

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YATAY BİR BORU İÇİNDE FC-72 AKIŞKANININ AKIŞ KAYNAMASININ DÜZ  
VE OYUKLU BİR YÜZEYDE VE HAVUZ KAYNAMASININ DÜZ BİR YÜZEYDE  
NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

**MEHMETCAN DÖNERTAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. SEBİHA YILDIZ**

**İSTANBUL, 2018**

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YATAY BİR BORU İÇİNDE FC-72 AKIŞKANININ AKIŞ KAYNAMASININ DÜZ  
VE OYUKLU BİR YÜZEYDE VE HAVUZ KAYNAMASININ DÜZ BİR YÜZEYDE  
NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmetcan Dönertaş tarafından hazırlanan tez çalışması 08.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Sebiha YILDIZ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Galip TEMİR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ebru MANÇUHAN  
Marmara Üniversitesi

Kardeşime ...

Mayıs, 2018

Mehmetcan Dönertaş



## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	viii
KISALTMA LİSTESİ.....	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xiv
ÖZET .....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	1
1.3    Hipotez .....	1
BÖLÜM 2	
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	2
BÖLÜM 3	
KAYNAMA .....	9
BÖLÜM 4	
NÜMERİK MODEL.....	12
4.1    Akışkan Hacim Metodu (VOF) .....	12
4.2    Mikro Bölge .....	13
4.3    Courant Sayısı.....	14
BÖLÜM 5	

TEORİK ÇALIŞMA .....	16
5.1 Korunum Denklemleri .....	16
5.2 Sıvı-Buhar Ara Yüzeyinde Basınç Farkı ve Korunum Denklemleri .....	17
5.3 Mikro Bölge Denklemleri.....	18
BÖLÜM 6	
HAVUZ KAYNAMASI .....	20
6.1 Havuz Kaynaması.....	20
6.2 Hesaplama Alanı ve Örgü Çözünürlüğü.....	20
6.3 Sınır Şartları .....	24
6.4 Simülasyon Zamanı ve Veri Yazdırma .....	26
6.5 Havuz Kaynaması için Simülasyonlar .....	27
6.5.1 Yerçekimi İvmesi 10gd Olan Havuz Kaynaması için Simülasyonlar.....	27
6.5.2 Yerçekimi İvmesi 1gd Olan Havuz Kaynaması için Simülasyonlar.....	30
6.5.3 Yerçekimi İvmesi 0,1gd Olan Havuz Kaynaması için Simülasyonlar....	33
6.5.4 Yerçekimi İvmesi 0,01gd Olan Havuz Kaynaması için Simülasyon.....	36
6.6 Havuz Kaynaması için Simülasyon sonuçları .....	39
BÖLÜM 7	
DÜZ BİR KANAL YÜZEYİNDEKİ AKIŞ KAYNAMASI .....	41
7.1 Düz Bir Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması .....	41
7.2 Hesaplama Alanı ve Örgü Çözünürlüğü.....	41
7.3 Düz Bir Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması Simülasyonları.....	43
7.4 Simülasyon Sonuçları .....	46
BÖLÜM 8	
OYUKLU BİR KANAL YÜZEYİNDEKİ AKIŞ KAYNAMASI.....	49
8.1 Oyuklu Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması.....	49
8.2 Hesaplama Alanı ve Örgü Çözünürlüğü.....	49
8.3 Oyuklu Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması Simülasyonları .....	50
8.3.1 3 Mikrometre Derinlikteki Oyukta Akış Kaynaması Simülasyonları .	51
8.3.2 12 Mikrometrelik Oyuk için Akış Kaynaması Simülasyonları .....	53
8.3.3 25 Mikrometrelik Oyuk için Akış Kaynaması Simülasyonları .....	56
8.3.4 50 Mikrometrelik Oyuk için Akış Kaynaması Simülasyonları .....	58
8.4 Simülasyon Sonuçları .....	61
8.4.1 Kabarcıkların Oyuklar İçerisindeki Gelişimleri.....	61
8.4.2 Kabarcık Kopma Sonuçları.....	64
8.4.3 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması .....	65
BÖLÜM 9	
GİRİŞ PARAMETRELERİ VE SİMÜLASYON VERİLERİ.....	70

9.1	Tüm Çalışmalar İçin Giriş Parametreleri.....	70	
9.2	Simülasyon Verileri.....	71	
BÖLÜM 10			
SONUÇ VE ÖNERİLER .....			74
10.1	Sonuçlar.....	74	
10.2	Öneriler .....	75	
KAYNAKLAR.....			76
EK-A			
HAVUZ KAYNAMASI ISI VE KÜTLE HIZI TRANSFER SONUÇLARI .....			77
EK-B			
AKIŞ KAYNAMASI ISI VE KÜTLE HIZI TRANSFER SONUÇLARI.....			81
EK-C			
MALZEME ÖZELLİKLERİ .....			86
EK-D			
NÜMERİK PROGRAMLAR .....			87
ÖZGEÇMİŞ.....			88

## SİMGE LİSTESİ

---

A	Dağılım sabiti
c	Özgül ısı kapasitesi
Co	Courant Sayısı
F	VOF metodu parametresi, kısmi hacim
f	Buharlaşıma oranı
g <sub>d</sub>	Dünya yerçekimi ivmesi
ĥ	Özel entalpi kaynak terimi
Δh <sub>v</sub>	Buharlaşıma entalpisi
J	Joule
K	Kelvin
k	Termal iletkenlik
kg	Kilogram
m	metre
mm	milimetre
s	saniye
P	Basınç
T	Sıcaklık
Δt	Zaman adımı
r <sub>1</sub>	Kürel olmayan kabarcık birinci yarıçapı
r <sub>2</sub>	Kürel olmayan kabarcık ikinci yarıçapı
R <sub>gas</sub>	Gaz sabiti
R <sub>int</sub>	Ara yüz ısı direnci
u	Hız
u <sub>r</sub>	Sıkıştırma hız vektörü,VOF sıkıştırma terimi
V	Hacim
Δx	Yol farkı
W	Watt
δ	Sıvı film kalınlığı
φ	Genel materyal özelliği
θ	Kontak açısı
σ	Yüzey gerilimi
ρ̇	Kütle kaynak terimi
ρ	Yoğunluk
τ	Gerilim Tensörü

