekilde anlatmışlar [30]:

- Sıvılarla kıyasla katılar daha yüksek ısı iletim katsayılarına sahip oldukları için nanoparçacık olarak bir temel akışkana katılınca akışkanın ısı iletim katsayısını artırır.
- Akışkan içerisine nanoparçacık katılınca hem özgül ısı hem de etkin ısı transfer alanı artar.

- Katı nanoparçacıkla temel akışkan içinde birbirleriyle etkileşime başlayıp çarpışınca türbülans artar ve ayrıca akışkan akımıyla akışkan yüzeyi arasındaki yüzey temas alanı da genişler.

Bir nanoakışkan hazırlanırken nanoparçack tercihinde temel özellik ısıl iletkenliktir, o yüzden de olduğundan dolayı Zn, Fe ve Cu gibi metallar veya Al_2O_3, CuO, FE_2O_3 gibi yüksek metal içeren metal oksitler ısıl iletkenliklerinin daha yüksek olduğu için daha çok tercih edilir ancak son zamanlar karbon nanotüp ve seramik gibi materialler de kullanılmaya başlamışlardır.

Hazırlanmış nanoakışkanın termofiziksel özellikleri sadece nanoparçacıkların özelliklerine değil, aynı zamanda içerisine nanoparçacıkların karıştırılacağı temel akışkanın türüne de bağlıdır. Temel akışkan olarak saf su her ne kadar yaygın tercih edilse de uygulanılacak sisteme uygun olabilmek amacıyla mineral yağlar, etilen ve etilen glikol gibi farklı akışkanlar da temel akışkan olarak kullanılabilmektedir. Bu bağlamda nanoparçacıklar ve temel akışkanın yeterli kimyasal etkileşimleri ve homojen ve kararlı bir şekilde karışabilmesi dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardandırlar.

Daha çok akışkanın hareketli olduğu durumlarda karşılaşılan tortu oluşma problemi bir nanoakışkan çözeltisinde sistemdeki parçaları olumsuz etkilediği ve akış karakteristiğine zarar verdiği için hiç istenilen bir şey değildir. Bu problemi çözmek için nanoakışkana üçüncü önemli bileşen olarak eklenen yüzey aktif maddelerin nanoakışkan çözeltisini önemli derecede etkilediği birçok çalışmada ispat edilmiştir [31, 32, 33, 34, 35]. Daha önce de bahsedildiği gibi bu maddeler hem yüzey gerilimini azaltarak daha kararlı nanokışkan çözeltisi oluşturur hem de nanoparçacıkların daha üzün süre asılı kalmasına yardımcı olup çökelmeyi erteler ve çökelen nanoparçacıklarının tekrar bir araya gelip yeni parçalar (tortu) oluşturmasına engel olur. Kimyasal yapılarına göre bu maddeler dört ana grupta yer almaktalardır: amfoterik, katyonik, noniyonik ve anyonik. Isıl sistemlerde nanoakışkan çözeltileri hazırlamasında çok yaygın şekilde kullanılan yüzey aktif maddelerden Triton X-100, SDS ve SDBS birkaç örneği sayılabilir.

2.1.1. Nanoakışkanlarda termofiziksel özellikler

Bir malzemenin ısıl karakteristikleri, termodinamik hal değişimleri, ısı depolama ve ısı transferi ile ilgili tüm özellikleri kendine özeldir ve bu özelliklerin hepsi bir arada termofiziksel özellikler adlandırılır. Bu özellikler içinde ısıl karakteristikleri olarak en başta özgül ısı ve ısı iletim katsayısı gelir ve termodinamik hal değişimleriyle ilgili en önemli özellikler basınç, sıcaklık ve özgül hacım olarak düşünülebilir. Genellikle katı halinde olan ve daha yüksek termofiziksel özelliklere sahip nanoparçacıklar bir temel akışkana eklenip bir nanoakışkan çözeltisi hazırladığında o akışkanın özgül ısı, ısı iletim katsayısı, yoğunluk ve viskozite gibi özelliklerinin artmasına ve eğer akışkan bir sistemde kullanılıyorsa o sistemin ısıl performansının iyileşmesine sebep olmaktadır. Bu etkileşimde kullanılan nanoparçacıkların da şekil, büyüklük ve cins gibi fiziksel özellikler, konsantrasyon oranı, sistem sıcaklığı ve basıncı, seçilen temel akışkanın türü de elde edilen nanoakışkanın nihai termofiziksel özelliklerini etkiler. Aşağıda nanoakışkan çözeltisinin bazı özelliklerinin nasıl değişildiği detaylı olarak anlatılmaktadır.

Nanoakışkanlarda ısı iletim katsayısı nasıl değişir?

Daha önce de anlatıldığı gibi bir katı sıvıya kıyasla daha yüksek ısı iletim katsayılarına sahiptir, bu yüzden de katılar nanoparçacık olarak temel bir sıvı akışkan içerisine katıldıklarında elde edilen çözeltinin ısı iletim katsayısında artışa sebep olur. Yapılan çalışmalar bu artışın nedenini nanoparçacıkların yüzeylerinde oluşan nanokatman ve bu katmanın aracılığıyla sıvı ve katı arasında bir ısıl bağın oluşturulmasıyla ifade etmişlerdir [36]. Bu doğrudan ilişki aynı şekilde temel akışkan için de geçerlidir; temel akışkanın ısı iletim katsayısı her ne kadar büyük ise bir o kadar elde edilen nanoakışkan çözeltisinin de ısı iletim katsayısı artışa yükselir. Akışkan içerisindeki nano boyuttaki parçacıkların miktarı veya başka sözle nanoparçacık konsantrasyon oranı da bahsedilen artış için geçerlidir ancak nanoakışkan çözeltisi içerisindeki derişim oranı daha yüksek rakamlara çıkınca çökelme ve tortu problemleriyle karşılaşılır ve ısıl iletkenlik düşür. Nanoakışkan çözeltisinin Isıl iletkenliğini etkileyen diğer faktör ise nano boyuttaki parçacıkların malzemesidir; metal katıların ısı iletim katsayısı katı seramiklerle kıyasla daha yüksek olduğu için elde edilen nanoakışkan çözeltisini de daha çok etkiler. Nanoakışkan çözeltisinin ısıl iletkenliğini etkileyen diğer etken ise nanoparçacıkların şeklidir. Bazı araştırmalar nanoparçacıkların şeklinin hazırlanan çözeltinin ısıl iletkenliğini nasıl etkilediğini araştırıp küresel parçacıklara

kıyasla silindirik nanoparçacıkların az da olsa daha çok artırdığını bildirmişlerdir. Nanoparçacık şeklinin ısıl iletkenliği nasıl etkilediğini araştıran Murshed ve diğerleri temel akışkan olarak su kullanarak küresel ve silindirik nanoparçacıklar ile farklı nanoakışkan çözeltileri hazırlamışlar ve ısı iletim katsayısı farkını incelemişlerdir. Araştırma sonucunda suya kıyasla silindirik nanoparçacıklar içeren nanoakışkan çözeltisinin ısı iletim katsayısını %33 artırırken içerisinde küresel nanoparçacıklar bulunduran nanoakışkanın %30 oranında yükselttiğini bildirmişlerdir [37]. Ayrıca boyut olarak daha küçük nanoparçacıklarla hazırlanan nanoakışkanların ısı iletim katsayısı daha büyük parçacıklardan hazırlanan nanoakışkanlara göre daha yüksektir çünkü nanoparçacıklar küçükleştikçe akışkan içerisinde daha serbest hareket edebiliyorlar.

Nanoakışkanda özgül ısı nasıl değişir?

İş akışkanı seçiminde önemli bir faktör olan özgül ısı, bir maddenin bir gramının sıcaklığını bir Santigrat derece yükseltmek için gereken ısı enerjisi miktarına denir. Özgül ısı kapasitesi malzemenin kendisine has olduğu için hazırlanmış bir nanoakışkan çözeltisinde de temel akışkan türü ve konsantrasyon oranına ile değişmektedir. Isıl iletkenliğin tersine nanoakışkanın boyutu veya şekli sonuç nanoakışkan çözeltisi üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı araştırmalarla raporlanmıştır [38, 39].

Nanoakışkanda viskozite nasıl değişir?

Viskozite hareket ile ilgili bir parametre olduğu için akış içeren sistemlerde çok büyük role sahip olduğu için sitemin hem basınç düşüşü ve aşınmasını etkileyen faktörleri hem de pompa türü seçimini kayda değer derecede etkilemektedir. Katı nanoparçacıkların katılımıyla hazırlanan nanoakışkanlar tartışılınca viskozitenin sabit kalmayacağı ve araştırılması gerektiği bellidir. Bu konuda yapılan araştırmalar elde edilen nanoakışkan çözeltisinin içerisindeki nanoparçacıkların konsantrasyon oranının, şeklinin, türünün ve boyutunun viskoziteyi etkilediğini göstermiştir. Akışkan akışını direkt etkilediği için, nanoakışkan çözeltisinin derişim oranın yüksek veya düşük olmasını bahsedilen parametreler için viskozite üzerinde en büyük etkiye sahip olmaktadır. Her ne kadar nanoakışkan çözeltisinin konsantrasyon aranı yüksek ise bir o kadar da viskozite yüksek olmaktadır [40]. Viskozite nanoparçacıkların boyutları ve şeklinden de benzer şekilde önemli derecede etkilenmektedir. Bünyesinde daha büyük boyutlara sahip nanoparçacıklar

içeren nanoakışkanlarda viskozite de bir o kadar büyük değere sahip olmaktadır çünkü daha küçük boyutlu katıların sergilediği özellikleri sıvı akışkana benzemektedir. Nguyen ve diğerleri yaptıkları bir çalışmada aynı derişim oranına sahip sırasıyla 36 nm ve 47 nm boyutlarında alümina nanoparçacıklarla iki farklı nanoakışkan çözeltisi hazırlamışlar ve yaptıkları deneyler sonucunda daha büyük taneciklere sahip olan nanoakışkan çözeltisinin daha büyük viskoziteye sahip olduğunu göstermişlerdir [41].

Nanoakışkanda yoğunluk nasıl değişir?

Maddenin hacim birimi başına kütlesi yani yoğunluk (hacimsel kütle yoğunluğu veya özgül kütle), bir nanoakışkanın termofiziksel özellikleri konusunda incelenmesi gereken diğer parametredir, ki değişmesi daha çok bir nanoakışkan çözeltisinin derişim oranıyla ilgilidir. Çalışmalar nanoparçacık konsantrasyon anının artmasıyla yoğunluğun arttığını ortaya koymuştur [42, 43]. Bir temel akışkana nanoparçacıklar birim hacime göre dağıtılınca, akışkan miktarında bir değişiklik olmadığına bakmayarak toplam kütle miktarında bir artış olduğundan temel akışkana kıyasla nanoparçacıklar içiren nanoakışkan daha büyük bir yoğunluğa sahip olmaktadır. Diğer parametrelere karşın sadece madde miktarına bağlı olan yoğunluk nanoparçacıkların şekli, boyutu veya türünden bağımsız olduğu söylenebilir. Aynı şekilde nanoakışkanın yoğunluğu nanoakışkan hazırlarken seçilen temel akışkanın (su, etilen glikol vb.) türünden bağımsız olduğunu da söylemek mümkündür.

2.2. Kaynama ve Yoğuşma Isı Transferi

Kaynama ve yoğuşmadaki ısı transferi taşınımla ısı transferinin bir türü olsa da bazı özelliklerinden dolayı diğer taşınımla ısı transferi türlerinden farklıdır. Bu ısı transferi türü buharlaşma gizli ısısına, akışkanının gaz ve sıvı fazlarındaki özelliklerine ve bu iki faz arasındaki ara yüzey gerilmesine bağlı olup onlardaki her bir küçük değişimle değişir. Buradaki taşınımla ısı transferi diğer ısı transferi türleriyle kıyasla daha yüksek ısı taşınım katsayıları ortaya koyduğuna rağmen, bu yüksek değerleri elde etmek için devamlı olarak iş akışkanı ile sistemin ısıtıcısı veya ısıtıcı yüzeyin arasında bir sıcaklık farkı korunmalıdır, ki bu da hem sistemin performansını etkilemekte hem de bu sistemlerin kullanımını sınırlamakta önemli bir etken olarak sayılmaktadır. Daha önce nanoakışkan konusunda da bahsedildiği gibi, kaynama ve yoğuşma konusunda da ısı transferi performansını iyileştirmek için birisi yüzey pürüzlülüğünde değişiklikler yaratmak diğeri sistemin iş

akışkanının termofiziksel özelliklerini iyileştirmek olarak iki farklı yöntemle karşılaşmaktayız. Burada bu artışın nedenlerini incelemek için önce kaynama ve yoğuşma sistemlerinde ısı transferi özellikleri anlatılır.

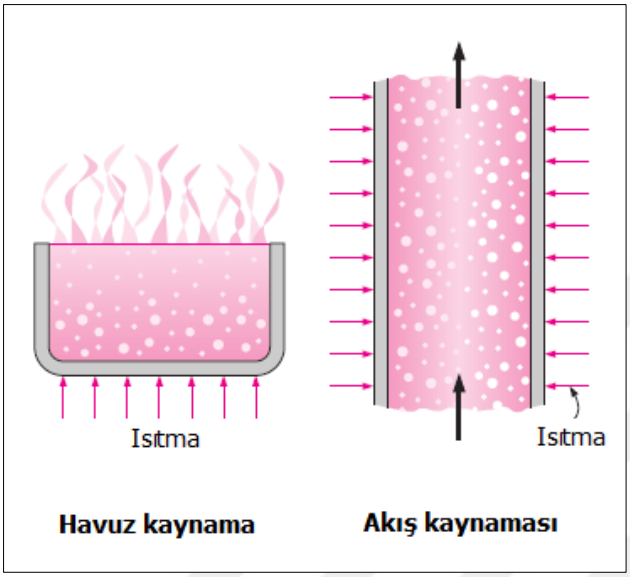
2.2.1. Kaynama ısı transferi

Kaynama basıncı sabit korunan bir işlemde bir sıvının doyma sıcaklığına kadar ısıtıldıktan sonraki faz değiştirme işleminden ibarettir. Kaynama, buharlaşma ile aynı özelliklere sahip olmasına bakmayarak aralarındaki esas fark belli bir sıcaklık için doyma basıncı ve buhar basıncı arasındaki ilişkiyle açıklanır. Buhar basıncı sıvının doyma basıncına kıyasla küçük olduğu hallerde buharlaşma gerçekleşir ve bu faz değiştirme işlemine buharlaşma denilir, ancak bu basıncın büyük olduğu durumlarda gerçekleşen faz değiştirmesi kaynama olarak adlandırılmaktadır. Başka ifadeyle eğer ısıtıcı yüzeyin sıcaklığı akışkanın doyma sıcaklığından biraz daha yüksek ise, akışkanla yüzeyin temas bölgesi olan katı-sıvı ara yüzeyde kaynama olayı ortaya çıkar. Kaynama olayı hem birçok değişken içerdiğinden hem de kabarcıkların oluşumu, ayrılması ve akışkan içerisindeki etkileşimlerinden dolayı çok karmaşık bir olaydır.

