

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HAVUZ KAYNAMASINDA BİR MİKRO OYUKTAKİ KABARCIKLANMANIN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Tuğba TETİK

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

NİSAN 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**HAVUZ KAYNAMASINDA BİR MİKRO OYUKTAKİ KABARCIKLANMANIN
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Tuğba TETİK
(503112021)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Ü. İ. Yalçın URALCAN

NİSAN 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503112021 numaralı Doktora Öğrencisi Tuğba TETİK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “HAVUZ KAYNAMASINDA BİR MİKRO OYUKTA Kİ KABARCIKLANMANIN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Ü. İsmail Yalçın URALCAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Levent TRABZON**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yakup Erhan BÖKE
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tahsin ENGİN
Sakarya Üniversitesi

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13 Mart 2022
Savunma Tarihi : 14 Nisan 2022





Aileme,



ÖNSÖZ

Doktora tez konumun belirlenmesi ve bu çalışmanın her aşamasında değerli bilgi ve katkılarını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Ü. İ. Yalçın URALCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin kurulması ve deneysel çalışmaların yapılması sırasında emekleri bulunan İTÜ Makina Fakültesi teknisyenleri Mehmet Ziya KUMCU ve Niyazi GÜVEN'e teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi'ne 38663 numaralı projeye verdikleri destekten dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her anında sonsuz sevgi ve anlayışlarını en derinden hissettiğim, her zaman daha iyisini yapmam konusunda beni teşvik eden annem, babam ve kardeşime, bana verdikleri güç ve cesaret için en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Mart 2022

Tuğba TETİK
(Makina Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
2. HAVUZ KAYNAMASI	3
2.1 Çekirdeklenme Kıstası ve Kabarcıklanma Çevrimi	5
2.2 Çekirdekli Havuz Kaynamasında Yüzeyde Kabarcık Oluşumunu Etkileyen Mekanizmalar ve Parametreler	7
2.2.1 Yüzey yapısı.....	7
2.2.1.1 Yüzeyde oluşturulan yapılar	8
2.2.1.2 Yüzey kaplamaları	10
2.2.2 Temas açısı.....	11
2.2.3 Akışkanın termofiziksel özellikleri	12
2.2.4 Isı akısı	13
2.2.5 Basınç.....	19
2.2.6 Yerçekimi.....	20
2.3 Kabarcık Dinamiği Parametreleri	20
2.3.1 Etkin kabarcıklanma odakları yoğunluğu	21
2.3.2 Büyüme hızı ve süresi	23
2.3.3 Yüzeyde bekleme süresi.....	26
2.3.4 Kabarcık ayrılma çapı	26
2.3.5 Yüzeyden ayrılma frekansı	32
2.4 Isı Taşınım Katsayısı.....	34
2.5 Kabarcık Görüntüleme Çalışmaları.....	37
2.6 Sayısal Modelleme Yöntemleri.....	41
2.6.1 Hacimsel yüzde yöntemi (VOF)	42
2.6.2 Level-Set yöntemi	43
2.6.3 CLSVOF yöntemi	44
3. MATEMATİK MODEL.....	45
3.1 Önerilen Matematik Model	46
3.1.1 Doğal taşınım ile ısı geçişi	47
3.1.2 Kabarcık etkin bölgede ısı geçişi	48
3.1.3 Kabarcık ayrılma çapı ve frekansı	49
3.1.4 Etkin çekirdeklenme odaklarının yoğunluğu	50
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	51
4.1 Deney Düzenegi	51

4.1.1 Kaynama havuzu	52
4.1.2 Kaynama yüzeyleri.....	53
4.1.3 Ana ve yardımcı ısıtıcılar	56
4.1.4 Görüntüleme sistemi	58
4.2 Deneylerin Yapılışı	59
4.3 Kullanılan Ölçüm Yöntemleri ve Verilerin Değerlendirilmesi.....	59
4.3.1 Uzunluk ölçümleri.....	60
4.3.2 Sıcaklık ölçümleri	60
4.3.3 Yüzey sıcaklığı ve ısı akısının belirlenmesi.....	61
4.3.4 Görüntüleme çalışmaları ve görüntülerin değerlendirilmesi.....	64
4.3.4.1 Kabarcıklanma çevriminin gözlemlenmesi	64
4.3.4.2 Kabarcık ayrılma çaplarının ölçülmesi	64
4.3.4.3 Kabarcık ayrılma frekansının belirlenmesi	66
5. SAYISAL MODEL	69
5.1 Yürütücü Denklemler ve Yapılan Kabuller.....	70
5.1.1 Süreklilik denklemi	71
5.1.2 Momentum denklemi	71
5.1.3 Enerji denklemi	71
5.2 İki Fazlı Akış Modeli	72
5.3 Kaynama Modeli	73
5.4 Çözüm Alanı	74
5.4.1 Model geometrisi.....	74
5.4.2 Çözüm ağının yapısı.....	76
5.4.3 Sınır şartları ve başlangıç koşulları	77
5.5 Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon-UDF	78
5.6 Çözümleme Yöntemi.....	78
6. SONUÇLAR	81
6.1 Düz yüzey.....	81
6.1.1 Kaynama eğrisinin elde edilmesi ve Rohsenow verileri ile karşılaştırılması	81
6.1.2 Kabarcık büyüme eğrisi ve ayrılma çapı.....	82
6.1.3 Kabarcık ayrılma frekansı	85
6.1.4 Sayısal modelin doğrulanması	86
6.2 Bir Oyuklu Yüzey	89
6.2.1 Kaynama eğrisinin elde edilmesi	89
6.2.2 Kabarcık büyüme eğrisi ve ayrılma çapı.....	89
6.2.3 Kabarcık ayrılma frekansı	92
6.2.4 Yüzeyde bir oyuk olması durumu için sayısal model sonuçları.....	94
6.3 Oyuklar Arasındaki Mesafenin Kaynama Olayına Etkisi	97
6.3.1 Kaynama eğrilerinin elde edilmesi.....	97
6.3.2 Kabarcık ayrılma çapı	99
6.3.3 Kabarcık ayrılma frekansı	100
6.3.4 Isı taşınım katsayısı	101
6.4 Kabarcık Görüntüleri.....	102
6.4.1 Ayırık kabarcıklanma	103
6.4.1.1 Düz yüzey.....	104
6.4.1.2 Yapay oyuk	104
6.4.2 Mantar form.....	107
6.4.3 Kabarcıkların birleşmesi olayları	108
6.4.4 Etkin kabarcıklanma odakları sayısı	113

6.5 Kabarcık Dinamiği için Elde Edilen Deneysel Verilerin Önerilen Matematik Model ile Karşılaştırılması	114
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR	119
EKLER.....	129
ÖZGEÇMİŞ.....	135





KISALTMALAR

CLSVOF : Birleştirilmiş Level-Set ve Akışkanların Hacmi Metodu

LS : Level-Set Yöntemi

VOF : Akışkan Hacimleri Yöntemi





SEMBOLLER

Ar	: Arşimed sayısı
b	: Buhar
D	: Çap [m]
dt	: Doğal taşınım
c_p	: Sabit basınçta özgül ısı [J/kgK]
g	: Yer çekimi ivmesi [m/s ²]
f	: Frekans [1/s]
h	: Isı taşınım katsayısı [W/m ² K]
k	: Isı iletim katsayısı [W/mK]
Ja	: Jakob sayısı
mb	: Mikrotabaka buharlaşması
n_k	: Etkin çekirdeklenme odaklarının yoğunluğu [adet/m ²]
Nu	: Nusselt sayısı
P	: Basınç [N/m ²]
Pr	: Prandtl sayısı
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü [m]
q	: Birim zamandaki ısı geçişi [W]
q"	: Isı akısı [W/m ²]
s	: Sıvı
T	: Sıcaklık [K]
T_d	: Doyma sıcaklığı [K]
T_y	: Yüzey sıcaklığı [K]
t_g	: Kabarcığın yüzeyde büyüme süresi
t_w	: Kabarcığın yüzeyde bekleme süresi
σ	: Yüzey gerilimi [N/m]
μ	: Dinamik viskozite [Ns/m ²]
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³]
ΔT_d	: Kızgınlık derecesi (T _y -T _d) [K]
β	: Isıl genleşme katsayısı [1/K]

θ : Temas açısı [°]
 κ : Ara yüzey eğriliği

Alt İndisler

a : Ayrılma
 c : Kritik
 d : Doyma
 eo : Etkinleşen odak
 g : Büyüme
 k : Kabarcık
 y : Yüzey
 w : Bekleme

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Denklem (2.4)'de verilen sabitlerin çeşitli yüzey-akışkan çiftleri için önerilen değerleri.	14
Çizelge 2.2 : Etkin kabarcıklanma yoğunluğu için önerilen ifadeler.	22
Çizelge 2.3 : Büyüme hızı için önerilen ifadeler.	25
Çizelge 2.4 : Kabarcık ayrılma çapı için önerilen ifadeler.	28
Çizelge 2.5 : Kabarcıklanma frekansı için önerilen ifadeler.	34
Çizelge 4.1 : Sıcaklık ölçümü alınan noktaların konumları.	60
Çizelge 5.1 : 100°C'deki sıvı su ve buharının malzeme özellikleri.	79
Çizelge 6.1 : Çözüm alanı.....	86
Çizelge A.1 : Ölçme silindirindeki termoeleman konumlarının ısı geçiş yüzeyine mesafesinin ölçülmesindeki belirsizlik.	131
Çizelge A.2 : Deney verilerindeki belirsizliğin hesabında kullanılan bağıntılar ve örnek sonuçlar.	133



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kaynama eğrisi ve havuz kaynaması düzenleri.	4
Şekil 2.2 : Oyuk parametreleri.	6
Şekil 2.3 : Hidrofilik yüzey üzerinde a) bir damlacıkta ve b) bir kabarcıkta oluşan arayüzey gerilimi dengesi.	11
Şekil 2.4 : Bir paslanmaz çelik yüzey üzerinde farklı nanotanecik kaplamalarının sıvı-katı temas açısına etkisi.	12
Şekil 2.5 : Kabarcıklı kaynamada ısı geçişinin modellenmesi.	20
Şekil 2.6 : Büyüyen kabarcığa etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi.	30
Şekil 2.7 : Judd ve Hwang'ın önerdiği modelin şematik gösterimi.	37
Şekil 4.1 : Deney düzeni.	51
Şekil 4.2 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi.	52
Şekil 4.3 : Kaynama havuzu.	53
Şekil 4.4 : Ölçme silindirleri.	54
Şekil 4.5 : Oyukların oluşturulması için hazırlanan düzenek.	54
Şekil 4.6 : Yüzeydeki oyukların yerleşimi.	55
Şekil 4.7 : Yüzey üzerinde oluşturulan oyuklar için kesit görüntüsü.	55
Şekil 4.8 : Oyuk ağzı.	55
Şekil 4.9 : Isıtıcı yüzeylerin havuza monte edilmesi için kullanılan plaka ve contalar.	56
Şekil 4.10 : Isıtma bloğu (Ana ısıtıcı).	56
Şekil 4.11 : Elektrik izolasyonu için kullanılan mikanit levha ve bakır plakalar.	57
Şekil 4.12 : Yardımcı ısıtıcılar ile kurulan devre şeması.	57
Şekil 4.13 : Görüntüleme sistemi.	58
Şekil 4.14 : Kaydedilen sıcaklık değerleri.	59
Şekil 4.15 : Termoelemanların ölçme silindiri üzerindeki konumları.	60
Şekil 4.16 : Termoeleman ölçme uçlarının elektrik ark kaynağı ile birleştirilmesi... ..	61
Şekil 4.17 : Bakır çubuk içindeki sıcaklık dağılımı.	62
Şekil 4.18 : Bakır yüzey sıcaklığının belirlenmesi.	62
Şekil 4.19 : Ölçme silindirinden alınan sıcaklık ölçümleri ve hesap edilen yüzey sıcaklığı değerleri.	63
Şekil 4.20 : Isı akısının hesaplanması.	63
Şekil 4.21 : 20 kW/m ² ısı akısında kabarcıklanma çevrimi.	64
Şekil 4.22 : Ölçümlerde kalibrasyon için kullanılan 0.98 mm çapa sahip uç.	65
Şekil 4.23 : a) Kabarcık görüntüsü b) Kabarcığın binary görüntüsü c) Görüntüdeki parazitlerin kaldırılması d) MATLAB ile elde edilen kabarcık geometrisi.	65
Şekil 4.24 : Aynı odakta art arda oluşan 5 kabarcıklanma çevrimi.	67
Şekil 5.1 : İncelenen çözüm alanının boyut ve geometrisi.	75
Şekil 5.2 : Kabarcıklanma odağının boyut ve geometrisi.	75
Şekil 5.3 : Ağ yapısının görünümü.	76
Şekil 5.4 : Isıl sınır tabaka kalınlığının zamana bağlı değişimi (T _y =380 K).	78

Şekil 5.5 : Çözümün ilk adımı olarak oluşturulan mikrotabaka.	80
Şekil 5.6 : Oyukta büyümekte olan buhar kabarcığı.....	80
Şekil 6.1 : Düz yüzey üzerindeki çekirdekli havuz kaynaması için elde edilen kaynama eğrileri.	82
Şekil 6.2 : Düz yüzey üzerinde oluşan kabarcıklanma için büyüme eğrileri.....	83
Şekil 6.3 : 30 kW/m ² ısı akısı için kabarcık ayrılma çapı dağılımı.	84
Şekil 6.4 : 60 kW/m ² ısı akısı için kabarcık ayrılma çapı dağılımı.	84
Şekil 6.5 : Kabarcık ayrılma çapının Ja sayısına göre değişimi.	85
Şekil 6.6 : Kabarcık ayrılma frekansının kabarcık ayrılma çapına bağlı olarak değişimi.....	86
Şekil 6.7 : Ağdan bağımsızlık testi.	87
Şekil 6.8 : Buharlaşma katsayısının kabarcık büyümesine etkisi.	88
Şekil 6.9 : Deneysel çalışma ve sayısal modelin sonuçlarının karşılaştırılması.	88
Şekil 6.10 : Düz yüzey ve bir oyuklu yüzey için elde edilen kaynama eğrileri.....	89
Şekil 6.11 : Yüzeyde bir oyuk olması durumunda oluşan kabarcıklar için büyüme eğrileri.	90
Şekil 6.12 : Kabarcık büyüme hızı.....	91
Şekil 6.13 : Kabarcık çapı ve hacminin zamana bağlı değişimi.	91
Şekil 6.14 : Yüzeyde bir oyuk olması durumunda kabarcık ayrılma çapının ısı akısına bağlı değişimi.	91
Şekil 6.15 : Kabarcık hacminin ısı akısına bağlı olarak değişimi.....	92
Şekil 6.16 : Bir oyuklu yüzey için hesaplanan frekans değerlerinin literatür ile karşılaştırılması.	92
Şekil 6.17 : 55 kW/m ² ısı akısı değerinde deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.	94
Şekil 6.18 : Deneysel ve sayısal çalışmalarda kaydedilen kabarcık şekillerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi.....	96
Şekil 6.19 : İnterferometri yöntemi ile görselleştirilen sıcaklık dağılımı.	97
Şekil 6.20 : Sıcaklık ölçümleri ile elde edilen kaynama eğrileri.	98
Şekil 6.21 : Kaydedilen görüntüler kullanılarak elde edilen gizli buharlaşma ısısının kaynama eğrileri ile karşılaştırılması.	98
Şekil 6.22 : Oyuklar arasındaki mesafeye bağlı olarak kabarcık çapının a) ısı akısıyla b) kızma farkıyla değişimi.....	99
Şekil 6.23 : Oyuklar arasındaki mesafeye bağlı olarak kabarcık ayrılma frekansının a) ısı akısıyla b) kızma farkıyla değişimi.	100
Şekil 6.24 : Isı taşınım katsayısının a) ısı akısıyla b) kızma farkıyla değişimi.....	102
Şekil 6.25 : Havuz içinde gerçekleşen ısı ve akış olayları.	103
Şekil 6.26 : Düz yüzeyde kabarcıklanma çevrimi ($q''=25 \text{ kW/m}^2$ $\Delta T=5,2 \text{ }^\circ\text{C}$).	104
Şekil 6.27 : 26 kW/m ² ısı akısında bir kabarcık için büyüme eğrisi.	104
Şekil 6.28 : Yüzeydeki oyuktan önce etkinleşen doğal kaynama odakları.....	105
Şekil 6.29 : Oyukta kabarcıklanma çevrimi ($q''=30 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=5.8 \text{ }^\circ\text{C}$).	105
Şekil 6.30 : Düz yüzey ve oyukta oluşan kabarcığın ayrılmaya yakın andaki şekli, boyun verme davranışı.	106
Şekil 6.31 : Oyukta kabarcıklanma çevrimi ($q''=42 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=6.6 \text{ }^\circ\text{C}$).	106
Şekil 6.32 : Oyukta kabarcıklanma çevrimi ($q''=57 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=7.6 \text{ }^\circ\text{C}$).	107
Şekil 6.33 : Düşük ısı akılarında ayırık kabarcıklanma (2 mm aralık).	107
Şekil 6.34 : Kabarcıkların sürekli olarak düşey yönde birleşmesi, ($q''=60 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=7.5 \text{ }^\circ\text{C}$).	108
Şekil 6.35 : Kaynama yüzeyine yakın bölgede kabarcıkların yatay, düşey ve diagonal ekseninde birleşmesi olayları.	108

Şekil 6.36 : Oyukta kabarcıklaşma çevrimi ($q''=84 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=8.7 \text{ }^\circ\text{C}$).	109
Şekil 6.37 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklaşma çevrimi ($q''=122 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=9.8 \text{ }^\circ\text{C}$).	109
Şekil 6.38 : Komşu odalarda eşzamanlı oluşan kabarcıkların birleşmesi.....	110
Şekil 6.39 : Birden fazla odaktan beslenen buhar kabarcıkları.	110
Şekil 6.40 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklaşma çevrimi ($q''=142 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.2 \text{ }^\circ\text{C}$).	111
Şekil 6.41 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklaşma çevrimi ($q''=165 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.5 \text{ }^\circ\text{C}$).	111
Şekil 6.42 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklaşma çevrimi ($q''=177 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.7 \text{ }^\circ\text{C}$).	112
Şekil 6.43 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklaşma çevrimi ($q''=202 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.8 \text{ }^\circ\text{C}$).	112
Şekil 6.44 : Tek oyuk ile yapılan deneylerde kullanılan yüzeyde kaynama odakları.	113
Şekil 6.45 : Oyukların arasındaki mesafenin 2 mm olduğu durumda oyuk yerleşimi ve kaynama odakları.....	113
Şekil 6.46 : Isı akısına bağlı olarak kabarcıklaşma odaklarının davranışları.	114
Şekil 6.47 : Kızma farkına bağlı olarak etkinleşen odakların sayısı.....	115
Şekil 6.48 : Önerilen matematik modelin deneysel veriler ile karşılaştırılması. a) Düz yüzey b) Tek oyuk c) 2 mm aralıklı oyuklar d) 0.5 mm aralıklı oyuklar	115
Şekil 6.49 : Her bir yüzey için deneylerde ölçülen ve matematik model ile elde edilen ısı akılarının karşılaştırılması.	116
Şekil A.1 : Düşük ısı akısında ($q''=41 \text{ kW/m}^2$) ölçme silindirindeki sıcaklık dağılımı.	132
Şekil A.2 : Yüksek ısı akısında ($q''=183 \text{ kW/m}^2$) ölçme silindirindeki sıcaklık dağılımı.	132



HAVUZ KAYNAMASINDA BİR MİKRO OYUKTAKİ KABARCIKLANMANIN İNCELENMESİ

ÖZET

Dünyadaki enerji kaynaklarının azalması, mevcut kaynakların daha verimli kullanılması üzerine yapılan çalışmaların önemini artırmaktadır. Isı geçiş miktarının iyileştirilmesi üzerine yürütülen çalışmalar da bu kapsamda yer almaktadır.

Yüzeyden ısı çekilmesi/soğutulması için en etkin ısı geçiş yöntemlerinden biri olan kaynama olayı, güç üretim sistemlerinden günlük yaşama kadar geniş bir uygulama alanına sahiptir. Bu sebeple, bu alanda yapılacak herhangi bir iyileşme, enerjinin verimli kullanımı ve ekonomi açısından olumlu etkilerde bulunacaktır. Kaynama ısı geçiş iyileştirme yöntemleri aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki bölümde incelenmektedir. Aktif yöntemlerde genellikle yüzeye ve akışkana dışarıdan müdahale edilirken, pasif yöntemlerde yüzey yapıları üzerinde çalışılmaktadır. Bununla birlikte kabarcıkların rastgele hareketleri ve birbirleri ile olan etkileşimleri ısı geçiş performansını etkilemektedir.

Kabarcıklanma olayının gerçekleştiği oyukların kaynama olayındaki ısı geçişine etkisinin anlaşılabilmesi, kaynama yüzeyi ve sistem ölçeğinde doğru çözüme ulaşılması açısından önemli bir adımı oluşturmaktadır. Bu çalışmada öncelikle gerçek yüzey yapısının etkilerinin en aza indirilerek kaynama olayına etki eden bilinmeyen parametrelerin sadeleştirilmesi amacıyla düz bakır yüzey üzerinde deneyler yapılmış ve yüzeyin havuz kaynama eğrisi elde edilmiştir. Daha sonra oyukların ısı geçişine etkisini araştırmak amacıyla üzerinde tek bir oyukun bulunduğu ve 0.5 mm ve 2 mm aralıklarla yerleştirilmiş yapay oyukların bulunduğu üç ayrı yüzey daha oluşturulmuştur. Deneyler, yeni yüzeyler için aynı ısı akısı aralığında tekrarlanarak yapay oyukların ısı geçişine etkisi incelenmiştir. Kurulan deney tesisatında, aynı zamanda kabarcıklanma çevrimi ve kabarcık davranışları gözlemlenmiş, kabarcığın yüzeyden ayrılma çapı ve frekansı ölçülmüştür.

Havuz kaynamasında gerçekleşen ısı miktarının belirlenmesi amacıyla yarı-ampirik bir matematik model geliştirilerek, sonuçlar deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Isı geçiş mekanizmaları, etkin oldukları alanlar ile birlikte değerlendirilip modele dahil edilirken, ısı geçiş yüzeyi özellikleri deney verilerinden alınmıştır.

Sayısal çalışma kapsamında, düz yüzeyde ve konik biçimli bir kaynama odağında gerçekleşen kabarcıklanma olayı iki boyutlu modellenmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen kabarcık büyüme eğrisi, çapı ve şekli deneysel veriler ile ilişkilendirilerek sayısal modelin geçerliliği değerlendirilmiştir.



STUDY OF BUBBLE NUCLEATION IN A MICROCAVITY IN POOL BOILING

SUMMARY

While energy sources became more scarce year by year, more efficient use of existing resources is prioritized throughout the world. Studies on improving heat transfer are considered equally important in this scope.

Boiling is one of the most effective heat transfer methods for heat extraction/cooling at the surface and has a wide range of applications from power generation systems to daily life. For this reason, any improvement in this area will have positive effects in terms of efficient use of energy and thermo-economy. Systems involving the boiling phenomenon are primarily designed and operated based on the nucleate boiling regime, which makes it possible to obtain high heat fluxes with low surface temperatures.

Nucleate pool boiling regime starts from the onset of nucleate boiling to fully developed nucleate boiling. Boiling heat transfer enhancement methodologies can be classified into active and passive groups. While external power is applied to the surface and fluid in active methods; passive methods include surface structure and modifications.

In boiling systems, a large amount of heat is transferred from the surface within small temperature differences between the surface and saturation temperature of the fluid. The energy transfer depends on the bubble characteristics, i.e., nucleation, growth period, departure diameter, and frequency. To obtain the most efficient heat transfer, it is important to fill the space with optimum amount of saturated liquid after the bubbles leave the surface. The continuous growth of bubbles by merging on the surface makes the amount of liquid flow to the surface insufficient. This causes dry out of the surface, and induces critical heat flux. In contrast, early release of the bubbles reduces the heat transfer by cooling effect of continuous liquid feeding to the surface.

Understanding the effect of the cavities on boiling heat transfer constitutes an essential step in reaching the exact solution at the boiling surface and system scale. The objective of the thesis is to study pool boiling phenomena experimentally and numerically from both macroscopic and microscopic viewpoints. A semi-empirical mathematical model was developed using experimental data.

This study investigates the effects of evenly spaced artificial cavities on a plane surface on the nucleate boiling heat transfer. An experimental facility was designed and constructed to visualize nucleate pool boiling phenomena. The experimental work can be classified into two groups: nucleation site density/distribution and bubble dynamics. Experiments have been conducted on the top surface of the copper rod with distilled water at atmospheric pressure. The bottom end of the copper rod is screwed into a copper heating block which encompasses the electric heater powered with a 15 V x

200 A DC supply. In the pool, saturation conditions were maintained by auxiliary heaters.

Axial temperature distribution along the rod, determined via thermocouple readings, is extrapolated to specify the boiling surface temperature. The product of the gradient of the temperature profile and the thermal conductivity of copper gives the heat flux at the boiling surface. Before starting the experiments, the working fluid was boiled for at least two hours to degas and reach the steady-state conditions. Afterward, the main heater was adjusted to yield a specific heat flux at the boiling surface.

Initial experiments were carried out on a flat copper surface in order to minimize the effects of the surface structure and simplify the unknown parameters affecting the boiling phenomenon. From the test results, the pool boiling curve of the surface was obtained. Then, three more surfaces with cavities, which are $180\pm 30\text{ }\mu\text{m}$ in diameter and $160\pm 10\text{ }\mu\text{m}$ in depth, were produced on the copper surface by mechanical methods; a single cavity, and artificial cavities placed at 0.5 mm and 2 mm intervals respectively. The effects of artificial cavities on heat transfer were investigated by repeating the experiments in the same heat flux range for new surfaces. The surfaces' boiling performance was evaluated by measured surface temperatures and wall heat flux.

During the experiments, bubbling cycle and bubble behavior were also observed. To understand the bubbling mechanism, detailed measurements of the bubbles have been made using a high-speed camera (Photron 512-PCI) with up to eight thousand frames per second and a long-distance microscope (K2 Distamax). Qualitative observations like bubble shapes and coalescence processes were made, and quantitative information like diameter and frequency was obtained from the recorded images and videos. At least thirty bubble cycles were examined to determine the bubble growth period, departure diameter, and frequency. Average values were used to compare the surface's boiling performance and the mathematical model.

In order to measure bubble diameter, an image processing code was developed in MATLAB. The bubble images were imported into MATLAB and read as a two-dimensional array of color values. After removing noise, Canny method was applied with specified threshold values to detect edges of the bubbles. The results were given in pixels and then scaled to millimeters. The results were compared with the literature.

Measured diameter and frequency values were used to calculate latent heat transport by vapor bubbles and compared with the boiling curves obtained by temperature measurements.

A semi-empirical mathematical model, including heat transfer mechanisms and bubble behaviors, was developed to determine the amount of heat generated in the pool boiling, and the results were compared with the experimental data. Boiling surface area is examined in two parts: bubble effective and natural convection areas. Relevant heat transfer mechanisms were utilized for related areas while carried out the calculations. Empirical constants, representing the characteristic of the heat transfer surfaces were derived from the experimental data. Suggested model can predict the experimental trend within an error of $\pm 30\%$.

A numerical model has been developed to simulate bubble growth and departure. Boiling is considered as two-phase flow for liquid and vapor phases of water. 2D axisymmetric simulations were conducted for water at equilibrium with its vapor phase. The study aims to examine the similarity of the bubble shape and growth rate with the experimental results. the bubbling phenomenon on a flat surface and in a

conical-shaped cavity is modeled. The interface separating the liquid and vapor phases from each other is considered as a thin surface. In the analysis, CLSVOF method was used. The numerical model was validated by experimental results, i.e., bubble growth curve, diameter and shape.





1. GİRİŞ

Kaynama, en etkin ısı geçişi türlerinden biri olarak, güç üretimi, elektronik soğutma, kimyasal süreçler gibi geniş uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılır. Son 70 yıl içinde, kaynama işlemlerini anlamayı amaçlayan çok sayıda çalışma yapılmış ve epeyce mesafe kat edilmiştir. Bu gelişmelere karşın, farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel çalışma sonuçlarının uyumsuz olması sebebiyle temel mekanizmalar ve ilkelerden hareketle kaynama olaylarını ifade eden tam ve doğru matematik modeller henüz oluşturulamamıştır.

Uygulamada kaynama olayını içeren sistemler, çoğunlukla, düşük yüzey sıcaklıkları ile yüksek ısı akılarının elde edilebilmesini mümkün kılan çekirdekli kaynama düzeni esas alınarak tasarlanır ve buna göre işletilirler. Bu nedenle, gerek havuz gerekse de zorlanmış akış halindeki çekirdekli kaynamada etkin olan mekanizmaların, ilgili parametrelerin ve aralarındaki ilişkilerin anlaşılması ve bu bilgilerden yola çıkarak matematik modellerin oluşturulmasını amaçlayan çok sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak, çekirdeklenme olayında etkin olan mekanizmaların nonlinear etkileşim içinde olması, bazı mekanizmaların ancak mikro/nano ölçekteki gözlemlerle anlaşılabilir ve yine bu ölçekte modellenebilir olması nedeniyle, tüm yüzey malzemesi ve geometrisi, akışkan seçenekleri ve geniş basınç aralıkları için geçerli olan tam teorik, ya da deneysel/yarı deneysel matematik modeller geliştirilebilmiş değildir. Problemin deneysel incelenmesindeki zorluklar, tek fazlı ısı geçişi için yapılan çalışmalara göreli olarak, kaynama için yapılan çalışmaların sınırlı sayıda ve kapsamda kalmasına; yapılan her çalışma sonucunun, etkin parametrelerden bir veya ikisinin dar bir aralıktaki değişimleri için geçerli olan deneysel bilgiler niteliğinde olmasına ve bu bilgilerin genelleştirilememesine yol açmıştır. Buna bağlı olarak, çekirdekli kaynamanın ön görülmesi için, geliştirilmiş modeller de ortaya koyulamamıştır.

Kaynama yüzeyindeki buhar tutabilen kusurların öncelikli olarak kaynama odağı haline geldiği bilinmektedir. Özellikle mikro ve nano imalat teknolojilerindeki gelişmelerle birlikte kabarcıklı kaynama olayındaki ısı geçişinin iyileştirilmesi

amacıyla kolaylıkla kaynama odağı olabilecek oyukların tasarımı ve yüzeydeki yerleşimi konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

Kaynama olayında oluşan buhar kabarcıklarının hareketinin, kaynama yüzeyindeki ısı dağılımının ve sıvı-buhar faz arasındaki etkileşimin görselleştirilmesi çalışmaları, kabarcıklı kaynama ile gerçekleşen ısı geçişini anlamamıza yardımcı olacaktır. Kabarcıklandırma olayı ve kabarcık dinamiği temellerinin anlaşılmasını amaçlayan çalışmalar genellikle üzerinde tek bir yapay kaynama odağı bulunan yüzeyler ile yapılmıştır. Kaynama olaylarını içeren uygulamalara daha gerçekçi bir yaklaşım için kabarcıklar arasındaki etkileşim olayları da göz önüne alınmalıdır. Bu sebeple ısı geçiş katsayısı ile kaynama odakları arasındaki mesafenin ilişkisi de incelenmelidir.

Bu tez çalışmasının amacı, havuz kaynamasının çekirdekli kaynama bölgesinde yapay çekirdeklenme odakları ile ısı taşınım katsayısı arasındaki ilişkinin belirlenmesidir. Bu amaçla, kaynama olayının inceleneceği yüzeylerin imalatı ve karakterizasyonu yapılmış, yüzeyler üzerinde kaynama sırasında oluşan kabarcıkların davranışı hızlı kamera ile gözlemlenmiştir. Aynı zamanda çekirdeklenme odakları arasındaki mesafenin ısı geçişine etkisi araştırılmıştır. Elde edilen nicel veriler ile kaynama eğrileri elde edilmiş ve ısı geçiş bağlantıları türetilmiştir.

Kabarcıklandırma olayı, kabarcık geometrisi ve çap karakteristiğinin gözlemlenmesi amacıyla iki boyutlu olarak modellenmiştir. Kullanılan model, yapılan deneysel çalışmalar ve kaynaklarda bulunan veriler ile doğrulanmıştır.

2. HAVUZ KAYNAMASI

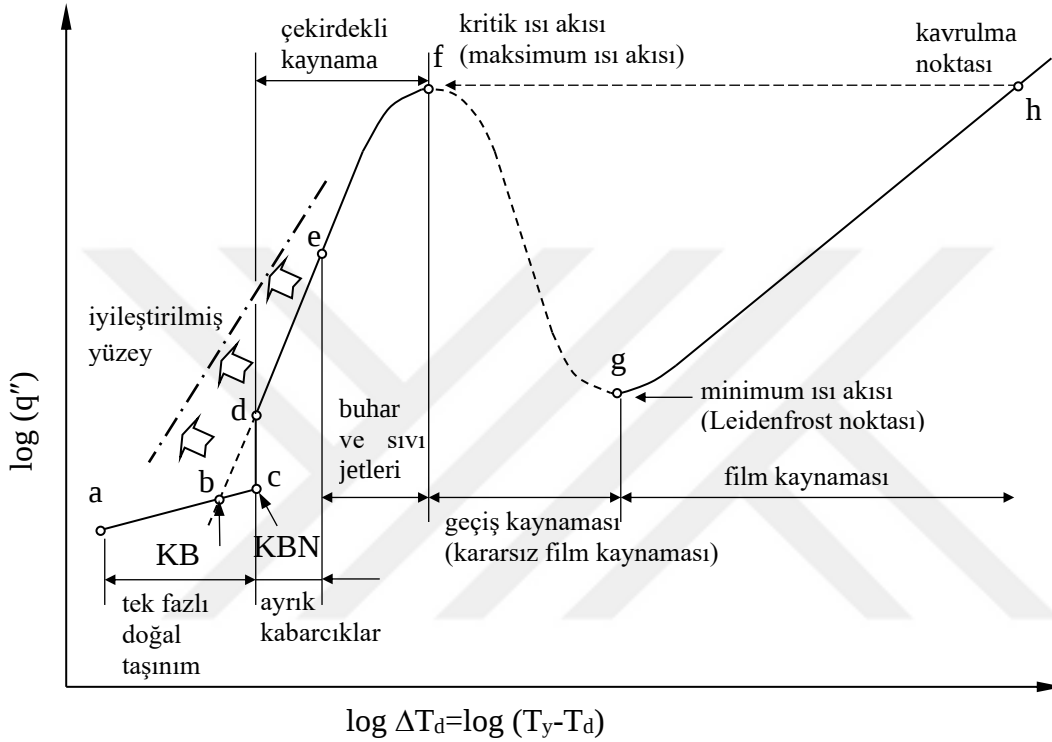
Bu bölümde kaynama konusunda genel bilgiler ve 1950'lerden bu yana yapılan kaynama çalışmalarının bir özeti sunulmuştur.

Hem ısı hem de kütle geçişini içeren kabarcıklı kaynama olayları havuz kaynaması ve akış kaynaması olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. Havuz kaynaması düzeninde sıvı, ısıtma yüzeyi üzerinde durgun haldeyken, akış kaynamasında, ısıtma yüzeyi üzerinden akar. Her iki kaynama rejiminde de ısı transferi, ısıtma yüzeyinden sıvıya doğru doğal taşınım olayı ile başlar ve akışkan sıcaklığı, sistemin çalışma basıncındaki doyma sıcaklığına gelene kadar devam eder. Sıvının, doyma sıcaklığına ulaşmasıyla birlikte, kaynama yüzeyinde, yüzey malzemesinin kristal yapısındaki bozukluklara bağlı veya yüzey işlemesi esnasında oluşan ve içerisinde gaz veya buhar hapsedebilen oyuklarda kabarcıklanma başlar. Oluşan kabarcıklardan her biri yüzeyde bekleme, büyüme ve yüzeyden kopma aşamaları olan bir çevrimle oluşur ve yüzeyden kopma anında yüksek sıcaklıktaki buharın yüzeyden ayrılmasıyla birlikte yerini daha soğuk sıvıya bırakarak yüzey sıcaklığını azaltır.

Nukiyama'nın (1934) kaynama rejimleri üzerine yaptığı öncü çalışma sonrasında, birçok araştırmacı kaynama olaylarında ısı geçişinin ve/veya ısı taşınım katsayısının artırılması konusunda çalışmalar yapmıştır. Nukiyama, atmosferik basınçtaki doymuş su içinde yatay şekilde konumlanmış nikel-krom ve platin teller ile tel sıcaklığının (T_y) dolayısıyla kızma farkı ΔT_d 'nin bağımlı değişken ve tele beslenen gücün (ısı akısı, q'') bağımsız olduğu kaynama deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda, logaritmik eksen takımında, ısı akısının yüzey kızgınlığına bağlı olarak değişimini veren ve kendi ismiyle adlandırılan kaynama eğrisini elde etmiştir.

Katı-sıvı ara yüzeyinde meydana gelen buharlaşma olarak da tanımlanan kaynama olayının etkin olması için yüzey sıcaklığının, sıvının doyma sıcaklığından daha yüksek değerlere sahip olması gerekmektedir. Kaynama, sıvı akışkan kitlesi içerisinde ayrık buhar kabarcıkları, yastıkları veya filmi oluşması suretiyle gerçekleşen buharlaşma olaylarında, sıvı kitlesinin belirli bölgelerinde, sıvı sıcaklığının geçici olarak doyma sıcaklığının (T_d) üzerine çıkması ile gerçekleşebilir. Bu da uygulamada çoğunlukla,

sıcak bir yüzeye ($T_y > T_d$) temas eden mikro-kalınlıklı sıvı tabakasında söz konusu olur. Dolayısıyla, yüzey kızgınlığı olarak adlandırılan bu iki sıcaklık arasındaki fark ($\Delta T = T_y - T_d$), kaynama olayının başlıca uyarıcısıdır ve üzerinde havuz kaynaması gerçekleşen bir yüzey için başlıca performans parametresi olan yüzey ısı akısı (q''), bu sıcaklık farkının fonksiyonu olarak, karakteristik kaynama eğrisi ile ifade edilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Kaynama eğrisi ve havuz kaynaması düzenleri [1].

ΔT_d değeri, Şekil 2.1’de gösterilen c noktasından daha küçük değerlerde iken, yüzeyde bir kabarcıklanma görülmez, ısı geçişi doğal taşınım ile olur. c noktasına karşı gelen ΔT_d değerinde, yüzeyde kabarcıkların oluşup ayrıldığı görülür ve çekirdekli kaynama başlar. Bu noktada ısı akısı aniden yükselir (d noktası) ve ΔT_d arttıkça hızla yükselmeye devam eder. Şekil 2.1’de f ile gösterilen kritik noktada ısı akısı kontrol ediliyorsa, yüzey sıcaklığının birden çok yükseldiği ve malzemeye zarar verebilecek değerlere (h noktası) çıktığı görülür. Kritik ısı akısı (CHF) olarak adlandırılan bu değer, kaynama olayları için önemli bir diğer karakteristik performans parametresidir. Isıtma sıcaklık kontrolü ile gerçekleştiriliyorsa, f noktasından sonra, yüzeyin gittikçe artan orandaki kısmının buhar ile temas halinde kaldığı ve ısı akısının azaldığı (geçiş kaynaması); g noktasına karşı gelen ΔT_d değerinde, yüzeyin tamamen buhar filmi ile kaplandığı ve film kaynamasına geçildiği görülür. Yüzeyden sıvıya ısı geçişinin buhar

filmi üzerinden düşük taşınım katsayısı ile gerçekleştiği bu düzende ısı akısı da minimum değerini alır. Daha yüksek sıcaklıklarda ise, buhar filmi varlığını korurken ışınlama ile ısı geçişindeki artış nedeniyle ısı akısı tekrar yükselmeye başlar. Kaynamada ısı geçişinin iyileştirilmesi söz konusu olduğunda akla gelen temel konular, çekirdekli kaynama bölgesinde ısı akısının (dolayısıyla ısı taşınım katsayısının) artırılması ve kritik ısı akısının yükseltilmesiyle, çekirdekli kaynamadaki düşük yüzey kızgınlıklarında yüksek ısı geçişi miktarlarına çıkılmasıdır.

Kabarcıklı kaynama konusunda yapılan çalışmaların artması kaynama olayının birçok mekanizmayı barındırdığının fark edilmesine sebep olmuştur ve bu karmaşık sürecin daha iyi anlaşılması amacıyla her bir mekanizma ayrı ayrı incelenmeye başlanmıştır. Bu mekanizmalar mikrotabaka, kabarcıkların büyümesi ve ayrılması olayları, kabarcık şekilleri ve havuz içindeki sıcaklık dağılımı olarak gruplandırılabilir.

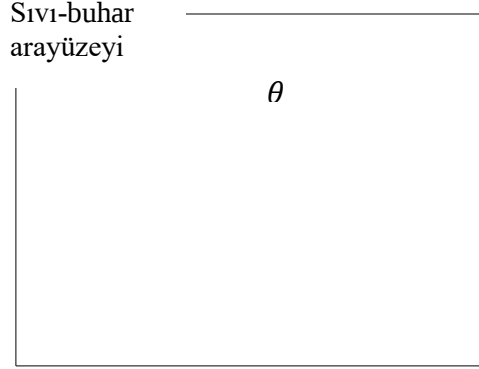
2.1 Çekirdeklenme Kısıtı ve Kabarcıklenme Çevrimi

Bir sıvıdan buhar oluşumu, (a) bir sıvı-gaz ara yüzeyindeki sıvı sıcaklığının, gaz (ya da buhar) tarafındaki buhar basıncına karşı gelen doyma sıcaklığından yüksek olması durumunda ara yüzeyden buharlaşma, (b) bir ana sıvı kitlesi içindeki sıcaklık ve buna bağlı yoğunluk dalgalanmaları nedeniyle, ana kitleden daha yüksek enerji düzeyine çıkan molekül topaklarının “buhar çekirdekleri” oluşturmasıyla homojen çekirdeklenme veya (c) bir sıcak katı yüzeydeki mikro ve mikro-altı oyuk ve çatlaklarda önceden mevcut olan gaz veya buhar paketçiklerinin bulunması durumunda, bu paketçiklerin etrafında heterojen çekirdeklenme yoluyla gerçekleşebilir. Güç üretim sistemleri, elektronik soğutma uygulamaları, endüstriyel süreçler ve günlük yaşamın her alanında karşılaşılabilecek olan çoğu kaynama uygulamalarında ilgi odağı olan buhar oluşum işlemi, bunlardan üçüncüsü, yani sıcak bir yüzeydeki odaklarda kabarcık çekirdeklenmesi, büyümesi ve yüzeyden ayrılması ile gerçekleşen çekirdekli kaynama olayıdır.

Kaynama olaylarında, kabarcık içindeki buhar ve kabarcığı çevreleyen sıvı, farklı sıcaklık ve basınç değerlerine sahiptir. Bu sıcaklık farkı sayesinde sıvı ve buhar fazları arasında ısı geçişi olurken, basınç farkı, sıvı ve buhar ara yüzeyindeki yüzey gerilim kuvvetleri tarafından dengelenir.

Bankoff'un çözümlemesine göre, gazın bir oyuk içinde hapsolması için, Şekil 2.2'de görülen oyukun koni açısı ψ 'nin, sıvı katı temas açısı θ 'dan küçük olması gerekir.

$$\psi_m < \theta \quad (2.1)$$



Şekil 2.2 : Oyuk parametreleri.

Diğer taraftan, bir oyukun etkin odak haline gelebilmesi için de, ağız yarıçapı R 'nin,

$$R_c \geq \frac{2\sigma T}{\rho_b h_{sb} \Delta T_y} \quad (2.2)$$

olarak verilen kritik yarıçaptan büyük olması gereklidir [2].

Belirli bir yarıçapa sahip oyukun etkin odağa dönüşme şartı olarak

$$\Delta T_y(R_c) \geq \frac{2\sigma T}{\rho_b h_{sb} R_k} \quad (2.3)$$

yazılabilir.

Griffith & Wallis tarafından yapılan çalışmada, bu oyukların yarıçaplarının kabarcıkların çekirdeklenmesi için gerekli olan kızgınlık derecesini belirlediği ve daha büyük oyukların daha düşük yüzey sıcaklıklarında etkin kaynama odaklarına dönüştüğü açığa kavuşturulmuştur [3].

Sıvı, oyuğa ulaştıktan sonra, odak etrafında ısı sınır tabakanın ve gerekli yüzey kızgınlığının oluşması için bir bekleme süresinin geçmesi gerekir. Oyuğun içinde hapsolup kalmış olan embriyonun (hapsolmuş buhar keseciği) tepesinde, denklem (2.3) ile verilen şart oluşur oluşmaz, kabarcık büyümeye başlar. Büyümekte olan kabarcıkla yüzey arasındaki temas alanında, bir sıvı mikrotabakası (ya da mikrofildi) kalır. Bazı durumlarda da, çok şiddetli buharlaşma nedeniyle, temas alanının ortasında kuru bir bölge oluşur.

Kabarcıklanma çevriminin son aşamasını oluşturan yüzeyden ayrılma süresi için birçok çalışmada, kabarcık çapına bağlı deneysel bağıntılar tanımlamakla yetinilmiştir [4]. Zeng ve diğ. (1993), kabarcığa etki eden kuvvetleri belirli kabuller altında modelleyerek, kabarcık ayrılmasının ön görülmesinde kısmen de olsa başarı sağlamışlardır. Kabarcığın yüzeyle temasının bittiği anda, bir çevrim tamamlanmış olur, ancak kabarcığın yüzeyden uzaklaşma hızı ve izlediği yol, ana sıvı kitlesinin yüzeye nasıl yönleneceğini, dolayısıyla da toplam ısı geçişinin önemli bir kısmını oluşturan yüzeyden ana sıvı kitlesine tahrik edilmiş taşınımın koşullarını belirler [5]. Van Stralen ve diğ.(1975), yüzeyden ayrılan bir kabarcığın arkasında bıraktığı izin ve pompalama etkisinin, yüzey üzerindeki sınır tabakada 5 m/s değerine varan hızlar oluşturduğunu gözlemişlerdir. Bu nedenle, kabarcığın yüzeyden ayrıldıktan sonraki hareketinin de, kapsamlı bir çekirdekli kaynama modellemesinde yer alması gerekli olacaktır [6].

Kabarcığın yüzeyden ayrılması ile boşalan hacme, T_d sıcaklığındaki ana sıvı kitlesinden sıvı hücum eder. Yüzeyden ayrılan kabarcıkların yerine çok miktarda sıvının hücum etmesi odak etrafındaki bölgeyi soğutarak ısı akısını olumsuz yönde etkilerken, bu kabarcıkların yüzeyde uzun süre beklemesi de yüzey sıcaklığının ani artışına neden olur ve böylelikle ısı taşınım katsayısı düşer.

2.2 Çekirdekli Havuz Kaynamasında Yüzeyde Kabarcık Oluşumunu Etkileyen Mekanizmalar ve Parametreler

Kaynamada ısı transferinin iyileştirilmesi amacıyla aktif ve pasif yöntemler uygulanmaktadır. Aktif yöntemlerde ısı transferi, basınç, ses dalgası, elektrik veya manyetik alanlar gibi dışarıdan bir mekanizma ile artırılırken, pasif yöntemlerde kaynama yüzeyinin pürüzlendirilmesi, yüzey üzerinde oyuk ve kanalların oluşturulması, yüzeyin çeşitli malzemeler ile kaplanması gibi yöntemler uygulanmaktadır. İyileştirme konusunda yapılan çalışmalar nanoakışkanların kullanılması ve yüzeyde oluşturulan makro, mikro ve nano yapılar üzerine yoğunlaşmıştır.

2.2.1 Yüzey yapısı

Kaynama işleminde yüzey karakteristiği; yüzey malzemesinin termofiziksel özelliklerine, katı yüzey-sıvı-buhar arasındaki etkileşime ve yüzey mikro-

geometrisine bağlıdır. Kaynama olayının karmaşık fiziksel mekanizması sebebiyle bu bileşenler araştırmacılar tarafından genellikle ayrı ayrı incelenmiştir [7].

Kaynamayla ısı geçişini iyileştirmek için yapılan ilk araştırmalar, yüzeyin yapısı üzerinde yoğunlaşmıştır ve yüzeydeki oyuk geometrisinin ısı geçişine etkisi araştırılmaya başlanmıştır. Araştırmalar sonucunda iç yüzeyi ıslanmayan oyuklarda çekirdeklenmenin başlaması için gerekli kızgınlık derecesinin düştüğü gözlemlenmiştir. Kaynamanın olduğu oyukun ağız çapı, çekirdeklenme için gerekli olan kızgınlık derecesini; oyukun şekli ise odağın kararlılığını belirlemektedir [8].

Isı transferi katsayısını ve/veya kritik ısı akısını artırmak için yüzeyde yapılan iyileştirmeler iki ana bölümde sınıflandırılır. Bunlar sırasıyla; yüzeyde çeşitli yöntemlerle farklı geometri ve boyutlarda yapıların oluşturulması ve yüzeyin gözenekli bir tabaka ile kaplanmasıdır.

2.2.1.1 Yüzeyde oluşturulan yapılar

Günümüze kadar yapılan deneysel çalışmalarda, çeşitli yüzey ve akışkan çifti için uygun yüzey yapıları tasarlanarak oluşturulan yapay oyukların kaynamada ısı transfer katsayısını ve kritik ısı akısını yükselttiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu konuda yapılan ilk çalışma Griffith ve Wallis 'e aittir [3]. Parafin kaplı paslanmaz çelik yüzey üzerinde oluşturulan yapay oyuklarla yapılan kaynama deneyleri sonuçları, düz yüzey üzerinde yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve belirli bir ısı akısı değerini elde etmek için yapay oyukların bulunduğu yüzeyde daha küçük kızgınlık farkının yeterli olduğu bildirilmiştir.