$\mu$  Dinamik vizkozite  
 $\xi$  Duvara paralel koordinat  
 $\eta$  Duvara dik koordinat





## KISALTMA LİSTESİ

---

VOF Akışkan hacim dağılımı metodu



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3. 1 Kaynamanın aşamaları .....	10
Şekil 4. 1 Mikro bölge .....	13
Şekil 4. 2 Makro bölge .....	13
Şekil 4. 3 Akış kaynamasında kontak açısı .....	14
Şekil 5. 1 Arayüzeyde kütle, momentum ve enerji denklemleri .....	17
Şekil 6. 1 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi $0,1g_d$ , $1g_d$ ve $10g_d$ için hesaplama alanı ön görünüşü.....	21
Şekil 6. 2 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi $0,1g_d$ , $1g_d$ ve $10g_d$ için hesaplama alanı yan görünüşü .....	22
Şekil 6. 3 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi $0,01g_d$ için hesaplama alanı ön görünüşü.....	23
Şekil 6. 4 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi $0,01g_d$ için hesaplama alanı yan görünüşü .....	23
Şekil 6. 5 Tüm hesaplama alanları için sınır şartları .....	24
Şekil 6. 6 Havuz kaynaması simülasyonlarında kabarcığın ilk durumu .....	26
Şekil 6. 7 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $10g_d$ ) kabarcık gelişimi .....	27
Şekil 6. 8 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $10g_d$ ) sıcaklık dağılımı.....	28
Şekil 6. 9 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $10g_d$ ) hız dağılımı.....	29
Şekil 6. 10 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $1g_d$ ) kabarcık gelişimi.....	30
Şekil 6. 11 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $1g_d$ ) sıcaklık dağılımı .....	31
Şekil 6. 12 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $1g_d$ ) hız dağılımı .....	32
Şekil 6. 13 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,1g_d$ ) kabarcık gelişimi.....	33
Şekil 6. 14 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,1g_d$ ) sıcaklık dağılımı .....	34
Şekil 6. 15 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,1g_d$ ) hız dağılımı .....	35
Şekil 6. 16 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,01g_d$ ) kabarcık gelişimi.....	36
Şekil 6. 17 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,01g_d$ ) sıcaklık dağılımı .....	37
Şekil 6. 18 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,01g_d$ ) hız dağılımı .....	38
Şekil 7. 1 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarının hesaplama alanlarının ön görünüşü .....	42
Şekil 7. 2 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarının hesaplama alanlarının yan görünüşü.....	43
Şekil 7. 3 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarında kabarcık gelişimleri .....	44

Şekil 7. 4	Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarında sıcaklık dağılımları.....	45
Şekil 7. 5	Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarında hız dağılımları.....	46
Şekil 8. 1	Oyuklu bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarındaki oyuk geometrisi ve yapısal olmayan örgü .....	50
Şekil 8. 2	3 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi .....	51
Şekil 8. 3	3 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları .....	52
Şekil 8. 4	3 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi.....	52
Şekil 8. 5	3 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları.....	53
Şekil 8. 6	12 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi .....	54
Şekil 8. 7	12 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları .....	54
Şekil 8. 8	12 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi.....	55
Şekil 8. 9	12 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları.....	55
Şekil 8. 10	25 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi .....	56
Şekil 8. 11	25 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları .....	57
Şekil 8. 12	25 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi .....	57
Şekil 8. 13	25 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları .....	58
Şekil 8. 14	50 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi .....	59
Şekil 8. 15	50 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları .....	59
Şekil 8. 16	50 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi .....	60
Şekil 8. 17	50 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları .....	60
Şekil 8. 18	3 mikrometre derinlikteki oyukta kabarcık başlangıcı.....	61
Şekil 8. 19	12 mikrometre derinlikteki oyukta, aşırı kızdırılmış sıvı (sol) ve kaynama sıcaklığındaki sıvı (sağ) için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi .....	62
Şekil 8. 20	25 mikrometre derinlikteki oyukta, aşırı kızdırılmış sıvı (5K) için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi.....	62
Şekil 8. 21	50 mikrometre derinlikteki oyukta, aşırı kızdırılmış sıvı (5K) için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi.....	63
Şekil 8. 22	25 mikrometre derinlikteki oyukta, kaynama sıcaklığındaki sıvı için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi.....	63

Şekil 8. 23 50 mikrometre derinlikteki oyukta,kaynama sıcaklığındaki sıvı için oyuk  
içerisindeki kabarcık gelişimi..... 64



## ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 6. 1	Tüm çalışmalardaki sınır şartı isimleri ve türleri ..... 25
Çizelge 6. 2	Simülasyonlarda zaman ve veri yazdırma parametreleri..... 26
Çizelge 6. 3	Havuz kaynaması için kabarcık gelişimi sonuçları ..... 39
Çizelge 7. 1	Akış kaynamasında tüm yığın sıvı hızları için kabarcık gelişim sonuçları.47
Çizelge 8. 1	3 ve 12 mikrometre derinlikteki oyuklar için aşırı kızdırılmış sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları ..... 65
Çizelge 8. 2	3 ve 12 mikrometre derinlikteki oyuklar için kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları ..... 66
Çizelge 8. 3	25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar için aşırı kızdırılmış sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları ..... 67
Çizelge 8. 4	3 ve 12 mikrometre derinlikteki oyuklar için kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları ..... 67
Çizelge 9. 1	Havuz kaynaması giriş parametreleri ..... 70
Çizelge 9. 2	Düz bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması giriş parametreleri..... 71
Çizelge 9. 3	Oyuklu bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması giriş parametreleri ..... 71
Çizelge 9. 4	Havuz kaynaması simülasyon verileri ..... 72
Çizelge 9. 5	Düz bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması simülasyon verileri ..... 72
Çizelge 9. 6	Oyuklu bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması simülasyon verileri..... 73
Çizelge A. 1	Yerçekimi $10g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları ..... 77
Çizelge A. 2	Yerçekimi $10g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları..... 77
Çizelge A. 3	Yerçekimi $1g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları ..... 78
Çizelge A. 4	Yerçekimi $1g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları..... 78
Çizelge A. 5	Yerçekimi $0,1g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları ..... 79
Çizelge A. 6	Yerçekimi $0,1g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları..... 79
Çizelge A. 7	Yerçekimi $0,01g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları ..... 80
Çizelge A. 8	Yerçekimi $0,01g_d$ büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları..... 80