Bilinen diğer termodinamik durumlara karşın kaynamada karşılaşılan işlemler termodinamik bakışından denge şartlarında gerçekleşmemektedir ve kaynama işlemi sırasında oluşan kabarcıklar etrafını saran sıvı akışkanla denge koşullarında değildirler. Başka ifadeyle kabarcıkların içindeki buhar etrafındaki sıvıya göre farklı basınç ve sıcaklık değerlerine sahiptir. Böyle olunca sıvı ile kabarcık arasındaki farklı basınç ara yüzeyde oluşan gerilme ile denge bulur. Kabarcıkların içerisindeki buhar ile onları çevreleyen sıvı arasındaki diğer fark, yani sıcaklık farkı kaynama ısı transferi işleminin gerçekleşmesine sebep olan temel özelliktir. Eğer kabarcık içerisindeki sıcaklık etrafını çevreleyen sıvıdan daha yüksek ise buhar ısı kaybedip yoğuşup söner. Ancak kabarcık içerisindeki buharın sıcaklığı daha küçük ise kabarcıklar sıcaklık farkından gerçekleşen ısı transferinden dolayı büyüyüp kaldırma kuvvetinin etkisiyle akışkanın yüzeyine yukarı doğru hareket eder [44].

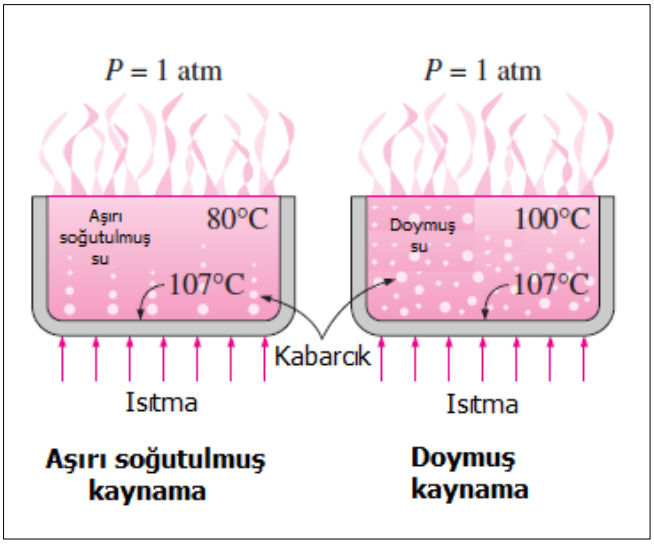
Akışkanın yığın hareketine göre kaynama ısı transferi biri havuz kaynaması diğeri akış kaynaması olarak iki farklı kaynama türüyle tanımlanmaktadır (Resim 2.3). Akışkanın yığın hareketi olmadığı şartlara havuz kaynama türü denir. Havuz kaynamada akışkanın hareketine sebep olan kaldırma kuvveti tahrikiyle oluşan kabarcıkların hareketi ve doğal

taşınım akımlarıdır. Bu tür kaynamayı gerçekleştirebilmek için durağan akışkanın içerisinde bir ısıtıcı yerleştirilir. Akışkanın yığın hareketi olduğu durumlarda karşılaşılan akış kaynaması ise bir dış etken (pompa vb.) kullanarak borudaki akışkanın veya ısıtılan bir yüzey üzerinde zorunlu bir hareket aracılığıyla ortaya çıkan kaynama ısı transferi türü olarak tanımlanır [44].



Resim 2.3. Akışkan yığın hareketine göre kaynama rejimleri [44]

Daha detaylı bir sınıflandırmada ise akışkan yığın ve doyma sıcaklığına bağlı olarak iki farklı kaynama türleri de tanımlanmaktadır; doymuş kaynama ve aşırı soğutulmuş kaynama. Aşırı soğutulmuş kaynama sıvının yığın sıcaklığı doyma sıcaklığından daha küçük olduğu durumlarda gerçekleşirken, doymuş kaynama sıvı sıcaklığı ile doyma sıcaklığı eşit olduğu zamanlar gerçekleşir (Resim 2.4) [44].

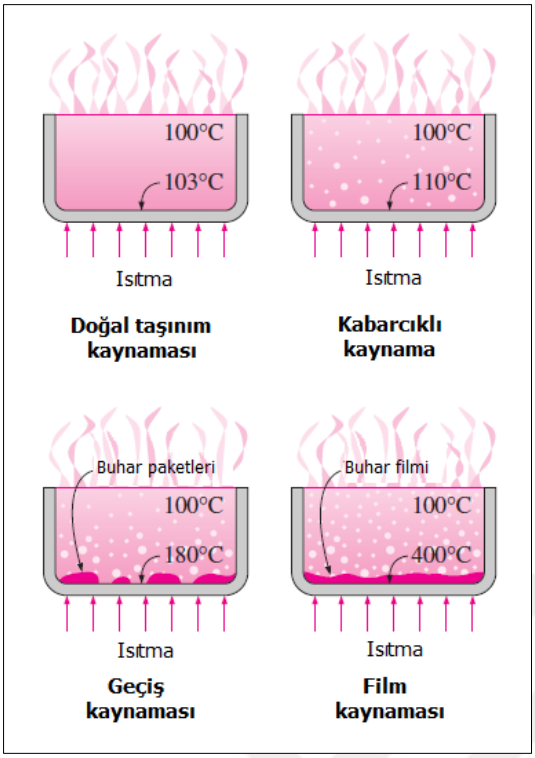


Resim 2.4. Akışkan yığın sıcaklığına göre kaynama rejimleri [44]

Kaynamanın başlangıcında ısıtıcı yüzey veya sıcak yüzey ile temas etmekte olan sıvı, doyma sıcaklığından büyük bir sıcaklığa ısıtıldığından dolayı hem buharlaşma gerçekleşir hem de sıcak yüzeyle temas eden küçük bir alana sınırlandırılmış bir bölgede kabarcıklar oluşur. Kabarcıklar, onları saran akışkana kıyasla daha yüksek sıcaklığa sahip olduklarından dolayı kabarcıklardan akışkana bir ısı transferi gerçekleşir ve bu ısı transferi sonucunda kabarcıklar yüzeyden ayrılır ayrılmaz patlayıp yok olur. Kabarcık oluşumu anlatılan durumun ters şartlarında bile gerçekleşmez, yani doyma sıcaklığı sıvı yığın sıcaklığından daha büyük olduğu taktirde bile gerçekleşen sistemde kaynama işlemi ısıtıcı yüzeye veya sıcak yüzeye yakın bir alanda ortaya çıkar, ki bu da kabarcıkların yukarı doğru hareket etmemesi anlamına gelmektedir. Kabarcıkların yukarı doğru hareket etmesi veya yükselmesi olayı sadece tüm sıvı hacmi ve doyma sıcaklığı eşit değerde (doyma sıcaklığında) olduğu hallerde ortaya çıkmaktadır.

Havuz kaynama

Daha önce anlatıldığı gibi havuz kaynamada Akışkan hareketini sebep olan bir dış etkenden ziyade oluşan kabarcıkların yukarıya doğru hareket etmesi ve doğal taşınım olmaktadır ancak bu kaynama türünün detaylarına inince çeşitli kaynama işlemleri ile karşılaşılmaktadır. Bu kaynama rejimleri doğal taşınım kaynamasıyla başlayıp daha karışık olan kabarcıklı kaynamayla devam eder ve daha sonra iki kaynama rejiminden oluşan geçiş kaynaması gerçekleşip film kaynaması aşamasına gelir (Resim 2.5).



Resim 2.5. Havuz kaynamada karşılaşılan rejimler [44]

Doğal taşınım kaynaması havuz kaynamada gerçekleşen ilk rejimdir. Bu aşamada ısıtıcı yüzey sıcaklığı akışkanın doyma sıcaklığından birkaç derece yüksek olduğu için doğal taşınım yoluyla ısıtıcı yüzeyden akışkana bir ısı transferi yapılmaktadır ve akışkanın hareketlerini belirleyen etken doğal taşınım hareketleridir. Buradaki yüzey ve akışkan arasındaki küçük sıcaklık farkı kısa bir süre devam ettikten sonra ısıtıcı sıcaklığının yükselmesiyle biter.

Isıtıcı yüzeyindeki sıcaklık artışıyla artan kabarcıklar oluşumu ve bunların yukarı doğru yükselmesi kabarcıklı kaynama rejiminin başlaması anlamına gelmektedir. Yüzey sıcaklığı ve Kabarcık oluşum ve yükselme hızı doğrudan bir ilişkiye sahipler, bu da yüzey sıcaklığını artışıyla akışkan içerisinde oluşan ve yükselen kabarcıkların artışı anlamına gelmektedir. Kabarcıklar her oluşup yükseldiğinde yüzeydeki yerlerini akışkana bırakıyorlar ve bu işlem artarda tekrarlanır. Yüzeydeki bu sürüklenmeden kaynaklanan çalkalanma ve karıştırma kabarcıklı kaynamanın bu aşamasında ısı transfer katsayısı ve ısı akısının artmasına neden olur [44]. Bu işlem sıvı sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki farkın aşım sıcaklığı da adlandırılan sıcaklık derecesine varana kadar devam eder. Bu noktada yüzeyde gerçekleşen buharlaşma çök hızlandığı sonucunda ısıtıcı yüzey kabarcıklarla kaplanıp sıvının ıslanmasına engel olur. Gerçekleşen bu işlemler neticesinde ısı akısı artma hızı fazlasıyla

düşer ve zirve bir değerde sabit kalır. Havuz kaynama ısı transferi çalışmalarında çok büyük bir öneme sahip olana bu maksimum ısı akısı değerine kritik ısı akısı denir. Bu aşamada yüksek ısı transferi katsayıları çok daha düşük aşım sıcaklılarla da elde edilebilmesinden dolayı mühendislik uygulamalarının en çök tercih ettiği rejim kabarcıklı kaynama rejimidir.

Isı akısı kritik ısı akısı noktasını bulduktan sonra buharlaşmanın arttığı bir durumda ısıtıcı yüzeyin büyük bir bölümü buharla kaplanıp sonuç olarak geçiş rejimi adıyla bilinen yeni kaynama rejimi başlar. Isıtıcı yüzeyin büyük bölgesini kaplayan veya başka bir deyişle film tabakası oluşturan buhar yüzey ile sıvı arasında yalıtıcı görevi yaparak ısı akısının düşmesinin devam etmesine sebep olur. Bu geçiş kaynama rejimi sürecinde hem kabarcık kaynama rejimi hem de film kaynama rejimi etkili olduğundan kararlı olmayan film kaynama rejimi adıyla da temsil edilmektedir [44].

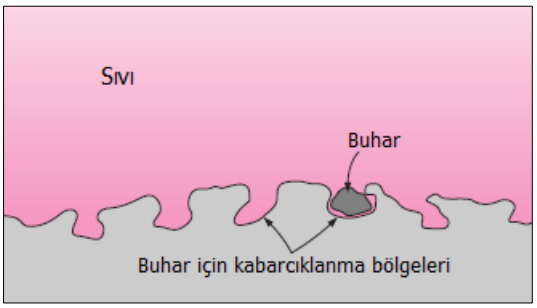
Geçiş kaynamada buharla kaplanan büyük bölge büyümeye devam edip ısıtıcı yüzey alanını tamamen örttüğü durumda kaynama rejimi artık film kaynama olarak tanımlanmaktadır. Isıtıcı ve sıvı teması buhar tabakası tarafından kesildiğinden dolayı film kaynamada karşılaşılan ısı transferi hızları küçüktür. Film kaynama rejimini havuz kaynama rejimlerinin diğerlerinden farklı kılan ve diğerlerinde karşılaşılmayan olay ışınımla ısı transferidir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda daha belirgin şekilde gerçekleşen bu sıcak ısıtıcı yüzeyden buhara olan ısı transferi, aşım sıcaklığının artmasıyla daha yüksük hızla gerçekleşmeye devam eder [44].

Teorik olarak havuz kaynama dört farklı rejimle bilinmektedir fakat uygulamada bu rejimlerden sadece kritik ısı akısı ve ondan önceki rejimlerle karşılaşılır, yani geçiş rejimini ve film rejimini görmek çok olası bir durum değildir. Daha detaylı bir ifade ile, kritik ısı akısından sonra gerçekleşen rejimleri görmek için çök daha büyük sıcaklıklara varmaya ve dolaysıyla ısıtıcı gücünün devamlı artırılmasına gerek duyulur. Böyle olunca da ısıtıcı malzemenin erime noktasına ulaşılıp onun yanmasına sebep olur, ki bu da kaynama konusunda yanma olayı olarak bilinmektedir. Kritik ısı akısının gerçekleşeceği aşım sıcaklığından daha büyük bir aşım sıcaklığında artan ısı enerjisi akışkan tarafından çekilemez hale gelir ve sonuç olarak da ısıtıcı yüzeydeki sıcaklık devamlı artar. Bu işlem ısıtıcı yüzey sıcaklığının artık daha fazla büyüyemeyeceği ve sıvı ile ısıtıcı yüzey arasında ısı transferinin devamlı olarak gerçekleşmeyeceği bir değere kadar sürer. Bu değer ise birçok

ısıtıcı malzemenin ergime derecesinden çok daha büyük bir sıcaklık değeri olduğundan dolayı süreç yanma işlemiyle biteceği anlamına gelmektedir.