Das ve diğ., doymuş havuz kaynaması şartlarında, düz yüzeyden ve farklı kabarcıklenme odaklarına sahip yüzeylerden ısı geçişini incelemişlerdir [9]. Yüzeyde mikro ölçekli oyuklarda düzenli ve ayrık kabarcıklenme alanları oluşturarak yapılan çalışmada damıtılmış su kullanılmıştır. İnceleme sonucunda, yapay kabarcıklenme alanlarındaki ısı geçişinde düz yüzeylere göre önemli ölçüde artış olduğu görülmüştür.

Kabarcıklenme olayının başlaması ve yüzeyden olan ısı transferinin artması için yapay yöntemlerle oluşturulan oyukların sayısının yanında geometrisi de önemli bir parametredir. Farklı oyuk geometrileri ile yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur.

Yüzeydeki oyuklara ilave olarak, yüzey mikrojeometrisi içinde yer alan ve kabarcıklı kaynamaya olan etkisi henüz tam olarak anlaşılamamış olan yüzey pürüzlülüğü;

çekirdeklenme odaklarında kabarcık oluşumunu doğrudan etkilediği için, kaynamadaki önemli parametrelerin başında gelmektedir. Bu parametrenin ısı geçişi üzerindeki etkisinin anlaşılmasını sağlamak amacıyla McHale ve Garimella kullandıkları deney tesisatını, ısıtıcı yüzeyi ve pürüzlülüğünü daha iyi karakterize edecek biçimde tasarlamış ve havuz kaynamasında kabarcıkların davranışını görsel olarak incelemişlerdir [7, 10]. Elde edilen kaynama eğrilerinden yüzey pürüzlülüğünün yanı sıra diğer yapısal özelliklerin de önemli olduğu gözlenmiştir. Yüzeydeki pürüzlülüğü ifade etmek için tanımlanan boşluk oranı, ısı akısıyla ilişkilendirilerek kabarcık oluşum ve gelişim periyotlarının kabarcık ayrılma çapı ve ısı akısı üzerinde kuvvetli etkisi olduğu belirlenmiştir. Jones ve Garimella tarafından suyun havuz kaynaması için yapılan deneysel çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün etkisinin gözlemlenmesi için, çeşitli ısı geçişi bağıntıları karşılaştırılmıştır [11]. Kim ve diğ., zımparayla, aşındırmayla ve mikro gözenekli kaplamayla işleme tabi tutulmuş yüzeyler üzerindeki havuz kaynamasında ısı geçişi karakteristiklerini PF5660 akışkanı kullanarak incelemişlerdir [12]. Isı geçişi performansının eğimli yüzeylerde yatay yüzeyden daha iyi olduğunu ve test edilen yüzeyler arasında en yüksek ısı geçişinin mikro gözenekli kaplamaya sahip yüzeyde olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve diğ., yüzey pürüzlülüğünün kabarcıklaşma üzerindeki etkisinin, sadece pürüzlülüğün geometrik boyutlarıyla değil, aynı zamanda yaşlanma, oksidasyon ve ıslanabilirlikle de ilgili olduğunu ifade etmişlerdir [13].

Ramiasa ve diğ., yayınlanan çalışmalarında, yüzey topografyasının dinamik ıslanabilirlik üzerindeki etkilerini incelemiş, kaynaklardan topladıkları deneysel verileri kullanarak, yüzeyin ve akışkanın makroskobik ve moleküler yapılarının, yüzeyin ıslanabilirliği ile ilişkisini kuracak matematik modeller oluşturmaya çalışmışlardır [14]. Geldikleri noktada, çalışmalarında esas aldıkları teorik ön görülerin geçerliğine dair kanıtların henüz mevcut olmadığını; basit bir akışkanın pürüzlü bir yüzey üzerinde akışındaki mekanizmalar için bile, araştırmacılar arasında bir uzlaşma sağlanamadığını; yüzey ıslanabilirliğine topografyanın etkisini açıklayabilmek için, daha iyi karakterize edilmiş ve yüksek doğruluğa sahip deneysel sistemlerle elde edilen verilere ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir.

2.2.1.2 Yüzey kaplamaları

Hızla gelişmekte olan mikro ve nano imalat yöntemleri, mikro ve nano ölçekte yüzey yapıları ve kaplamalarının oluşturulabilmesine imkan vermektedir.

Takata ve diğ., ıslanabilirliğin etkisini inceledikleri çalışmada, UV ışıınım uygulaması ile TiO_2 kaplanmış yüzeylerde temas açısının UV uygulama süresi arttıkça azaldığını ve yüzeyin süperhidrofilik duruma geçtiğini, ısı taşınım katsayısı artarken kritik ısı akısının da yükseldiğini belirtmişlerdir [15]. Kang ve diğ., ise birbiriyle son derecede etkileşim içinde olan yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyin ıslanabilirliği parametrelerinin etkisini ayırt edebilmek için, mikro ölçekte pürüzlülüğü olmayan yüzey üzerinde, hidrofobik ve hidrofilik bölgeler oluşturup, sadece yüzey ıslanabilirliğinin etkisini incelemişlerdir [16]. Bu amaçla Si wafer üzerinde ısıl işlemle hidrofilik SiO_2 tabakası oluşturmuş, üzerine kapladıkları Teflon tabakadan fotolitografi ile hidrofobik bölgeler ayırt etmişlerdir. Hızlı kamera ile yüzeyin ıslanabilirliği ve kabarcık davranışı üzerinde gözlemler yapmışlar, temas açısı ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak, buhar hapseden mikro oyukları olmayan, nano ölçekte pürüzlülüğü olan hidrofilik ve hidrofobik yüzeylerde de heterojen kaynamanın oluştuğunu; hidrofobik yüzeylerde ısı geçiş katsayısının yüksek olduğunu, ancak kritik ısı akısının çok düşük kaldığını belirtmişlerdir. Hidrofilik yüzey üzerinde belirli dizilişe sahip olan hidrofobik noktalar bulunması halinde, kabarcık bekleme süresinin hemen hemen ortadan kalktığını, kabarcıklanmanın daha düşük sıcaklıkta başladığını, hem ısı geçiş katsayısının hem de kritik ısı akısının yüksek tutulabildiğini; ancak bu iyileşmelerin, hidrofobik noktaların boyutu, yoğunluğu, kapladıkları alanın yüzeyin toplam alanına oranı, ısı akısının düşük veya yüksek olması ile karmaşık şekilde ilişkili olduğunu öne sürmüşlerdir.

Lee ve diğ., doymuş havuz kaynaması koşulundaki ısıtılmış alüminyum alaşımlı düz yüzeylerde ve alüminyum nano gözenekli yüzeyler üzerinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlardan dolayı yüzey morfolojisindeki değişimin kabarcıklı kaynamadaki ısı transferi üzerine etkisini belirlemeye çalışmışlardır [17]. İncelenen yüzey ve akışkan (su) arasındaki kimyasal reaksiyon nedeniyle yüzey morfolojisinde ortaya çıkan değişimin, kabarcıklı kaynamadaki ısı geçişi performansının belirlenmesinde önemli bir parametre olduğunu belirlemişlerdir. Nano gözenekli yüzeylerde düz yüzeye göre, kabarcıklı kaynamanın başlangıcında daha düşük yüzey kızgınlığı ve bunun yanı sıra daha yüksek kabarcıklı kaynama ısı taşınım katsayısı oluştuğunu tespit etmişlerdir.

2.2.2 Temas açısı

Bir katının sıvı ile ıslanabilirliğinin kantitatif ölçüsünü veren temas açısı, sıvının katı-sıvı-gazın kesiştiği üç faz sınırında oluşturduğu açıdır. Bu açı, sınır hareketine bağlı olarak statik temas açısı ve dinamik temas açısı olmak üzere iki bölümde incelenir.

Katı yüzey ve sıvı arasında oluşan statik temas açısına (θ) dayanarak, bir yüzeyin hidrofilik ($0 < \theta < 90$) veya hidrofobik ($90 < \theta$) olduğu kabul edilir. Hidrofilik ve hidrofobik kavramları sırasıyla, sıvının yüzeyde yayılmasına izin veren ve sıvıyı iten anlamlarında kullanılmaktadır.

Katı yüzey üzerindeki sıvı damlası ve buhar kabarcığı için temas açıları Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Buhar kabarcığında, katı yüzey üzerindeki buhar, sıvı ile çevrelendiğinden, arayüzeyde oluşan gerilim kuvvetleri iki durum için birbirinden farklıdır.

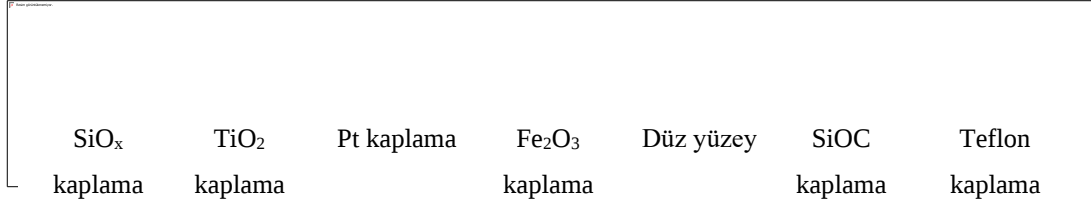


Şekil 2.3 : Hidrofilik yüzey üzerinde a) bir damlacıkta ve b) bir kabarcıkta oluşan arayüzey gerilimi dengesi.

Süperhidrofobik ve süperhidrofilik yüzeylerde yapılan deneysel çalışmalarda, süperhidrofobik yüzeylerde kabarcıklanma olayının başlaması için düşük kızgınlık farklarının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fakat bu durumda kabarcık büyüdükçe kuvvet dengesi, kabarcığın yüzeyden ayrılmasına izin vermemekte ve kabarcıklar kaynama yüzeyinde daha uzun süreler bekleyip birleşmektedir. Bunun sonucunda daha düşük kızgınlık farklarında kritik ısı akısına ulaşılır. Süper hidrofilik yüzeyler ise bu durumun tersi olarak kaynamanın başlaması için daha yüksek kızgınlık farklarına ihtiyaç duyarlar fakat yüzeyden ayrılmaları daha kolay olur ve daha yüksek kritik ısı akısı değerlerine ulaşılabilir [18–20].

Şekil 2.4'te, Phan ve diğ., tarafından yapılan çalışmada, paslanmaz çelik yüzey üzerindeki çeşitli kaplamaların yüzey ıslanabilirliğine etkisi araştırılmıştır. 2 μ L su damlacığının, bu kaplamalar üzerindeki görüntüleri sıvı-katı temas açısı değerleri ile birlikte verilmiştir [19]. Buradan, ısı geçişini ve kritik ısı akısını kuvvetle etkileyen bu

açının, farklı yüzey kaplamaları kullanılarak çok geniş bir aralıkta değiştirilebileceği görülmektedir.



SiO _x kaplama	TiO ₂ kaplama	Pt kaplama	Fe ₂ O ₃ kaplama	Düz yüzey	SiOC kaplama	Teflon kaplama
-----------------------------	-----------------------------	------------	---	-----------	-----------------	-------------------

Şekil 2.4 : Bir paslanmaz çelik yüzey üzerinde farklı nanotanecik kaplamalarının sıvı-katı temas açısına etkisi [19].

2.2.3 Akışkanın termofiziksel özellikleri

Isı geçişinin artırılması konusunda, farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda akışkanlar; saf sıvılar, soğutucu akışkanlar, dielektrik akışkanlar, hidrokarbonlar ve nanoakışkanlar gibi çeşitli sınıflara ayrılmıştır.

Isı taşınım katsayısının artırılması amacıyla ısı geçiş yüzeyinin artırılmasının yanında kaynama sıvısının içine mikro ve nano ölçekli metal parçacıkların eklendiği çalışmalar da kaynaklarda mevcuttur. Eklenen parçacıkların ısı geçiş katsayısının, kaynama sıvısından daha yüksek değere sahip olması, kaynamanın ısı transfer katsayısını da artırmaktadır. Nanoakışkan terimi, ilk kez Choi ve Eastman tarafından kullanılmış ve nanoakışkanların ısı iletim katsayısındaki artış gösterilmiştir [21]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, nanoakışkanlarda ısı iletim katsayısındaki artışın yanısıra kritik ısı akısını artırma özellikleri ve ısı taşınım katsayıları üzerine araştırmalar yapılmıştır. Kakaç ve Pramuanjaroenkij, yaptıkları derleme çalışmasında nanoakışkanların ısı iletim ve taşınım katsayılarının temel akışkanlara oranla çok daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [22].

Kabarcıklı havuz kaynaması için birçok araştırmacının alüminyum oksit tabanlı nanoakışkan ile çalışması mevcuttur [23–26]. Bu çalışmalarda, saf su ve nanoakışkanların kaynamada kritik ısı akısı değerleri karşılaştırılmış ve nanoakışkan kullanılan çalışmalarda kritik ısı akısı değerlerinin saf suya oranla ortalama %30 daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Kim ve diğ., saf su ve alumina, zirconia ve silica tanecikli nanoakışkan kullanarak yaptıkları deneylerde, nanoakışkanların yüzeyin ıslanabilirliğini arttığını ve buna bağlı olarak kritik ısı akısının yükseldiğini tespit etmişlerdir [27]. SEM kullanarak yapılan

yüzey karakterizasyonu sonucunda, bu değişimin, yüzey üzerinde nano taneciklerin birikmesi ve bir gözenekli tabaka oluşturmamasından kaynaklandığını belirlemişlerdir.

2.2.4 Isı akısı

Kaynama yüzeyinden sıvıya aktarılan ısı, yüzeyde gerçekleşen kaynama ısı geçişi mekanizmalarına ve yüzey özelliklerini içeren çok sayıda değişkene bağlıdır. Bu değişkenler arasındaki ilişkileri açıklamak amacıyla mekanizmalardan ve değişkenlerden bazıları ihmal edilerek ve deneylere dayanan ampirik katsayılar kullanılarak ısı akısını hesaplayan modeller kullanılmaktadır. Bu değişkenlerden kabarcığa ait olan çap ve frekans değerleri için farklı akışkanlar kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda farklı sonuçlar verilmiştir. Söz konusu farklılık yüzeyden ayrılan kabarcığın seçiminden kaynaklanmaktadır. Özellikle yüksek ısı akılarında yüzeyden ayrılan kabarcıklar yüzeye yakın bir noktada buhar kümesi oluşturmakta ve bu buhar belirli bir hacme ulaştıktan sonra bulunduğu yerden yükselerek yerine yeni bir buhar kümesi oluşmaktadır. Dolayısıyla buhar kümesini oluşturan her küçük kabarcık için yapılan çap ve frekans ölçümlerinde ısı akısı arttıkça çap azalır, frekans artarken, buhar kümesini gözönüne alan çalışmalarda bu değişkenler aksi yönde bir eğilim göstermektedir. Buna karşılık her iki varsayım ile yapılan çalışmalarda etkin kabarcıklanma odağı sayısının ısı akısı ile arttığı belirtilmiştir. Kabarcıklanma odaklarının uzağında bulunan ve kabarcığın etkisi altında olan bölgelerde etkili olan ısı geçiş mekanizmalarının etkinlikleri de ısı akısına bağlı olarak değişmektedir.

Isı geçişinin hesaplanması için önerilen bağıntıların bir bölümü ampirik katsayılar içeren yarı analitik modellere dayanırken, bir bölümü de deneysel verilerin boyut analizi ile elde edilen ampirik modellere uydurulması ile oluşturulmuştur. Bu bölümde kaynaklarda bulunan çalışmalar özetlenecektir.

Mchale & Garimella, yaptıkları deneysel çalışmaların sonucu olarak ısı akısındaki artış ile kabarcığın yüzeyden ayrılma frekansının ve etkin kabarcıklanma odaklarının yoğunluğunun da arttığını belirtmişlerdir [28]. Artan ısı akısı ile daha büyük hacimli kabarcıklara etki eden kaldırma kuvvetinin artması dolayısıyla kabarcıkların yüzeyden ayrılma hızı (Terminal rise velocity) da artmaktadır. Deneylerde elde edilen sonuçlar Ishii & Zuber'in önerdiği eşitlikler ile uyum göstermektedir [29].

Benjamin & Balakrishnan ısı akısının artmasının etkin kabarcıklanma odaklarının sayısında artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir [30]. Isı akısının artırılmasına bağlı

olarak kabarcık dinamiğine etki eden parametrelerin değişimini inceleyen çeşitli çalışmalarda, kabarcık ayrılma çapının azaldığı ve frekansın arttığı belirtilmiştir. [31, 32]

Kaynama yüzeyinde oluşan buhar kabarcıklarının, kaynama olayının her rejimi için farklı davranış göstermesi sebebiyle ısı akısı, kabarcıkların hareketinden oldukça etkilenir. Kabarcık oluşumunun farklılık gösterdiği bölgeler, doğal taşınımın etkin olduğu bölge, kabarcık oluşumunun etkin olduğu bölge ve buhar kabarcığı ile ısıtma yüzeyi arasındaki bölge olarak üç bölümde incelenebilir [33].

Çekirdekli havuz kaynamasının modellenmesi konusunda öncü çalışmalardan biri Rohsenow'a aittir ve yüzeyden ayrılan kabarcığın arkasında oluşan taşınımı esas almıştır [34]. Bu modele göre ısı akısı,

$$q'' = \mu_s h_{sb} \left[\frac{(\rho_s - \rho_b)g}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{c_{p,s} (T_y - T_d)}{C_{s,s} h_{sb} Pr_s^n} \right]^3 \quad (2.4)$$

olarak verilmiştir. Eşitlikteki $C_{s,s}$ ve n deneysel yöntemlerle belirlenen ampirik sayılardır. Yüzey-akışkan çiftine bağlı olarak bu katsayıların aldığı değerler bazı durumlar için Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1 : Denklem (2.4)'de verilen sabitlerin çeşitli yüzey-akışkan çiftleri için önerilen değerleri [35].

Yüzey-akışkan ikilisi	$C_{s,s}$	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 dağlanmış	0.0130	1.0
Zımparalanıp dağlanmış	0.0060	1.0
Su- pirinç	0.0060	1.0
Su- nikel	0.0060	1.0
Su- platin	0.0130	1.0

Isı akısının belirlenmesi konusunda yapılmış bir diğer çalışmada ısı geçişi yüzeyi yüzeyden ayrılan kabarcığın kızgın sıvı tabakasını beraberinde sürüklediği bölüm ve

ısının doğal taşınım yoluyla kaynama yüzeyinden sıvıya doğrudan geçtiği bölüm olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır [36, 37]. Daha sonra, ısıtma karakteristiği etkisi göz önüne alınarak Mikic ve Rohsenow tarafından kabarcık ayrılma çapı ve frekansı, etkin kabarcıklaşma odağı, akışkanın termofiziksel özellikleri ve kızgınlık farkı göz önüne alınarak geliştirilen model, deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [38].

$$q'' = \frac{K^2}{2} \sqrt{\pi(k\rho c_p)_s f D_d^2 N_a \Delta T} + \left(1 - \frac{K}{4} N_a \pi D_d^2\right) h_{dt} (T_y - T_\infty) \quad (2.5)$$

Judd ve Hwang [31] ise Mikic ve Rohsenow'un [38] modeline buhar hacmi ve gizli buharlaşma ısını ekleyerek kabarcık tabanındaki mikrotabaka buharlaşmasını göz önüne alan bir model geliştirmişlerdir.

$$q'' = \frac{K^2}{2} \sqrt{\pi(k\rho c_p)_s f D_d^2 N_a \Delta T} + \left(1 - \frac{K}{4} N_a \pi D_d^2\right) h_{dt} (T_y - T_\infty) + v_e N_a \rho_s h_{sb} f \quad (2.6)$$

v_e buharlaşan mikrotabaka hacmi olmak üzere;

$$v_e = 2\pi \int_0^{R_b} [\delta_0(r) - \delta(r, t)] r dr \quad (2.7)$$

Benjamin ve Balakrishnan [39] saf akışkanların düşük ve orta ısı akılarında kaynaması ile ilgili mekanik bir model önermişlerdir. Bu modelde ısı geçişinin üç yolla gerçekleştiği kabulü yapılmıştır. a) buharlaşan mikrotabakaya gizli ısı geçişi (q''_{mb}) b) ısıl sınır tabakanın yeniden oluşması sırasındaki ısı geçişi (q''_R) c) kabarcıklardan etkilenmeyen bölgede ısı geçiş yüzeyinden türbülanslı doğal taşınım yoluyla ısı geçişi (q''_{dt}). Buna göre ısı akısı için önerilen ifade;

$$q'' = \frac{q''_{me} t_w + q''_R t_g}{t_g + t_w} + q''_{dt} \quad (2.8)$$

Bahsedilen her mekanizma için analitik ifadeler geliştirilmiştir.

$$q''_{mb} = \frac{\gamma \phi \sqrt{\pi}}{10} B^2 Ar^{0.27} Ja(\alpha_s)^{\frac{3}{2}} \sqrt{t_g} \rho_s \lambda \left(\frac{N}{A}\right) \quad (2.9)$$

$$q_R'' = 2 \sqrt{\frac{k_s \rho_s C_{p,s}}{\pi t_w}} \left(\frac{N}{A} \cdot a \right) (T_y - T_d) \quad (2.10)$$

$$q_{dt}'' = h \left[1 - \left(\frac{N}{A} \right) \cdot a \right] (T_y - T_d) \quad (2.11)$$

ϕ ve γ katsayılarının hesaplanması için sırasıyla, mikrotabakanın buhar kabarcığının tabanındaki alanından ve mikrotabakadan kabarcığa geçen ısı akısından faydalanılmaktadır.

$$A_m = \frac{\pi D^2}{4} \left[1 - \left(\frac{D_d}{D} \right)^2 \right] = \frac{\pi D^2}{4} \phi \quad (2.12)$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{k_y \rho_y C_{p,y}}}{\sqrt{k_s \rho_s C_{p,s}}} \quad (2.13)$$

a katsayısı ise ısıtma yüzeyinde kabarcığın etkisi altında olan alandır.

$$a = \pi D_k^2 \quad (2.14)$$

$$t_w = 3t_g \quad (2.15)$$

B sabiti, su, CCL₄ ve n-hekzan için 1,55; n-pentan ve aseton için 1/1.55 olarak verilmiştir.

Yu ve Cheng, kaynama yüzeyindeki kabarcıklaşma odaklarının fraktal dağılımını temel alarak kabarcıklı havuz kaynamasında ısı transferi için bir model geliştirmişlerdir [40]. Modelde ısı akısı, kızgın yüzey üzerinde kabarcık oluşumu ve yüzeyden ayrılması, kabarcıklaşma olmayan kızgın yüzeyde doğal taşınım ve kabarcıkların altında oluşan mikrotabakanın buharlaşmasına göre değerlendirilmiştir.

$$q'' = q_k'' + q_{mb}'' + q_{dt}'' \quad (2.16)$$

$$q_k'' = C_b \frac{2D_f}{D_f + 1} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{3}} \frac{T_y - T_d}{T_y - T_\infty} D_{c,max}^{-1} [(N_{a,top})^{1+1/D_f} - 1] \quad (2.17)$$

$$q_{mb}'' = C_{mb} \frac{\sqrt{3} D_{c,max}}{16 \sqrt{\pi \alpha_s} \frac{T_y - T_\infty}{T_y - T_d} \frac{D_f}{D_f - 1} \left[\left(\frac{D_{c,max}}{D_{c,min}} \right)^{D_f - 1} - 1 \right]} \quad (2.18)$$

$$q''_{dt} = h_{dt} \left[1 - K \left(\frac{D_{c,min}}{D_{c,max}} \right)^{2-D_f} \right] (T_y - T_\infty) \quad (2.19)$$

$$C_b = K \sqrt{\pi(k\rho c_p)_s} D_b^2 (T_y - T_d) \quad (2.20)$$

$$C_{mb} = \frac{\gamma \left(1 - \frac{D_d^2}{D_i^2} \right) \sqrt{\pi}}{10} B^2 (Ar)^{0.27} Ja(\alpha_s)^{\frac{3}{2}} \rho_s h_{sb} \quad (2.21)$$

$$Ar = g v_s \left(\frac{\sigma}{\rho_s g} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.22)$$

$$Ja = \frac{\rho_s C_{p,s} (T_y - T_d)}{\rho_s h_{sb}} \quad (2.23)$$

Kabarcık ayrılma çapı;

$$D_b = C \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} Ja^{\frac{5}{4}} \quad (2.24)$$

C katsayısı, su için 1.5×10^{-4} diğer akışkanlar için 4.65×10^{-4} olarak verilmiştir.

Chu ve Yu, düşük ısı akılarından yüksek akılara kadar saf sıvıların kaynamasında kabarcıklı havuz kaynamasını modellemişlerdir [41]. Bu modelde etkin olan ısı geçişi mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir.

a) Moore ve Mesler tarafından önerilen, sıvının buharlaşması ile buhara olan gizli ısı geçişi, q''_{mb} [42]

b) Han ve Griffith tarafından önerilen, ısıl sınır tabakanın yeniden oluşması sırasında oluşan ısı geçişi, q''_R [36]

c) Yu ve Cheng tarafından önerilen, doğal taşınım ile ısı geçişi, q''_{dt} [40]

Toplam ısı akısı;

$$q'' = (q''_{LH} \cdot t_g + q''_R \cdot t_w) f + q''_{dt} \quad (2.25)$$

olarak verilmiştir. Eşitlikte verilen katsayılar aşağıda özetlenmiştir.

$$q_{mb}'' = J \frac{D_f}{D_f + 2} \frac{16\pi\alpha_s}{3} \left(\frac{T_y - T_d}{T_y - T_\infty} \right)^2 D_{c,max}^{-2} [(N_{a,top})^{1+2/D_f} - 1] \quad (2.26)$$

$$q_R'' = \frac{8}{3} a \frac{D_f}{D_f + 1} \sqrt{\pi k_s \rho_s C_{p,s} \alpha_s} \left(\frac{T_y - T_d}{T_y - T_\infty} \right)^2 D_{c,max}^{-1} [(N_{a,top})^{1+1/D_f} - 1] \quad (2.27)$$

$$q_{dt}'' = h_{dt} \left[1 - K \left(\frac{D_{c,min}}{D_{c,max}} \right)^{2-D_f} (T_y - T_\infty) \right] \quad (2.28)$$

Kabarcığın bekleme süresinin belirlenmesinde Han ve Griffith'in önerdiği analitik ifade sadeleştirilerek kullanılmıştır [36].

$$t_b = \frac{9}{16\pi\alpha_s} \left(\frac{T_y - T_\infty}{T_y - T_d} \right) D_c^2 \quad (2.29)$$

Kabarcıklaşma odaklarının fraktal oranı Yu ve Cheng tarafından [40];

$$D_f = \frac{\ln \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\bar{D}_{c,max}}{\bar{D}_{c,min}} \right)^2 \right]}{\ln \frac{D_{c,max}}{D_{c,min}}} \quad (2.30)$$

En büyük ve en küçük kabarcıklaşma odakları çapı Hsu'nun çalışmasından [43];

$$D \frac{\delta}{\frac{1 + \cos \varphi}{\sin \varphi}} \left[1 - \frac{T_d - T_\infty}{T_y - T_\infty} \right] \sqrt{\left(1 - \frac{T_d - T_\infty}{T_y - T_\infty} \right)^2 - \frac{4 \left(\frac{2\sigma T_y}{\rho_b h_{sb}} \right) (1 + \cos \varphi)}{\delta (T_y - T_\infty)}} \quad (2.31)$$

min

$$D \frac{\delta}{\frac{1 + \cos \varphi}{\sin \varphi}} \left[1 - \frac{T_d - T_\infty}{T_y - T_\infty} \right] \sqrt{\left(1 - \frac{T_d - T_\infty}{T_y - T_\infty} \right)^2 - \frac{4 \left(\frac{2\sigma T_y}{\rho_b h_{sb}} \right) (1 + \cos \varphi)}{\delta (T_y - T_\infty)}} \quad (2.32)$$

max

Toplam kabarcıklaşma odakları sayısı;

$$N_{a,top} = \left(\frac{D_{c,max}}{D_{c,min}} \right)^{D_f} \quad (2.33)$$

Kabarcık çapı;

$$D_c = 2R_c \quad (2.34)$$

Bir kabarcık ile yüzeyden uzaklaştırılan ısı akısı;

$$J = h_{sb}\rho_b V_b = \pi h_{sb}\rho_b D_b^3/6 \quad (2.35)$$

Büyüme ve bekleme süreleri arasındaki ilişki; [6]

$$t_w = 3t_g \quad (2.36)$$

Isıl sınır tabaka kalınlığı,

$$\delta = \frac{k_s}{h_{dt}} \quad (2.37)$$

Ortalama taşınım katsayısı; [36]

Doğal taşınım için; ν = kinematik viskozite olmak üzere;

$$\begin{aligned} h_{dt} &= 0.54\rho_s c_{p,s} \left[\frac{\gamma g (T_y - T_\infty) \alpha_s^3}{Av} \right]^{\frac{1}{4}} & 10^5 < Ra < 2 \times 10^7 \\ h_{dt} &= 0.14\rho_s c_{p,s} \left[\frac{\gamma g (T_y - T_\infty) \alpha_s^2}{v} \right]^{\frac{1}{3}} & 2 \times 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10} \end{aligned} \quad (2.38)$$

K katsayısı kabarcık çapının etkilediği alanın oransal sabitidir ve Dhira tarafından 2 alınması önerilmiştir [44].

Önerilen model, herhangi bir ampirik sabit içermemekle birlikte, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında kabul edilebilir sonuçlar vermektedir.

2.2.5 Basınç

Kabarcıklı kaynama olayında çalışma basıncının değiştirilmesi, çalışma sıvısının yüzey gerilimini, buharın yoğunluğunu ve gizli buharlaşma ısını etkileyerek hem kaynamada ısı taşınım katsayısını hem de kritik ısı akısını etkilemektedir.

Gong ve diğ., R170 ve R600a soğutucu akışkanları ile yaptıkları, farklı basınç ve ısı akısı değerlerinde kabarcıkların davranışını gözlemledikleri çalışmalarında, sabit ısı akısı değerinde artırılan basınç ile birlikte kabarcık boyutunun küçüldüğünü belirtmişlerdir [45].

Michaie ve diğ., saf suyun atmosfer basıncı ve atmosfer basıncı altındaki basınçlarda kaynamasını görüntülemiş ve kabarcık dinamiği ile ilgili çalışmalar yapmışlardır [46]. Hızlı kamera ile kaydedilen görüntülerin değerlendirilmesi sonucunda, çalışma basıncının düşmesiyle birlikte, kabarcık ayrılma çapı ve frekansının arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Aynı zamanda, atmosferik basınç altında küresel forma çok yakın olan kabarcıkların şekli, çalışılan en düşük basınçta kutuplardan basık bir forma dönüşmüştür.

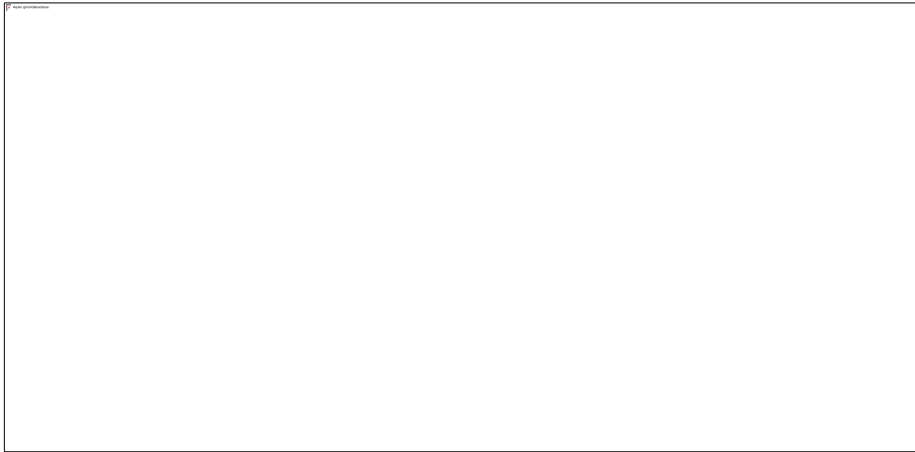
2.2.6 Yerçekimi

Kaynama olayı ile ısı geçişi uygulamaları yerçekimine sahip ortamlardan mikro yerçekimine sahip uzay ortamlarına kadar geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Yerçekimi koşullarında gerçekleşen kaynama olaylarında, iki fazlı akışkana etkiyen kaldırma kuvvetleri sonucunda gerçekleşen hidrodinamik olaylar sebebiyle yerçekimi ivmesi parametresi çalışmalara bir sabit olarak dahil edilmektedir. Günümüzde, kaynama ile gerçekleşen ısı geçişinin farklı yerçekimi koşulları altındaki temel özellikleri konusunda yapılan araştırmalar, yerçekimi olan ve olmayan ortamlar için karşılaştırmalı olarak yapılan deneysel çalışmalar ve sayısal modellemeler ile sınırlıdır.

2.3 Kabarcık Dinamiği Parametreleri

Kabarcıklı kaynamanın güvenilir bir modelini oluşturmak için Şekil 2.5'te gösterilen dört alt süreç ve aralarındaki ilişkiler incelenmelidir. Bu süreçler aktif kabarcıklanma odakları, kabarcığın büyümesi, birleşmesi ve ayrılmasını içeren kabarcık dinamiği ve çeşitli ısı geçişi mekanizmalarıdır [47].



Şekil 2.5 : Kabarcıklı kaynamada ısı geçişinin modellenmesi [47] .

Bir kabarcığın büyümesi; bekleme periyodu, atalet kuvvetleri kontrolü altında büyüme periyodu ve ısı geçişi kontrollü büyüme periyodu olmak üzere üç bölümde incelenir.

2.3.1 Etkin kabarcıklanma odakları yoğunluğu

Belirli bir ısı akısı aralığında, kaynama yüzeyinde bulunan doğal oyuklar ve/veya çeşitli imalat yöntemleri ile oluşturulmuş farklı geometri ve boyutlara sahip oyuklardan, minimum kabarcıklanma yarıçapı kriterini sağlayan ve buhar tutabilme kapasitesine sahip olanlar, etkin kabarcıklanma odağı olarak çalışırlar. Özellikle yüksek ısı akılarında çalışıldığında kızma sıcaklığı farkının artmasıyla birlikte, yüzey üzerindeki çok sayıdaki odak, kritik kabarcıklanma yarıçapı kriterini sağlar ve etkin duruma geçer. Etkin odakların artması, kabarcıkların hareketinin gözlemlenmesini ve doğrudan ölçülmesini zorlaştırır.

Bir kaynama yüzeyinde birim ısıtma yüzeyi başına düşen kaynama odağı sayısı (buhar kabarcıklarının oluştuğu ve büyümeye başladığı oyuklar) etkin kabarcıklanma odağı yoğunluğu olarak tanımlanır.

Yapılan deneysel çalışmalarda kabarcıklanma odağı yoğunluğunun ısı akısı, kızma farkı, oyuk geometrisi (çap, derinlik) ve yüzey/akışkan çifti özelliklerine bağlı olduğu belirtilmiştir. Etkin kabarcıklanma odaklarının birbirine göre konumu ve aralarındaki mesafe, kabarcıkların birbiriyle olan etkileşimini (yatay ve/veya düşey yönde birleşme) değiştirmekte, bu durum da kaynama karakteristiğini etkilemektedir.

Bonjour ve diğ. (2000), en yüksek ısı geçiş katsayılarının kabarcıklar arasında birleşme olaylarının meydana gelmediği durumlarda elde edildiğini ve ısı geçişinin iyileştirilmesi için kabarcıklanma odakları arasındaki en uygun mesafenin birleşme olaylarının gerçekleşmeyeceği mesafe olduğunu belirtmişlerdir [48]. Kabarcıklar arasındaki etkileşimin çok sayıda değişkene bağlı olması sebebiyle bunu sağlamak zordur.

Zhang ve Shoji, silisyum yüzey üzerinde bir ve iki oyuk olan yüzeyler üzerinde saf su ile çalışmışlardır [49]. İki oyuk olan durumda, oyukların arasındaki mesafeyi değiştirerek, bu mesafenin kabarcık etkileşimine etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, oyuklar arasındaki mesafenin ortalama ayrılma çapına oranı ile ifade edilen boyutsuz parametre ile değerlendirilmiştir. Elde edilen oranın 1.5'e eşit ve daha küçük olduğu durumda ısı akısının artmasıyla birlikte kabarcık ayrılma çapı ve frekansın arttığı; 1.5 ve 2 arasında olduğunda ısı etkileşiminin hidrodinamik etkileşimden daha etkili olması

sebebiyle frekansın azaldığı, 2 ve 3 arasında olduğunda ise kabarcıkların arasındaki kuvvetli hidrodinamik etkileşimin oluşması sonucunda yeniden yüksek kabarcık ayrılma frekansı değerlerine ulaşıldığı bildirilmiştir. Bu oranın 3'ten büyük olması durumunda, oyuklarda oluşan kabarcıkların birbiriyle olan ısı ve hidrodinamik etkileşimlerin ihmal edilebilecek boyutta olması dolayısıyla ayrılma frekansı, yüzeyde tek oyukla yapılan deneyler ile aynı sonucu vermiştir.

Nimkar ve diğ., silisyum yüzey üzerinde piramit şeklinde oluşturdukları yapay oyuklarda FC-72 sıvısı ile çalışmışlardır [50]. Oyuklar arasındaki mesafenin üç farklı durumu için komşu odaklarda oluşan kabarcıkların ayrılma çapı ve frekansının incelendiği çalışmada oyuklar arasındaki mesafenin bu parametreler üzerinde etkisi olmadığı sonucu verilmiştir.

Bu konuda çalışma yapan araştırmacılar tarafından önerilen çeşitli bağıntılar Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2 : Etkin kabarcıklanma yoğunluğu için önerilen ifadeler.

Kaynak	Önerilen İfade
Paul ve Abdel-Khalik (1983) [51]	$n_k = 1.207q'' + 15.74$
Kocamustafaogullari ve Ishii (1983) [52]	$n_k = n_k^*/D_a^2$ $n_k^* = f(\rho^*)R_c^{*-4,4}$ $f(\rho^*) = 2.157 \times 10^{-7} \rho^{*-3,2} (1 + 0.0049\rho^*)^{4,13}$ $\rho^* = (\rho_s - \rho_b)/\rho_b$ $R_c^* = R_c/(D_k/2)$ $D_b = 2,5 \times 10^{-5} \rho^{*0,9} \theta \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}}$
Wang ve Dhir (1993) [13]	$n_k = 7.81 \times 10^{-29} (1 - \cos \theta) R_c^{-6}$
Benjamin ve Balakrishnan (1997) [30]	$n_k = 218.8(Pr)^{1,63} \left(\frac{k_s \rho_s c_{p,s}}{k_y \rho_y c_{p,y}} \right) \left[14.5 - 4.5 \left(\frac{RaP}{\sigma} \right) \right. \\ \left. + 0,4 \left(\frac{RaP}{\sigma} \right)^2 (T_y - T_d)^3 \right]$
Suszko ve El-Genk (2015) [53]	$n_k = \left(\frac{6q''}{\pi D_a^3 \rho_b h_{sb} f_b (1 + A_r)} \right) = \left(\frac{6h}{\pi D_a^3 \rho_s c_{p,s} f_b (1 + A_r)} \right) Ja$

Kocamustafaogullari ve Ishii, etkin kabarcıklaşma odakları yoğunluğunun yüzey özellikleri ve akışkanın termofiziksel özelliklerinden etkilendiğini kabul ederek bir bağıntı önermişlerdir [52].

Wang ve Dhir, düşey levha üzerinde yaptıkları deneysel çalışmaların sonucuna dayalı olarak temas açısı ve oyuk çapını içeren ampirik bir ifade önermişlerdir[13]. Atmosferik basınç altında su ile yapılan çalışmalarda parlatılmış bakır yüzey üzerinde oluşturulan oyuklar kullanılmıştır. Önerilen ifadenin temas açısının 18°'den 90°'ye kadar olduğu durumlar ve oyuk çapının 5.8 μm 'den küçük olduğu durumlarda kullanılabileceği belirtilmiştir.

Benjamin ve Balakrishnan, paslanmaz çelik ve alüminyum yüzeylerde farklı yüzey işlemleri ile elde edilen kaynama yüzeylerinde saf su, karbon tetraklorid, n-hekzan ve aseton kullanarak düşük ve orta ısı akılarında yaptıkları deneylerde yüzey-sıvı etkileşimini incelemişlerdir [30]. Kabarcıklaşma odakları yoğunluğunun yüzey mikro pürüzlülüğüne, sıvının yüzey gerilimine, yüzeyin ve sıvının termofiziksel özelliklerine ve yüzey kızgınlığına bağlı olarak değiştiği sonucuna varmışlardır.

Suszko ve El-Genk, bakır yüzey üzerinde PF-5060 akışkanı ile yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, kabarcıklaşma odaklarının yoğunluğunun hesaplanması için kabarcık ayrılma çapı, frekansı gibi deneysel verileri ve Jakob sayısını içeren bir bağıntı önermişlerdir [53].

2.3.2 Büyüme hızı ve süresi

Kaynama yüzeyinde oluşan kabarcıklar, birkaç milisaniye içinde büyüyüp yüzeyden ayrılmaktadır.

Modelleme çalışmalarında ilk olarak sıvı havuzunda bulunan ve simetrik bir küre şeklinde büyüyen buhar kabarcığı göz önüne alınır. Gerçek duruma göre oldukça basitleştirilmiş bu kabul ile buhar kabarcığının sıvı-buhar ara yüzeyindeki ısı ve hidrodinamik etkileşimler, buharın basınç-sıcaklık değişimi ve non-lineer taşınım terimi ihmal edildiği için yapılan analitik çözümler yetersiz kalmaktadır.

Modelleme konusunda yapılan teorik çalışmalara göre, kaynama sırasında oluşan kabarcığın büyüme hızı; atalet kuvvetleri ve ısı geçişi olayları kaynaklı olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Kabarcığın oluşması ve büyümesi sürecinde, sıvının yüzey gerilim kuvveti ve atalet kuvvetlerinin çok büyük olması sebebiyle kabarcığın büyüme

hızı momentum denklemi ile kontrol edilirken; kabarcık çapı, oluşma sırasındaki çapının iki katına çıktığında yüzey kuvvetleri ve atalet kuvvetleri ihmal edilebilir seviyeye gelir ve büyüme hızı ısı geçişi olayları (kızgın mikrotabaka sıvısından iletimle ve sıvı-buhar arayüzeyinde oluşan buharlaşma) ile kontrol edilir. Bunun sonucu olarak kabarcıklanmanın ilk aşamasında lineer bir büyüme süreci gösteren buhar kabarcığı, ısı geçişiyle kontrol edilen rejimde asimptotik bir davranış gösterir.

Atalet kuvvetlerinin etkin olduğu anda buhar kabarcığının büyümesi Rayleigh denklemi ile ifade edilir.

$$R_k \frac{d^2 R_k}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_k}{dt} \right)^2 = \frac{P_b - P_\infty}{\rho_s} - \frac{2\sigma}{\rho_s R_k} \quad (2.39)$$

Büyüyen buhar kabarcığını çevreleyen sıvı tabakasının buharlaşmasıyla birlikte sıvının sıcaklığı düşer ve buna bağlı olarak buhar basıncı da düşer. Sıvı-buhar arayüzeyindeki basınç farkının azalması kabarcık büyüme hızının da azalmasına sebep olur. Bu aşamadan sonra kızgın sıvı tabakasından buhar kabarcığına olan ısı geçişi kabarcığın büyümesindeki etkin mekanizma olarak rol oynar.

Buhar basıncının doyma basıncına eşit olduğu ve kabarcığın çevresiyle denge halinde olduğu varsayımlarına göre, kritik kabarcık yarıçapı Young-Laplace denklemi ile öngörülür.

$$R_c = \frac{2\sigma}{P_d(T_\infty) - P_\infty} \quad (2.40)$$

Robinson ve Judd, yaptıkları çalışmada kabarcığın büyümesinin atalet kuvvetleri ya da ısı geçişi olayları tarafından kontrol edildiğini belirlemek için kabarcık büyümesini etkileyen atalet kuvvetlerinin, atalet kuvvetlerini oluşturan enerjiye oranını veren I_R katsayısını tanımlamışlardır [54].

$$I_R = \left(\frac{4}{27} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_s \alpha^2} \right) \frac{R_c}{Ja^2} \begin{cases} \ll 1 \text{ atalet kuvvetleri tarafından kontrol edilen büyüme} \\ \gg 1 \text{ ısı geçişi olayları tarafından kontrol edilen büyüme} \end{cases} \quad (2.41)$$

Çeşitli araştırmacılar tarafından büyüme hızını belirlemek için önerilen ifadeler Çizelge 2.3'te verilmiştir. Rayleigh denkleminde büyüme hızı atalet kuvvetlerine bağlı olarak hesap edilirken aşağıdaki denklemlerde kabarcık büyümesi sadece ısı geçişine bağlı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Büyüme hızı için önerilen ifadeler.

Kaynak	Önerilen ifade
Plesset ve Zwick (1954) [55]	$D = 3.908Ja\sqrt{\alpha_s t}$
Forster ve Zuber (1954) [56]	$D = 3.544Ja\sqrt{\alpha_s t}$
Cole ve Shulman (1966) [57]	$D = 5Ja^{3/4}\sqrt{\alpha_s t}$
Cooper (1969) [58]	$D = 3.96 \frac{Ja}{Pr^{0.5}} \sqrt{\alpha_s t}$
Zhao ve diğ., (2002) [59]	$D = \frac{4k(T_y - T_d)}{\rho_s h_{sb} \sqrt{0.64 Pr \alpha_s}} \sqrt{t}$

Eşitliklerde de görüldüğü gibi büyüme hızı genel olarak kabarcık ayrılma çapı, Jakob sayısı, ısıl yayılım katsayısı ve zaman ile ilişkilendirilmiştir.

Kabarcığın büyümesi ile ilgili bir diğer önemli parametre, büyüme süresi olarak adlandırılan, kabarcığın yüzeyde oluşmasından ayrılmasına kadar geçen süredir. Bu sürenin bilinmesiyle birlikte yüzeyden çekilen ısı miktarı belirlenebilir.

Zuber, uniform olmayan sıcaklık alanlarında kabarcığın büyüme periyodu ile ilgili bir eşitlik önermiştir [60].

$$t_g = \frac{D_k^2}{16b^2(Ja)^2\alpha_s} \quad (2.42)$$

Eşitlikte görülen b değeri 1 ve $\sqrt{3}$ arasında $\pi/2$ ara değeri ile değişen bir sabittir. Büyüme süresinin kabarcık ayrılma çapı ve akışkanın termofiziksel özellikleri ile ilişkilendirildiği ifadede büyüme süresi kabarcığın ayrılma çapının karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

Lee ve diğ., farklı sınır koşulları ve çalışma sıvılarıyla yaptıkları deneylerin sonucuna dayanarak kabarcık ayrılma çapı ve süresini boyutsuz sayılar cinsinden ifade etmişler ve kabarcığın büyüme süresi ile ilgili aşağıdaki eşitliği önermişlerdir [61].

$$t_g = 135Ja\alpha_s \frac{\rho_s R_k}{\sigma} \quad (2.43)$$

2.3.3 Yüzeyde bekleme süresi

Bir kaynama odağında, bir buhar kabarcığı ayrıldıktan sonra aynı odakta yeni bir kabarcık oluşması için geçen süre, yüzeyde bekleme süresi olarak adlandırılır.

Kabarcığın yüzeyde bekleme süresi, yüzey ve havuz sıcaklıkları ile ara yüzeydeki sıcaklık gradyeni tarafından kontrol edilir. Bu sıcaklık ölçekleri çalışma sıvısının doyma sıcaklığına, havuz bulk sıcaklığına ve ısıtılan yüzeyin sıcaklığına bağlıdır.

Han ve Griffith ısı geçişi ile akışkan akışı benzerliğiyle ısıl sınır tabaka kalınlığının, odak çapının 3/2 katına eşdeğer olduğunu belirtmişler ve bu noktadaki sıcaklığı aynı odak çapında kabarcık oluşması için gerekli sıcaklığa eşitleyerek yüzeydeki bekleme süresini belirlemek için aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir [62].

$$t_w = \frac{q}{4\pi\alpha_s} \left[\frac{(T_y - T_\infty)R_c}{T_y - T_d \left(1 + \frac{2\sigma}{R_c\rho_b h_{sb}} \right)} \right] \quad (2.44)$$

Eşitlikte de görüldüğü gibi belirli çaptaki ağza sahip bir oyuk için bekleme süresi, yüzey sıcaklığı ile doğru orantılı, yüzey kızgınlığı ile ters orantılıdır.

Stralen ve diğ., ise yaptığı çalışmalarda bir kaynama odağında kabarcık oluşması için gereken bekleme süresinin, kabarcığın büyüme süresinin 3 katına eşit olduğu sonucuna varmışlardır [6].

$$t_w = 3t_g \quad (2.45)$$

2.3.4 Kabarcık ayrılma çapı

Buhar kabarcığının ısıtma yüzeyinden ayrıldığı andaki çapı, ayrılma çapı olarak adlandırılır. Çeşitli deneysel çalışmalar ile oluşturulan ampirik ve yarı-ampirik modeller, kuvvet dengesine dayanarak oluşturulan analitik modeller ve ısıl analizlere bağlı olarak oluşturulan bağıntılar ile bu çapı belirlemeye yönelik ifadeler kaynaklarda mevcuttur.