Çizelge B. 1	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.01 m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları.....	81
Çizelge B. 2	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.01 m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları .....	81
Çizelge B. 3	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.035 m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları.....	82
Çizelge B. 4	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.035 m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları .....	82
Çizelge B. 5	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.07 m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları.....	83
Çizelge B. 6	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.07 m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları .....	83
Çizelge B. 7	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.3 m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları .....	84
Çizelge B. 8	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.3 m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları.....	84
Çizelge B. 9	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.6 m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları .....	85
Çizelge B. 10	Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.6 m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları.....	85
Çizelge C. 1	Malzeme özellikleri .....	86
Çizelge D. 1	Nümerik programların listesi.....	87

**YATAY BİR BORU İÇİNDE FC-72 AKIŞKANININ AKIŞ KAYNAMASININ DÜZ  
VE OYUKLU BİR YÜZEYDE VE HAVUZ KAYNAMASININ DÜZ BİR YÜZEYDE  
NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmetcan Dönertaş

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Sebiha YILDIZ

Bu tez çalışmasında, kanal içerisindeki FC-72 akışkanının kabarcıklı akış kaynaması ve kabarcıklı havuz kaynamasına dair üç farklı çalışma nümerik olarak yürütülmüştür. Düz Kanal duvarı ve oyuk duvarı için  $BAF_2$  malzemesi seçilmiştir.

Yapılan tez çalışması kapsamında ilk olarak tek kabarcıklı havuz kaynamasının farklı yerçekimi ivmesi durumlarında kabarcığın ilk durumundan kabarcık kopmasına kadar geçen süreler, kabarcık kopma çapları ve kabarcık kopma süreleri incelenmiştir. Bu parametrelere ek olarak belirlenen zaman adımlarında kanal içerisindeki kabarcık büyümesi ve ayrılması durumları için kabarcık içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir.

Yapılan tez çalışması kapsamında ikinci çalışma yatay bir kanal içerisindeki tek kabarcıklı akış kaynamasının sabit Dünya yerçekimi ivmesinde farklı akış hızlarında kabarcığın ilk durumundan kabarcık kopmasına kadar geçen süreler, kabarcık kopma çapları ve kabarcık kopma süreleri incelenmiştir. Ayrıca belirlenen zaman adımlarında kanal içerisindeki hız profilleri, sıcaklık dağılımları incelenmiştir.

İlk iki çalışma aşırı kızdırılmış sıvı (5K) ile aşırı kızdırılmış duvar (10K) durumları için yürütülmüştür. Ek olarak birinci çalışmada Dünya yerçekimi ivmesine tekabül eden havuz kaynaması durumu ve sabit Dünya yerçekimi ivmesinde yürütülen ikinci çalışma birbiri ile kıyaslanmıştır.

Yapılan tez kapsamında üçüncü çalışma ise yatay bir kanal içerisinde kanal alt duvarı üzerinde silindirik, sabit çapta ve farklı derinliklere sahip çukurlar içerisinde gerçekleşen kabarcıklı kaynama durumu incelenmiştir. Bu çalışma kızgın (5K) sıvı ve doymuş kaynama sıcaklığında bulunan yağın sıvı için ayrı ayrı yürütülmüştür. Her iki çalışmada da dört farklı çukur derinliği için kaynama durumu incelenmiştir. Her iki durum için de çukur derinlikleri 3,12,25 ve 50 mikrometre olarak tanımlanmıştır. Bu çalışmalarda yerçekimi ivmesi büyüklüğü Dünya yerçekimi ivmesi büyüklüğünde tanımlanmıştır. Simülasyonlarda kullanılan akış hızı parametresi ise 10m/s olarak tanımlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kanal içerisinde kabarcıklı akış kaynaması, Havuz kaynaması, akışkan hacim metodu (VOF), Yapay oyukta akış kaynaması, OPENFOAM





**NUMERICAL INVESTIGATION OF SINGLE BUBBLE FLOW BOILING BOTH  
ON A FLAT SURFACE AND ON A CAVITY IN HORIZONTAL PIPE AND POOL  
BOILING ON A FLAT SURFACE**

Mehmetcan Dönertaş

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Sebiha Yıldız

In this study, Volume of Fluid (VOF) method in OpenFoam software was used to numerically simulate superheated FC-72 single bubble nucleation during flow boiling both from an artificial cavity and flat surface and single bubble nucleation during pool boiling from a flat surface. All simulations were performed in 3D. FC-72 was used as a working fluid and BaF<sub>2</sub> was used for channel and cavity walls.

The studies of the pool boiling on the flat surface were carried out on 0.01g, 0.1g, 1g, 10g gravity magnitudes. Bubble detachment diameter, bubble detachment time, velocity and temperature magnitudes in bubbles were investigated on different earth gravities.

The studies of flow boiling from a flat surface in horizontal channel were conducted for several bulk fluid velocities on constant Earth gravity. In this study bubble detachment diameter, bubble detachment time, velocity and temperature magnitudes in bubbles were examined and also were compared to each other.

First and Second studies were compared on superheated bulk fluid (5K) and superheated solid domain (10K). The results of study which was conducted in pool boiling section on

constant Earth gravity were taken and compared with results of flow boiling from a flat surface.

