

**KÜRESEL YÜZEYLERDE NANO AKIŞKANLARDA  
KAYNAMA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Harun ÇİFCİ**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Termodinamik Bilim Dalı  
Doç. Dr. Abdurrahim BÖLÜKBAŞI  
Yrd. Doç. Dr. Doğan ÇİLOĞLU  
2014**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KÜRESEL YÜZEYLERDE NANO AKIŞKANLARDA KAYNAMA  
ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Harun ÇİFCİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
Termodinamik Bilim Dalı**

**ERZURUM  
2014**

**Her hakkı saklıdır**



T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

KÜRESEL YÜZEYLERDE NANO AKIŞKANLARDA KAYNAMA ISI  
TRANSFERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Doç. Dr. Abdurrahim BÖLÜKBAŞI danışmanlığında, Harun ÇİFCİ tarafından hazırlanan bu çalışma 17/12/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği/oy çokluğu (5/5) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

İmza

Üye : Doç. Dr. Abdurrahim BÖLÜKBAŞI

İmza

Üye : Doç. Dr. İbrahim CAN

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ

İmza

Üye : Yrd. Doç. Dr. Doğan ÇİLOĞLU

İmza

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu .31.. / 12 / 2014 . tarih ve .52 / 1750 . nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU  
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 2012/490

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KÜRESEL YÜZEYLERDE NANO AKIŞKANLARDA KAYNAMA ISI TRANSFERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Harun ÇİFCİ

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Termodinamik Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdurrahim BÖLÜKBAŞI  
Ortak Danışman: Yrd. Doç. Dr. Doğan ÇİLOĞLU

Bu çalışmada, atmosfer basıncı altında ve doyma şartlarında nano akışkanlarla su verilerek soğutulan yüksek sıcaklıktaki küresel yüzeyler etrafında havuz kaynama ısı transfer karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel olarak %0,001, %0,01, %0,05 ve %0,1 olmak üzere dört farklı hacimsel konsantrasyonda saf su esaslı silika, alümina, titania ve bakır oksit nano akışkanları kullanılmıştır. Bronz malzemeden yapılmış küresel test numunesi yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldıktan sonra, doymuş şartlardaki nano akışkan süspansiyonlarına aniden daldırmıştır. Numuneye ait sıcaklık-zaman verileri ile soğuma eğrileri çizilmiş ve kaynama eğrileri elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar, test numunesinin soğuma performansının nano akışkan tipine ve konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. İlk su verme testlerinde saf suya yakın değerler elde edilmesine rağmen, nano akışkanlarda tekrarlı testler ile soğuma süresinin önemli ölçüde kısaldığı görülmüştür. Bu etki nano partikül konsantrasyonu ile artmıştır. Özellikle silika nano akışkan için tekrarlı su verme testleri ile film kaynama kaybolmuş ve kritik ısı akışı önemli derecede artmıştır. Deneysel sonuçlar, ayrıca, çekirdek havuz kaynama ısı transferinde tüm nano akışkanlar için önemli bir değişimin olmadığını göstermiştir. Sonuç olarak, nano akışkanlar ile su verme testleri sonrasında, test yüzeyi üzerinde biriken nano partiküllerin yüzeyin ıslatabilirliğini artırdığı ve böylece kritik ısı akısında artışa neden olduğu belirlenmiştir.

**2014, 62 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Isı transferi, Havuz kaynama, Nano akışkanlar, Küresel yüzeyler

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF BOILING HEAT TRANSFER ON THE SPHERICAL SURFACES IN NANOFLUIDS**

Harun ÇİFCİ

Atatürk University  
Institute of Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Abdurrahim BOLUKBASI

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Doğan CİLOGLU

In this study, the pool boiling heat transfer characteristics around spherical surfaces with high temperature quenched by nanofluids at saturated conditions and under atmospheric pressure was experimentally investigated. In the experiments, pure water-based silica, alumina, titania and copper oxide nanofluids with four different volumetric particle concentrations (0.001, 0.01, 0.05 and 0.1%) were used. After the spherical test specimen made up of brass material was heated at high temperatures, it was suddenly plunged into the nanofluid suspensions at saturated conditions. Using the temperature-time data of the specimen, the cooling curves were drawn and the boiling curves were obtained. The experimental results showed that the cooling performance of test specimen depended on the type of nanofluids and nanoparticle concentration. In the first quenching tests, although the cooling trend were nearly identical to that in pure water, it was observed that the cooling time was considerably shortened with the repetition tests in nanofluids. This effect enhanced with the nanoparticle concentrations. For silica nanofluids, especially, the film boiling region vanished during the repetition tests and the critical heat flux dramatically increased. The experimental results also showed that a considerable change in nucleate pool boiling heat transfer was not observed for all nanofluids. Consequently, it was determined that the nanoparticles deposited on the test surface after the quenching tests by nanofluids increased the wettability and thus caused the increment in critical heat flux.

**2014, 62 Pages**

**Keywords:** Heat transfer, Pool boiling, Nanofluids, Spherical surfaces

## **TEŞEKKÜR**

Bu çalışmayı gerçekleştirirken her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen hocalarım Sayın Doç. Dr. Abdurrahim BÖLÜKBAŞI ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Doğan ÇİLOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Öneri ve katkılarından dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Erdal SÖNMEZ ve Harran Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Öğr. Gör. Vehbi BALAK'a teşekkür ederim.

Bu çalışma 2012/490 nolu "Küresel Yüzeylerde Nanoakışkanların Kaynama Isı Transferinin İncelenmesi" isimli BAP projesi kapsamında yapılmıştır. Atatürk Üniversitesi Araştırma Fonu'na teşekkür ederim. Ayrıca her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen ailem ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

**Harun ÇİFCİ**

**Aralık, 2014**

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Nano Akışkanlarda Kaynama Isı Transferi İle İlgili Literatürdeki Çalışmalar .....	3
<b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>11</b>
2.1. Kaynama.....	11
2.2. Kaynamanın Türleri .....	11
2.3. Havuz Kaynama .....	12
2.3.1. Havuz kaynama eğrisi .....	12
2.3.2. Havuz kaynama aşamaları .....	13
2.4. Havuz Kaynama Bağlılıları .....	16
2.4.1. Çekirdek kaynama ısı transferi.....	16
2.4.2. Havuz kaynamada kritik ısı akısı .....	17
2.4.3. En küçük ısı akısı .....	18
2.4.4. Film havuz kaynaması .....	19
2.5. Havuz Kaynaması Üzerindeki Parametrik Etkiler .....	20
2.6. Nano Akışkanlar .....	21
2.6.1. Nano akışkanların özellikleri.....	23
2.6.2. Nano partikül çeşitleri ve üretimi .....	24
2.7. Nano Akışkanların Hazırlanmasında Kullanılan Yöntemler.....	24
2.8. Nano Akışkanların Isı Transferi Üzerindeki Etkileri .....	25
2.9. Nano akışkanların uygulama alanları .....	26
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>28</b>
3.1. Deneyleerde Kullanılan Nano Partiküller .....	28
3.2. Nano Akışkanların Hazırlanması .....	28

3.2. Nano Akışkanların Termal Özellikleri .....	30
3.3. Deneyleer .....	32
3.3.1. Deney düzeneği .....	32
3.3.2. Deneyin yapılışı.....	35
3.3.4. Kaynama eğrilerinin belirlenmesi .....	36
3.4. Belirsizlik Analizi.....	37
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....</b>	<b>39</b>
4.1. Soğuma Eğrileri.....	39
4.1.1. Saf suda soğuma eğrileri .....	39
4.1.2. Nano akışkanlarda soğuma eğrileri .....	41
4.2. Kaynama Eğrileri .....	50
4.2.1. Kritik ısı akısı (CHF) değerleri .....	50
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>57</b>
5.1. Sonuçlar.....	57
5.2. Öneriler.....	58
KAYNAKLAR .....	59
ÖZGEÇMİŞ .....	63

## SİMGELER DİZİNİ

A	Isı transfer yüzey alanı ( $m^2$ )
Bi	Biot sayısı
$c_p$	Sabit basınçta özgül ısı ( $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ )
D	Küre çapı (m)
g	Yerçekimi ivmesi ( $m.s^{-2}$ )
h	Isı taşınım katsayısı ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
$h_{fg}$	Buharlaşma gizli ısı ( $kJ.kg^{-1}$ )
k	Isı iletim katsayısı ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )
m	Kütle (kg)
Nu	Nusselt sayısı
Pr	Prandtl sayısı
$\dot{q}$	Birim alandan transfer edilen ısı akısı ( $kW.m^{-2}$ )
r	Yarıçap (m), Pürüzlülük faktörü
SSA	Spesifik yüzey alanı ( $m^2.g^{-1}$ )
T	Sıcaklık ( $^{\circ}C$ )
t	Zaman (s)
V	Hacim ( $m^3$ )
v	Özgül hacim ( $m^3.kg^{-1}$ )
$\epsilon$	Işınım yayma oranı
$\mu$	Viskozite ( $kg.s^{-1}.m^{-1}$ )
$\rho$	Yoğunluk ( $kg.m^{-3}$ )
$\sigma$	Yüzey gerilmesi ( $N.m^{-1}$ ), Stefan-Boltzman sabiti ( $W.m^{-2}.K^{-4}$ )
$\theta$	Boyutsuz sıcaklık
$\emptyset$	Hacimsel partikül oranı
$\gamma$	Yüzey enerjisi ( $N.m^{-1}$ )
vol.	Hacimsel konsantrasyon
W	Hata miktarı
x	Ölçüm parametreleri
R	Ölçülen boyut

## İndisler

bf	Temel akışkan
d	Doyma değeri
f,l	Sıvı
nf	Nano akışkan
i	Başlangıç
p	Partikül
sub	Doyma noktasının altındaki şartlar
T	Toplam
v	Buhar
y	Yüzey
$\infty$	Akışkan sıcaklığı
SL	Katı-sıvı
SV	Katı-buhar

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Atmosfer basıncında suyun kaynama eğrisi .....	13
Şekil 2.2. Kaynama krizi başlangıcı .....	15
Şekil 2.3. 300 K sıcaklığında bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları .....	22
Şekil 3.1. Hazırlanan, (a) Silika nano akışkanı, (b) Alumina nano akışkanı, (c) CuO nano akışkanı (d) TiO <sub>2</sub> nano akışkanı resimleri .....	30
Şekil 3.2. Deney düzeneğinin şematik resmi .....	34
Şekil 3.3. Deney numunesine ait teknik resim.....	35
Şekil 4.1. Doymuş saf suda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi. ....	40
Şekil 4.2. Doymuş saf suda soğutulan deney numunesinde tekrarlı deneyler sonucu elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri. ....	40
Şekil 4.3. Doymuş sıcaklıkta %0,001 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri. ....	42
Şekil 4.4. Doymuş sıcaklıkta %0,01 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri. ....	44
Şekil 4.5. Doymuş sıcaklıkta %0,05 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri. ....	46
Şekil 4.6. Doymuş sıcaklıkta %0,1 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri. ....	48
Şekil 4.7. Doymuş şartlarda (a) silika, (b) alumina, (c) bakır oksit, (d) titania nano akışkanlarına ait (%0,1 vol) kaynama eğrileri. ....	51
Şekil 4.8. (a) Test öncesi, (b) saf suda, (c) %0,1 alumina nano akışkanında, (d) %0,1 silika nano akışkanında, (e) %0,1 CuO nano akışkanında, (f) %0,1 TiO <sub>2</sub> nano akışkanında soğutulan deney numunesine ait resimler. ....	55
Şekil 4.9. Numune yüzeyi için temas açıları.....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2.1.</b> Çeşitli yüzey-akışkan çiftleri için $C_{s,f}$ değerleri.....	17
<b>Çizelge 3.1.</b> Nano partiküllerin özellikleri.....	28
<b>Çizelge 3.2.</b> Nano akışkanların, hacimsel konsantrasyonlara göre partikül ağırlıkları (1000 ml için).....	29
<b>Çizelge 3.3.</b> Oda sıcaklığında saf su ve nano akışkanların termal özellikleri .....	31
<b>Çizelge 3.4.</b> Deney numunesinin termal özellikleri.....	35
<b>Çizelge 3.5.</b> Isı transfer katsayılarına ait ölçülen parametreler için hata miktarları .....	38
<b>Çizelge 4.1.</b> Saf su ve nano akışkan kaynama deneyleri sonucu kritik ısı akıları .....	50

## 1. GİRİŞ

Kaynama, sıvının buhar basıncının dış basınca eşit olduğunda, katı-sıvı ara yüzeyinde oluşan buhar kabarcıklarının yüzeyden ayrılması olarak tanımlanır. Kaynama sırasında bir faz değişimi meydana geldiğinden dolayı akışkan sıcaklığı değişmeden, düşük sıcaklık farklarında yüksek miktarlarda ısı transferi elde edilebilir. Kaynama nükleer güç santralleri, elektronik ekipmanların soğutulması, ısı değiştiricileri, iklimlendirme sistemleri gibi, gibi birçok alanda karşılaşılan etkili bir ısı transfer mekanizmasıdır. Kaynama ısı transferi ısı transfer akışkanının termofiziksel özellikleri, akışkana ilave edilen seyreltici ve katı partiküllerin özelliklerine, sistem basıncına ve ısı transferi yüzeyinin özelliklerine oldukça bağlıdır.

Isı transferini iyileştirmeye yönelik yapılan çalışmalarda genel olarak “pasif”, “aktif” ve “karma” yöntemler kullanılmaktadır. Pasif yöntemler, pürüzlü yüzeyler kullanılması, boru içerisine iyileştirme elamanları yerleştirilmesi ve akışkan özelliklerinin değiştirilmesi gibi ekstra enerji kullanılmadan yapılan iyileştirme yöntemleridir. Aktif yöntemler, mekanik karıştırıcıların kullanılması, akışkanın titreşimi ve yüzey titreşimi uygulanması gibi yöntemlerdir. Bu yöntemlerde dışarıdan bir güç kullanmak zorunludur. Karma yöntemler ise aktif ve pasif yöntemlerin birlikte kullanılmasıyla yapılan iyileştirme yöntemleridir. Bu yöntemler ısı transferini artırmada uygulanmasına rağmen kullanılan geleneksel akışkanların (su, etilen glikol, yağ vs.) düşük ısı performansları nedeniyle ısı transferi miktarı sınırlanmaktadır. Bu bakımdan kullanılan akışkanların ısı iletim katsayılarını artırmak, ısı transferini artırmada etkili olacaktır. Bununla ilgili olarak ilk çalışmayı Maxwell (1891) başlatmıştır. Maxwell, temel bir sıvı içerisine katı partiküller ekleyerek akışkanların ısı transfer katsayılarını artırıcı çalışmalar yapmıştır. Ancak kullanılan partiküller mili ve mikro boyutta olduğundan dolayı ısı transferi uygulamalarında aşınma, tıkanma ve basınç düşümü gibi problemler ortaya çıktığından bu akışkanlar yaygınlaşmamıştır.

Günümüzde gelişen teknoloji ile nanometre boyutunda metalik ve metalik olmayan katı partiküller üretilmektedir. Genelde, 100 nanometreden küçük olarak üretilen katı

partiküller, ilk olarak Choi and Eastman (1995) tarafından geleneksel akışkanlarda ilave edilerek yeni nesil akışkan olan “nano akışkanlar” elde edilmiştir. Partiküllerin nano boyutta olması sayesinde, akışkan içerisinde partiküller homojen ve daha stabildir. Ayrıca tıkanma, basınç düşümü gibi durumlar bu akışkanlar için söz konusu olmamaktadır. Bu akışkanlar sayesinde, nano boyuttaki partiküller ile geniş yüzey alanlarının oluşturulması ve partiküllerin kinematik enerjisi sayesinde ısı transfer özelliklerinde önemli kazanımlar elde edilebilmektedir. Nano akışkanlara bu özellikleri ile son yıllarda ilgi artmış ve nükleer sistemlerin soğutulması, elektronik sistemlerin soğutulması, iklimlendirme sistemleri gibi birçok uygulamada kullanılmıştır. Genel olarak literatürdeki çalışmalarda temel akışkan olarak de-iyonize su, yağ ve etilen glikol, nano partikül olarak, metalik nano partiküller (Cu, Al, Ti, Au, Ag, Fe), seramik partiküller ( $Al_2O_3$ , CuO,  $SiO_2$ ,  $Fe_3O_4$  ve  $TiO_2$ ) ve karbon nanotüpler (CNT) kullanılmıştır.

Su verme işlemi, yüksek sıcaklıklardaki katı malzemelerin, sıvı akışkanlara daldırılarak yapılan bir soğutma işlemi olarak bilinir. Su verme işlemi endüstride birçok alanda kullanılmaktadır. Bilindiği gibi, çeliklerin sertleştirilmesinde, önce malzemeler yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılır ve ardından sıvıya daldırılarak soğutulur. Bu işlemin sonucunda çeliklere bazı mekanik özellikler kazandırılır. Ayrıca su verme işlemi nükleer reaktörlerin soğutulmasında da önemli bir yere sahiptir. Bu tür uygulamalarda soğuma süresi oldukça önemli bir parametredir. Soğuma süresi de ancak ısı transfer miktarının artırılması ile azalacaktır. Su verme işleminde oluşan film kaynama mekanizması kaynama ısı transferini sınırlayıcı bir etkiye sahiptir. Isıtıcı yüzeyinde oluşan kararlı bir buhar film tabakası ısı transferine karşı termal bir direnç oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayı kaynama ısı transfer miktarının artırılması için film kaynama bölgesinden çekirdek kaynama bölgesine hızlı bir geçiş sağlanmalıdır. Nano akışkanlar sayesinde bu geçişin hızlanacağı beklenmektedir (Trisaksri and Wongwises 2007).

### 1.1. Nano Akışkanlarda Kaynama Isı Transferi İle İlgili Literatürdeki Çalışmalar

Literatürde, nano akışkanlarda kaynama ısı transferi üzerinde yapılan çalışmalarda genel olarak ısıtıcı yüzeyin özellikleri, partikül çeşidi ve konsantrasyonu gibi etkiler incelenmiştir. Bu çalışmalarda bulunan sonuçlar genel olarak kritik ısı akısı (CHF), minimum ısı akısı (MHF), ve kaynama ısı transferi (BHT) açısından değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalarda genelde kritik ısı akısı değerinin arttığı tespit edilirken, kaynama ısı transferi değerlerinde birbirleriyle çelişkili sonuçlar bulunmuştur.

Bang and Chang (2005)  $Al_2O_3$  ve su ile hazırlanan nano akışkanlar ile yassı yüzeylerde kaynama ısı transferi deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler sonucu araştırmacılar nano akışkanlarla yapılan deneylerde kaynama ısı transferinin saf suya göre daha az olduğunu ve partikül konsantrasyonunun arttıkça ısı transfer katsayısının azaldığını tespit etmişlerdir. Ancak nano akışkanlarda yapılan deneylerde CHF artışının olduğunu ifade etmişlerdir.

Wen and Ding (2005) tarafından yapılan çalışmada  $Al_2O_3$  ve su ile hazırlanan nano akışkan ile paslanmaz çelikten üretilmiş yassı yüzeylerde kaynama ısı transferi atmosferik basınç altında incelenmiştir. Araştırmacılar, kütleli olarak %1,25 konsantrasyonlu nano akışkanlar ile yapılan deneyler sonrasında ısı transfer katsayısında %40 artış olduğunu rapor etmiştir. Bu artışın sebebi olarak hem nano akışkanların hem de yüzey özelliklerinin etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir.

Kim *et al.* (2008) tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklıklardaki paslanmaz çelik küresel yüzeylere, alümina nano partikülleri (hacimsel olarak %0,001, %0,01, %0,1) ve deyionize su esaslı nano akışkanlarda su verme işlemi uygulanmıştır. Atmosferik basınç ve doyma sıcaklıklarında yapılan çalışmada araştırmacılar tekrarlanan deneyler sonrası yüksek sıcaklıklarda, film kaynama bölgesinden geçiş kaynama bölgesine geçişin hızlandığını ifade etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, özellikle dördüncü tekrar deneyinden sonra MHF değerinde önemli artışların olduğunu belirtmişlerdir.

Lotfi and Shafii (2009) tarafından yapılan çalışmada Ag-su ve TiO<sub>2</sub>-su ile kütsel konsantrasyonları %0,5, 1, 2, 4 olan nano akışkanlar hazırlanarak, yüksek sıcaklıkta (700°C) gümüş küreye su verme işlemi uygulanmıştır. Yazarlar deney sonuçlarına göre, nano akışkanların kaynama ısı transfer katsayılarının saf suya göre daha düşük olduğunu belirtmiştir. Ancak yazarlar, su içerisindeki nano partikül varlığının film kaynamayı engellediğini, tekrarlanan deneylerde çekirdek kaynamanın arttığını ve kürenin daha hızlı soğuduğunu tespit gözlemiştir. Bu film bölgesinin engellenmesini sağlayan etkinin ise yüzeye çöken partiküller olduğunu ifade etmişlerdir. Yazarlar bu etkinin TiO<sub>2</sub> nano akışkanları ile gerçekleştiğini bunun sebebinin ise TiO<sub>2</sub> nin ısı iletkenlik değerinin gümüşten düşük olmasına bağlamışlardır. TiO<sub>2</sub> partiküllerinin bir çeşit yalıtım görevi görerek kürenin yüzey sıcaklığını düşük hale getirdiğini ve bu sayede çekirdek kaynamanın başlamasının kolaylaştığını belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca TiO<sub>2</sub> partiküllerinin radyasyon emisyonunun gümüşten daha yüksek olmasının ısı transferi artırıcı etkiye sahip olduğunu vurgulamışlardır.

Kim *et al.* (2009) tarafından yapılan çalışmada metalik küçük kürelere (~1cm) su verme işlemi uygulanmıştır. Araştırmacılar çalışmalarında, düşük konsantrasyonlarda (≤%0,1 vol.) alüminyum, silika ve elmas nano partikülleriyle saf suda hazırlanan nano akışkanlar kullanmıştır. Isıtıcı yüzey olarak, paslanmaz çelik ve zirkonyum küreler kullanılmıştır. Araştırmacılar buldukları sonuçlarda, nano akışkanla yapılan deneyde temiz küre yüzeyi için su verme davranışının, saf suyla yaklaşık olarak aynı olduğunu tespit etmiştir. Tekrarlanan deneylerde ise alüminyum ve silika nano akışkanlarında her iki ısıtıcı yüzey için de CHF’de önemli ölçüde artışlar görülmüştür. Ancak elmas nano akışkanının CHF değeri diğerlerinden yüksek olmasına karşın, tekrarlanan deneylerde önemli artışlar sağlanmamıştır. Deney sonuçlarına göre yüzeye çöken partiküller film kaynamanın yok olmasını hızlandırmış ve minimum ısı akısını arttığı görülmüştür. Tekrarlanan deneylerde CHF ve MHF alüminyum ve silika için önemli ölçüde artarken elmas için önemli değişikliklerin olmadığı görülmüştür.