Havuz kaynamada ısı transferini arttırma yöntemleri

Kaynama boyunca ısıtıcı yüzeyinde kabarcık sayısını arttırma, başka bir değişle ısıtıcı yüzeyinde kabarcık oluşum bölgelerini arttırma, bir havuz kaynama prosesinde ısı transferini arttırmanın temel yöntemi olmaktadır. Yani ısıtıcı yüzeyinde kabarcık oluşumunun yükselmesine neden olacak herhangi bir değişim beraberinde temenni edilen ısı transferi artışını getirecektedir. Kaynama işlemlerinde ısı transferini arttırma ısı transferi katsayısını arttırma ve/veya aynı zamanda ise kritik ısı akısını arttırmak demektir. Yüzey alanını genişletmek kabarcık oluşumunu arttırmanın en basit yoludur. Kabarcık oluşumunu arttırma amacıyla uygulamada yaygın şekilde kullanılan yöntemler bunlardan ibarettir; ısıtıcı yüzeyinde milimetre boyutlarında oyuklar oluşturmak ve nano boyutta malzemeler kullanarak yüzeyi kaplamak, ki bunlarda başka bir deyişle yüzey pürüzlülüğünü arttırmak anlamına gelmektedir. Yüzeyi nano malzemelerle kaplanmış veya yüzeyinde oyuklar oluşmuş ısıtıcılar şu anda borsada mevcuttur ve bunları kullanarak ısı transferi katsayısında ve kritik ısı akısında sırasıyla 10 kat ve 3 kat daha büyük rakamlar elde edildiği bildirilmiştir (Resim 2.6) [44].



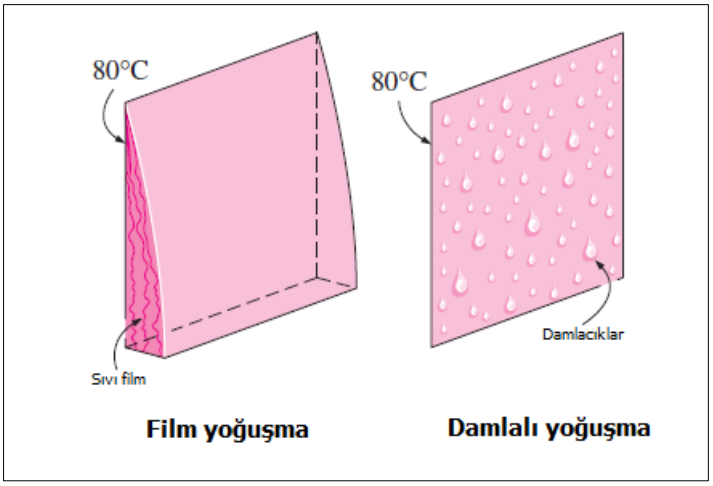
Resim 2.6. Isıtıcı yüzeyinde açılan oyuklar ile kabarcıklanma bölgelerinin arttırılması [44]

Yukarıda giriş bölümünün başlarında girilen çalışmalarda da özetlendiği gibi temel akışkana kıyasla bir kaynama işleminde nanoakışkan kullanımı kritik ısı akısı ve kaynama ısı transferi için çök büyük derecede artış sağlamaktadır. Saf su gibi geleneksel bir iş akışkanına nano boyutlarında parçacıklar ekleyerek süspansiyon biçiminde bir nanoakışkan çözeltisi hazırlayınca temel akışkanın termofiziksel özellikleri iyileştirilir ve bunun sonucunda kabarcıkların oluşumunun hızlandırılmasıyla kaynama ısı transferi artır. Buna ek olarak bu

nanoakışkanlarda yüzey aktif madde kullanarak nanoparçacıkların tekrardan birleşmesi engellenir, yüzey pürüzlülüğü bir nanotabaka oluşarak gelişir ve sonuç olarak ısı transferi desteklenir. Bu çalışmada nanoakışkanın bir iş akışkanı termofiziksel özelliklerini geliştirme prensibinden yola çıkarak bununla beraber ısıtıcı yüzeyinde farklı tip oyuklar açmanın kaynama ısı transferini nasıl etkilediği incelenmiştir. Kaynama ısı transferini arttırmanın başka yolları ise, yüzey titreştirme ve mekanik karıştırma, ısı transferi değerlerinde artış sağladığına rağmen karmaşık olduklarından dolayı diğer metotlara kıyasla çök tercih edilen yöntem değillerdir [44].

2.2.2. Yoğuşma ısı transferi

Yoğunlaşma, akışkanın gaz veya buhar fazından sıvı fazına geçmesidir ve buharlaşmanın tersidir. Başka deyişle yüksek sıcaklıklara sahip olan buhar fazındaki bir akışkanın sıcaklığı herhangi bir yöntemle doyma sıcaklığın altına düşünce yoğuşma adlanan faz değişimi gerçekleşir. Bu işlem genellikle buhar fazındaki akışkan ve ondan çok daha düşük sıcaklıklarda bulunan bir katının birbirleriyle temas ettirilmesiyle gerçekleştirilir. Yoğuşma iki türden ibarettir; damlalı yoğuşma ve film yoğuşma [44]. Film yoğuşmada yüksek sıcaklılarda buhar fazındaki bir akışkan veya yoğuşma sıvısı bir katı yüzeyle temas ettiğinde sıcaklığını kaybederek buhar fazından sıvı fazına geçip katıyı tamamen ıslatır ve yer çekiminden de etkilenerek aşağıya doğru akan bir sıvı filmi ortaya koyar. Oluşumunda yoğuşma sıvısının veya akışkanın miktarının artmasının da etkisi olan bu sıvı filmin kalınlığı akış veya kayma yönünde artış gösterir. Sıvı film tabakasına kıyasla daha fazla farklı boyutlarda damlacıklar oluşturan ve bundan dolayı da yüzeyin çok sayıda oluşan damlacıkla kaplanmasına sebep olan yoğuşma işlemine ise damlalı yoğuşma denir (Resim 2.7).



Resim 2.7. Yoğuşma ısı transferi türleri [44]

Film tabakası olayı ortaya çıkınca, aynı film kaynama rejiminde olduğu gibi film yoğuşmada da sıvı filmi akışkan ile yüzey arasında bir yalıtım malzemesi rolü oynayarak ısı transferine karşı bir direnç oluşturur, bu da ısı aktarımını negatif olarak etkilemesi anlamına gelmektedir. Bunun tersine, damlalı bir yoğuşma işleminde yüzeyde oluşan damlacıklar belirli bir boyuta varmayana kadar aşağı doğru akarak ardında bıraktıkları alanda yüzey ile buhar arası temas kabiliyetini artırır ve böylece ısının daha hızlı aktarılmasında önemli derecede katkı sağlar. Başka bir ifade ile, buradaki yoğuşma sıvısı filmi, hiç de film yoğuşmadaki gibi değildir. Tüm bunlardan dolayı da film yoğuşamaya kıyasla damlalı yoğuşmada görülen ısı transferdeki hız neredeyse 10 kat daha fazla olduğu için mühendislik uygulamalarda tercih edilen proses damlalı yoğuşmadır ve o yüzden de bu çalışmada bu iki yoğuşma türünden damlalı yoğuşmayı daha detaylı anlatmakla yetinir.

Damlalı yoğuşma

Yukarıda da anlatıldığı gibi damlalı yoğuşmada yüksek ısı transferi katsayıları elde edilebilir. Bu süreçte buhar fazındaki akışkan sıcaklığını kaybederek temas ettiği yüzeyde küçük boyutlardaki damlacıklar şeklinde yoğuşur. Bu durumda hala ısı aktarımı devam ediyorsa belirli bir zaman sonra damlacıklar birleşip daha büyük çaplı damlacıklar yaratırlar. Boyutça daha büyük olan bu yoğuşma damlacıkları belli bir boyuta vardıktan sonra aşağı doğru kaymaya başlar ve gerisinde bıraktığı bölgelerde yoğuşma sürecinin devam etmesini mümkün kılar. Damlalı yoğuşmada oluşan sıvı filmi ısı transferini negatif şekilde etkilemeyeceğinden çok daha küçük bir alanda belli bir ısı transfer hızına ulaşılabilmek olası

bir durum olmaktadır. Böyle olunca da daha küçük yoğuşturucular kullanılmasıyla bile istenen şartları elde etmek ekonomik bir seçeneğe dönüşür.

Damlalı yoğuşmada yüzeyleri kimyasal işlem işlemek veya yüksek sıcaklıklardaki buhar akışkana farklı kimyasal madde eklemek, teflon gibi bir polimer veya altın ve gümüş gibi soy metallerle yüzeyi kaplamakla onları ısı transferi için uygun ederler. Damlalı yoğuşma her ne kadar da film yoğuşmaya kıyasla ısı transferi için daha avantajlı bir seçenek olsa da bu işlemi uzun zaman sürdürebilmek kendiliğinde büyük bir problemdir. Damlalı yoğuşmayı uzun zaman devem ettirebilmek için kimyasal ve mekanik metotlar kullanılmaktadır. Örneğin kimyasal metot olarak daha önce de bahsedildiği gibi buhar fazındaki akışkana katkı maddeler eklenir, mekanik yöntemlerde ise yüzey dış bir malzeme kullanılarak kaplanır. Tüm bunlara rağmen damlalı yoğuşmada etkin bir sonuç elde etmek için işlemi uzun zaman sürdürebilmenin masrafları ve onun sonucunda elde edilen ısı transferindeki iyileştirme oranı karşılaştırılıp incelenmelidir.

Yoğuşturma ile ısı transferi konusunda dikkat edilmesi gereken konulardan biri de yoğuşturucunun yapıldığı malzemedir, yani yoğuşma ile her ne kadar büyük ısı transferi katsayıları elde edilse de yüksek ısıl dirençlerin oluşturmasını engellemek için yoğuşturucu yüksek ısıl iletkenliklere sahip olan altın ve bakır gibi malzemelerden yapılması bir gerekliliktir.

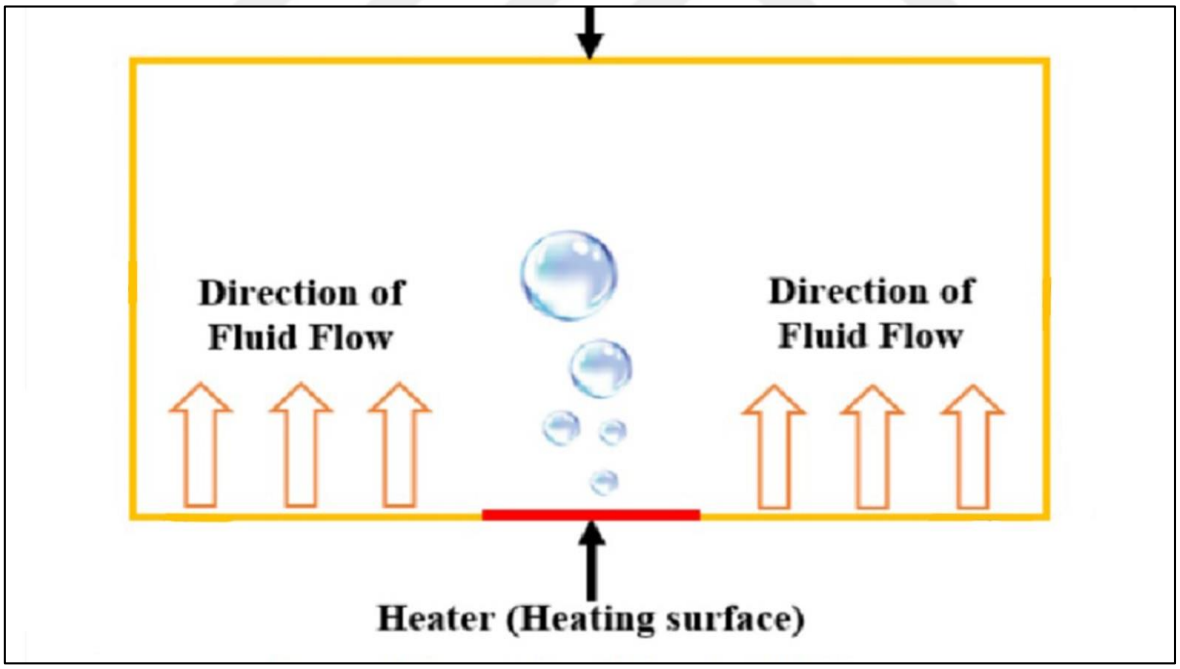
3. YÖNTEM VE SAYISAL ANALİZLER

3.1. Yöntem

CFD kullanılarak altı set analiz yapıldı. Malzeme detaylarındaki bazı küçük farklılıklar dışında, altı setin tamamı için yöntem hemen hemen aynıdır. Bu farklılıklar her bölümde açıklanmıştır.

3.1.1. Geometri

Geometri olarak Design Modeler'de, bir normal kabı temsilen basit iki boyutlu bir dikdörtgen alan, çizildi (Resim 3.1). Kaba boyut olarak 4 cm uzunluk ve 2 cm yükseklik verildi. Çizim ayarlarında Grid bölümünde Snap aktif edildi ve Major Grid Spacing 1 cm olarak değiştirildi. Diğer ayar ve seçenekler değiştirilmeden Default olarak bırakıldı. Oyuklu ısıtıcı yüzeyler için üçgenler ve yarım daireler aynı mesafelerde tasarlandı ve boyutları eşit girildi.