The studies of flow boiling from an artificial cavity in horizontal channel were conducted for four different cavity depths on 1g gravity magnitude. Flow boiling from an artificial cavity studies were examined in bulk fluid at saturation temperature and superheated bulk fluid temperature separately. Cavities diameters were defined as 30 micrometers for 3, 12, 25 and 50 micrometers cavities depths. Each cavity depth simulation was investigated at both bulk fluid temperature. Bulk fluid velocity magnitude was constant and defined as 10m/s in each study.

**Keywords:** Nucleate flow boiling in horizontal channel, pool boiling, volume of fluid method (VOF),flow boiling from an artificial cavity, OPENFOAM



#### 1.1 Literatür Özeti

Literatürde genellikle kabarcık çapları, kontak hattı mikro bölge ısı ve kütle transferi üzerine farklı modellemeler ve simülasyonlar yapılmıştır. Literatürde aşırı soğutulmuş yığın sıvı sıcaklığında farklı ara yüz yakalama modellerinin uygulandığı çalışmalar kabarcık dinamiği üzerine birkaç çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar genellikle tek kabarcıklı kaynama simülasyonlarını içermektedir. Ek olarak literatürdeki birkaç çalışmada mikro bölgedeki ısı transferini araştırmak için aynı mikro bölge buharlaşma modellerinin uygulandığı çalışmalarda mikro bölgedeki ısı transferi hızı araştırılmıştır.

#### 1.2 Tezin Amacı

Tek kabarcıklı akış kaynaması simülasyonları düz bir yüzeyde FC-72 akışkanının havuz kaynaması ve yatay bir boru içerisinde alınan FC-72 akışkanının hem düz yüzey hem de kavitenin olduğu yüzeyde akış kaynaması durumları için incelenmiştir. Çalışmalar yerçekimi ivmesi, kanal içerisindeki maksimum akış hızları , kavitelerin derinlikleri, yığın akışkan sıcaklıkları değiştirilerek yürütülmüştür. Farklı parametreler için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### 1.3 Hipotez

Farklı parametrelerde oluşturulan nümerik çalışmalarda, yığın sıvı sıcaklığının, yüzey şeklinin, yerçekimi ivmesi büyüklüğünün, oyuk büyüklüğünün kabarcık gelişimlerine ve kopma süreçlerine etkisinin büyük olacağı düşünülmüş ve kabarcık gelişim süresi ile kopma sürelerinin farklı parametrelerde araştırılması hedeflenmiştir.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Christian Kunkelmann [1] 2011 yılında yaptığı çalışmada, havuz kaynamasında tek kabarcık oluşumunu, kabarcık birleşimini, farklı hızlardaki akış kaynamasını ve biçimlendirilmiş mikro kanalda akış kaynamasını incelemiştir. Çalışmalarında karmaşık geometrilerdeki kaynama proseslerinin simülasyonunu yüksek hassasiyetle gerçekleştirebilen bir model geliştirilmiştir. Simülasyonlarda hem makro hem de mikro ölçekteki ısı transferi ve akışı detaylı olarak incelemiştir. Buharlaştırma oranını ve ara yüzeyin pozisyonunu tam olarak belirleyebilmek için ara yüzeyi yeniden yapılandıran bir metot uygulamıştır.

Modelin geçerliliğini test etmek amacı ile modeli bir boyutlu emici ara yüzey probleminde, 3 fazlı kontak hattının hesaba katılmadığı 2 boyutlu küresel kabarcık büyümesi probleminde ve son olarak da 2 boyutlu 3 fazlı kontak hattının hesaba katıldığı durumlar için uygulamıştır. İlk test durumunda 1 bar basınçta kızdırılmış (5K) su için yapılmış ve dört farklı örgü çözünürlüğü kullanılmıştır. Analitik sonuçlar iyi örgü çözünürlüğü sonuçları ile uyuşmuştur. İkinci test durumunda aşırı kızdırılmış (5K,10K) sıvı olarak HFE-7100 seçilmiştir. En kaba örgü çözünürlüğünde bile sonuçlar %6'dan daha düşük hata payı ile analitik sonuçlara yakınsamıştır. Üçüncü test durumu için referans bir çalışma seçilmiş ve test durumunun sonucunda referans çalışmaya kıyasla %7'nin altında bir sapma göstermiştir. Havuz kaynaması için yapılan çalışmada hesaplama alanı farklı örgü çözünürlüklerine sahip alt bölümlere ayrılmıştır. Kabarcık etrafındaki bölgede örgü çözünürlüğü 4 mikrometre olarak tanımlanmıştır. Isıtıcı duvarın başlangıç aşırı kızdırılmış sıcaklığı 15K olarak tanımlanmıştır. Yapılan çalışmada kabarcık büyümesi, ayrılması ve

tekrar oluşması için geçen süreler belirlenmiştir. Kabarcık büyümesi esnasında kabarcık ayağı çapının büyüme hızının kabarcık ayrılması esnasındaki kabarcık ayağı küçülme hızından daha büyük olduğunu gözlemlemiştir. Simülasyon sonuçlarında elde edilen kabarcık ayrılma çapını ise deneylerden elde edilen kabarcık çapının %30 üzerinde ve 2.5mm olarak elde etmiştir. Havuz kaynaması için yapılan diğer bir çalışmada, kabarcık oluşum sıklığının kabarcık ayrılma çapı ile ters orantılı olduğu elde edilmiştir.