Kwark *et al.* (2010) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO ve elmas nano partikülleri ile hazırlanan, 1g/L’den küçük konsantrasyonlardaki nano akışkanlar ile kaynama ısı transferini 1 atm basınçta

incelenmişlerdir. Deneylede kaynama sırasında yüzeyde ince bir nano partikül film tabakası gözlenmiş ve bu bölgelerde mikro boyutlarda buharlaşmalar meydana geldiği belirtilmiştir. Bunun etkisiyle de CHF'nin arttığı anlaşılmıştır. Deneyle sonucunda maksimum CHF oluşurken, BHT'de (kaynama ısı transferinde) azalma meydana gelmediği tespit edilmiştir. CHF artışına, sebep olan etkinin ise ısıtıcı yüzeye çöken nano partiküller olduğu yazarlar tarafından vurgulanmıştır.

Kim *et al.* (2010) yüksek sıcaklıklardaki metal çubuk ve kürelere, atmosferik basınçta alümina nano partikülleri (hacimsel olarak %0,1) ve deiyonize su ile hazırlanan nano akışkanlarda su verme işlemi uygulamışlardır. İlk deneylede nano akışkanlarda su verme davranışları saf su ile benzerlik gösterse de tekrarlanan deneyle sonrasında ısıtıcı yüzeyine çöken partiküllerin etkisiyle film kaynamanın daha erken sonlandığını ve su verme süresinin kısaldığını rapor etmişlerdir. Ayrıca yazarlar MHF sıcaklığının da önemli ölçüde arttığını raporlarında belirtmişlerdir.

Kathiravan *et al.* (2010) tarafından yapılan çalışmada, ortalama boyutları 10 nm olan bakır nano partiküller ile %0,25, 0,5 ve 0,1 kütleli konsantrasyonlarında hazırlanan nano akışkanlar kullanılmıştır. Nano akışkanlar, nano partiküllerin saf su ve saf suya hacimsel olarak %9 oranında sodyum laurik sülfat anionic surfaktif (SDS) akışkana dağıtılmasıyla elde edilmiştir. Isıtıcı yüzey olarak 30x30x0,44 mm ölçülerinde paslanmaz çelik kullanılmıştır. Yazarlar deney sonuçlarında saf su için CHF değerinin, seyreltili akışkandan %80 daha yüksek olduğunu tespit etmiştir. Bakır nano partikülleriyle oluşturulan nano akışkanlarda hacimsel olarak %0,25, %0,5 ve %1 konsantrasyonlarda, CHF değerlerinin saf suya göre sırasıyla %25, %40 ve %48 daha yüksek olduğu görülmüştür. Saf su-nano partikül ve surfaktif akışkan-nanopartikülle hazırlanan nano akışkanlarda, konsantrasyon artırıldıkça ısı transfer katsayısının saf suya göre azaldığı anlaşılmıştır. Nanopartikül-su ve nanopartikül-su-seyreltili akışkanla hazırlanan nano akışkanlarda (%1 vol.), CHF değerlerinde saf suya göre sırasıyla %48 ve %106 artış elde edilmiştir. Ayrıca yazarlar, ısı transfer katsayısının partikül konsantrasyonu arttıkça azaldığını belirtmiştir.

Kim *et al.* (2011)  $Al_2O_3$ -su nano akışkanı ve  $Al_2O_3$  nano partikül çökeltme tüpü kullanarak CHF artışını incelemiştir. Yazarlar deney sonuçlarında CHF artışının yaklaşık %80 olduğunu belirtmişlerdir. CHF artışının sebebi olarak test yüzeyine çöken nano partiküller olduğu ancak, konsantrasyon farklılıklarının CHF artışında etkisi olmadığını vurgulamışlardır.

Wen *et al.* (2011) tarafından yapılan çalışmada hacimsel olarak %0,001, %0,01 ve %0,1 konsantrasyonlarda iki adım metoduyla hazırlanan alüminyum-su nano akışkanı kullanılmıştır. Isıtıcı yüzey olarak, pirinç plaka yüzey kullanılarak atmosferik basınç altında ısı transferi davranışları incelenmiştir. Yazarlar deney sonucunda kaynama ısı transferinin artması ya da azalmasının, partikül boyutuna ve ısıtıcı yüzey geometrisinin değişimine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca yazarlar yüzeye çöken partiküllerin çekirdek kaynama ısı transferini artırdığını belirtmişlerdir.

Bolukbasi and Ciloglu (2011) tarafından yapılan çalışmada  $600^{\circ}C$ 'ye kadar ısıtılan düşey silindirikler,  $SiO_2$  ve su ile hacimsel olarak %0,001, 0,01, 0,05 ve 0,1 konsantrasyonlarında iki adım yöntemiyle hazırlanan nano akışkanlara, atmosferik basınç altında daldırılarak ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda kaynama ısı transferinin saf suyla yapılan deneyle aynı olduğu, ancak yüksek konsantrasyonlarda tekrarlanan deneylerde ise film kaynama bölgesinin kaybolduğu ve kritik ısı akısının (CHF) artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin ise yüzeye çöken partiküller olduğu anlaşılmıştır.

Ciloglu and Bolukbasi (2011) tarafından yapılan çalışmada farklı konsantrasyonlarda  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  ve  $CuO$  nanopartikülleri ile hazırlanan nano akışkanların (hacimsel oran olarak %0,01, 0,05 ve 0,1), pirinç silindirik çubuk kullanılarak ısı transferi davranışı incelenmiştir. Deneyler atmosferik basınç altında gerçekleştirilmiş olup, soğuma süresinin, konsantrasyon kadar nanopartikül cinsine de bağlı olduğu anlaşılmıştır. Tekrarlanan testler sonucunda, test numunesi yüzeyine biriken partiküller nedeniyle pürüzlü yüzeyler meydana gelmiş ve böylece film kaynama ortadan kalkmıştır. Ayrıca yüzeyde çöken partiküller ıslatılabilirliği artırmış ve bunun etkisiyle

CHF'de önemli artışlar tespit edilmiştir. Deney sonuçlarında çekirdek kaynama ısı transferinde kayda değer değişiklik olmamıştır.

Huang *et al.* (2011) ısıtıcı yüzey olarak, kalınlığı 0,3 mm ve uzunluğu 50 mm olan nikel tel kullanarak, TiO<sub>2</sub> ve su (kütlesel olarak %0,01-1 konsantrasyonları arasında) ile hazırlanan nano akışkanlarda havuz kaynama deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucu yazarlar yüzeyin kaplanması sonucunda termal bir direnç etkisinin oluştuğunu ve buna bağlı olarak çekirdek kaynama ısı transfer katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca yazarlar ısı akısı ve konsantrasyonun artmasıyla, CHF'nin arttığını tespit etmişlerdir. Bunu sağlayan etkinin kaplanan yüzeydeki nano partiküllerin ıslak yüzey alanını artırması olduğunu ifade etmişlerdir. Yazarlar, deneysel sonuçlara göre maksimum CHF artışını %82,7 olarak rapor etmiştir. (nano akışkan %1 ve ısı akısı 1000 kW/m<sup>2</sup>).

Sheikhhahai *et al.* (2011) ısıtıcı yüzey olarak yatay ince bir Ni-Cr tel kullanarak, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nano partikülü ve etilen glikol-su ile hazırlanan nano akışkanlarda kaynama ısı transferini incelemişlerdir. Deneylerde nano akışkan konsantrasyonunun artmasıyla, kaynama ısı transferi katsayısının azaldığını belirtmişlerdir. Yazarlar, nano partiküllerin çekirdek kaynamasını geciktirdiğini ancak CHF'yi artırdığını ifade etmiştir. Ayrıca, maksimum CHF artışının hacimsel olarak %0,1 konsantrasyonlu nano akışkanda oluştuğunu ve bu artışa yüzeye çöken partiküllerin sebep olduğunu vurgulamışlardır.

Stutz *et al.* (2011) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano partikülü ve su ile hazırlanan nano akışkanda, ısıtıcı yüzey olarak platin tel kullanarak, kaynama ısı transfer karakteristiklerini atmosferik basınç altında incelemişlerdir. Yazarlar, ısıtıcı yüzeyine çöken partiküllerin yüzeyini kalınlaştırması sonucu termal direncin arttığını, bunun sonucunda ısı transfer katsayısının azaldığını vurgulamıştır. Ancak, yüzeye çöken partiküllerin CHF artışına sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Harish *et al.* (2011) alüminyum yassı yüzey kullanarak, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve su ile (hacimsel olarak %1 ve %2 konsantrasyonlarda) hazırlanan nano akışkanlarda havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, kaynama ısı transferindeki artış ya da azalışının yüzeye

çöken partiküle bağlı olduğunu ve çöken bu partiküllerin CHF'nin artmasına sebep olduğunu vurgulamıştır.

Yang and Liu (2011) tarafından yapılan çalışmada geliştirilmiş silika ile hazırlanan nano akışkan ile geleneksel nano akışkanın CHF ve BHT açısından arasındaki farklar incelenmiştir. Geliştirilmiş nano akışkanın geleneksel olandan farkının uzun süre stabil halini koruması olduğu belirtilmiştir. CHF ve BHT'nin farklılıkların genel olarak ısıtıcı yüzeyinde meydana gelen değişiklikte ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Geleneksel nano akışkanla yapılan deneyde yüzeyde çökme meydana geldiği, geliştirilmiş nano akışkanla yapılanda ise yüzeyde değişiklik meydana gelmediği görülmüştür. Yazarlar, geliştirilmiş nano akışkanla yapılan deneyde ısı transfer katsayısının saf suya göre daha fazla olduğunu ve CHF'de önemli bir değişiklik olmadığını, geleneksel nano akışkanda ise ısı transfer katsayısının azalıp, CHF'nin attığını ifade etmişlerdir.

Ahmed *et al.* (2012) bakır yüzeylerde, Alüminyum nano partikülü ve su ile hazırlanan nano akışkanlarda (hacimsel olarak %0,01, %0,1, %0,05) havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonrasında ısıtıcı yüzeyinde nano partikül tabakası oluşmuş ve daha sonra bu yüzeyler ile saf suda deneyler gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, yüzeye çöken partiküller sayesinde, kaynama ısı transfer katsayısının arttığını vurgulamıştır.

Jung *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada  $Al_2O_3$  partikülleri ile hacimsel olarak %0-0,1 konsantrasyonları arasında hazırlanan nano akışkanlara, stabilizer olarak polivinil alkol katılmış ve bunun kritik ısı akısı (CHF) ve kaynama ısı transferi katsayısı (BHTC) üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde ısıtıcı yüzey olarak yassı bakır yüzey kullanılmıştır. Deneyler sonucunda CHF'nin arttığı görülürken, BHTC düşüş göstermiştir. Yazarlar CHF artışının nedenini ısıtıcı yüzeyindeki değişimlere bağlarken, kaynama ısı transferinin azalmasının sebebini, yüzeye çöken partiküllerin termal direnci artırması olarak görmüşlerdir. Ayrıca yazarlar, stabilizerin efektif kaynama yüzey alanını artırmada etkili olduğunu, ancak bunun %0,001 hacimsel konsantrasyona kadar sağlandığını ifade etmiştir.

Lee *et al.* (2012) tarafından yapılan çalışmada, nano akışkan olarak magnetik madde-su (MWNF), alüminyum-su (AWNF) ve titanyum-su nano akışkanları, ısıtıcı yüzey olarak da 100mm uzunluğunda Ni-Cr tel kullanılarak atmosferik basınç altında ısı transfer davranışları incelenmiştir. Deneysel sonucu tüm nano akışkanlarda CHF değerlerinde önemli artışlar elde edilmiştir. MWNF deki CHF artışı %160-240, AWNF de %140–230, TWNF deki artış %150–205 olmuştur. Yazarlar bu artışların sebebinin yüzeye çöken partiküllerin, yüzey ıslatılabilirliğini artırmasından kaynaklandığını belirtmekte olup MWNF deki artışın daha fazla olmasını ise suda daha iyi dağılımı olmasına bağlamaktadır.

Ahn *et al.* (2013) alümina nano akışkanı kullanılarak, 10 mm yassı bir bakır yüzeyde havuz kaynama deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Atmosferik basınç altında gerçekleştirilen deneylerde, CHF artışlarının olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar saf su için CHF değerini  $1532 \text{ kW/m}^2$  olarak bulurken, nano akışkan deneyinde bu değer  $2096 \text{ kW/m}^2$  olduğunu tespit etmişlerdir. Bu artışın sebebini, çöken partiküllerin yüzey koşullarını değiştirmesine bağlayan araştırmacılar, nano partikül kaplı yüzey ile saf suda deney gerçekleştirmiş ve CHF değerini  $1900 \text{ kW/m}^2$  olduğunu rapor etmişlerdir. Ancak CHF artışlarına rağmen, kaynama ısı transfer katsayısının azaldığı çalışmada belirtilmiştir.

Shahmoradi *et al.* (2013) tarafından yapılan çalışmada yassı ısıtıcı yüzeyde, alumina-su nano akışkanı kullanılarak kaynama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonucu araştırmacılar, CHF'nin partikül konsantrasyonu arttıkça yükseldiğini, ancak ısı transfer katsayısının azaldığını tespit etmişlerdir. CHF'nin yükselmesini yüzey ıslatılabilirliğinin artmasına bağlayan araştırmacılar, ısı transfer katsayısının azalmasının sebebini yüzeye çöken partiküllerin termal direnci artırması olarak ifade etmişlerdir.

Khosmehr *et al.* (2014) tarafından yapılan çalışmada, karbon nanotüp kullanılarak hazırlanan (kütleli olarak %0,8 - %0,1) deiyonize su esaslı nano akışkanlar ile pürüzlü ve pürüzsüz olmak üzere iki farklı yüzeye su verme işlemleri uygulanmıştır. Deneysel sonucunda akışkan türü gözetmeksizin, soğuma süresinin pürüzlü yüzeylerde daha kısa

sürdüğünü ifade eden yazarlar, partikül konsantrasyonunun artmasıyla soğuma süresinin arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca deney tekrarlarının artmasıyla CHF değerleri sabit kalırken MHF değerlerinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Fan *et al.* (2014) küresel bakır yüzeylere %0,001'den küçük kütleli konsantrasyonlarda grafen oksit-su ile hazırlanan nano akışkanlarda su verme işlemi uygulanmıştır. Araştırmacılar özellikle, yüksek konsantrasyonlu akışkanlarda tekrarlanan deneyler sonucu ısıtıcı yüzeyinde biriken partiküllerin yüzey kontak açısını azaltarak ısılatılabilirliği artırdığını rapor etmişlerdir. Bunun sonucunda ise kayda değer bir CHF artışının meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Song *et al.* (2014) düşük konsantrasyonlu (%0,0001, %0,001, %0,01) SiC-su nano akışkanları kullanılarak havuz kaynamada CHF değişiklikleri incelemişlerdir. Araştırmacılar ısıtıcı yüzey olarak paslanmaz çelik yüzey kullanmış olup, deneylerini atmosferik basınç altında gerçekleştirmiştir. Deneyler sonucunda araştırmacılar CHF artışını %105 olarak tespit etmiş ve bu değeri %0,01 hacimsel konsantrasyonda elde ettiklerini rapor etmiştir. Araştırmacılar CHF' de ki bu artışın sebebini, yüzeye çöken partiküllerin ısılatılabilirliği artırmasıyla ilişkilendirmiştir.

Bu çalışmada, küresel yüzeylerde nano akışkanlarda kaynama ısı transferi deneysel olarak incelenmiştir. %0,1, %0,05, %0,01, % 0,001 hacimsel konsantrasyonlarda, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CuO nano partikülleri ve saf su ile hazırlanan nano akışkanlar kullanılmıştır. Deney numunesi olarak kullanılan pirinç küre 600°C'ye ısıtıldıktan sonra, doyma sıcaklığındaki nano akışkanlara atmosferik basınç altında daldırılmıştır. Deneyler sonrasında numune merkezinden ölçülen sıcaklıklar ile soğuma eğrileri oluşturulmuştur. Daha sonra "Lumped metodu" kullanılarak kaynama eğrileri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu grafikler irdelenerek nano partikül ve konsantrasyon farklılıklarının kaynama ısı transferi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Kaynama

Sıvının buhar basıncının dış basınca eşit olduğu anda, katı-sıvı ara yüzeyinde buhar kabarcıklarının oluşmasına “kaynama” denir. Kaynama olayı esnasında bir faz değişimi olduğu için, akışkana veya akışkandan olan ısı geçişi, akışkanın sıcaklığından etkilenmeden gerçekleştirilebilir. Dolayısıyla kaynama işleminde, küçük sıcaklık farkları ile yüksek miktarda ısı geçişi elde edilebilir. Gizli ısı  $h_{fg}$ 'ye ek olarak sıvı-buhar ara yüzeyindeki yüzey gerilmesi ( $\sigma$ ) ve iki faz arasındaki yoğunluk farkı da kaynama işleminde önemli etkiler meydana getirmektedir. Yoğunluk farkı  $g(\rho_l - \rho_v)$  ile doğru orantılı olan bir kaldırma kuvvetini oluşturur. Gizli ısı ve kaldırma kuvveti ile desteklenen akışın birleşik etkileri nedeniyle, kaynama sırasında ısı taşınım katsayıları ve ısı geçişi, faz değişimi olmadan gerçekleşen ısı geçişindeki değerlerden genellikle çok daha büyüktür (Incropera and DeWitt 1990). Kaynama işlemi yüzey sıcaklığı  $T_y$ , sıvı basıncına karşı gelen doyma sıcaklığı  $T_d$ 'yi aştığı zaman gerçekleşir. Katı yüzeyden sıvıya ısı geçişi olur ve  $\Delta T \equiv T_y - T_d$  olarak tanımlanmak üzere, Newton'un soğuma kanuna göre;

$$\dot{q} = h(T_y - T_d) = h\Delta T \quad 2.1$$

olarak tanımlanır.

### 2.2. Kaynamanın Türleri

**Havuz Kaynaması:** Akışkanın kitlesel bir akışı yoktur. Akışkanın yüzey üzerindeki hareketi, kabarcık büyümesi ve ayrılmasından kaynaklanan karışma ve doğal taşınım ile gerçekleşir.

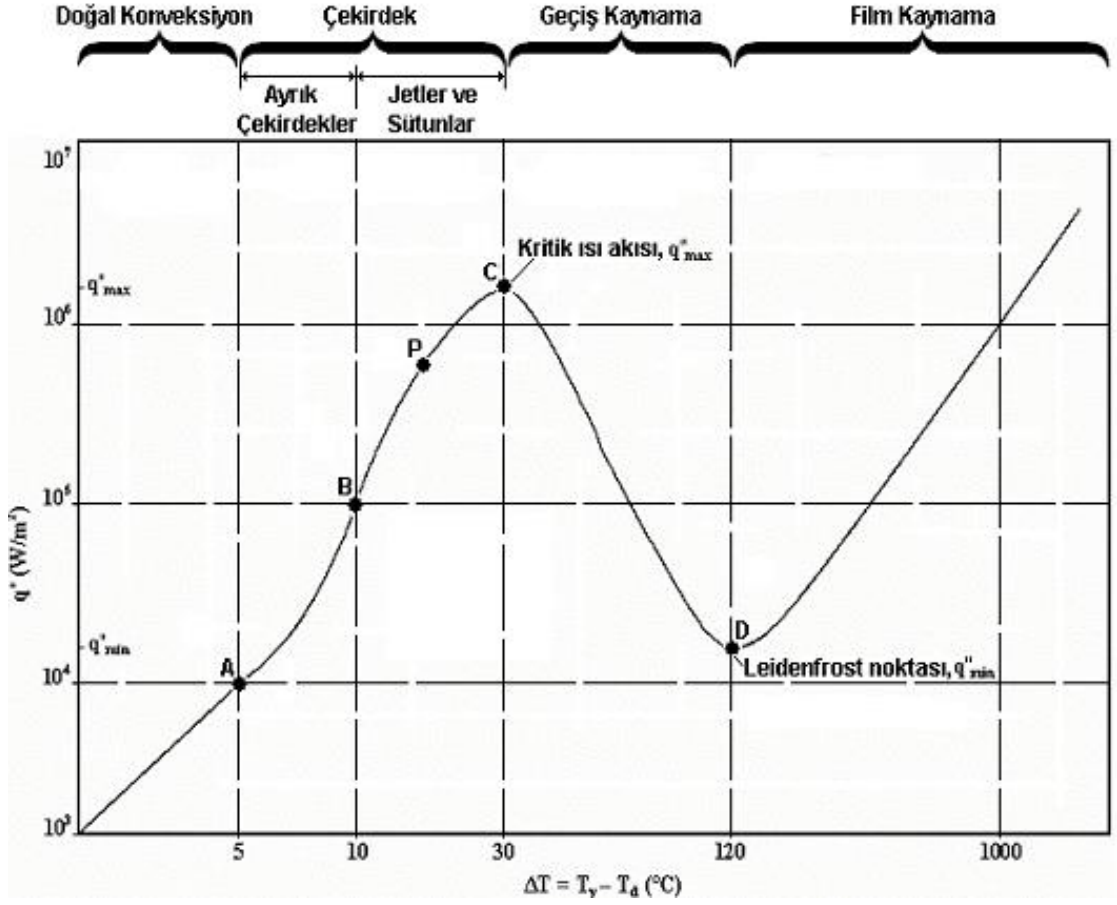
**Zorlanmış Taşınımlı Kaynama:** Akışkanın hareketi, doğal taşınım ve kabarcık kaynaklı kaynama kadar, bir dış kuvvetin etkisiyle de gerçekleşir.

Kaynama sıvının sıcaklığına bağlı olarak da sınıflandırılabilir. Eğer sıvının sıcaklığı doyma sıcaklığının altında ise “aşırı soğutulmuş kaynama (subcooled)”, doyma sıcaklığında ise “doymuş kaynama” denir. Aşırı soğutulmuş sıvılarda yüzeyde oluşan kabarcıklar sıvı içerisinde yoğuşabilir. Doymuş kaynamada sıvının sıcaklığı doyma sıcaklığını biraz aşar. Yüzeyde oluşan kabarcıklar kaldırma kuvvetinin etkisiyle, sıvının içinde yukarı doğru itilir ve serbest yüzeyden dışarı çıkar.

### **2.3. Havuz Kaynama**

#### **2.3.1. Havuz kaynama eğrisi**

Havuz kaynamasında farklı mekanizmaların ve düzenlerin ilk olarak incelenmesi Nukiyama (1934) tarafından gerçekleştirilmiştir. Nukiyama, yatay bir platin teli doyma sıcaklığındaki su havuzu içerisine yerleştirmiş ve telden elektrik akımı geçirerek suya aktarılan ısı akısındaki değişiklikleri incelemiştir. Bu deney düzeneği, tel sıcaklığı  $T_y$  nin (kızma farkı  $\Delta T$ ) bağımlı değişken olduğu ve beslenen gücün (ısı akısı  $\dot{q}_y$ ) bağımsız değişken olduğu, güç kontrollü bir çalışmadır. Atmosferik basınç altında yapılan deney sonrasında suya verilen ısıya ait grafik Şekil 2.1'deki gibi elde edilmiştir. Bu eğriye göre kaynama mekanizması, doğal konveksiyonla kaynama, çekirdek kaynama, geçiş kaynama ve film kaynama gibi dört ayrı kısımda incelenebilmektedir.