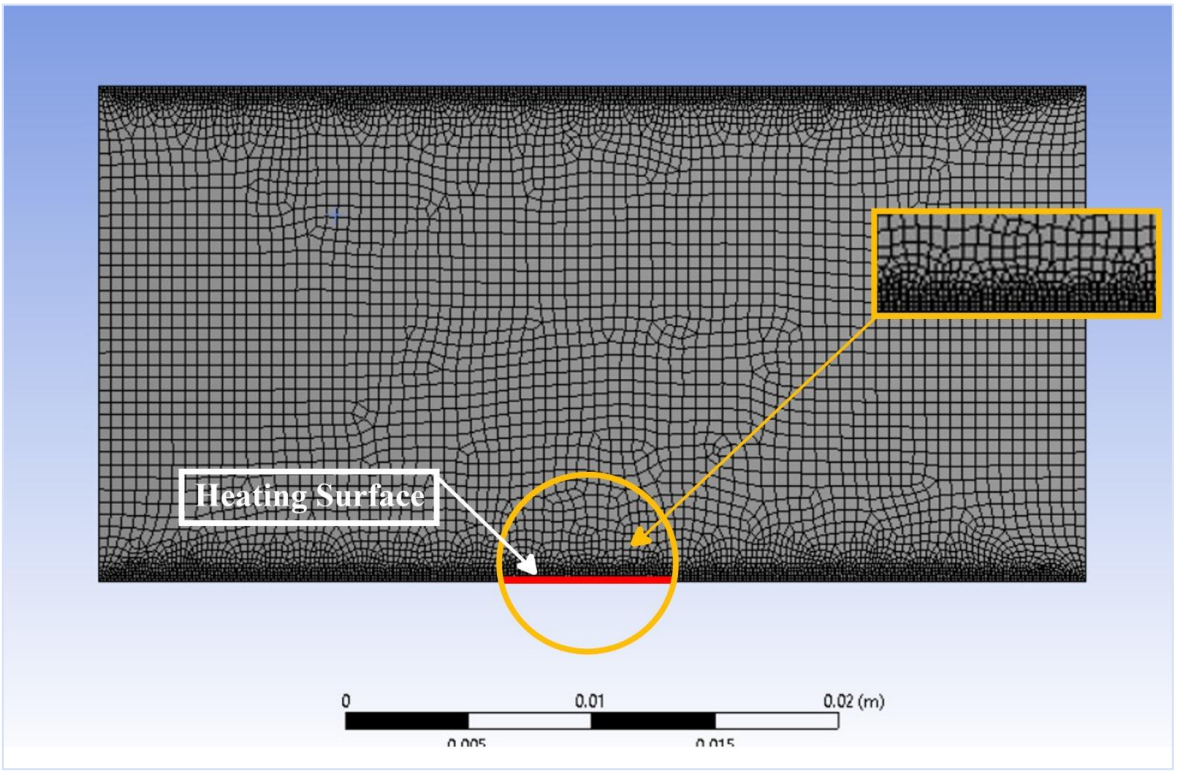


Resim 3.1. İki boyutlu geometri

3.1.2. Ağ oluşturma

Ağ oluşturmada, tanımlanan ısıtıcı yüzey için Fluid Material seçildi ve Mesh menusu altındaki Fizik Tercihi, CFD olarak değiştirildi. Kenarları adlandırdıktan sonra Sizing

aşamasında hem ısıtıcı hem de yoğuşturucu kenarlar için Element Size 0.0001 m girildi. Mesh menusundan Relevance Center Fine olarak tanımlanıp onun bir aşağısında Max Size Face bölümüne 0.0005 girildi. Başka herhangi bir seçeneği değiştirmeden ağ oluşturuldu. Aşağıda ağ yapısından bir resim görebiliriz (Resim 3.2).



Resim 3.2. Ağ yapısı

3.1.3. Setup ayarları

Bu bölümde ayarlar tüm altı analiz için Malzeme tanımlama bölümündeki küçük bir farklılık dışında hemen hemen aynı ayarlandı.

Genel ayarlar (general) ve modeller (models)

General menüsünde yerçekimi Y ekseni üzerinde eksi 9,81 olarak girildi. Ayrıca zaman seçeneği olarak geçici (transient) seçildi. Modals menüsü altında ise çok fazlı (multiphase) seçeneği etkinleştirilip Volume of Fluid seçilip alttan ise Implicit Body Force etkinleştirildi. Modals da diğer seçeneklerden enerji seçeneği etkinleştirildi. Ayrıca viskoz modeli k-epsilon olarak ayarlanıp alt menüsünden Near wall treatment olarak enhanced wall treatment

ardından ise thermal effects ve curvature correction etkinleştirildi. Bu bölümdeki diğer seçenekler hepsi default (varsayılan) haline bırakıldı.

Malzeme tanımlama (materials)

Bu menüde önce düz su akışkanı için su-sıvı (water-liquid), su-buhar (water-vapor) ve bakır malzemelere eklendi sonra hava çıkarıldı. Sonra Setting Up Physics Menüsünden birinci faz su-sıvı ikinci fazı ise su-buhar olarak adlandırıldı. Bu menüden aşağıda Phase Interactions sekmesinden kütle transferi mekanizması sayısını bire yükseltip yeni sekmede fazları birinci fazdan ikinciye ayarlanıp mekanizma olarak ise buharlaşma-yoğuşma seçildi. Aynı sekmede ısıtıcı yüzey gerilimi (surface tension) bölümünden sırasıyla Surface Tension Force Modeling, wall adhesion ve jump adhision bölümünü etkinleştirilip ısıtıcı yüzey gerilim katsayısı sabit olarak 0,072 üzerine ayarlandı. Aynı yöntem alümina nanoakışkanı için de kullanıldı. Sadece nanoakışkan analizlerinde alümina-sıvı ve alümina-buhar olarak iki yeni malzeme tanımlanıp sonda su-sıvı ve su-buhar malzemelerden çıkarıldı. Bu analizler için ise birinci ve ikinci fazlar sırasıyla alümina-sıvı ve alümina-buhar adlandırıldı.

Sınır şartları (boundaries)

Bu menüde önce yoğuşturucu bölgesi için sıcaklık 273 Kelvin'e ayarlanıp sonra menünün en alt kısmında malzeme adı alüminyumdan bakıra değiştirildi. Benzer şekilde ısıtıcı bölgesi için de önce sıcaklık 400 Kelvin'e ayarlanıp sonra malzeme ismi sekmesi bakır olarak değiştirildi.

Çözüm (solution)

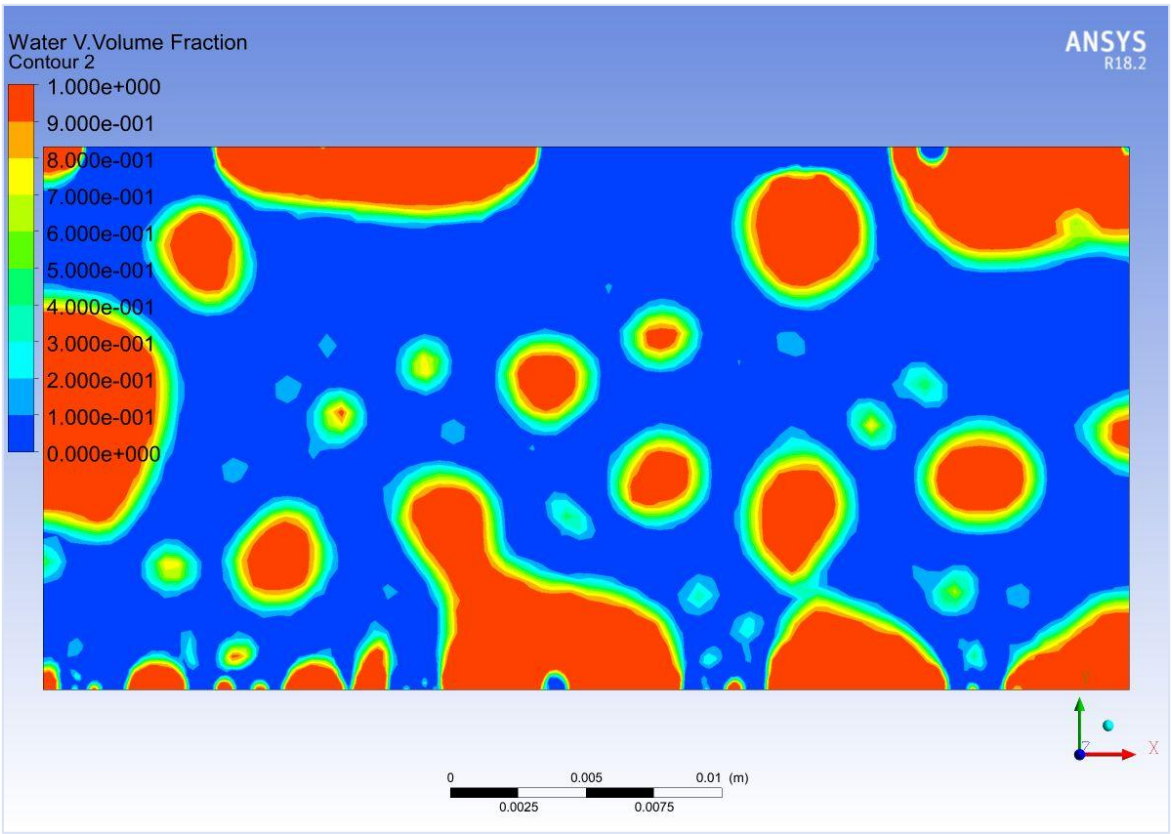
Bu menüde önce başlatma (Initialization) bölümünde sıcaklığı 373,15 ayarlayıp sonra hesaplamayı çalıştır (Run calculation) sekmesinden veri dosyası miktarları (Data File Quantities) bölümünden üç seçenek etkinleştirildi: toplam ısı akısı (Total heat flux), ısıtıcı yüzey ısı transfer katsayısı (surface heat transfer coefficient) ve ısıtıcı yüzey Nusselt sayısı (surface Nusselt number). Daha sonra zaman adımı boyutu 0,0001 saniyeye ayarlandı ve 6500 zaman adımı sayısı girildi ve hesaplama başlatıldı.

3.2. Sayısal Analizler

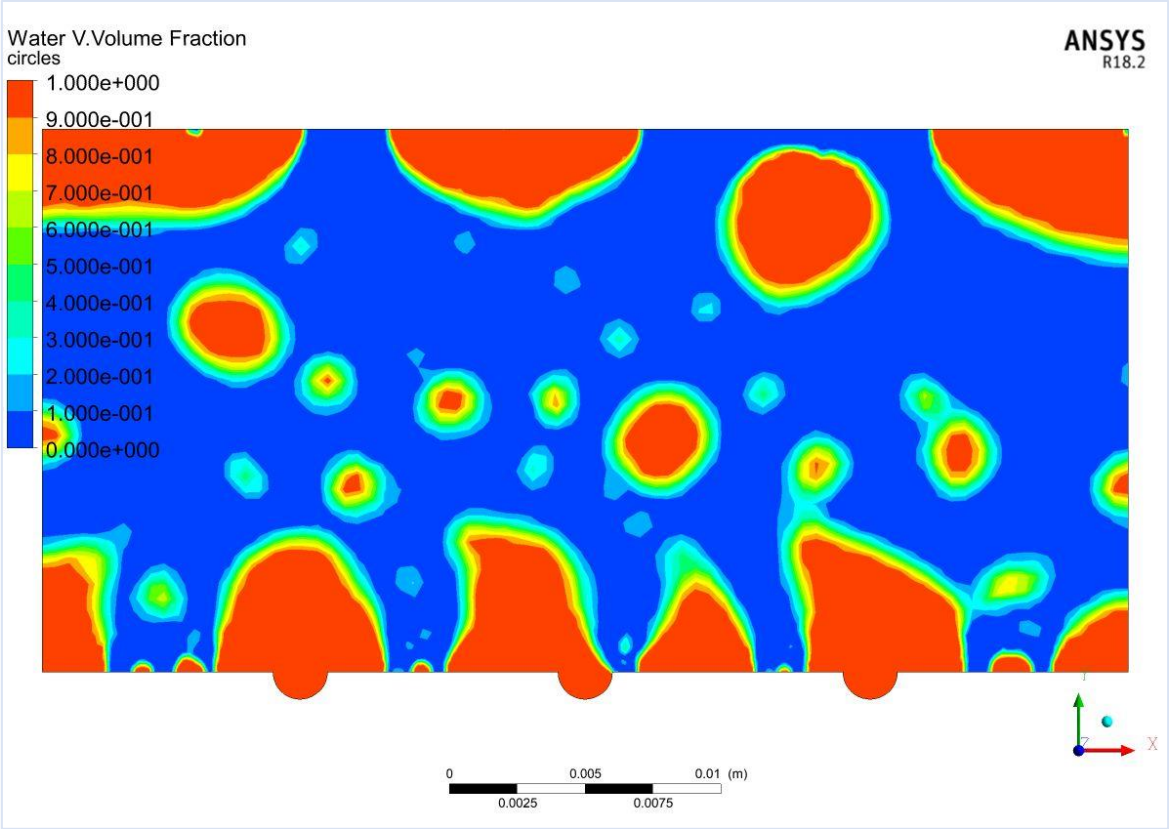
Bu bölümde ANSYS Fluent 18.2 yazılımı aracığıyla akışkanların hem nanoparçacıklar eklenmeden önceki hem de eklendikten sonraki şartlarda sıvı-buhar hacim fraksiyonları, hız ve sıcaklık konturları ve hız vektörleri oyuklu ve oyuk olmadan farklı ısıtıcı yüzeyler için incelenmiş sonuçları sunulmuştur.