Isı transferi mekanizması için yapılan deneyde buharlaşma gizli ısı 0,4 W olarak elde edilmiştir. Bu değer kabarcık büyümesi esnasında hızla arttığı ve kabarcık ayrılması sürecinde yavaşça azaldığı görülmüştür. Kontak hattı uzunluğu başına ısı transfer hızı ise kabarcık oluşumu esnasında artarken, kabarcık büyümesi esnasında azalmıştır. Örgü çözünürlüğünün kabarcık çapı, ısıtıcı akısı ve kontak hattındaki ısı transfer hızı üzerine etkilerini görmek için tek bir kabarcık döngüsünde yapılan çalışmada 3 farklı örgü çözünürlüğü kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre artan örgü çözünürlüğü ile yakınsama gerçekleşirken kaba örgü çözünürlüğünde hata payı büyük sonuçlar elde edilmiştir. Doğal konveksiyonun toplam ısı transferine etkisini incelemek için yapılan karşılaştırmalı çalışmalarda kontak açısı 30 derece olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada kaba örgü çözünürlüğü seçilmiş ve sonuç olarak doğal konveksiyonun toplam ısı transferi üzerine etkisinin yok denilecek kadar az olduğu sonucuna varılmıştır. Farklı kontak açılarının kabarcık çapına, ayrılma sırasındaki kabarcık çapına, ısıtıcıdaki ısı transferi hızına ve kabarcık ayağı çapına etkilerini incelemek için bir simülasyon çalışması yürütülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre yüksek kontak açılarında kabarcığın ayrılma çapı daha büyük elde edilmiştir. Kontak açısı arttıkça kabarcık büyüme zamanının, yüzeyden ayrılma süresinin, yüzeyde kalma süresinin, kabarcık ayağı çapının arttığı ancak ısıtıcıdan olan ısı transfer hızının neredeyse sabit olduğu gözlemlenmiştir.

Dietl [2] 2015 de yaptığı çalışmada, girintili yüzeylerde kaynama proseslerinin simülasyonlarını akışkan hacim metodu (VOF) kullanarak çalışmıştır. Yapılan çalışmalarda sıvı-buhar ara yüzeyi doymuş kaynama sıcaklığında kabul edilmiş ve kütle kaynak terimini hesapladıktan sonra difüzyon denklemi ile ayırtmış ve korunum denklemlerine eklemiştir. Mikro bölge için Stephan ve Busse tarafından geliştirilen buharlaşma modeli kullanılmış buna ek olarak sıvı katı arasında gerçekleşen birleşik ısı transferi modeli uygulanmıştır.

Girintili oyuklar ile yapılan çalışmalar üç farklı geometri için yürütülmüştür. Birinci geometri dairesel bir oyuk ve oyukun üst kısmında iki girinti ile oyuk çapı düşürülmüş yapay bir geometride yürütülmüştür. İkinci geometri kare veya dikdörtgen bir delik ve kare bir oyuktan oluşmaktadır. Üçüncü geometri ise dairesel bir oyuk ve buna ek olarak deliğin giriş kısmında dairesel bir kanaldan oluşmaktadır. Kanalı oluşturan duvar parçası havada asılı durmaktadır ve gerçekte böyle bir geometri olması mümkün değildir. Bu geometride delik köşesindeki ısı transferini mümkün kılabilmek için sıvı içerisindeki ince kanal katı bölgede yer almıyormuş gibi düşünülmüştür.

Örgü çözünürlüğünün aşırı kızdırılmış duvar ve kabarcık ayrılması üzerine etkilerini incelemek için yaptığı çalışmada silindirik girintili oyuk seçilmiş ve sınır şartı olarak katı kısma sabit ısı akısı şartı uygulamıştır. Tamamen 2 boyutlu ve asimetrik olarak gerçekleştirilen çalışmada iyi örgü çözünürlüğü ve orta örgü çözünürlüğü değerleri arasında aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığının %0.14 kabarcık ayrılma çapının ise %4'lük bir değişim gösterdiği elde edilmiştir. Kare oyuk için yapılan çalışmada bu değerler daha yüksek çıkmış ve bu sebeple kare oyukta iyi örgü çözünürlüğü seçilmiştir.

Kurulum değişkenlerinin sonuçlar üzerine etkisini incelemek amacıyla çalışmalar yürütülmüştür. Yapılan çalışmalarda ek bir kanala sahip geometri kullanılmıştır. Sınır şartı olarak sabit ısı akısı ve sabit sıcaklık değerleri tanımlanmıştır. Sonuçlarda buharlaşma oranının %0.5 değiştiği gözlemlenmiştir. Aynı sınır şartları için kontak hattının hareketini göz önünde bulunduran ve onu ihmal eden çalışma sonucunda aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığının sapması %0.3 olarak elde edilmiştir. Üç fazlı kontak hattının mikro bölgeden uzaklığının aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığına etkisini incelemek için uzaklık 0.5 mikrometre ve 1 mikrometre olarak tanımlanmıştır. İki durum için duvar süper sıcaklığındaki değişim %0.004 olarak elde edilmiştir. Farklı buharlaşma oranlarının mikro bölgeden geçen ısı oranına, kontak açısına ve duvar aşırı sıcaklığına etkisini incelemek için çalışma yürütülmüştür. Öngörüldüğü gibi buharlaşma oranı arttıkça mikro bölgeden geçen ısı akısının arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucu olarak aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığında %1.7'lik bir düşüş meydana gelmiştir. Diğer bir çalışmada hesaplama alanının büyüklüğü 2 katına çıkarılmış bunun sonucunda kabarcık ayrılma çapının çok az azaldığı ancak duvar süper sıcaklığının ise %6 azaldığı görülmüştür.

Dairesel oluk ile yapılan çalışmada oluk içerisindeki sıvı filmi miktarının ısı transferine etkisi incelenmiştir. Oyuk içerisinde hem alt hem de üst kısımda sıvı filmi bulunan durumun tamamen kuru duruma oranla ısı transferinin yaklaşık 8 kat daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Benzer bir çalışma kare delikli oyuk için yürütülmüştür. Kare delikli oyuk için de sıvı filminin ısı transferini arttırdığı elde edilmiştir. Oyuk derinliğinin taşmaya veya kurumaya etkisi araştırılmıştır. Sığ oyukta taşma meydana gelirken derin oyukta kuruma meydana gelmiştir. Oyuk derinliği arttıkça oyuk içerisinde kuruma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Farklı delik çaplarına sahip oyuklarda gerçekleştirilen çalışmalarda sınır şartı olarak sabit ısı akısı uygulanmıştır. Oyuklar içerisindeki sıvı hacim dağılımları incelenmiştir. Daha büyük delik çaplarında daha düşük ısı akılarında oyuk içerisindeki sıvı hacim dağılımının daha düşük olduğu elde edilmiştir. Kabarcık ayrılma çapının ise yüksek delik çaplarında daha yüksek olduğu elde edilmiştir.