Şekil 2.1. Atmosfer basıncında suyun kaynama eğrisi

### 2.3.2. Havuz kaynama aşamaları

**Doğal taşınım ile kaynama:** Isıtıcı yüzey ile akışkan arasındaki sıcaklık farkının  $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$ 'ye kadar olduğu bölgelerde doğal taşınım ile kaynama gerçekleşmektedir. Bu bölgede, sıvının doyma sıcaklığında kaynaması için sıvı ile temas eden yeterli buhar yoktur. Sıcaklık farkı artırılmaya başlandığından itibaren kabarcık oluşumu başlamaktadır. Akışkanın hareketleri doğal taşınım etkileri ile oluşmaktadır. Akışın laminer veya türbülanslı olmasına göre, ısı taşınım katsayısı ( $h$ ), sırasıyla,  $\Delta T$ 'nin  $1/4$  veya  $1/3$  kuvvetiyle değişir. Buna bağlı olarak ısı akısı ( $\dot{q}$ )  $\Delta T$ 'nin  $5/4$  veya  $4/3$  kuvvetiyle değişir (Incropera and Dewitt 1990).

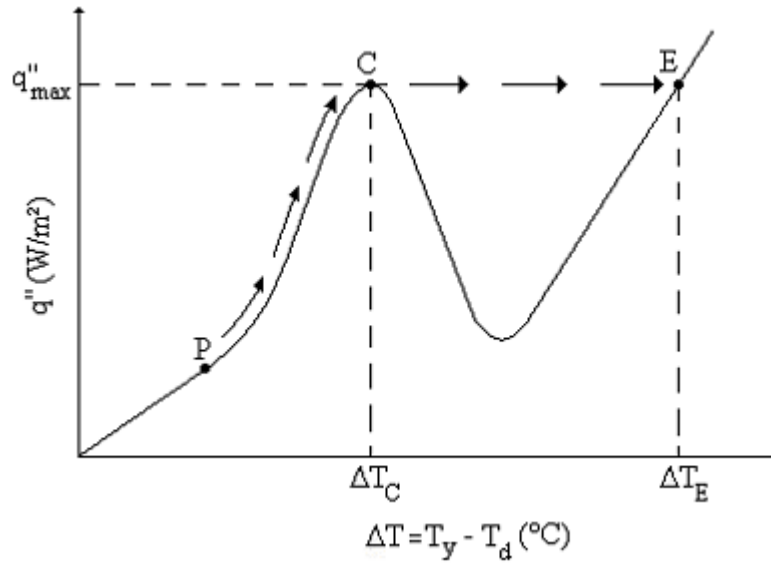
**Çekirdek kaynama:** Sıcaklık farkının  $\Delta T \approx 5-30^\circ\text{C}$  değerleri arasında olduğu bölgede çekirdek kaynama gerçekleşir. Bu aşamada iki farklı akış düzeni vardır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, A-B noktaları arasında kabarcıklanma odaklarında ayrı kabarcıklar oluşur ve yüzeyden ayrılır. Bu ayrılmanın sonucunda, buhar ve sıvı fazlarındaki akışkanlar karışır ve böylece  $h$  ve  $\dot{q}$  artar. Bu aşamada ısı alışverişinin büyük miktarı ısıtıcı yüzeyden sıvıya doğrudan aktarım ile gerçekleşir. Sıcaklık farkı artırıldığında ise B noktasından itibaren kabarcıklanma odakları artar ve kabarcıklar arasındaki etkileşim artarak kabarcık birleşmesi başlar. B-C noktaları arasında birleşen buhar kabarcıkları jet veya sütunlar halinde yükselerek buhar yastıklarını oluşturur. Çok sayıdaki kabarcıklar arasındaki etkileşim nedeniyle, sıvının ısıtıcı yüzey yakınında hareketi kısıtlanır ve P noktasında  $h$  maksimum değere ulaşır. Bu noktadan sonra  $\Delta T$  artarken  $h$  azalmaya başlar. Ancak P-C arasında  $\Delta T$  artışının  $h$ ’in azalmasından fazla olması ile  $\dot{q}$  artmaya devam eder. C noktasında,  $\Delta T$ ’deki artış  $h$ ’deki azalma oranına eşitlenir ve bu noktada maksimum ısı akısı  $\dot{q}_{\max}$  meydana gelir. Bu noktadaki ısı akısı genelde “kritik ısı akısı” olarak adlandırılır.

Küçük sıcaklık farklarında, yüksek ısı taşınım katsayıları ve yüksek ısı akıları elde edilebildiği için, mühendislik uygulamalarında çoğu sistemlerin çekirdek kaynama düzeninde çalıştırılması istenir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi sıcaklık farkları ısı akılarına bölündüğünde ısı taşınım katsayılarının  $10^4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ’ den yüksek olduğu açıktır. Bu değerler, faz değişimi olmadan gerçekleştirilen taşınım ile ısı transferi değerlerinden çok daha büyüktür.

**Geçiş kaynaması:** Sıcaklık farkı  $\Delta T \approx 120^\circ\text{C}$  olduğu D noktasına kadar olan bölgeye “geçiş kaynama”, “kararsız kaynama” veya “kısmi film kaynama” denir. Bu bölgede kabarcık oluşumunun çok yüksek seviyede olmasından dolayı ısıtıcı yüzey üzerinde buhar filmi oluşmaya başlar. Yüzey üzerindeki herhangi bir noktada koşullar çekirdek ve film kaynama düzenleri arasında gidip gelir. Sıcaklık artırılmaya devam ettikçe yüzey üzerindeki buhar filmi miktarı da artar. Buharın ısı iletim katsayısı, sıvınıninkine oranla daha küçük olduğu için bu bölgede  $\Delta T$  artarken  $h$  ve  $\dot{q}$  azalır.

**Film kaynaması:** Sıcaklık farkının  $\Delta T \approx 120^\circ\text{C}$ 'yi aşmasıyla film kaynaması gerçekleşir. Leidenfrost noktası olarak adlandırılan D noktasında, ısı akısı en küçük değerini alır. Bu noktadan itibaren yüzey tamamen buhar filmi ile kaplanır. Artık yüzeyden sıvıya olan ısı geçişi, buhar üzerinden iletimle gerçekleşir. Yüzey sıcaklığının daha da artmasıyla buhar filmi içinde ışınlımla ısı geçişi önem kazanır.  $\Delta T$ 'nin artmasıyla birlikte ısı akısı da artmaya başlar.

Nukiyama (1934), deneyini yüzey sıcaklığını ve ısı akısını kontrol ederek gerçekleştirmiştir. Şekil 2.2'de herhangi bir P noktasından başlandığı ve  $\dot{q}$  ısı akısının sürekli artırıldığı durumda,  $\Delta T$  değeri ve yüzey sıcaklığı da C noktasına doğru sürekli olarak artacaktır. Sıcaklık değişimi kontrollü olmadığında kaynama eğrisinde ani bir sapma meydana gelir ve  $\Delta T_E$  sıcaklığına ulaşılır. Bu nokta katı maddenin ergime sıcaklığını aşabileceğinden sistemin çökmesi veya devre dışı kalması söz konusu olabilir. Bu nedenle C noktasına çoğunlukla “yanma noktası” veya “kaynama krizi” adı verilir. Bu noktaya karşılık gelen ısı akısına da “kritik ısı akısı,  $\dot{q}_c = \dot{q}_{maks}$  (CHF)” denir. Bir ısı geçiş yüzeyinin, bu değere yakın koşullarda çalıştırılması istenebilir, fakat bu değer aşılması, genellikle istenmeyen bir durumdur.



**Şekil 2.2.** Kaynama krizi başlangıcı

## 2.4. Havuz Kaynama Bağlılıları

### 2.4.1. Çekirdek kaynama ısı transferi

Çekirdek kaynamanın irdelenmesi için, yüzeydeki kabarcıklanma odaklarının sayısının ve her bir odaktan birim zamanda çıkan kabarcık sayısının bilinmesi gerekmektedir. Kabarcıklanma odaklarının, ısı geçişi üzerindeki etkilerini,

$$\dot{q}_d = C\Delta^a n^b \quad 2.2$$

eşitliği ile ilk ifade eden, Yamagata *et al.* (1955) olmuştur. Burada, n odak yoğunluğudur ve üsler yaklaşık olarak, a=1,2 ve b=1/3 değerlerindedir. C ve n değerleri bir akışkan-yüzey çiftinden diğerine önemli ölçüde değişebilmelerine karşın, çoğu ticari yüzeyler için, n  $\propto \Delta T^5$  veya  $\Delta T^6$  olarak bulunmuştur (Yamagata *et al.* 1955). Eşitlik 2.2'de  $\dot{q}_d$  değerinin yaklaşık olarak  $\Delta T^3$  ile orantılı olduğu anlaşılabilir.  $\dot{q}_d$ 'nin  $\Delta T$  ile bu ilişkisi, Rohsenow (1973) tarafından geliştirilen çekirdek kaynama için ilk ve en kullanışlı şekilde aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$\dot{q}_d = \mu_l h_{fg} \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[ \frac{c_{p,l} \Delta T}{C_{s,f} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3 \quad 2.3$$

Burada, l ve v alt simgeleri sırasıyla, doymuş sıvı ve buhar hallerini göstermektedir. Yüzey gerilmesi  $\sigma$  (N/m) kabarcık (çekirdek) oluşumu ve gelişimi üzerindeki etkiyi ifade eder.  $C_{s,f}$  katsayısı ve n üssü, yüzey-sıvı çiftine bağlıdır ve bazı değerler Çizelge 2.1'de gösterilmektedir.

Rohsenow (1973) bağıntısı, sadece temiz yüzeyler için uygulanabilir. Isı akısını belirlemek için kullanıldığı zaman, %100'e varan hatalar meydana gelebilir. Buna

karşın,  $\Delta T \alpha (\dot{q}_d)^{1/3}$  olduğu için bu eşitlik, bilinen bir  $\dot{q}_d$  değerinden yola çıkarak,  $\Delta T$  değerini belirlemek için kullanıldığı zaman, hata oranı 3 kat azalır.

Aynı zamanda  $\dot{q}_d \propto h_{fg}^{-2}$  olduğu ve artan doyma basıncı (sıcaklığı) ile  $h_{fg}$  azaldığı için, sıvının basıncı artırıldığında çekirdek kaynamadaki ısı akısı da artar (Incropera and DeWitt 1990).

**Çizelge 2.1.** Çeşitli yüzey-akışkan çiftleri için  $C_{s,f}$  değerleri

Yüzey-Akışkan Çifti	Yüzey Durumu	$C_{s,f}$	n
Su-Bakır	Çizili	0,0068	1,0
	Parlatılmış	0,0130	1,0
Su-Paslanmaz Çelik	Kimyasal olarak dağlanmış	0,0130	1,0
	Mekanik olarak parlatılmış	0,0130	1,0
	Zımparalanıp parlatılmış	0,0060	1,0
Su-Pirinç		0,0060	1,0
Su-Nikel		0,0060	1,0
Su-Platin		0,0130	1,0
n-Pantene-Bakır	Parlatılmış	0,0154	1,7
	Taşlanmış	0,0049	1,7
Benzen-Krom		0,101	1,7
Etil alkol-Krom		0,0027	1,7

#### 2.4.2. Havuz kaynamada kritik ısı akısı

Şekil 2.1’de kaynama eğrisinde görüldüğü gibi  $\dot{q}_{max}$  önemli bir noktayı belirtmektedir. Bir kaynama işleminin kritik ısı akısına  $\dot{q}_{max}$ ’a yakın gerçekleşmesi istenir, ancak daha yüksek miktardaki ısı akılarının tehlikesinin de bilinmesi gerekir. Kutateladze (1948) boyut çözümlenmesi, Zuber (1958) de hidrodinamik kararlılık çözümlenmesi ile yüzey malzemesinden bağımsız ve geometriye sadece zayıf bağımlı olan,

$$\dot{q}_{\max} = \frac{\pi}{24} h_{fg} \rho_v \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \left[ \frac{\rho_l + \rho_v}{\rho_l} \right]^{1/2} \quad 2.4$$

eşitliğini elde etmişlerdir. Zuber sabiti  $(\pi/24) = 0,131$ , Leinhard and Dhir (1973)'in yatay plakalar için elde ettikleri deneysel değer olan 0,149 ile değiştirilir ve son terim de yaklaşık olarak bir kabul edilirse eşitlik 2.4,

$$\dot{q}_{\max} = 0,149 h_{fg} \rho_v \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \quad 2.5$$

şeklini alır. Ancak bu eşitlik sonsuz uzunlukta yatay bir ısıtıcı yüzeyde elde edildiği için, bir karakteristik uzunluk yoktur. Bu eşitliğin uygulamalarda geçerli olabilmesi için gerçek yüzeylerin karakteristik uzunluğunun ortalama kabarcık  $D_b$ 'den büyük olması gerekmektedir. Isıtıcı karakteristik uzunluğunun  $D_b$ 'ye oranı olan Bond sayısı 3'ten küçükse bu eşitliğe bir düzeltme çarpanı uygulanması gerekmektedir.

### 2.4.3. En küçük ısı akısı

Geçiş kaynama, sadece ısıtıcı yüzey sıcaklığının kontrol edilmesiyle oluşabileceği için, geçiş kaynaması aşaması uygulama açısından pek cazip değildir. Bu aşama için yeterli bir teori geliştirilmemiş olup, koşullar, sıvı ile ısıtıcı yüzey arasında periyodik ve kararsız temas ile belirlenir. Ancak, kararlı bir buhar filminin oluşumuna ve en küçük ısı akısı koşuluna karşı geldiği için, bu aşamanın üst sınırı önemlidir. Isı akısı, bu en küçük değer altına düşerse, film dağılır ve yüzeyin soğumasına ve kabarcıklı kaynamanın yeniden oluşmasına sebep olur.

Zuber (1958), kararlılık teorisini kullanarak büyük bir yatay levhadaki en küçük ısı akısı,  $\dot{q}_{\min}$  için aşağıdaki eşitliği türetmiştir.

$$\dot{q}_{\min} = c_{\rho,v} h_{fg} \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} \quad (2.6)$$

$C=0,9$  sabiti, Berenson (1961) tarafından deneylerle belirlenmiştir. Bu eşitlik çoğu akışkan için, orta basınçlarda yaklaşık olarak %50 doğruluğa sahiptir, fakat yüksek basınçlarda daha hatalı sonuçlar verir (Hahne *et al.* 1977).

#### 2.4.4. Film havuz kaynaması

Leinfrost noktasından sonraki sıcaklık farklarında, ısıtıcı yüzey sürekli bir buhar filmi ile örtülerek sıvı ile herhangi bir teması olmamaktadır. Kararlı buhar filmindeki koşullar, laminer film yoğuşmasındaki koşullara çok benzediği için, film kaynaması bağıntıları, yoğuşma teorisinden elde edilen sonuçlara dayandırılır. Çapı  $D$  olan bir silindir veya küre üzerinde film kaynamasına uygulanabilen böyle bir sonuç,

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_{konv} * D}{k_v} = C \left[ \frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{v_v k_v (T_y - T_d)} \right]^{1/4} \quad 2.7$$

şeklinindedir. Burada,  $C$  yatay silindirler için 0.62 (Bromley 1950), küreler için ise 0,67 (Lienhard and Dhir 1973)'dir. Düzeltilmiş gizli ısı  $h'_{fg}$ , buhar örtüsü içindeki sıcaklıkları doyma sıcaklığının üstünde tutabilmek için gerekli duyulur ısıyı da içerir. Duyulur ısı,

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,80 c_{p,v} (T_y - T_d) \quad 2.8$$

biçiminde ifade edilebilmesine karşın Prandtl sayısına da zayıfça bağımlı olduğu bilinmektedir (Sadasivan and Lienhard 1987). Buhar özellikleri,

$$T_{film} = \frac{T_y + T_d}{2} \quad 2.9$$

eşitliğine göre alınırken, sıvının yoğunluğu, doyma sıcaklığındaki değeri olarak alınır.

Yüksek yüzey sıcaklıklarında ( $T_y \geq 300^\circ\text{C}$ ), buhar filminde ışınlama ısı geçişi önem kazanır. Işınlama, film kalınlığını artıracak yönde etkilediği için, ışınlama ve taşınım işlemlerini basitçe toplanabilir kabul etmek akılcı olmaz. Bromley (1950), yatay boruların dış yüzeyinde film kaynamasını incelemiş ve toplam ısı geçiş katsayısının,

$$\bar{h}^{4/3} = \bar{h}_{\text{konv}}^{4/3} + \bar{h}_{\text{rad}} \bar{h}^{1/3} \quad 2.10$$

biçiminde bir eşitlikle hesaplanmasını önermiştir.  $\bar{h}_{\text{rad}} < \bar{h}_{\text{konv}}$  olması durumunda ise, daha basit bir eşitlik olan,

$$\bar{h} = \bar{h}_{\text{konv}} + \frac{3}{4} \bar{h}_{\text{rad}} \quad 2.11$$

eşitliği kullanılabilir. Etkin ışınlama katsayısı  $\bar{h}_{\text{rad}}$ ,

$$\bar{h}_{\text{rad}} = \frac{\varepsilon \sigma (T_y^4 - T_d^4)}{(T_y - T_d)} \quad 2.12$$

şeklinde yazılır. Burada,  $\varepsilon$  katının ışınlama yayma oranı,  $\sigma$  ise Stefan-Boltzmann sabitidir.

## 2.5. Havuz Kaynaması Üzerindeki Parametrik Etkiler

Havuz kaynamasını etkileyebilecek en önemli parametreler, yerçekimi, doyma sıcaklığı altında akışkan sıcaklığı (subcooling) ve katı yüzey koşullarıdır. Yerçekimi alanının etkisi, uzay taşıma araçları ve dönel makinelerde önemli bir parametredir. Doğal taşınım aşamasında ısı akısı  $(T_y - T_\infty)^{5/4}$  veya  $(\Delta T_e + \Delta T_{\text{sub}})^{5/4}$  ile orantılı olarak artar. Buna karşın, çekirdek kaynamada, en büyük ve en küçük ısı akıları  $\dot{q}_{\text{max}}$  ve  $\dot{q}_{\text{min}}$   $\Delta T_{\text{sub}}$

ile doğru orantılı olarak artsa da, aşırı soğutulmuşluğun (subcooling) etkisi ihmal edilebilir. Film kaynamasında ise, ısı akısı, artan  $\Delta T_{\text{sub}}$  ile büyük ölçüde artar.

Yüzey pürüzlülüğünün (tezgahta işleme, yivlendirme, skorklama veya kumlama ile elde edilmiş) en büyük ve en küçük ısı akıları ve film kaynaması üzerindeki etkisi göz ardı edilebilir düzeydedir. Ancak Berenson (1961) tarafından gösterildiği gibi, yüzey pürüzlülüğünün artması, çekirdek kaynama aşamasında ısı akısının, çok büyük oranda artışına neden olabilir. Yüzey pürüzlülüğünün artması ile kabarcık büyümesi için daha çok sayıda ve daha büyük odaklar oluşur.

Çekirdek kaynamayı iyileştiren, özel yüzeyler Webb (1983) tarafından incelenmiştir. İyileştirilmiş yüzeyler iki türdür;

- 1) Sinterleme, pirinçle kaplama, alevli püskürtme, elektrolit çökeltme veya köpüklendirme ile oluşturulan, çok gözenekli malzemeler ile oluşturulan kaplamalar.
- 2) Mekanik olarak işlenmiş veya oluşturulmuş, buharın sürekli olarak hapsedilmesini sağlayan çift-girintili oyuklar.

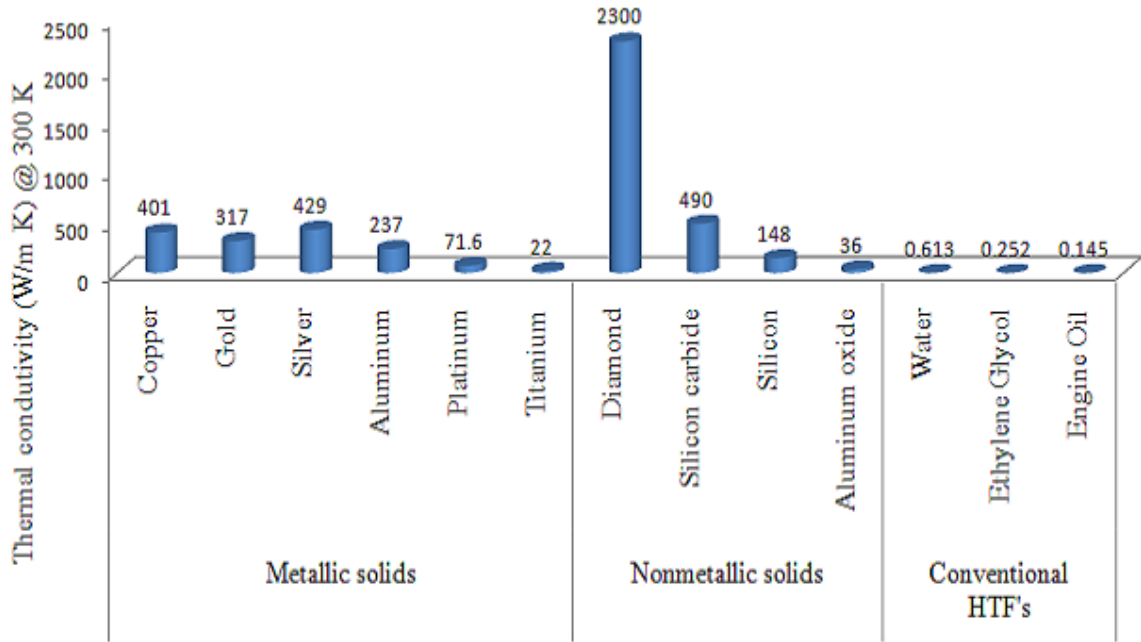
Bu tür yüzeyler, kabarcıklanma odaklarında buharın, sürekli olarak yenilenmesini ve ısı geçişinin, on kat daha fazla iyileştirilmesini sağlar (Incropera and DeWitt 1990).

## **2.6. Nano Akışkanlar**

Son yıllarda gelişen teknoloji ile birlikte birçok mühendislik uygulamalarında, yüksek ısı transferi ihtiyaçları artarken bununla birlikte enerji tasarrufu ve minyatürleşme gibi talepler de önemli hale gelmektedir. Gün geçtikçe geliştirilen elektronik ekipmanlar oldukça yüksek ısı akısı oluşturmaktadır. Bu sistemlerin yeterli bir şekilde soğutulması performansları açısından önemli olduğu kadar soğutma sistemlerinin küçük ve az yer kaplaması da önemli bir durumdur. Elektrik üretim sistemleri, HVAC, ulaşım gibi

mühendislik uygulamalarında ise ısı transfer sistemlerinin geliştirilmesi ile hem enerjinin daha verimli kullanılması hem de bu sistemlerdeki maliyetlerin azaltılması günümüzde büyük önem arz etmektedir.