Deneysel çalışmalarda hızlı kamera yardımıyla buhar kabarcığının fotoğrafları çekilerek, görüntüler analiz edilir ve ayrılma çapı belirlenir. Düşük ve orta ısı akılarında bu yöntem kolaylıkla uygulanabilirken, yüksek ısı akılarında komşu

odaklarda oluşan kabarcıkların etkileşimi ve birleşmesi ayrılma çapını belirlemeyi zorlaştırır.

Kabarcık ayrılma çapının kuvvet dengesine dayalı olarak belirlenmesi yönteminde ise, buhar kabarcığına etki eden kuvvetler belirlenerek çeşitli bağıntılar elde edilir.

Havuz kaynaması üzerine yapılan çalışmalarda kabarcık ayrılma çapının belirlenmesi için önerilen ifadeler Çizelge 2.4'te verilmiştir.

Fritz'in önerdiği bağıntı, halen kabarcık ayrılma çapının hesaplanmasında kullanılan en güvenilir modellerden biridir [63]. Hem saf sıvılar hem de karışımlar için kullanılabilen ifade temas açısı, yüzey ile durgun akışkan arasındaki açıdır. Oysa bu açı, uygulamada kabarcık hareketiyle sürekli olarak değişmektedir. Bu model daha sonra farklı araştırmacılar tarafından Jakob, Prandtl ve Arşimed gibi boyutsuz katsayılar ve ısıl yayılım katsayısı gibi akışkan özellikleri eklenerek güncellenmiş ve yeni bağıntılar önerilmiştir.

Robert Cole [64] ve Cole ve Rohsenow [65], kaynama yüzeyi sıcaklığının kabarcık ayrılma çapına etkisini göz önünde bulundurarak Fritz [63]'in önerdiği bağıntıya Jakob sayısını ekleyip, temas açısını bir sabitle değiştirmişlerdir. Robert Cole'nin önerdiği bağıntı saf sıvılar için kullanılabilirken, Cole ve Rohsenow'un önerdiği bağıntı hem saf sıvılarda hem de karışımlarda kabarcık ayrılma çapını hesaplamada kullanılabilir.

Van Stralen ve Zijl ise boyutsuz Jakob sayısının yanında ısıl yayılım katsayısını da eşitliğe dahil etmişlerdir [66]. Kabarcık hareketi basınca bağlı olarak izlendiğinde geniş basınç aralıklarında kabarcığın ayrılma çapının minimuma gitmesi sebebiyle Kocamustafaogullari, basınç farkını yoğunluk farkı ile normalize ederek yeni bir ifade önermiştir [67]. Daha sonra Wenzel tarafından Prandtl ve Arşimet sayılarının eklenmesiyle geliştirilen ifade Fritz'in saf sıvılar ve karışımlar için önerdiği bağıntı ile karşılaştırıldığında kabarcık ayrılma çapı için daha doğru tahminlere ulaşılmıştır [68]. Zeng ve diğ., kabarcık ayrılma çapını kabarcığa etki eden kuvvetlerin dengesine bağlı olarak hesaplayan bir model geliştirmişlerdir [5]. Kabarcığın yüzeyden ayrılmasında etkin kuvvetlerin kaldırma kuvvetleri ve kabarcığın büyüme kuvveti olarak kabul edildiği modelde, kabarcık büyüme hızı (C_s) 190 adet deney verisine en küçük kareler yöntemi uygulanarak $20/3$ olarak belirlenmiştir. K ve n ise ampirik olarak elde edilmiş değerlerdir.

Çizelge 2.4 : Kabarcık ayrılma çapı için önerilen ifadeler.

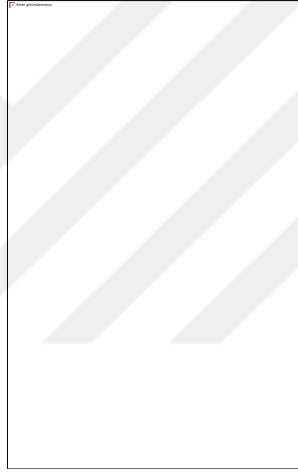
Kaynak	Uygulama alanı	Önerilen İfade
Fritz (1935) [63]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = 0.0208\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}}, \theta = 35^\circ(\text{karışımlar}), 45^\circ(\text{su})$
Robert Cole (1967) [64]	Saf sıvılar	$D_a = 0.04Ja \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}}$
R. Cole & Rohsenow (1969) [65]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = CJa^{\frac{5}{4}} \sqrt{\frac{2\sigma g_c}{g(\rho_s - \rho_b)}}, C = 1.5 \times 10^{-4}(\text{su}), 4.65 \times 10^{-9}(\text{diğer akışkanlar})$
Van Stralen & Zijl (1978) [66]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = 2.63 \left(\frac{Ja^2 \alpha_s^2}{g} \right)^{1/2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{3Ja} \right)^{1/2}}$
Kocamustafaogullari (1983) [67]	Saf sıvılar	$D_a = 2.64 \times 10^{-5} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}} \left(\frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_b} \right)^{0.9}$
Kocamustafaogullari & Ishii (1983) [52]		$D_a = 0.0012 \left(\frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_b} \right)^{0.9} 0.0208\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}}$
Wenzel (1992) [68]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = 0.25 \left[1 + \left(\frac{Ja}{Pr} \right)^2 \left[\frac{100000}{Ar} \right]^{0.5} \right] \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}}$
Zeng ve diğ. (1993) [5]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = 2 \left[\frac{3}{4} \frac{K^{2/n}}{g} \left(\frac{3}{2} C_s n^2 + n(n-1) \right) \right]^{n/(2-n)}$
Yang, Wu, Yuan, & Ma (2000) [69]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = 3,0557 \times 10^3 \frac{\rho_s}{\rho_b} \frac{\sqrt{c_{p,s} T_d}}{h_{sb}} \frac{\alpha Pr_s^{3/5}}{\eta}$
Lee ve diğ. (2003) [61]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = 2 \left[\frac{25}{2} \sqrt{27} Ja \alpha \left(\frac{\rho_s}{\sigma} \right)^{0.5} \right]^2$

Çizelge 2.4 (devam) : Kabarcık ayrılma çapı için önerilen ifadeler.

Kaynak	Uygulama alanı	Önerilen İfade
Jamialahmadi, Helalizadeh, & Müller-Steinhagen [70]	Elektrolit çözeltiler	$D_a = \left(96.75 + \frac{0.01425q''}{\ln q''}\right)^{-1}$
Fazel & Shafae (2010) [71]	Elektrolit çözeltiler	$D_a = 40 \left(\frac{\mu_b q''}{h_{sb} \rho_b \sigma \cos \theta}\right) \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}}$
Phan, Caney, Marty, Colasson, & Gavillet (2010) [72]	Saf sıvılar ve karışımlar	$D_a = \left(6 \sqrt{\frac{3}{2}}\right)^{1/3} \left(\frac{\rho_s}{\rho_b}\right)^{-1/2} \left(\frac{\rho_s}{\rho_b} - 1\right)^{1/3} \tan \theta^{-1/6} \left(\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}\right)^{1/2}$
Nam, Aktinol, Dhir, & Ju (2011) [73]	Saf sıvılar	$D_a = \left[\left(\frac{24 \sin^2 \theta}{2+3 \cos \theta - \cos^3 \theta}\right) \left(\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}\right)\right]^{1/2}$
S Hamzekhani, Falahieh, & Akbari (2014) [74]	Saf sıvılar	$D_a = \left[\frac{\sigma}{g \Delta \rho} \left(\frac{\mu_b V}{\sigma \cos \theta}\right)^{0.25} \left[\left(\frac{\rho_s c_{p,s} \Delta T}{\rho_s h_{sb}}\right)^{0.75} \frac{g \rho_s \Delta \rho}{\mu_s^2} \left(\frac{\sigma}{g \Delta \rho}\right)^{3/2}\right]^{0.05}\right]^{0.5}$
Suszko & El-Genk (2015) [53]		$D_a = 234 + 81\sqrt{t_g}$ parlatılmış yüzeyler için $D_a = 206 + 48\sqrt{t_g}$ pürüzlü yüzeyler için
Bovard, Asadinia, Hosseini, & Fazel (2017) [75]	Saf sıvılar	$D_a = c_0 \left[c_1 + Ja^{c_2} Ca^{c_3} \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_y}\right)\right] \left(\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}\right)^{1/2}$ $C_1=0.0172742 \ C_2=1.285607 \ C_3=0.661205 \ C_4=0.025346,$ $Ca = \frac{\mu_b V_k}{\sigma \cos \theta}$ kılcallık katsayısı

Geliştirilen modelde kabarcık büyüme hızı ve sabitlerin belirlenmesi için deneysel yöntemin gerekliliği bu yöntemi kullanmayı zorlaştırmaktadır. Yapılan deneylerde bu değerleri belirlemek yerine kabarcık çapları görüntüleme yöntemleriyle doğrudan ölçülebilir. Söz konusu çalışmadaki bilinmeyen parametre büyüme hızı, Jiang ve diğ., tarafından yapılan çalışmada kabarcığın ısısı sınır tabaka içinde ve dışında olan bölümünün çapının ayrı ayrı belirlenmesiyle bilinen parametreye dönüştürülmüş ve kabarcığın yüzeyden ayrılmasının modellenmesinde daha güvenilir bir yöntem olarak sunulmuştur [76].

Kabarcıklı kaynama olayında büyüyen bir buhar kabarcığı Şekil 2.6'da görüldüğü gibi; yerçekimi kuvveti F_b , yüzey gerilim kuvveti F_σ , atalet kuvvetleri F_i , yüzeyden ayrılan sıvı kuvveti F_d ve büyümeyle ilgili sürüklenme kuvveti F_{dw} 'yi yenmeye çalışmaktadır.



Şekil 2.6 : Büyüyen kabarcığa etki eden kuvvetlerin şematik gösterimi [76].

Artan kuvvetler bu direnci yenmeye başladığında kabarcık da yüzeyden kopmaya başlamaktadır.

$$F_i = F_b + F_i + F_{dw} - F_\sigma - F_d > 0 \quad (2.46)$$

Bu kuvvetleri bulmak için kullanılan eşitlikler aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$F_i = (\rho_b + 0.6875\rho_b)d(V_k v_k)/dt \quad (2.47)$$

$$F_b = V_k(\rho_s - \rho_b)g \quad (2.48)$$

$$F_d = \rho_b(dV_k/dt)^2/\pi R_s^2 \quad (2.49)$$

$$F_{dw} = C_D \rho_s \pi R_k^2 v_s^2 \quad (2.50)$$

$$F_{\sigma} = 2\pi R_s \sigma \sin \theta \quad (2.51)$$

Sürüklenme katsayısı C_D ; $1 < Re_k < 10^3$ değerleri için $18.5/Re_k^{0.6}$ değerini alırken daha büyük Re_k sayıları için 0.44'e eşittir.

Yang ve diğ., kabarcıkların büyüme ve yüzeyden ayrılma sürecini tanımlamak için karakteristik uzunluk ve zaman ölçeği kullanmışlardır [69]. Ayrılma çapının belirlenmesinde yüzey kızgınlık farkının etkisinin incelendiği çalışmada bu parametre η ile tanımlanmıştır.

$$\eta = \psi J a^{0.3} \quad (2.52)$$

$$\psi = \frac{c^2}{\phi^{m-1} [f(c)]^{\frac{2}{3}}} \quad (2.53)$$

$$f(c) \approx 1 - \frac{3}{4} \left[1 - \sqrt{1 - c^2} \right]^2 + \frac{1}{4} \left[1 - \sqrt{1 - c^2} \right]^3 \quad (2.54)$$

$$c = \frac{R_b}{R_t} \quad (2.55)$$

Verilen denklemlerde, ϕ yüksek basınçlarda kabarcık büyümesi için düzeltme katsayısını ve R_b kabarcık altında gelişen mikrotabakanın yarıçapını temsil ederken m değeri 1.4 değerine eşit bir sabittir.

Fazel ve Shafee, geniş bir ısı akısı aralığında, farklı derişikliğe sahip elektrolit sıvılar ile yaptığı çalışmalarda kabarcık ayrılma çapının artan elektrolit derişikliği ve ısı akısı ile arttığı sonucuna varmışlardır [71]. Sıvı içinde küresel şekle sahip kabarcığa etkileyen kuvvetlere mekanik, ısı ve kimyasal denklükleri yazılarak geliştirilen modelde deneysel veriler ile uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır.

Phan ve diğ., temas açısının kabarcık ayrılmasına etkisini incelediği çalışmada makro ve mikro temas açılarına bağlı olarak kabarcık ayrılma çapının belirlenmesi için yeni model geliştirmişlerdir [72]. Çalışmada yapılan kabullere göre; kabarcığın maksimum hacmi kuvvet dengesi ile belirlenmiştir, büyüme sıvı mikrotabakanın buharlaşmasıyla gerçekleşmektedir ve sıvının yeniden ısıtılması süresince kütle transferi ihmal edilebilir mertebededir. Önerilen ifade sadece yatay yüzeyden ayrılan ayrık kabarcıkların çapını belirleyebilmektedir.

Nam ve diğ., silisyum yüzey üzerinde kontrollü CuO nanoyapıları oluşturarak tek bir kabarcığın dinamiğini incelemişlerdir [73]. Sonuçlar süperhidrofilik yüzeyler ile karşılaştırıldığında, süperhidrofilik yüzeylerde kabarcık ayrılma çapının silisyum yüzeyden 2.5 kat daha küçük ve büyüme periyodunun 4 kat daha kısa olduğu görülmüştür. Kaldırma kuvvetleri ve yüzey gerilim kuvvetlerine bağlı olarak önerilen modelde ıslanabilirliğin önemine dikkat çekilmiştir.

Suszko ve El-Genk, PF5060 sıvısı kullanarak bakır yüzey üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar sonucu kabarcık ayrılma çapı için parlatılmış ve pürüzlü yüzeylerde kullanılmak üzere iki ayrı ifade önermişlerdir [53]. Parlatılmış yüzeyler için elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ile karşılaştığında %15 aralığında hata oranı verirken, pürüzlü yüzey için bu değer %8'dir.

Bovard ve diğ., farklı pürüzlülük değerlerine sahip alüminyum, paslanmaz çelik, bakır ve pirinç ısıtıcı yüzeyler üzerinde su, etil alkol ve metil alkol ile havuz kaynaması deneyleri yapmışlardır [75]. Kabarcık ayrılma çapı Jakob sayısı, Bond sayısı gibi boyutsuz sayılar kullanarak, kabarcık üzerine etkiyen kuvvetlere Buckingham π teoremi uygulanmış ve yeni bir ampirik model önerilmiştir.

Verilen ifadelerle bakıldığında kabarcık ayrılma çapının doğru öngörülebilmesi için, çap değeri; akışkanın termofiziksel özellikleri, yüzey gerilimi, yüzey ıslanabilirliği, ısı akısı, yüzey kızgınlık farkı ve temas açısı terimleri ile ifade edilmelidir. Sonuç olarak, kabarcık ayrılma çapı ve frekansını etkileyen parametrelerin, malzeme ve pürüzlülük gibi kaynama yüzeyinin özellikleri, yüzey sıcaklığı veya ısı akısı, kabarcıklaşmanın olduğu oyuğun boyutu ve geometrik şekli, sıvının termofiziksel özellikleri, sıvı ve yüzey arasındaki temas açısı, buharın yüzeyde bekleme süresi, büyüme ve yüzeyden ayrılma hızı, ortam basıncı ve etkiyen yerçekimi ivmesi gibi çok sayıda olmasına rağmen araştırmacılar tarafından önerilen ifadelerin bu değişkenlerin birkaçının kullanılarak oluşturulmuş olması, bu ifadelerin kabul edilebilir hata bandında sonuç verdiği çalışma aralığını sınırlandırmaktadır.

2.3.5 Yüzeyden ayrılma frekansı

Bir kaynama odağında birim zamanda oluşan kabarcık sayısı olarak tanımlanan kabarcıklaşma frekansı, kabarcık oluşması için gereken bekleme süresi ve kabarcığın yüzeyde büyüme süresine bağlıdır. Dolayısıyla bir oyukta oluşan kabarcıklaşma

frekansı, akışkanın termofiziksel özellikleri ve temas açısı, kabarcıklaşma odağının boyutları, kızgınlık farkı ve komşu odaklar arasındaki mesafe ile ilişkilidir.

$$f = \frac{1}{t_w + t_g} \quad (2.56)$$

Deneysel olarak, birim zamanda bir oyukta oluşan toplam kabarcık sayısının sayılmasıyla bulunur. Bununla birlikte, yüzeyden ayrılma frekansı genellikle kabarcığın ayrılma çapıyla ilişkilendirilmiştir. Çoğu ifade için genel form aşağıdaki gibidir.

$$f \propto D_a^m = f(\text{sistem özellikleri})$$

Kaynaklarda, kabarcıklaşma frekansı ile ilgili önerilen ifadeler Çizelge 2.5'te verilmiştir.

Jakob ve Fritz, su ve sıvı azot ile yaptıkları havuz kaynaması deneylerinde, kabarcığın yüzeyden ayrılma frekansı ve çapının çarpımının bir sabite eşit olduğu sonucuna varmışlardır [77]. Bu ifade daha sonra yine Jakob tarafından akışkanın yüzey gerilimi ve termofiziksel özellikleri eklenerek güncellenmiştir [78]. Modelde, kabarcık için eşit olarak kabul edilen yüzeyde bekleme ve büyüme süreleri Zuber tarafından önerilen ifadede değiştirilmiştir [79].

McFadden ve Grassmann'a göre kabarcık ayrılma frekansı ve kabarcık ayrılma çapının karekökü bir sabite eşittir [80]. Mikic ve Rohsenow, kabarcık ayrılma frekansının karekökü ile kabarcık ayrılma çapının çarpımını, kabarcığın bekleme ve büyüme süreleri, sıvının ısıl yayılım katsayısı ve boyutsuz Jakob sayısı ile ifade eden bir model önermişlerdir [81]. Sakashita ve Ono, yüksek ısı akılarında suyun havuz kaynaması için kabarcık ayrılma frekansını, sıvının yüzey gerilimi ve kinematik viskozite değerlerine bağlı olarak modellemişlerdir [82]. İfadedeki değerlerin her akışkan için sabit değerlere sahip olması, bu modelde de frekans ve ayrılma çapının çarpımının sabit olduğu sonucunu göstermektedir.

Hamzekhani ve diğ., su ve farklı derişiklik oranına sahip NaCl çözeltisi ile yaptıkları havuz kaynaması deneylerinin sonuçlarına dayanarak kabarcık frekansını öngören bir ifade geliştirmişlerdir [83]. Buckingham π teoreminin uygulandığı çalışmada, parametreler; kabarcık frekansı, çapı, yerçekimi ivmesi, ısı akısı, yüzey gerilimi ve sıvı-buhar yoğunluğu farkı olarak seçilmiştir. İfadede elde edilen değerler ile deneysel verilerin uyumu için denklemde görülen 0.015, 0.88 ve 0.44 katsayıları kullanılmıştır.

Çizelge 2.5 : Kabarcıklanma frekansı için önerilen ifadeler.

Kaynak	Önerilen ifade
M Jakob & Fritz (1931) [77]	$f D_a = 0.078$
Max Jakob (1949) [78]	$f D_a = \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{0.25}$
Zuber (1959) [79]	$f D_a = 0.59 \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{0.25}$
Robert Cole (1960) [84]	$f D_a^{1/2} = \left[\frac{4g(\rho_l - \rho_v)}{3C_D \rho_l} \right]^{0.5}$
McFadden & Grassmann (1962) [80]	$f D_a^{1/2} = 0.56 g^{1/2}$
Ivey (1967) [85]	$f D_a^{1/2} = 0.90 g^{1/2} \text{ d} > 0.5 \text{ cm}$ $f D_a^{1/2} = 0.44 g^{1/2} \text{ } 10^{-2} \leq \text{d} \leq 10 \text{ cm}$
R. Cole & Rohsenow (1969) [65]	$D_a = C \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)}} Ja^{c^{1/4}}$ $C=1.5 \times 10^{-9} \text{ (su)}, C=4.65 \times 10^{-9} \text{ (su dışındaki akışkanlar)}$
Mikic & Rohsenow (1970) [81]	$f^{1/2} D_a = \frac{4}{\pi} Ja \sqrt{3\pi\alpha_s} \left[\left(\frac{t_g}{t_g + t_w} \right)^{1/2} + \left(1 + \frac{t_g}{t_g + t_w} \right)^{1/2} - 1 \right]$
Sakashita & Ono (2009) [82]	$f D_a = 0.6 \left[\frac{g(\rho_s - \rho_b)}{\rho_s} \right]^{2/3} \left[v_s \left(\frac{g(\rho_s - \rho_b) \rho_s^2 v_s^4}{\sigma^3} \right)^{-0.25} \right]^{-1/3}$
Hamzekhani ve diğ. (2015) [83]	$f = 0,015 \left(\frac{q}{\Delta \rho^{0.25} g^{0.75} \sigma^{0.25}} \right)^{0.88} \left(\frac{\Delta \rho^{0.5} g^{0.5} D_b}{\sigma^{0.25}} \right)^{0.44} \frac{\Delta \rho^{0.25} g^{0.75}}{\sigma^{0.25}}$

2.4 Isı Taşınım Katsayısı

Taşınmıla ısı geçişinin kullanıldığı uygulamalarda, iyi bir tasarım için çeşitli akışkan ve yüzey çiftleri için ısı taşınım katsayısının belirlenmesi gereklidir. Bu katsayıyı belirlemek için, yüksek maliyetli deneysel çalışmalar yerine ısı geçişi temellerine veya

deneysel çalışmalara bağılı olarak ampirik ve yarı-ampirik ifadeler üretilmektedir. Isı taşınım katsayısının belirlenmesinde deneysel katsayıların en aza indirilmesi, elde edilen ifadelerin endüstriyel uygulamalarda en az hata ile güvenilirliğini artıracaktır.

Stephan ve Abdelsalam, doğal taşınım ile kaynama bölgesinde ısı taşınım katsayısını belirlemek için mevcut olan yaklaşık 5000 deneysel veri ile regresyon analizi uygulamışlardır [86]. Akışkanların; su, hidrokarbonlar, kriyojenik sıvılar ve soğutucu akışkanlar olmak üzere dört bölümde incelendiği çalışmada su için önerilen ifade aşağıda sunulmuştur.

Su;

$$h = 0.246 \times 10^7 \left(\frac{k_s}{D_d} \right) \left(\frac{q'' 6.57 \left(\frac{2\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)} \right)^{1/2}}{k_s T_d} \right)^{0.673} \left(\frac{h_{sb} \left(6.57 \left(\frac{2\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)} \right)^{1/2} \right)^2}{\alpha_s^2} \right)^{-1.58} \left(\frac{c_{p,s} T_d \left(6.57 \left(\frac{2\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)} \right)^{1/2} \right)^2}{\alpha_s^2} \right)^{1.26} \left(\frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s} \right)^{5.22} \quad (2.57)$$

Ayrıca analizlerde kullanılan akışkanlar için genel bir ifade çıkarılmıştır.

$$h = 0.23 \left(\frac{k_s}{D_d} \right) \left(\frac{q'' D_d}{k_s T_d} \right)^{0.674} \left(\frac{\rho_b}{\rho_s} \right)^{0.297} \left(\frac{h_{sb} D_d^2}{\alpha_s^2} \right)^{0.371} \left(\frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s} \right)^{-1.73} \left(\frac{\alpha_s^2 \rho_s}{\sigma D_d} \right)^{0.35} \quad (2.58)$$

Eşitliklerde verilen kabarcık ayrılma çapı Fritz tarafından önerilen

$$D_a = 0.0146 \theta \left[\frac{2\sigma}{g(\rho_s - \rho_b)} \right]^{0.5} \quad (2.59)$$

bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır. Su için temas açısı 35° olarak verilmiştir.

Eşitliklerde de görüldüğü gibi ısı taşınım katsayısı, akışkanın termofiziksel özelliklerinin yanı sıra kabarcık ayrılma çapı ve ısı akısına da bağlıdır.

Labuntsov (1973) ise saf sıvılar, soğutucu akışkanlar ve hidrokarbonlar için aşağıdaki eşitliği önermiştir [87].

$$h = 0.075 \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_b}{\rho_s - \rho_b} \right)^{0.67} \right] \left[\frac{k_s^2}{v \sigma T_d} \right]^{0.33} (q'')^{0.67} \quad (2.60)$$

Cooper (1984), ısı taşınım katsayısının belirlenmesi için sadece sistem basıncı ve akışkanın doyma özelliklerini kullanan cebirsel bir bağıntı önermiştir [88].

$$h = 55 \left(\frac{q}{A} \right)^{0.67} P_r^{0.12-0.2 \log_{10} R_p} x (-\log_{10} P_r)^{-0.55} x M^{-0.5} \quad (2.61)$$

Cornwell & Houston (1994), 8-50 mm çapında borularda yaptıkları deneysel çalışmalara eğri uydurma yöntemiyle su, soğutucu akışkanlar ve organik sıvılar için aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir [89].

$$h = 9.7 \left(\frac{k_s}{D_a} \right) (1.8 P_r^{0.7} + 4 P_r^{1.2} + 10 P_r^{10}) P_c^{0.5} Re_b^{0.67} Pr^{0.4} \quad (2.62)$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}, \quad (2.63)$$

$$Re_b = \frac{qD}{\mu_s h_{sb}} \quad (2.64)$$

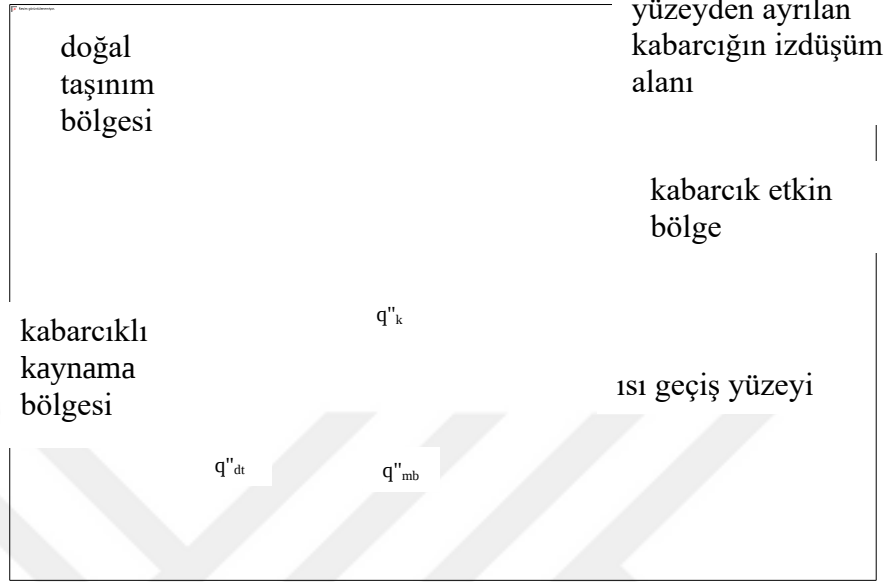
Fazel ve Roumana (2010), atmosferik basınç altında saf sıvılar (su, aseton, isopropanol, etil alkol ve metil alkol) ile yaptıkları deneysel çalışmalarda 400 kW/m² ısı akısı değerine kadar iki yüzden fazla ölçüm almışlardır [90]. Boyut analizine dayalı olarak geliştirdikleri ampirik model aşağıda verilmiştir.

$$h = \frac{3,253 \sigma^{0.125} h_{sb}^{0.125} \left(\frac{q}{A} \right)^{0.876}}{T_d \alpha_s^{0.145}} \quad (2.65)$$

Judd ve Hwang (1976), ısı akısını belirlemek amacıyla mikrotabaka buharlaşmasını, doğal taşınımı ve çekirdekli kaynama mekanizmalarını kapsayan bir model sunmuşlardır [31]. Önerilen model, cam yüzey üzerinde diklorometan ile yapılan kaynama deneyleri sonuçlarına bağlı olarak oluşturulmuştur. Kaynama yüzeyinde uniform ısı dağılımı olduğu kabulü ve kaynama ile gerçekleşen ısı geçişinin Newton'un soğuma yasası ile belirlendiği çalışmada ısı geçişi alanı kabarcık etkin ve doğal taşınım etkin bölgeler olmak üzere iki ana bölüme ayrılmıştır (Şekil 2.7). Isı taşınım katsayısı ise,

$$h = h_{dt} + (\sqrt{\pi k_s \rho_s f} - h_{dt})(n_s) \frac{\pi}{4} D_a^2 \quad (2.66)$$

olarak tanımlanmıştır.



Şekil 2.7 : Judd ve Hwang'ın önerdiği modelin şematik gösterimi.

2.5 Kabarcık Görüntüleme Çalışmaları

Kabarcıklı havuz kaynamasının gözlemlenmesi kabarcık dinamiğinin kavranması açısından büyük öneme sahiptir. Kaynama mekanizmasının anlaşılabilmesi için çeşitli optik yöntemler ve hızlı kameralar ile yapılan görünürleştirme çalışmaları kaynaklarda mevcuttur. Bu yöntemler yüzey pürüzlülüğü, çeşitli oyuk geometri ve sıklığı, temas açısı gibi yüzey karakteristiği ve ısı akısı değişkenlerinin kabarcık ayrılma çapı ve frekansına etkilerini incelemek üzere kullanılmıştır.

Inoue ve diğ.(1998), soğutucu akışkanlar kullanarak yatay platin tel üzerinde, kritik ısı akısına kadar olan akılarda havuz kaynaması çalışmaları yapmışlardır [91]. Yapılan görsel gözlemlere bağlı olarak akışkanların kaynama özellikleri ve ısı geçiş katsayısının değişimini öngören bir model önerilmiştir.

Shoji ve diğ.(2002), havuz kaynamasında kabarcıkların hareketi, yüzey sıcaklığının dağılımı, ısı geçişi karakteristiği ve kabarcıklanma odaklarının etkileşimini incelemek üzere yapay yüzey oyukları oluşturmuşlardır [92]. Oyukların şekli, boyutu ve aralarındaki mesafenin etkisini incelemek üzere üç set olarak yapılan deneylerde kabarcıkların davranışları hızlı kamera ile gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar, buhar tutabilme kapasitesinin en yüksek olduğu oyukların, silindirik ve girintili oyuklar

olduğunu göstermiştir. Oyukların derinliğinin etkisi belirgin olarak görülürken, oyuk çapının etkisi ihmal edilebilir mertebededir. Oyukların arasındaki mesafe azaldıkça, oluşan kabarcıkların yatay ve dikey olarak etkileşimde olması dolayısıyla ayrılma çapı küçülürken, frekans artmaktadır.

Pascual ve diğ.(2002), ITO kaplı cam üzerinde R-123 soğutucu akışkanı ile yaptıkları havuz kaynaması deneylerinde elektrik alanı uygulandığı ve uygulanmadığı durumlar için kabarcıklanma odaklarının sayısı, kabarcık ayrılma çapı ve frekansı değerleri ölçülmüştür [93]. Verilerin değerlendirilmesi sonucu elektrik alanın uygulanmasının yüzey sıcaklığını düşürdüğü, böylelikle kaynamayı engellediği ve gizli ısı akısının toplam ısı akısına etkisini azalttığı görülmüştür.

Diao ve diğ. (2006), R11(CC1₃)-R113(CCl₃F₃) karışımı için saydam ısıtıcı yüzey üzerinde havuz kaynaması deneylerinde görüntüleme çalışmaları yapmışlardır [94]. Soğutucu akışkan karışım oranı için kabarcık ayrılma çapı ve yüzeyden ayrılma süresinin incelendiği çalışmada, kabarcık ayrılma çapı arttıkça kabarcığın altındaki sıvı mikrotabanın kurumasının daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir.

Nam ve diğ.(2009), farklı ıslanabilirlik özelliklerine sahip olan iki farklı düz yüzey üzerinde ayrı kabarcıkların oluşma, büyüme ve yüzeyden ayrılmasını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir [95]. Hidrofobik yüzeyde kabarcık, kısa bir boyun verme sürecinden sonra yüzeyde yeni kabarcığı oluşturacak bir parça buharı bırakarak ayrılmaktadır. Bu yüzeylerde oluşan kabarcıkların ayrılma çapı hidrofilik yüzeyde oluşanlardan üç kat daha büyükken, büyüme süresi 60 kat daha uzundur.

Yüksek çözünürlüklü ve yüksek hızlı kızılötesi kameralar ile yapılan çalışmalarda kaynama yüzeyindeki ısı dağılımı incelenebilmektedir. Golobic ve diğ.(2009), kaynama yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılımını yüksek hızlı kızılötesi kamera ile kaydetmişlerdir [96]. Aynı zamanda yüksek hızlı video kamera ile eşzamanlı olarak kabarcıkların hareketleri kaydedilmiştir. 6 µm kalınlığındaki platin levha üzerinde yapılan deneylerde doymuş ve doymamış kaynama koşullarında ayrı kabarcıkların davranışı gözlemlenmiştir. Gerardi ve diğ.(2010), yüksek hızlı kamera ve kızılötesi termometri yöntemini kullanarak benzer bir çalışmayla elektrik ile ısıtılan ITO kaplı safir yüzeyde oluşan kabarcıkların ayrılma çapı ve frekansını, yüzeyde bekleme ve büyüme sürelerini, kabarcıklanma odağı yoğunluğunu bu görüntüleri kullanarak belirlemişlerdir [97]. Kaynama yüzeyinde bulunan odaklar için, elde edilen deneysel veriler, kaynaklarda bulunan eski modeller (Rohsenow, Kutateladze-Zuber) ile

karşılaştırıldığında, sonuçların makul olduğu görülmüştür. Verilerin, RPI ısı akısı bölümlene modeline göre değerlendirilmesi ile kabarcıklı kaynamada ısı geçişinin büyük bölümünü yüzeyden ayrılan kabarcığın arkasında oluşan kısa süreli iletim olayının oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Kabarcık altında oluşan mikrotabakanın geometrisi ve dinamiği ise lazer interferometri yöntemleriyle belirlenebilmektedir. Jawurek(1969), saydam yüzey üzerinde oluşan kabarcıkların hareketini lazer interferometri yöntemini kullanarak hızlı kamera ile görüntülemiştir [98]. Kaydedilen görüntüler yardımıyla kabarcıkların büyümesine bağlı olarak mikrotabakanın detaylı geometrisini elde ederek mikrotabanın buharlaşması olayını analiz etmiştir. Benzer yöntemlerle yapılan diğer çalışmada Voutsinos ve Judd (1975), bir kabarcık için mikrotabaka kalınlığının 5 μm mertebesinde olduğunu belirtmişlerdir [99]. Yapılan analizler sonucunda çalışılan koşullarda mikrotabaka buharlaşmasının toplam ısı geçişinin %25'ini oluşturduğu görülmüştür. Koffman ve Plesset (1983), su ve etanol ile yaptıkları deneylerde mikrotabaka kalınlığının oluşumunu ve mikrotabaka kalınlığının zamana bağlı olarak değişimini gözlemlemişlerdir [100]. Gao ve diğ.(2012), kabarcıklı kaynama süresince etanol buhar kabarcığı altında oluşan mikrotabakanın dinamik karakteristiğini lazer interferometri ve hızlı kamera tekniklerini kullanarak çalışmışlardır [101]. Kaydedilen girişim çizgilerinden katı-sıvı-gaz fazlarının kesişim noktasının hareketi, mikro-temas açısının dinamik değişimi, kabarcığın taban alanı çapı ve mikrotabaka hacmi elde edilmiştir.

Saydam kaynama yüzeylerinde toplam yansıma (total reflection) yöntemi, yüzeydeki sıvı-buhar arafazı ve sıvı-buhar fazlarının dağılımını tespit eder. Aynı zamanda buhar kabarcığının altındaki kuru alanların tespit edilmesine imkan sağlar. Nishio ve diğ.(1998), yüksek ısı akılarında, saydam yüzeyler üzerinde toplam yansıma yöntemini kullanarak katı-sıvı temasını ve kaynama yüzeyi yakınındaki kabarcık yapılarını gözlemlemişlerdir [102]. Yüksek ısı akılarında gerçekleşen kaynama olayındaki ısı geçişine, buharlaşan sıvı filminin katkısının bir ölçüsü olarak temas çizgisi uzunluğunun yoğunluğu önerilmiştir. Chung ve No (2003), toplam yansıma yöntemini kullanarak ve hızlı kamera ile kabarcıkların görüntülerini kaydederek kabarcıkların davranışını ve kaynama yüzeyindeki kuru noktaları gözlemlemişlerdir [103]. Elde edilen verilerin birlikte değerlendirilmesiyle kabarcık ve kuru noktaların yüzeyde eşzamanlı olarak oluştuğu sonucuna varılmıştır. Kuru noktaların

yoğunluğuna bağlı olarak kritik ısı akısı modeli sunulmuştur. Nishio ve Tanaka (2004), ITO kaplı safir yüzey üzerinde kritik ısı akısına yakın değerlerde yaptıkları deneysel çalışmada katı-sıvı temasını ve kabarcıkların davranışını gözlemlemişlerdir [104]. Toplam yansıma yöntemi ve kabarcıkların yandan alınan görüntülerinin eşzamanlı olarak incelenmesiyle kabarcık tabanının neredeyse kuru olduğu ve kabarcıkların yatay yönde birleşmesi ile birleşik kuru alanların oluştuğu sonucuna varılmıştır. Yüzey kızgınlığı arttıkça, katı-sıvı teması kuru alanlar boyunca oluşan kıvrımlı bir kanal gibi görünmektedir. Chu ve diğ.(2013), toplam yansıma ve kaynama havuzunun köşegeninden görüntüleme yöntemlerini birlikte kullanarak kaynama yüzeyindeki bir kabarcığın altında oluşan kuru nokta ve mikrotabakayı eşzamanlı olarak görüntülemişlerdir [105].

Saydam kaynama yüzeylerinde toplam yansıma tekniğinin lazer interferometre ile birlikte uygulanmasıyla birlikte mikrotabaka geometrisi belirlenebilir. Kızılötesi-opak yüzeylerde ise yüksek hızlı interferometrik termometri yöntemiyle yüzey sıcaklığı ve ısı akısı elde edilebilir. Bahsedilen görselleştirme yöntemlerinin eşzamanlı olarak kullanımı ile yüzeydeki ısı dağılımı, sıvı-buhar arafazı ve mikrotabakanın davranışı incelenerek, kabarcıklı kaynamada ısı geçişi konusunda kapsamlı bilgi elde edilebileceği düşünülmektedir. Bu eşzamanlı yöntem, kaynamanın fiziksel mekanizmasının anlaşılmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır.

Jung & Kim (2015), toplam yansıma yöntemini lazer interferometri ve kızılötesi termometri ile eşzamanlı olarak kullanarak mikrotabakadaki ısı transferini deneysel olarak çalışmışlardır [106]. Kaynama çalışmaları, kızılötesi-saydam ve görünür-saydam kalsiyum florür üzerine kaplanan kızılötesi-opak ve görünür-saydam ITO film ısıtıcı yüzeyinde yapılmıştır. Mikrotabaka geometrisi ve bununla ilişkili olarak yüzey sıcaklığı ve ısı akısı dağılımı tümleşik deneysel yöntem kullanılarak elde edilmiştir.

Jo ve diğ.(2016), hidrofilik ve hidrofobik özellikteki malzemelerin birlikte kullanıldığı yüzeylerde saf suyun kaynamasında kabarcıkların davranışını hızlı kamera ile gözlemlemişlerdir [107]. Hidrofobik noktalar kaynamanın başlamasını daha erkene almasına ve kabarcığın boyun verme süreciyle birlikte bekleme süresi olmadan sürekli kabarcık büyümesini sağlamasına rağmen, buhar tabakası kalın olduğunda kaynama ısı geçişi artırılmamıştır. Yüzeyde bulunan hidrofobik noktalar, kritik çaptan daha küçük olduğunda hidrofobik noktalarda oluşan kabarcıklar kayabilmekte ve bunun sonucu olarak kabarcık yüzeyden ayrıldıktan sonra yüzeyde kalan buhar tabakası

kabarcık tabanından daha küçük olmaktadır. Heterojen yüzeylerin kullanılması, hidrofilik yüzeye göre kabarcıklanma için bekleme süresini azaltırken, hidrofobik yüzeye göre yüzeyde oluşacak kabarcığın bekleme süresinde iletim ile ısı geçişini iyileştirerek kaynamada ısı geçişini artırır.

2.6 Sayısal Modelleme Yöntemleri

Karmaşık fiziksel temellere sahip olan kaynama olaylarını tam olarak açıklayabilen matematiksel modeller geliştirilememiştir. Fakat ısı ve kütle geçişi hesabında katı-sıvı-buhar etkileşimini göz önüne alan sayısal modeller üzerinde çalışılmıştır.

Gelişen bilgisayar teknolojisi ve algoritmalar ile birlikte hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi mühendislik problemlerinin çözümünde popüler ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde akış ile ilgili bilgiler kısa sürede elde edilebilirken, çok fazlı akışlarda, fazlar arasındaki fiziksel özelliklerin bir akışkandan diğer akışkana büyük oranda değişmesi ve sıvı-buhar arayüzeyinin tanımlanıp çözümlenmesi korunum denklemlerinin çözümünü ve sayısal olarak modellenmeyi zorlaştırmaktadır.

Sıvı içinde yükselen bir buhar kabarcığı, sıvı-buhar ara yüzeyindeki yüzey gerilimi, viskozite, kaldırma kuvveti ve atalet kuvvetlerinin etkileşimleri sonucunda oluşan basınç dağılımına göre şekillenir. [108]. Bu sebeple kaynama olayının modellenmesinde, sıvı ve gaz fazları arasında gerçekleşen kütle geçişi ve faz değişiminin doğru bir şekilde tanımlanabilmesi, sayısal modelin geçerliliği için büyük önem taşımaktadır. Kaynama olayında sıvı ve buhar fazlarının birbirinden hareketli bir sınır tabakası ile ayrılması sebebiyle, Navier-Stokes denklemleri her iki faza ayrı ayrı uygulanabilirken arayüzey sınırındaki sürekliliği bozmadan her iki faz için birlikte uygulanamaz.

İki fazlı akış problemlerinin çözümlenmesi için çeşitli sayısal yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemler en genel şekilde, sıvı-buhar arayüzeyinin matematiksel ifadesine bağlı olarak temelde implicit ve explicit olmak üzere iki çeşittir. Arayüzey takip yöntemlerini kullanan modeller hacimsel yüzde, level-set ve Lattice Boltzman olarak sıralanabilir. Bu çalışmada hacimsel yüzde ve level-set yöntemleri birlikte kullanılmıştır.

2.6.1 Hacimsel yüzde yöntemi (VOF)

Hacimsel yüzde yönteminde sıvı-buhar arayüzeyinin takibi bir sürekli fonksiyon ile yapılır. Bu fonksiyon 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir ve çözüm ağında bulunan her hücre için hücrede bulunan sıvının, hücrenin toplam hacmine oranını verir.

Hacimsel yüzde yöntemi ilk defa 1976 yılında Noh ve Woodward tarafından kullanılmıştır. Bu yöntemde akışın çözümlenmesi için tek bir momentum denklemi kullanılır. Fazlar arasında bulunan arayüzeyin takibi fazlardan birinin veya daha fazlasının hacimsel yüzdesi için süreklilik denkleminin çözümü ile gerçekleştirilir. [109].

n fazı için bu denklem en genel halde aşağıdaki şekildedir.

$$\frac{1}{\rho_n} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_n \rho_n) + \nabla \cdot (\alpha_n \rho_n \vec{v}_n) \right] = S_{\alpha_n} + \sum_{n=1}^n (\dot{m}_{pn} - \dot{m}_{qn}) \quad (2.67)$$

Eşitlikte α her faz için hacimsel yüzde oranını göstermektedir. Bu yaklaşıma göre çözüm alanı içerisindeki her bir hücre akışkanlardan biri veya akışkanların karışımı ile doludur ve bir hücrede bulunan akışkanların hacim yüzdeleri toplamı bire eşittir. Birinci faz için bu oran aşağıdaki denklem ile hesaplanırken, diğer fazlar için hacimsel yüzde denklemini kullanılır.

$$\sum_{n=1}^n \alpha_n = 1 \quad (2.68)$$

S_{α_n} fazlar arasındaki kütle transferini ve S her faz için kaynak terimini temsil etmektedir.

Arayüzeyde bulunan hücrelerdeki yoğunluk ve viskozite değerleri hacimsel yüzde oranlarına göre hesaplanır ve momentum denklemini çözülerek, akış tek fazlı probleme dönüştürülür.

Enerji denkleminin çözümünde her fazın özgül ısısı ve ortak bir sıcaklık alanı kullanılır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (2.69)$$

Denklemden S_h hacimsel ısı kaynağını, E ise fazların özgül ısılarının ortalamasını temsil etmektedir.

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (2.70)$$

Kütlenin korunumu yasasının doğru bir şekilde uygulanabilir olması ve yöntemin herhangi bir ağ yapısında kullanılabilir olması avantajlarına sahip olan VOF yöntemi arayüzeyin oluşturulması konusunda fiziksel olarak uygun olmayan sınırlar çizerek arayüzey konumunda doğruluk kaybına neden olur.

Bu yöntemde hacimsel oranların ilk dağılımı çözüm başlangıcında belirlenen ilk arayüzey geometrisine göre belirlenir. Bu sebeple hacimsel yüzde yöntemi sıvı ve buhar fazlarını, kaynama olayı için kabarcıklanma olayını, oluşturamaz. Dolayısıyla buharın eklenmesi için ayrı bir modele ihtiyaç duyulur.

2.6.2 Level-Set yöntemi

Level-Set yöntemi ilk defa Osher ve Sethian tarafından sıkıştırılmaz iki fazlı akışın hareketini modellemek için kullanılmıştır. Bu yöntem, sayısal bir hücrenin arayüzeye olan uzaklığı ilgili bilgileri içeren ve hız alanı ile konvektif olarak taşınan bir alan kullanır. Arayüzey, yüzey eğriliğini ve yüzey geriliminden olan eğriliği doğru öngören sürekli level-set fonksiyonu ($\phi(x,t)$) ile takip edilir ve Level-Set alanının sıfır eşdeğer çizgisi ile temsil edilir [110]. Level-Set fonksiyonu kabarcığın dışında bulunan sıvı fazında pozitif değerlere sahipken, kabarcık içindeki buhar fazında negatif değerler alır. Sıvı ve buhar fazlarının arasındaki sıfır eşdeğer çizgisi ile arayüzey belirlenmiş olur.

İki fazlı akış sistemlerinde bu fonksiyon aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\Gamma = \{(x, y \mid \phi(x, y, t)) = 0\} \quad (2.71)$$

Level-set fonksiyonunun değişimi denklem (2.72) ile verilebilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{u} \phi) = 0 \quad (2.72)$$

Momentum denklemi denklem (2.73)'te verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu [(\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T)] - \vec{F}_{sf} + \rho \vec{g} \quad (2.73)$$

Level set yöntemi arayüzey belirleme açısından oldukça avantajlı olmasına rağmen bu yöntemde kütle korunamaması sebebiyle çözümde hacmin korunması konusunda eksikler bulunmaktadır. VOF yönteminde ise, belirli bir fazın hacimsel yüzdesi her bir hücre için ayrı ayrı hesaplandığından hacmin korunduğu bir yöntemdir. Bu yöntemdeki zayıflık uzamsal türevlerin hesaplanmasından kaynaklanmaktadır, çünkü VOF fonksiyonu arayüzey boyunca süreksizdir.

2.6.3 CLSVOF yöntemi

CLSVOF yöntemi; LS yöntemlerinin avantajlarını VOF yöntemi ile birlikte kullanabilmemizi sağlayan bir çözüm yöntemidir. Bu yöntemde arayüzey VOF fonksiyonundan ve LS fonksiyonundan hesaplanan arayüzeye dik vektörler kullanılarak yeniden yapılandırılır. Böylelikle yeni arayüzeyde LS fonksiyonları kütle korunumunu sağlamak için yeniden düzenlenmiş olur.

VOF ve LS yöntemlerinin zayıf olan yönlerinin üstesinden gelmek için Bourlioux (1995) tarafından önerilen CLSVOF yöntemi [111] daha sonra Sussman ve Puckett (2000) tarafından geliştirilmiştir [112].

CLSVOF yönteminde momentum denklemleri hem level-set alanı hem de momentum alanı için çözülür. Bu birleştirilmiş yöntemde level-set arayüzey eğriliğini belirleyip düzgün türevlenebilir alan sağlarken VOF, kaba ağ yapılarında bile kütle korunumunu kullanarak arayüzey sınırlarını belirler.

İki fazlı akışların modellenmesinde CLSVOF yöntemi araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. [113–116]. Welch ve Wilson'un sıvı-buhar arayüzeyinde gerçekleşen faz değişimi ve kütle transferini hesapladığı çalışma bu yöntemle yapılan öncü çalışmalardan biridir. Bu çalışmada su ve R143a akışkanları için kabarcık büyümesi ve kabarcıklaşma çevrimi de modellenmiştir. [117]

Pijl ve diğ.(2005), iki fazlı akışların modellenmesinde MCLS (mass-conserving level-set) yöntemini geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemde Level-Set fonksiyonu ile hesaplanan VOF fonksiyonu arayüzey oluşturmak yerine kütle korunumu amacıyla kullanılmıştır [118].