Christian Kunkelmann ve Peter Stephan [3] tarafından 2009 yılında yapılan çalışmada akışkan hacim metodu kullanılarak (VOF) kabarcıklı akış kaynamasını OPENFOAM programında çalışmışlardır. Çalışmada sıvı-katı bölgeleri arasında gerçekleşen birleşik ısı transferi ile kontak hattında meydana gelen buharlaşma üzerinde durulmuştur. Mikro bölge buharlaşma modeli için Stephan ve Busse tarafından geliştirilen model uygulanmıştır. Simülasyonlarda akışkan hacim dağılımı (VOF) metodu içerisindeki kontak çizgi kalınlığı bir örgü büyüklüğünden daha büyük olduğu için bu gölgede geçiş bölgesi tanımlanmıştır. Geçiş bölgesi için ısı transferi denklemi modellenmiştir. Simülasyonlar emici ara yüzey probleminde ve kabarcık büyümesi durumlarında test edilmiştir. Simülasyon sonuçları ile analitik sonuçların iyi bir şekilde uyduğu gözlemlenmiştir. Mikro bölgedeki ısı transfer hızı aşırı kızdırılmış duvar süper sıcaklığına bağlı olarak FC-72, HFE-7100 ve su için ölçülmüştür. Su için mikro bölgedeki ısı transfer hızının diğer soğutucu akışkanların mikro bölgedeki ısı transfer hızından birkaç kat daha büyük elde edilmiştir. FC-72, HFE-7100 ve su için 5K'lık bir aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığında kabarcık yarıçapının gelişimi için çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada su için kabarcık çapı gelişiminin diğer soğutucu akışkanlara göre daha hızlı olduğu ve aynı zaman adımı daha büyük kabarcık çapına ulaştığı elde edilmiştir. Tek kabarcık çalışması için HFE-7100 akışkanı kullanılmıştır. Aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığı 5K olarak seçilmiş ve kabarcığın başlangıç çapı 0.05 milimetre olarak tanımlanmıştır. Buharlaşma tarafından tüketilen ısı

kabarcık büyümesi esnasında giderek artmıştır. Daha sonra bu değer kabarcık ayrılmasına kadar azalmıştır. Simülasyon sonucunda kabarcık ayrılma çapı  $2.22 \text{ mm}^3$  olarak elde edilmiştir.

Liu vd. [4] 2016 yılında yaptıkları çalışmada tek kabarcıklı havuz kaynamasını Level Set metodu kullanarak COMSOL programında çalışmışlardır. Hesaplama alanı 5 milimetre yüksekliğinde ve çapında bir silindir olarak tanımlanmıştır. Hesaplama alanının ortasında 10 mikrometre çapında ve 15 mikrometre derinliğinde bir oyuk bulunmaktadır. Katı tabakanın alt yüzeyine 383 K sabit sıcaklık şartı uygulanmıştır. Oyuk civarında örgü çözünürlüğü 4 mikrometre iken hesaplama alanının uç bölgelerinde 20 mikrometre olarak tanımlanmıştır. Kabarcığın ilk durumu 0.01 milimetredir. Kabarcık çapı 0.07 milimetre ayrılma çapı ise 1.2 milimetre olarak elde edilmiştir. Sonuçlar kabarcığın ilk durumundan yükselmesine kadar geçen sürede sıcaklık hız ve basınç değişimleri türünden elde edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre kabarcık büyümesi esnasında kabarcık ile yığın sıvı arasında basınç farkının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ancak kabarcık kopması esnasında bu basınç farkının azaldığı ve sabit olduğu sonucuna varılmıştır. Tüm bir kabarcık çevrimi için kabarcık içerisindeki hız değerleri yığın sıvının hız değerlerinden daha yüksek elde edilmiştir.

Kunkelmann vd. [5] 2011 yılında yaptıkları çalışmada menisküs buharlaşması ve havuz kaynaması sırasında kontak hattı bölgesinde üç fazlı kontak hattının yerel ısı transferine olan etkisi deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Kontak hattı hareketinin kontak hattı bölgesindeki ısı transferine etkisi iki farklı deneysel yöntem ile gerçekleştirilmiştir. Nümerik çalışmada model OPENFOAM programında VOF çözücüsü uygulanarak çözülmüştür. İlk deney olarak tek bir kabarcık bölgesindeki havuz kaynaması için çalışma sıvısı olarak N-Perfluorohexane kullanılmıştır. Deney tam bir kabarcık döngüsü için yapılmış olup, büyüyen ve ayrılan kabarcık durumları için üç fazlı kontak hattından olan ısı transferi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kabarcığın büyüme periyodunda üç fazlı kontak hattındaki ısı akısı maksimum değerleri sabit iken kabarcık ayrılması sırasında bu değerler sürekli bir artış göstermiştir. Sonuç olarak kontak hattı bölgesindeki ısı transferi kabarcık ayrılması esnasında katı mikro bölgedeki buharlaşma ve geçici ısı iletimi ile belirlenirken kabarcık büyümesi sürecinde sadece mikro bölgedeki buharlaşma ile belirlenmiştir. Her iki durum için de mikro bölgeden buharlaşma ile ısı



transferi miktarı sabit olarak belirlenmiştir. Dahası her iki durum için mikro bölgeden gerçekleşen ısı transferi miktarının kontak hattı hızından bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır. Geçici ısı iletimi ise kontak hattı hızına büyük oranda bağlıdır ve kontak hattı hızı arttıkça ısı iletiminin arttığı görülmüştür. Hareketli menisküs durumu için yapılan deneyin sonuçlarına göre gerileyen menisküs durumunda ısı akısı kontak hattı hızından bağımsız bulunmuştur. İlerleyen menisküs durumu için ise kontak hattı hızı arttıkça ısı akısının arttığı görülmüştür. Bu iki durum için yapılan karşılaştırmada ilerleyen menisküs durumu için 3 fazlı kontak hattı bölgesindeki maksimum yerel ısı transferinin gerileyen menisküs durumundan daha büyük olduğu elde edilmiştir.