Mühendislik uygulamalarında yüksek akıllı ısı transfer sistemlerinin çoğunda sıvı akışkan kullanılmaktadır. Su, etilen glikol, yağ vs. gibi geleneksel akışkanların kullanıldığı bu sistemlerde ısı transferini iyileştirmede birçok yöntem kullanılmasına rağmen bu akışkanların düşük ısı iletim katsayıları yüksek ısı transferini kısıtlamaktadır. Bu bakımdan kullanılan akışkanların ısı iletim katsayılarını artırmak, ısı transferini artırmada etkili olacaktır.



**Şekil 2.3.** 300 K sıcaklığında bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları

Şekil 2.3'te görüldüğü üzere metaller ve ametaller sıvılara oranlar daha yüksek ısı transfer katsayısına sahiptir. Bu durumda sıvılar içerisine katı partiküllerin eklenmesi ile sıvıların ısı transfer katsayısını artırabileceği düşünülebilir. Bununla ilgili olarak ilk çalışmayı Maxwell (1891) başlatmıştır. Maxwell akışkan içerisine katı partiküller ekleyerek sıvıların ısı iletkenliğinde önemli artışlar sağlamıştır. Ancak o dönemde partiküllerin mm ve  $\mu\text{m}$  olmasından dolayı sistemlerde çökme, aşınma, tıkanma ve

basınç düşümü gibi etkiler ortaya çıkmış ve bu nedenle uygulamalarda pek tercih edilmemiştir.

Günümüzde gelişen teknoloji ile nanometre boyutunda metalik ve metalik olmayan katı partiküller üretilmektedir. Genelde, 100 nanometreden küçük olarak üretilen katı partiküller, ilk olarak Choi and Eastman (1995) tarafından geleneksel akışkanlara ilave edilerek yeni nesil akışkan olan “nano akışkanlar” elde edilmiştir.

### **2.6.1. Nano akışkanların özellikleri**

Endüstride kullanılan ısı transfer sistemlerinde, ısı performansını artırmada birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu uygulamalarda sistem boyutları ve pompalama gücü gibi etkenler verimlilik açısından kısıtlayıcı etkiye sahiptir. Geleneksel akışkanlar yerine nano akışkanlar kullanılarak sistemlerde birçok avantaj elde edilebilir. Nano akışkanlara ait bazı özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Nano partiküllerin ısı iletkenliklerinin ve yüzey alanlarının oldukça fazla olması sayesinde ısı transferini önemli ölçüde artırabilmektedir.
- 2) Partiküllerin nano boyutta ve çok hafif olması sayesinde nano akışkanlarda çökelme olma oranı oldukça azdır.
- 3) Mikro kanallarda tıkanma oluşturmadan yüksek kapasitede ısı transferi gerçekleştirebilirler.
- 4) Partiküller çok küçük olduğundan yüzeylere uygulayacağı kuvvet de oldukça az olacaktır. Sistem yüzeylerinde aşınma oluşturmadan güvenle kullanılabilirler.
- 5) Yüksek konsantrasyonlu partikül ile oluşturulacak nano akışkanlar ile viskozite artışı sağlanabilmektedir.

6) Pompa gücünde önemli kazanımlar elde edilebilmektedir. Geleneksel akışkanlarda ısı transferini 2 kat artırmak için pompa gücünü 10 kat artırmak gerekmektedir. Akışkanın viskozitesinin önemli ölçüde artmadığı nano akışkanlarda pompa gücü önemli ölçüde azalacaktır.

7) Nano akışkanların yüksek ısı transfer kabiliyetleri sayesinde ısı transfer sistemlerinin daha küçük boyutta tasarlanması sağlanabilmektedir. Bu sayede sistemlerdeki yatırım maliyetleri azalacak ve enerji daha etkili bir şekilde kullanılacaktır.

### **2.6.2. Nano partikül çeşitleri ve üretimi**

Nano partikül üretiminde fiziksel ve kimyasal pek çok yöntem kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan fiziksel yöntemler; mekanik aşındırma, inert gaz yoğuşurma teknikleri olarak bilinmektedir. Kimyasal yöntemler olarak, kimyasal çökeltme, ısı püskürtme ve piroliz püskürtme (spray pyrolysis) yöntemleri kullanılmaktadır. Nano partiküller, üretildikleri malzemeler açısından 4 gruba ayrılmaktadır:

**Seramik nano partiküller:** SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CeO<sub>2</sub>, CuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, ZnO, ZrO<sub>2</sub>, WO<sub>3</sub>

**Metalik nano partiküller:** Ag, Cu, Au, Fe, Ni

**Alaşım nano partiküller:** Ag-Cu, Ag-Al, Al-Cu

**Karbon nano partiküller:** Karbon nanotüpler (CNT), elmas, grafit, grafen

### **2.7. Nano Akışkanların Hazırlanmasında Kullanılan Yöntemler**

Nano akışkanların hazırlanmasında tek adım ve iki-adım yöntemi olmak üzere iki temel yöntem kullanılmaktadır.

**İki-Adım Metodu:** İki adım metodu nano akışkan hazırlanmasında kullanılan en yaygın yöntemdir. Nano partiküller, nano fiberler, nano tüpler ve diğer nano materyaller öncelikli olarak kimyasal veya fiziksel yöntemlerle kuru toz olarak üretilir. Daha sonra nano boyuttaki bu tozlar su, temel akışkan içerisinde dağıtılır. Akışkan içerisinde partikülleri stabil hale getirmek ve homojen dağılım elde etmek için magnetik karıştırma, ultrasonik karıştırma, yüksek parçalayıcı karıştırma (high shear mixer) gibi işlemler uygulanır.

İki-adım metodu nano akışkan hazırlanması için kullanılan en yaygın yöntemdir. Ancak nano partiküller yüksek yüzey alanı ve yüzey aktivitesi nedeniyle topaklanma eğilimine sahiptir. Bu yüzden stabiliteyi artırmak ve homojen dağılımı sağlamak için en etkili teknik yüzey aktif madde (surfaktif) kullanımudur. Ancak surfaktifler yüksek sıcaklıklarda etkisini kaybedebilmektedirler.

**Tek-Adım Metodu:** Tek adım metodunda nano partikül üretimi ve temel akışkan içerisinde dağıtımı aynı anda gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem ile daha homojen dağılımlı ve stabil nano akışkanlar elde edilebilmektedir. Partiküllerin topaklanma oranları da iki adım metoduna göre daha azdır. Ancak bu yöntem geniş uygulama alanına sahip değildir. Üretim maliyetleri yüksektir ve kullanılacak partikül çeşidi sınırlıdır.

## 2.8. Nano Akışkanların Isı Transferi Üzerindeki Etkileri

Nano akışkanların, ısı transfer performansının yüksek olmasının sebepleri şu şekilde sıralanabilir (Xuan and Li 2000);

- Akışkan içerisindeki partiküller akışkanın ısı kapasitesini ve yüzey alanını artırır.
- Akışkan içerisindeki partiküller akışkanın ısı iletim katsayısını artırır.
- Akışkan içerisinde çalkantı ve türbülans artar.
- Nano partiküllerin akışkan içinde saçılması sonucu, akışkanın enine sıcaklık gradyeni düzleşir.

## 2.9. Nano akışkanların uygulama alanları

**Elektronik Sistemlerin Soğutulması:** Günümüzde yüksek performanslı elektronik ekipmanlar, çipler ve mikro işlemciler geliştirilmekte ve bu sistemlerde oluşan yüksek seviyede ısı akıları sorunlarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu sistemlerin dizaynı ve geometrisi ısı transfer alanını kısıtlamaktadır. Bu sistemlerin soğutma sistemlerinde yüksek ısı transfer kabiliyetine sahip olan nano akışkanların kullanımı ile daha küçük ısı transfer alanlarında yeterli soğutma yapılabilecektir.

**Ulaşım:** Nano akışkanlar yüksek ısı transfer kabiliyetleri sayesinde otomobil, kamyon, iş makineleri gibi birçok aracın soğutma sistemlerinde kullanılabilir. Araç radyatörlerinde kullanılan geleneksel akışkanlar yerine nano akışkanların kullanımı ile daha küçük ve daha az kompleks sistemlerde soğutma elde edilebilir. Bunun sayesinde araçların ağırlıkları azalacak ve daha az yakıtla daha yüksek performans elde edilecektir. Yakıtın daha az kullanılması ile de egzoz emisyonları da azalacaktır. Ayrıca radyatörlerin daha küçük yapıda olması ile araç dizaynları daha iyi yapılabilecektir. Argon Ulusal Laboratuvarında yapılan araştırma ile araç radyatörlerinde nano akışkan kullanımı ile radyatör alanı %10 azaltılmış ve bunun sonucunda yakıtta %5 tasarruf sağlanmıştır (Singh *et al.* 2006).

**Isıtma ve Soğutma Sistemleri:** Isıtma ve soğutma sistemlerinde nano akışkanlar kullanılarak daha etkili ısı transferi elde edilirken, pompa gücü ve ısı değiştirgeçleri boyutunda önemli kazanımlar elde edilebilir.

**Nükleer Reaktörlerin Soğutulması:** Nükleer reaktörlerin soğutulmasında ısı transferi, kaynama işlemi ile sağlanmaktadır. Ancak bu sistemlerde daha fazla miktarda ısı transferi elde edebilmek için kaynama işleminin çekirdek kaynama mekanizmasında gerçekleşmesi gerekmektedir. Çekirdek kaynama ise CHF ile sınırlı kalmaktadır. Literatürde yapılan birçok çalışmada nano akışkanların CHF değerini artırdığı tespit edilmiştir (Bolukbasi and Ciloglu 2011; Huang *et al.* 2011; Yang and Liu 2011;

Shahmoradi *et al.* 2013) Bundan dolayı, nano akışkan kullanımı ile bu sistemlerin soğutulması daha etkili ve daha güvenilir olacaktır.

**Savunma Sanayi:** Savunma sanayisinde ve askeri sistemlerde kullanılan askeri araçlar, radarlar, lazerler ve elektronik ekipmanlar yüksek ısı akıllı soğutma sistemine ihtiyaç duyarlar. Ancak geleneksel akışkanlar bu ihtiyaca karşı yetersiz kalmaktadırlar. Bu tür sistemlerde nano akışkan kullanımı ile yüksek miktarlarda soğutma elde edilebilecektir.

**Tıbbi Uygulamalar:** Tıpta nano akışkan kullanılarak kanser tedavisi yapılabilmektedir. Kanserli hücrelerin etrafında yüksek sıcaklık değerleri oluşturularak sağlıklı hücrelere zarar verilmeden tümörler yakılabilmektedir (Jordan *et al.* 1999).

**Triboloji Uygulamaları:** Nano akışkanlar birçok yağlama sisteminde kullanılabilir. Yağlara eklenen nano partiküller ile yağların yük taşıma kapasitesi artmakta, sürtünme kuvvetleri ve aşınmalar azaltılabilmektedir. (Que *et al.* 1997; Li *et al.* 2004)

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Deneylerde Kullanılan Nano Partiküller

Bu deneysel çalışmada nano akışkanların hazırlanmasında literatürde birçok araştırmacı tarafından da tercih edilen  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  ve  $CuO$  nano partikülleri kullanılmıştır. Bu partiküller “Nanoamor” firmasından temin edilmiş olup firma tarafından belirtilen özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Nano partiküllerin özellikleri

Nano partiküller	Safılık (%)	Partikül boyutu (nm)	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$C_p$ (J/kgK)	k (W/mK)	SSA ( $m^2/g$ )
$Al_2O_3$	99,5	27-43	3970	765	36	35
$SiO_2$	99,5	20	2220	745	1,38	160±20
$TiO_2$	99+	10-30	4157	710	8,4	210±10
$CuO$	99+	30-50	6310	535,6	76,5	13

#### 3.2. Nano Akışkanların Hazırlanması

Deneysel çalışmada kullanılacak olan nano akışkanlar, literatürde de en yaygın olarak kullanılan iki-adım yöntemiyle hazırlanmıştır. Temel akışkan olarak “de-iyonize su” kullanılmış olup farklı hacimsel konsantrasyonlar için gerekli partikül miktarları aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanmıştır.

$$\phi = \frac{V_P}{V_T} \quad 3.1$$

$$m_P = \rho_P V_P \quad 3.2$$

Burada,  $\emptyset$  hacimsel konsantrasyonu belirtir.  $V_P$ ,  $V_T$ ,  $\rho_P$  ve  $m_P$  ise sırasıyla, partikül hacmini (lt), süspansiyonun toplam hacmini (lt), nano partikülün yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ), partikül miktarını (kg) belirtmektedir.

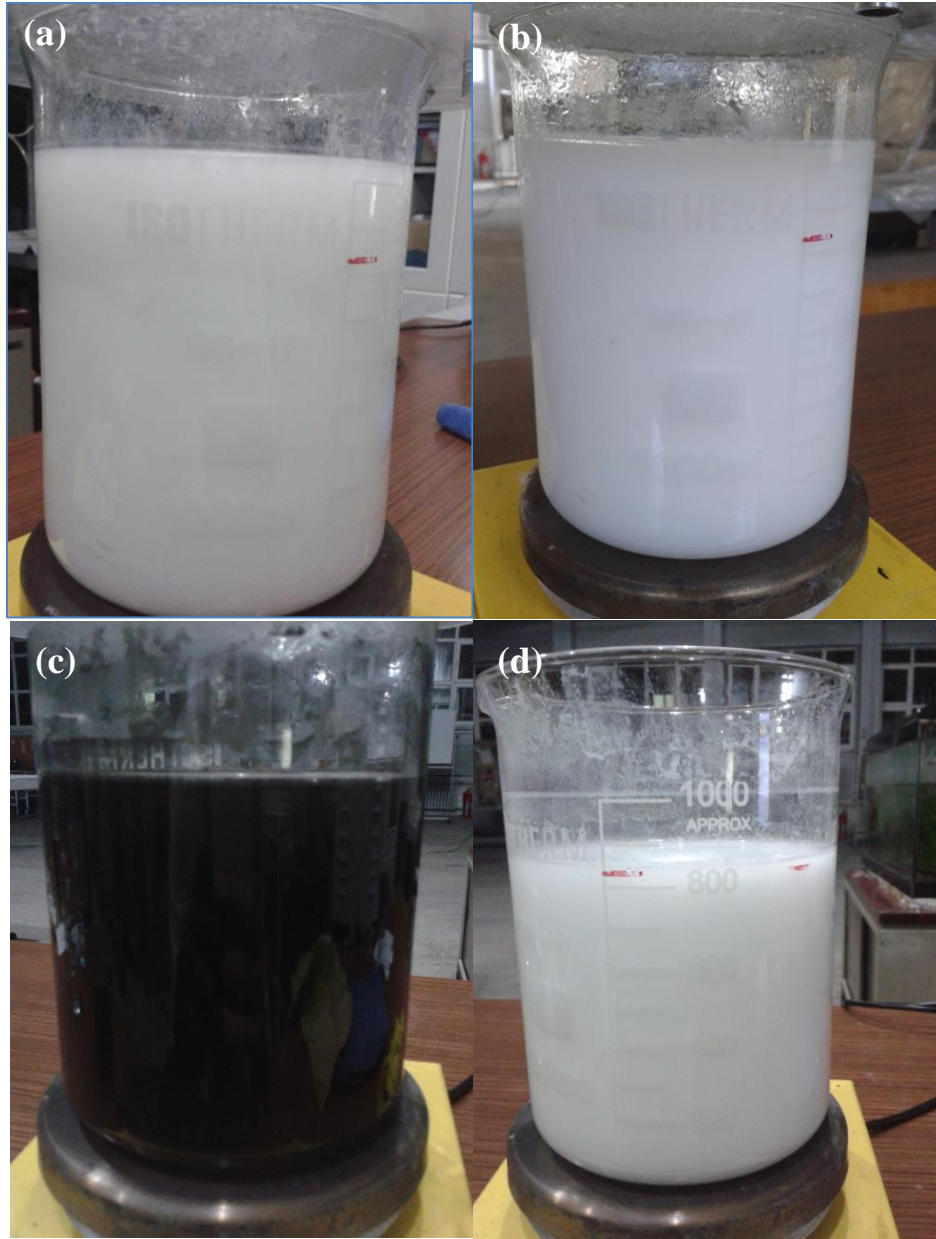
Bu çalışmada toplam süspansiyon hacmi 1 lt seçilmiş olup hacimsel konsantrasyonlar %0,001, %0,01, %0,05 ve %0,1 olarak belirlenmiştir. Seçilen 1 lt hacim için gerekli partikül miktarları hesaplanarak Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Nano akışkanların, hacimsel konsantrasyonlara göre partikül ağırlıkları (1000 ml için)

Konsantrasyon (%)	Nano partikül miktarı (gr)			
	$m_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$m_{\text{SiO}_2}$	$m_{\text{TiO}_2}$	$m_{\text{CuO}}$
0,001	0,04	0,02	0,04	0,06
0,01	0,39	0,22	0,42	0,63
0,05	1,98	1,11	2,08	3,15
0,1	3,97	2,22	4,16	6,31

Nano partikül hesaplamaları yapıldıktan sonra 1lt toplam hacim için her bir konsantrasyon için gerekli nano partiküller hassas terazi ile tartılarak kaynama kabına boşaltılmıştır. Daha sonra kaynama kabına toplam hacim 1 lt olana kadar de-iyonize su ilave edilmiştir. Bu işlemler her bir partikül ve konsantrasyon için ayrı ayrı tekrarlanarak nano akışkanlar elde edilmiştir.

Daha öncede belirtildiği üzere iki-adım yönteminin en büyük dezavantajının, akışkan içerisinde partiküllerin topaklanması ve çökmesi olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı stabil ve homojen bir nano akışkan elde etmek için partiküllere su eklenmesinden sonra oluşan süspansiyonlara manyetik karıştırma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem deneylerin öncesine kadar uygulanmış olup, nano akışkanları doyma sıcaklığına ısıtma işlemi ile aynı anda gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sonucunda deneyler öncesinde stabil ve homojen dağılımlı nano akışkanlar elde edilirken deneyler esnasında herhangi bir çökmenin olmadığı görülmüştür. Deneylerde kullanılmak üzere elde edilen nano akışkanlara ait resimler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1.** Hazırlanan, (a) Silika nano akışkanı, (b) Alumina nano akışkanı, (c) CuO nano akışkanı (d) TiO<sub>2</sub> nano akışkanı resimleri

### 3.2. Nano Akışkanların Termal Özellikleri

Nano akışkanlar hazırlandıktan sonra termal özelliklerinin belirlenmesi için bazı eşitlikler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Deneyde kullanılan nano akışkanlara ait

yoğunluk, özgül ısı, ısı iletim katsayısı değerlerinin hesaplanmasında Pak and Cho (1998) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad 3.3$$

$$c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,bf} + \phi c_{p,p} \quad 3.4$$

$$k_{p,nf} = (1 - \phi)k_{nf} + \phi k_p \quad 3.5$$

Bu eşitliklerde  $\phi$  nano akışkanın hacimsel konsantrasyonunu göstermekte olup nf, bf ve p alt indisleri ise sırasıyla nano akışkan, temel akışkan ve partikülü belirtmektedir. Nano akışkanların dinamik viskozitesini hesaplamada ise Brinkman (1952) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$\mu = \mu_{bf} (1 + 1,25\phi) \quad 3.6$$

Yukarıdaki eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplamalar hacimsel olarak en yüksek konsantrasyon olan %0,1 için yapılmış ve bulunan sonuçlar Çizelge 3.3'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3.** Oda sıcaklığında saf su ve nano akışkanların termal özellikleri

Akışkan	Termal Özellik			
	$k_{nf}$ (W/mK)	$\mu_{nf}$ (Pa.s)	$\rho_{nf}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,nf}$ (J/kgK)
De-iyonize su	0,613	1,370	997,1	4179
SiO <sub>2</sub> N.A.	0,614	1,372	998,32	4175,57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> N.A.	0,648	1,372	1000,07	4175,59
CuO N.A.	0,688	1,372	1002,41	4175,36
TiO <sub>2</sub> N.A.	0,620	1,372	1000,26	4175,53

Hesaplamalar sonucunda, hazırlanan nano akışkanların termal özelliklerinin suya göre önemli ölçüde değişmediği Çizelge 3.3'te görülmektedir. Literatürde de benzer çalışmalarda değişen bu termal özelliklerin ihmal edilebilir oranda oldukları belirtilmiştir (Bang and Chang 2005; Ciloglu and Bolukbasi 2011; Harish *et al.* 2011).

### 3.3. Deneyle

#### 3.3.1. Deney düzeneği

Şematik resmi Şekil 3.2'de gösterilen deney düzeneği aşağıdaki temel elemanlardan oluşmaktadır.

**Fırın:** Numuneyi ısıtmak için kullanılan fırın silindirik şekilde olup yüksekliği 200mm ve çapı 400 mm'dir. Fırın içerisinde ısı enerjisi elde etmek için 2 mm çapında rezistans tel bulunmaktadır. Bu rezistans tel ile 20 A ve 220 V elektrik enerjisi ile fırın içerisinde 1000°C sıcaklık değeri oluşturulabilmektedir. Çevreye olan ısı kayıplarını en aza indirmek için fırın etrafı yalıtılmıştır.

**Numune destek kolu:** Numunenin bağlandığı elemandır. Yüksek sıcaklığa dayanıklı ve ince bir boru şeklinde olup içerisinden termokupul geçebilecek şekilde tasarlanmıştır.

**Pnömatik piston:** 0-10 bar basınç değerleri arasında çalışmaktadır. Manuel çalışarak numunenin fırın ve kaynama kabı arasındaki hareketini sağlamaktadır.

**Kaynama kabı:** Yüksek sıcaklığa dayanıklı camdan imal edilmiştir. Çapı 100 mm ve yüksekliği 200 mm olan silindir şeklindedir.

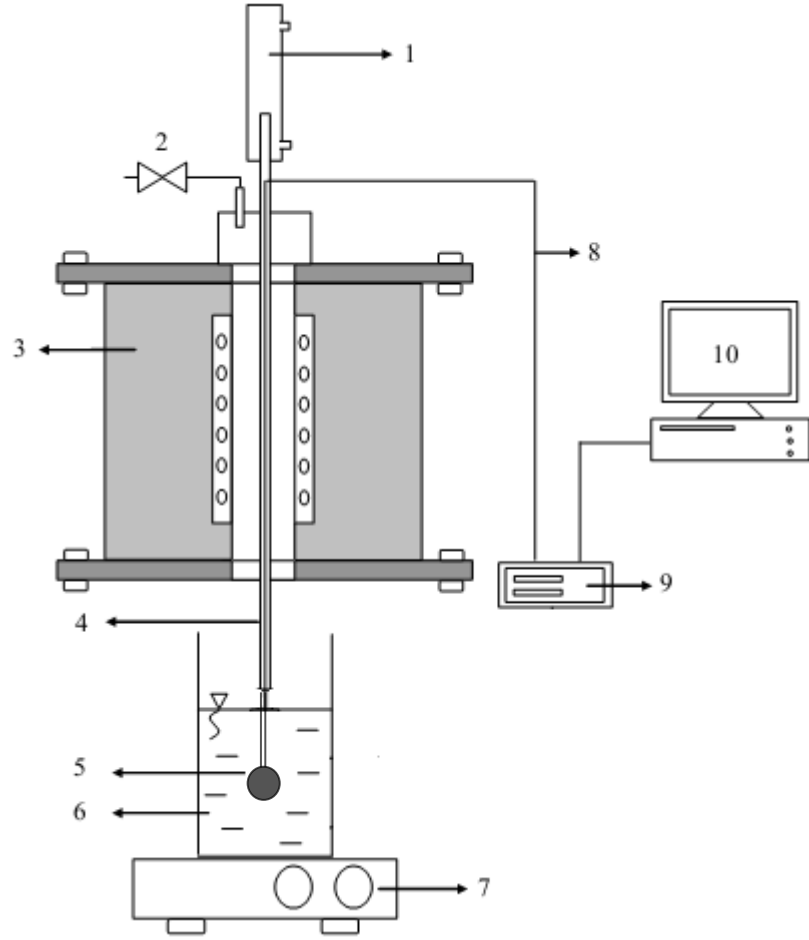
**Isıtıcı:** Saf su ve nano akışkanları doyma sıcaklığına getirmede ve manyetik karıştırma işleminde kullanılmaktadır. Markası "Yellow Line" ve modeli "MSH Basic" dir.