3.2.1. farklı ısıtıcı yüzeylerde saf su için su-buhar hacmi

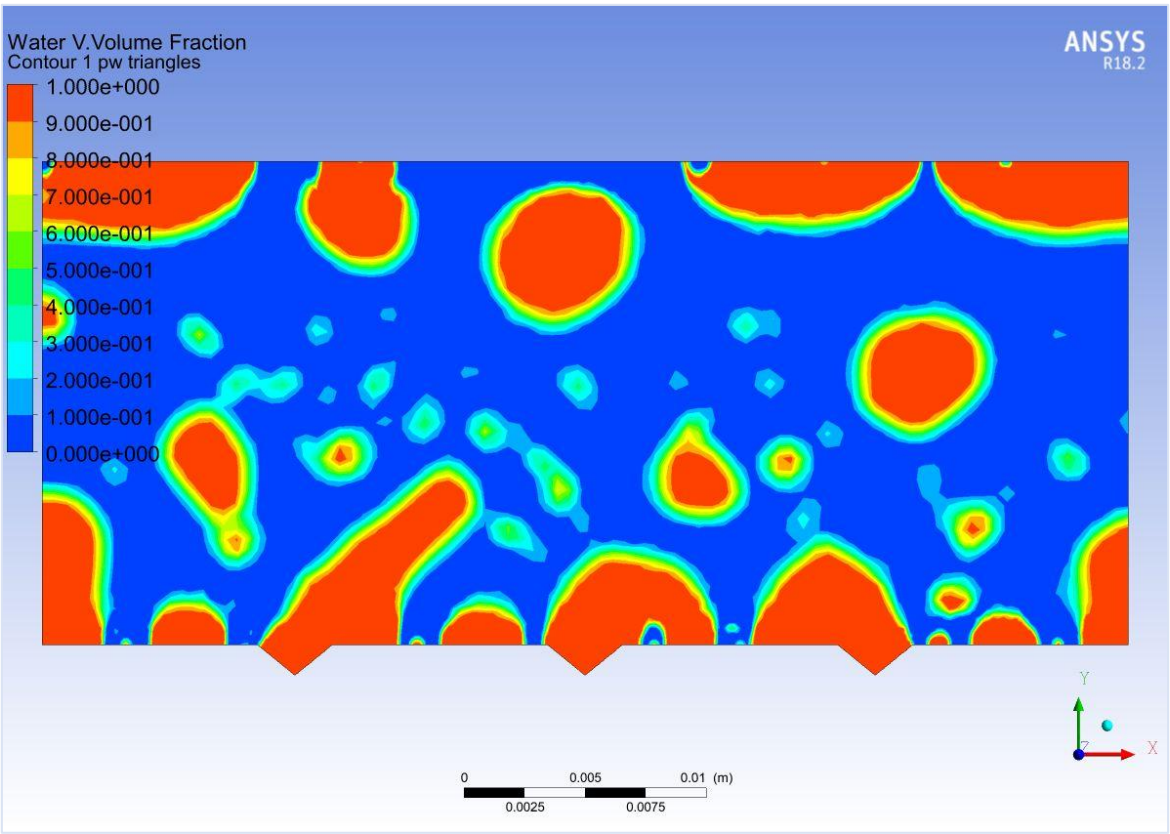
İlk analize saf su ve oyuk olmayan düz bir ısıtıcı yüzey kullanılarak başlanıp, daha sonra üçgen ve yarım daire oyuklu ısıtıcı yüzeyler için analiz devam edildi. 6500 zaman adımı kullanan tüm analizlerde kaynama kabarcıklarının oluşmaya başladığı zaman adımı, kabarcıkların sayıca çoğalmaya başladığı zaman adımı, ilk kaynama kabarcığın akışkanın yüzeyine vardığı zaman adımı ve kabarcıkların hareketlerinin hızlanması gibi faktörler dikkate alınarak birbirleriyle karşılanmıştır. Aşağıda üç farklı ısıtıcı yüzeyde iş akışkanı saf su olduğu durumlarda sıvı-buhar hacim fraksiyonunun son zaman adımındaki halleri şekillerle verilmiştir (Şekil 3.1,3.2,3.3).



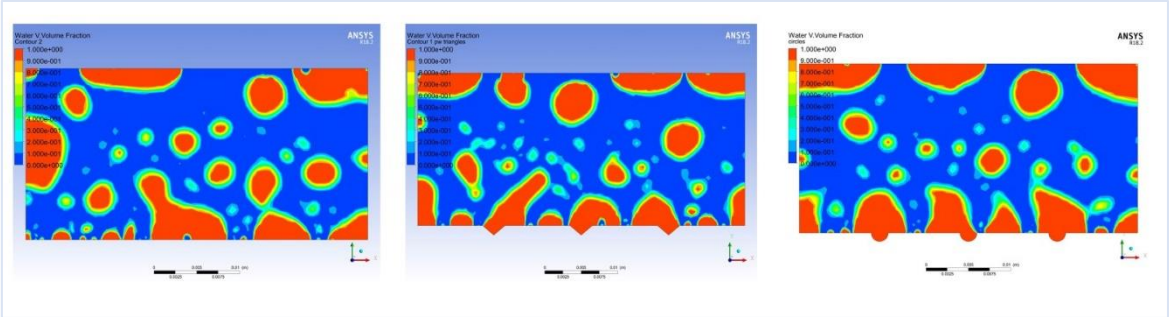
Şekil 3.1. Düz bir ısıtıcı yüzeyde saf su için Su-buhar hacmi



Şekil 3.2. Yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde saf su için Su-buhar hacmi



Şekil 3.3. Üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde saf su için su-buhar hacmi

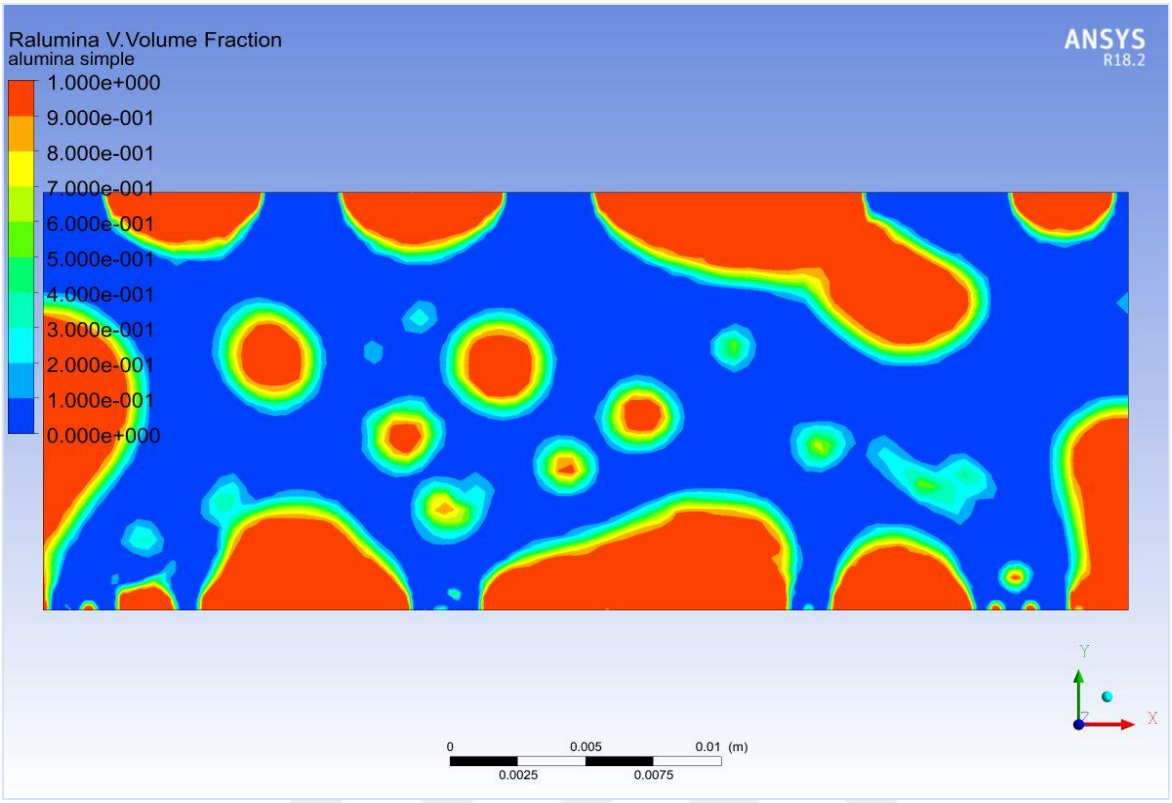


Şekil 3.4. Sırasıyla soldan sağa, düz bir ısıtıcı yüzeyde, üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde ve yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde saf su için son zaman adımı su-buhar hacim fraksiyonunun karşılaştırılması

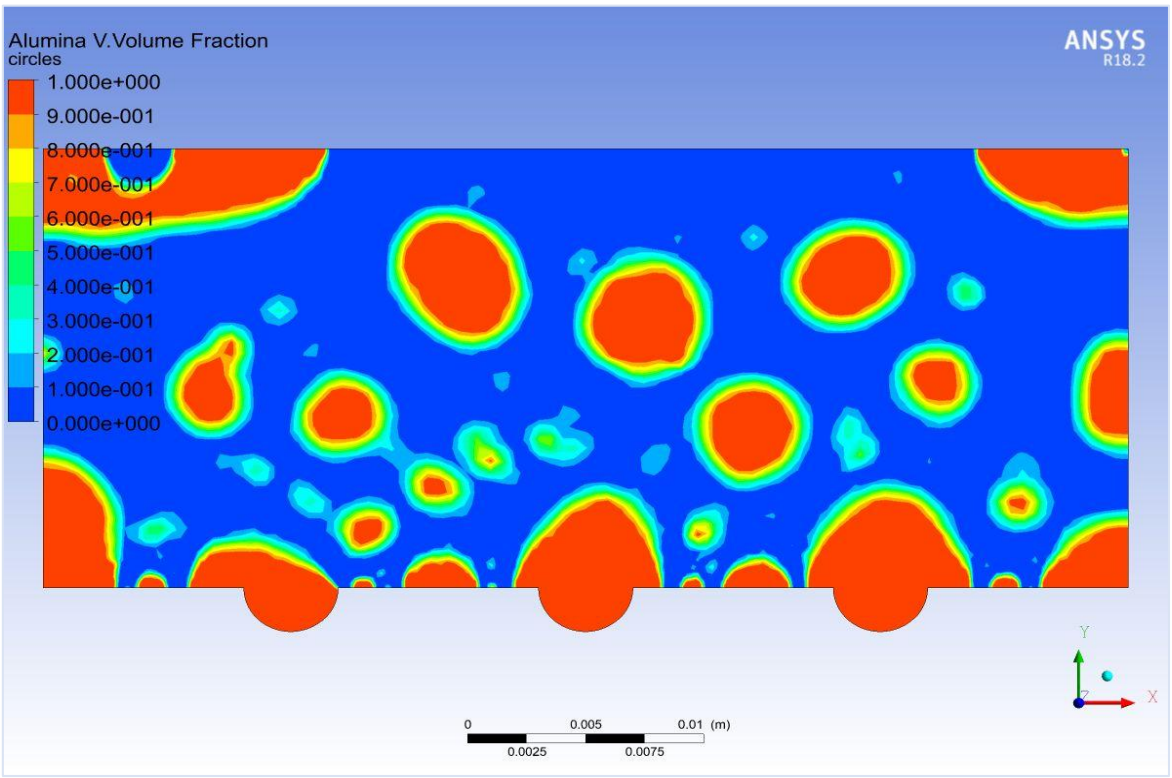
3.1, 3.2, 3.3 ve 3.4 numaralı şekillerden de belli olduğu gibi ısıtıcı yüzeye farklı tip oyukların uygulanması kabarcıkların oluşumunu ve ısıtıcı yüzeyden ayrılmasını hızlandırmıştır. Bu ilk kabarcıkların tepeye ulaştığı zaman adımı değerlerinden de anlaşılabilir. Düz ısıtıcı yüzey, yarım daireli ısıtıcı yüzey ve üçgenli ısıtıcı yüzey için ilk kabarcığın tepeye ulaştığı zaman adımı sayısı sırasıyla 5240, 4400 ve 4220'dir. Bu zaman adımı değerleri, oyukların ek alanların ortaya çıkmasına neden olduğunu göstermektedir, bu da kabarcıkların daha kısa sürede oluşmasını ve ayrılmasını kolaylaştırmaktadır. Oyuklu ısıtıcı yüzeyler birbiriyle karşılaştırıldığında, geometrinin keskin formundan dolayı üçgen oyuklu ısıtıcı yüzeyi için kabarcık oluşumu daha erken gerçekleşmiştir.

3.2.2. Farklı ısıtıcı yüzeylerde alümina nanoakışkanı

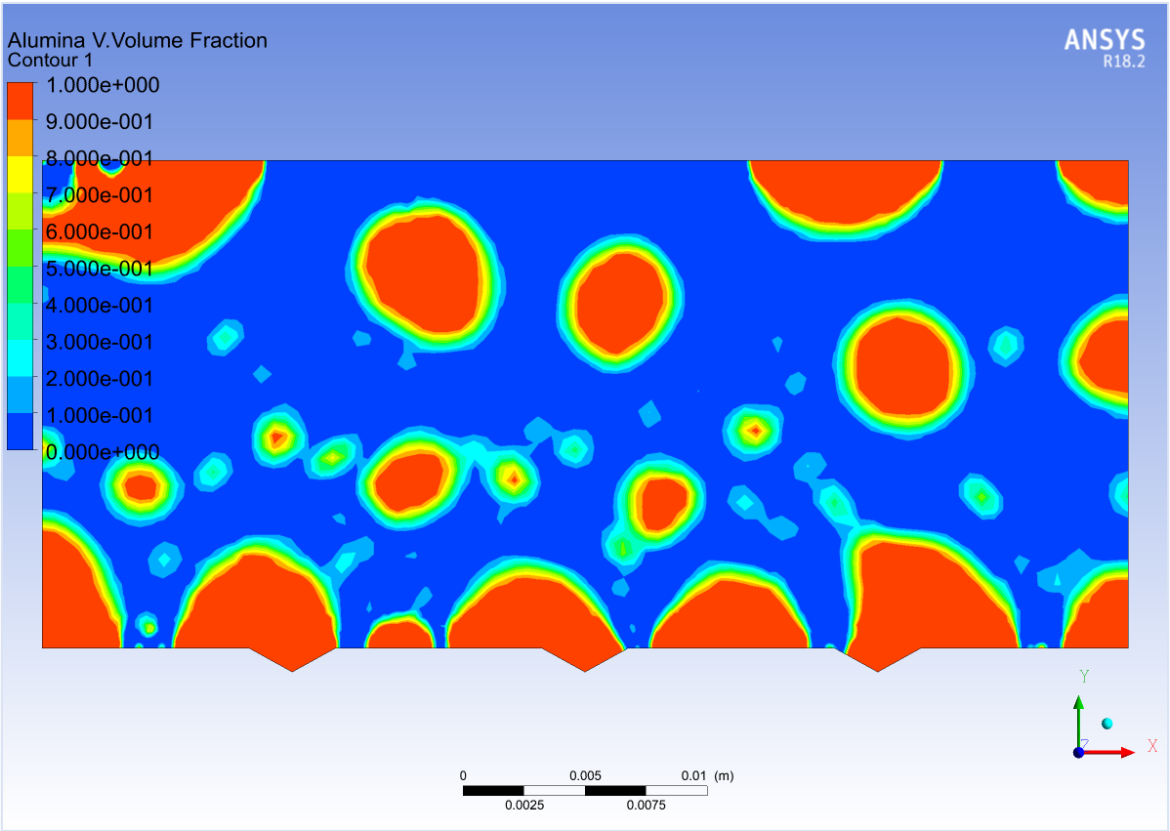
Bu bölümde ikinci aşama olarak, alümina nanoakışkanını oluşturan temel akışkana nano boyutta parçacıkların eklenmesinin etkisi analiz edilmeye çalışılmıştır. Yukarıda da bahsedildiğine göre daha yüksek termofiziksel özelliklere sahip olan nanoparçacıkların temel akışkan saf suya eklenmesiyle kaynama kabarcıklarının daha erken oluşması, daha çok sayıda oluşması ve akışkanın yüzeyine daha erken varması beklenilmektedir. Nanoakışkanların hepsinde hem malzeme hem de derişim oranı aynı olduğundan (%0,1) işlemleri daha belirgin şekilde etkileyecek geriye kalan tek etkenin ısıtıcı yüzeyde oyukların bulunup bulunmaması ve oyukların şekli olabileceği düşünülmektedir. Aşağıda farklı ısıtıcı yüzeyler kullanılarak nanoakışkanın son zaman aşamasına ait şekiller verilmiştir; düz bir ısıtıcı yüzey, yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzey ve üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzey (Şekil 3.5,3.6,3.7).