Peter Stephan vd. [6] 2012 yılında yapılan çalışmada yazar önceki çalışmaları ve son zamanlar kabarcıklı kaynama olgusu üzerine yapılan çalışmalar hakkında genel bilgiler vermiştir. Yazar kendi enstitüsünde yaptığı tek kabarcıklı kaynama çalışmasında akışkan hacim metodunu (VOF) kullanmış ve çalışmalarını OPENFOAM programında gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmalarda tek kabarcıklı kaynama prosesinde yerel taşınım hakkında bilgiler verilmiştir. Sonuçlara göre kabarcık büyümesi ve ayrılması durumlarında yüzeyin yerel olarak soğuduğunu gözlemlemişlerdir. Kabarcığın ayrılması esnasında elde edilen maksimum ısı akısı miktarının kabarcığın büyümesi sırasında elde edilen maksimum ısı akısı miktarından çok daha büyük olduğu elde edilmiştir. Kabarcık yüzeyden ayrılana kadar kabarcığın altındaki duvardan kabarcığa olan ve sıvı filminden gerçekleşen ısı transferinin ısı transfer mekanizması içerisindeki payının çok az olduğu sonucuna varılmıştır. Kabarcığın ilk durumundan ayrılana kadar geçen süredeki toplam buharlaşma miktarının %30'unun kontak hattı bölgesinden gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.

Ding Li vd. [7] 2007 yılında yaptığı çalışmada tek kabarcıklı akış kaynamasını yatay, dikey ve açılı yüzeylerde farklı akış hızlarında ve farklı yerçekimi ivmelerinde nümerik olarak çalışmıştır. Simülasyon çalışmalarında sıvı-buhar ara yüzünü yakalamak için Level Set metodu kullanılmıştır. Akış alanındaki örgü çözünürlüğü tamamen aynı büyüklükte tanımlanmıştır. Akış laminer olarak tanımlanmıştır. Dinamik kontak açısında çalışılmış ve yüksek kontak açılarında kabarcığın ayrılma çapının büyüdüğü, kabarcık büyüme süresinin arttığı elde edilmiştir. Nümerik çalışmalar 5.3K aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Hız büyüklükleri 0.007 m/s ile 0.023 m/s arasında

seçilmiştir. Yatay düzlemdeki akış kaynamasında yapılan çalışmada ise yerçekimi ivmesi 1g ve 0.0001g arasında değişmiştir. Elde edilen sonuçlara göre akış hızı arttıkça kabarcığın büyüme süresi ve kabarcığın kalkış çapının azaldığı görülmüştür. Yerçekimi ivmesinin azaltılması ile yapılan çalışmalarda kabarcık büyüme süresinin ve kabarcık ayrılma çapının büyük oranda arttığı görülmüştür. Yığın sıvı hızının yerçekimi ivmesinin bu etkisini azalttığı görülmüştür. Diğer bir deyişle sabit bir yerçekimi ivmesinde yığın sıvı hızı arttırıldığında kabarcık ayrılma çapı ve kabarcık büyüme süresi düşmektedir.