3. MATEMATİK MODEL

Çekirdekli havuz kaynamasında ısı geçişinin kontrol edilebilmesi ve kabarcık dinamiğinin anlaşılabilmesi amacıyla çeşitli değişkenler üzerinde araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar yüzey üzerinde çekirdeklenmenin başlamasından, kabarcık üzerine etkiyen kuvvetlere ve kabarcığın büyüüp yüzeyden ayrılması konularına kadar çeşitli alt olayları kapsamaktadır. Kullanılan değişkenlerin başında akışkanın termofiziksel özellikleri, ısıtma yüzeyinin malzemesi, pürüzlülüğü, yüzey yapısı, yönü ve sıcaklık, basınç, yerçekimi gibi çalışma şartları gelmektedir. Çok sayıda araştırmacı, yapılan kabuller ve bahsedilen bu parametrelere bağlı olarak kabarcık büyümesi için deneysel ve teorik çalışmalar yapmıştır. Bu modellerde genel olarak kabarcık çapı, büyüme hızı ve kabarcığın yüzeyden ayrılma frekansı birbiriyle ilişkilendirilmiştir.

Matematik modeller, geniş çalışma aralığında kullanılabilir olma, yüksek doğrulukta sonuç verme ve kaynama olayında gerçekleşen her ısı geçiş mekanizmasının toplam ısı geçişine katkısının belirlenebilmesi gibi özellikleriyle deneysel modellere göre daha avantajlı konumdadır.

Günümüzdeki matematik modelleme çalışmaları genel olarak kabarcık oluşumundaki fazları esas alan modeller ve yüzey üzerinde gerçekleşen ısı geçiş mekanizmalarını dikkate alan modeller olmak üzere ikiye ayrılır. Isı akısının hesaplanması için önerilen modeller Bölüm 2.2.4 'te özetlenmiştir. Bu çalışmada ısı geçiş mekanizmalarını temel alan bir matematik model üzerinde çalışılmıştır. Bugüne kadar geliştirilen kaynama modellerinde ısı geçiş genel olarak sıvının sıcaklığını artıran doğal taşınım, yüzeyden ayrılan kabarcıkların yerine hücum eden sıvıdan yüzeye olan hızlı soğutma ısı (quench) ve faz değişimi sebebiyle gerçekleşen buharlaşma ısı olarak üç bölümde incelenmiştir [31, 39, 119–121]. Bu modellerden en popüler olanı Kurul ve Podowski tarafından geliştirilen RPI modelidir [119]. Düşük ve orta ısı akılarında kadar iyi sonuçlar veren bu model kabarcıkların birleşme olaylarını dikkate almadığından yüksek ısı akılarında doğruluğu azalmaktadır.

Bu çalışmada Han ve Griffith tarafından önerilmiş olan ve farklı araştırmacılar tarafından da üzerinde değişiklikler yapılan bir matematik model üzerinde çalışılmıştır. Doğal yüzeyler için oluşturulan ve deney verilerinden kabarcıklanma odağı sayısı elde edilen matematik model [1], yüzey karakteristiği belirli olan yüzeyler ile test edilmiş ve üzerinde güncellemeler yapılmıştır.

3.1 Önerilen Matematik Model

Çekirdekli havuz kaynamasında ısı geçişinin hesabı için önerilen modelde kaynama yüzeyi, kabarcık etkin bölge ve kabarcıkların etki alanı dışında kalan bölge olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. Kabarcık hareketlerinin etkin olduğu bölgelerde; yüzeyden kızgın sıvı tabakasına zamana bağlı iletim ve kabarcıklara buharlaşma ile gizli ısı geçişi, kabarcıkların etkisi dışında kalan bölgelerde ise türbülanslı doğal taşınım mekanizmalarının etkin olduğu düşünülmüştür. Her iki bölge için hesaplanan ısı akıları, etkin oldukları alanların oranları ile çarpılıp toplanmıştır. Deneysel çalışmada kaydedilen görüntüler incelenerek, etkinleşen kaynama odakları sayılmış ve modele ampirik katsayı olarak eklenmiştir.

$$q''A = (q_k''A_k + q_{dt}''A_{dt})n_{eo} \quad (3.1)$$

$$A = A_k + A_{dt} \quad (3.2)$$

Verilen ifadede, q'' toplam ısı akısını, A toplam ısı geçişi yüzey alanını ifade ederken, k ve dt indisleri sırasıyla kabarcık etkin bölge ve doğal taşınım etkin bölgelerini temsil etmektedir.

Denklem (3.1) A ile bölünür ve denklem (3.2)'den A_{dt}/A çekilerek yerine yazılır ise, $a_k = A_k/A$ olmak üzere,

$$q'' = (q_k''a_k + q_{dt}''(1 - a_k))n_{eo} \quad (3.3)$$

elde edilir.

Han ve Griffith'in çalışmasında da verildiği gibi yüzeyden ayrılan D_a çapındaki bir kabarcığın, beraberinde sürüklediği kızgın sıvı tabakasının izdüşüm alanı (πD_a^2)dir.

Yüzeydeki çekirdeklenme odaklarının sayısı N_k olduğuna göre,

$$A_k = \pi D_a^2 N_k \quad (3.4)$$

$$a_k = \pi D_a^2 \frac{N_k}{A} \quad (3.5)$$

ifadeleri elde edilir. Çekirdeklenme odaklarının yoğunluğu $n_k = N_k/A$ dikkate alınarak bu eşitlik denklem (3.3)'te yerine yazılırsa,

$$q'' = (q_k'' \pi D_a^2 n_k + q_{dt}'' (1 - \pi D_a^2 n_k)) n_{eo} \quad (3.6)$$

eşitliği elde edilir. Bağlantı ΔT ile bölünerek ısı taşınım katsayıları cinsinden de yazılabilir.

$$h = (h_k \pi D_a^2 n_k + h_{dt} (1 - \pi D_a^2 n_k)) n_{eo} \quad (3.7)$$

Çekirdekli havuz kaynamasında kaynama eğrilerinin elde edilebilmesi için kabarcık etkin ve doğal taşınım etkin bölgelerdeki ısı taşınım katsayılarının hesaplanması, bunun için de kabarcık ayrılma çapı ve frekansı değerlerinin sıcaklık farkına bağlı olarak belirlenmesi gerekmektedir.

3.1.1 Doğal taşınım ile ısı geçişi

Isı taşınım katsayısının doğal taşınım bileşeni yatay yüzeyden türbülanslı doğal taşınım için Cryder ve Finalborgo tarafından önerilen,

$$Nu = 0.14 Ra^{1/3} \quad (3.8)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır [122]. Verilen eşitlikte Rayleigh ve Nusselt sayıları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$Ra = Gr Pr_s = \frac{g \beta_s \Delta T L^3}{\nu_s^2} Pr_s \quad (3.9)$$

$$Nu = \frac{hL}{k_s} \quad (3.10)$$

Karakteristik uzunluk L ise $L = \sqrt{A}$ olarak tanımlanmıştır. Denklem (3.8)'de bulunan $1/3$ ve denklem (3.9)'da 3 üsleri sadeleştiğinden, türbülanslı ısı taşınım katsayısı karakteristik uzunluktan bağımsızdır.

$$h_{dt} = C_{dt} k_s \left(\frac{\rho_s^2 g \beta_s Pr_s}{\mu_s^2} \right)^{1/3} \Delta T^{1/3} \quad (3.11)$$

Eşitlik ΔT ile çarpılarak doğal taşınım ile gerçekleşen ısı akısı

$$q_{dt} = C_{dt} k_s \left(\frac{\rho_s^2 g \beta_s Pr_s}{\mu_s^2} \right)^{1/3} \Delta T^{4/3} \quad (3.12)$$

3.1.2 Kabarcık etkin bölgede ısı geçişi

Kabarcık etkin bölgedeki toplam ısı geçişi (q_k''), bir çekirdeklenme odağında kabarcığın oluşması, büyümesi ve yüzeyden ayrılmasıyla birlikte kabarcığın yerine hücum eden sıvı olayları ile gerçekleşir. Sıvının, kabarcığın boşalttığı hacmi doldurması yeni bir kabarcıklanma olayını meydana getirerek bekleme süresini başlatır. Bekleme süresi boyunca sıvıya sadece iletim ile ısı geçişi olduğu varsayımı yapılarak, yenilenen sıvı tabakasının ısıtılması zamana bağlı ısı geçişi olarak modellenenebilir. Böylelikle bu bölgedeki ısı geçişi; kabarcığa buharlaşma ile ısı geçişi ve ayrılan kabarcığın yerini dolduran sıvıya yüzeyden zamana bağlı ısı geçişinin birleşimi olarak düşünülebilir.

Aynı bölge üzerinde etkin olan mekanizmalar için toplam ısı akısı ve taşınım katsayısı,

$$q'' = q_{kt}'' + q_g'' \quad (3.13)$$

$$h = h_{kt} + h_g \quad (3.14)$$

olarak verilebilir.

Mikic ve Rohsenow, kabarcığın etkisi altında olan alanın yarıçapını kabarcığın ayrılma çapına eşit olarak kabul etmişlerdir [38]. Yüzeyden mikrotabakaya zamana bağlı ısı iletimi için kabarcık ayrılma frekansı ile orantılı olarak aşağıdaki ifadeyi önermişlerdir.

$$q_{kt}'' = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_s \rho_s c_{p,s} \sqrt{f} \Delta T} \quad (3.15)$$

Bu çalışmada önerilen modelde, denklem (3.15)'e yüzeyden kabarcığa buharlaşma ile gizli ısı geçişi de dahil edilmiştir. Odakta oluşan her kabarcığın yüzeyden ayrılana kadar aldığı gizli ısı, kabarcığın etki alanına bölünerek gizli ısı geçişinin, toplam ısı geçişine katkısı belirlenmiştir.

Kabarcığın ayrılma hacmi,

$$V_k = \frac{\pi D_a^3}{6} \quad (3.16)$$

olduğuna ve her odaktan birim zamanda f kez kabarcık ayrıldığına göre gizli ısı akısı

$$q_g'' = \frac{\rho_b (\pi D_a^3 / 6) h_{sb}}{\pi D_a^2} f = \frac{1}{6} \rho_b D_a h_{sb} f \quad (3.17)$$

olarak elde edilir.

Zamana bağlı ısı iletimi ve gizli ısı akısını veren ifadeler denklem (3.13)'te yerine yazılarak kabarcık etkin bölgedeki toplam ısı akısı aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$q_k'' = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_s \rho_s c_{p,s} \sqrt{f} \Delta T} + \frac{1}{6} \rho_b D_a h_{sb} f \quad (3.18)$$

Bu bağıntı ΔT ile bölünerek, kabarcık etkin ısı geçiş katsayısı,

$$h_k = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_s \rho_s c_{p,s} \sqrt{f}} + \frac{1}{6} \rho_b D_a h_{sb} f \frac{1}{\Delta T} \quad (3.19)$$

bulunur.

3.1.3 Kabarcık ayrılma çapı ve frekansı

Sunulan modelde bulunan kabarcık ayrılma çapı ve frekansı değerleri için kaynaklarda önerilen çok sayıda bağıntı, bu çalışmada elde edilen deney verileri ile birlikte değerlendirilmiştir.

Kabarcık ayrılma çapı için, deney verileri ile model arasında uyumun sağlandığı Kutateladze ve Gogonin tarafından önerilen bağıntı seçilmiştir [123].

$$Bo^{1/2} = 0.25(1 + 10^5 K_1)^{1/2} \quad (3.20)$$

$$K_1 = \left(\frac{Ja}{Pr_s} \right) \left\{ \left[\frac{g \rho_s (\rho_s - \rho_b)}{\mu_s^2} \right] \left[\frac{\sigma}{g (\rho_s - \rho_b)} \right]^{3/2} \right\}^{-1} \quad (3.21)$$

Kabarcık ayrılma frekansı ise, kabarcığın yüzeyden ayrılıp yükselmesi ile doğal taşınım arasında benzerlik kuran Zuber'in önerdiği eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır [79].

$$f D_a = 0.59 \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{0.25} \quad (3.22)$$

3.1.4 Etkin çekirdeklenme odaklarının yoğunluğu

Artan kızma sıcaklığı farkıyla birlikte kritik kabarcıklanma yarıçapı değerinin düşmesi ve çok sayıda odağın etkin hale geçmesi kabarcık hareketlerinin gözlemlenmesini zorlaştırmaktadır.

Bu çalışmada, belirli bir kızma sıcaklığı farkında etkinleşen kaynama odaklarının yoğunluğunun belirlenmesi için, kaynama odakları yoğunluğu ve kızma sıcaklığı farkı arasında, deney verilerine eğri uydurularak bir ilişki kurulmuştur. Bulunan sabitler, modeli yarı-amipirik yapmaktadır.

Bu bölümde verilen denklemler kullanılarak her ısı geçiş mekanizmasının toplam ısı akısı içindeki payını tahmin etmek mümkündür. Önerilen modelin sonuçları Bölüm 6.5 'te verilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde kaynama çalışmalarının yapıldığı deney tesisatı tanıtılmış ve deneylerin yapılışı hakkında bilgi verilmiştir. Deneylerde kullanılan ölçüm yöntemleri ve alınan ölçümlerin değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur.

4.1 Deney Düzenegi

Kaynama yüzeyinde oluşan kabarcıkların oluşma, büyüme ve yüzeyden ayrılma evrelerinin incelendiği deney düzenegi Şekil 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.1 : Deney düzenegi.

Düzenek; test bölümü, güç kaynakları ve ölçüm sistemleri olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Test bölümü; kaynama havuzu, ana ısıtıcı (23 kW), yardımcı ısıtıcılar (224 W), yoğuşturucu ve termostatik su banyosundan oluşmaktadır. Ana ısıtıcı için AC (250Vx10A), yardımcı ısıtıcı için DC (300Vx5A) güç kaynakları kullanılmıştır. Ölçme sistemi ise hızlı kamera, uzun mesafe mikroskobu, veri toplama sistemi ve iki adet bilgisayardan oluşmaktadır. Çalışma sıvısı olarak saf suyun kullanıldığı deneyler atmosferik basınç koşullarında yapılmıştır. Deney düzenegi şematik olarak Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

4.1.1 Kaynama havuzu

Kaynama yüzeyinin optik yöntemlerle gözlemlenebilmesi için, borosilikat camlardan hazırlanan yan yüzeyler, paslanmaz çelikten imal edilen taban üzerine, yüksek sıcaklığa dayanıklı silikon ve alüminyum profiller kullanılarak yapıştırılmıştır. Doymuş kaynama koşullarının sağlanabilmesi için iç içe iki adet havuz şeklinde oluşturulan kaynama havuzu Şekil 4.3'te görülmektedir. İki havuzun arasındaki bölme yardımcı ısıtıcılar yerleştirilmiştir.

Kaynama havuzunun üstü 1 mm et kalınlığına sahip paslanmaz çelik sacın kenarlarından birer cm bükülerek hazırlanan kapak ile kapatılmıştır. Kapak üzerinde yardımcı ısıtıcılar, termoelemanlar ve yoğuşturucu giriş-çıkışları için gerekli bağlantıların yapılması için uygun çapta delikler açılmıştır. Kapaktan olan ısı geçişinin azaltılması amacıyla kapağın üstü yalıtım malzemesi ile kapatılmıştır.

Kaynama yüzeylerinde oluşan buharın yoğuşup yeniden havuza dönmesini sağlamak için cam bir yoğuşturucu kullanılmış ve bu şekilde buharlaşma ile olan sıvı kaybı en aza indirilmiştir. Yoğuşturucuya gelen soğutma suyu termostatik su banyosu ile oluşturulan kapalı çevrimle sağlanmıştır.



Şekil 4.3 : Kaynama havuzu.

Havuzun su sızdırmazlığı için yüksek sıcaklığa dayanıklı silikon ve contalar kullanılmıştır.

4.1.2 Kaynama yüzeyleri

Deneyisel çalışmalar için 6 mm çapındaki %99.99 saflıktaki elektrolitik bakır çubuklar üzerine 30 mm çapında ve 24 mm yüksekliğinde bakalit kaplanmıştır. Bakalite alınan numuneler Bölüm 4.3.1 'de verilen imalat resmine göre imal edilmiştir.

Kaynama yüzeyleri dört farklı gruba ayrılmaktadır.

- Parlatılmış yüzeyler
- Yüzey üzerinde oluşturulmuş bir oyuk
- Yüzey üzerinde, aralarında 2 mm mesafe olan oyuklar
- Yüzey üzerinde, aralarında 0,5 mm mesafe olan oyuklar

Silindirlerin üst yüzeyi zımparalama ve parlatma ünitesinde, akan su altında sırasıyla 180, 240, 320, 600, 1000 ve 1200 numaralı silisyum karbür zımpara kağıtlarıyla yüzeydeki izler kayboluncaya kadar temizlenmiş ve durulanarak parlatmaya hazır hale getirilmiştir. Parlatma aşamasında çuha ve elmas macunu kullanılarak 0.4 µm yüzey

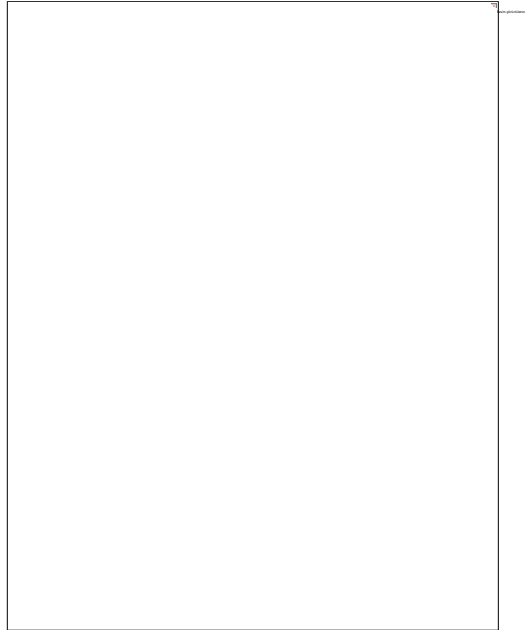
pürüzlülüğüne sahip yüzeyler elde edilmiş ve oyukların oluşturulması için hazır hale getirilmiştir. Parlatma işlemi sırasında numune ile çuha arasında sürtünmeden kaynaklanabilecek ısınmayı engellemek için su kullanılmıştır. (Şekil 4.4)



Şekil 4.4 : Ölçme silindirleri.

Temizlenip parlatılan yüzeyler üzerinde kaynama odaklarının oluşturulması için Şekil 4.5’de görülen düzenek hazırlanmıştır. Sivri uçlu paslanmaz çelik iğne düzeneğe yerleştirilip üzerine sabit kuvvet uygulanarak oyuklar oluşturulmuştur.

İlk olarak merkezinde bir adet oyuk bulunan yüzey hazırlanmıştır. Farklı bir yüzey üzerinde, aralarında 2 mm mesafe bulunan ve yedi adet oyuktan oluşan altıgen yapıda bir desen oluşturulmuştur. Oyuklar arasındaki mesafe 0.5 mm olacak şekilde bir yüzey daha hazırlanmıştır. Oyukların yerleşimi şematik olarak Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.5 : Oyukların oluşturulması için hazırlanan düzenek.

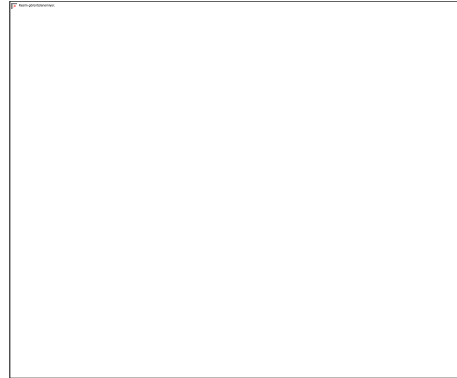


Şekil 4.6 : Yüzeydeki oyukların yerleşimi.

Oluşturulan oyuk geometrileri optik mikroskop ile görüntülenmiş ve çap-derinlik ölçümleri alınmıştır. Mekanik yöntemlerle oluşturulan konik oyukların çapları 180 ± 30 μm aralığında değişirken, derinlik 160 ± 10 μm arasındadır. Modellenen oyuk için kesit görüntüsü ve mikroskoptan alınan görüntü sırasıyla Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7 : Yüzey üzerinde oluşturulan oyuklar için kesit görüntüsü.



Şekil 4.8 : Oyuk ağzı.

Hazırlanan yüzeyler deneylerden önce aseton ve etanol ile temizlenip, saf su ile durulanmıştır.

Kaynama yüzeyleri, ölçme silindirinin alt yüzeyinin ısıtıcı bloğa vidalanmasıyla ısıtılmaktadır. Yüzey sıcaklığı, ölçme silindirinin merkezine kadar (10 mm) 0.7 mm çapında delinen deliklere 2 delikli seramik porselen izolatörler içinde yerleştirilen 3

adet K-tipi (Nikel-Krom ve Nikel-Alüminyum) termoelemanndan alınan sıcaklık ölçümleri kullanılarak ekstrapolasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır. Sıcaklık değerleri aynı zamanda ısı akısının belirlenmesinde de kullanılmıştır.

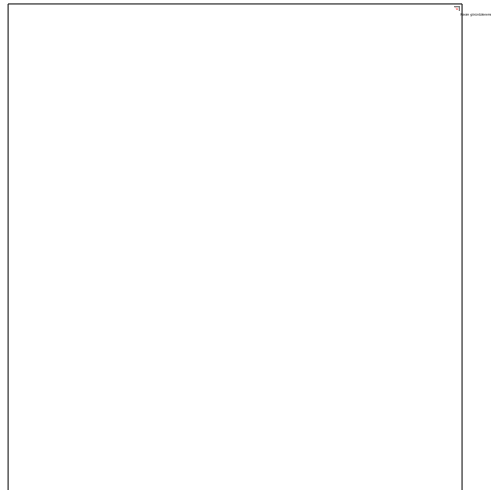
Alt yüzeyi ısıtıcı bloğa vidalanan ölçme silindirin üst yüzeyi ise 34x74x3 mm boyutlarında hazırlanan bir plaka yardımıyla kaynama havuzuna monte edilmiştir. Plaka ve bakalit yüzey arasındaki sızdırmazlık, hazırlanan silikon contalar ile sağlanmıştır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Isıtıcı yüzeylerin havuza monte edilmesi için kullanılan plaka ve contalar.

4.1.3 Ana ve yardımcı ısıtıcılar

Kaynama yüzeylerinin ısıtılması için 10 mm x 750 mm x 0.04 mm boyutlarındaki manganin direncin 13 adet bakır plaka arasına sıkıştırılmasıyla bir ısıtma bloğu hazırlanmış ve ana ısıtıcı olarak kullanılmıştır. Ana ısıtıcı, 15 V x 200 A ayarlanabilir bir doğru akım güç kaynağı tarafından beslenmiştir. Isıtıcıdan geçen akımın ayarlanabilir olması ısı akısının kontrol edilebilir olmasını sağlamıştır.



Şekil 4.10 : Isıtma bloğu (Ana ısıtıcı).

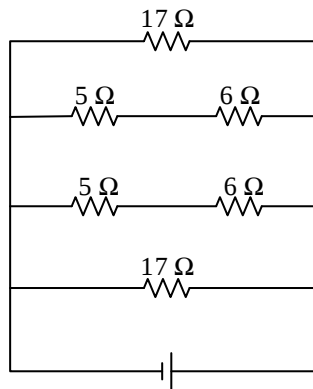
Elektrik izolasyonu için plakaların arasında mikanit levhalar kullanılmıştır (Şekil 4.11). Bakır plakaya yerleştirilen bir termoeleman ile blok sıcaklığı sürekli olarak takip edilmiştir.



Şekil 4.11 : Elektrik izolasyonu için kullanılan mikanit levha ve bakır plakalar.

Isıtma bloğundan olan ısı kayıplarının en aza indirilmesi amacıyla bloğun etrafına seramik yününden yalıtım yapılmıştır.

İç çapı 3 mm, dış çapı 4 mm olan paslanmaz çelik borulardan imal edilen yardımcı ısıtıcıların içine silikon kılıf içinde direnç teli yerleştirilmiş ve magnezyum oksit tozuyla sıkıştırılmıştır. Borular havuz içinde kullanılacağı şekle büküldükten sonra uçları silikon ile kapatılmıştır. Hazırlanan yardımcı ısıtıcılar ile Şekil 4.12’de gösterilen devre kurulmuştur.



Şekil 4.12 : Yardımcı ısıtıcılar ile kurulan devre şeması.

Kurulan devre, ayarlanabilir bir güç kaynağı ile beslenerek 340 W gücünde bir ısıtıcı elde edilmiş ve havuz içinde kaynama için gerekli ısıl güç sağlanmıştır. (Maksimum çıkış gücü: 300Vx5A-DC)

Yardımcı ısıtıcılar deneye hazırlık aşamasında saf suyun içinde çözünmüş halde bulunan gazların uzaklaştırılması ve su sıcaklığının doyma sıcaklığına kadar ısıtılması için, deneyler süresince ise yan yüzeylerden doğal taşınım ile oluşacak ısı kaybının önlenerek doymuş kaynama koşullarının sağlanması için kullanılmıştır. Böylelikle ana ısıtıcılar tarafından sağlanan ısıнын tamamı kaynama olayında kullanılmıştır.

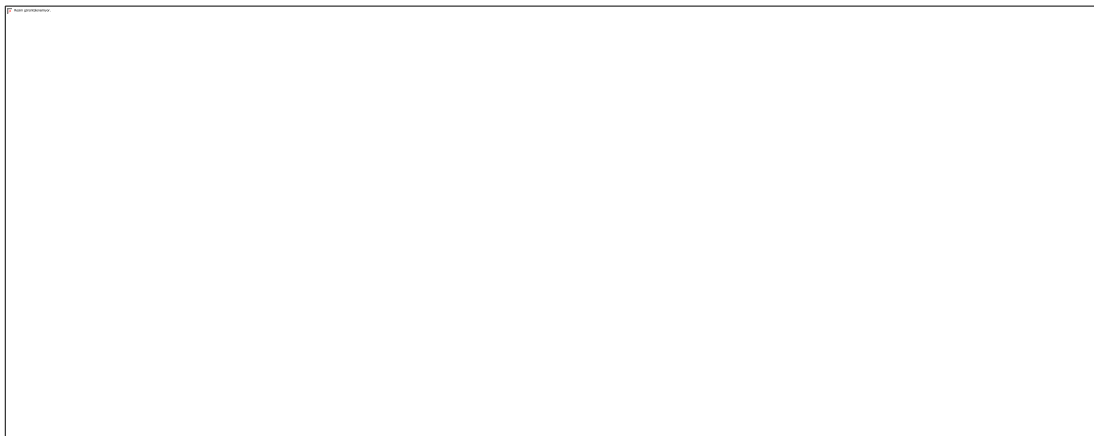
4.1.4 Görüntüleme sistemi

Kaynama olayı ve ısıtma yüzeylerinde oluşan kabarcık hareketleri yüksek hızlı kamera (Photron 512-PCI), uzun mesafe mikroskobu (K2 distamax) ve Sigma 105 mm f2.8 makro lens ile görüntülenmiştir.

Kameranın CMOS sensörünün en yüksek çözünürlüğü 512x512 pikseldir. Kamera en yüksek çözünürlükte (512x512) 2000 fps hızında görüntü alabilirken, düşürülmüş çözünürlükte (512x32) 32000 fps hızına kadar görüntü alabilmektedir. 16.7 msden 4 μ s aralığında değişen poz süresi (shutter) ise görüntüleme hızından (frame rate) bağımsız olarak hareket bulanıklığını ortadan kaldırır ve net görüntüler elde edilmesini sağlar.

Uzun mesafe mikroskobu, güvenli mesafeden kaynama yüzeylerinin yakın çekimlerinin yapılabilmesine imkan sağlamıştır. Mikroskop ile birlikte 95-122 mm çalışma aralığı olan CF-3 lensi kullanılmıştır. Makro lens ise doğrudan kameraya bağlanarak kaynama yüzeyinin tamamının görüntülenmesini ve kabarcıklar arasındaki etkileşimin gözlemlenmesini sağlamıştır.

Deneyisel çalışmalarda 2000/4000 fps hızlarında kaydedilen görüntüler bilgisayara aktarılmıştır. Aydınlatma için DedoCool COOLH ticari aydınlatma sistemine bağlı olarak iki adet halojen lamba (maksimum güç:500W) kullanılmıştır (Şekil 4.13).



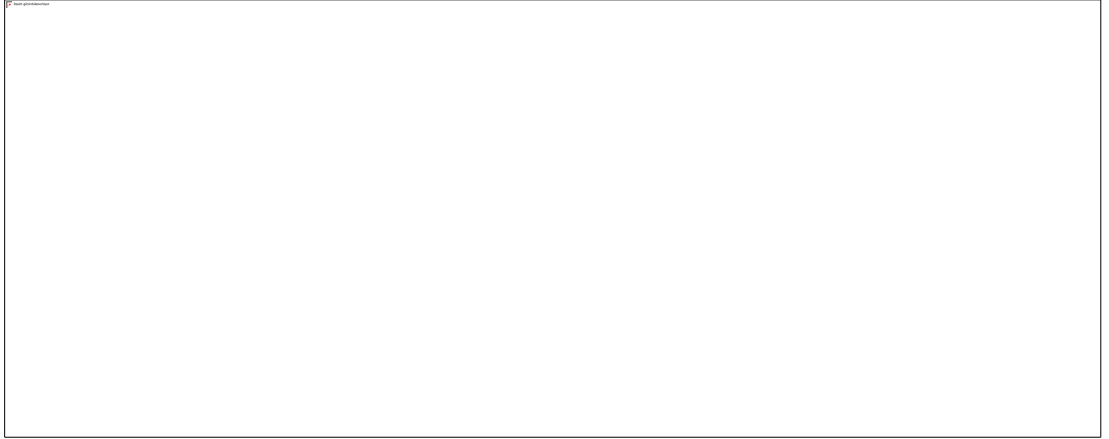
Şekil 4.13 : Görüntüleme sistemi.

4.2 Deneylerin Yapılışı

Deney tesisatını oluşturan elemanların montajı tamamlandıktan sonra havuzun içi, kaynama yüzeyleri, havuz içinde kullanılan ısıtıcı ve termoelemanlar, aseton ve saf su kullanılarak üzerlerindeki toz ve kirden arındırılmıştır. Temizleme işlemleri bittikten sonra kaynama havuzu bir litre saf su ile doldurulmuştur.

Deneylere başlamadan önce havuzdaki suyun, içinde çözünmüş halde bulunan gazlardan arındırılması ve kaynama yüzeylerinin yaşlandırılması için tesisat iki saat süreyle çalıştırılmıştır. Yardımcı ısıtıcılar ile kaynama havuzunda doyma koşulları sağlanmış ve daha sonra ısıtıcı bloğu besleyen doğru akım kaynağının gücü istenen değere ayarlanmıştır. Isıl gücün ayarı, akım ve gerilim değerlerinin ölçümleri kullanılarak yapılmıştır.

Deneyin yapılacağı ısı akısında, sürekli rejim şartlarına ulaşıldığı andan itibaren veri toplama sistemi ile tüm sıcaklık ölçüm noktalarından alınan değerler onar saniye aralıklarla izlenerek sıcaklık değerlerinin zamanla değişmediği ve dalgalanmaların azaldığı görüldükten sonra yarım saat süreyle veri kaydı yapılmıştır (Şekil 4.14). Kaydedilen değerler kontrol edilerek, çalışma noktasının kaynama eğrisi üzerindeki konumu belirlenmiştir.



Şekil 4.14 : Kaydedilen sıcaklık değerleri.

Tekrar deneyleri yapıp, sıcaklık ölçümleri ve görüntü kayıtları tamamlandıktan sonra ana ısıtıcının gücü bir sonraki deney için yeni değere ayarlanarak işlemler tekrarlanmıştır.

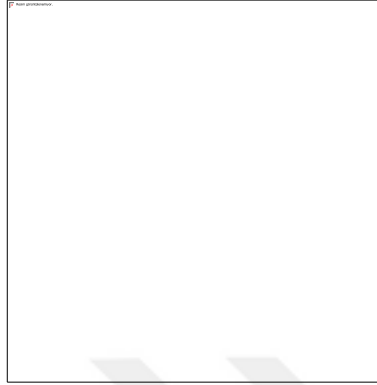
4.3 Kullanılan Ölçüm Yöntemleri ve Verilerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, deneyde kullanılan uzunluk, sıcaklık ve çap değerlerinin ölçümü ile ısı akısı ve frekans hesabı yöntemleri anlatılmıştır.

4.3.1 Uzunluk ölçümleri

Ölçme silindirindeki sıcaklık ölçüm deliklerinin eksenleri ve kaynama yüzeyi arasındaki mesafeler Mitutoyo marka bir kumpas ile ölçülmüştür.

Deliklerin ölçme silindiri üzerindeki konumları Şekil 4.15'te verilmiştir.



1 ve 4 numaralı termoelemanlar için sıcaklık ölçüm noktası

2 ve 5 numaralı termoelemanlar için sıcaklık ölçüm noktası

3 ve 6 numaralı termoelemanlar için sıcaklık ölçüm noktası

Şekil 4.15 : Termoelemanların ölçme silindiri üzerindeki konumları.

Uzunluk ölçmelerindeki belirsizlikler, kumpasın hassasiyetinden kaynaklanmaktadır.

4.3.2 Sıcaklık ölçümleri

Kaynama yüzeylerinin bulunduğu bakır çubukların, ana ısıtıcının ve ortamın sıcaklığı K tipi termoelemanlar kullanılarak sürekli olarak takip edilmiştir.

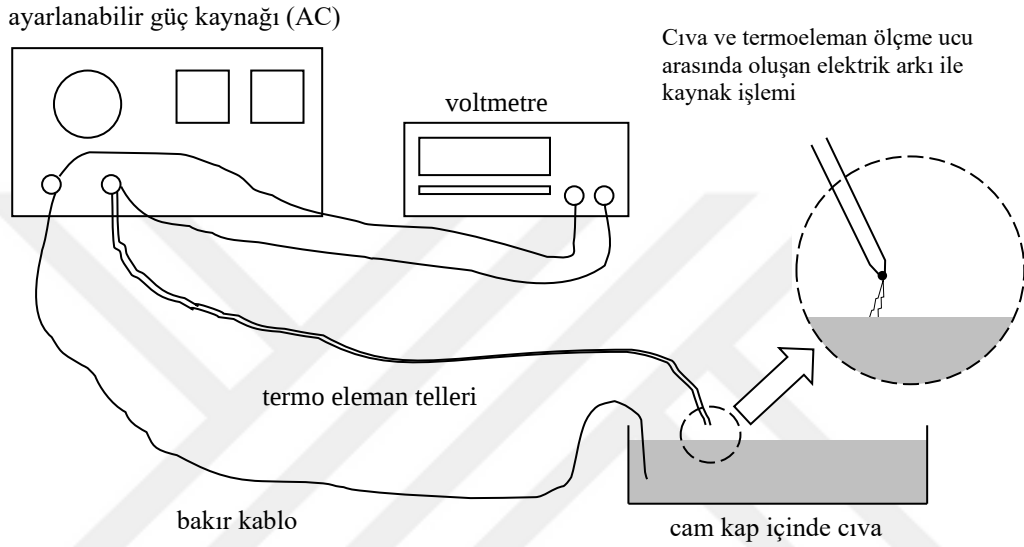
Toplamda on noktadan alınan sıcaklık ölçümlerinin konumları Çizelge 4.1'de verilmiştir. Ölçüm sonuçları Keithley 2750 DMM data acquisition kartı ile bilgisayara aktarılmıştır.

Çizelge 4.1 : Sıcaklık ölçümü alınan noktaların konumları.

Termoeleman No	Ölçme noktası
1	1 nolu ölçme silindiri eksen (z1)
2	1 nolu ölçme silindiri eksen (z2)
3	1 nolu ölçme silindiri eksen (z3)
4	2 nolu ölçme silindiri eksen (z4)
5	2 nolu ölçme silindiri eksen (z5)
6	2 nolu ölçme silindiri eksen (z6)
7	Isıtıcı blok
8	Kaynama havuzu, sıvı
9	Kaynama havuzu, buhar
10	Ortam

Ölçme silindirlerinde kullanılmak üzere hazırlanan termoeleman uçları, sıkıca kıvrılıp olabildiğince kısa kesildikten sonra Şekil 4.16'da görüldüğü gibi elektrik ark kaynağı ile birleştirilmiştir. Kaynak işleminde, çıkış gerilimi 30 Volta kadar ayarlanabilen bir alternatif akım güç kaynağı kullanılmıştır.

Kaynama havuzundaki su ve buharın sıcaklığının ölçülmesi için iç çapı 3 mm, dış çapı 4 mm olan paslanmaz çelik borudan proplar imal edilmiştir. Hazırlanan termoeleman uçları, paslanmaz çelik borunun ucuna kaynaklanmıştır.



Şekil 4.16 : Termoeleman ölçme uçlarının elektrik ark kaynağı ile birleştirilmesi [1].

Buhar sıcaklığı ölçümleri su seviyesinden yaklaşık 1 cm yüksekte yapılmıştır. Havuz içinde kaynamakta olan akışkanın sıcaklığı (T_d), anlık meteorolojik verilerden alınan barometrik basınç değeri kullanılarak doğrulanmıştır.

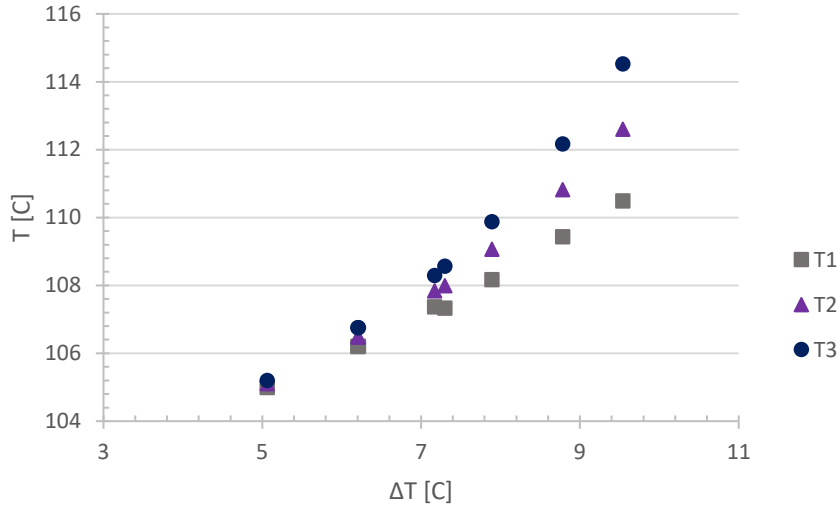
4.3.3 Yüzey sıcaklığı ve ısı akısının belirlenmesi

Yüzey sıcaklığı ve ısı akısının belirlenmesinde ölçme silindirinin merkezine kadar (10 mm) 0.7 mm çapında delinen deliklere yerleştirilen 3 adet K-tipi (Nikel-Krom ve Nikel-Alüminyum) termoelemandan alınan sıcaklık ölçümleri kullanılmıştır.

Ölçme silindirinde radyal yönde oluşacak ısı geçişi yalıtımla engellenmiştir.

Bakır çubuk boyunca ölçülen sıcaklıkların dağılımı Şekil 4.17'de görülmektedir. 1 ve 2 numaralı konumlar arasındaki sıcaklık gradyeninin 2 ve 3 numaralı konumlar arasındaki sıcaklık gradyenine yakın olması sebebiyle sıcaklık değişimi doğrusal olarak kabul edilebilir. Bu sebeple ısı geçişinin tek boyutlu olduğu kabulü yapılmıştır.

Yüzey sıcaklığı, termoelemanlardan alınan sıcaklık ölçümleri kullanılarak ekstrapolasyon yöntemiyle hesaplanmaktadır (Şekil 4.18).

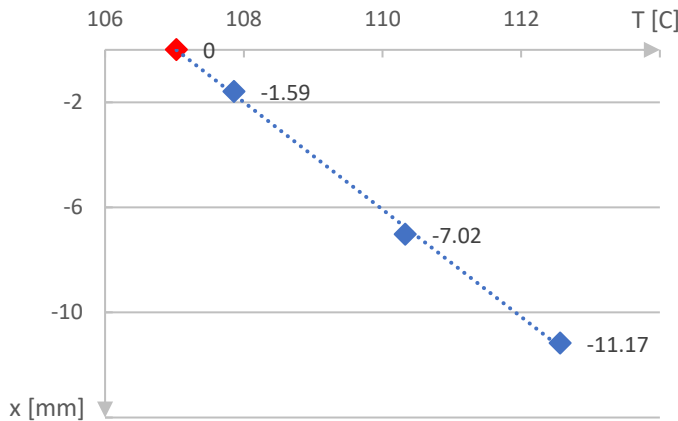


Şekil 4.17 : Bakır çubuk içindeki sıcaklık dağılımı.

Sıcaklık verileri, Şekil 4.18’de görülen biçimdeki bir grafiğe koyulmuş ve bu noktalardan en küçük kareler yöntemine göre geçirilen en uygun eğrinin yüzeyi ($x = 0$) kestiği sıcaklık değeri, yüzey sıcaklığı (T_y); aynı konumda eğrinin eğimi de, sıcaklık gradyeni (dT_y/dx) olarak alınmış ve,

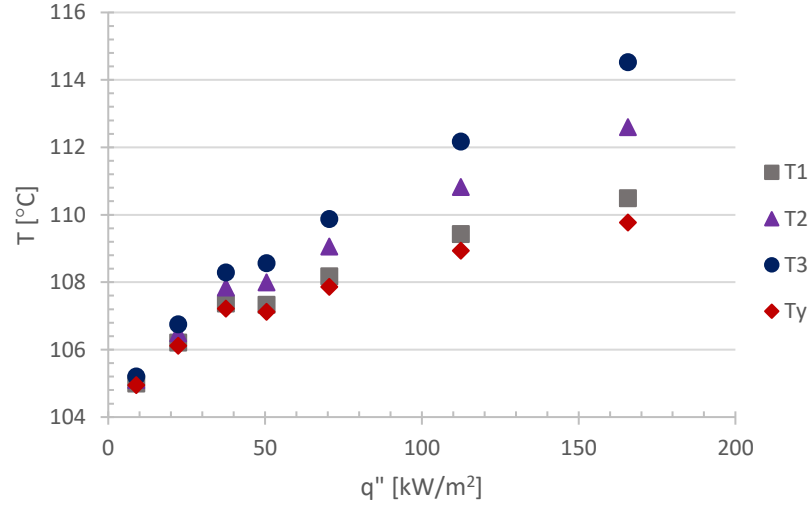
$$q'' = -k \frac{dT_y}{dx} \quad (4.1)$$

bağıntısında yerine koyulması ile yüzeydeki ısı akısı hesaplanmıştır. Buradaki k , ölçme silindiri malzemesinin (bakır) ısı iletim katsayısıdır.



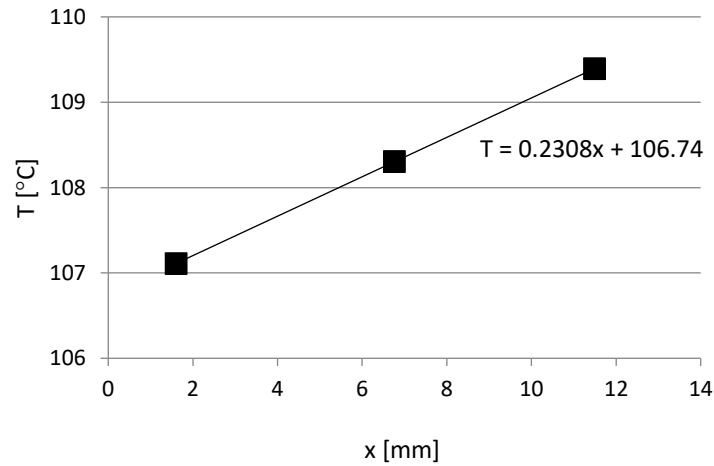
Şekil 4.18 : Bakır yüzey sıcaklığının belirlenmesi.

Düz yüzey için farklı ısı akılarında kaydedilen sıcaklık ölçümleri ve ekstrapolasyon yöntemiyle hesaplanan yüzey sıcaklığı değerleri Şekil 4.19’da sunulmuştur.



Şekil 4.19 : Ölçme silindirinden alınan sıcaklık ölçümleri ve hesap edilen yüzey sıcaklığı değerleri.

Isı akısının hesaplanmasında kullanılan grafikler için bir örnek Şekil 4.20’de sunulmuştur.



Şekil 4.20 : Isı akısının hesaplanması.

Hem yüzey sıcaklığı hem de ısı akısını hesaplamak için kullanılan grafiklerde ölçüm noktalarının lineer bir doğru üzerinde çıkması tek boyutlu ısı geçişi kabulünü doğrulamaktadır.

Hesaplamalarda ölçme silindirlerinin eksenel simetrik olduğu, bakalitten olan radyal ısı kayıplarının çubuk boyunca eşit olduğu ve bakırın ısı iletkenliğinin çalışılan sıcaklık aralığında sabit olduğu varsayımları yapılmıştır.

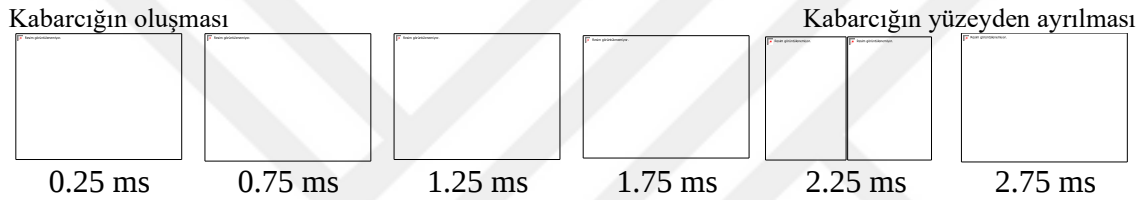
Böylece ısı akısı ile yüzeyin kızgınlığı (yüzey sıcaklığı ile kaynamakta olan doymuş akışkanın sıcaklığı arasındaki fark) arasındaki ilişki, yani kaynama eğrileri elde edilmiştir.

4.3.4 Görüntüleme çalışmaları ve görüntülerin değerlendirilmesi

Çalışmada kullanılan her yüzey için, farklı ısı akıları ve yüzey kızgınlığı değerlerinde kaydedilen görüntü ve videolardan kabarcıklanma çevrimi, kabarcık birleşmesi olayları gözlemlenmiş, kabarcık ayrılma çapı ve frekans ölçümleri yapılmıştır.

4.3.4.1 Kabarcıklanma çevriminin gözlemlenmesi

Bir kaynama odağında meydana gelen kabarcık, oluşma anından yüzeyden ayrılma anına kadar gözlemlenmiş ve kabarcıkların davranışı incelenmiştir. Isı akısının 20 kW/m^2 olduğu yüzeyde oluşan kabarcıklanma çevrimi Şekil 4.21’de görülmektedir. Sıralı görüntüler arasındaki zaman aralığı 0.5 ms , kabarcığın oluşma ve yüzeyden ayrılması arasındaki süre 2.75 ms ’dir.



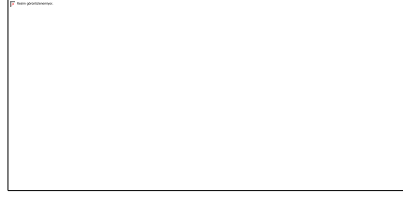
Şekil 4.21 : 20 kW/m^2 ısı akısında kabarcıklanma çevrimi.

4.3.4.2 Kabarcık ayrılma çaplarının ölçülmesi

Kabarcık büyümesi, ayrılma çapı ve frekansı gibi incelemeler hızlı görüntüleme sistemi ile kaydedilen görüntüler kullanılarak yapılmıştır.

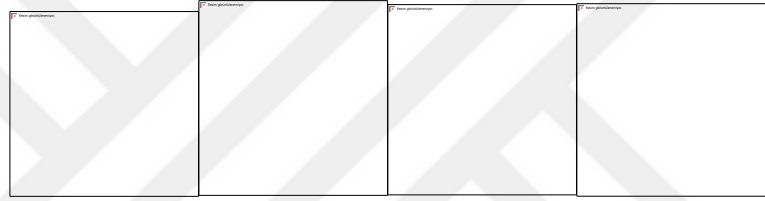
Çapın belirlenmesi için, deneylere başlamadan önce uzun mesafe mikroskobu ve makro lens ile deneylerde gözlem yapılacak mesafe ve görüntüleme değerlerinde (büyütme oranı, diyafram) 0.98 mm çapa sahip bir matkap ucundan referans bir görüntü alınmış ve bir pikselin uzunluğu hesaplanmıştır. Bu değer uzun mesafe mikroskobu için $6 \text{ }\mu\text{m}$ iken, makro lens için $22 \text{ }\mu\text{m}$ ’dir. Kullanılan referans görüntüde piksel değerini milimetreye dönüştürecek katsayı belirlendikten sonra, her ısı akısı değerinde oluşan kabarcığın büyüme süresi boyunca ve yüzeyden ayrıldığı andaki görüntüsü üzerinde ölçüm alınarak kabarcık ayrılma çapı belirlenmiştir. Kalibrasyon için kullanılan uç Şekil 4.22’de görülmektedir.

Çapın ölçüleceği kabarcıklanma çevrimi belirlendikten sonra kabarcığın büyümesi ve yüzeyden ayrılması incelenmiştir.



Şekil 4.22 : Ölçümlerde kalibrasyon için kullanılan 0.98 mm çapa sahip uç.

Ayrılan kabarcığın geometrisi MatLab’de yazılan bir görüntü işleme kodu kullanılarak analiz edilmiştir. Hızlı kamera ile kaydedilen fotoğraflar Matlab’e aktarıldıktan sonra sadece ölçüm alınacak alanlar kalacak şekilde kırpılmıştır. Elde edilen görüntüler ikili sistem görüntü tipine çevrilerek kabarcıklar siyah beyaza dönüştürülmüştür. Görüntüdeki parazitler ve yansımalar kaldırıldıktan sonra Canny metodu uygulanarak kabarcık geometrisi ve sınırları belirlenmiştir. Piksel sayısı olarak alınan sonuçlar milimetreye çevrilmiştir.