**Termokupul:** Numune merkezindeki sıcaklıkları ölçmek için K-tipi termokupul kullanılmıştır. Ø1,5x50 mm ölçülerinde olan termokupul, numune destek kolun içerisinden geçirilerek numune merkezindeki sıcaklığı ölçebilecek şekilde yerleştirilmiştir.

**Azot (N<sub>2</sub>) gazı:** Yüksek sıcaklıklara çıkarılan numunenin deney sırasında oksitlenmesini önlemek amacıyla kullanılmıştır. Tüpten çekilen gaz hortum vasıtasıyla fırının üst tarafından sistem içerisine verilmektedir.

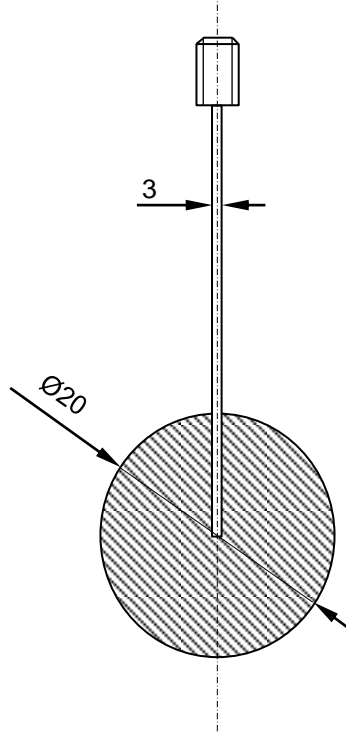
**Analog-Dijital Kart ve Bilgisayar:** Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan termokupullar bir bilgisayara monte edilen Advantech ISA PCL-818HG marka data kartına bağlanmıştır. Ölçülen veriler Genie Software programı ile bilgisayar ortamında kayıt edilmiştir.

**Deney numunesi:** Deneylerde ısıtıcı yüzey olarak, Şekil 3.5'te gösterilen, 20 mm çapında, pirinç malzemeden imal edilmiş küre kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılacak termokupulun numune içerisine yerleştirilmesi için numune merkezine kadar 2 mm çapında bir delik açılmıştır. Numunenin destek koluna bağlantı kısmı vida şeklinde yapılmış olup titreşim oluşması engellenecek şekilde bağlanmıştır. Deney numunesine ait termal özellikleri Çizelge 3.4'deki gibidir.



**Şekil 3.2.** Deney düzeneğinin şematik resmi

- |                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| 1- Pnömatik piston            | 6- Kaynama kabı        |
| 2- Azot ( $N_2$ ) gazı girişi | 7- Isıtıcı             |
| 3- Fırın                      | 8- K-tipi termokupul   |
| 4- Numune destek kolu         | 9- Analog-Dijital Kart |
| 5- Deney numunesi             | 10- Bilgisayar         |



**Şekil 3.3.** Deney numunesine ait teknik resim

**Çizelge 3.4.** Deney numunesinin termal özellikleri

Sıcaklık (K)	İletim katsayısı (W/mK)	Özgül ısı (J/kgK)
100	75	-
200	95	360
400	137	395
600	149	425

### 3.3.2. Deneyin yapılışı

Deney numunesi fırın içerisindeki numune destek koluna bağlanarak termokupul yerleştirildi. Kaynama kabı içerisinde hazırlanan nano akışkanlar ısıtıcı üzerine konularak doyma sıcaklığına kadar ısıtılmaya başlandı. Isıtma işleminin başlangıcından itibaren doyma sıcaklığına gelene kadar nano akışkanların homojen ve stabil olması için

manyetik karıştırma işlemi yapıldı. Numune destek kolu yukarıya çekilerek numune fırın içerisine çekildi ve fırın çalıştırıldı. Numunenin ısıtılması sırasında yüzeyinde oluşabilecek oksitlenmeleri engellemek amacıyla azot gazı vanası açılarak fırın içerisine azot gazı verildi. Nano akışkan doyma sıcaklığına, numune de 600°C'ye ulaştığında destek kolu çok hızlı bir şekilde aşağıya doğru itilerek numune kaynama kabına daldırıldı. Bir süre sonra numune ve nano akışkan termal olarak dengeye gelince deney sonlandırıldı. Soğuma süresi boyunca numune merkezinden ölçülen sıcaklık-zaman verileri bilgisayar ortamında kayıt edildi. Elde edilen sıcaklık-zaman verileri ile soğuma eğrileri oluşturuldu. Deneyler sırasında numune yüzeyinde meydana gelebilecek değişimlerin, kaynama ısı transferine etkilerini incelemek için her bir nano akışkan için deneyler beşer kez tekrarlandı. Tekrarlanan deneylerde numune yüzeyine herhangi bir işlem yapılmayarak aynı akışkan kullanıldı. Farklı nano akışkan deneylerine geçildiğinde numune yüzeyine parlatma işlemi yapıldı. Parlatma işlemi önce zımpara kağıdı (1500 mesh) ardından alumina parlatma solüsyonu uygulanarak gerçekleştirildi. Her bir nano akışkanla yapılan deneyler yaklaşık 50 dk sürede gerçekleşti.

#### 3.3.4. Kaynama eğrilerinin belirlenmesi

Sıcaklık-zaman eğrilerinden kaynama eğrilerini elde etmek amacıyla "Toplam Kütle Yaklaşımı (Lumped metodu)" kullanılmıştır. Bu yöntemde, deney numunesi içerisinde sıcaklık gradyeni ihmal edilir. Dolayısıyla numune içerisindeki her noktanın sıcaklığı aynı kabul edilir. Bu şartın geçerli olabilmesi Biot sayısına bağlıdır. Küresel yüzeyler için Biot sayısı ( $Bi$ );

$$Bi = \frac{hr}{3k} < 0.1 \quad 3.5$$

şartını sağlarsa, toplam kütle yaklaşımından kaynaklanan hata küçüktür. Bu yöntemle, hesaplamalarda ortaya çıkacak hata %5 civarındadır (Incropera and Dewitt 1990). Bu yöntem kullanılarak, deney numunesi için enerji dengesinden ısı transfer katsayıları hesaplanabilir. Enerji dengesi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir.

$$-hA(T - T_d) = \rho V c_p \frac{dT}{dt} \quad 3.6$$

Burada, V ve A sırasıyla kürenin hacmini ve yüzey alanını  $\rho$  ve  $c_p$  kürenin yoğunluğunu ve özgül ısısını göstermektedir.  $\frac{dT}{dt}$ , küre merkezinden ölçülen sıcaklığın zamana göre değişimidir. Literatürde “Lumped metodu” birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. (Steven and Writte 1972; Dhir and Purohit 1977; Lotfi and Shafii 2009).

Hesaplamalarda, eşitlik 3.6 kullanılarak ısı akıları elde edilmiştir. Sonuçların geçerliliğini doğrulamak için Biot sayısı kontrolü yapılmıştır. Sonuçlara göre en yüksek Biot sayısı 0,055 bulunmuştur.

#### 3.4. Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm aletlerinin hata oranları bulunmaktadır. Bu hatalardan kaynaklanan belirsizlik analizi Kline and McClintock (1953) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlik hesaplanabilmektedir.

$$W_R = \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} W_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} W_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_3} W_3 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.7)$$

Burada R ölçülecek boyutu, x değerleri ölçümü etkileyen parametreleri W değerleri her bir bağımsız parametreye ait hata miktarlarını göstermektedir. Bu çalışmada hesaplanan değer ısı transfer katsayısı olup eşitlik 3.8’deki gibi ifade edilebilmektedir.

$$h = -\rho c_p \frac{V}{A} \frac{1}{t} \ln \theta \quad 3.8$$

Burada  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $V$ ,  $A$ ,  $t$ ,  $\theta$  değerleri sırasıyla, deney numunesinin yoğunluğunu, özgül ısısını, hacmini ve yüzey alanını,  $t$ ,  $\theta$  ise geçen süreyi ve boyutsuz sıcaklığı göstermekte olup  $h$  değerleri bu parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Boyutsuz sıcaklık olan  $\theta$  değeri eşitlik 3.9 (Incropera and DeWitt 1990) ile gösterilmektedir.

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad 3.9$$

Burada  $T$ ,  $T_{\infty}$  ve  $T_i$  sırasıyla, numunenin anlık sıcaklığı, akışkanın sıcaklığı ve numunenin ilk sıcaklığıdır. Hesaplamalara ait ölçülen değerler ve hata miktarları Çizelge 3.5'te gösterilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Isı transfer katsayılarına ait ölçülen parametreler için hata miktarları

Parametre (W)	Ölçülen Değer	Hata Miktarı ( $W_n$ )
$V$ ( $m^3$ )	$4,19 \times 10^{-6}$	0,015
$A$ ( $m^2$ )	$1,26 \times 10^{-3}$	0,01
$t$ (s)	42	0,012
$\theta$	0,0112	$1,2 \times 10^{-3}$

Bu değerlerin eşitlik 3.8'de yerlerine yazılarak gerekli hesaplamalar yapıldığında hata oranı;

$$\text{Bağıl Hata Oranı} = \frac{W_h}{h} = \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial V} W_V \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial A} W_A \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial t} W_t \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial \theta} W_{\theta} \right)^2 \right]^{1/2} = \%3,8$$

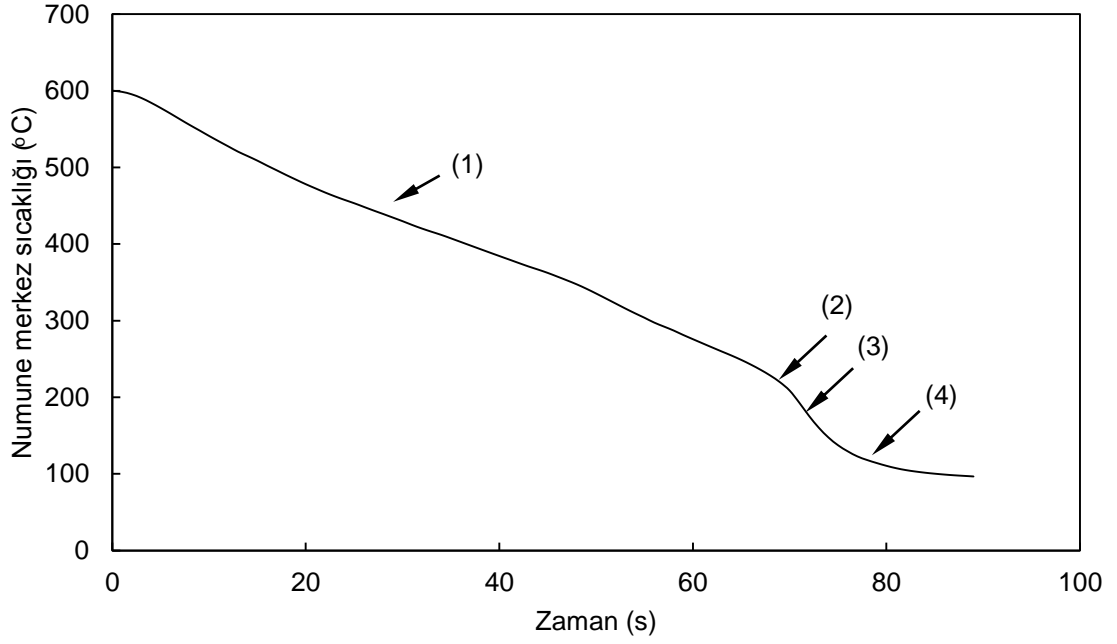
olarak bulunur.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

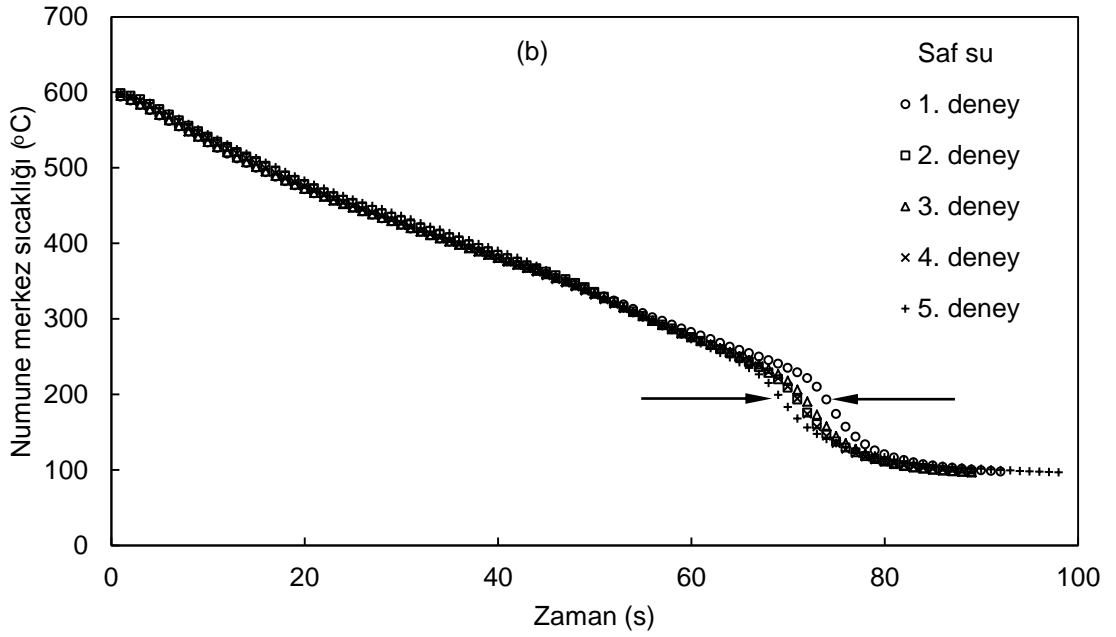
### 4.1. Soğuma Eğrileri

#### 4.1.1. Saf suda soğuma eğrileri

Nano akışkanların kaynama ısı transferi üzerindeki etkilerini incelemeye referans oluşturmak üzere öncelikle saf su deneyleri doyma şartlarında ve atmosferik basınç altında gerçekleştirilmiştir. Saf su ile gerçekleştirilen deneyler 5 kez tekrarlanmış ve numune merkezinin sıcaklık-zaman değerleriyle soğuma eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 4.1'de tekrarlanan deneyler sonucunda elde edilen soğuma eğrileri gösterilmektedir. Şekil 4.1'de görüldüğü üzere tekrarlı deneylerde soğuma eğrilerinde küçük sapmaların meydana geldiği görülmektedir. Bu sapmalara numunenin yüksek sıcaklıklara ulaştıktan sonra soğutulması ile yüzeyinde meydana gelen az miktardaki oksitlenmenin neden olduğu tahmin edilmektedir. Saf su için elde edilen soğuma eğrilerinde biri nano akışkanlarla yapılan deneylere temel oluşturması için seçilmiş ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Burada eğri üzerindeki işaretli bölgeler kaynama ısı transferi mekanizmalarını belirtmektedir. (1) numaralı bölge film kaynama bölgesini göstermektedir. Bu bölgede numune yüzeyi tamamıyla buhar tabakasıyla örtülüdür. (2) numaralı bölgede geçiş kaynama başlangıcı ve minimum ısı akısı gerçekleşmektedir. Bu bölgede yüzey üzerindeki herhangi bir noktada koşullar çekirdek ve film kaynama düzenleri arasında gidip gelmektedir. (3) numaralı bölgede kritik ısı akısı meydana gelir ve çekirdek kaynamaya geçilir. Bu bölgede yüzey üzerinde ayırık kabarcıklar oluşumu başlar. (4) numaralı bölgede ise doğal taşınım ile ısı transferi gerçekleşir.



Şekil 4.1. Doymuş saf suda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi.

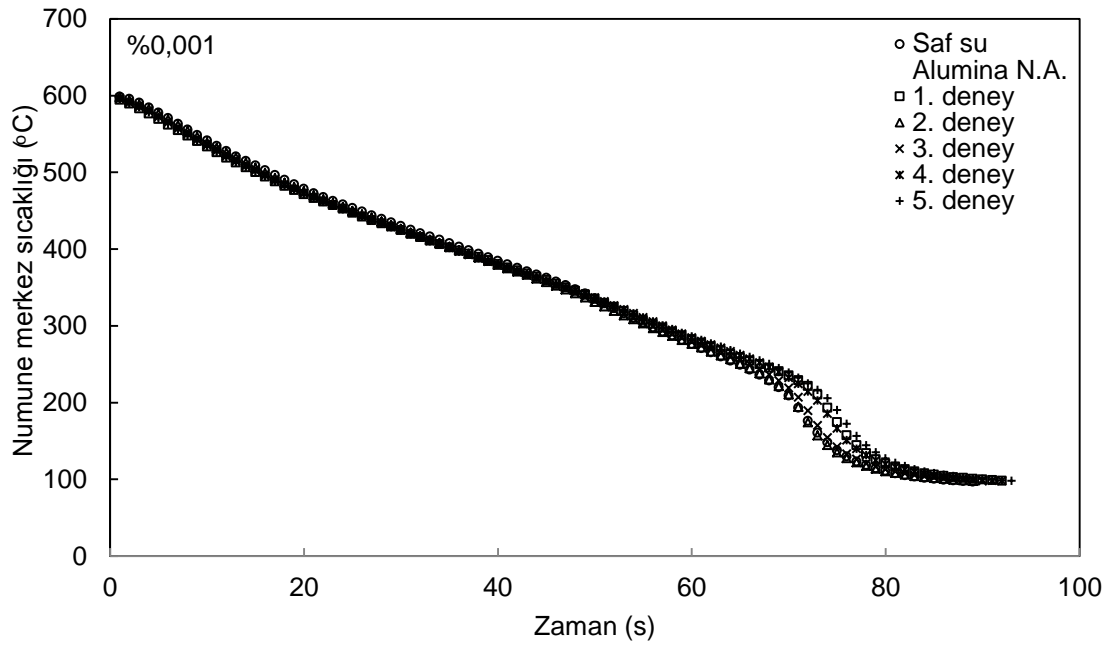
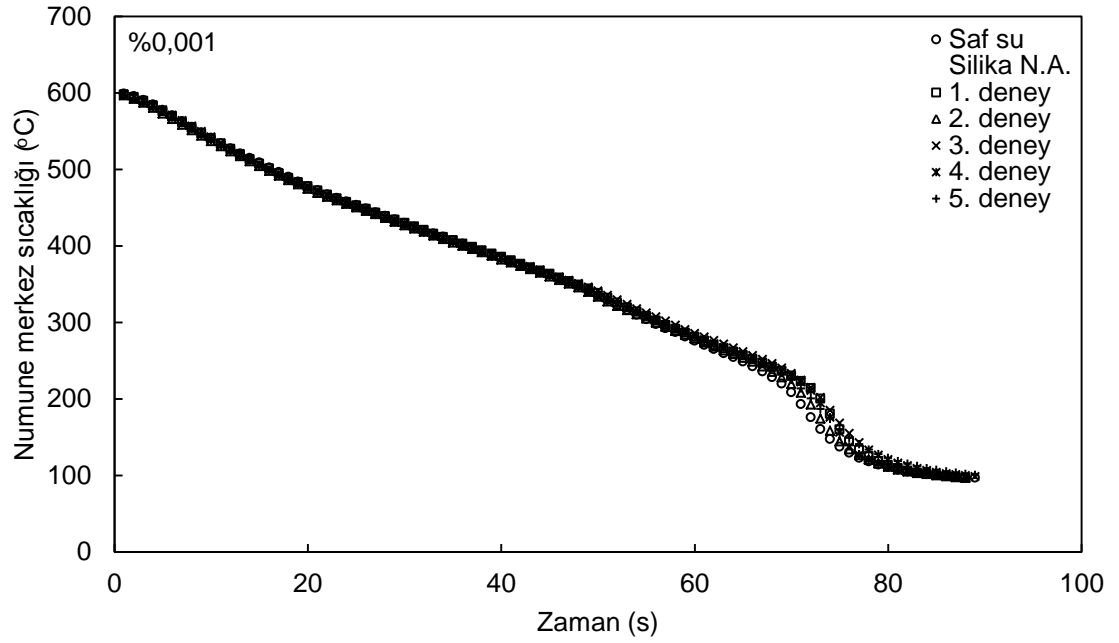


Şekil 4.2. Doymuş saf suda soğutulan deney numunesinde tekrarlı deneyler sonucu elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri.