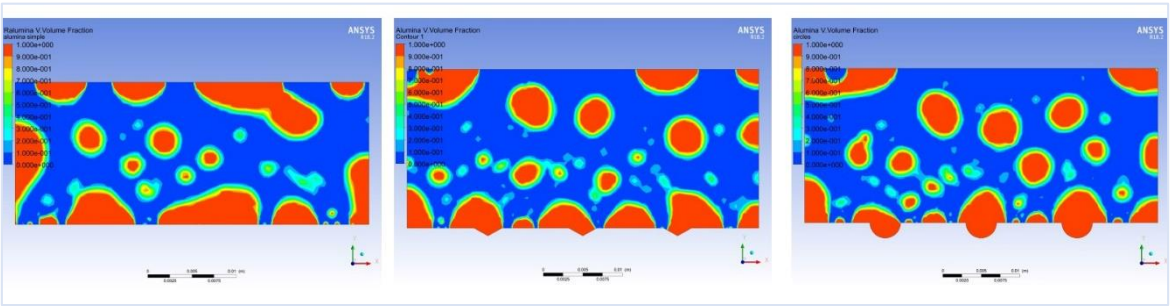
Şekil 3.5. Düz bir ısıtıcı ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkanı için son zaman adımı alümina-buhar hacmi



Şekil 3.6. Yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkan için son zaman adımı alümina-buhar hacmi



Şekil 3.7. Üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkan için son zaman adımı alümina-buhar hacmi



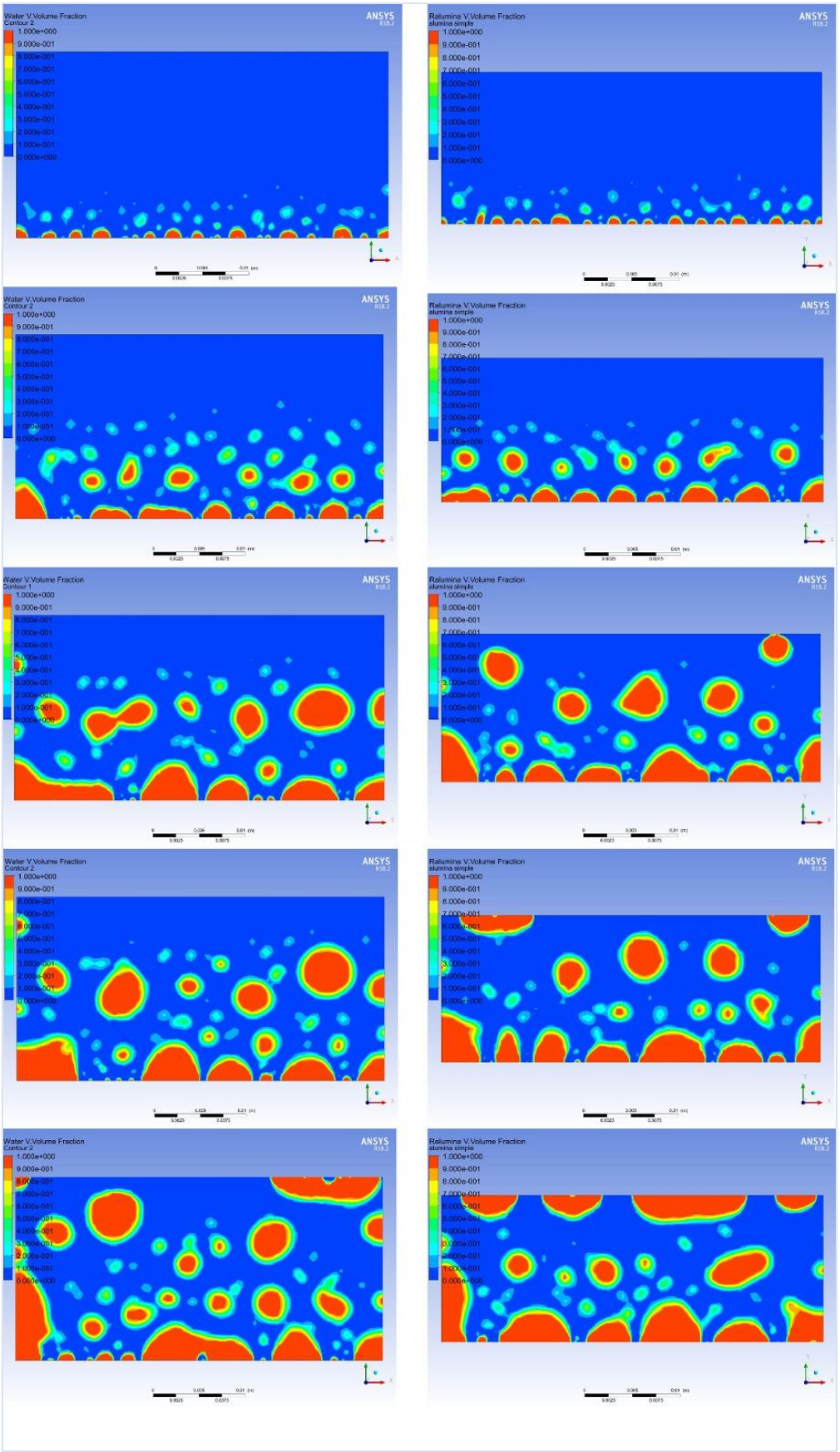
Şekil 3.8. Soldan sağa düz bir ısıtıcı yüzeyde, üçgen oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde ve yarım daire oyuklu bir ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkan için son zaman adımı alümina-buhar hacmi karşılaştırılması

Yukarıdaki şekiller (Şekil 3.5, 3.6, 3.7, 3.8) göz önünde bulundurulunca, düz bir ısıtıcı yüzeyde alümina nanoakışkan kullanıldığı durumda hem kabarcıkların oluşumunun hem de ayrılmasının daha hızlı gerçekleştiği ve ayrıca kabarcık sayısının önemli ölçüde arttığı sonucuna varılabilir. Düz ısıtıcı yüzey, yarım daire oyuklu yüzey ve üçgen oyuklu yüzey için ilk kaynama kabarcığının akışkanın yüzeyine ulaştığı zaman adımı sayısı sırasıyla 4660, 4300 ve 4140'tır. Bu değerlere dikkat edilince oyuklu ısıtıcı yüzeyler için kabarcık miktarının

kayda değer şekilde artmasına rağmen, ilk kabarcığın tepeye varma zamanında çok az bir iyileşme gerçekleştiği sunucu gözlemlenmiştir. Bu sonuç oyukların mikro boyutlarından dolayı nanopartiküllerin boşluklarda birikebileceğinden asılıdır. Başka bir ifade ile nanoakışkanların benzer eski katı maddelerin akışkanın içerisine katılma işlemine üstünlüğü nano boyutlarından dolayı yüzeyde birikmemeleri ve tortu ve tıkanıklık gibi problemlere sebep olmamalarıdır, ancak yüzeyde mikro boyutlarda oyuklar oluşunca artık nanoparçacıklar oyuk alanlarına karşı birikmeyecek kadar küçük boyutlara sahip değillerdir. Nanoakışkanla yapılan analizlerde, hem düz ısıtıcı yüzeydeki büyük gelişme hem de oyuklar içeren ısıtıcı yüzeylerdeki küçük gelişmenin nedeni nanoakışkanın daha yüksek termofiziksel özellikleriyle açıklanmaktadır.

3.2.3. Farklı yüzeylerde düz su ve alümina nanoakışkanın karşılaştırılması

Yukarıda bahsedilen iki durumu, saf su ve alümina nanoakışkan ile yapılan analizleri, birbiriyle karşılaştırılınca oyuklar oluşturarak elde edilen analizlerin farkı dikkat çekici şekilde göz önüne sergilenmektedir. Aşağıda Şekil 3.9'da yukarıdan aşağıya doğru ve solda saf su, sağda nanoakışkan olmak üzere bu iki durum kaynama kabarcıklarının oluşmaya başladığı, gelişip hızlandığı, alümina nanoakışkanı için ilk kaynama kabarcığının akışkanın yüzeyine vardığı, saf su için ilk kaynama kabarcığının akışkanın yüzeyine vardığı ve son zaman adımı durumları karşılaştırılmıştır.

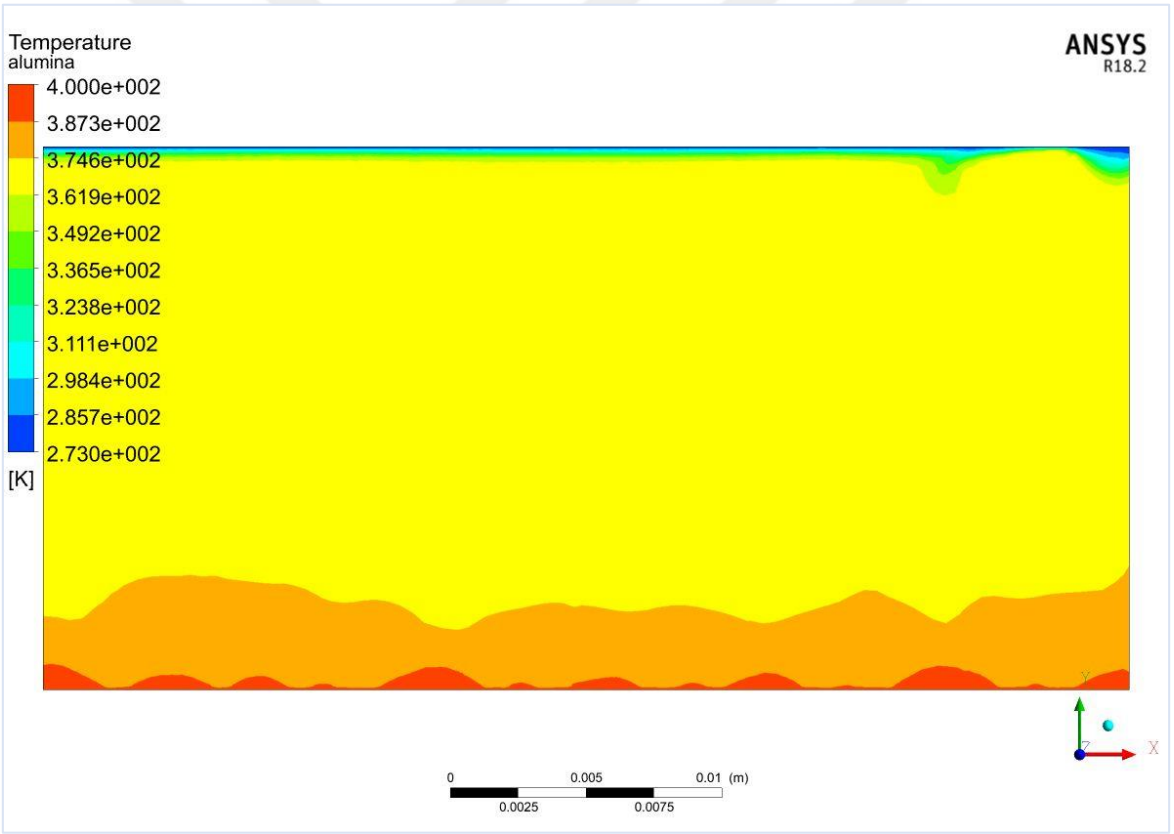


Şekil 3.9. Saf su (solda) ve nanoakışkan (sağda) için farklı durumların karşılaştırılması