Şekil 4.23 : a) Kabarcık görüntüsü b) Kabarcığın binary görüntüsü c) Görüntüdeki parazitlerin kaldırılması d) MATLAB ile elde edilen kabarcık geometrisi.

Her ısı akısı için yüzeyden sıralı olarak ayrılan otuz kabarcığın çap ortalaması alınarak kabarcık ayrılma çapı belirlenmiştir. Özellikle yüksek ısı akılarında birleşmiş ve küresel formdan farklı şekle sahip kabarcıklar için ayrılma çapı eşdeğer çap olarak belirlenmiştir. Eşdeğer çap, yüzeyden ayrılan kabarcık ile aynı hacme sahip bir kürenin çapı olarak hesaplanmıştır. Benzer uygulamalar farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda mevcuttur. [47, 124–126]

Her ısı akısı için belirlenen kabarcık çapları, yapılan kontrol deneylerinin ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Deney düzeneğinden ve yapılan ölçümlerden kaynaklanabilen hatalar ve ayrılma çapının rasgele kabarcık etkileşimlerinden büyük oranda etkilenmesi sebebiyle tam olarak aynı sonuçların elde edilmesi mümkün olmamıştır fakat %3 mertebesinde benzer sonuçlara ulaşılmıştır.

Kabarcık çapı için yapılan ölçümlerdeki belirsizlik, kabarcığın ayrıldığı anın tam olarak seçilememesi, kalibrasyon yapılan mesafenin doğruluğu ve ölçme hatalarından kaynaklanmaktadır.

Kabarcığın hareketini izlemek için her 0.25 milisaniyede bir fotoğraf kaydedildiğinden yüzeyden ayrılma anının belirlenmesindeki hata düşüktür. Kabarcıklanma çevriminde kabarcık büyüme hızının giderek yavaşlaması ile birlikte ayrılma anındaki iki görüntü arasındaki çap farkı 30 μm mertebelerindedir. Kalibrasyon için alınan ölçümlerde ise ölçme hatası 2 pikseldir. Bu değerin hesaplanan çapa etkisi uzun mesafe mikroskobu ve makro lens ile alınan görüntüler için sırasıyla 12 μm ve 44 μm 'dir. Kabarcıklanmanın ısıtma yüzeyinin farklı noktalarında oluşması sebebiyle 3 mm mesafenin (ısıtma yüzeyi yarıçapı) görüntü boyutuna etkisi ise 1 metrelik görüntü kayıt uzaklığı için %0.03'tür. Sonuç olarak bir kabarcığın büyümesindeki toplam hata en küçük ve en büyük ayrılma çapları için ortalama %3 olarak hesaplanmıştır.

4.3.4.3 Kabarcık ayrılma frekansının belirlenmesi

Kaynama çalışmalarında kabarcıklanma frekansının belirlenmesi için kabarcık sayma yöntemi tanımlanmalıdır. Literatürde bulunan çalışmalarda sayma yöntemlerinin birbirinden farklılık göstermesi, artan ısı akısı/kızma farkı ile birlikte kabarcıklanma frekansının arttığı ya da azaldığı yönündeki gözlemlerin farklı olmasını açıklamaktadır.

Bu çalışmada frekans ölçümleri için, bir kabarcıklanma odağında art arda oluşan en az 20 kabarcıklanma çevrimi incelenmiştir. Frekans belirlenirken ayırık kabarcıkların olduğu ısı akılarında, odaktan tek kabarcığın çıkış sayısı, kabarcıkların birleştiği durumda ise kabarcığın yüzeye temasının tamamen bittiği andaki kabarcık sayısı dikkate alınmıştır. Komşu odaklarda rasgele oluşan birleşme olayı, frekans değerlerinin ortalamasına bakıldığında büyük bir dağılım olduğunu göstermektedir.

Birleşme olayının yanı sıra odakta büyüüp ayrılan bir buhar kabarcığı, sıvı içinde düzensizliklere neden olur. Kabarcığın ardında oluşan girdabın hızı (wake velocity) çevrede ve aynı odakta oluşacak olan kabarcıkların hareketini etkiler. Düşük ısı akılarında yüzeyden az sayıda kabarcığın ayrılması sebebiyle sıvı içindeki hareketin frekansa etkisi azdır. Yüksek ısı akılarında sıvı ve katı yüzeyden olan ısı geçişinin artması, daha fazla buharlaşmanın olması, birleşme olaylarının artması ve yüzeyden daha fazla kabarcığın ayrılması sıvı içindeki çalkantıları artırır. Bu durum da frekans etkiler. Örnek bir frekans hesabı için aynı odakta art arda oluşan 5 kabarcık için kabarcıklanma çevrimi Şekil 4.24'de verilmiştir. Görüntülerde her kabarcık için

[illegible]

Şekil 4.24 : Aynı odakta art arda oluşan 5 kabarcıklanma çevrimi.



5. SAYISAL MODEL

Deneysel yöntemler kullanılarak kabarcık ile ilgili gözlemler yapılabilse de, kabarcık dinamiğinin tam olarak anlaşılabilmesi için sayısal yöntemlerin kullanılması da gereklidir. Açık kaynaklarda da bahsedildiği üzere kabarcık dinamiğinin ve sürekli değişen sıvı-buhar arayüzeyinin modellemesinin karmaşık olması sebebiyle, incelenen olaylarda büyük ölçüde sadeleştirme yapılarak konu hakkında temel bilgiler elde edilebilir ve üç boyutlu olayların anlaşılabilmesi konusunda kolaylık sağlanır.

Bu çalışmada, havuz kaynamasında konik bir oyukta oluşan kabarcıklanma olayı ve dinamiği sayısal olarak incelenmiştir. Yapılan sayısal çalışmanın amacı; deneysel çalışma ile elde edilen kabarcık oluşum mekanizması, kabarcık şekli ve çapının zamana bağlı değişiminin, FLUENT yazılımında elde edilen sonuçlar ile benzerliğini incelemektir. Bu amaçla 25, 44, 55 ve 67 kW/m² ısı akıları için sayısal çözümleme yapılmıştır.

Kaynama olayı, sıvı ve buhar fazlarının birbirine karışmadığı bir sıvı (su) için iki fazlı akış problemi olarak ele alınmıştır. Sıvı ve buhar fazlarını birbirinden ayıran arayüzey ise ince bir yüzey olarak ifade edilmiştir. Modelleme çalışmalarında bu arayüzeyin sınırları, arayüzeyde gerçekleşen faz değişimi, sıvı ve buharın hacimsel oranları, mikro tabaka kalınlığı ve toplam ısı geçişi göz önüne alınır. Çözüm için kullanılan yöntemlerin birbirine göre üstünlükleri ve eksik yanları bulunmaktadır.

Sayısal yöntem olarak Bölüm 2.6 'da bahsedilen VOF ve level-set yöntemlerinin eksikliklerinin üstesinden gelmek için bu iki yöntemin birlikte kullanıldığı CLSVOF (Volume of Fluid-Level-Set) kullanılmıştır. Yapılan çözümlemeler ile kaynama yüzeyi üzerinde oluşturulan yapay oyukta oluşan buhar kabarcıklarının çapı, şekli ve davranışı hakkında bilgi edinilmiştir. Modelleme sonuçları deneysel veriler ile birlikte değerlendirilerek, kullanılan yöntemin geçerliliği değerlendirilmiştir.

Modelleme çalışmalarında korunum denklemlerinin her hücre için çözülmesi için sayısal ayrıklaştırma yapılması gerekmektedir. Ayrıklaştırma işlemi genel

denklemlerin cebirsel formda yazılmasını sağlar, böylelikle denklemler sayısal olarak çözümlenebilir. Bu çalışmada ikinci dereceden ayrıklaştırma işlemi kullanılmıştır.

Tez kapsamında ANSYS FLUENT yazılımının içerisinde hazır olarak yer alan ve Lee (1979)'nin çalışmalarına dayanarak hazırlanan fiziksel modelde kaynamanın tüm sıvı içerisinde gerçekleştiği göz önüne alınmaktadır. Bu çalışmada tek bir odaktan çıkan buhar kabarcığının oluşumunun incelenmesi amaçlandığından kaynamanın tüm sıvı kütlelerinde gerçekleşmesi, tek bir odağın incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle faz değişimi modeli değiştirilerek, değişimin ara yüzeyle sınırlandırılması sağlanmıştır. Oluşan kütle geçişi ile ilgili modellemelerde fonksiyonlar UDF ile tanımlanmıştır.

Faz değişimi, sıvı halde bulunan akışkan sıcaklığının doyma sıcaklığının üstüne çıkması sonucunda gerçekleşen bir olaydır. Kızma farkı olarak adlandırılan bu iki sıcaklık arasındaki fark, faz değiştiren kütle miktarı ve faz değişimi hızını etkileyen bir parametredir. Sıvı-buhar arayüzeyinde gerçekleşen kütle geçişi, faz değişimi ve özgül hacmi artan sıvı, odakta oluşan buhar kabarcığının büyümesine sebep olur. Sıvı hacminin buhar fazına geçmesi sonucu akış içindeki sıvı-buhar hacmi oranı değişir ve sıvı-buhar molekülleri arasında oluşan moleküler çekim kuvvetlerinin etkisiyle arayüzey şekillenir. Kabarcık içindeki buhar basıncı ve yüzey kuvvetlerinin denge hali ile kabarcık şekillenir.

Kaynama olayına etki eden bir diğer faktör de katı ile sıvı arasındaki temas açısıdır. Kullanılan yöntemde temas açısı sabit olarak alınmıştır.

5.1 Yürütücü Denklemler ve Yapılan Kabuller

Hız ve sıcaklık dağılımının belirlenebilmesi için korunum denklemleri sayısal olarak çözümlenmiştir. Akış alanını belirlenmede kullanılan denklemler; süreklilik, momentum ve enerji denklemleridir. Bu bölümde verilen denklemler her iki faz için de geçerlidir [127].

Çözümlerin doğruluğunu koruyan aynı zamanda da uygulamayı kolaylaştıran bazı kabuller yapılmıştır. İlk olarak akışkan özelliklerinin her zaman doyma koşullarında ve sabit olduğu varsayılmıştır. Akışkan özelliklerinin sıcaklıkla değişimi oldukça küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Akışkan hızı Mach sayısının çok altında olduğu için akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Sıvı ve buhar fazları birbirine karışmayan sıvılar olarak kabul edilmiştir. Kütle geçişi faz değişimiyle gerçekleşmektedir. Isı akısı

sıcaklık gradyeniyle orantılıdır ve Fourier iletim kanunu geçerlidir. Akış, viskoz ve laminar olarak kabul edildiğinden türbülans denklemleri çözümün dışında bırakılmıştır.

5.1.1 Süreklilik denklemi

Süreklilik denkleminin genel formu denklem (5.1)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5.1)$$

Sayısal çözümlemeyi kolaylaştırmak için yapılan, akışkan özelliklerinin doyma koşullarında ve sabit olması kabulüyle korunum denklemi aşağıdaki haliyle kullanılmıştır.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (5.2)$$

5.1.2 Momentum denklemi

Eulerian VOF modeli kullanıldığında çözüm alanı için ortak tek bir momentum denklemi çözülür ve elde edilen hız alanı fazlar arasında paylaşılır. Momentum denklemi fazların yoğunluk ve dinamik viskozite özelliklerinin hacimsel yüzdesine bağlıdır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.3)$$

Denklemde yer alan μ ve ρ simgeleri karışımın hacimsel ortalama değerleridir.

5.1.3 Enerji denklemi

Enerji denklemi fazlar arasında paylaşılmaktadır.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (5.4)$$

Eşitlikte bulunan enerji ve sıcaklık terimleri, fazların kütleli ortalaması olarak alınır.

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (5.5)$$

Eşitliklerde yoğunluk ve efektif iletkenlik katsayısı fazlar arasında paylaşılırken, S_h ısı akısı için kaynak terimlerini kapsar.

5.2 İki Fazlı Akış Modeli

İki fazlı akışın modellenmesi için fazların birbirine karışmadığı akışlar için uygun bir çözümleme yöntemi olan VOF yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşımda akışkanlar için tek bir momentum denklemi bulunur. Akış alanı fazlar arasında paylaşıldığı için momentum ve enerji denklemleri birlikte çözülür. Bu denklemlerde yer alan termodinamik özellikler için fazların hacimsel ortalamaları kullanılır.

Her hücredeki hacim yüzdeleri süreklilik denklemi ile takip edilir. Birden fazla akışkan için hacim yüzdelerinin süreklilik bağıntısı en genel hali ile denklem (5.6) da verilmiştir.

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (5.6)$$

Çözüm alanı içindeki her hücre akışkanlardan biri veya her ikisi ile doludur. Bir hücredeki akışkanların hacim yüzdeleri toplamı bire eşittir.

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (5.7)$$

Birincil fazın hacimsel yüzdesi denklem (5.7) den bulunur. Birincil fazın dışındaki bütün fazlar için hacimsel yüzde denklemi ayrı ayrı çözülür.

Sonlu hacimler yöntemiyle yapılan sayısal çözümlemede matematiksel model explicit yöntemle ayrıştırılarak sayısal model elde edilmiştir. Explicit çözüm yönteminde $t+1$ zamanındaki çözüm, bir önceki zaman olan t zamanındaki değerlere bağlıdır ve iteratif çözüme gerek duyulmadan doğrudan elde edilebilir. Bu yöntemde ANSYS Fluent'in standart sonlu farklar interpolasyon yöntemleri önceki zaman adımında hesaplanan hacimsel oranlarına uygulanır.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \quad (5.8)$$

Verilen denklemde n+1 çözülmekte olan zaman adımını, n bir önceki zaman adımını, $\alpha_{q,f}$ q fazının bir yüzeyindeki hacimsel yüzdesini, V hücre hacmini ve U_f yüzey normalindeki hız bileşenini temsil etmektedir.

5.3 Kaynama Modeli

Geçerli bir sayısal model oluşturabilmek için sıvı ve gaz fazları arasındaki kütle geçişi doğru hesaplanmalıdır. Bunun için de faz değişiminin doğru bir şekilde tanımlanması büyük önem taşımaktadır. Faz değişiminin hızı ve faz değiştiren kütle miktarı sıcaklık kızma farkına bağlı olarak belirlenir.

Yeterli miktarda gizli ısı geçişi gerçekleştiğinde sıvı hacmi faz değişimine uğrar ve akış içindeki sıvı-buhar hacmi oranları değişir. Bu değişim oranları yürütücü denklemler bölümünde verilen denklemlerle takip edilir.

Bu çalışma kapsamında FLUENT yazılımının içinde yer alan Lee (1979)'nin çalışmalarına dayanarak hazırlanan fiziksel model kullanılmıştır. Bu modelde sıvı buhar kütle geçişi, buhar taşınım denklemine göre hesaplanır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_b \rho_b) + \nabla \cdot (\alpha_b \rho_b \vec{V}_b) = \dot{m}_{sb} - \dot{m}_{bs} \quad (5.9)$$

Buharın su içinde kabarcıklar halinde toplanması ve belirli bir büyüklüğe ulaşana kadar yüzeyde tutunması yüzey gerilimi kuvvetleri sayesinde olur. Bu sebeple kabarcığın şekli ve yüzeyden ayrılabilmesini modelleyebilmek için yüzey gerilmeleri tanımlanmalıdır. Sıvı içinde bulunan buhar kabarcığında sıvı-buhar arayüzeyi kohezyon kuvvetleri etkisiyle şekillenir. Buharın yüzeyde tutunması ve yüzeyden ayrılması ise sıvı ve katı yüzey arasındaki adezyon kuvvetleriyle kontrol edilir. Büyüme evresinde kabarcığa etki eden yüzey gerilimi suyun kaldırma kuvvetini dengeleyerek kabarcığın yüzeyde tutunmasını sağlar.

Bu çalışmada ANSYS Fluent içinde hazır olarak bulunan ve Brackbill(1992)'nin çalışmalarına dayanarak hazırlanan “Continuum Surface Force(CSF)” modeli kullanılmıştır. Bu modelde arayüzeye dik yönde uygulanan kuvvet, ara yüzeydeki basınç değişimini sağlayan kuvvet olarak kabul edilir ve hesaplanan yüzey gerilimi kuvveti VOF yönteminin momentum denklemine kaynak terimi olarak eklenir.

Ara yüzeydeki basınç düşüşü, yüzey gerilim kuvveti katsayısı σ ve ortogonal yönde ölçülen R_1 ve R_2 yarıçapları ile ölçülen yüzey eğrilğine bağlı olarak hesaplanır.

$$P_2 - P_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1 - R_2} \right) \quad (5.10)$$

Denklemde bulunan P_1 ve P_2 arayüzeyin her iki tarafında bulunan akışkanların basınçlarını temsil etmektedir.

Momentum denkleminde eklenen kaynak teriminin iki fazlı akış için sadeleştirilmiş hali denklem (5.11) ile verilmiştir.

$$F = \sigma_{sb} \frac{\rho \kappa_b \nabla \alpha_b}{\frac{1}{2}(\rho_b + \rho_s)} \quad (5.11)$$

5.4 Çözüm Alanı

Bu bölümde, sayısal yöntemde kullanılan geometri, ağ yapısı, sınır şartları ve başlangıç koşullarını kapsayan çözüm alanı tanımlanmıştır. Sınır şartları ve başlangıç koşulları belirlenirken açık kaynaklarda önerilen yaklaşımlar ve yapılan deneysel çalışmanın sonuçları birlikte kullanılmıştır.

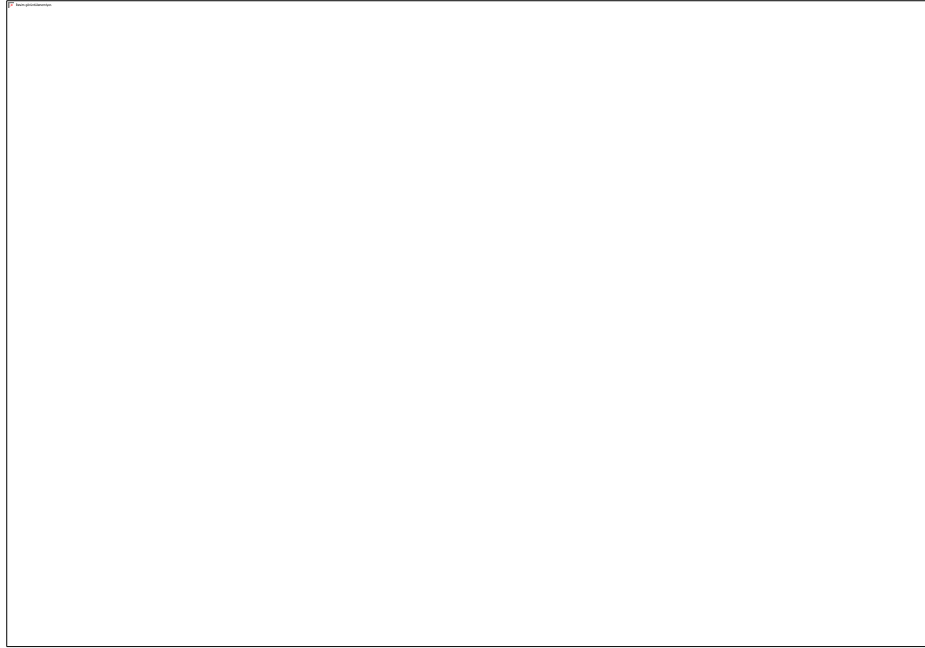
5.4.1 Model geometrisi

Çalışmada kullanılan ANSYS Fluent modeli, deney tesisatının iki boyutlu aksisimetrik modelidir. Oluşturulan geometri katı ve sıvı hacmi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Katı hacim için bakır, sıvı hacmi için su özellikleri tanımlanmıştır. Çözüm alanı durgun su ile doldurulmuş ve mikrotabaka oluştuktan sonra bir buhar kabarcığı eklenerek çözüm başlatılmıştır. Modelleme çalışmalarında öncelikle yüzeyde oyuk olmadığı durum için çözüm yapılmıştır. Daha sonra, kaynama yüzeyi üzerinde ağız çapı 150 μm ve derinliği 200 μm olan konik geometriye sahip bir oyuk oluşturulmuştur. Kabarcık oluşumu sadece bu oyukta gerçekleşmektedir ve yine bu odakta oluşan kabarcıklaşma çevrimi zamana bağlı olarak incelenmiştir. Analiz boyunca, havuzda bulunan su doyma sıcaklığındadır ve kaynama yüzeyine sabit ısı akısı uygulanmıştır. Akışkanların termodinamik özellikleri sıcaklığa bağlıdır. Yüzey gerilmeleri ve yoğunluk farklarından oluşan kaldırma kuvvetleri hesaplamalara dahil edilmiştir.

İncelenen çözüm alanı ve oluşturulan kaynama odağının geometrisi Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de boyutları ile birlikte verilmiştir.



Şekil 5.1 : İncelenen çözüm alanının boyut ve geometrisi.



Şekil 5.2 : Kabarcıklenme odağının boyut ve geometrisi.

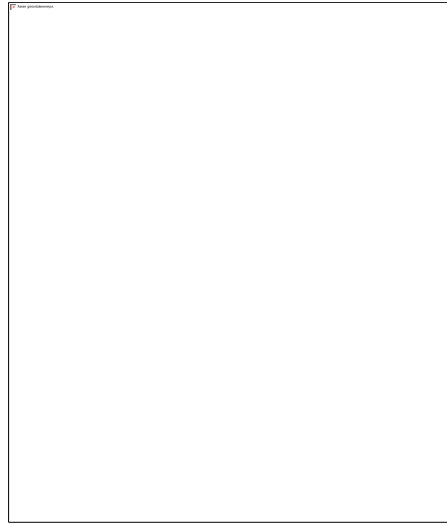
5.4.2 Çözüm ağının yapısı

Sayısal çözüm yöntemlerinde akış özellikleri, ısı geçiş miktarı ve faz değişimlerinin doğru bir şekilde öngörülebilmesi için çözümde kullanılan ağ yapısının önemi büyüktür. Ağda bulunan hücrelerin boyutları ve çözüm için seçilen zaman adımları Courant sayısı olarak adlandırılan bir boyutsuz sayı ile birbirine bağlantılıdır. Courant sayısı, sıvının çözüm ağında bulunan hücrelerde nasıl hareket ettiğini gösterir ve denklem (5.12) ile ifade edilir.

$$Co = \frac{V\Delta t}{\Delta x} \quad (5.12)$$

$Co \leq 1$ ise akışkan parçacıkları bir hücreden diğerine en fazla bir zaman adımı içinde geçerken $Co > 1$ olduğu durumda akışkan parçacığı her zaman adımında birden fazla hücreden geçerek çözümün ıraksamasına ve hatalı sonuçlara sebep olur.

Ağ yapısının oluşturulmasında deneysel çalışmada kaydedilen kabarcığın ayrılma çapı değeri referans olarak alınmış ve kabarcığın yüzeyden ayrılıp sıvı içindeki yükselmesi sırasında izlediği yol üzerinde olan bölgede daha sık olmak üzere sabit ağ yapısı kullanılmıştır. Buna göre odak üzerinde 1.2 mm çapında silindirik bir bölge tanımlanmış ve akış alanı boyunca kenar uzunluğu 0.025 mm olan altıgen elemanlar kullanılmıştır. Üç fazın birlikte bulunduğu odağa yakın alanlarda ve altıgen elemanların boyutu 0,01 mm olarak seçilmiştir. Çözüm süresinin kısılması amacıyla kalan bölgede 0.05 mm boyutlarında dörtgen ve altıgen elemanlar kullanılmıştır. Odağa yakın bölgelerde kurulan ağ yapısı Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : Ağ yapısının görünümü.

5.4.3 Sınır şartları ve başlangıç koşulları

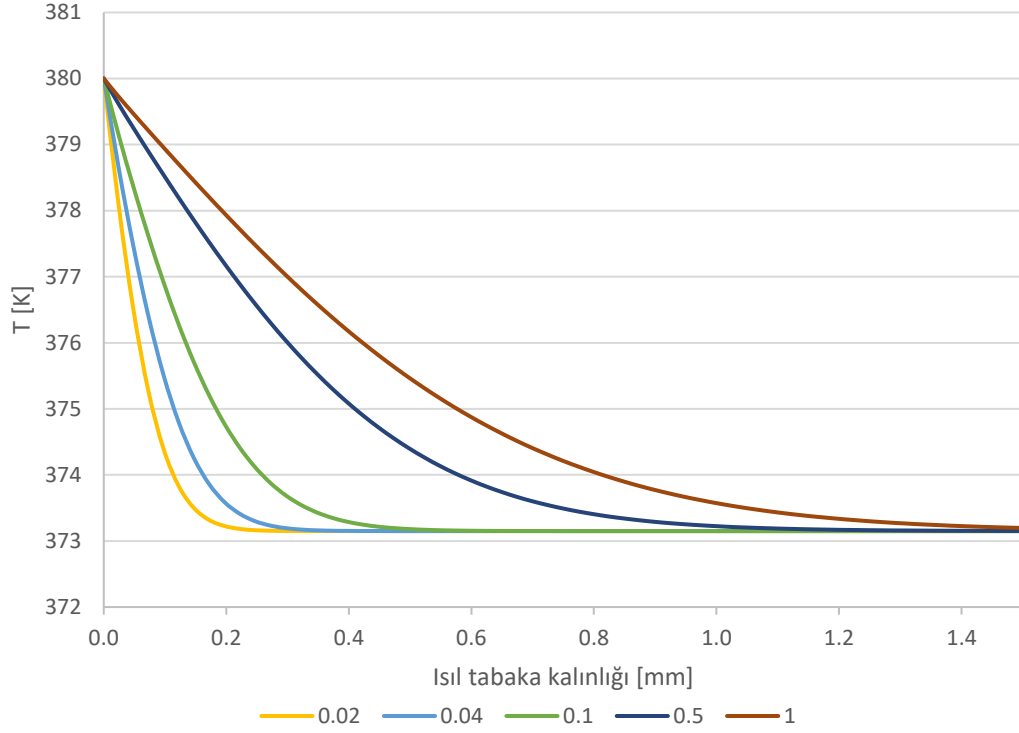
Bölüm 5.1 'de verilen denklemlerin çözülebilmesi için denklemlerde bulunan değişkenlerin akış alanına ait sınır koşullarının bilinmesi gereklidir. Çözüm için belirlenen sınır şartları aşağıda verilmiştir.

Akış alanı ekstenel simetrik olarak modellenerek, simetri eksenini akış alanının merkezi seçilmiştir. Havuzun yan duvarları için yalıtım sınır şartı uygulanmıştır. Giriş ve çıkış sınır şartları sırasıyla sabit ısı akısı ve atmosferik basınç olarak seçilmiştir.

Kabarcığın büyüme hızının, doğal taşınım sebebiyle oluşan yükselme hızından daha baskın olması dolayısıyla, yapılan analizlerde akışın ilk hızı durgun olarak kabul edilmiştir. Isıtıcı yüzey için sabit ısı akısı uygulanmaktadır ve akışkan ile akışkanın temas ettiği yüzeyde akışkan hızının sifira eşit olduğu kabulü (no-slip condition) yapılmıştır. Kabarcığın büyümesi için gerekli ısıyı karşılayan aşırı ısıtılmış tabakanın kalınlığı, ısı akısı ve zamana bağlı olarak değişmektedir. Kaynama yüzeyinin 380 K sıcaklığına sahip olduğu durum için ısıl sınır tabakanın gelişimi Şekil 5.4'de gösterilmiştir. İlk halde doyma sıcaklığında bulunan sıvı için ısıl sınır tabaka kalınlığının 0,4 mm'ye ulaşması yaklaşık 60 milisaniyede gerçekleşmektedir. Bu değer, çözümlemelerde ısıl sınır tabakanın gelişmesi için başlangıç değeri olarak kullanılmıştır.

Deneyisel sonuçlar ile ilişkili olarak belirlenen başlangıç koşulları, akışın ilk hızı, ısı akısı ve odakta bulunan buhar kabarcığının boyutlarıdır.

Yüzey sıcaklığının başlangıç değerinin belirlenebilmesi için analiz, sabit ısı akısı ile kabarcık başlangıcı olmayan durum için 60 ms süre için çalıştırılmıştır. Yüzeye 44 kW/m² ısı akısı uygulandığında yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi Şekil 5.4'te verilmiştir. Belirtilen ısı akısı değerinde yüzey sıcaklığı 379.96 K değerine ulaşmaktadır. Doyma sıcaklığının 373.15 K olduğunda bu değer 6.81 K kızma farkına karşılık gelmektedir. Bu değer, sonraki çözümlemeler için başlangıç değerini oluşturmaktadır.



Şekil 5.4 : Isıl sınır tabaka kalınlığının zamana bağlı değişimi ($T_y=380$ K).

5.5 Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon-UDF

Kütle geçiş modeli için UDF kullanılmıştır. Buharlaşma katsayısı belirlenerek buharlaşan kütlenin hesabı yapılmakta ve gizli ısı akısı hesaplanmaktadır.

5.6 Çözümleme Yöntemi

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi ile yapılan çalışmalarda, bilinmeyen her büyüklük için ayrı denklemler elde edilir ve korunum denklemleri hesaplama alanındaki her kontrol hacmine uygulanır. Çözülen denklemlerin lineer olmaması her değişken için hata artışı değeri oluşmasına sebep olur. Bu değişim her iterasyon ile azalır. Yapılan çalışmada kontrol parametresi olarak basınç ve momentum kullanılmıştır.

Birincil faz olarak su, ikincil faz olarak buhar olarak seçilmiş ve termodinamik özellikleri tanımlanmıştır. Tanımlanan özellikler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Sıvı-buhar arayüzünün davranışının modellenmesi için zamana bağlı kütlenin korunumu ve momentum denklemleri, yüzey gerilimi ve yer çekimi kuvvetinin etkileri göz önüne alınarak, PISO (pressure implicit splitting operator) algoritması ile çözülmüştür. PISO algoritması zamana bağlı sıkıştırılabilir akışların iteratif olmayan hesaplamaları için geliştirilmiş basınç-hız hesaplama yöntemidir. Basınç tabanlı

özüm yöntemi, kütleinin korunumu ve momentum denklemlerinin basınç dağılımı ile düzeltilmesini sağlar. Bu yöntem hız-basınç eşleştirmesi olarak adlandırılır.

Çizelge 5.1 : 100°C’deki sıvı su ve buharının malzeme özellikleri [35].

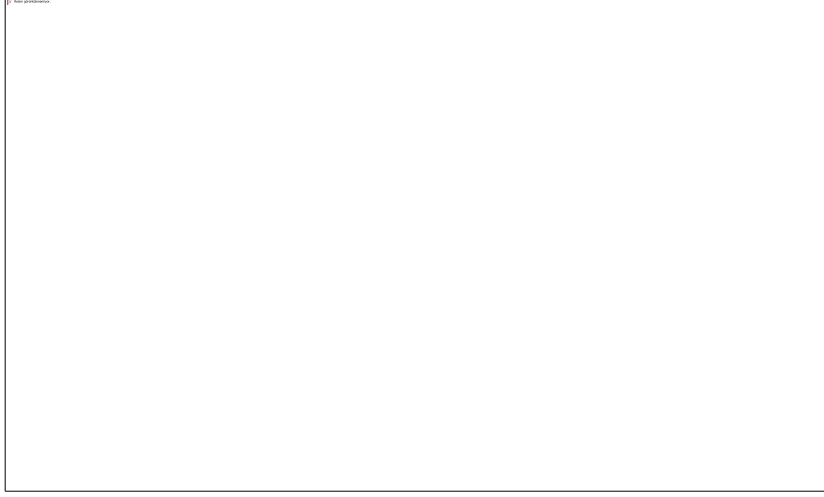
Özellik	Birim	Su	
		Sıvı	Buhar
Yoğunluk, ρ	kg/m ³	958	0.597
Özgöl ısı, C_p	J/kg.K	4220	2030
Isıl iletkenlik katsayısı, k	W/m.K	0.679	0.025
Viskozite, μ	Pa.s	2.77×10^{-4}	1.30×10^{-5}
Buharlaşma ısısı, h_{sb}	J/kg	2256000	
Yüzey gerilim katsayısı, σ	N/m	0.059	
Doyma sıcaklığı, T_d	°K	373.15	
Basınç, P	MPa	1.013	

Konum ayrıştırma (spatial discretization) yöntemi olarak en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Enerji ve momentum denklemleri second order upwind ile ayrıklaştırılmıştır. Simülasyonlar tüm bileşenler için toplam hata artığının (scaled residuals) 10^{-4} yakınsama kriterine ulaşmasına kadar devam ettirilmiştir.

Çözüm alanında mikrotabaka ve makro bölüm olmak üzere iki bölge gösterilmiştir. Mikro tabaka, kabarcığın altında bulunan tabakadan, makro bölge ise kabarcık ve kabarcığı çevreleyen sıvıdan oluşmaktadır.

Tüm çözüm alanı için standart başlangıç koşulları ile çözüm başlatılmıştır. Deneylerde kaydedilen sıcaklık ölçümleri kullanılarak hesaplanan ısı akısı, tek fazlı akış için yüzeyde sabit ısı akısı şartı olarak uygulanıp havuzdaki sıcaklık dağılımı ve yüzey sıcaklığı elde edilmiştir. Yüzey sıcaklığı değeri deneysel verilerle karşılaştırılmış, deneysel sonuç ile tutarlı olduğu durumda bir sonraki aşamaya geçilmiş aksi durumda sınır tabaka kalınlığı değiştirilerek yeniden çözümleme yapılmıştır.

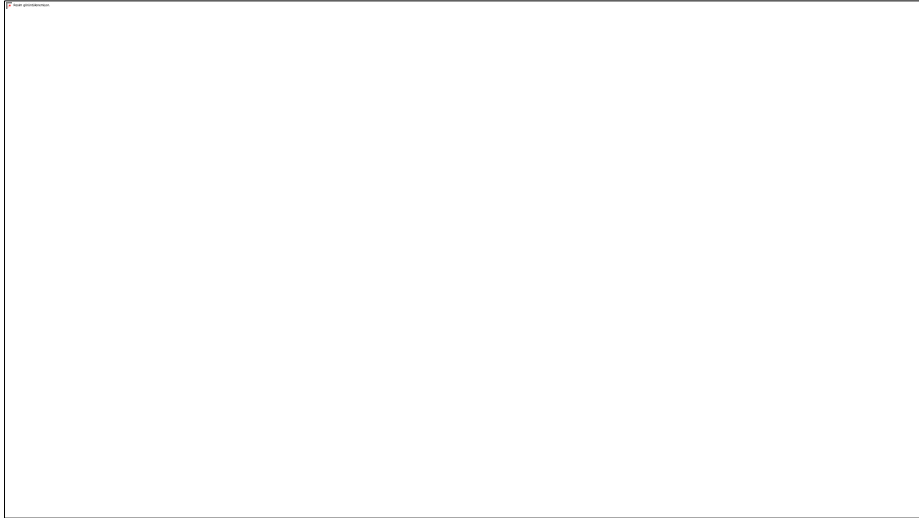
Isıl sınır tabaka kalınlığı arttıkça sıvı içinde buharlaşma için kullanılabilecek daha fazla ısı enerjisi bulunmaktadır. Sınır tabaka içindeki sıvının doyma sıcaklığının üstünde olması, sıvının arayüzeye yakın bölgelerde hızlı bir şekilde faz değiştirmesine ve gaz fazına geçebilmesine imkan sağlamaktadır.



Şekil 5.5 : Çözümün ilk adımı olarak oluşturulan mikrotabaka.

Tek fazlı akış probleminin çözümlenmesiyle elde edilen tam gelişmiş akış şartları, iki fazlı akış hesaplamaları için giriş şartı olarak kullanılmıştır [127]. Böylece yüzey boyunca uniform sıcaklık profili elde edilerek, aynı oyuktan çıkan önceki kabarcığın etkileri de ihmal edilmiştir.

Isıl sınır tabaka oluştuktan sonra çözüm alanında oyuk içine buhar fazı yama olarak eklenmiş ve çözüme devam edilmiştir. Eklenen buhar için hacimsel oran 1 olarak seçilmiştir. Sıvı fazının çözümlenmesiyle belirlenen ısıl sınır tabaka kalınlığı, iki fazlı akışın çözümlenmesinde başlangıç koşulu olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.6 : Oyukta büyümekte olan buhar kabarcığı.

Ayrık kabarcıkların olduğu rejimde, kabarcıkların davranışı ile ilgili tahmin ve modelleme çalışmaları sonucunda gerçeğe yakın değerler elde edilebilirken, ısı akısı artırıldıkça, kabarcıkların birbirleriyle etkileşiminin ihmal edilmesi bu durumu zorlaştırmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu bölümde, saf suyun kabarcıklı havuz kaynama karakteristiğinin incelenmesi ve analiz edilmesi amacıyla yapılan deneylerde kaydedilen sıcaklık değerleri, optik görüntüler ve sayısal modelleme sonuçları değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

6.1 Düz yüzey

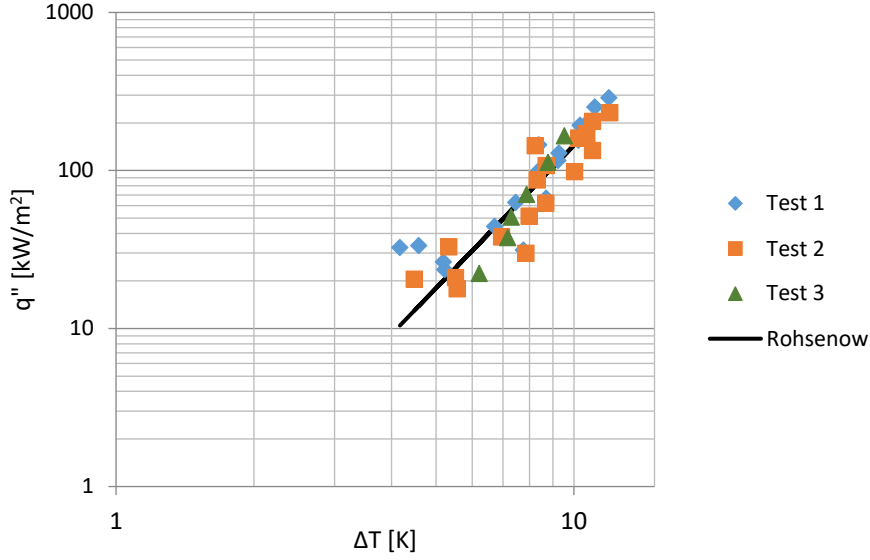
Düz yüzey için kaynama eğrileri oluşturulmuştur. Farklı ısı akıları için kabarcığın büyüme eğrileri, ayrılma çap ve frekansları elde edilmiştir. Görüntülerden ölçülen kabarcık çap ve frekans değerleri kaynaklarda önerilen ifadeler ve sayısal model ile karşılaştırılmıştır.

6.1.1 Kaynama eğrisinin elde edilmesi ve Rohsenow verileri ile karşılaştırılması

DeneySEL koşulların tekrarlanabilirliği ve sıcaklık ölçümlerinin güvenilirliğini test etmek amacıyla üç adet kaynama yüzeyi hazırlanmıştır. Tekrarlanan deneylerde sıcaklık ölçümleri kaydedilerek her yüzey için kaynama eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen kaynama eğrilerinden, benzer yüzey karakteristiğine sahip bakır yüzeylerin hazırlanabildiği ve deneySEL yöntemin tutarlı olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir.

Deney sonuçlarının doğrulanması için literatürde en çok kullanılan doğrulama kriterlerinden biri olan Rohsenow eşitliği kullanılmıştır. Düz bakır yüzey üzerinde yapılan test deneylerinde kaydedilen sıcaklık ölçümleri ile elde edilen kaynama eğrileri Rohsenow'un önerdiği yarı ampirik eşitlik ile karşılaştırılmıştır. Önerilen ifadede bulunan $C_{s,a}$ ve n katsayıları bakır yüzey ve su ikilisi için sırasıyla 0.013 ve 1 olarak alınmıştır. Sonuçlar Şekil 6.1'de sunulmuştur.

Yukarıda verilen değerlendirmeden deney tesisatının güvenilir olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir. Rohsenow eğrisi ve deneySEL çalışma sonuçları ile oluşturulan eğrinin arasındaki fark, ısıtıcı yüzeyin alanı, yüzey pürüzlülüğü, yaşlanma etkileri ve temas açısı ile açıklanabilir.



Şekil 6.1 : Düz yüzey üzerindeki çekirdekli havuz kaynaması için elde edilen kaynama eğrileri.

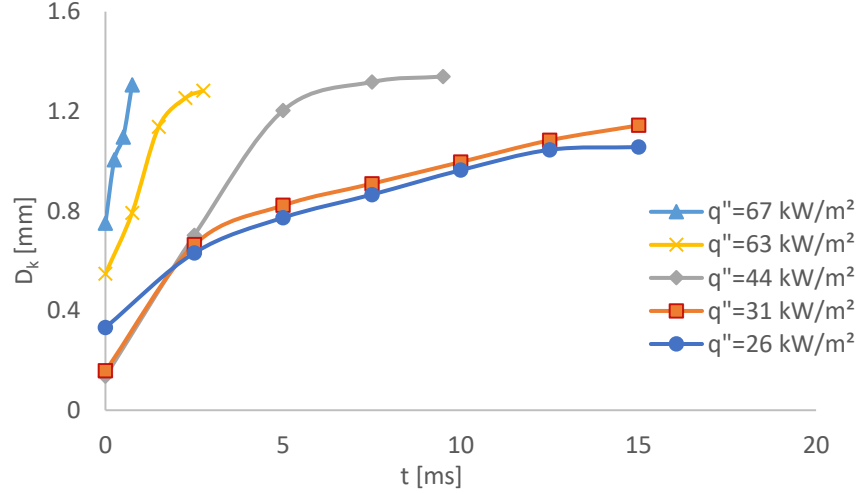
6.1.2 Kabarcık büyüme eğrisi ve ayrılma çapı

Isı akısı ve/veya yüzey kızgınlık derecesindeki değişimlerin yüzeyden olan buharlaşma miktarını etkilemesi dolayısıyla yüzeyden olan ısı geçişi miktarının hesaplanabilmesi için kabarcık ayrılma çapı ve frekansı önemli parametrelerdir.

Kabarcıklı kaynama olaylarında kabarcığın büyümesini etkileyen mekanizmalar doğal taşınım, mikrotaşınım, mikrotabakanın buharlaşması ve havuzda oluşan sıvı hareketleri olarak sıralanabilir.

Düz yüzey üzerinde oluşan kabarcıklanma için zamana bağlı büyüme eğrileri Şekil 6.2'de verilmiştir. Kabarcıkların büyümesi yüzey kızgınlık farkı ve kaynama odağındaki sıcaklık dağılımına bağlıdır. Isı akısı arttıkça, yüzeyde oluşan kabarcıkların büyüme hızı ve buna bağlı olarak kabarcıklanma frekansı artmaktadır.

Çalışılan ısı akısı değerinin artmasıyla birlikte kabarcık ayrılma çapı artarken, kabarcığın yüzeyde kalma süresi azalmaktadır. Isı akısı arttıkça buharlaşma miktarının artması kabarcığın büyüme hızının artmasına neden olmaktadır. Yüksek ısı akılarında, komşu odaklarda oluşan kabarcıkların yatay yönde hareketi ve birleşmesi sonucunda, oyukta oluşan kabarcığın çapı ani bir şekilde artırmaktadır.



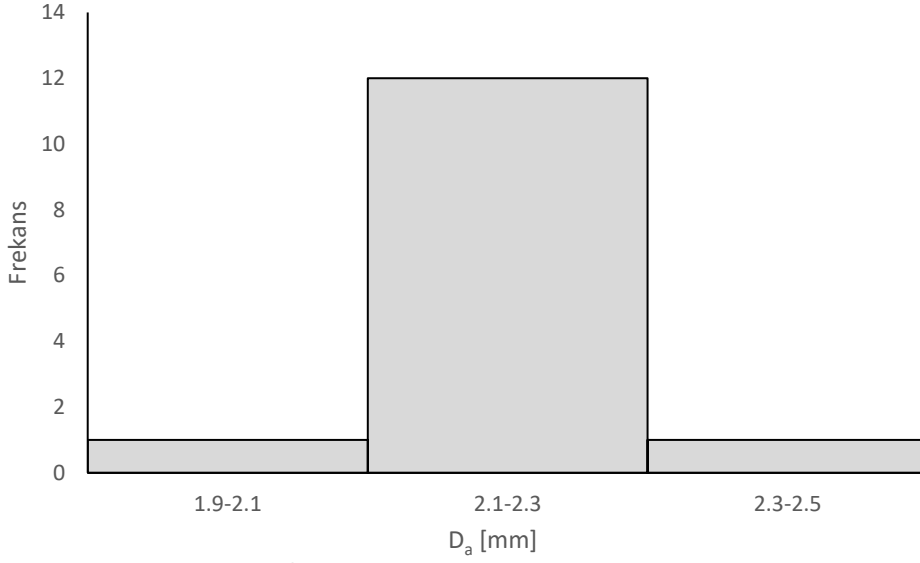
Şekil 6.2 : Düz yüzey üzerinde oluşan kabarcıklanma için büyüme eğrileri.

Kabarcık ayrılma çapı, yüzey ısı akısıyla doğrudan ilişkilidir. Isı akısının artmasıyla birlikte kabarcık altında oluşan mikro tabakanın kalınlığı artmakta ve bu da mikro-tabakadan olan ısı geçişini artırmaktadır. Sonuç olarak ısı akısı arttıkça kabarcığın ayrılma çapı da artmaktadır [128]. Yatay yönde birleşen kabarcıklarda ayrılma çapını belirlemek için, her iki kabarcığın toplam hacminden oluşan küresel formda bir kabarcığın çapı, eşdeğer çap olarak alınmıştır.

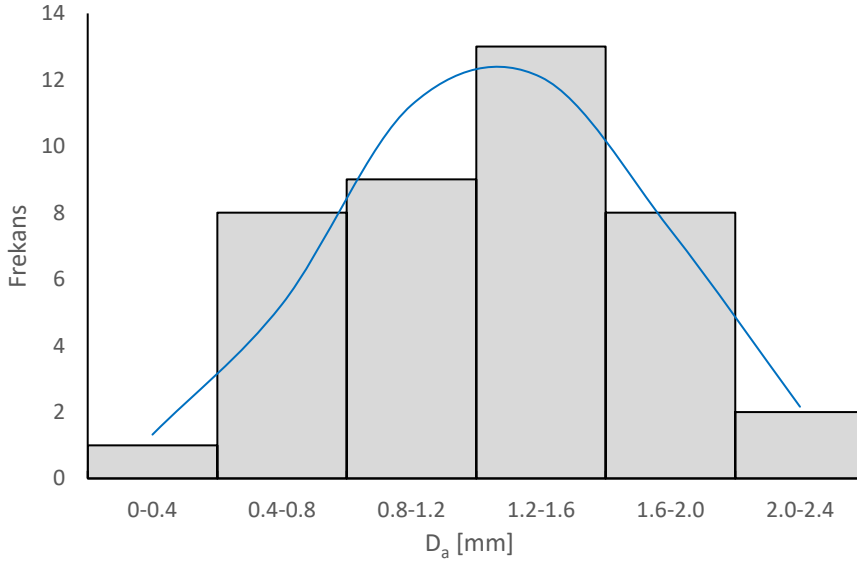
Kabarcık ayrılma çapını etkileyen diğer parametreler sıvı-buhar arayüzeyindeki kuvvet, hidrostatik basınç, yüzey gerilimi kuvvetleri ve kaldırma kuvveti olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada, hızlı kamera ile elde edilen görüntüler analiz edilerek kabarcıkların büyüme eğrisi elde edilmiş, yüzeyden ayrılma çapı belirlenmiş ve her ısı akısı için çap dağılımı elde edilmiştir. Sonuçların normal dağılıma uygun olması, yapılan ölçümlerin güvenilirliği konusunda bize bilgi vermektedir. Buna bağlı olarak çalışılan ısı akıları için kabarcık ayrılma çapı, ortalama kabarcık ayrılma çapı olarak kullanılmıştır. Ramaswamy ve diğ.(2002), ve Chen ve diğ.(2017)'nin yaptığı çalışmalarda da kabarcık ayrılma çapının standart normal dağılıma uyduğu belirtilmiştir [125, 129].

Düz yüzeyde 30 kW/m² ve 60 kW/m² ısı akısı değerleri için ölçülen kabarcık ayrılma çaplarının dağılımı Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te verilmiştir. 30 kW/m² ısı akısı için ölçüm aralığındaki kabarcıkların %80'inin çapı 2.1-2.3 mm aralığındadır.



Şekil 6.3 : 30 kW/m² ısı akısı için kabarcık ayrılma çapı dağılımı.



Şekil 6.4 : 60 kW/m² ısı akısı için kabarcık ayrılma çapı dağılımı.