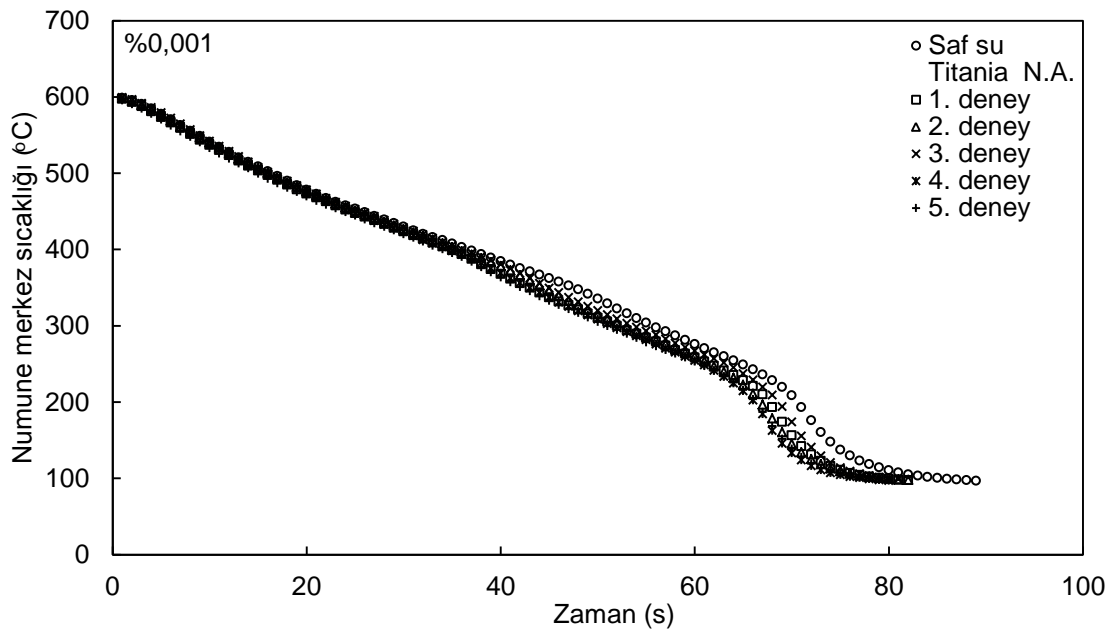
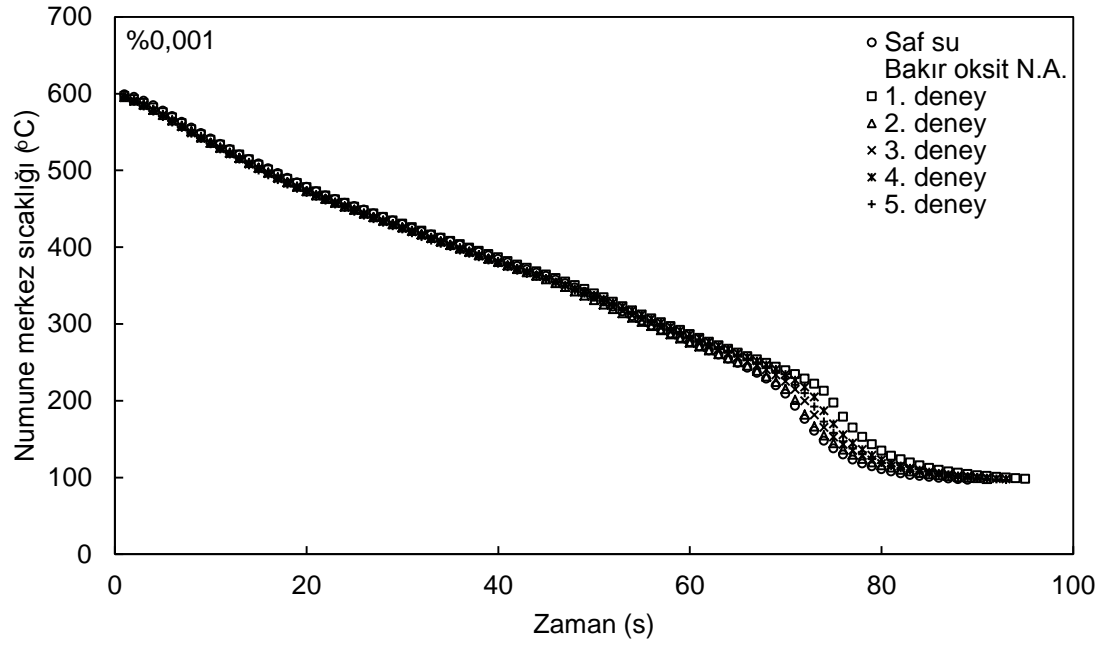
#### 4.1.2. Nano akışkanlarda soğuma eğrileri

Atmosferik basınç altında ve doyma sıcaklıklarında dört farklı hacimsel konsantrasyonda (%0,001, %0,01, %0,05, %0,1) hazırlanan silika, alumina, bakır oksit ve titania nano akışkanları ile yapılan deneyler sonucu elde edilen sıcaklık-zaman değerleriyle soğuma eğrileri oluşturulmuştur. Şekil 4.3'te %0,001 hacimsel konsantrasyonlardaki nano akışkanlarda soğuma eğrileri gösterilmiş olup, eğrilerde önemli değişikliklerin meydana gelmediği ve saf sudakine yakın olduğu görülmektedir. Genel olarak partikül konsantrasyon artışı ile Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da gösterildiği gibi %0,01 hacimsel konsantrasyonlarından itibaren soğuma eğrilerinde önemli değişmelerin olduğu görülmektedir. Konsantrasyon artışı ile tekrarlı deneyler sonrası eğrilerin sola doğru olan sapma mesafeleri artmış ve numunenin soğuma süresi kısalmıştır. Ancak bakır oksit nano akışkanıyla yapılan deneylerde %0,1 hacimsel konsantrasyonunda dahi soğuma eğrilerinde önemli değişiklikler olmamıştır. Deneyler sonrasında en hızlı soğuma süresi %0,1 hacimsel konsantrasyonlu silika nano akışkanında elde edilmiştir. Deney numunesinin saf suda soğuma süresi 89 saniye olurken bu değer %0,1 silika nano akışkanı 5. tekrar deneyi sonrasında 40 saniye olarak ölçülmüştür.

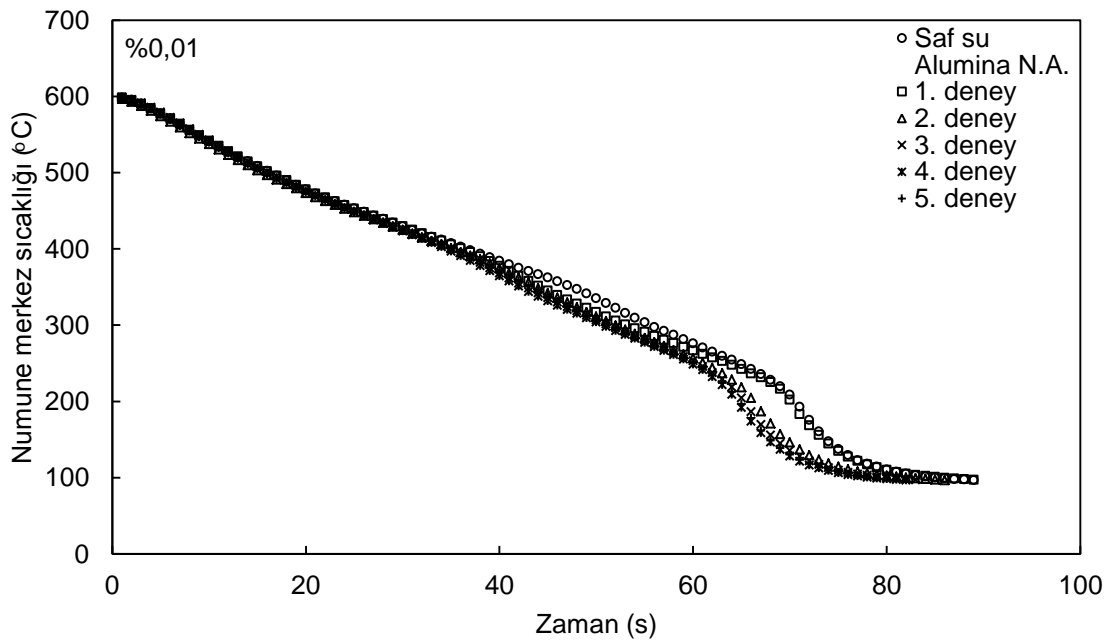
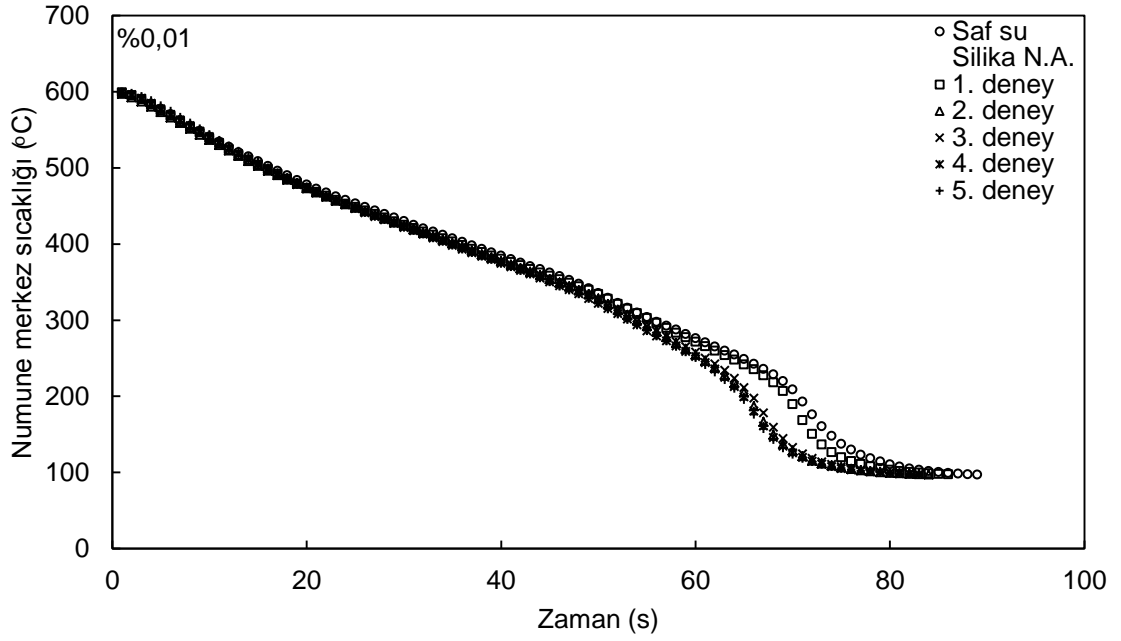
Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6 incelendiğinde, genellikle ilk deneylerdeki soğuma eğrilerinin saf sudaki soğuma eğrilerine yakın olduğu görülmektedir. Deney tekrarlarının artması ile eğrilerdeki sola doğru olan sapma miktarları artmaktadır. Bu durum, numune yüzeyinin ilk deneylerde parlatılmış olduğundan dolayı, temiz yüzeye sahip test numunesinin soğuma davranışı üzerine nano akışkanların az ya da hiç etkisinin olmadığını göstermektedir. Bu sonuçlar Kim *et al.* (2009) tarafından rapor edilen sonuçlarla uyum içerisindedir. Tekrarlı su verme testleri sonucunda ise eğrilerdeki sola doğru kayma daha belirgin olmuştur. Böylece, film kaynama daha erken sona ermiş ve deney numunesi daha hızlı soğumuştur. Özellikle %0,1 partikül konsantrasyonunda silika nano akışkanı için numune yüzeyinde oluşan kararlı buhar film tabakası tekrarlı deneylerde gözlenmemiştir. Sonuç olarak, nano akışkan tipi ve konsantrasyonu su verme davranışını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.



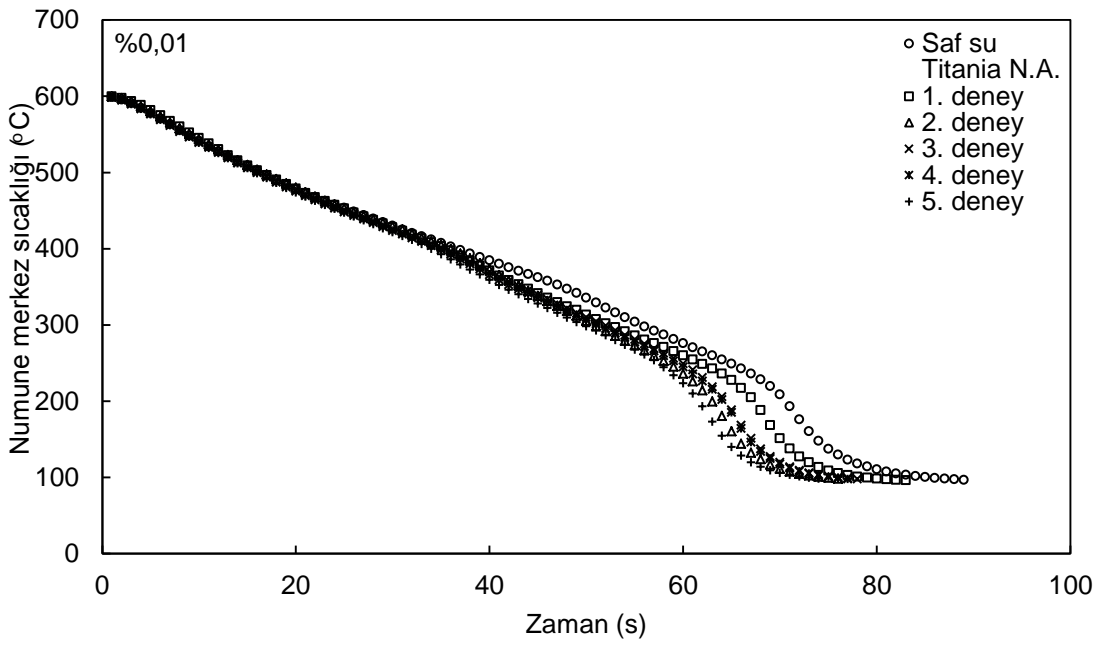
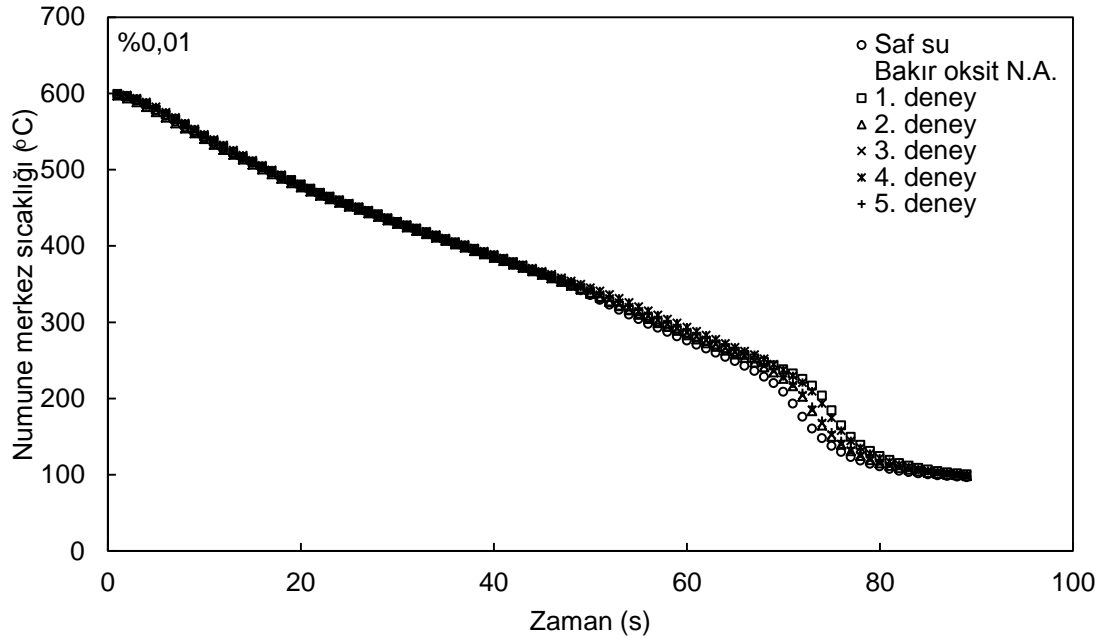
**Şekil 4.3.** Doymuş sıcaklıkta %0,001 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri.



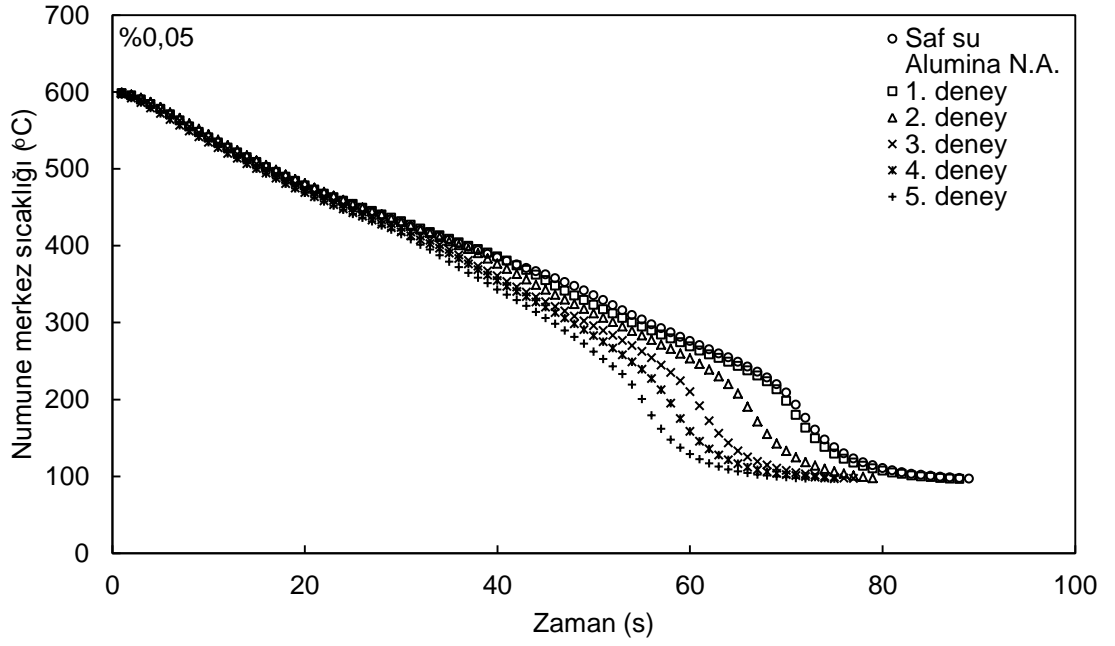
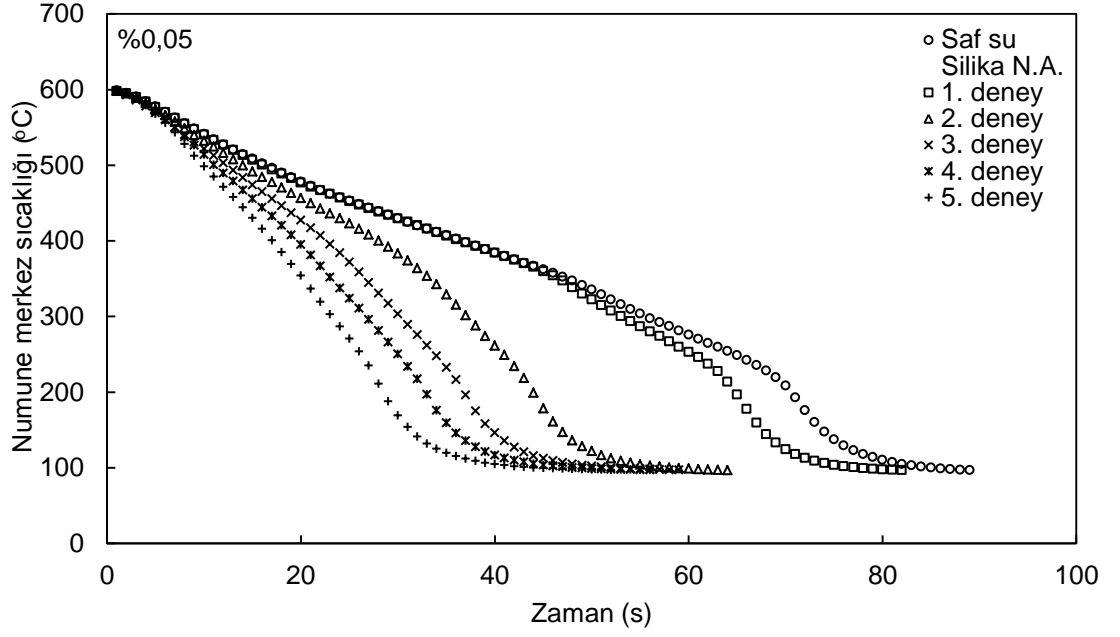
Şekil 4.3. (devam)



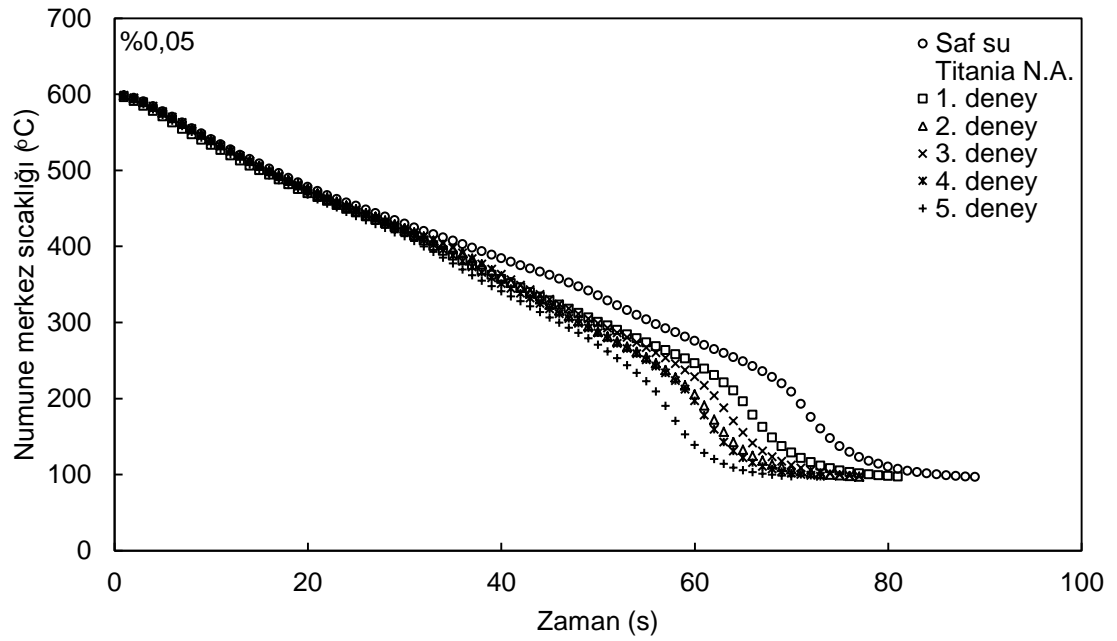
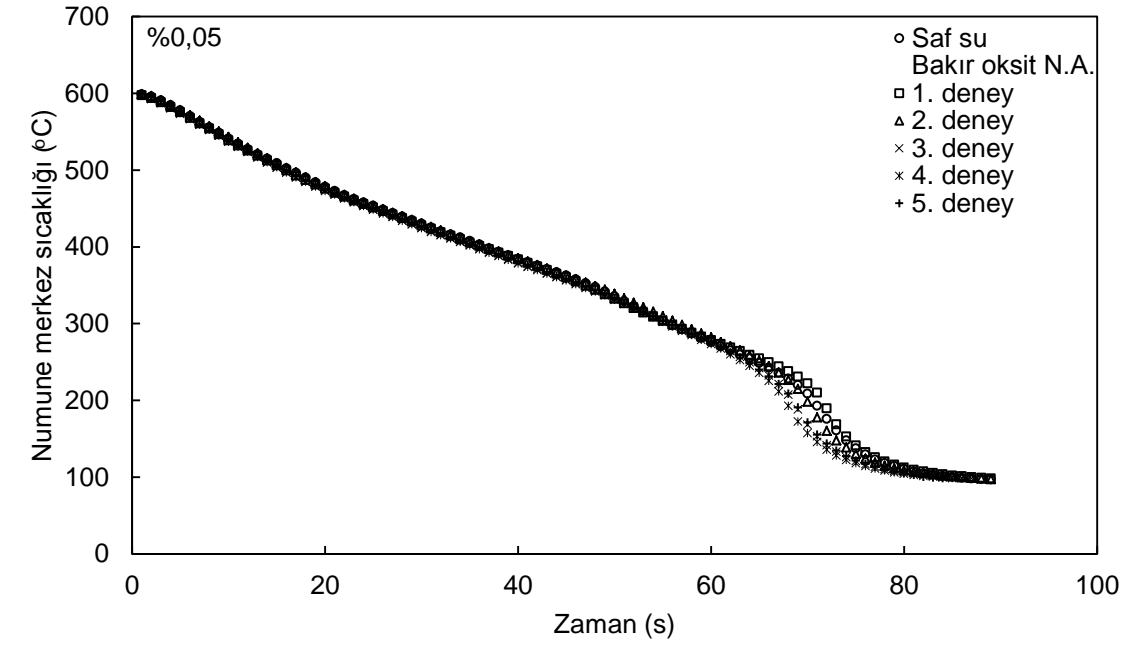
**Şekil 4.4.** Doymuş sıcaklıkta %0,01 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri.