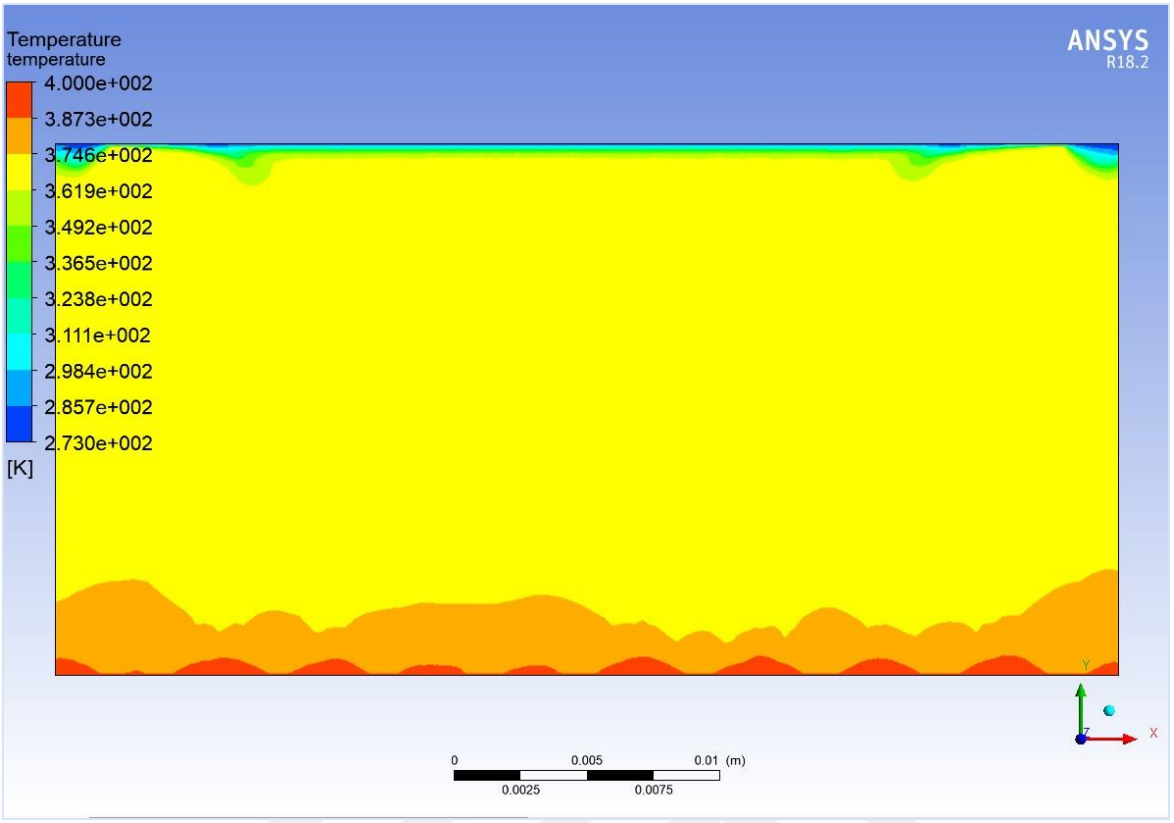
İş akışkanı olarak saf suya kıyasla alümina nanoakışkanı uygulanınca ilk kaynama kabarcığının akışkanın yüzeyine varma zaman adımı sayısındaki dikkat çekici fark nanoparçacıkların ısı transferi karakteristiğini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca nanoakışkan etkisinde iki kabarcıkların sayısı, boyutları, kabarcık oluşum alanları ve hareketleri de kayda değer şekilde iyileştirilmiştir.

3.2.4. Temel akışkan ve nanoakışkan için sıcaklık dağılımı

Saf su ve alümina nanoakışkan için sıcaklık konturları elde edildi ce birbirleriyle karşılaştırıldı. Aşağıda Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 sırasıyla alümina nanoakışkandaki ve saf sudaki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir.



Şekil 3.10. Alümina nanoakışkan için sıcaklık dağılımı



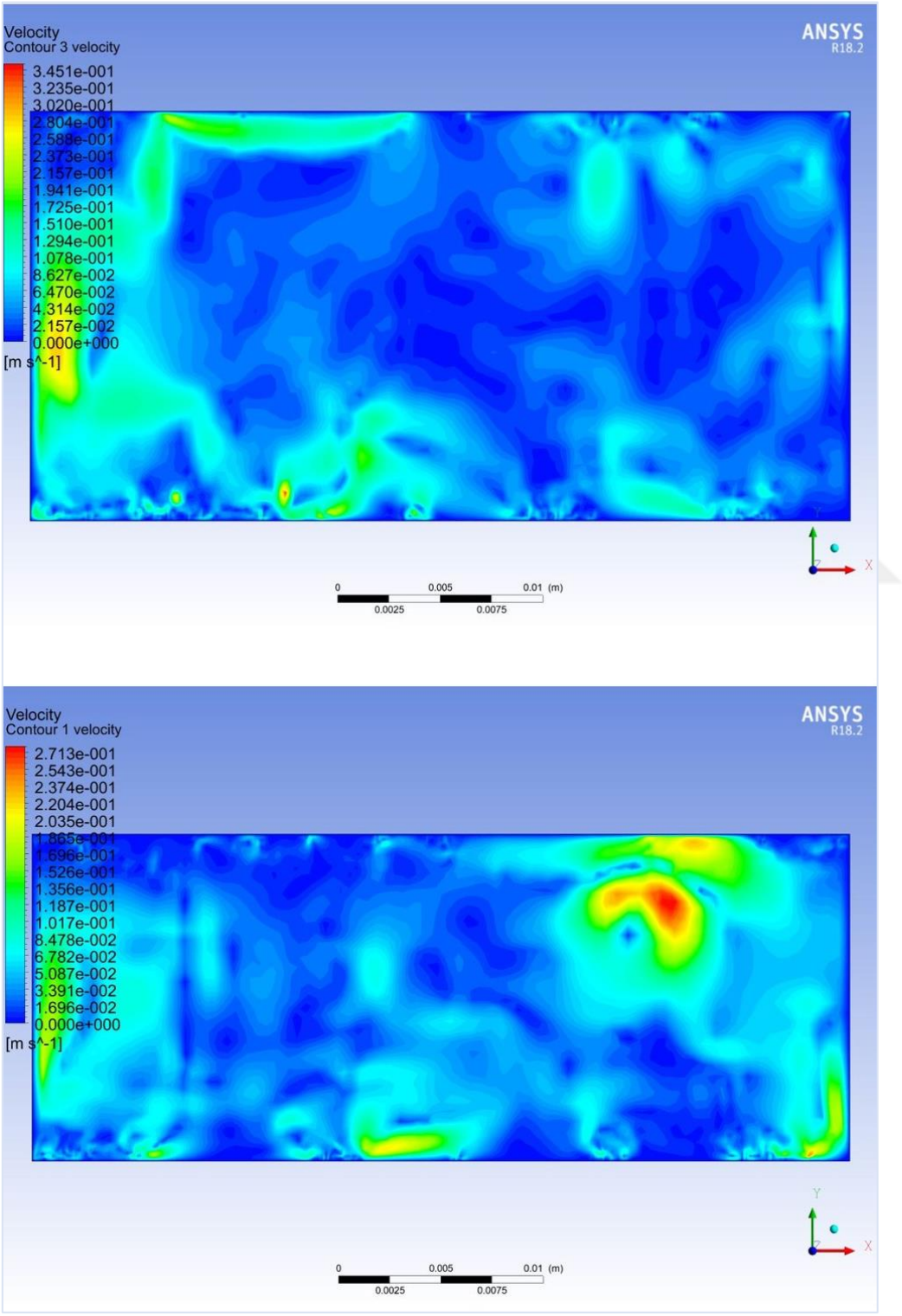
Şekil 3.11. Saf su için sıcaklık dağılımı

Yukarıda Şekil 3.10 ve 3.11 dikkate alınınca nanoparçacıkların akışkanın içerisine karıştırılmasıyla sıcaklık profilinde çok büyük bir farkın ortaya çıkmaması sonucuna varılmıştır.

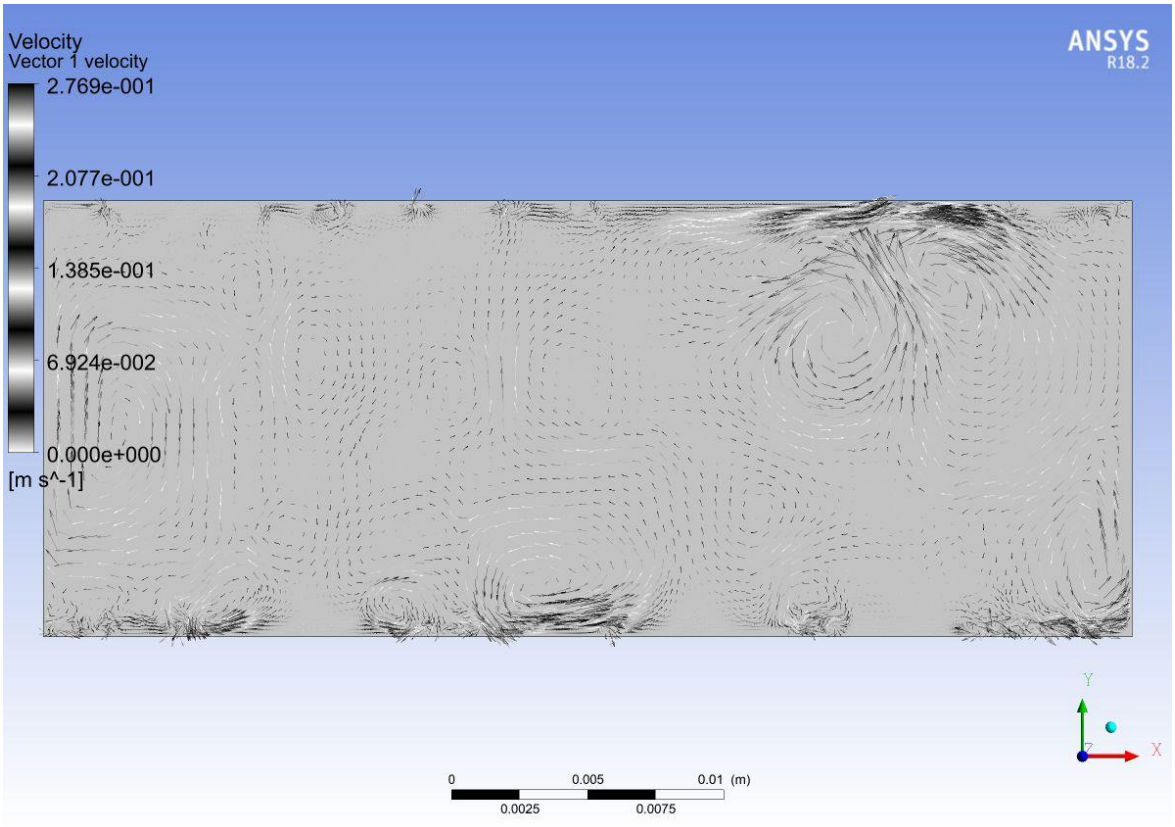
3.2.5. Temel akışkan ve alümina nanoakışkan için hız dağılımı

Saf su ve alümina nanoakışkan için ayrıca hız dağılımı da incelendi. Şekil 3.12'de saf su (yukarıda) ve alümina nanoakışkanı için hız dağılımı konturları akış alanında karşılaştırılmıştır. Aynı şekilde oyuklu ısıtıcı yüzeyleri de içeren daha geniş bir karşılaştırılmada ise altılı olarak şekil 3.14'de (solda saf su analizleri ve sağda alümina nanoakışkan analizleri olmak üzere) verilmiştir. Grafiklere göre akış alanında duvarlara yakın bölgelerde saf su içine alüminyum nanoparçacıkları eklenince akışkanın akış hızında atış gerçekleştirilmesi görülmektedir. Kaynama ve yoğuşma olayı tüm analiz boyunca durmadan devam ettiği için duvarlara yakın bölgelerde akışkan yoğuşarak sıvı faza geçip duvarlardan aşağıya doğru akar ve bunun sonucunda da duvara yakın bölgelerde bir hız profilinin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Oluşan bu hız profilinin var olduğu alümina nanoakışkanla gerçekleşen analizden hız vektörlerini oluşturup incelemekle de kanıtlanabilir. Şekil 3.13'de gösterilen hız vektörlerinin yönlerine dikkat edildiğinde, daha küçük sıcaklıklara sahip duvarlara aşağıdan ısınıp yükselen

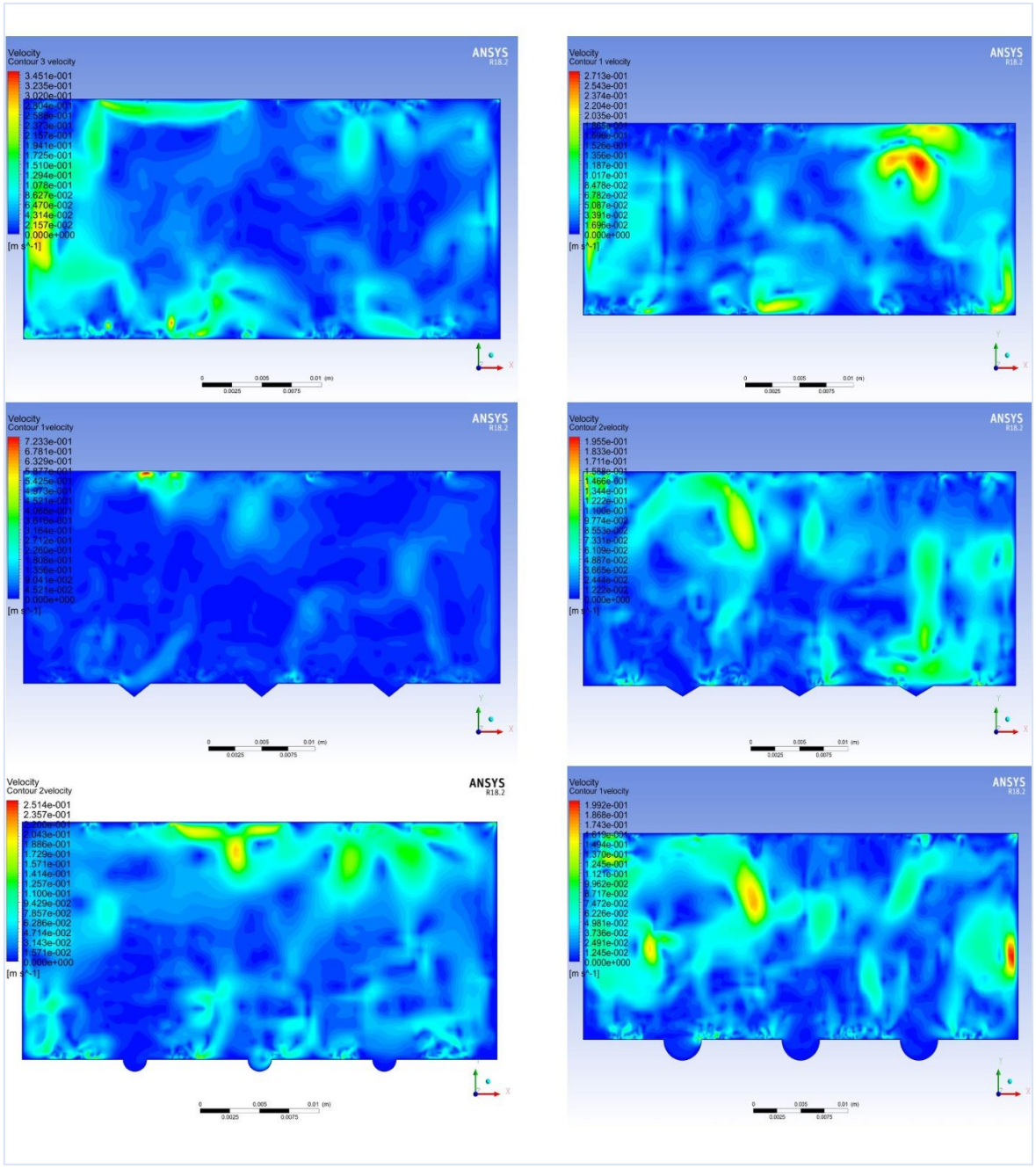
akışkan temas edince yoğuşup yeniden aşağıya doğru akmaya başladığı daha net bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Neden iş akışkanı olarak alümina nanoakışkan kullanıldığında akış hızı daha yüksek olur sorusu ise yoğuşma hızıyla cevaplanabilir. Ayrıca bu çalışmada elde edilen bu sonuç Çiftçi tarafından yapılan çalışmadaki deneysel analizle de doğrulanmıştır [1].