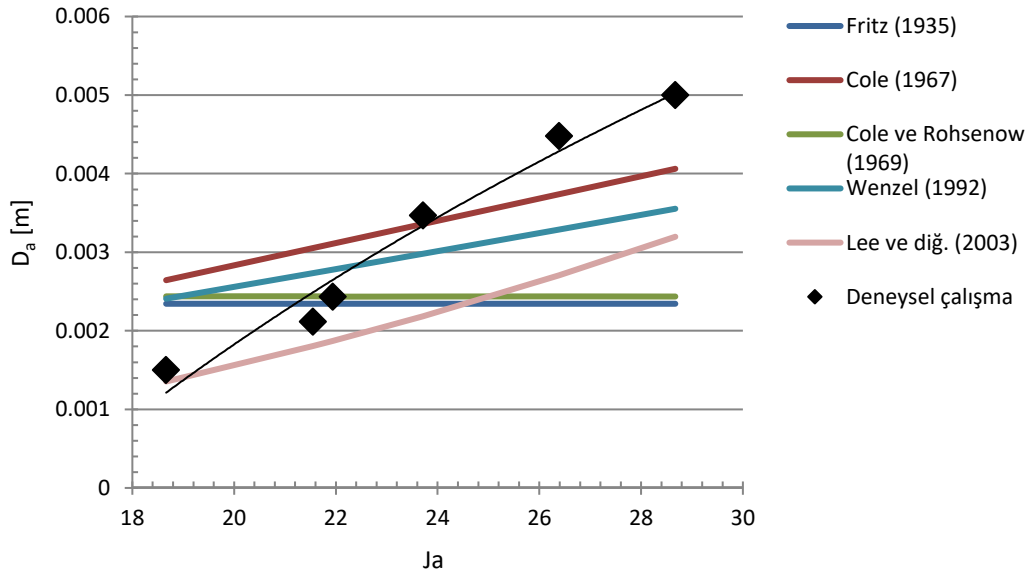
Isı akısı arttıkça etkin kaynama odaklarının sayısının artması sıvı içindeki hareketleri artırmaktadır. Bu hareketler kabarcıkların yüzeyden daha erken ya da geç kopmasına ve sonuç olarak aynı ısı akısında ölçülen kabarcık ayrılma çaplarının düşük ısı akılarına göre daha geniş bir aralıkta değer almasına sebep olmaktadır.

0.2-2.5 mm aralığında değişim gösteren değerler arasında küçük ve büyük çapta kabarcıkların oluşmasına karşılık, verilerin %20'si kabarcık ayrılma çapının 1.2 mm olduğunu göstermektedir.

Farklı Ja sayıları için düz bakır yüzey ile yapılan deney sonuçları, kaynaklarda bulunan ampirik ve yarı-ampirik modellerle karşılaştırılmalı olarak Şekil 6.5'te verilmiştir [61,

63–65, 68]. Deneysel çalışma verilerindeki her nokta, art arda ayrılan en az 30 kabarcığın ortalama çapını temsil etmektedir.

Önerilen modellerin uygulamada farklı kısıtlı yönleri olmasına rağmen, artan Ja sayısına karşılık kabarcık çapları benzer eğilimi göstermektedir.



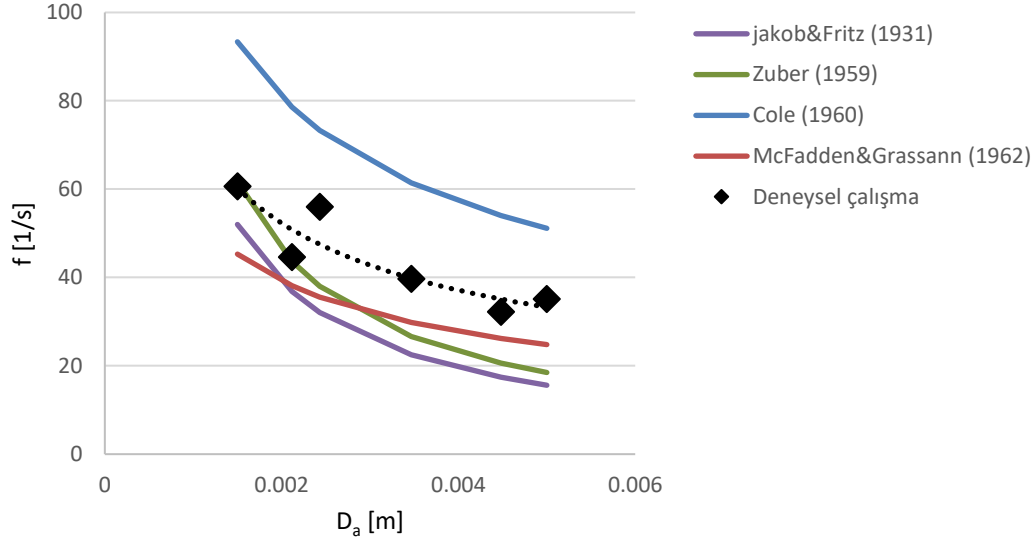
Şekil 6.5 : Kabarcık ayrılma çapının Ja sayısına göre değişimi.

Yüzey kızgınlığı arttıkça kabarcık birleşme olayları artmaktadır. Birbirine yakın odaklarda oluşan kabarcıkların yüzeyde birleşip, tek kabarcık olarak ayrılması ayrılma çapının büyümesine neden olmaktadır. Kaynama olaylarının kararsız doğası, havuz içindeki akışkan hareketleri ve kabarcıkların etkileşiminin artması dolayısıyla artan kızgınlık derecesiyle birlikte tek bir kabarcık için kabarcıklaşma çevriminin görselleştirilmesi zorlaşmaktadır.

6.1.3 Kabarcık ayrılma frekansı

Düz yüzey ile yapılan deneysel çalışmalarda kabarcık ayrılma frekansının ayrılma çapına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Deney sonuçları literatürde bulunan eşitliklerle karşılaştırmalı olarak Şekil 6.6'da verilmiştir.

Literatürdeki modellerin deneysel sonuçlar ile aynı eğilimi göstermekte ve frekans değerlerini $\pm\%35$ bandında doğru öngörebilmektedir.



Şekil 6.6 : Kabarcık ayrılma frekansının kabarcık ayrılma çapına bağlı olarak değişimi [115].

6.1.4 Sayısal modelin doğrulanması

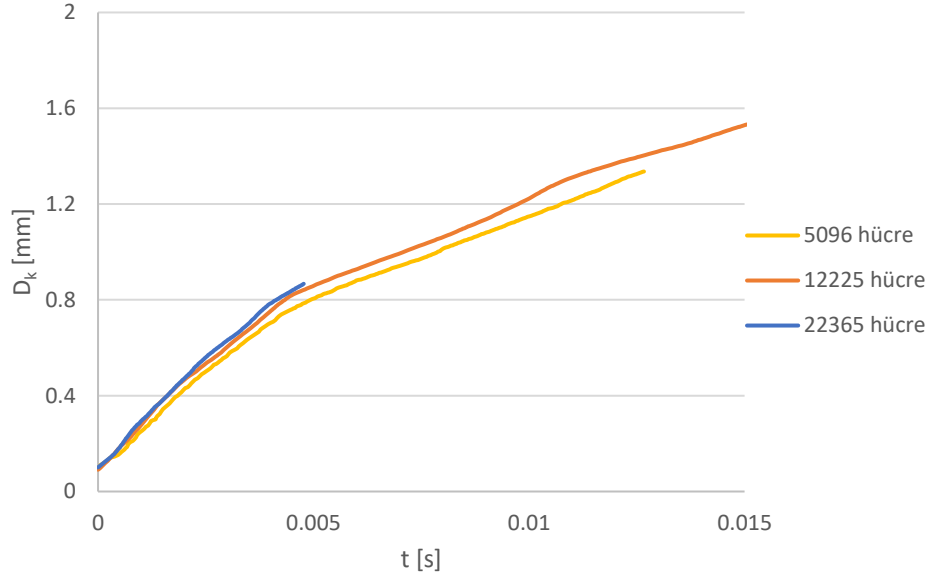
Sayısal modelleme çalışmalarında güvenilir modeller oluşturulabilmesi için çözümün ağ yapısından bağımsız olması ve deneysel değerler ile uyumlu sonuçların elde edilebilmesi gerekmektedir. Ağdan bağımsızlık testleri, kurulan modelin ağ yapısındaki hücrelerin sayısı, boyutu ve geometrisinde değişiklikler yapılarak elde edilen sonuçların kabul edilebilir hata oranları içinde olup olmadığı kontrol edilerek yapılır.

Bu çalışmada ağdan bağımsızlık testleri için düğüm ve hücre sayıları değiştirilerek üç farklı ağ yapısı oluşturulmuş ve kabarcık büyüme çapı için çözümleme yapılmıştır. Her ağ yapısındaki düğüm noktaları ve hücrelerin sayısı Çizelge 6.1de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Çözüm alanı

Ağ Yapısı	Düğüm Noktası sayısı	Hücre Sayısı
1	5230	5096
2	12414	12225
3	22528	22364

Üç ağ yapısı için kabarcık eşdeğer çapındaki değişim Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7 : Ağdan bağımsızlık testi.

Kabarcık büyüme çapı farkının en yüksek değerinin %5 olması sebebiyle işlemci hesap yükü ve zamanı verimli kullanmak amacıyla çözümlere 2 numaralı ağ yapısıyla devam edilmiştir. Deneysel çalışma ve sayısal modelde elde edilen kabarcık büyüme eğrileri Şekil 6.9’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

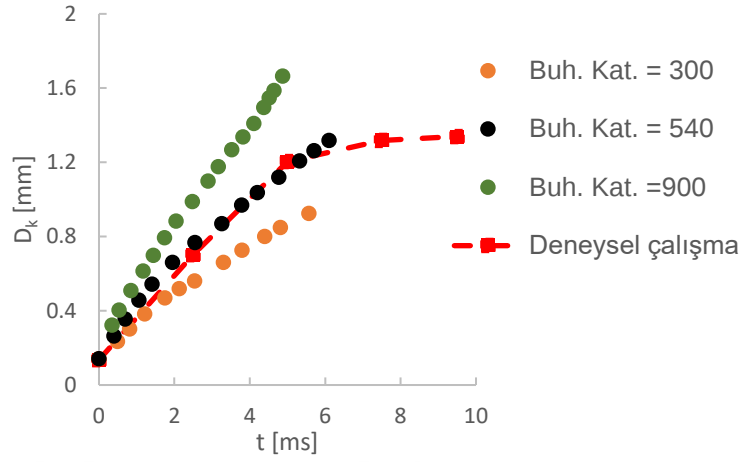
Kabacığın oluşumu ve yüzeyden ayrılması olayında sayısal modelde analitik olarak belirlenemeyen ve deneysel sonuçlarla ilişkilendirilmesi gereken değerler aşağıda sıralanmıştır.

- Başlangıç ısı sınır tabaka kalınlığı
- Katı-sıvı ara yüzeyindeki temas açısı
- Kaynama modelinde yer alan buharlaşma katsayısı

Bu parametrelerin her biri için farklı değerler kullanılarak yapılan çözümlemelerde, her değişkenin olaya etkisi gözlemlenmiştir ve deney sonuçları ile en uyumlu sonucu veren değişkenler seçilmiştir.

Lee kaynama modelinde yer alan ve deneysel veriler ile doğrulanması gereken bir parametre olan buharlaşma katsayısı birim zamanda gerçekleşen faz değişim miktarını belirler. Buharlaşma katsayısının artması, faz değiştiren sıvı miktarının artmasına dolayısıyla katı yüzeyden buharlaşma için çekilen ısı miktarının da artmasına sebep olur. Bunun sonucu olarak sabit ısı akısı koşullarında çözüm sırasında yüzey sıcaklığı düşer.

44 kW/m² ısı akısı değeri için farklı buharlaşma katsayısı için yapılan çözümlemelerden elde edilen sonuçlar Şekil 6.8'de verilmiştir.

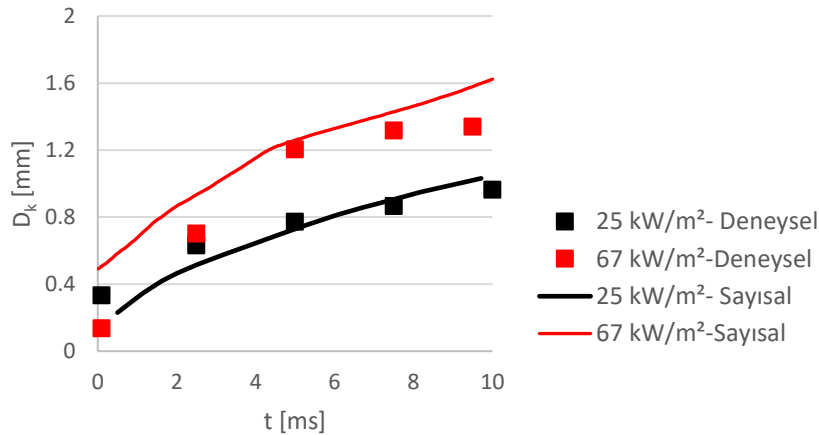


Şekil 6.8 : Buharlaşma katsayısının kabarcık büyümesine etkisi.

Şekil 6.8'de de görüldüğü gibi deneysel veriler ile en uyumlu sonucun elde edildiği buharlaşma katsayısı 540 olarak belirlenmiştir.

Farklı ısı akıları için yapılan sayısal çözümlemelerde kabarcık için büyüme eğrileri çıkarılmış ve modelin tutarlılığı test edilmiştir. Çözümlemelerde kabarcığın oluşma anından yüzeyden kopma anına kadar olan sürede çapın değişimi incelenmiştir. İlk anda yarıküreye yakın olan kabarcık şekli kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle küre haline yaklaşır. Artan buhar hacmi hakkında bilgi sahibi olmak ve deneysel verilerle karşılaştırma yapabilmek için eşdeğer çap değeri kullanılmıştır.

İki farklı ısı akısı için deneysel ve sayısal çalışmalar sonucu kaydedilen kabarcık büyüme eğrileri Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9 : Deneysel çalışma ve sayısal modelin sonuçlarının karşılaştırılması.

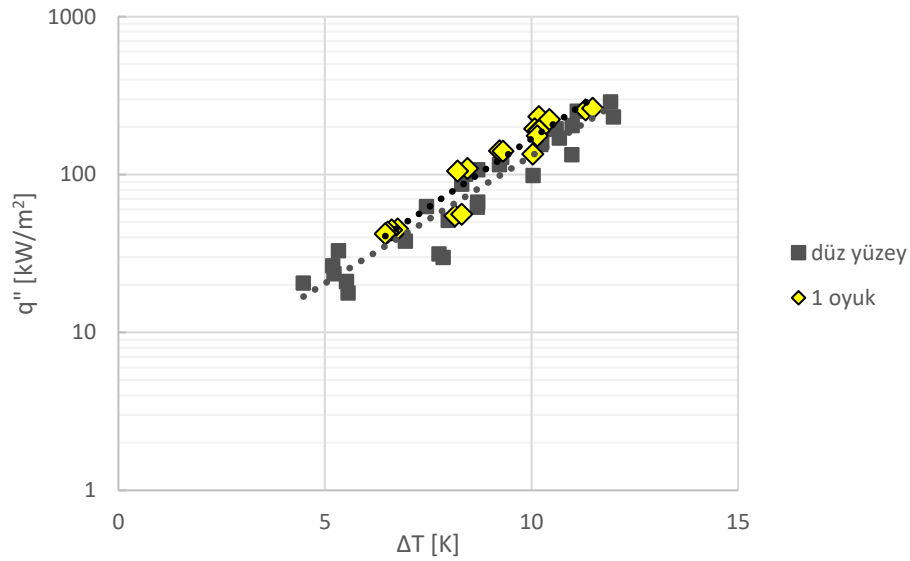
Çözümüne eklenen buhar kabarcığının çapına bağlı olarak büyüme süresinin ilk aşamalarında sayısal ve deneysel çalışmalar arasında bir sapma görülmektedir.

6.2 Bir Oyuklu Yüzey

Bakır yüzey üzerinde konik bir oyuk olması durumunun ısı geçişi olaylarına etkisinin incelenmesi amacıyla farklı ısı akıllarında yapılan deneylerde sıcaklık değerleri kaydedilmiş ve kaynama eğrileri oluşturulmuştur. Görüntülerden alınan çap ve frekans ölçümleri kullanılarak kabarcık büyüme eğrileri elde edilmiştir. Görüntülerden ölçülen kabarcık çapları sayısal modelden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

6.2.1 Kaynama eğrisinin elde edilmesi

Kaynama yüzeyinde yapay bir oyukun bulunduğu test yüzeyi için oluşturulan kaynama eğrileri, düz yüzey sonuçları ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.10'da sunulmuştur.



Şekil 6.10 : Düz yüzey ve bir oyuklu yüzey için elde edilen kaynama eğrileri.

Bir oyuklu yüzey için kaynama eğrisi düz yüzeye kıyasla sola doğru kaymıştır. Daha düşük sıcaklık farkları ile daha yüksek miktarda ısı geçişinin elde edilebilmesi, yüzeyde oluşturulan mikro ölçekteki oyukun ısı geçişini iyileştirdiğini göstermektedir.

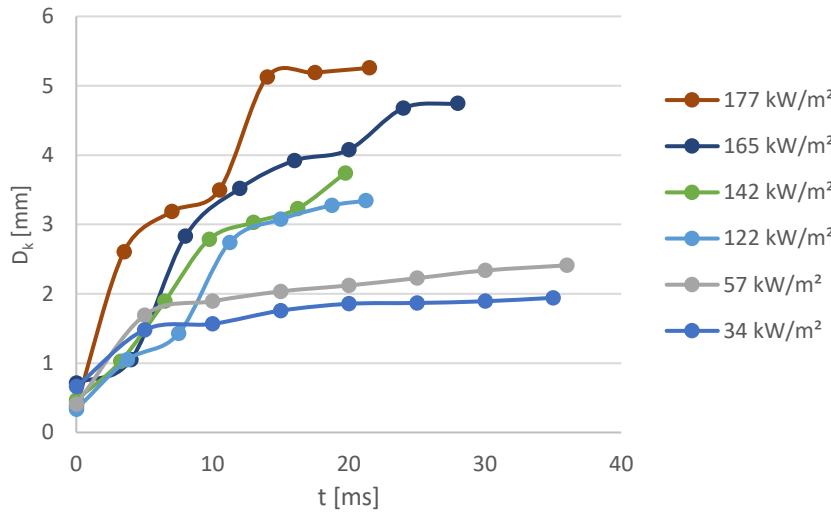
6.2.2 Kabarcık büyüme eğrisi ve ayrılma çapı

Bir oyukta oluşup büyüyen kabarcığın tabanı oyukun kenarına tutunur. Dolayısıyla oyukta oluşan kabarcık, düz yüzeyde oluşan kabarcığa göre daha büyük bir taban alanına sahip olur. Taban alanının büyük olması, kabarcığın yüzeyden ayrılmasını

zorlaştıran yüzey gerilim kuvvetinin artmasına sebep olur. Kabarcığın yüzeyden ayrılması için gereken kaldırma kuvvetinin, bu kuvveti yenebilmesi için kabarcık ayrılma çapı daha büyük bir değere sahip olmalıdır. Bu sebeple, taban alanı büyük olan kabarcıklar yüzeyde daha uzun süre kalmakta ve büyüme süreleri daha uzun olmaktadır.

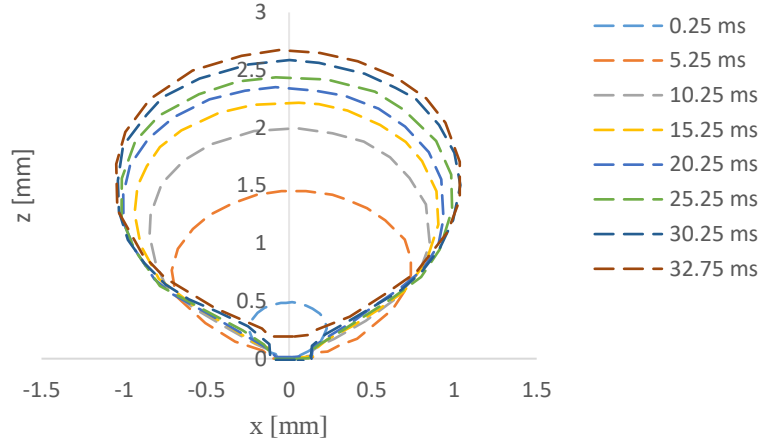
Yüzeyde bir oyuk olması durumunda oluşan kabarcıklar için zamana bağlı büyüme eğrileri Şekil 6.11 'de verilmiştir. Atalet kuvvetleri kontrolü altında olan büyüme her ısı akısı için yaklaşık değerlerde olurken, ısı geçişi kontrollü büyüme periyodunda ısı akısının önemi görülmektedir.

Kabarcığın oluşma ve büyüme sürecinde, sıvının yüzey gerilim kuvveti ve atalet kuvvetlerinin çok büyük olması sebebiyle kabarcığın büyüme hızı momentum denklemi ile kontrol edilirken; kabarcık çapı, oluşma sırasındaki çapının 2-2.5 katına çıktığında yüzey kuvvetleri ve atalet kuvvetleri ihmal edilebilir seviyeye gelir ve büyüme hızı ısı geçişi olayları ile kontrol edilir.

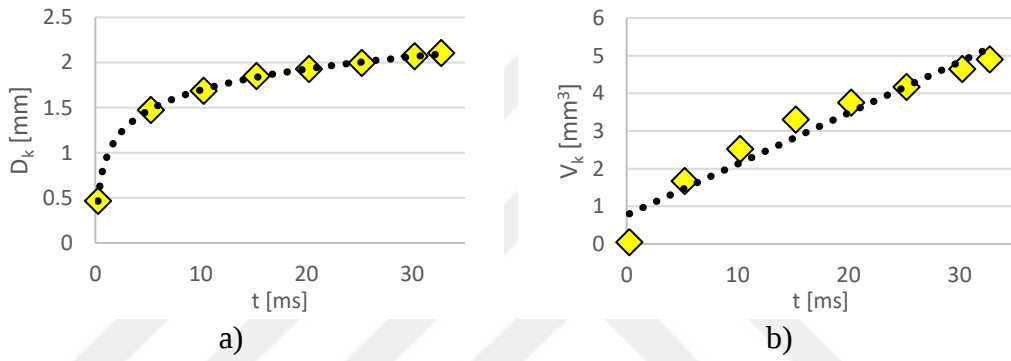


Şekil 6.11 : Yüzeyde bir oyuk olması durumunda oluşan kabarcıklar için büyüme eğrileri.

Bunun sonucu olarak kabarcıklanmanın ilk aşamasında lineer ve hızlı bir büyüme süreci gösteren buhar kabarcığının çapı, ısı geçişiyle kontrol edilen rejimde daha yavaş büyüme hızı ve asimptotik bir davranış gösterir (Şekil 6.12). Buna karşılık kabarcık hacmi yaklaşık olarak lineer artmaya devam eder (Şekil 6.13). Bahsedilen durum, ısı akısının 40 kW/m^2 olduğu yüzeyde büyüyen bir kabarcık için kaydedilen görüntülerden ölçülen çap ve buna bağlı olarak hesaplanan kabarcık hacmi değerlerinde görülmektedir.

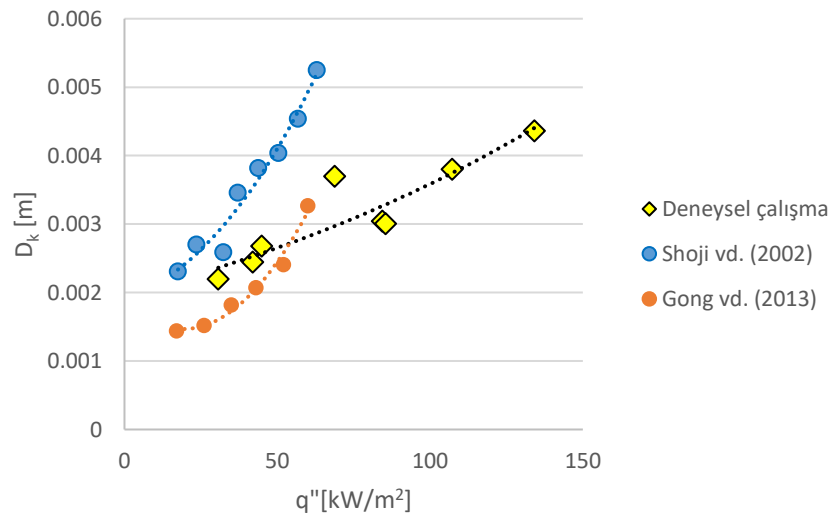


Şekil 6.12 : Kabarcık büyüme hızı.



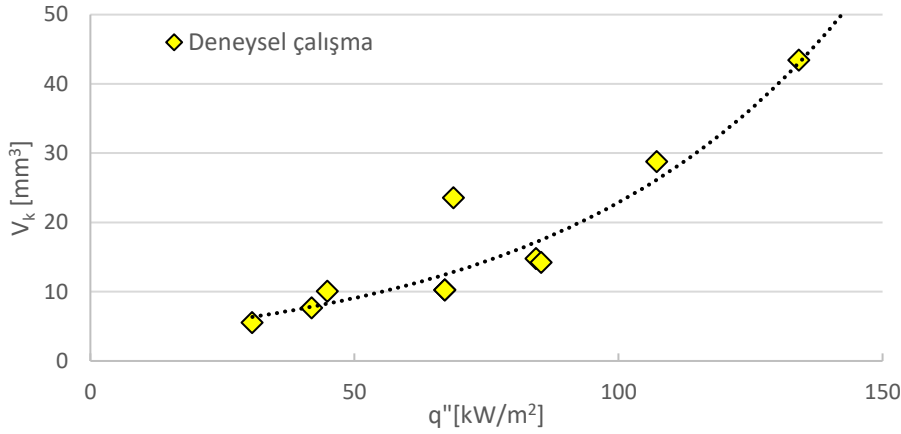
Şekil 6.13 : Kabarcık çapı ve hacminin zamana bağlı değişimi.

Oyukta oluşan kabarcıklanma çevriminde ısı akısına bağlı olarak ayrılma çapı değişimi Şekil 6.14’te verilmiştir. Ayrık kabarcıklanma rejimin görüldüğü orta ısı akılarına kadar yapılan ölçüm sonuçları kaynaklardaki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.14 : Yüzeyde bir oyuk olması durumunda kabarcık ayrılma çapının ısı akısına bağlı değişimi [45, 92].

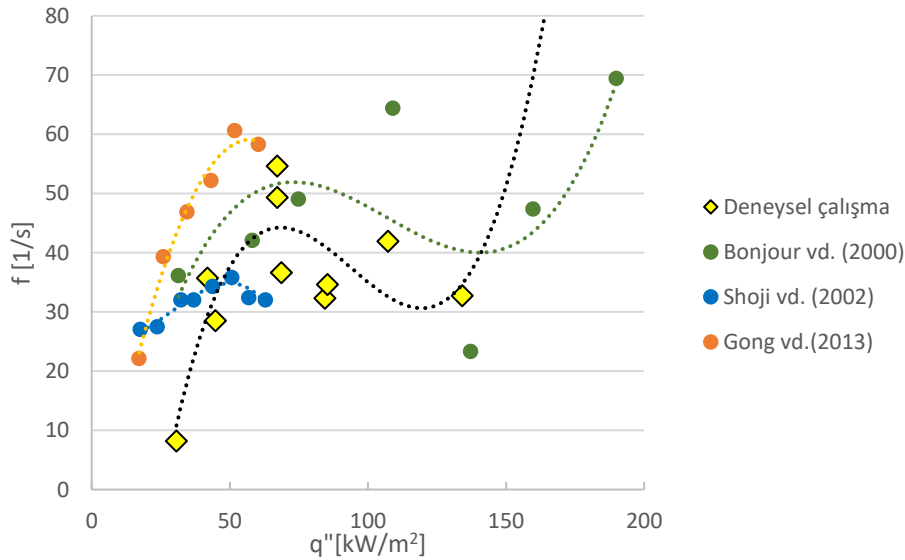
Düz yüzey çalışmalarında da gözlemlendiği gibi ısı akısı arttıkça kabarcık ayrılma çapı da artmaktadır. Buharlaşıma ile gerçekleşen ısı geçişini belirleyebilmek için kabarcığın yüzeyden ayrıldığı andaki hacmi hesaplanmış ve ısı akısına bağlı olarak değişimi Şekil 6.15'te verilmiştir.



Şekil 6.15 : Kabarcık hacminin ısı akısına bağlı olarak değişimi.

6.2.3 Kabarcık ayrılma frekansı

Bir oyuklu yüzey için kaydedilen frekans değerleri Şekil 6.16'da kaynaklara geçmiş araştırma sonuçları ile birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 6.16 : Bir oyuklu yüzey için hesaplanan frekans değerlerinin literatür ile karşılaştırılması.

DeneySEL çalışma sonuçlarına bakıldığında kabarcığın yüzeyden ayrılma frekansının 50 kW/m^2 ısı akısına kadar olan ayrık kabarcıklı kaynama bölgesine kadar arttığı, bu değerden sonra azaldığı görülmektedir. Bu azalma, artan ısı akısıyla birlikte kabarcıkların yüzeyde birleşerek daha büyük kabarcığı oluşturması, dolayısıyla da

kabarcığın büyüme süresinin artmasına bağlanmaktadır. Bu ısı akısı aralığında ayrılma frekansı düşse de Şekil 6.15'te bahsedildiği gibi kabarcık hacmi artmaktadır. Dolayısıyla kaynama eğrilerinde ısı akısı artmaya devam etmektedir. 100 kW/m^2 ısı akısına ulaşıldığında ise buhar kabarcığı hacminin artması sonucunda etkisi artan kaldırma kuvvetinin kabarcığın yüzeyden ayrılmasını kolaylaştırması sebebiyle frekans yeniden artmaya başlamaktadır. Aynı eğilim literatürde bulunan deneysel çalışmalarda da görülmüştür [48, 92, 130].

Gong ve diğ.(2013) ayrık kabarcıklı kaynama rejiminde, silisyum yüzey üzerinde oluşturulmuş silindirik bir oyukta saf suyun kaynamasını incelemişlerdir [130]. Oyuk çapı $100 \text{ }\mu\text{m}$, derinlik ise $110 \text{ }\mu\text{m}$ ölçülmüştür. Kabarcığın altında oluşan sıvı tabakasının hareketinin, yüzeyde oluşan kabarcığın dinamiğine etkisinin deneysel olarak incelendiği çalışmada, kabarcıkların ısı akısının 35 kW/m^2 değerinden itibaren düşey yönde, 60 kW/m^2 değerinden itibaren de yatay yönde birleşmeye başladığı gözlemlenmiştir. Genel olarak ısı akısının artması ile birlikte artan kabarcık frekansı, ısı akısının 52 kW/m^2 değerine ulaştığında en yüksek değerine sahip olmakta ve bu değerden sonra kabarcıkların birleşmeye başlaması sebebiyle yavaş yavaş azalmaya başlamaktadır. Yüksek ısı akılarında alınan frekans değerleri aynı odakta oluşan önceki kabarcığın oluşturduğu düzensiz hareketler sebebiyle daha fazla saçılım göstermektedir.

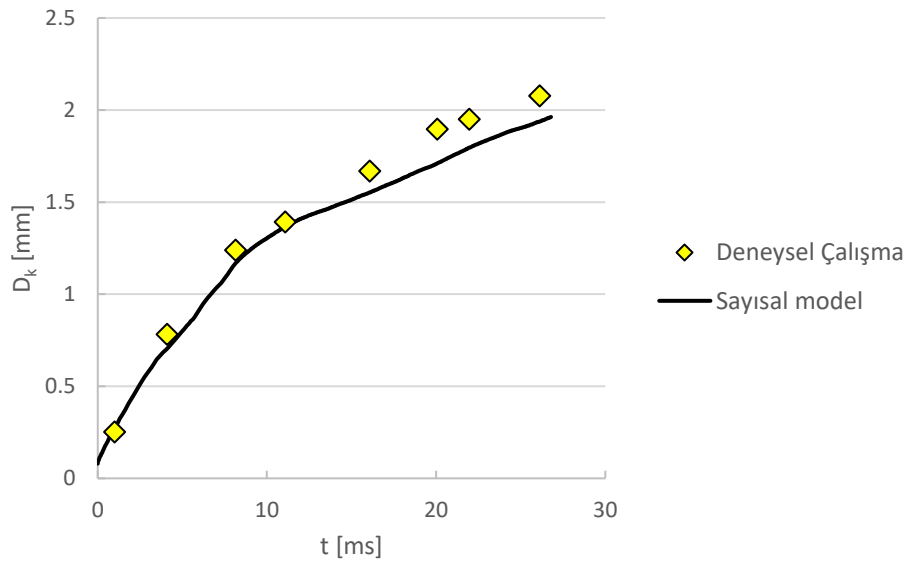
Bonjour vd R-113 soğutucu akışkanı ile üzerinde yapay oyuk oluşturulmuş düşey yönde duran duralümin (AU4G) yüzeyde yaptıkları çalışmada kabarcık ayrılma frekansının, ısı akısının 100 W/cm^2 değerine kadar artıp bu noktada en yüksek değerine ulaştığı, bu değerden sonra kabarcıkların birleşmesi sebebiyle azaldığı görülmüştür. 150 W/cm^2 değerinden sonra ise yüksek ısı akılarında taşınım etkilerinin güçlü olması frekansın yeniden artmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra yüksek ısı akısı ile yapılan deneylerde, kabarcık çapının büyük olması, kabarcığın yüzeyden ayrılmasını destekleyen kaldırma kuvvetlerinin daha büyük olmasına sebep olmaktadır [48].

Shoji vd.'nin çalışmasında bakır yüzey üzerinde farklı boyutlarda konik, silindirik ve girintili(reentrant) oyuklar oluşturularak; oyuk geometrisi, boyutu ve oyukların arasındaki mesafenin kabarcık dinamiğine etkisi araştırılmıştır [92]. Oyuk geometrisinin incelendiği deneyler sonucunda konik oyukların büyük sıcaklık dalgalanmaları ile kesintili kabarcıklanma davranışı sergilemesi ve kabarcıklanmayı

sürdürmek için oldukça yüksek kızgınlık farkı gerektirmesine karşılık silindirik ve girintili oyukların daha düşük kızgınlık farklarında bile sürekli ve kararlı kabarcıklaşma davranışı gösterdiği görülmüştür. Silindirik oyuklarda oluşan kabarcıklar için oyuk çapının belirgin etkisi görülmezken, derinlik güçlü etkilere sahiptir.

6.2.4 Yüzeyde bir oyuk olması durumu için sayısal model sonuçları

150 μm ağız çapına sahip oyuk olan yüzeye 55 kW/m^2 değerinde sabit ısı akısı uygulandığı durum için yapılan sayısal çözümleme sonuçları Şekil 6.17’de deneysel çalışma sonuçları ile birlikte verilmiştir. Modelde temas açısının sabit (69°) olduğu kabulü yapılmıştır. Kabarcık büyümesinin deneysel sonuçlarla yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Kabarcık yüzeyden ayrıldıktan sonra oyuk içinde bir miktar buharın kalması, kabarcık oluşmasını devam ettirebilmektedir.



Şekil 6.17 : 55 kW/m^2 ısı akısı değerinde deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.

Sayısal çözümde hesaplanan kabarcık şekli modelin doğruluğunun değerlendirilmesinde önemli bir parametredir. Bu nedenle kabarcık şeklinin simülasyonu ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır [131, 132].

Atmosferik basınç altında saf suyun kaynaması için bu çalışmada yapılan sayısal modelleme sonuçları, deneylerde hızlı kamera ile kaydedilen görüntüler ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.18’de verilmiştir. Yoğunluğa bağlı olarak yapılan görselleştirme çalışmalarında elde edilen kabarcık sınırları, Cfd-Post ile sıcaklık dağılımı üzerine eklenmiştir.

Yüzey kızgınlık farkı, yüzey ve sıvı arasındaki ısı akışını başlatan en önemli parametredir. Gizli buharlaşma ısısı ile büyüyen kabarcığın yüzeyden ayrılıp havuz içinde yükselmesi, sıvı içindeki türbülansı ve zorlanmış taşınım ile olan ısı geçişini artırır. Buna ek olarak ısı aktarımı gizli ısı geçişiyle ve kabarcık sayesinde kütle geçişi yoluyla da gerçekleşir.

İlk fotoğrafta oyuk içinde bulunan ve mikrotabaka içinde büyümeye başlayan kabarcık görülmektedir. Kabarcığı çevreleyen sıvı sıcaklığının uniform olmaması kabarcık içindeki sıcaklık dağılımının konuma bağlı olarak değişmesine sebep olmaktadır. Bununla birlikte kabarcığın oluşma ve büyüme aşamalarında kızgın mikrotabaka davranışının değişmesi (oluşması, kalınlığının değişmesi ve parçalanması) ısı geçişinin hesabını zorlaştırmaktadır.

Daha küçük çapta ayrılan ikinci kabarcık büyük kabarcık ile birleşerek sıvı içinde yükselmeye devam etmektedir. Yüzeyden ayrılma sırasında çeşitli forma sahip olan buhar elipsoid olarak yüzeyden ayrılmaktadır. Ayrılan kabarcık, yüzeydeki sıcak sıvıyı da beraberinde sürükleyerek ısının bir bölümünün havuz içindeki sıvıya taşınmasını sağlar. Yüzeyden ayrılan kabarcığın oluşturduğu vakum kuvveti, yüzeyde oluşan kabarcığı daha erken sürede yüzeyden ayırmaktadır. Bu kuvvet, kabarcıklanma frekansı ile birlikte yeni kabarcığın şeklini de etkilemektedir. Bahsedilen vakum hareketi sayısal çözümleme sonuçlarından görülmektedir. Yüzey ile teması kalmayan kabarcığın içindeki buharın sıcaklığı doyma sıcaklığına eşittir.

Aynı durum Beer tarafından yapılan interferometri ile kabarcık etrafındaki sıcaklık dağılımının incelendiği çalışmada (Şekil 6.19) da görselleştirilmiştir [133].

Yüzeyden ayrılan kabarcık üzerinde kaldırma kuvvetini dengeleyen kuvvetler etkisini yitirmektedir. Bu sebeple kabarcık hızlı bir şekilde sıvı içinde yükselmektedir. Yavaş hızla başlayan hareket ivmelenerek yukarı yönde devam eder. Düşey yöndeki hız arttıkça sıvının atalet kuvveti ve viskoz kuvvetler kabarcığı yavaşlatmaya çalışmakta ve kabarcık şekli değişime uğramaktadır. Kaydedilen görüntülerde alan derinliği sebebiyle yükselen kabarcık hacminin azaldığı yanılgısı oluşabilmektedir. Kabarcık görüntüleri ile 2 boyutlu çalışma sonucu elde edilen konturlar birlikte değerlendirildiğinde sonuçların niteliksel olarak uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 6.18 : Deneysel ve sayısal çalışmalarda kaydedilen kabarcık şekillerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi.



Şekil 6.19 : İnterferometri yöntemi ile görselleştirilen sıcaklık dağılımı [133].

Kaynamanın sayısal modellemesi ve deneysel yöntemler ile elde edilen sıcaklık dağılımları kaynama olayını anlamak ve doğru fiziksel temellere dayalı analitik modeller oluşturabilmek için oldukça önemlidir.

6.3 Oyuklar Arasındaki Mesafenin Kaynama Olayına Etkisi

Bu bölümde etkin kaynama odağı sayısının kaynama ile gerçekleşen ısı geçişine etkisi araştırılmıştır. Aralarında 2 mm ve 0.5 mm mesafe olacak şekilde yerleşimi yapılan konik oyuklara sahip bakır yüzeyler üzerinde yapılan deneylerin sonuçları verilmiştir.

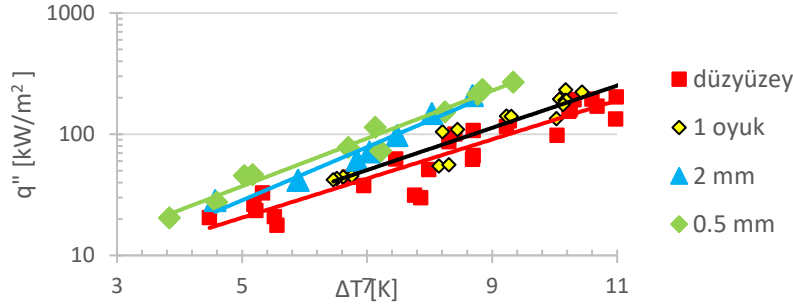
6.3.1 Kaynama eğrilerinin elde edilmesi

Kaynama yüzeyinde oluşan buhar kabarcıklarının, kaynama olayının her rejimi için farklı davranış göstermesi sebebiyle, ısı akısı kabarcıkların hareketinden oldukça etkilenir. Kabarcıklı kaynama olaylarında etkin parametreler olan kabarcık ayrılma çapı ve frekansı değerlerinin ısı akısı ile ilişkisi kaynama eğrilerinin konumunu belirler. Isı akısının, kabarcık çapının küpü ile orantılı olması sonucu akının belirlenmesinde çap, frekansa göre daha etkin bir rol oynar.

Deneyde kaydedilen sıcaklık ölçümleri ile oluşturulan kaynama eğrileri Şekil 6.20’de verilmiştir. Doğal taşınım bölgesinde ısı geçişinin düşük olması sebebiyle birbirine yakın konumda bulunan eğriler kabarcıklı kaynama etkilerinin sonucu olarak birbirinden ayrılmakta ve aralarındaki fark artmaktadır. Kaynama eğrilerinin sola kayması ile birlikte daha küçük yüzey kızgınlığı değerlerinde daha yüksek ısı geçişi gerçekleşmektedir.

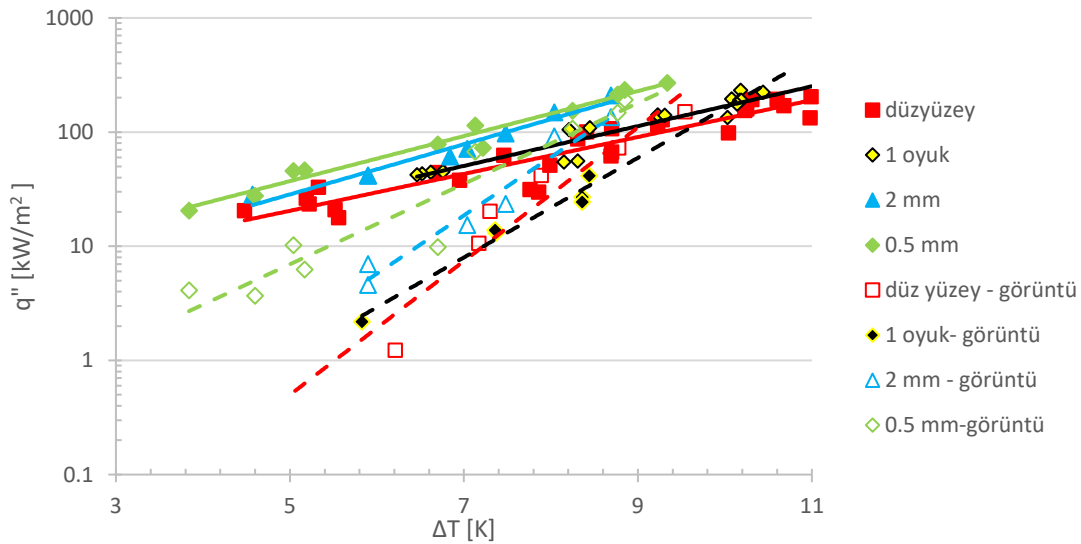
Grafikte genel olarak etkin kaynama odaklarının sayısı arttıkça, ısı transferi iyileşmiş ve kaynama eğrisi sola doğru kaymıştır. Kaynama odaklarının arasındaki mesafenin 2 mm olduğu durumda kabarcığın oyuk kenarına tutunması kabarcığın yüzey geriliminin artmasına sebep olur. Kabarcığın tutunduğu yüzey alanının büyümesiyle birlikte buharlaşma miktarı da artmakta ve kaynama eğrisi sola doğru kaymaktadır. Odakların 0.5 mm sıklıkla yerleştirildiği durumda odaklar arasındaki mesafenin kabarcık ayrılma

çapından daha küçük olması benzer şekilde kabarcıkların yüzeydeyken birleşip kabarcık ayrılma çapının büyümesine yol açmaktadır. Artan ısı akısı buharlaşma miktarını da artırmaktadır.



Şekil 6.20 : Sıcaklık ölçümleri ile elde edilen kaynama eğrileri.

Görüntüleme sistemi ile kaydedilen kabarcıkların çap ve frekans değerleri kullanılarak yüzeyden olan buharlaşma miktarının hesap edilmesi yöntemiyle gizli ısı akısı eğrileri oluşturulmuş ve bakır numuneden alınan sıcaklık değerleri kullanılarak oluşturulan kaynama eğrilerinin eğilimleri ile karşılaştırılmıştır. Düşük ve orta ısı akılarında bu yöntem kolaylıkla uygulanabilirken, yüksek ısı akılarında komşu odaklarda oluşan kabarcıkların etkileşimi ayrılma çapını belirlemeyi zorlaştırmaktadır. Şekil 6.21’de iki yöntem ile oluşturulan eğriler ile birlikte verilmiştir.



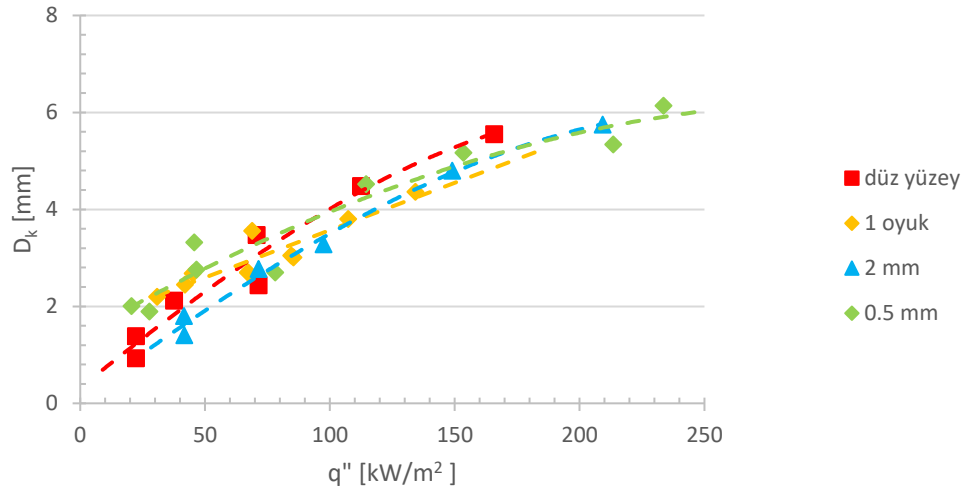
Şekil 6.21 : Kaydedilen görüntüler kullanılarak elde edilen gizli buharlaşma ısıısının kaynama eğrileri ile karşılaştırılması.

Her iki yöntemde de elde edilen eğriler birbiri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Düşük kızma farklarında ısı geçişinde doğal taşınımın etkin olması dolayısıyla kızma farkı arttıkça sıcaklık ölçmeleri yöntemi ve görüntüleme çalışmalarıyla elde edilen eğriler arasındaki fark kapanmaktadır.

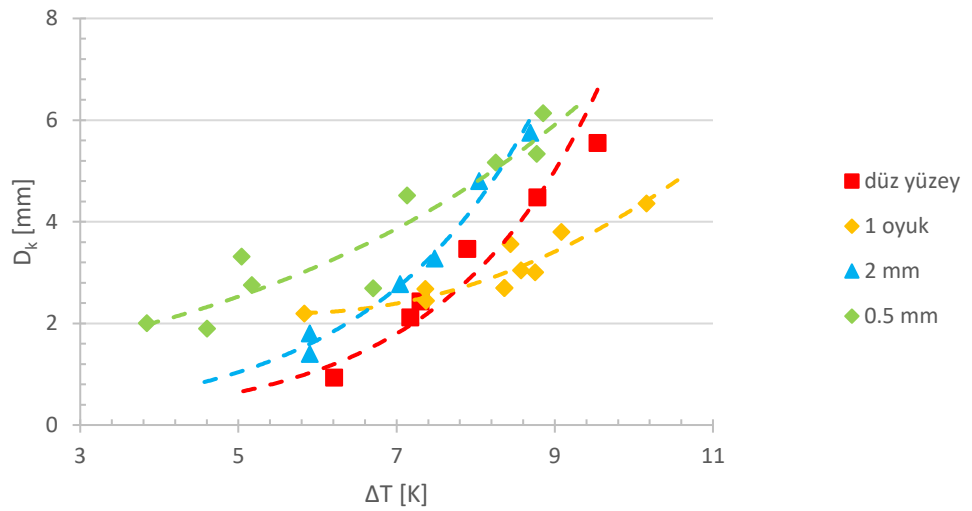
6.3.2 Kabarcık ayrılma çapı

Oyuklar arasındaki mesafeye bağlı olarak kabarcık çapının ısı akısı ve kızma farkıyla değişimi Şekil 6.22’de verilmiştir.