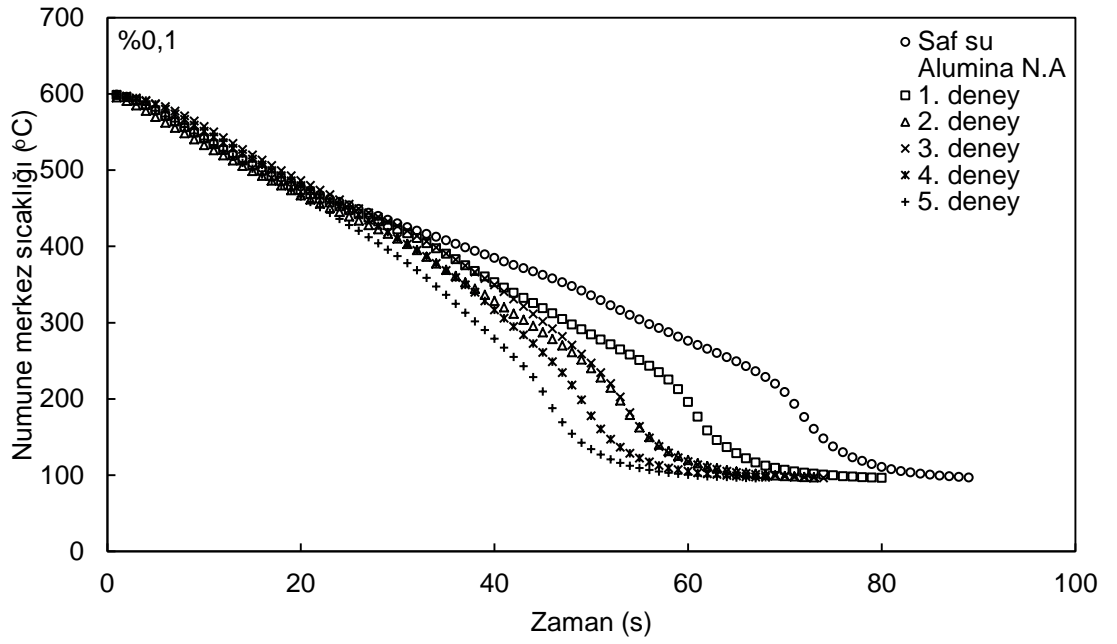
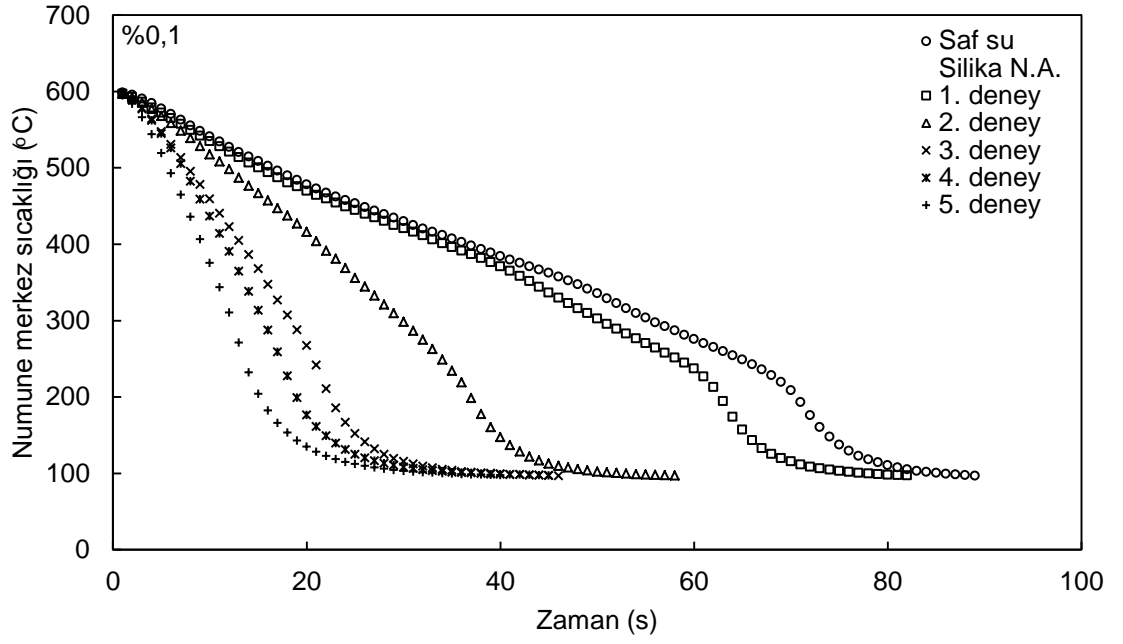
Şekil 4.4. (devam)



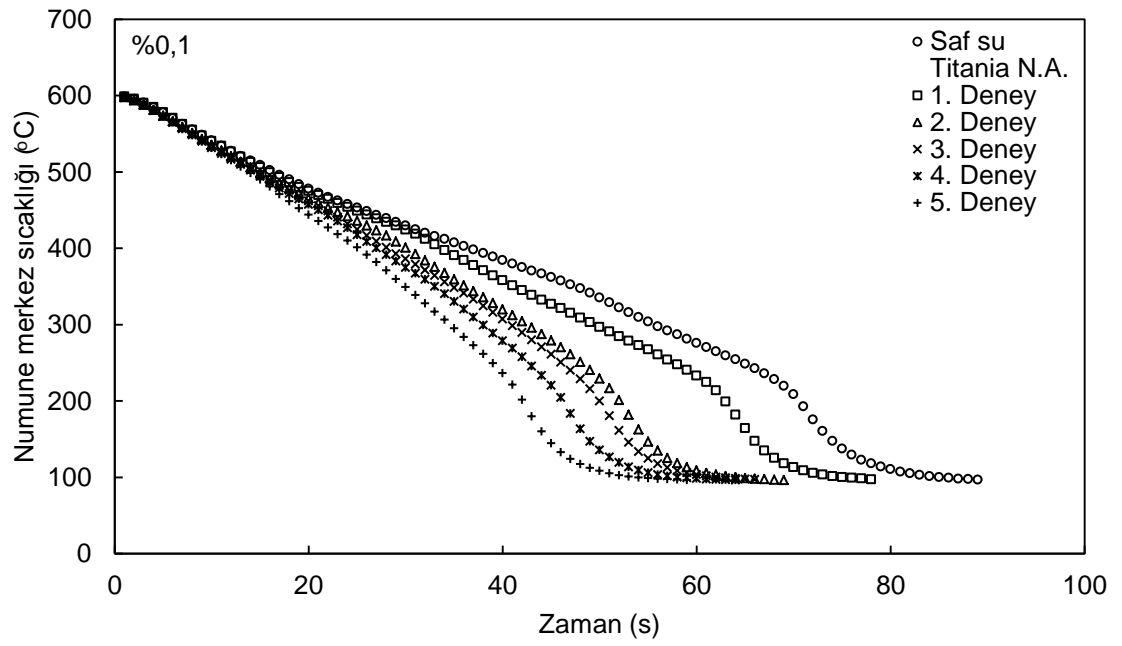
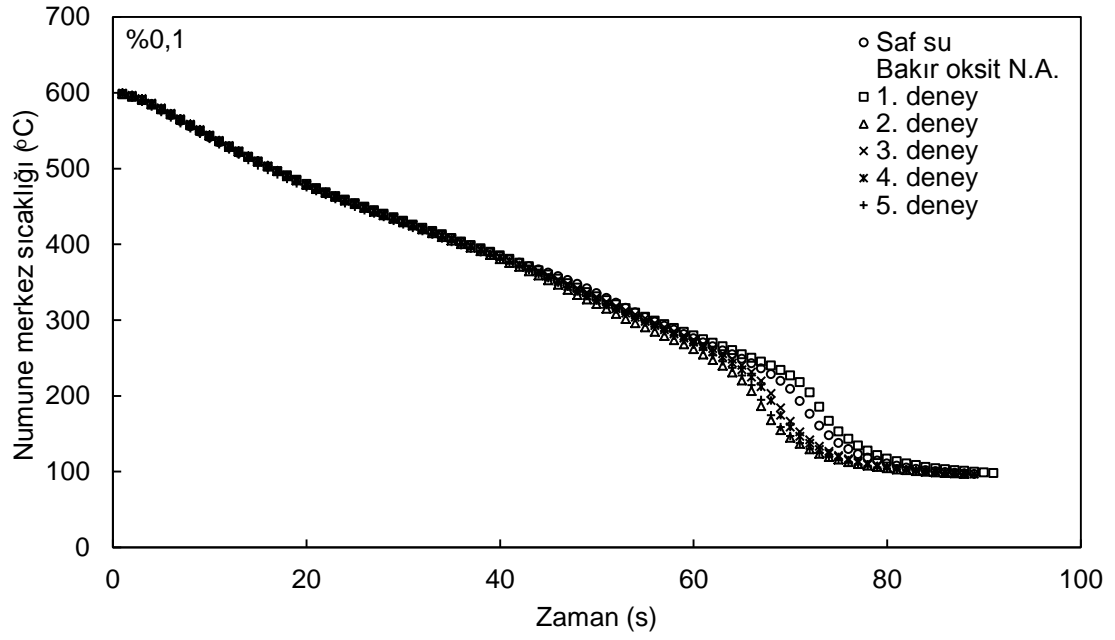
**Şekil 4.5.** Doymuş sıcaklıkta %0,05 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri.



Şekil 4.5. (devam)



**Şekil 4.6.** Doymuş sıcaklıkta %0,1 vol. partikül konsantrasyonunda nano akışkanlarda soğutulan deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrileri.



Şekil 4.6. (devam)

## 4.2. Kaynama Eğrileri

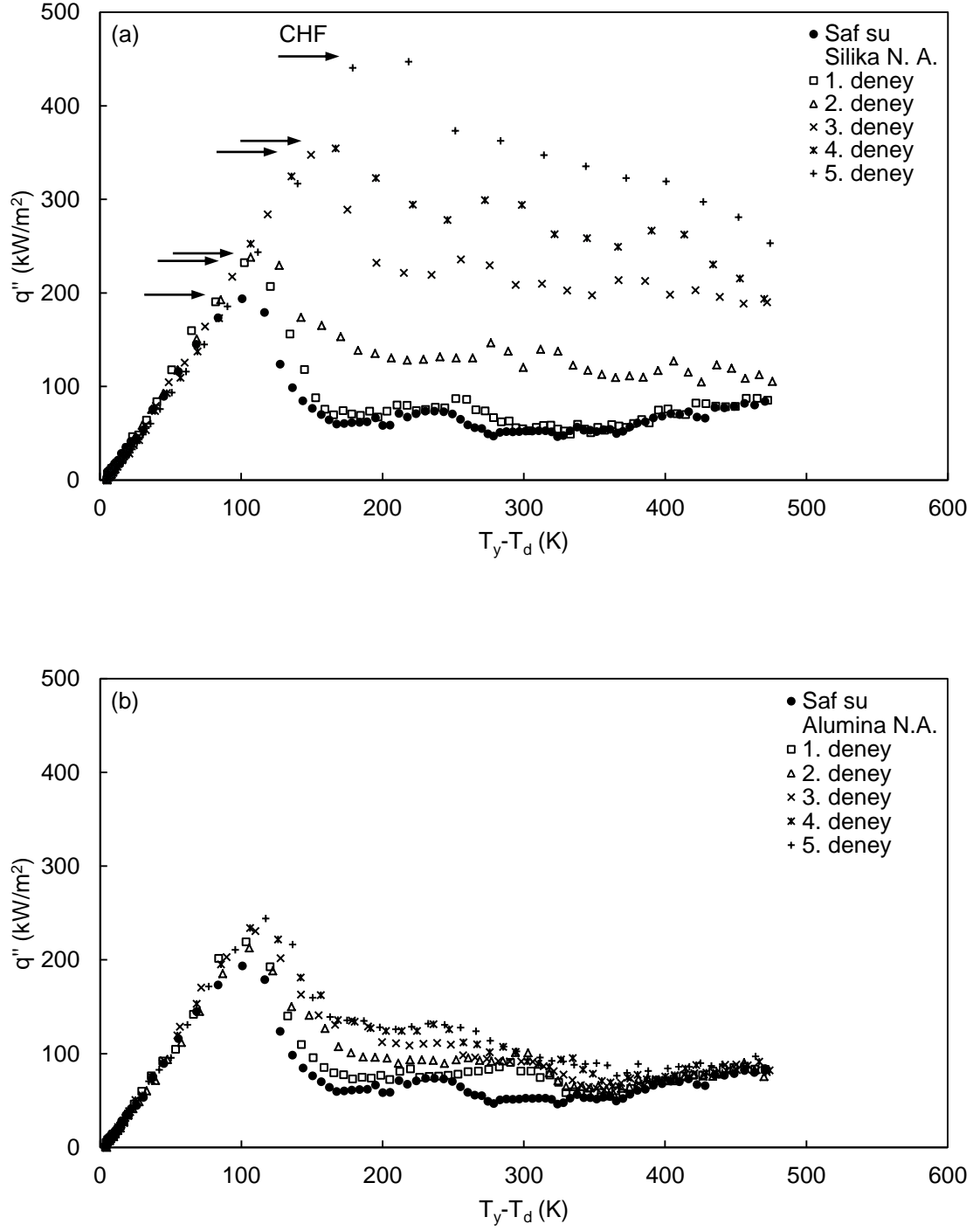
Deneyle sonucunda elde edilen sıcaklık-zaman verileri kullanılarak ‐Lumped metodu‐ yardımıyla saf su ve %0,1 hacimsel konsantrasyonlu nano akışkanlar için kaynama eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi nano akışkanlarda deney tekrarları ile kaynama eğrilerindeki en önemli değişiklik silika nano akışkanında gözlenirken, bakır oksit nano akışkanında ise su ile yakın değerler elde edilmiştir. Şekil 4.8’de, ayrıca, silika nano akışkanı için 3. deneyden itibaren film kaynama bölgesinin kaybolduğu görülmektedir.

### 4.2.1. Kritik ısı akısı (CHF) değerleri

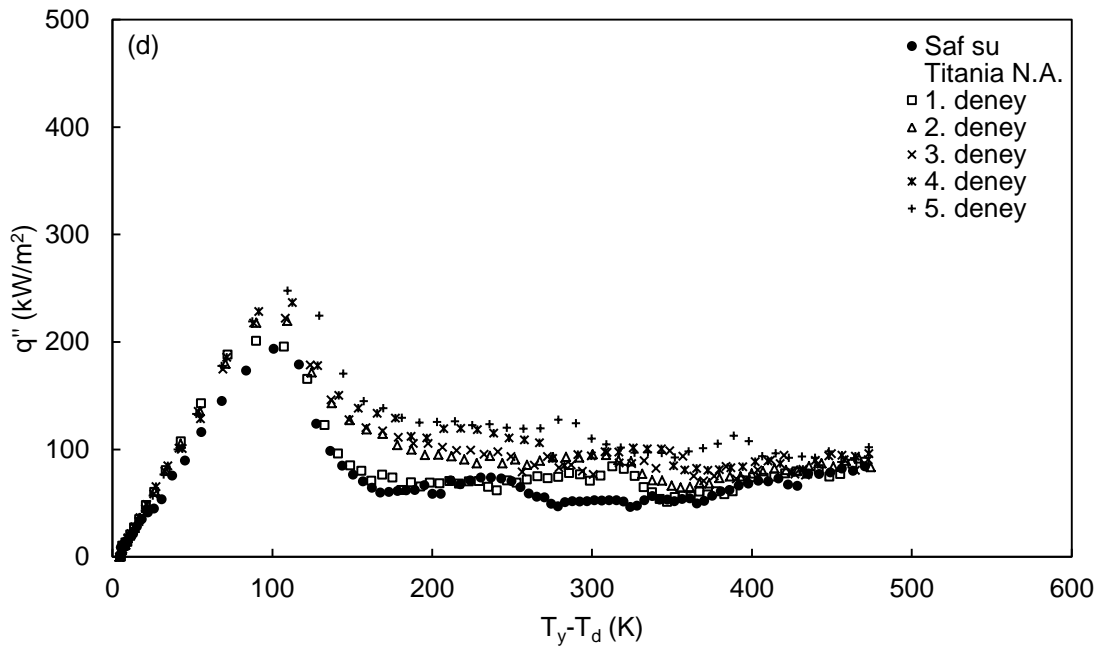
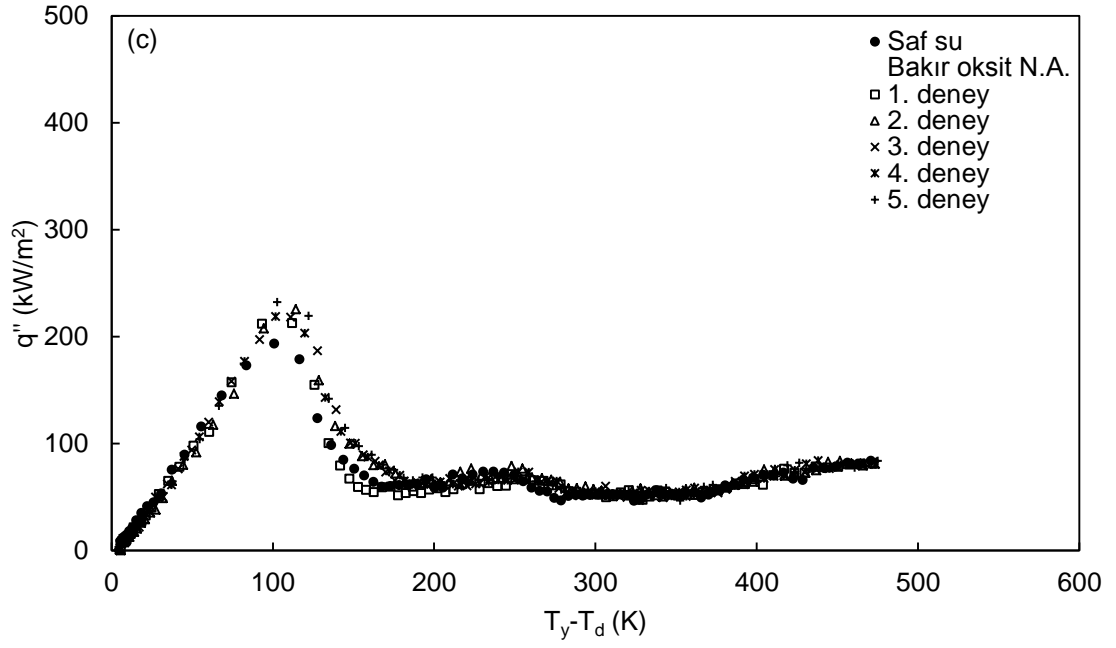
Deneyle elde edilen CHF değerleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir. Burada nano akışkanlar için CHF değerlerinde deney tekrarı ile artış olduğu görülmektedir. En yüksek CHF artışı silika nano akışkanı için gerçekleşmiştir. Saf su için kritik ısı akısı değeri  $\sim 193 \text{ kW/m}^2$  olurken bu değer silika nano akışkanı için 5. tekrar deneyinde  $\sim 447 \text{ kW/m}^2$  olarak bulunmuştur. Sonuç olarak, silika nano akışkanı için CHF değerinde yaklaşık %131 artış elde edilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Saf su ve nano akışkan kaynama deneyleri sonucu kritik ısı akıları

Akışkan Tipi	CHF değerleri ( $\text{kW/m}^2$ )				
	1. Deney	2. Deney	3. Deney	4. Deney	5. Deney
Silika N. A.	232,039	237,913	347,456	354,272	447,019
Alumina N.A.	218,934	212,6082	230,683	233,846	244,014
Bakır oksit N.A.	212,608	225,712	218,256	218,708	232,227
Titaina N.A.	200,859	219,386	221,872	236,557	247,628
Saf Su		193,403			



**Şekil 4.7.** Doymuş şartlarda (a) silika, (b) alumina, (c) bakır oksit, (d) titania nano akışkanlarına ait (%0,1 vol) kaynama eğrileri.