Şekil 3.12. Saf su ve nanoakışkan için hız dağılımı



Şekil 3.13. Nanoakışkan için hız dağılımı vektörleri



Şekil 3.14. Saf su ve temel akışkan için hız dağılımı karşılaştırılması

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bünyesinde Temel bir akışkanın içerisine daha yüksek termofiziksel özelliklere sahip nanoparçacıklar ekleyerek elde edilen nanoakışkanların ısı transferi karakteristiklerinin iyileştirilmesi birçok araştırmayla kanıtlanmıştır. Bu çalışmada saf su ve derişim oranı %0,1 olan alümina nanoakışkan iş akışkanı olarak temel alınarak ısıtıcı yüzeyde üçgen ve yarım daire oyuklar oluşturup bunun kaynama kabarcıklarının oluşumu ve yüzeyden ayrılma hızında ortaya koyduğu etkiler ANSYS FLUENT yazılımı aracılığıyla sayısal olarak incelenmiştir. Hem saf su hem de alümina nanoakışkanı için eşit şartlarda işlemin farklı zamanlarında kaynama kabarcıklarının oluşumu, gelişmesi, hızlanması, ısıtıcı yüzeyden ayrılması ve akışkanın yüzeyine varması sıvı-buhar fraksiyonlarının konturlarını elde ederek incelenmiştir. Ayrıca her iki akışkanın farklı durumları için sıcaklık ve hız dağılımı grafikleri gösterilmiş nanoakışkan için hız vektörleri de elde edilerek karşılaşılan farklılıklar açıklanmıştır. Yeniliği ısıtıcı yüzeyde oyuklar oluşturulduğu olan bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar ve gelecekte bu alanda çalışılabilecek konulara dair öneriler aşağıdaki iki bölümde sunulmuştur.

4.1. Sonuçlar

İş akışkanı olarak saf su ve alümina nanoakışkanı kullanan ve her birisi için düz ısıtıcı yüzey, yarım daireli oyuklar içeren ısıtıcı yüzey ve üçgen oyuklar içeren ısıtıcı yüzey için yapılan sayısal analizlerin sonuçlarında elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Saf su iş akışkanı olarak kullanıldığında düz ısıtıcı yüzeyle kıyasla yarım daire ve üçgen oyuklu ısıtıcı yüzeylerde kaynama kabarcıklarının hem oluşumunda hem miktarında hem de yüzeyden ayrılma hızında kayda değer bir gelişme gözlemlenmiştir. Bu gelişmenin en açık göstergesi ilk kabarcığın akışkanın yüzeyine varma zaman adımı sayısıdır. Bunun neden ise oyukların kaynama için daha fazla alan açılmasıyla (ek ısı transfer alanlarının oluşması) açıklanmaktadır.

- Alümina nanoakışkanı ile yapılan analizlerde düz ısıtıcı yüzeye kıyasla oyuklu yüzeylerde oyuklar nanoparçacıklara daha dar bir alan oluşturdukları ve bu dolaysıyla nano boyuttaki parçacıkların birikmesine sebep oldukları için iyileştirmedeki farkın daha az olduğu gözlemlenmiştir.

- Nanoparçacıklar ve açılan oyuklar sayesinde temel akışkana kıyasla elde edilen nanoakışkan çözeltisi için duvarlara yakın bölgelerde farklı bir hız profili ve akışkan akışı elde edilmiştir.

4.2. Öneriler

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen veriler ışığında gelecekte bu konuyla ilgili yapılabilecek çalışmalar için şu öneriler sunulabilir:

- Bu çalışmada oyukların küçük olması ve nispeten nanoparçacıkların boyutlarına yakın olması nanoparçacıkların birikmesi ve tortu oluşturmasına sebep olduğu için oyukların ısı transferi performansını iyileştirmesindeki etkisinin düz ısıtıcı yüzeye kıyasla daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle daha büyük bir yüzey alanı ve daha büyük oyukların uygulanmasıyla daha farklı sonuçlar elde edilebilir.

- Yapılan analizlerde sadece ısıtıcı yüzey geometrisinde yapılan değişiklikler (oyuklar açılması) odaklandığı için yüzeyi etkileyen pürüzlülük gibi diğer etkenler dikkate alınmamıştır. Dolaysıyla bu etkenleri de içeren deneysel ve sayısal analizler yapılabilir.

- Yüzey aktif maddeler de nanoakışkanlarla yapılan çalışmalarda farklı sonuçlar doğurabileceği için farklı tipte yüzey aktif maddelerin kullanıldığı benzer çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Çiftçi, E. (2020). *Nanoakışkanların Kaynama-Yoğuşma Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 77-113.

2. Ham, J., Kim, H., Shin Y. and Cho, H. (2017). Experimental investigation of pool boiling characteristics in Al_2O_3 nanofluid according to surface roughness and concentration. *International Journal of Thermal Sciences,* 114, 86-97.

3. Liu, Z. H., Yang, X. F. and Xiong, J. G. (2010). Boiling characteristics of carbon nanotube suspensions under sub-atmospheric pressures. *International Journal of Thermal Sciences,* 49(7), 1156-1164.

4. Gupta, R. R., Bhambi, S. and Agarwal, V. K. (2019). CFD modeling for nucleate pool boiling of nanofluids. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 75(6), 402-412.

5. You, S. M., Kim, J. H. and Kim, K. H. (2003). Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. *Applied Physics Letters*, 83, 3374-3376.

6. Modi, M., Kangude, P. and Srivastava, A. (2020). Performance evaluation of alumina nanofluids and nanoparticles deposited surface on nucleate pool boiling phenomena. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 146, 118833.

7. Ham, J., Kim, H., Shin Y. and Cho, H. (2017). Experimental investigation of pool boiling characteristics in Al_2O_3 nanofluid according to surface roughness and concentration. *International Journal of Thermal Sciences,* 114, 86-97.

8. Kim, H. and Kim, M. (2009). Experimental study of the characteristics and mechanism of pool boiling CHF enhancement using nanofluids. *Heat and Mass Transfer,* 45, 991–998.

9. Kwark, S. M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J. and You, S. M. (2010). Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 53(5-6), 972–981.

10. White, S. B., Shih, A. J. and Pipe, K. P. (2010). Effects of nanoparticle layering on nanofluid and base fluid pool boiling heat transfer from a horizontal surface under atmospheric pressure. *Journal of Applied Physics,* 107(11), 114302.

11. Liu, Z. H., Yang, X. F. and Xiong, J. G. (2010). Boiling characteristics of carbon nanotube suspensions under sub-atmospheric pressures. *International Journal of Thermal Sciences,* 49(7), 1156-1164.

12. Kwark, S. M., Moreno, G., Kumar, R., Moon, H. and You, S. M. (2010). Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 53(21-22), 4579-4587.

13. Manetti, L. L., Stephen, M. T., Beck, P. A. and Cardoso, E. M. (2017). Evaluation of the heat transfer enhancement during pool boiling using low concentrations of Al_2O_3-water based nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science,* 87, 191-200.

14. Kumar, N., Urkude, N., Sonawane, S. S. and Sonawane, S. H. (2018). Experimental study on pool boiling and Critical Heat Flux enhancement of metal oxides based nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 96, 37-42.

15. Reddy, Y. A. and Venkatachalapathy, S. (2019). Heat transfer enhancement studies in pool boiling using hybrid nanofluids. *Thermochimica Acta,* 672, 93-100.

16. Park, H. Lee, S. J. and Jung, S. Y. (2019). Effect of nanofluid formation methods on behaviors of boiling bubbles. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 1312-1318.

17. Bang, I. C. and Chang, S. H. (2005). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al_2O_3–water nano-fluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 48(12), 2407-2419.

18. Xue, H. S., Fan, J. R., Hong, R. H. and Hu, Y. C. (2007). Characteristic boiling curve of carbon nanotube nanofluid as determined by the transient calorimeter technique. *Applied Physics Letters,* 90, 184107.

19. Kim, S. C., Bang, I. C., Buongiorno, J. and Hu, L. W. (2007). Study of pool boiling and critical heat flux enhancement in nanofluids. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences,* 55(2), 211-216.

20. Shi, M. H., Shuai, M. Q., Chen, Z. Q. and Xuan, Y. (2007). Study on pool boiling heat transfer of nano-particle suspensions on plate surface. *Journal of Enhanced Heat Transfer,* 14(3), 223-231.

21. Kim, S. J., Bang, I. C., Buongiorno, J. and Hu, L. W. (2007). Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19-20), 4105-4116.

22. Liu, Z. H., Xiong, J. G. and Bao, R. (2007). Boiling heat transfer characteristics of nanofluids in a flat heat pipe evaporator with micro-grooved heating surface. *International Journal of Multiphase Flow*, 33(12), 1284-1295.

23. Liu, Z. H. and Liao, L. (2008). Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(9-10), 2593-2602.

24. Coursey, J. S. and Kim, J. (2008). Nanofluid boiling: The effect of surface wettability. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(6), 1577-1585.

25. Buongiorno, J., Hu, L. W., Apostolakis, G., Hannink, R., Lucas, T. and Chupin A. (2009). A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in light-water reactors. *Nuclear Engineering and Design,* 239(5), 941-948.

26. Xiao, B., Jiang, G. P. and Chen, L. X. (2010). A fractal study for nucleate pool boiling heat transfer of nanofluids. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 53, 30–37.

27. Dominguez-Ontiveros, E., Fortenberry, S. and Hassan, Y. A. (2010). Experimental observations of flow modifications in nanofluid boiling utilizing particle image velocimetry. *Nuclear Engineering and Design*, 240(2), 299-304.

28. Kim, H., Ahn H. S. and Kim, M. H. (2010). On the mechanism of pool boiling critical heat flux enhancement in nanofluids. *Journal of Heat Transfer*, 132(6), 061501.

29. İnternet: What are nanofluids and which are their applications? Web: http://qix.sagepub.com/cgi/reprint/9/6/859 adresinden 15 Ocak 2023'te alınmıştır.

30. Sözen, A., Variyenli H. I., Özdemir M. B. and Gürü, M. (2017). Upgrading the thermal performance of parallel and cross-flow concentric tube heat exchangers using MgO nanofluid. *Heat Transfer Research*, 48(5), 419–434.

31. Khanları, A. (2018). *Plakalı Isı Değiştiricilerin Deneysel ve Sayısal Analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-12.

32. Karakaya, U. (2018). *Nano Mineralojik Akışkanların Termofiziksel Özellikleri ve Isıl Sistemdeki Performansa Etkisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-20.

33. Peng, H., Ding, G. and Hu, H. (2011). Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(6), 960-970.

34. Kole, M. and Dey, T. K. (2012). Thermophysical and pool boiling characteristics of ZnO-ethylene glycol nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 62, 61-70.

35. Shoghl, S. N. and Bahrami, M. (2013). Experimental investigation on pool boiling heat transfer of ZnO, and CuO water-based nanofluids and effect of surfactant on heat transfer coefficient. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 45, 122-129.

36. Sarafraz, M. M. and Hormozi, F. (2015, April). Pool boiling heat transfer to dilute copper oxide aqueous nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 90, 224-237.

37. Murshed, S. M. S., Leong, K. C. and Yang, C. (2005). Enhanced thermal conductivity of TiO2 water based nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(4), 367-373.

38. Wang, B. X., Zhou, L. P. and Peng, X. F. (2006). Surface and size effects on the specific heat capacity of nanoparticles. *International Journal of Thermophysics*, 27, 139-151.

39. Tiznobaik, H. and Shin, D. (2013). Enhanced specific heat capacity of high-temperature molten salt-based nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 542-548.

40. Sundar, S. L., Singh, M. K. and Sousa, A. C. M. (2013). Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 44, 7-14.

41. Nguyen, C. T., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S. and Mintsa, H. A. (2008). Viscosity data for Al_2O_3-water nanofluid-hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(2), 103-111.

42. Teng, T. P. and Hung, Y. H. (2014). Estimation and experimental study of the density and specific heat for alumina nanofluid. *Journal of Experimental Nanoscience*, 9(7), 707-718.

43. Pastoriza-Gallego, M. J., Casanova, C., Paramo, R. and Pineiro, M. M. (2009). A study on stability and thermophysical properties (density and viscosity) of Al_2O_3 in water nanofluid. *Journal of Applied Physics*, 106, 123-129.

44. Çengel, Y. A. ve Afshar, J. G. (2015). *Isı ve kütle transferi esaslar ve uygulamalar* (Dördüncü Baskı). Ankara: Palme Yayıncılık, 581-611.



Gazili olmak ayrıcalıktır