Oluşturulan kaynama odakları arasındaki mesafenin kabarcık ayrılma çapına yakın ve daha küçük olduğu durumda, oyuklarda oluşan buhar kabarcıkları yüzeyde büyümeye devam ederken birleşmeye başlarlar. Yüzeyde kızma farkının artması aynı odakta art arda oluşan buhar kabarcıkları arasındaki sürenin kısılmasına sebep olur. Bu olay yeni oluşan kabarcığın, oyuktan ayrılan kabarcığın hareketinden daha fazla etkilenmesine sebep olur. Kabarcıkların yüzeye yakın mesafede birleşmesi odaklar arası mesafe azaldıkça kabarcık ayrılma çapının artmasına neden olur.



a)



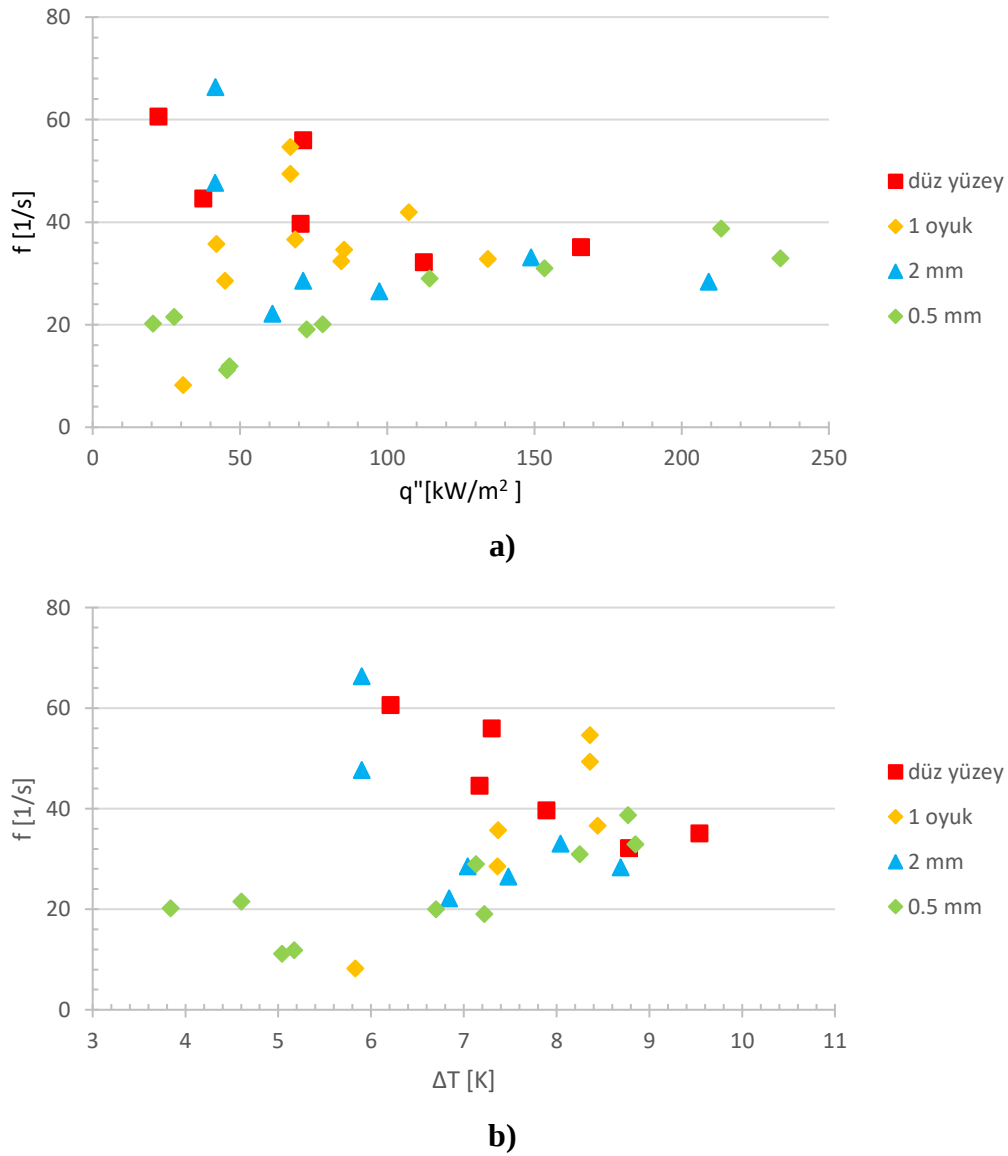
b)

Şekil 6.22 : Oyuklar arasındaki mesafeye bağlı olarak kabarcık çapının a) ısı akısıyla b) kızma farkıyla değişimi.

6.3.3 Kabarcık ayrılma frekansı

Yüksek ısı akılarında oluşan buhar kabarcıklarının yüzeyde tutunurken diğer kabarcık ile birleşip büyümeye devam etmesi, yüzeyde kayması ve kabarcıkların yüzeyden ayrıldıktan sonra bile oluşan rasgele birleşme olayları sonucunda yüksek ısı akılarında bir kabarcığın takibi, çap ve frekans ölçümleri zorlaşmaktadır. Yüzeyden ayrılan kabarcığın altında vakum oluşmakta ve aynı zamanda üstten gelen sıvı, kabarcığı aşağı doğru itmektedir. Bu olay, kabarcığın yüzeyden ayrılmasını zorlaştırmaktadır. Yüzeyden ayrılmayı destekleyen kuvvet ise kaldırma kuvvetidir.

Kabarcıklanma odaklarının arasında bulunan mesafenin kabarcık ayrılma frekansına etkisi Şekil 6.23'te verilmiştir.

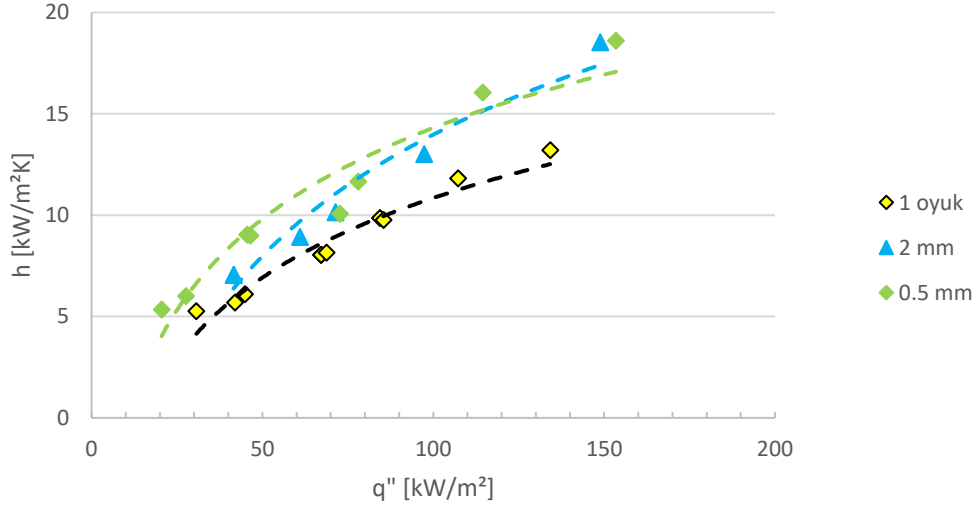


Şekil 6.23 : Oyuklar arasındaki mesafeye bağlı olarak kabarcık ayrılma frekansının a) ısı akısıyla b) kızma farkıyla değişimi.

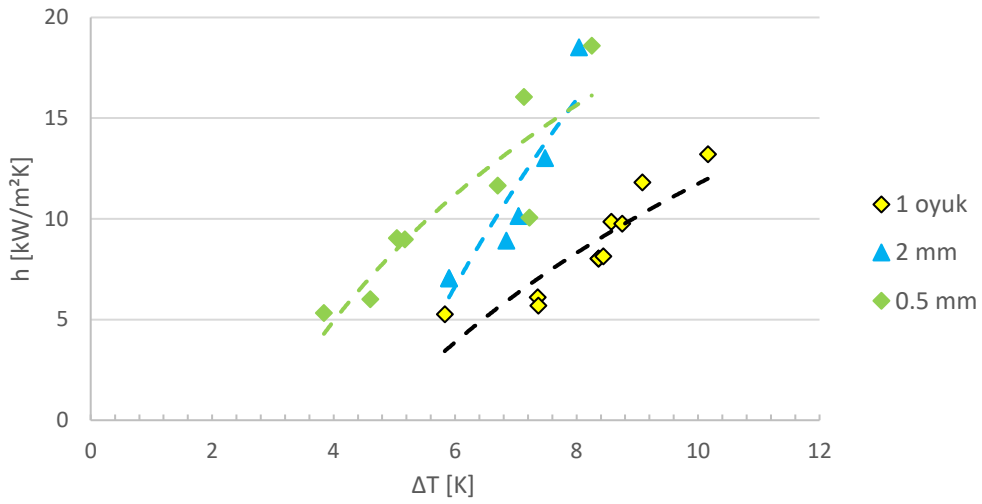
Düşük kızma sıcaklığı farklarında, oyuklar arasındaki mesafenin 2 mm ve daha büyük olduğu durumlarda, kabarcık ayrılma çapının odaklar arasındaki mesafeden daha küçük olması sebebiyle birleşme olayları gözlemlenmezken, mesafenin azalması ve kabarcık ayrılma çapından daha küçük bir değere sahip olmasıyla birlikte birleşme olaylarına rastlanmaktadır. Birleşme olayları sonucunda yüzeyden ayrılması geciken kabarcıklar, aynı kızma sıcaklığı farkında frekansın azalmasına sebep olmaktadır. Oyuklar arasındaki mesafenin 0.5 mm'ye kadar kısaldığı durumda yüzeyde oluşan çok sayıda kabarcık küçük çaplardayken birleşerek sıvının buhar kabarcıkları arasından yüzeye ulaşmasına engel olmaktadır. Kabarcıklanma bölgesinin dışındaki sıvı, keser etki yaparak kabarcığı yüzeyden ayırmakta ve aynı zamanda artan buhar hacmi ile birlikte orantılı olarak buhar kabarcığına etki eden kaldırma kuvvetinin artması, kabarcığın sıvı içinde yükselmesini kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda kabarcık ayrılma çapı düşük akılardan itibaren oyuklar arasındaki mesafeden daha büyük olduğu için, kabarcık birleşmesi olayları diğer yüzeylere göre çok daha küçük ısı akıllarında başlamaktadır. Bu sebeple kabarcık ayrılma frekansında görülen dağılım bu yüzeyde daha küçük aralıktadır. Isı akısı arttıkça, yüzeyden ayrılan kabarcığın bir kısmının oyuk üzerinde kalması, yüksek ısı akıllarında kabarcıklanma çevriminin bekleme süresini sıfıra indirmektedir.

6.3.4 Isı taşınım katsayısı

Kaynama yüzeyleri için ısı taşınım katsayısının ısı akısına bağlı olarak değişimi Şekil 6.24'te verilmiştir. Elde edilen grafiklerden kaynama odakları arasındaki mesafe azaldıkça aynı sıcaklık farklarında daha yüksek ısı taşınım katsayılarına ulaşıldığı görülmektedir. Bu durum, oyuklar arasındaki mesafenin azalmasıyla birlikte ısı geçişinin iyileştiğini göstermektedir.



a)



b)

Şekil 6.24 : Isı taşınım katsayısının a) ısı akısıyla b) kızma farkıyla değişimi.

6.4 Kabarcık Görüntüleri

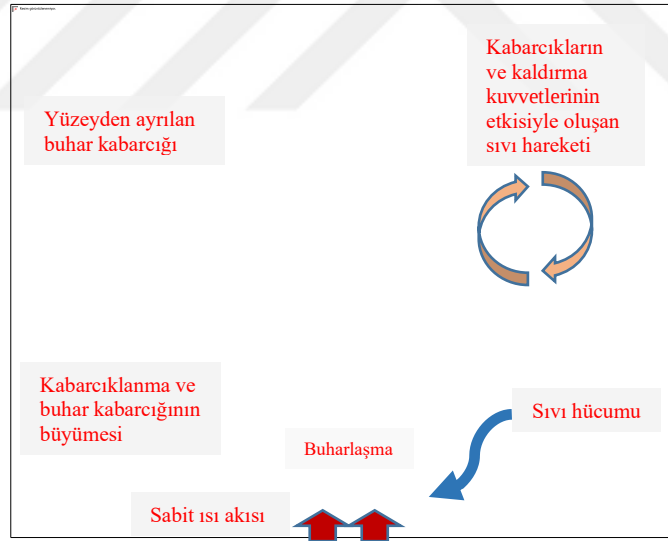
Havuz içindeki ısı geçişi ve akışkan hareketleri kabarcıkların büyüme ve yüzeyden ayrılma özelliklerini belirler. Yüzeyden olan buharlaşma miktarının ayrılma çapı ve frekansına bağlı olması çap ve frekans değerlerini ısı geçişini hesaplayabilmek için önemli parametreler yapar.

Isıtma yüzeyinin sıcaklığı sıvının doyma sıcaklığından daha yüksek olduğunda, doğal taşınım rejimi başlar ve yüzeydeki ısı, oluşan mikrotabaka üzerinden sıvıya aktarılır. Yüksek sıcaklığa sahip olan mikrotabakanın kalınlığı buharlaşmayla birlikte azalır, yüzeyde kabarcıklar oluşmaya başlar ve ısı geçiş mekanizması doğal taşınımdan ayrık kabarcıklı kaynama bölgesine geçer. Yüzeyde buharlaşmanın olması ısı geçişinin artmasına neden olur.

Yüzeyde oluşan kabarcığın büyümesi ilk aşamada atalet kuvvetlerinin etkisiyle olurken, kabarcık içi ve dışındaki basıncın eşitlenmesiyle birlikte mikrotabanın buharlaşması ve arayüzeydeki difüzyon ile devam eder. Kabarcık çevresindeki kızgın sıvıdan olan difüzyonun kabarcık büyümesine etkisi büyüktür [128].

Kabarcık içinde oluşan buhar basıncı, yüzeye yakın bölgede ve kabarcık etrafında bulunan sıvının itilmesine yardımcı olur. Bu iç basınç; kaldırma kuvveti, yüzey gerilimi, sıvının viskozitesi ve ataleti gibi kuvvetlerle dengelenir. Kaldırma kuvvetlerinin atalet kuvvetlerini yenmesiyle birlikte büyüme evresi sona erer ve oluşan net kuvvete bağlı olarak kabarcık yüzeyden ayrılır. Yüzeyden ayrılan kabarcığın kızgın sıvı tabakasının bir bölümünü kendisiyle birlikte sürüklemesi havuz içinde zorlanmış taşınımına neden olur ve ısı geçişini artırır.

Buhar kabarcıklarının hareketi, çalışmada kullanılan her yüzey için, farklı ısı akıları ve yüzey kızgınlığı değerlerinde hızlı kamera ve uzun mesafe mikroskobu ile kaydedilmiştir. Kaynama havuzu içinde gerçekleşen ısı ve akış olayları deneysel çalışmada kaydedilen bir görüntü üzerinde verilmiştir. (Şekil 6.25)



Şekil 6.25 : Havuz içinde gerçekleşen ısı ve akış olayları.

6.4.1 Ayrık kabarcıktanma

Düşük ve orta ısı akıları seviyelerinde kaynama yüzeyinde oluşan kabarcıklar, komşu kaynama odaklarında oluşan ve/veya aynı odakta art arda oluşan kabarcıklar ile etkileşime girmeden büyür ve yüzeyden ayrılırlar.

Kabarcık üzerine etkiyen kuvvetler kabarcıkların şeklini ve hareketini etkiler.

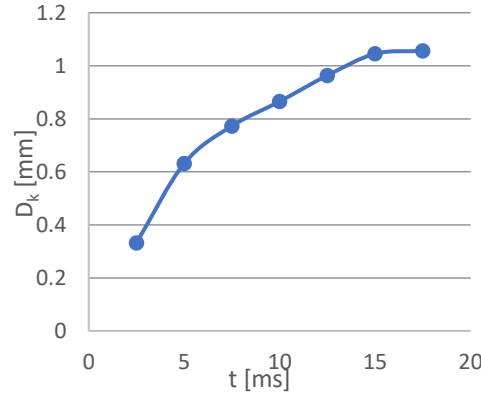
6.4.1.1 Düz yüzey

Ayrık kabarcıklı kaynama rejimi için düz bakır yüzeyde oluşan bir kabarcığın büyümesi ve yüzeyden ayrılması Şekil 6.26'da görülmektedir. Seçilen fotoğraflar arasındaki süre 5 ms'dir. Kabarcık yüzeyden ayrıldıktan sonra, göreceli olarak soğuk olan su, kabarcığın ayrıldığı hacme hücum eder. Isıtma yüzeyinin üstünde bulunan bu sıvı tabakası, yeni bir kabarcığın oluşması için gereken kızgınlığa ulaşana kadar iletim yoluyla ısınır ve kabarcık büyümesi olayı tekrarlanır. Büyüme esnasında, kabarcık altındaki mikrotabanın buharlaşması ve kabarcık etrafında oluşan mikro taşınım olayları sayesinde yüzeyden ısı çekilir.



Şekil 6.26 : Düz yüzeyde kabarcıklanma çevrimi ($q''=25 \text{ kW/m}^2$ $\Delta T=5.2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Şekil 6.27'de verilen büyüme eğrisinde de görüldüğü gibi, büyümenin ilk aşamasında kabarcık çapı hızlıca artarken, sonraki aşamalarda yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



Şekil 6.27 : 26 kW/m^2 ısı akısında bir kabarcık için büyüme eğrisi.

Düşük ısı akısı değerlerinde oluşan kabarcıklar simetrik bir şekle sahipken, daha yüksek akılarında kaldırma kuvveti ve taşınım olaylarının etkisiyle kabarcıkların şekli simetrik olmaktan uzaklaşır.

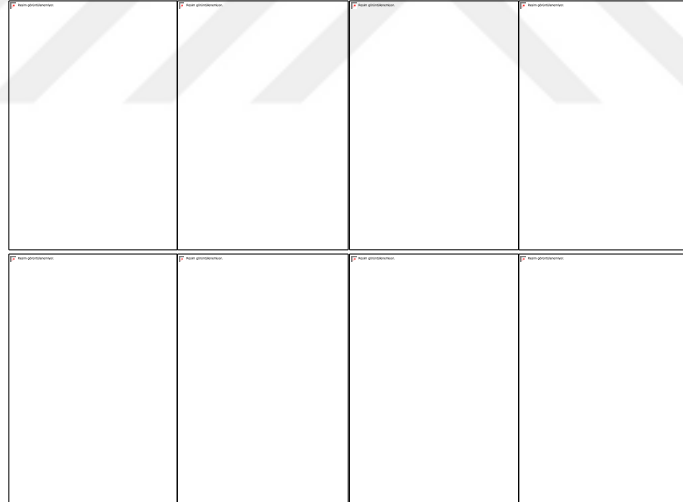
6.4.1.2 Yapay oyuk

Yüzeyde oluşturulan yapay oyuğun etkinleşmesi için gereken yüzey kızgınlığının yüksek olması sebebiyle, buhar kabarcıkları oyuktan önce yüzey üzerindeki doğal kaynama odaklarında oluşmuştur (Şekil 6.28).



Şekil 6.28 : Yüzeydeki oyuktan önce etkinleşen doğal kaynama odakları.

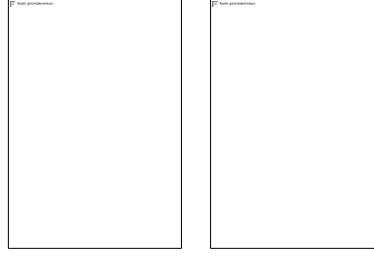
6 mm çapındaki bakır yüzeyin merkezinde oluşturulan 180 µm çapındaki oyukta görüntülenen kabarcıklanma çevrimi için kaydedilen 5 ms aralıklı fotoğraflar Şekil 6.29’da sunulmuştur. Yüzeyde oluşan kabarcık, başlangıçta hızlı bir şekilde büyürken, kabarcığı çevreleyen sıvının aşağı doğru olan hareketi ve arayüzey etrafındaki ısı sınır tabakanın etkisiyle birlikte bu büyüme hızı azalmaya başlar. Kabarcık çapı en yüksek değerine ulaştıktan sonra taban alanı küçülür ve buhar boyun verdiği yerden koparak yüzeyden ayrılır. Kabarcığın, yüzeyde kalan kısmından yeni bir kabarcık oluşmaya başlamasıyla kabarcıklanma çevrimi devam eder. Yüzeyde kalan buhar, ayrılan kabarcığın taban alanının tamamen ıslanmasını önler ve kabarcıklanma mekanizmasının iyileştirir [105].



Şekil 6.29 : Oyukta kabarcıklanma çevrimi ($q''=30 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=5.8 \text{ }^\circ\text{C}$).

Büyümenin ilk aşamalarında küresel formda olan kabarcık zaman geçtikçe küresel formdan sapma göstermekte ve yüksekliği eninden daha hızlı büyümektedir.

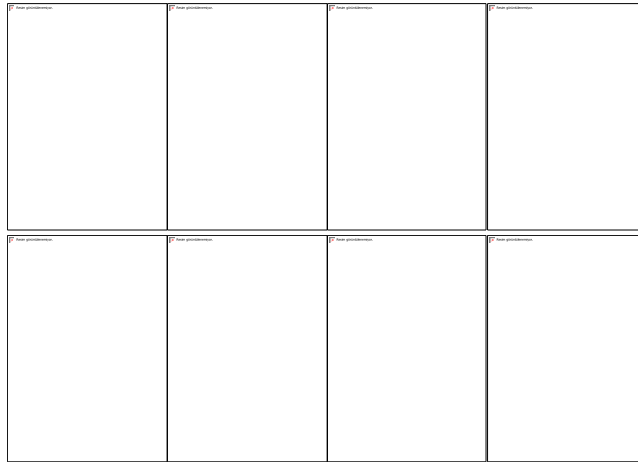
Yaklaşık ısı akısı değerlerinde, oyuklu yüzeyde yapılan deneylerde kabarcık tabanının oyuk ağzına tutunduğu, dolayısıyla taban alanının genişlemesiyle birlikte buharlaşma alanının arttığı görülmektedir (Şekil 6.30).



Şekil 6.30 : Düz yüzey ve oyukta oluşan kabarcığın ayrılmaya yakın andaki şekli, boyun verme davranışı.

Oyukta tutunan kabarcıkta adezyon kuvvetleri de daha etkindir. Bu sebeple kabarcığın yüzeyden ayrılabilmesi için daha büyük bir kaldırma kuvvetine ihtiyaç vardır. Bu da daha yüksek buhar hacmine ulaşılmasıyla mümkündür. Buhar miktarının artması ayrılma çapını da artırmaktadır. Düz yüzeyde oluşan kabarcığın yüzeye tutunduğu alanın daha küçük olması, kaldırma kuvvetleri etkisiyle yukarı doğru hareket eden kabarcığın daha kısa sürede yüzeyden ayrılmasına sebep olur. Bunun sonucu olarak kabarcıklanma çevrimi daha kısa sürede tamamlanır ve frekans, oyukta oluşan kabarcıklanmaya göre daha yüksek değere sahip olur.

Ayrık kabarcıklı kaynama bölgesi için farklı ısı akılarında kaydedilen görüntülerde kabarcığın büyüme ve yüzeyden ayrılma aşamaları görülmektedir (Şekil 6.31). Seçilen fotoğraf kareleri arasındaki süre 5 ms'dir.



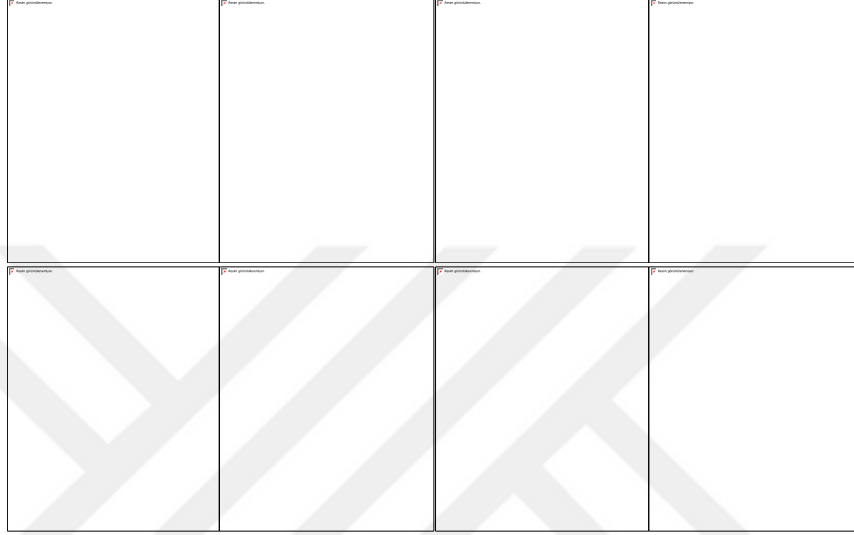
Şekil 6.31 : Oyukta kabarcıklanma çevrimi ($q''=42 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=6.6 \text{ }^\circ\text{C}$).

Isı akısının artmasıyla birlikte iki kabarcıklanma çevrimi arasındaki süre yani kabarcığın oluşması için gerekli kızgınlık derecesine ulaşma süresi kısalmaktadır.

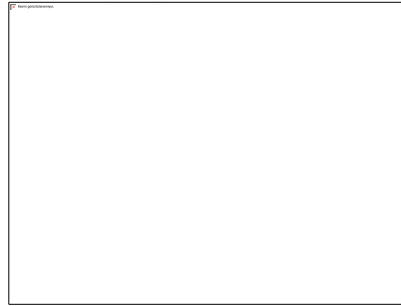
Ayrık kabarcıklı kaynama rejiminde, büyüyen kabarcık diğer odaklarda oluşan kabarcıklar ile etkileşime girmemekte ve yüksek ısı akılarına göre daha büyük çapa

sahip olmaktadır. Şekil 6.32'nin ilk karesinde yüzeyden ayrılan ve odakta oluşan kabarcık birlikte görülmektedir. Seçilen fotoğraflar arasındaki süre 5 ms'dir.

Kabarcıklı kaynamanın ilk aşamalarında yüzey üzerindeki yapay oyukların her birinde ayrı kabarcıkların oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.33). Buradan kaynama başlangıcının yüzeyde oluşturulan mikro ölçekli oyuklarda gerçekleştiği sonucuna ulaşılabilmektedir.



Şekil 6.32 : Oyukta kabarcıklanma çevrimi ($q''=57 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=7.6 \text{ }^\circ\text{C}$).



Şekil 6.33 : Düşük ısı akılarında ayrı kabarcıklanma (2 mm aralık).

6.4.2 Mantar form

Isı akısının artırılmasıyla birlikte kabarcıklar düşey yönde birleşmeye başlamaktadır. Kızgınlık farkının artması kabarcıkların büyüme hızının artmasına neden olur. Büyüme hızı artan kabarcık kaynama odağından ayrılan bir önceki kabarcığın hareketlerinden daha çok etkilenir. 60 kW/m^2 ısı akısında kaydedilen görüntüler Şekil 6.34'te görülmektedir.

Bir kaynama odağında oluşan kabarcığın tepe noktasının yükselme hızı, aynı odakta oluşan önceki kabarcığın yükselme hızından daha büyük olduğu durumda kabarcıklar

düşey yönde birleşir. Büyüyen ikinci kabarcık, ilk kabarcık tarafından çok kısa zaman aralığında yüzeyden çekilir ve absorbe edilir. Yükselme hızının kızgınlık farkından bağımsız olmasına karşın artan ısı akısıyla birlikte kabarcık daha kısa sürede büyümekte ve kabarcık hareketlerinin birbirinden etkilenme oranı artmaktadır. Şekil 6.34'te bir milisaniyede gerçekleşen bu birleşme olayından sonra farklı şekil değişikliklerine uğrayan buhar, düşey eksen yönünde daha uzun köşegene sahip olan elipsoit halinde yüzeyden ayrılır. Yüzeyden ayrılan ilk kabarcığın oluşturduğu vakum etkisi bir sonraki kabarcığın yüzeyden erken ayrılmasına sebep olur.

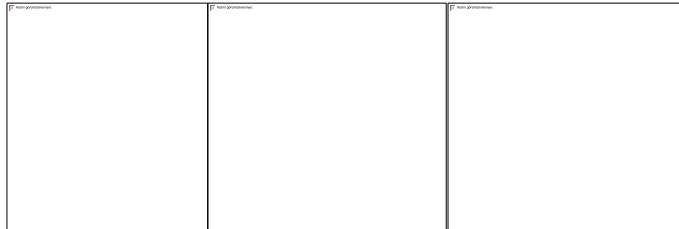


Şekil 6.34 : Kabarcıkların sürekli olarak düşey yönde birleşmesi, ($q''=60 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=7.5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Buyevich ve Webbon(1997), çalışmalarında bu tip birleşimin buhar sütunlarının oluşmasına sebep olacağını ve göreceli olarak soğuk olan suyun kaynama yüzeyine ulaşmasını zorlaştırarak kritik ısı akısına geçişi tetiklediğini belirtmişlerdir [134].

6.4.3 Kabarcıkların birleşmesi olayları

Isı akısı ve yüzey kızgınlığı arttıkça etkinleşen kabarcıklanma odağı sayısı da artmaktadır. Etkin kabarcıklanma odağı sayısı ve kabarcıklanma frekansının artmasının sonucu olarak yüzeyde oluşan kabarcıklar birbirleriyle etkileşime girerek yatay ve dikey yönde birleşirler (Şekil 6.35).



Şekil 6.35 : Kaynama yüzeyine yakın bölgede kabarcıkların yatay, düşey ve diagonal eksenlerde birleşmesi olayları.

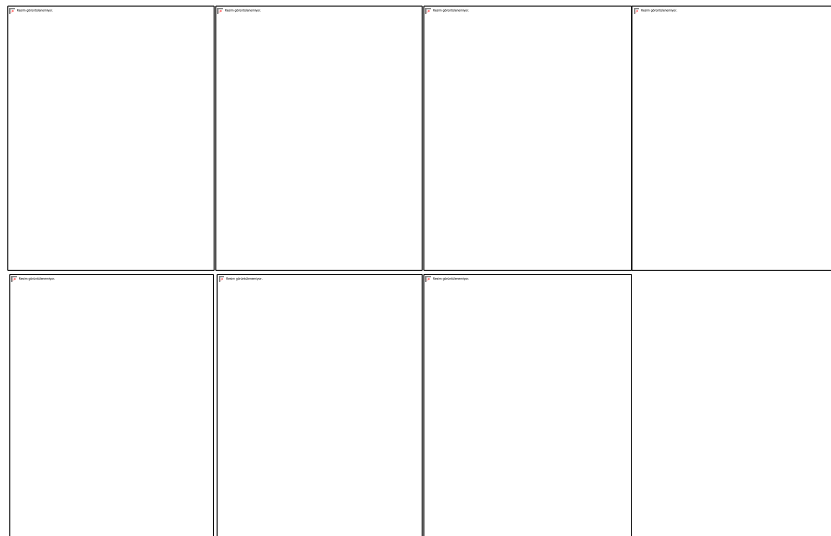
Komşu odaklarda aynı büyüme hızına sahip olarak büyüyen iki buhar kabarcığı yatayda birleşirken, kabarcıkların farklı büyüme hızlarına sahip olması veya kabarcıklar oluşmadan önce geçen bekleme süresinin farklı olması, kabarcıkların

farklı açılarda birleşmesine sebep olur. Aynı odakta art arda oluşan kabarcıkların arasında geçen bekleme süresinin kısa olması ise kabarcıkların düşey yönde birleşmesine sebep olur. Bu durumda odakta büyüyen ilk kabarcığın yüzeyden hemen ayrılamaması sonucu altında oluşan mikrotabaka hızlı bir şekilde buharlaşır. Sadece iki kabarcık arasında kalan sıvı tabakaları ve bu buhar ile bir ağ yapısı oluşur ve altta oluşan kabarcık, ilk kabarcık ile birleşerek yüzeyden ayrılır (Şekil 6.36). Sunulan fotoğraflar arasındaki süre 4 ms'dir.



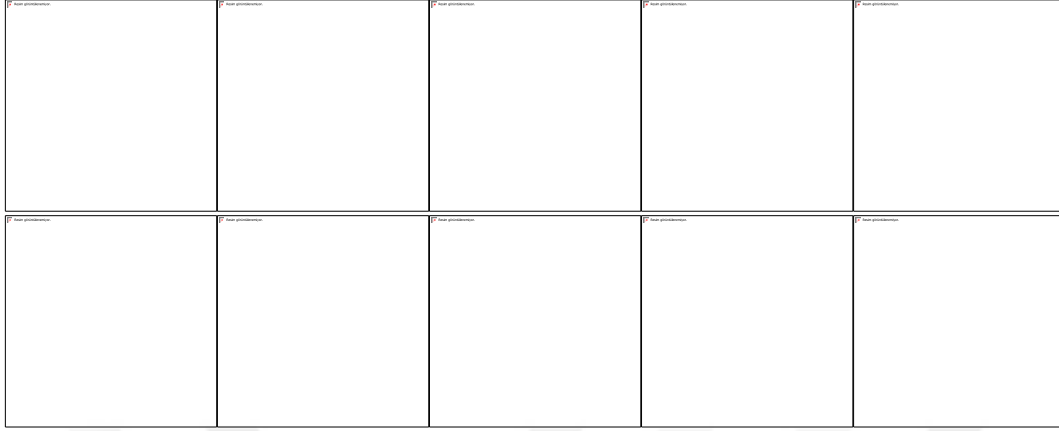
Şekil 6.36 : Oyukta kabarcıklanma çevrimi ($q''=84 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=8.7 \text{ }^\circ\text{C}$).

Etkin kabarcıklanma odağı sayısının artması yüzeyde daha fazla buhar kabarcığı oluşmasına ve kabarcıkların daha yüzeyden ayrılmadan birleşmesine sebep olmaktadır (Şekil 6.37). Seçilen fotoğraf arasındaki süre 1.7 ms'dir.



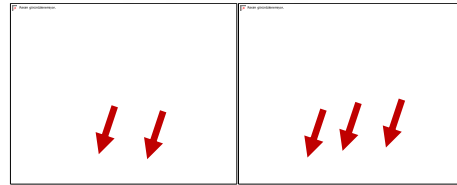
Şekil 6.37 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklanma çevrimi ($q''=122 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=9.8 \text{ }^\circ\text{C}$).

Yapay kaynama odaklarının 1 mm aralıkla yerleştirildiği düzende ısı akısının 85 kW/m² olduğu durumda kabarcıkların birleşmesi detaylı olarak şekilde sunulmuştur. Her fotoğraf karesi arasındaki zaman aralığı 2.5 milisaniyedir (Şekil 6.38).



Şekil 6.38 : Komşu odalarda eşzamanlı oluşan kabarcıkların birleşmesi.

Kaynama yüzeyi üzerindeki komşu odalarda aynı zamanda oluşan ve aynı büyüme hızına sahip olan buhar kabarcıkları, buhar kabarcığının çapının yeterince büyümesi ve sıvı buhar yüzeylerinin arada ince bir sıvı filmi kalana kadar yaklaşması sonucunda birleşirler. Aradaki sıvı filmi buharlaştığında yüzeye iki veya daha fazla noktada tutunan tek bir kabarcık meydana gelir (Şekil 6.39).

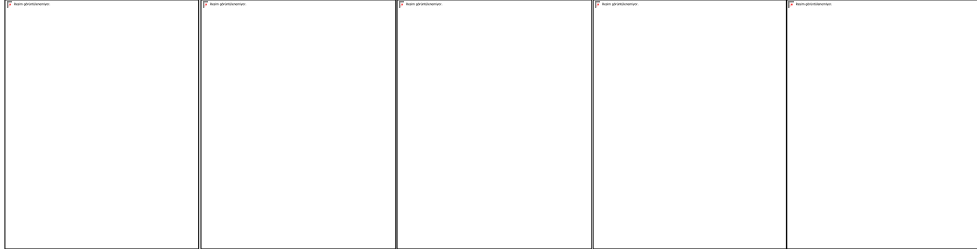


Şekil 6.39 : Birden fazla odaktan beslenen buhar kabarcıkları.

Birleşen kabarcıklar yüzey gerilimi kuvvetleri sonucunda küresel forma ulaşmaya çalışır. Kabarcıkların yüzeye tutunduğu noktalar arasındaki sıvı mikrotabakasının buharlaşması ve kılcallık etkisiyle uzaklaştırılmasıyla birlikte, oluşan kabarcık yüzeyden ayrılır ve bu noktalar yaklaşık eşzamanlı olarak yeniden etkinleşir. Böylelikle kabarcıklanma çevrimi oluşmaya devam eder.

Komşu odaklardaki kabarcıkların birleşmesi, her kabarcığın altındaki mikrotabakanın yanısıra kabarcık köklerinin arasındaki sıvının da buharlaşmasına izin verir. Buharlaştıran mikrotabaka hacminin artması, gizli ısı geçişini artırır ve o bölgedeki yüzey sıcaklığını göreceli olarak düşürür. Buna karşılık, birleşen kabarcıkların sayısının çok miktarda olması, ısı transferinin azalmasına ve kritik ısı akısına geçişe neden olur [48].

Artan ısı akısı ile birlikte kaydedilen görüntüler aşağıda sıralanmıştır (Şekil 6.40-42). Her fotoğraf karesi arasındaki süre 4 ms'dir. Yüksek akılarda yüzeye yakın bir bölgede buhar kümesi oluşur.



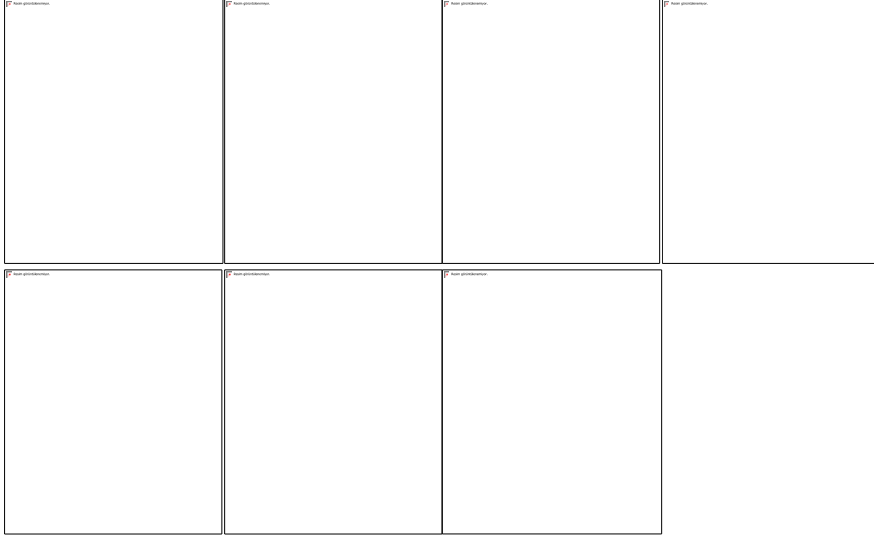
Şekil 6.40 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklanma çevrimi ($q''=142 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.2 \text{ }^\circ\text{C}$).

Buhar kabarcığı, yüzeyde diğer odaklarda oluşan kabarcıklar ile temas edecek kadar büyüdüğünde buhar kümesi tarafından yakalanır ve oluştuğu odaktan ayrılır. Büyük buhar kümesi yavaş bir hızla yükselirken yüzeyde oluşan diğer kabarcıkları yakalamaya devam eder.

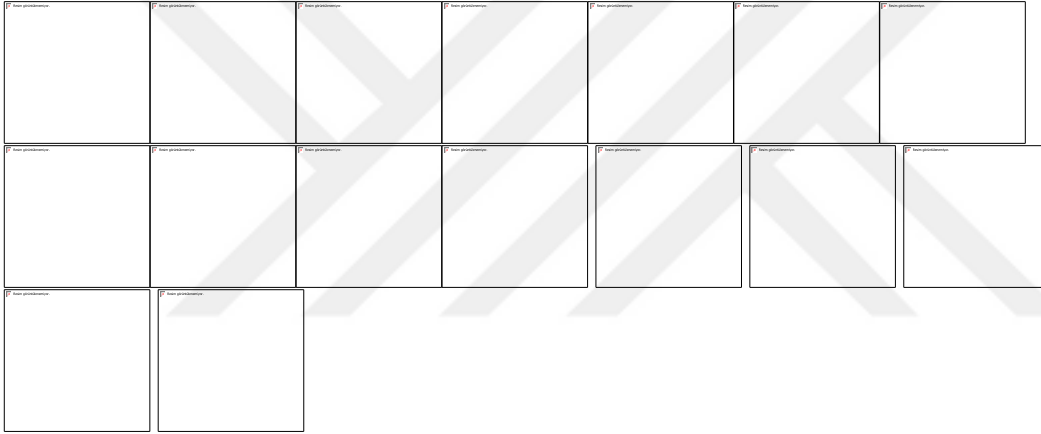


Şekil 6.41 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklanma çevrimi ($q''=165 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.5 \text{ }^\circ\text{C}$).

Oyuklar arasındaki mesafenin 1 mm olduğu durumda kabarcıkların yüksek ısı akılarındaki davranışı Şekil 6.43'te verilmiştir. Her iki fotoğraf karesi arasındaki süre 2.5 ms'dir. Başlangıçta her oyukta oluşan buhar kabarcıkları periyodik olarak yüzeye yakın yüksekliklerde birleşerek tek bir buhar hacmi şeklinde yüzeyden uzaklaşmaktadırlar. Bu durum kabarcık ayrılma çapının artmasına ve ayrılma frekansının azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 6.42 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklanma çevrimi ($q''=177 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.7^\circ\text{C}$).



Şekil 6.43 : Yüksek ısı akılarında kabarcıklanma çevrimi ($q''=202 \text{ kW/m}^2$, $\Delta T=10.8^\circ\text{C}$).

Isı akısının artmasıyla birlikte kabarcıklanma odaklarının üzerinde oluşan buhar kümesini besleyen kabarcıklanma odaklarının sayısı da artmaktadır. Düşük ısı akılarında bir kabarcık çapı mesafesinde bulunan kabarcıklar birleşirken ısı akısı arttıkça sıvı içinde oluşan düzensizlikle birlikte daha uzak mesafede oluşup büyüyen kabarcıklar da birleşebilmektedir. Yüksek ısı akılarında ise yüzeydeki kabarcıkların tümü birleşerek bir buhar kümesi oluşturmaktadır. Farklı odaklarda oluşan kabarcıkların sürekli olarak birleşmesi sonucunda sıvı-buhar arayüzeyinde salınımlar/dalgalanmalar görülmektedir.

Yüzeyden ayrılan kabarcığın yükselme hızı ve izlediği yol sıvı sıcaklığından etkilenir. Havuz içindeki sıcaklığın artması sonucunda viskozite ve yoğunluk değerlerinin azalması buhar kabarcığının daha hızlı yükselmesine sebep olur. Sıvı içindeki bu

davranış ve yükselmenin meydana getirdiği sıvı hareketi, ısı geçişini ve taşınımı artırır. Oluşan kabarcık şekillerinin birbirinden farklı olması, oluşan ve yüzeyden ayrılan her kabarcığın diğer kabarcıklar ile etkileşime girmesi veya dolaylı olarak birbirini etkilemesi, oluşan ısı geçişinin belirlenmesini zorlaştırır.

6.4.4 Etkin kabarcıklaşma odakları sayısı

Etkin olarak çalışan kabarcıklaşma odaklarının sayısı ısı akısı ile birlikte artmaktadır. Çalışmada kullanılan iki yüzey üzerinde etkinleşen kaynama odaklarının sayısı ve konumunu gösteren fotoğraflar Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te sunulmuştur.



Şekil 6.44 : Tek oyuk ile yapılan deneylerde kullanılan yüzeyde kaynama odakları.

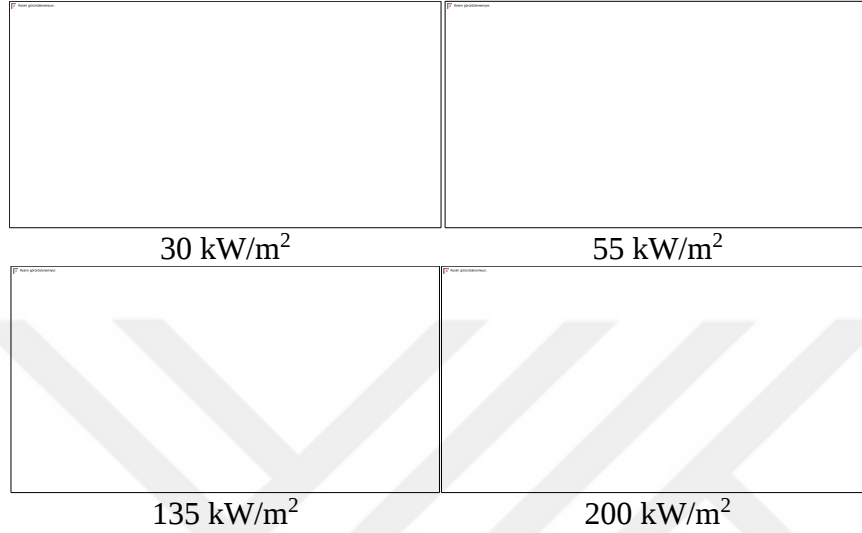


Şekil 6.45 : Oyukların arasındaki mesafenin 2 mm olduğu durumda oyuk yerleşimi ve kaynama odakları.

Etkin kabarcıklaşma odaklarının sayısının ısı akısıyla değişimi Şekil 6.46'da özetlenmiştir. Yapılan gözlemlerde, belirli bir ısı akısı değeri için etkin olarak çalışan oyuklarda sürekli aynı frekansta kabarcık oluşmadığı, etkin olarak çalışan oyukların değiştiği görülmüştür. Yapay odaklardan birinin etkinliğinin artmasıyla komşu odakların etkinliğinin azaldığı ya da tamamen durdurduğu bu etkileşim Golobič ve Gjerkeš'in çalışma sonuçlarında da verilmiştir [135].

Artan ısı akısıyla birlikte etkin kabarcıklaşma odaklarının artması, yüzeyden oluşan kabarcık yoğunluğunu da artırmaktadır.

Komşu odaklarda oluşan kabarcıkların kaynama yüzeyinden ayrılmadan önce birleşerek daha büyük bir kabarcığı oluşturması ve daha sonra yüzeyden ayrılması sonucunda aynı odakta daha küçük ve yüzeyden daha kısa sürede ayrılan bir kabarcığın oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum Kulenovic ve diğ.(2002) ve Chen ve diğ., çalışmalarında da gözlemlenmiştir [125, 136].

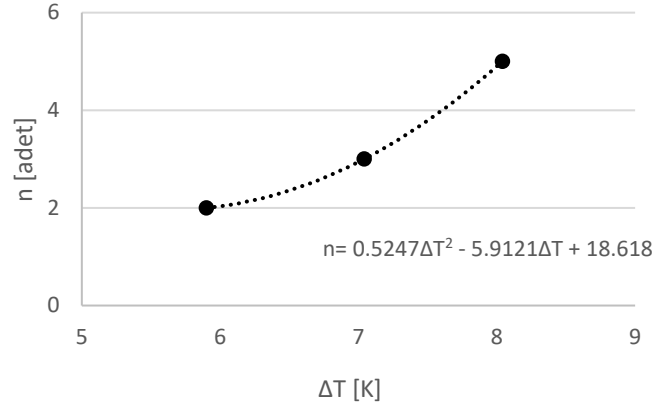


Şekil 6.46 : Isı akısına bağlı olarak kabarcıklanma odaklarının davranışları.

6.5 Kabarcık Dinamiği için Elde Edilen Deneysel Verilerin Önerilen Matematik Model ile Karşılaştırılması

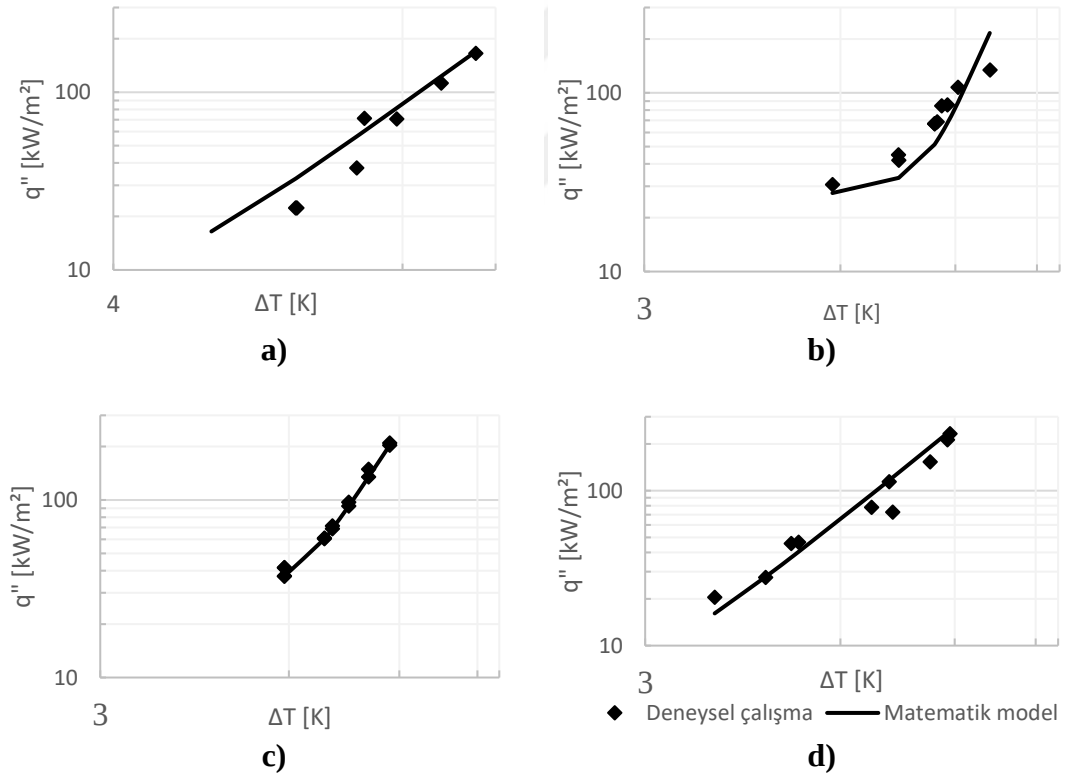
Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi kabarcık dinamiği parametrelerinin kabul edilebilir ölçüde doğru tahmin edilebilir olması kabarcıklanma olayı ve kaynama ile olan ısı geçişini anlayabilmek açısından son derece önemlidir. Bu bölümde, deneysel çalışmada kaydedilen sıcaklık ölçümleri ile hesaplanan ısı akıları ve önerilen matematik model birlikte değerlendirilmiştir.