Şekil 4.7. (devam)

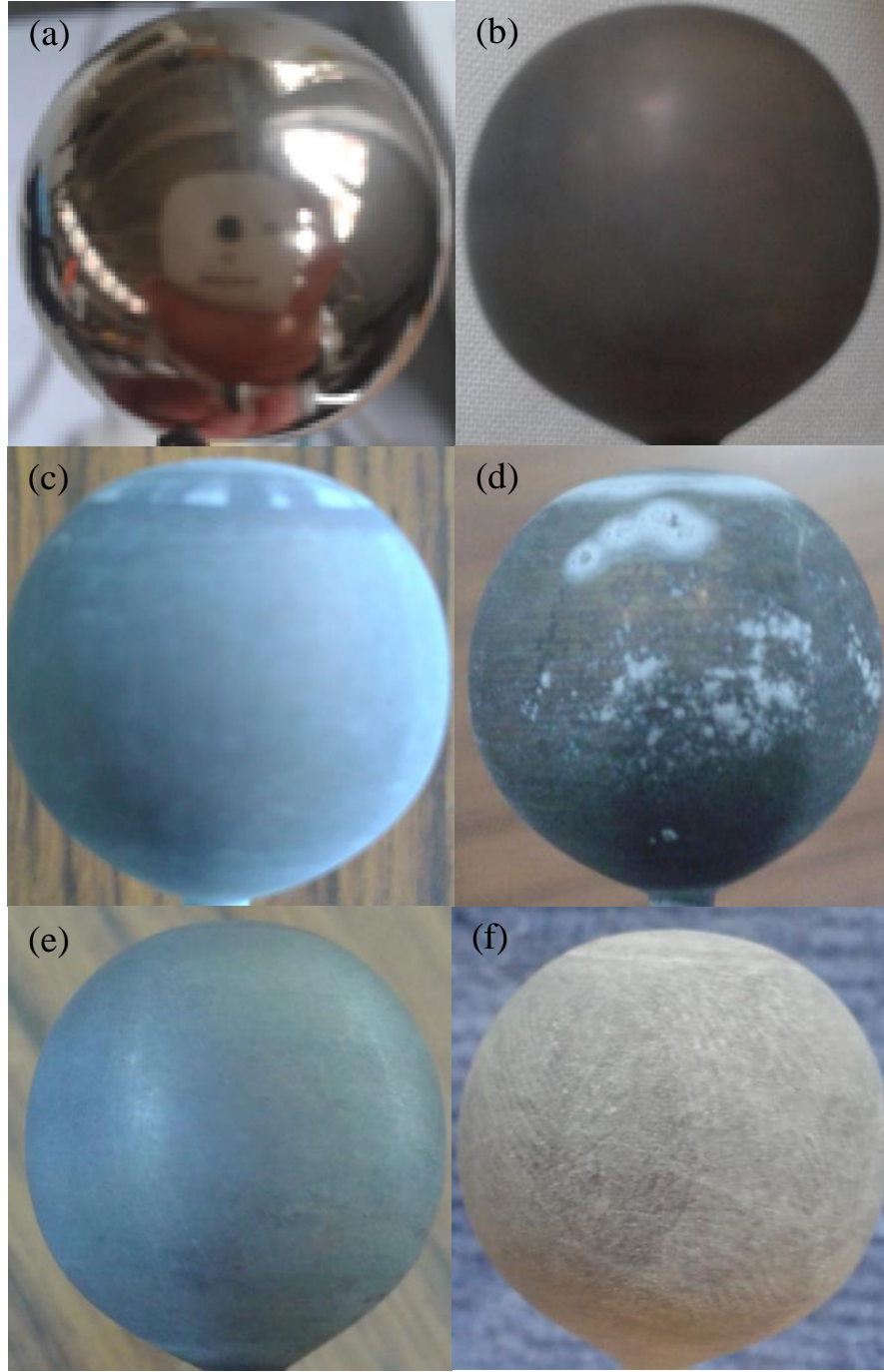
Araştırmacılar, katı yüzey üzerinde biriken nano partiküllerin yüzeyin morfolojisini ve ıslatabilirliğini önemli ölçüde değiştirebileceği rapor etmişlerdir (Das *et al.* 2003; Vassallo *et al.* 2004; Bang and Chang 2005; Kim *et al.* 2007; Kathiravan *et al.* 2010; Sakashita 2012; Shahmoradi *et al.* 2013). Film kaynama bölgesinde sadece birkaç mikron kalınlığındaki buhar filmi, böylesi bir partikül birikmesinden etkilenebilir (Park *et al.* 2004). Film kaynamada sıvı-buhar ara yüzeyi sürekli dalgalıdır ve özellikle yüksek pürüzlülükte bir yüzeyde kısa süreli katı-sıvı temasları meydana gelebilir. Eğer yüzey oldukça ıslatan bir yüzey ise, sıvı yüzeye yapışır ve yayılır. Bu durumda oluşan buhar kabarcıkları buhar filmi bozarak onun daha erken ve daha yüksek yüzey sıcaklıklarda kırılmasına neden olur.

Deneyle sonrasında test numunesinin yüzey fotoğrafları çekilmiş ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi, %0,1 hacimsel konsantrasyonlu silika, alümina, titania nano akışkanları sonrasında yüzeyde homojen olmayan nano partikül tabakalarının olduğu görülürken bakır oksit nano akışkanı sonrasında yüzeyde önemli değişikliğin olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, soğuma eğrilerindeki sapmanın (erken soğumanın) temel sebebi, nano akışkanlarla değil değişen yüzey karakteristikleriyle ilgilidir (Golubovic *et al.* 2009; Stutz *et al.* 2011; Wen *et al.* 2011; Mourgues *et al.* 2013). Bu durumu doğrulamak için test numunesinin yüzeyinden temas açıları ( $\theta$ ) ölçülmüştür (KSV, Cam-101 Scientific Inst.). Elde edilen sonuçlar Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre, deney öncesi parlatılmış yüzey için temas açısı  $99,92^\circ$  olarak ölçülürken, saf su deneyinden sonra bu değer  $81,85^\circ$  olarak ölçülmüştür. Ancak, silika nano akışkan deneylerinden sonra temas açılarında belirgin bir düşüş görülmektedir. %0,05 konsantrasyonlu silika nano akışkan deneyinden sonra temas açısı  $32,30^\circ$ , %0,1 konsantrasyonunda ise  $6,12^\circ$  olarak ölçülmüştür. Bazı araştırmacılar da temas açılarında düşüş gözlemişlerdir ki bu durum yüzeydeki aktif buhar çekirdeklerinin sayısında düşüőe neden olmuştur (Shahmoradi *et al.* 2013; Golubovic *et al.* 2009; Coursey *et al.* 2008; Kim *et al.* 2009; Truong *et al.* 2010; Ahn *et al.* 2013). Araştırmacılar düşük partikül konsantrasyonlarında bile ( $<0,01\text{vol.}\%$ ) CHF değerinde %250’ye varan önemli artışlar gözlemişlerdir (Das *et al.* 2003; Das *et al.* 2008; Kathiravan *et al.* 2009). Dolayısıyla bu artış nano akışkanların özellikleri ile

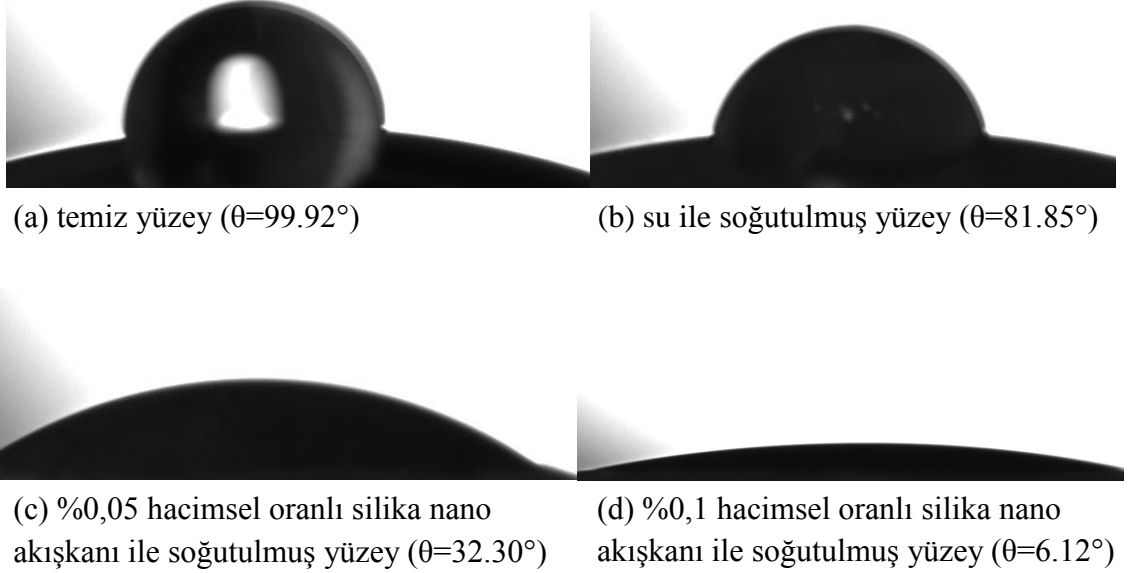
açıklanamaz. Aslında, CHF değeri temas açısıyla ters orantılı olarak değişmektedir ve bu nedenle CHF değerlerindeki artışın sebebi artan ıslatabilirlik (düşük temas açısı) olabilir. Aşağıda gösterilen ve Wenzel (1949) tarafından önerilen değiştirilmiş Young eşitliği bu durumu açıklamaktadır.

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\sigma} r \quad (4.1)$$

Burada,  $\gamma_{SV}-\gamma_{SL}$  adezyon gerilimini (yüzey geriliminin yatay bileşeni),  $r$  ise pürüzlülük faktörünü göstermektedir (aktif temas yüzey alanının toplam yüzey alanına oranı). Eşitlik 4.1'e göre, temas açısındaki azalma ile (veya yüksek ıslatabilirlik) adezyon gerilimi artar ve yüzeyde oluşacak buharlaşma gecikir ve böylece CHF değeri de artar (Bang and Chang 2005).



**Şekil 4.8.** (a) Test öncesi, (b) saf suda, (c) %0,1 alumina nano akışkanında, (d) %0,1 silika nano akışkanında, (e) %0,1 CuO nano akışkanında, (f) %0,1 TiO<sub>2</sub> nano akışkanında soğutulan deney numunesine ait resimler.



**Şekil 4.9.** Numune yüzeyi için temas açıları.

CHF değerinde artışa neden olabilecek diğer bir etki ise kılcallık etkisidir. Kim *et al.* (2007), yüzeydeki buhar kabarcıklarının altındaki kuru bölgeler kılcallık etkisi nedeniyle çevredeki akışkan ile ıslatılabilir ve böylece CHF'nin meydana gelmesi gecikir. Ayrıca, Kim and Kim (2007) tarafından yapılan çalışmada da ısıtma yüzeyinde oluşan nano partikül tabakasının neden olduğu kılcallık etkisi incelenmiştir. Yazarlar, yüzeyde oluşan nano partikül tabakası nedeniyle iyileşen ıslatabilirlik ve kılcallık etkisi ile nano akışkanlarda daha yüksek CHF değerleri elde edildiğini belirtmişlerdir.

Literatürde bugüne kadar yapılan çalışmalarda, yüzey pürüzlülüğü, nano partikül boyutu, ısıtıcı tipi ve yerleşimi, sistem basıncı, süspansiyonun kararlılığı ve ilave edilen seyrelticilerin etkisi gibi birçok parametrenin nano akışkanlarda CHF değerlerinde değişime neden olabileceği vurgulanmıştır. Ancak bu çalışmada yüzeyin ıslatabilirliği etkisi (wettability) üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak, nano akışkanlarla su verilerek soğutulan test numunesinin değişen yüzey özellikleri kaynama davranışında meydana gelen değişikliğin temel sebebidir.

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada ısıtıcı yüzey olarak pirinç malzemedan yapılmış küresel yüzey kullanılarak nano akışkanlarda su verme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Nano akışkanlar  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$  ve  $\text{TiO}_2$  nano partikülleri ve de-iyonize su ile hacimsel olarak %0,001, %0,01, %0,05 ve %0,1 konsantrasyonlarında iki-adım yöntemiyle hazırlanmıştır. Doyma şartlarında ve atmosferik basınç altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda soğuma ve kaynama eğrileri elde edilmiş olup bulunan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Deneysel numunesine ait su verme karakteristikleri kullanılan nano akışkan tipine ve nano partikül konsantrasyonuna oldukça bağlı olduğu görülmüştür.
- Hacimsel olarak %0,001 konsantrasyonlu nano akışkanlarda yapılan deneyler sonucunda soğuma eğrileri saf sudakine yakın olmuştur. Konsantrasyon ve deney tekrarı artışı ile  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{TiO}_2$  nano akışkanlarında soğuma süresi kısalmıştır. Ancak  $\text{CuO}$  nano akışkanında en yüksek konsantrasyonda bile soğuma eğrilerinde önemli değişiklik olmamıştır. Soğuma eğrilerinde en önemli değişiklikler  $\text{SiO}_2$  nano akışkanlarında meydana gelmiştir. Saf suda yapılan deney sonucu numunenin soğuma süresi 89 saniye olurken, %0,1 hacimsel konsantrasyonlu  $\text{SiO}_2$  nano akışkanında 5. tekrar deneyinde bu değer 40 saniye olmuştur.
- Kaynama eğrilerinde konsantrasyon ve deney tekrarı ile önemli değişimler meydana gelmiştir. Kaynama eğrilerinde en önemli değişiklik %0,1 hacimsel konsantrasyonlu  $\text{SiO}_2$  nano akışkanında 5. tekrar deneyinde olmuş ve CHF değerinde % 131 artış gerçekleşmiştir.
- Genel olarak çekirdek kaynama ısı transferinde önemli bir değişimin olmadığı gözlenmiştir.
- Nano partiküllerin deneyler sonunda homojen olmayan bir şekilde test numunesi üzerine biriktiği görülmüştür. Yüzeyde biriken nano partiküllerin, yüzeyin

ıslatabilirliğini artırdığı ve böylece CHF değerlerindeki artışın sebebi olduğu tespit edilmiştir.

## **5.2. Öneriler**

Partikül çeşidi ve konsantrasyonu değiştirilerek elde edilen nano akışkanlarda kaynama ısı transferi değişimleri incelenebilir. Isıtıcı yüzey için farklı malzemeler ve geometrilerden yapılmış deney numuneleri kullanılarak farklılıkları araştırılabilir.

**KAYNAKLAR**

- Ahmed, O., Hamed, M.S., 2012. Experimental investigation of the effect of particle deposition on pool boiling of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 3423-3436.
- Ahn, H.S., Kim, M.H., 2013. The boiling phenomenon of alumina nanofluid near critical heat flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, 718-728.
- Bang, I.C. and Chang, S.H., 2005. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nano-fluids from a plain surface in a pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (12), 2407–2419.
- Berenson, P. J., 1961. Film Boiling Heat Transfer for a Horizontal Surface, *J. Heat Transfer*, 83, 351.
- Bolukbasi, A., and Ciloglu, D., 2011. Pool boiling heat transfer characteristics of vertical cylinder quenched by SiO<sub>2</sub>-water nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 1013-1021.
- Brinkman, H.C., 1952. The Viscosity of concentrated suspensions and solutions, *J. Chem. Phys.*, 20, 571-581.
- Bromley, L., 1950. Heat Transfer in Stable Film Boiling. *Chem. Eng. Prog.* 46(5), 221-227.
- Ciloglu, D. and Bolukbasi, A., 2011. The quenching behavior of aqueous nanofluids around rods with high temperature, *Nuclear Engineering and Design*, 241, 2519-2527.
- Choi, U.S., and Eastman, J.A., 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *International mechanical Engineering congress and exhibition*, san Francisco, CA.
- Coursey, J.S. ve Kim, J., 2008. Nanofluid boiling: the effect of surface wettability, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 29, 1577-1585.
- Das, S. K., Putra, N., Roetzel, W., 2003. Pool boiling characteristics of nanofluid, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 46, 851-862.
- Das, S.K., Narayan, G.P., Anoop, K.B., 2008. Survey on nucleate pool boiling of nanofluids: the effect of particle size relative to roughness, *J. Nanoparticle Res.*, 10, 1099-1108.
- Dhir, V.K., Purohit, G.P., 1977. Subcooled Film Boiling Heat Transfer from Spheres, *Chemical, Nuclear, and Thermal Engineering Department, School of engineering and Applied Science University of California, Los Angeles, California 90024, USA.*
- Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S. and Thompson, L.J., 1997. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, *Proceedings of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II*, 457, 3–11, *Materials Research Society, USA.*
- Fan, L.W., Li, J.Q., Li, D.Y., Zhang, L., Yu, Z.T., 2014. Regulated transient pool boiling of water during quenching on nanostructured surfaces with modified wettability from superhydrophilic to superhydrophobic, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 76, 81-89.

- Golubovic, M.N., Hettiarachchi, H.D.M., Worek, W.M., Minkowycz, W.J., 2009. Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study, *Appl. Therm. Eng.*, 29, 1281-1288.
- Huang, C.K., Lee, C.W., Wang, C.K., 2011. Boiling enhancement by TiO<sub>2</sub> nanoparticle deposition, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 4895-4903.
- Hahne, E. and Grigull, U., 1977. *Heat Transfer in Boiling*, Hemisphere/Academic Press, New York.
- Harish, G., Emlin, V., Sajith, V., 2011. Effect of surface particle interactions during pool boiling of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 2318-2327.
- Incropera, F.P. and De Witt, D. P., 1990. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, p.590, John Wiley & Sons, New York.
- Jordan, A., Scholz, R., Wust, P., Fahling, H., and Felix, R., Magnetic fluid hyperthermia (MFH):cancer treatment with AC magnetic field induced excitation of biocompatible superparamagnetic nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 201, 413–419 (1999).
- Jung, J.Y., Kim, E.S., Kang, Y.T., 2012. Stabilizer effect on CHF and boiling heat transfer coefficient of alumina/water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 1941-1946.
- Kathiravan, R., Kumar, R., Gupta, A., Chandra, R., 2009. Characterization and pool boiling heat transfer studies of nanofluids, *J. Heat Transfer*, 131, 1-8.
- Kathiravan, R., Kumar, R., Gupta, A., Chandra, R., 2010. Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 1673-1681.
- Kim, H., Buongiorno, J., Hu, L.W, McKrell, T., 2010. Nanoparticle deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based alumina nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 1542-1553.
- Kim, H.D., Kim, J., Kim, M.H., 2007. Experimental studies on CHF characteristics of nano-fluids at pool boiling, *Int. J. Multiphase Flow*, 33, 691-706.
- Kim, H.D. ve Kim, M.H., 2007. Effect of nanoparticle deposition on capillary wicking that influences the critical heat flux in nanofluids, *Applied Physics Letters*, 91:014104.
- Kim, H., DeWitt, G., McKrell, T., Buongiorno, J., Hu, L.W, 2009. On the quenching of steel and zircaloy spheres in water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles, *International Journal of Multiphase Flow*, 35, 427-438.
- Kim, T.I., Chang, W.J., Chang, S.H., 2011. Flow boiling CHF enhancement using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid and an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle deposited tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 2021–2025.
- Kim, H., Buongiorno, J., Hu, L.W., McKrell, T., DeWitt, G., 2008. Experimental study on quenching of a small metal sphere in nanofluids, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Boston, Massachusetts, USA
- Kline, S.J., Mc Clintock, F.A., 1953. Describing uncertainties in single-sample experiments. *Mec. Eng.*, 3.

- Khosmehr, H. H., Saboonchi, A., Shafii, M.B., 2014. The quenching of silver rod in boiling carbon nano tube-water nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 75 , 95-104.
- Kwark, S.M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J., You, M.S., 2010. Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 , 972–981.
- Kutateladze, S. S., 1948. On the Transition to Film Boiling Under Natural Convection, *Kotloturbostroenie*, 3, 10.
- Lee J.H., Lee, T., Jeong, Y.H., 2012. Experimental study on the pool boiling CHF enhancement using magnetite-water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2656-2663.
- Lienhard, J. H., Dhir, V. K. and Riherd, D. M., 1973. The Peak Pool Boiling Heat Flux Measurements on Finite Horizontal Flat Plates, *J. Heat Transfer*, 95, 477.
- Li, J., Peterson, G.P., & Cheng, P., 2004. Three-dimensional analysis of heat transfer in a micro-heat sink with single phase flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 19-20, 4215–4231, ISSN: 0017-9310.
- Lotfi, H. and Shafii, M.B., 2009. Boiling heat transfer on a high temperature silver sphere in nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 48, 2215–2220.
- Maxwell, J.C., 1891. *A Treatise on Electricity and Magnetism*, unabridged 3rd ed., Clarendon Press, Oxford, UK.
- Mourgues, A., Virginie, H., Muller, T., Marylise, C.C., 2013. Boiling behaviors and critical heat flux on a horizontal and vertical plate in saturated pool boiling with and without ZnO nanofluid, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 57(2), 595-607.
- Nukiyama, S., 1934. The Maximum and Minimum Values of Heat Transmitted from Metal to Boiling Water Under Atmospheric Pressure, *J. Japan Soc. Mech. Eng.*, 37, 367.
- Pak, B.C. and Cho, Y.I., 1998. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Exp. Heat Transf.* 11, 151–170.
- Park, H.S., Shiferaw, D., Sehgal, B.R., Kim, D.K., Muhammed, M., Film boiling heat transfer on a high temperature sphere in nanofluid, in: *Proceedings of 2004 ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference*, Charlotte, NC, 1-8.
- Que, Q., Zhang, J., Zhang, Z., 1997. Synthesis structure and lubricating properties of dialkydithiophosphate-modified Mo-s compound nanoclusters, *Wear*, 209 (1-2) : 8-12.
- Rohsenow, W. M., 1973. Boiling, *Hand book of Heat Transfer*, Chap. 13, Mc Graw Hill, New York.
- Sadasivan, P. And Lienhard, J. H., 1987. Sensible Heat Correction in Laminar Film Boiling and Condensation, *J. Heat Transfer*, 109, 45.
- Sakashita, H., 2012. CHF and near-wall boiling behaviors in pool boiling of water on a heating surface coated with nanoparticles, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55, 7312-7320.
- Shahmoradi, Z., Etesami, N., Esfahany, M.,N., 2013. Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 47, 113-120.

- Sheikhhbahai, M., Esfanahy, M.N., Etesami, N., 2011. Experimental investigation of pool boiling of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /ethylene glycol-water nanofluid in electric field, *International Journal of Thermal Sciences*, xxx,1-5.
- Singh, D., Toutbort, J., Chen, G., et al. 2006. Heavy vehicle system optimization merit review and peer evaluation. Annual Report, Argonne National Laboratory.
- Steven, J.W., Writte, L.C., 1972 Destabilization of Vapour Film Boiling Around the Sphere. Department of Mechanical Engineering. University of Houston, Houston, Texas 72004. USA.
- Song, S.L., Lee, J.H., Chang, S.H., 2014. CHF enhancement of SiC nanofluid in pool boiling experiment, *Experimental Thermal and Fluid Science* 52, 12-18.
- Stutz, B., Morceli, C.H.S., Silva, M.F., Cioulachtijan., S., Bonjour, J., 2011. Influence of nanoparticle surface coating on pool boiling, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, 1239-1249.
- Trisaksri, V., Wongwises, S., 2007. Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 512 – 523.
- Truong, B., Hu, L.W., Buongiorno, J., McKrell, T., 2010. Modification of sandblasted plate heaters using nanofluids to enhance pool boiling critical heat flux, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 53, 85-94.
- Vassallo, P., Kumar, R., D'Amico, S., 2004. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 47(2), 407-411.
- Web, R., The Evolution of Enhanced Surface Geometries for Nucleate Boiling, *Heat Transfer Eng.*, 2, 46, 1981 and Nucleate Boiling on Porous Coated Surfaces, *Heat Transfer Eng.*, 4, 71, 1983.
- Wen, D. and Ding, Y., 2005. Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based  $\gamma$ -alumina nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research* 7 (2), 265– 274.
- Wen, D., Corr, M., Hu, X., Lin, G., 2011. Boiling heat transfer of nanofluids: The effect of heating surface modification, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 480-485.
- Wenzel, R.N., 1949. Surface roughness and contact angle (letter), *J. Phys. Coll. Chem.*, 53(9), 1466.
- Xuan, Y. and Li, Q., 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 21, 58–64.
- Yamagata, K., Kirano, F., Nishiwaka, K. and Matsuoka, H., 1955. Nucleate Boiling of Water on the Horizontal Heating Surface, *Mem. Fac. Eng. Kyushu*, 15, 98.
- Yang, X.F., Liu, Z.H., 2011. Pool boiling heat transfer of functionalized nanofluid under sub-atmospheric pressures, *International Journal of Thermal Sciences*, 50, 2402-2412
- Zuber, N., 1958. On the Stability of Boiling Heat Transfer, *Trans. ASME*, 80, 711.

## ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında Giresun'un Şebinkarahisar ilçesinde doğdu. İlköğretim ve lise öğretimini Giresun'da tamamladı. 2007 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başladı.

Harran Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Ocak 2013 yılından beri Harran Üniversitesi Dekanlık 50/d kadrosuyla Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.