Kaynama yüzeyi sıcaklığının artmasıyla birlikte kritik kabarcıklanma odağı yarıçapı düşer (Denklemler (2.2)). Bu sebeple yüzeyde bulunan pürüzlülükler de belirli sıcaklıktan itibaren etkin kaynama odağı olarak çalışmaya başlar. Yapılan görüntüleme çalışmalarında bu odak sayıları tespit edilerek bu değerlerden bir eğri geçirilmiş ve matematik modele ampirik katsayı olarak eklenmiştir (Şekil 6.47).



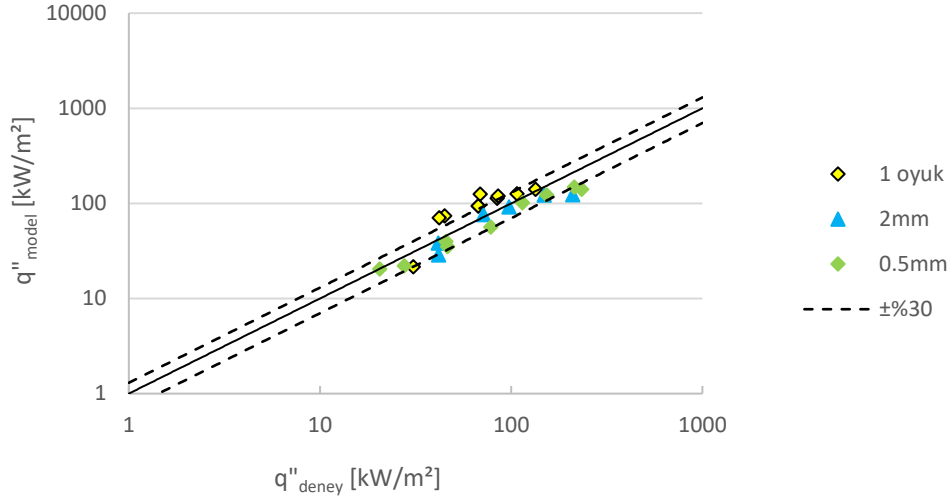
Şekil 6.47 : Kızma farkına bağlı olarak etkinleşen odakların sayısı.

Şekil 6.48’de düz yüzey ve üzerinde 2 mm ve 0.5 mm aralıklarla yerleştirilmiş yapay oyukların bulunduğu bakır yüzeyler için tüm deney verileri aynı ΔT sıcaklık farkları için, Bölüm 3. ’te sunulan matematik model kullanılarak hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.48 : Önerilen matematik modelin deneysel veriler ile karşılaştırılması. a) Düz yüzey b) Tek oyuk c) 2 mm aralıklı oyuklar d) 0.5 mm aralıklı oyuklar

Her bir yüzey için deneysel veriler ve modelleme çalışmaları ile hesaplanan ısı akıları Şekil 6.49’da verilmiştir.



Şekil 6.49 : Her bir yüzey için deneylerde ölçülen ve matematik model ile elde edilen ısı akılarının karşılaştırılması.

Önerilen model, deney verileri ile uyumlu sonuçlar vermekte ve birkaç değer dışında deneysel çalışma ile elde edilen değerleri $\pm 30\%$ aralığında doğru öngörebilmektedir. Matematik modele kabarcık birleşmesinin etkileri dahil edilmemiştir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında kaynama olayının karmaşık yapısını anlayabilmek amacıyla kabarcıktanma davranışı üzerinde çalışılmıştır. Bu amaçla deney tesisatı tasarlanmış ve kaynama yüzeyleri oluşturulmuştur. Oyuklar arasındaki mesafenin ısı geçişine etkisinin araştırılması ve temellerin anlaşılmasıyla birlikte ısı geçişi açısından daha verimli olacak yüzey tasarımları ile uygulamalar geliştirilebilecektir.

Deneysel çalışmada sıcaklık ölçümleri yardımıyla ısıtma yüzeyinden sıvıya olan ısı geçişi hesaplanmış ve kabarcıktanma olayları hızlı görüntüleme sistemi ile kaydedilmiştir. Görüntü işleme kodu yardımıyla kaydedilen görüntülerden kabarcık büyümesi, ayrılma çapı ve frekansı ölçülmüştür.

Sunulan çalışmada elde edilen deney verileri ve sayısal model ile ilgili sonuçlara dayanarak, ticari bir yazılım olan ANSYS FLUENT ile yapılan çözümlemelerin havuz kaynamasının belirli sınırlar içerisinde sayısal olarak çözümlemesine olanak verdiği görülmektedir. Tez kapsamında düz yüzey ve üzerinde yapay kaynama odağı oluşturulan yüzey üzerinde oluşan buhar kabarcığının oluşma çevrimi incelenmiştir. Kullanılan CLSVOF modeli ile kabarcığın büyüme süreci boyunca çapı ve ayrılma süresi deneysel veriler ile uyumlu sonuçlar vermiştir.

- Kaynama mekanizmalarının incelenebilmesi için en gerçekçi yaklaşım deneysel yöntemlerdir. Fakat deneysel çalışmaların sonuçlandırılmasında birçok zorlukla karşılaşilmektedir.
- Doğal yüzeyler için oluşturulan ve deney verilerinden kabarcıktanma odağı sayısı elde edilen matematik model, yüzey karakteristiği belirli olan yüzeyler ile test edilmiş ve üzerinde güncellemeler yapılmıştır.
- Düz yüzey ve üzerinde yapay olarak oluşturulmuş kaynama odakları bulunan yüzeyler kullanılarak kaynama deneyleri yapılmıştır. Buhar kabarcığının yüzeyden ayrıldığı andaki çapı ve ayrılma frekansı hızlı görüntüleme sistemi ile elde edilen görüntüler kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen değerler geliştirilen matematik modelde kullanılmıştır.

- Kabarcık dinamiği ve buna bağlı olarak gelişen ısı geçişi ve sıvı hareketlerinin anlaşılabilmesi amacıyla düz yüzey ve bir kaynama odağı için sayısal model oluşturulmuştur. Oluşturulan model, deneylerde kaydedilen sıcaklık değerleri ve görüntüler kullanılarak doğrulanmıştır. Sayısal modelleme çalışması komşu odaklarda oluşan kabarcıkları dikkate almamıştır.
- Kaynama yüzeyine doğru olan sıvı akışı ve buna ters yönlü olarak buharın yukarı doğru hareketi havuz içindeki hidrodinamik kararsızlıkları artırmaktadır. Kabarcık çapıyla ilgili olan bu ters yönlü akışı dengelemek için kaynama odakları arasında bulunan mesafe dikkate alınmalıdır. Böylelikle yüksek akılarda yüzeydeki kabarcıkların arasından sıvının yüzeye ulaşması kolaylaşabilir ve kritik ısı akısına ulaşılması geciktirilebilir.
- Kabarcıklı kaynamada ısı geçişi mekanizmalarının anlaşılması için önerilen çeşitli bağıntı ve mekanik modeller, kaynama olayını etkileyen kabarcıklanma odağı yoğunluğu, kabarcık ayrılma çapı ve frekansı, yüzeyde bulunan odak geometrisi gibi değişkenlerin tümünün etkisini değerlendirmeye almamaktadır.
- Yapılan çalışmaya oyuk çapı, derinliği ve yerleşimi gibi farklı geometrik parametreler dahil edilerek geliştirilebilir.
- Oluşturulan oyukların 3 boyutlu geometrisi elde edilerek çalışma geliştirilebilir.
- Kabarcıklı kaynama olayının birçok mekanizmadan oluşması sebebiyle sayısal model tüm durumlar için uygulanabilir olmayabilir.
- Yapılan sayısal modellemeler farklı ısı akısı, yüzey kızgınlığı, ortam basıncı ve yerçekimi gibi değerleri de kapsayacak şekilde genişletilebilir. Sıvı ve yüzeyde oluşan gerçek sıcaklık dağılımı modelde kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Küçük ,H.** (2002). Çekirdekli havuz kaynamasında ısı geçişine katı taneciklerin etkisi (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] **Bankoff ,S.G.** (1958). Entrapment of gas in the spreading of a liquid over a rough surface, *AIChE J.*, 4(1): 24–26, doi: 10.1002/aic.690040105.
- [3] **Griffith ,P.**, ve **Wallis ,J.D.** (1958). The role of surface conditions in pool boiling, *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, 56 (30) 49-63.
- [4] **Stephan ,P.**, ve **Hammer ,J.** (1994). A new model for nucleate boiling heat transfer, *Wärme und Stoffübertragung*, 30: 119–125.
- [5] **Zeng ,L.Z.**, **Klausner ,J.F.**, ve **Mei ,R.** (1993). A unified model for the prediction of bubble detachment diameters in boiling systems- I. Pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 36(9): 2261–2270, doi: 10.1016/S0017-9310(05)80111-5.
- [6] **Van Stralen ,S.J.D.**, **Sohal ,M.S.**, **Cole ,R.**, ve **Sluyter ,W.M.** (1975). Bubble growth rates in pure and binary systems: Combined effect of relaxation and evaporation microlayers, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 18(3): 453–467, doi: 10.1016/0017-9310(75)90033-2.
- [7] **McHale ,J.P.**, ve **Garimella ,S. V** (2013). Nucleate boiling from smooth and rough surfaces – Part 1: Fabrication and characterization of an optically transparent heater–sensor substrate with controlled surface roughness John, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 44: 439–455, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.08.005.
- [8] **Pioro ,I.L.**, **Rohsenow ,W.**, ve **Doerffer ,S.S.** (2004). Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 47(23): 5033–5044, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.06.019.
- [9] **Das ,A.K.**, **Das ,P.K.**, ve **Saha ,P.** (2007). Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 31(8): 967–977, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2006.10.006.
- [10] **McHale ,J.P.**, ve **Garimella ,S. V** (2013). Nucleate boiling from smooth and rough surfaces – Part 2: Analysis of surface roughness effects on nucleate boiling, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 44: 439–455, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.08.005.
- [11] **Jones ,B.J.**, ve **Garimella ,S. V.** (2007). Effects of Surface Roughness on the Pool Boiling of Water, ASME/JSME 2007 Therm. Eng. Heat Transf. Summer Conf. Vol. 2. ASME; ss 219–227.
- [12] **Kim ,Y.H.**, **Lee ,K.J.**, ve **Han ,D.** (2008). Pool boiling enhancement with surface treatments, *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, 45(1): 55–60,

doi: 10.1007/s00231-008-0402-8.

- [13] **Wang ,C.H., ve Dhir ,V.K.** (1993). Effect of Surface Wettability on Active Nucleation Site Density During Pool Boiling of Water on a Vertical Surface, *Trans. ASME J. Heat Transfer*, 115: 670-679, doi: 10.1115/1.2910737.
- [14] **Ramiasa ,M., Ralston ,J., Fetzer ,R., ve Sedev ,R.** (2014). The influence of topography on dynamic wetting, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 206: 275–293, doi: 10.1016/j.cis.2013.04.005.
- [15] **Takata ,Y., Hidaka ,S., Cao ,J.M., Nakamura ,T., Yamamoto ,H., Masuda ,M., ve Ito ,T.** (2005). Effect of surface wettability on boiling and evaporation, *Energy*, 30(2–4 SPEC. ISS.): 209–220, doi: 10.1016/j.energy.2004.05.004.
- [16] **Jo ,H., Kang ,S.H., Ahn ,H.S., ve Kim ,M.H.** (2010). Experimental Study of Nucleate Boiling Performance on Several Types of the Mixed-wettability Pattern Surface by Micro-Milli-sized Hydrophobic Patterns, *Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, (ss.1-6). Montreal, Canada, 1-5 Ağustos.
- [17] **Lee ,C.Y., Zhang ,B.J., ve Kim ,K.J.** (2012). Morphological change of plain and nano-porous surfaces during boiling and its effect on nucleate pool boiling heat transfer, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 40: 150–158, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.02.011.
- [18] **Takata ,Y., Hidaka ,S., ve Uraguchi ,T.** (2006). Boiling Feature on a Super Water-Repellent Surface, *Heat Transf. Eng.*, 27(8): 25–30, doi: 10.1080/01457630600793962.
- [19] **Phan ,H.T., Caney ,N., Marty ,P., Colasson ,S., ve Gavillet ,J.** (2009). Surface wettability control by nanocoating: The effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 52(23–24): 5459–5471, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.032.
- [20] **Betz ,A.R., Jenkins ,J., Kim ,C.-J. CJ, ve Attinger ,D.** (2013). Boiling heat transfer on superhydrophilic, superhydrophobic, and superbiphilic surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 57(2): 733–741, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.080.
- [21] **Choi ,S.U.S., ve Eastman ,J.A.** (1995). Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles*, *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, San Fransisco, CA*.
- [22] **Kakaç ,S., ve Pramuanjaroenkij ,A.** (2009). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 52: 3187–3196, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.006.
- [23] **Shahmoradi ,Z., Etesami ,N., ve Nasr Esfahany ,M.** (2013). Pool boiling characteristics of nanofluid on flat plate based on heater surface analysis, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 47: 113–120, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.06.006.
- [24] **Cheol Bang ,I., ve Heung Chang ,S.** (2005). Boiling heat transfer performance

and phenomena of Al₂O₃ –water nano-fluids from a plain surface in a pool, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 48: 2407–2419, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.047.

- [25] **Ahn ,H.S.**, ve **Kim ,H.** (2013). The boiling phenomenon of alumina nanofluid near critical heat flux, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 62: 718–728, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.054.
- [26] **Raveshi ,M.R.**, **Keshavarz ,A.**, **Mojarrad ,M.S.**, ve **Amiri ,S.** (2013). Experimental investigation of pool boiling heat transfer enhancement of alumina-water-ethylene glycol nanofluids, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 44: 805–814, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2012.09.025.
- [27] **Kim ,S.J.**, **Bang ,I.C.**, **Buongiorno ,J.**, ve **Hu ,L.W.** (2007). Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 50(19–20): 4105–4116, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002.
- [28] **Mchale ,J.P.**, ve **Garimella ,S. V** (2010). Bubble nucleation characteristics in pool boiling of a wetting liquid on smooth and rough surfaces, *Int. J. Multiph. Flow*, 36: 249–260, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.12.004.
- [29] **Ishii ,M.**, ve **Zuber ,N.** (1979). Drag coefficient and relative velocity in bubbly, droplet or particulate flows, *AIChE J.*, 25(5): 843–855, doi: 10.1002/aic.690250513.
- [30] **Benjamin ,R.J.**, ve **Balakrishnan ,A.R.** (1997). Nucleation Site Density in Pool Boiling of Saturated Pure Liquids: Effect of Surface Microroughness and Surface and Liquid Physical Properties, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 15: 32–42.
- [31] **Judd ,R.L.**, ve **Hwang ,K.S.** (1976). A Comprehensive Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Including Microlayer Evaporation, *J. Heat Transfer*, 98(4): 623, doi: 10.1115/1.3450610.
- [32] **Chien ,L.-H.**, ve **Webb ,R.L.** (1998). Visualization of pool boiling on enhanced surfaces, *ASHRAE Trans.*, 16(16): 332–341.
- [33] **Mohanty ,R.L.**, ve **Das ,M.K.** (2017). A critical review on bubble dynamics parameters influencing boiling heat transfer, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 78: 466–494, doi: 10.1016/j.rser.2017.04.092.
- [34] **Rohsenow ,W.M.** (1951). *A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids*, Cambridge, Mass. : M.I.T. Division of Industrial Cooperation.
- [35] **Bergman ,T.L.**, **Lavine ,A.S.**, **Incropera ,F.P.**, ve **DeWitt ,D.P.** (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7. baskı. Wiley.
- [36] **Han ,C.-Y.**, ve **Griffith ,P.** (1965). The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling—Part I Bubble Initiation, Growth and Departure, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 8(6): 905–914, doi: 10.1016/0017-9310(65)90074-8.
- [37] **Han ,C.-Y.**, ve **Griffith ,P.** (1965). The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling—Part II The heat flux-temperature difference relation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 8(6): 905–914, doi: 10.1016/0017-

- [38] **Mikic ,B.B., ve Rohsenow ,W.M.** (1969). A New Correlation of Pool-Boiling Data Including the Effect of Heating Surface Characteristics, *J. Heat Transfer*, 91(2): 245, doi: 10.1115/1.3580136.
- [39] **Benjamin ,R.J., ve Balakrishnan ,A.R.** (1996). Nucleate pool boiling heat transfer of pure liquids at low to moderate heat fluxes, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 39(12): 2495–2504.
- [40] **Yu ,B., ve Cheng ,P.** (2002). A Fractal Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer, *J. Heat Transfer*, 124(6): 1117–1124, doi: 10.1115/1.1513580.
- [41] **Chu ,H., ve Yu ,B.** (2009). A new comprehensive model for nucleate pool boiling heat transfer of pure liquid at low to high heat fluxes including CHF, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 52: 4203–4210, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.010.
- [42] **Moore ,F.D., ve Mesler ,R.B.** (1961). The measurement of rapid surface temperature fluctuations during nucleate boiling of water, *AIChE J.*, 7(4): 620–624, doi: 10.1002/aic.690070418.
- [43] **Hsu ,Y.Y.** (1962). On the size range of active nucleation cavities on a heating surface, *J. Heat Transf. Asme*, 207–213.
- [44] **Dhir ,V.K.** (1991). Nucleate and transition boiling heat transfer under pool and external flow conditions, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 12(4): 290–314.
- [45] **Gong ,M., Wu ,Y., Ding ,L., Cheng ,K., ve Wu ,J.** (2013). Visualization study on nucleate pool boiling of ethane, isobutane and their binary mixtures, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 51: 164–173.
- [46] **Michaie ,S., Rullière ,R., ve Bonjour ,J.** (2017). Experimental study of bubble dynamics of isolated bubbles in water pool boiling at subatmospheric pressures, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 87: 117–128, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.04.030.
- [47] **Dhir ,V.** (2006). Mechanistic Prediction of Nucleate Boiling Heat Transfer–Achievable or a Hopeless Task?, *J. Heat Transfer*, 128, 1–12, doi: 10.1115/1.2136366.
- [48] **Bonjour ,J., Clausse ,M., ve Lallemand ,M.** (2000). Experimental study of the coalescence phenomenon during nucleate pool boiling, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 20: 180–187.
- [49] **Zhang ,L., ve Shoji ,M.** (2003). Nucleation site interaction in pool boiling on the artificial surface, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 46(3): 513–522, doi: 10.1016/S0017-9310(02)00291-0.
- [50] **Nimkar ,N.D., Bhavnani ,S.H., ve Jaeger ,R.C.** (2006). Effect of nucleation site spacing on the pool boiling characteristics of a structured surface, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 49(17–18): 2829–2839, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.02.018.
- [51] **Paul ,D.D., ve Abdel-Khalik ,S.I.** (1983). A statistical analysis of saturated nucleate boiling along a heated wire, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 26(4): 509–519, doi: 10.1016/0017-9310(83)90002-9.

- [52] **Kocamustafaogullari ,G., ve Ishii ,M.** (1983). Interfacial Area and Nucleation Site Density in Boiling Systems, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 26(9): 1377–1387, doi: 10.1016/S0017-9310(83)80069-6.
- [53] **Suszko ,A., ve El-Genk ,M.S.** (2015). Saturation boiling of PF-5060 on rough Cu surfaces: Bubbles transient growth, departure diameter and detachment frequency, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 91: 363–373, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.07.083.
- [54] **Robinson ,A.J., ve Judd ,R.L.** (2004). The dynamics of spherical bubble growth, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 47(23): 5101–5113, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.05.023.
- [55] **Plesset ,M.S., ve Zwick ,S.A.** (1954). The Growth of Vapor Bubbles in Superheated Liquids, *J. Appl. Phys.* , 25(1): 493–500, doi: 10.1063/1.1724342.
- [56] **Forster ,H.K., ve Zuber ,N.** (1954). Growth of a Vapor Bubble in a Superheated Liquid Growth of a Vapor Bubble in a Superheated Liquid*, *J. Appl. Phys.*, 25(4): 474–478, doi: 10.1063/1.1721664.
- [57] **Cole ,R., ve Shulman ,H.L.** (1966). Bubble growth rates at high Jakob numbers, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 9(12): 1377–1390, doi: 10.1016/0017-9310(66)90135-9.
- [58] **Cooper ,M.G.** (1969). The microlayer and bubble growth in nucleate pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 12(8): 915–933, doi: 10.1016/0017-9310(69)90155-0.
- [59] **Zhao ,Y.-H., Masuoka ,T., ve Tsuruta ,T.** (2002). Unified theoretical prediction of fully developed nucleate boiling and critical heat flux based on a dynamic microlayer model, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45: 3189–3197.
- [60] **Zuber ,N.** (1961). The dynamics of vapor bubbles in nonuniform temperature fields, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2(1–2): 83–98, doi: 10.1016/0017-9310(61)90016-3.
- [61] **Lee ,H.C., Oh ,B. Do, Bae ,S.W., ve Kim ,H.** (2003). Single bubble growth in saturated pool boiling on a constant wall temperature surface, *Int. J. Multiph. Flow*, 29: 1857–1874, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.09.003.
- [62] **Han ,C.-Y., ve Griffith ,P.** (1962). The Mechanism of Heat Transfer in Nucleate Pool Boiling, *ONR Rep. No. 7673-19*, 1–76.
- [63] **Fritz ,W.** (1935). Berechnung des maximalvolume von dampfblasen, *Phys. Zeitschrift*, 36: 379–388.
- [64] **Cole ,R.** (1967). Bubble frequencies and departure volumes at subatmospheric pressures, *AIChE J.*, 13(4): 779–783, doi: 10.1002/aic.690130434.
- [65] **Cole ,R., ve Rohsenow ,W.M.** (1969). Correlation of bubble departure diameters for boiling of saturated liquids, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 65(92): 211–213.
- [66] **Van Stralen ,S.J.D., ve Zijl ,W.** (1978). Fundamental developments in bubble dynamics, *Sixth International Heat Transfer Conference Toronto*; ss 429–450.

- [67] **Kocamustafaogullari ,G.** (1983). Pressure dependence of bubble departure diameter for water, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 10(6): 501–509, doi: 10.1016/0735-1933(83)90057-X.
- [68] **Wenzel ,U.** (1992). *Saturated Pool Boiling and Subcooled Flow Boiling of Mixtures at Atmospheric Pressure* (Doktora Tezi), The University of Auckland, Auckland.
- [69] **Yang ,C., Wu ,Y., Yuan ,X., ve Ma ,C.** (2000). Study on bubble dynamics for pool nucleate boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 43: 203–208, doi: 10.1016/S0017-9310(99)00132-5.
- [70] **Jamialahmadi ,M., Helalizadeh ,A., ve Müller-Steinhagen ,H.** (2004). Pool boiling heat transfer to electrolyte solutions, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 47: 729–642, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.07.025.
- [71] **Fazel ,S.A.A., ve Shafae ,S.B.** (2010). Bubble Dynamics for Nucleate Pool Boiling of Electrolyte Solutions, *J. Heat Transfer*, 132(8): 081502, doi: 10.1115/1.4001315.
- [72] **Phan ,H.T., Caney ,N., Marty ,P., Colasson ,S., ve Gavillet ,J.** (2010). A model to predict the effect of contact angle on the bubble departure diameter during heterogeneous boiling, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 37: 964–969, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.06.024.
- [73] **Nam ,Y., Aktinol ,E., Dhir ,V.K., ve Ju ,Y.S.** (2011). Single bubble dynamics on a superhydrophilic surface with artificial nucleation sites, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 54: 1572–1577.
- [74] **Hamzekhani ,S., Falahieh ,M.M., ve Akbari ,A.** (2014). Bubble departure diameter in nucleate pool boiling at saturation: Pure liquids and binary mixtures, *Int. J. Refrig.*, 46: 50–58, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.07.003.
- [75] **Bovard ,S., Asadinia ,H., Hosseini ,G., ve Fazel ,S.A.A.** (2017). Investigation and experimental analysis of the bubble departure diameter in pure liquids on horizontal cylindrical heater, *Heat Mass Transf.*, 53(1199–1210).
- [76] **Jiang ,Y.Y., Osada ,H., Inagaki ,M., ve Horinouchi ,N.** (2013). Dynamic modeling on bubble growth, detachment and heat transfer for hybrid-scheme computations of nucleate boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 56: 640–652, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.09.006.
- [77] **Jakob ,M., ve Fritz ,W.** (1931). Versuche über den Verdampfungsvorgang, *Forsch. Ingenieurwes*, 2: 435–447.
- [78] **Jakob ,M.** (1949). *Heat Transfer*, 1. baskı. John Wiley & Sons Inc, New York.
- [79] **Zuber ,N.** (1959). *Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer* (Doktora Tezi), University of California, Davis.
- [80] **McFadden ,P.W., ve Grassmann ,P.** (1962). The relation between bubble frequency and diameter during nucleation pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 5: 169–173.
- [81] **Mikic ,B.B., ve Rohsenow ,W.M.** (1970). On Bubble Growth Rates, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 13: 657–666.
- [82] **Sakashita ,H., ve Ono ,A.** (2009). Boiling behaviors and critical heat flux on a

- horizontal plate in saturated pool boiling of water at high pressures, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 52: 744–750, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.040.
- [83] **Hamzekhani ,S., Falahieh ,M.M., Kamalizadeh ,M.R., ve Nazari ,Z.** (2015). Experimental study on bubble departure frequency for pool boiling of water/NaCl solutions, *Heat Mass Transf.*, 51: 1313–1320.
- [84] **Cole ,R.** (1960). A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux, *AIChE J.*, 6(4): 533–538, doi: 10.1002/aic.690060405.
- [85] **Ivey ,H.J.** (1967). Relationships between bubble frequency, departure diameter and rise velocity in nucleate boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 10(8): 1023–1040, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(67\)90118-4](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(67)90118-4).
- [86] **Stephan ,K., ve Abdelsalam ,M.** (1980). Heat-transfer correlations for natural convection boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 23(1): 73–87, doi: 10.1016/0017-9310(80)90140-4.
- [87] **Labuntsov ,D.A.** (1973). Heat transfer problems with nucleate boiling of fluids, *Therm. Eng. (English Transl. Teploenerg.)*, 19(9): 21–28.
- [88] **Cooper ,M.G.** (1984). Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling—A Wide-Ranging Examination Using Reduced Properties, *Advances In Heat Transfer*, 16, 157–239, doi:10.1016/S0065-2717(08)70205-3.
- [89] **Cornwell ,K., ve Houston ,S.D.** (1994). Nucleate pool boiling on horizontal tubes: A convection-based correlation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 37(SUPPL. 1): 303–309, doi: 10.1016/0017-9310(94)90031-0.
- [90] **Alavi Fazel ,S.A., ve Roumana ,S.** (2010). *Pool Boiling Heat Transfer to Pure Liquids*. WSEAS Press.
- [91] **Inoue ,T., Kawae ,N., ve Monde ,M.** (1998). Characteristics of heat transfer coefficient during nucleate pool boiling of binary mixtures - Improvement of correlation and its physical meaning, *Heat Mass Transf.*, 33: 337–344.
- [92] **Shoji ,M., Mosdorf ,R., Zhang ,L., Takagi ,Y., Yasui ,K., ve Yokota ,M.** (2002). Features of boiling on an artificial surface- Bubble formation, wall temperature fluctuation and nucleation site interaction, *J. Therm. Sci.*, 11(3): 226–234.
- [93] **Pascual ,C.C., Jeter ,S.M., ve Abdel-Khalik ,S.I.** (2002). Visualization of boiling bubble dynamics using a flat uniformly heated transparent surface, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45: 691–696.
- [94] **Diao ,Y., Zhao ,Y., ve Wang ,Q.** (2006). Visualization of bubble dynamics for pool boiling of binary refrigerant mixture R11-R113, *Chinese J. Chem. Eng.*, 14(2): 149–157, doi: 10.1016/S1004-9541(06)60052-9.
- [95] **Nam ,Y., Wu ,J., Warriier ,G., ve Ju ,Y.S.** (2009). Experimental and Numerical Study of Single Bubble Dynamics on a Hydrophobic Surface, *J. Heat Transfer*, 131(12): 121004, doi: 10.1115/1.3216038.
- [96] **Golobic ,I., Petkovsek ,J., Baselj ,M., Papez ,A., ve Kenning ,D.B.R.** (2009). Experimental determination of transient wall temperature distributions close to growing vapor bubbles, *Heat Mass Transf. und*

Stoffuebertragung, 45(7): 857–866, doi: 10.1007/s00231-007-0295-y.

- [97] **Gerardi ,C., Buongiorno ,J., Hu ,L.W., ve McKrell ,T.** (2010). Study of bubble growth in water pool boiling through synchronized, infrared thermometry and high-speed video, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 53(19–20): 4185–4192, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.041.
- [98] **Jawurek ,H.H.** (1969). Simultaneous determination of microlayer geometry and bubble growth in nucleate boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 12(8): 843–848, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90151-3](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(69)90151-3).
- [99] **Voutsinos ,C.M., ve Judd ,R.L.** (1975). Laser Interferometric Investigation of Microlayer Evaporation Phenomenon, *J. Heat Transf. Asme*, 97(1): 88–92, doi: 10.1115/1.3450295.
- [100] **Koffman ,L.D., ve Plesset ,M.S.** (1983). Experimental observations of the microlayer in vapor bubble growth on a heated solid, *J. Heat Transf. Asme*, 105(3): 625–632, doi: 10.1115/1.3245631.
- [101] **Gao ,M., Zhang ,L., Cheng ,P., ve Quan ,X.** (2012). An investigation of microlayer beneath nucleation bubble by laser interferometric method, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 57: 183–189, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.017.
- [102] **Nishio ,S., Gotoh ,T., ve Nagaib ,N.** (1998). Observation of boiling structures in high heat-flux boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 41: 3191–3201.
- [103] **Chung ,H.J., ve No ,H.C.** (2003). Simultaneous visualization of dry spots and bubbles for pool boiling of R-113 on a horizontal heater, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 46(12): 2239–2251, doi: 10.1016/S0017-9310(02)00524-0.
- [104] **Nishio ,S., ve Tanaka ,H.** (2004). Visualization of boiling structures in high heat-flux pool-boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 47: 4559–4568, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.07.033.
- [105] **Chu ,I.-C., Cheon No ,H., ve Song ,C.-H.** (2013). Visualization of boiling structure and critical heat flux phenomenon for a narrow heating surface in a horizontal pool of saturated water, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 62: 142–152, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.067.
- [106] **Jung ,S., ve Kim ,H.** (2015). An Experimental Study on Heat Transfer Mechanisms in the Microlayer using Integrated Total Reflection, Laser Interferometry and Infrared Thermometry Technique, *Heat Transf. Eng.*, 36(12): 1002–1012, doi: 10.1080/01457632.2015.979109.
- [107] **Jo ,H., Park ,H.S., ve Kim ,H.** (2016). Single bubble dynamics on hydrophobic-hydrophilic mixed surfaces, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 93: 554–565, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.031.
- [108] **Durst ,F., Schönung ,B., Selanger ,K., ve Winter ,M.** (1986). Bubble-driven liquid flows, *J. Fluid Mech.*, 170: 53–82, doi: 10.1017/S0022112086000800.
- [109] **Noh ,W.F., ve Woodward ,P.** (1976). SLIC (Simple Line Interface Calculation), *Fifth Int. Conf. Numer. Methods Fluid Dyn.*, (ss.330–340). Hollanda : Enschede, 28-30 Haziran.

- [110] **Osher ,S., ve Sethian ,J.A.** (1988). Fronts Propagating with Curvature Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations, *J. Comput. Phys.*, 79: 12–49.
- [111] **Bourlioux ,A.** (1995). A coupled level-set volume-of-fluid algorithm for tracking material interfaces, *6th Int. Symp. Comput. fluid Dyn.*(ss. 15-22). ABD, Lake Tahoe, NV, 4-8 Eylül.
- [112] **Sussman ,M., ve Puckett ,E.G.** (2000). A Coupled Level Set and Volume-of-Fluid Method for Computing 3D and Axisymmetric Incompressible Two-Phase Flows, *J. Comput. Phys.*, 162: 301–337, doi: 10.1006.
- [113] **Ningegowda ,B.M.** (2016). A Coupled Level Set And Volume Of Fluid Method For Numerical Simulation Of Boiling Flows, Indian Institute of Technology Delhi.
- [114] **Liu ,Q., ve Palm ,B.** (2016). Numerical study of bubbles rising and merging during convective boiling in micro-channels, *Appl. Therm. Eng.*, 99: 1141–1151, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.116.
- [115] **Tetik ,T., ve Uralcan ,I.Y.** (2019). Nucleate Pool Boiling on A Plain Surface, *Hittite J. Sci. Eng.*, 4(6): 309–313, doi: 10.17350/HJSE19030000162.
- [116] **Tomar ,G., Biswas ,G., Sharma ,A., ve Agrawal ,A.** (2005). Numerical simulation of bubble growth in film boiling using a coupled level-set and volume-of-fluid method, *Phys. Fluids*, 17: 112103-1-112103–112113, doi: 10.1063/1.2136357.
- [117] **Welch ,S.W.J., ve Wilson ,J.** (2000). A Volume of Fluid Based Method for Fluid Flows with Phase Change, *J. Comput. Phys.*, 160(2): 662–682, doi: 10.1006/jcph.2000.6481.
- [118] **Pijl ,S.P. Van Der, Segal ,A., Vuik ,C., ve Wesseling ,P.** (2005). A mass-conserving Level-Set method for modelling of multi-phase flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 47(4): 339–361.
- [119] **Kurul ,N., ve Podowski ,M.Z.** (1990). Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling, *Int. Heat Transf. Conf.* 9, (ss.21-25). Jerusalem
- [120] **Hoang ,N.H., Song ,C. H., Chu ,I. C., ve Euh ,D. J.** (2017). A bubble dynamics-based model for wall heat flux partitioning during nucleate flow boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 112: 454–464.
- [121] **Kim ,M., ve Kim ,S.J.** (2020). A mechanistic model for nucleate pool boiling including the effect of bubble coalescence on area fractions, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 163: 120453, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120453.
- [122] **Cryder ,D.S., ve Finalborgo ,A.C.** (1937). Natural Convection From Horizontal Flat Surface, *Trans. Am. Inst. Chem. Engrs.*, 33, ss 173–178.
- [123] **Kutateladze ,S.S., ve Gogonin ,I.I.** (1979). Growth rate and detachment diameter of a vapor bubble in free convection boiling of a saturated liquid, *High Temp.*, 17: 667–671.
- [124] **Narayan ,S., Singh ,T., ve Srivastava ,A.** (2020). Experiments on pool boiling

regimes and bubble departure characteristics of single vapor bubble under subcooled bulk conditions, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 111, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109943.

- [125] **Chen ,H., Chen ,G., Zou ,X., Yao ,Y., ve Gong ,M.** (2017). Experimental investigations on bubble departure diameter and frequency of methane saturated nucleate pool boiling at four different pressures, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 112: 662–675, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.05.031.
- [126] **Kumar Dhir ,V., Warriier ,G.R., Aktinol ,E., Chao ,D., Eggers ,J., Sheredy ,W., Booth ,W., Dhir ,V.K., Warriier ,G.R., Aktinol Henry ,E., Chao ,D., Sheredy ,W., Eggers ,J., ve Booth ,W.** (2012). Nucleate Pool Boiling Experiments (NPBX) on the International Space Station, *Microgravity Sci. Technol*, 24: 307–325, doi: 10.1007/s12217-012-9315-8.
- [127] *Ansys Fluent Theory Guide*, Release 15.
- [128] **Yabuki ,T., ve Nakabeppu ,O.** (2014). Heat transfer mechanisms in isolated bubble boiling of water observed with MEMS sensor, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 76: 286–297, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.012.
- [129] **Ramaswamy ,C., Joshi ,Y., Nakayama ,W., ve Johnson ,W.B.** (2002). High-speed visualization of boiling from an enhanced structure, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45(24): 4761–4771, doi: 10.1016/S0017-9310(02)00196-5.
- [130] **Gong ,S., Ma ,W., ve Li ,L.** (2013). An experimental study on the effect of liquid film thickness on bubble dynamics, *Appl. Therm. Eng.*, 51: 459–467, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.09.025.
- [131] **Mukherjee ,A., ve Dhir ,V.K.** (2004). Study of Lateral Merger of Vapor Bubbles During Nucleate Pool Boiling, *J. Heat Transfer*, 126(6): 1023, doi: 10.1115/1.1834614.
- [132] **Bi ,J., Christopher ,D.M., Zhao ,D., Xu ,J., ve Huang ,Y.** (2019). Numerical study of bubble growth and merger characteristics during nucleate boiling, *Prog. Nucl. Energy*, 112: 7–19, doi: 10.1016/j.pnucene.2018.12.001.
- [133] **Beer ,H.** (1971). Das dynamische Blasenwachstum beim Sieden von Flüssigkeiten an Heizflächen, *Forsch. im Ingenieurwes.*, 37(3): 85–90.
- [134] **Buyevich ,Y.A., ve Webbon ,B.W.** (1997). The isolated bubble regime in pool nucleate boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 40(2): 365–377.
- [135] **Golobič ,I., ve Gjerkeš ,H.** (2001). Interactions between laser-activated nucleation sites in pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 44(1): 143–153, doi: 10.1016/S0017-9310(00)00087-9.
- [136] **Kulenovic ,R., Mertz ,R., ve Groll ,M.** (2002). High speed flow visualization of pool boiling from structured tubular heat transfer surfaces, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 25: 547–555.
- [137] **Uralcan ,İ.Y.** (2021). *MAK509 Isı-Akış Olaylarında Deneysel Yöntemler*.

EKLER

Ek A : Belirsizlik Hesabı





EK A : Belirsizlik Hesabı

Deneysel çalışmalarda kullanılan ölçme cihazlarının hassasiyetleri ve kalibrasyonları, çevresel koşullar ve kullanıcıların okuma hataları gibi etkenler deney sonuçlarında belirsizliğe neden olur. Kullanıcı kaynaklı hatalar tecrübe ve dikkate bağlı iken, ölçme cihazlarından kaynaklanan belirsizliklerin giderilmesi çoğu zaman imkansızdır. Bu sebeple bu belirsizliklerin belirlenmesi deneysel verilerin güvenilirlik düzeyinin anlaşılması açısından önemlidir[1, 137].

Bu çalışma sonuçlarını etkileyebilecek belirsizlikler; uzunluk ve sıcaklık ölçümleri, yapılan kabuller ve hesap yöntemlerinden kaynaklanmaktadır.

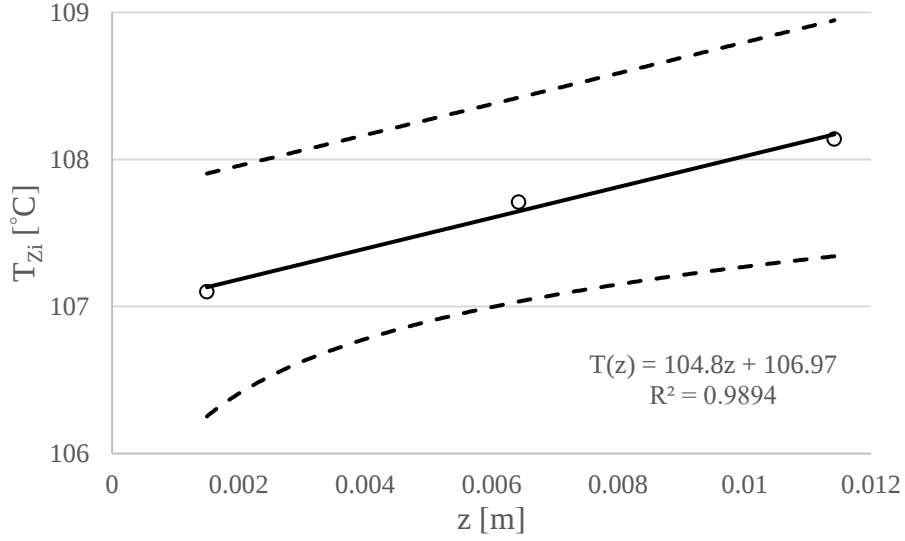
Uzunluk ölçümünde kullanılan kumpasın hassasiyetinden kaynaklanan belirsizlik, Çizelge A.1’de verilmiştir.

Çizelge A.1 : Ölçme silindirindeki termoeleman konumlarının ısı geçiş yüzeyine mesafesinin ölçülmesindeki belirsizlik.

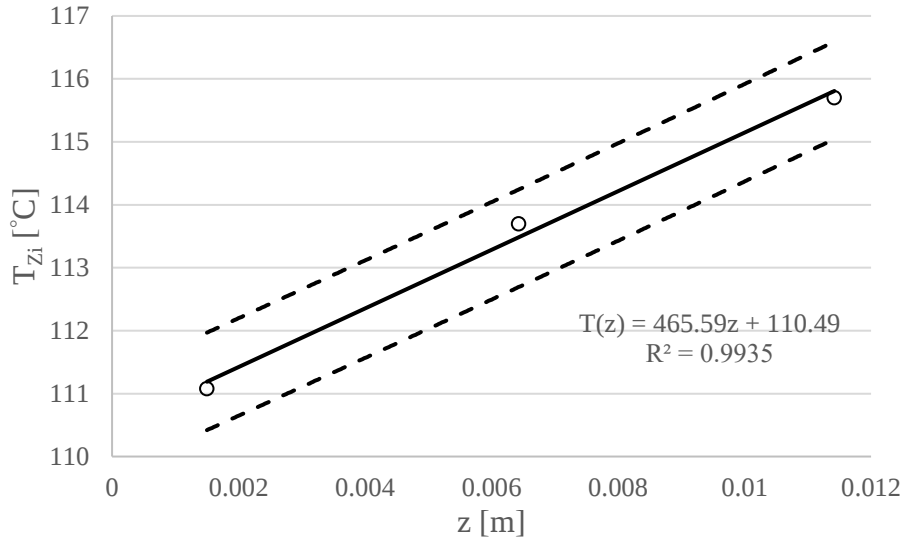
	Ölçme sonucu	Mutlak belirsizlik	Bağıl belirsizlik	% belirsizlik
i	z_i [m]	$\pm\delta z$ [m]	$\pm\delta z/z_i$ [--]	[--]
1	0.0015	0.00002	0.01333	1.333
2	0.00643	0.00002	0.00311	0.311
3	0.01142	0.00002	0.00175	0.175

Sıcaklık ölçmelerindeki belirsizlik termoelemanların hassasiyeti ve veri toplama sisteminden kaynaklanan belirsizliklerden kaynaklanmaktadır. Kullanılan K-tipi termo-elemanların hassasiyeti $\pm 0.025\%$ ’tir. Veri toplama sisteminden kaynaklanan belirsizlik ise hem ölçme hassasiyetinin (μV) mertebesinde olması hem de ortalama 200 ölçümün ortalaması kullanıldığı için ihmal edilebilecek değerdedir.

Yüksek ve düşük ısı akılarında ölçme silindiri eksenindeki sıcaklık dağılımı Şekil A.1 ve Şekil A.2’de verilmiştir.



Şekil A.1 : Düşük ısı akısında ($q''=41 \text{ kW/m}^2$) ölçme silindirindeki sıcaklık dağılımı.



Şekil A.2 : Yüksek ısı akısında ($q''=183 \text{ kW/m}^2$) ölçme silindirindeki sıcaklık dağılımı.

Belirsizlik hesabında izlenen yöntem, kullanılan bağıntılar ile yüksek ve düşük ısı akıları için yapılan örnek belirsizlik hesaplarının sonuçları Çizelge A.2’de verilmiştir.

Çizelge A.2 : Deney verilerindeki belirsizliğin hesabında kullanılan bağıntılar ve örnek sonuçlar.

		Yüksek Isı Akısı	Düşük Isı Akısı
Ölçülen sıcaklıklar	$T_{Z1} [^{\circ}\text{C}]$	111	107.1
	$T_{Z2} [^{\circ}\text{C}]$	113.7	107.7
	$T_{Z3} [^{\circ}\text{C}]$	115.7	108.1
	$T_d [^{\circ}\text{C}]$	99.9	99.8
Yüzey sıcaklığı	$T_y [^{\circ}\text{C}]$	110.4	106.9
Sıcaklık gradyeni	$m=(dT/dx) [\text{K/m}]$	466	105
Korelasyon katsayısı	R^2	0.993	0.989
Ölç. sil. ort. sic.	$T_{ort} [^{\circ}\text{C}]$	113.4	107.6
Ölç. sil. ısı. ilt. kt.	$k_{Tort} [\text{W/mK}]$	392.5	394.4
Sıcaklık farkı	$\Delta T_d = T_y - T_d [\text{K}]$	10.5	7.1
Isı akısı	$q'' = k dT/dz [\text{W/m}^2]$	1.83×10^5	0.41×10^5
Hesaplanan sıcaklıklar	$T_{Z1h} [^{\circ}\text{C}]$	111.1	107.1
	$T_{Z2h} [^{\circ}\text{C}]$	113.4	107.6
	$T_{Z3h} [^{\circ}\text{C}]$	115.8	108.1
Sıcaklık ölçmelerinin standart sapması	$\sigma_T = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_{zih} - T_{zi})^2 \right)^{1/2}$ (n=3) [K]	0.26	0.08
Sıcaklık gradyenindeki belirsizlik	$\sigma_m = \frac{\sigma n^{1/2}}{\left[n \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2 \right]^{1/2}}$ (n=3) [K/m]	37.71	10.84
Yüzey sıcaklığındaki belirsizlik	$\sigma_{T_y} = \frac{\sigma (\sum_{i=1}^n z_i^2)^{1/2}}{\left[n \sum_{i=1}^n z_i^2 - (\sum_{i=1}^n z_i)^2 \right]^{1/2}}$ (n=3) [K/m]	0.26	0.08
Isı akısındaki belirsizlik	$\sigma_{q''} = \sqrt{\left(\frac{\partial q''}{\partial m} \sigma_m \right)^2} = k \sigma_m [\text{W/m}^2]$	1.48×10^4	0.43×10^4
Isı akısı ve % belirsizlik	$q'' \pm \% \left(\frac{\sigma_{q''}}{q''} 100 \right) [\text{W/m}^2]$	1.83×10^5 $\pm \%8.1$	0.41×10^5 $\pm \%10.3$
Sıcaklık farkındaki belirsizlik	$\sigma_{\Delta T_d} = \sqrt{\sigma_{T_y}^2 + \sigma_{T_d}^2} [\text{K}]$	0.28	0.08
Sıcaklık farkı ve % belirsizlik	$\Delta T_d \pm \% \left(\frac{\sigma_{\Delta T_d}}{\Delta T_d} 100 \right) [\text{K}]$	$10.5 \pm \%2.5$	$7.1 \pm \%1.06$



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Tuğba TETİK

ÖĞRENİM DURUMU

- **Lisans:** 2008, Gazi Üniversitesi, Çorum Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- **Yüksek Lisans:** 2011, Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018- Devam ediyor – Araştırma Görevlisi – İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 2011-2018 – Araştırma Görevlisi – İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 2009-2011 – Araştırma Görevlisi – Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- 15.02.2018-15.05.2018 – Marie Curie Horizon 2020 Projesi (Etexweld – Proje No: 644268) Araştırmacı Bursu – GemTex Laboratuvarı, Roubaix, Fransa.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Tetik, T.**, Uralcan, İ.Y. (2019). Nucleate Pool Boiling On a Plain Surface, *Hittite Journal of Science and Engineering*, 6(4), 309-313, doi: 10.17350/HJSE19030000162.
- **Tetik T.**, Uralcan İ.Y. (2017). Visual Investigation of Nucleate Pool Boiling on A Flat Surface. *International Conference on Advances in Science and Arts*, Mart 29-31, 2017 İstanbul, Türkiye.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Tetik, T.**, Yildiz, R.A., Labanieh, A.R., Yoruk, B., Kursun Bahadır, S., Kalaoglu, F., ve Koncar, V. (2021). Hydrodynamic modeling of e-textile fabric washing behavior by the Coupled Eulerian–Lagrangian method, *Text. Res. J.*, 91(9–10): 1117–1131, doi: 10.1177/0040517520973455.

- **Tetik T.**, Yoruk B., Yildiz R. A. , Labanieh A. R. , Kurşun Bahadır S., Kalaoğlu F., Koncar V., (2019). Wear Modeling of A Conductive Yarn. *2nd International Conference On Life And Engineering Sciences, ICOLES 2019*, Haziran 27-29, 2019 İstanbul, Türkiye.
- Kılıçarslan A., **Tetik, T.**, Kurtbaş İ. (2012). Azeotropik ve Yakın Azeotropik Soğutucu Akışkan Karışımlarının Karşılaştırılması, *Termodinamik*, 235, 64-70.
- **Tetik, T.**, Kılıçarslan A. (2012). Exhaust Gas Analysis of a Residential Heating System, *6th International Ege Energy Symposium and Exhibition*, Haziran 28-30, 2012 İzmir, Türkiye.
- **Tetik, T.**, Kılıçarslan A. (2011). Değişken Gaz Debisinin Radyatör Kapasitesine ve Tersinmezliğe Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *İKLİM 2011- Ulusal İklimlendirme Kongresi ve Fuarı*, Kasım 18-20, 2011 Antalya, Türkiye.
- **Tetik, T.**, Kılıçarslan A. (2011). Su Sıcaklığı ve Debisinin Radyatör Kapasitesine ve Tersinmezliğine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Eylül 7-10, 2011 Zonguldak, Türkiye.
- Kılıçarslan A., **Tetik, T.**, Kurtbaş İ. (2011). Azeotropik ve Yakın Azeotropik Soğutucu Akışkan Karışımlarının Kullanıldığı Soğutma Çevriminin İkinci Kanun Analizi, *Anadolu Enerji Sempozyumu*, Haziran 22-24, 2011 Elazığ, Türkiye.