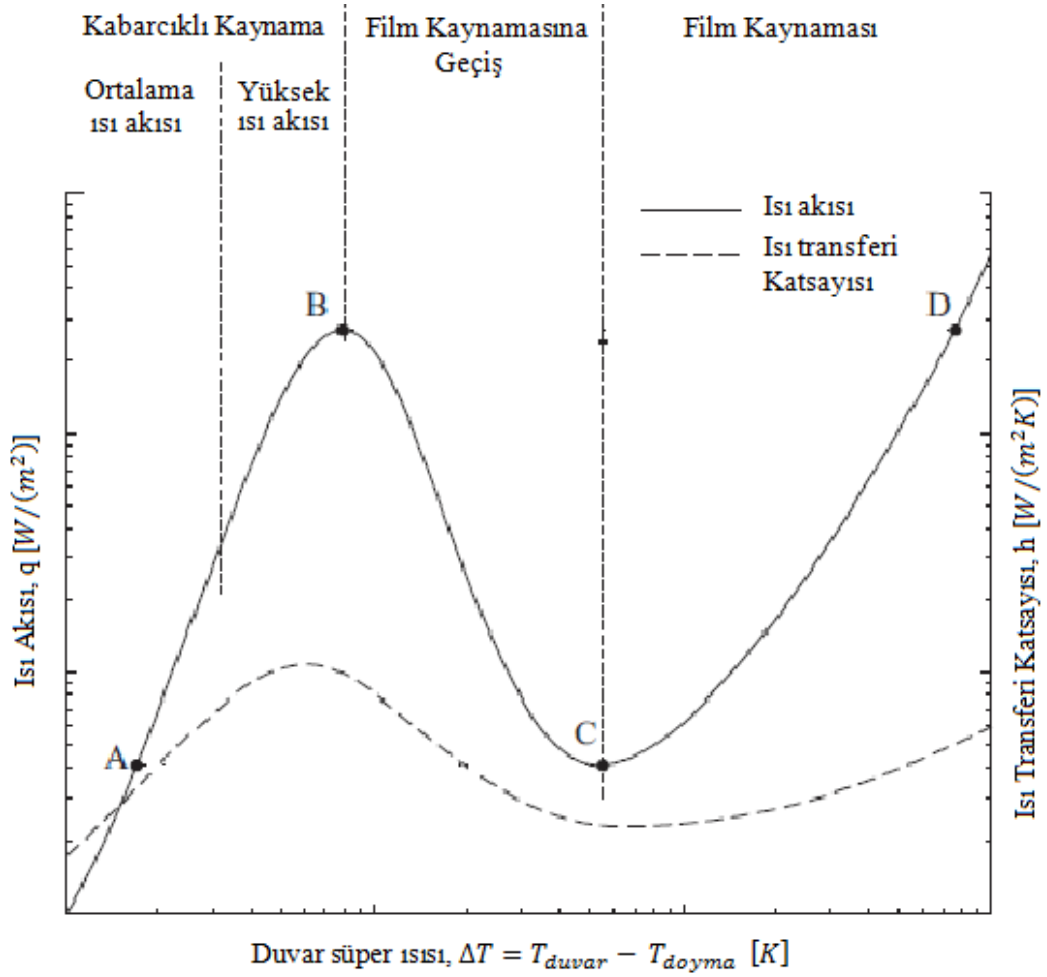


## BÖLÜM 3

---

### KAYNAMA

Bu bölümde kaynama , kaynamanın çeşitleri hakkında kısaca bilgi verilmektedir. Bilindiği gibi kaynama uzun yıllar üzerinde çalışılan bir konudur. Endüstride geniş bir uygulama alanına sahip olan bu olgu daha çok buhar kazanlarında ve yüksek performanslı elektrikli cihazların soğutulmasında kullanılmaktadır. Kaynama adımlarını daha iyi tanımlayabilmek için Nukiyama tarafından önerilen ve Kunkelmann [1] tarafından da kullanılan kaynamanın aşırı kızdırılmış duvar süper sıcaklığına, ısı akısına ve ısı transferi katsayısına bağlılığını gösteren Şekil 3'ten faydalanılmıştır. Doğal konveksiyonun etkileri ihmal edilmiştir.



Şekil 3.1 Kaynamanın aşamaları Carey [1]

Artan ısı akısı ve aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığı ile birlikte yüzey üzerindeki kabarcık büyür ve yüzeyden ayrılır. Bu bölümde ısı akısı arttırılmaya devam edildiğinde ısı transferi katsayısı sürekli olarak artar ve yüzeyden ayrılan kabarcık sıklığında artış yaşanır. İlk kabarcığın büyümesi ile yüzeyden ayrılan kabarcık sayısına bağlı olarak kabarcıkların birbiri ile etkileşimine kadar olan bölgeye ortalama ısı akısında kabarcıklı kaynama adı verilir. Bu bölgeden aşağı inildikçe ve aşırı kızdırılmış duvar duvar sıcaklığı sıfır olduğunda yüzeyde herhangi bir kabarcık oluşumu gözlenmez.

Artmaya devam eden ısı akısı sonucunda yüzeyde oluşan kabarcık sayısı devamlı olarak artar ve kabarcıklar birbirleri ile etkileşime girerler. Bu bölgede ısı transferi katsayısı da artmaya devam eder. Ancak Şekil 3.1'de B noktasından önce ısı transfer katsayısında bir azalma görülür. Bunun sebebi yüzeyde oluşan kabarcıkların artması ile birlikte buhar fazı

yüzeyde bir izole tabaka görevi görür. Bu bölge yüksek ısı akısında kabarcıklı kaynama olarak adlandırılır.

Kabarcıklı kaynama bölgesinin sonunda ısı akısı arttırılmaya devam edildiğinde artık yüzeyde oluşan kabarcık sayısı çok fazla olduğu için kabarcıkların izole etkisi artar ve yüzeyi neredeyse stabil bir buhar fazı kaplar. Bu bölgede sıvı fazın duvarla teması çok azalır. Bu sebep ile ısı akısında ve ısı transferi katsayısında ani azalma gerçekleşirken aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığında artışlar görülür. Bu bölge film kaynamasına geçiş bölgesi olarak adlandırılır.

Sonuç olarak ısı akısı arttırılmaya devam edildiğinde artık duvar yüzeyinde sıvı ve duvarı birbirinden ayıran sabit bir buhar fazı oluşur. Bu bölüm de film kaynaması olarak adlandırılır.

### NÜMERİK MODEL

Bu bölümde nümerik çalışmada kullanılan akışkan hacim metodu (VOF) , Courant sayısı ve ara yüzey iyileştirme metotları belirtilmiştir. Mikro bölge ve mikro bölge içerisindeki kontak açısı, 3 fazlı kontak hattı bölgeleri gibi önemli noktalar açıklanmıştır.[1],[2]

#### 4.1 Akışkan Hacim Metodu (VOF)

Literatür çalışmalarında da görüleceği gibi çift fazlı akış çalışmalarının bir kısmında akışkan hacim metodu kullanılmıştır. Akışkan hacim metodu, çift fazlı veya çok fazlı bir akışta sabit bir örgü içerisinde belirlenen akışkan fazlarından birisinin kısmi hacmini temsil eder. Akışkan hacim metodu parametresi “F” sıfır ile bir arasında bulunur. Bu sebeple çift fazlı akışlarda akışkanlardan birisinin kısmi hacmi elde edilerek diğer fazın kısmi hacmine ulaşılabilir.

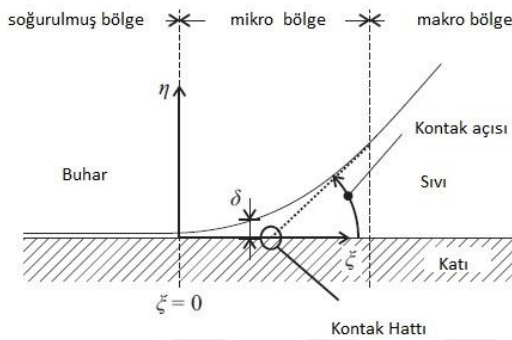
$$F = \frac{V_L}{V_{cell}} \quad (4.1)$$

Çok fazlı akışlarda ise akışkan sayısından bir eksik olacak şekilde F parametresi tanımlanmalıdır. Mevcut tez çerçevesinde akışkan hacim metodu sıvı faza göre tanımlanmıştır. Akışkan hacim dağılımı denklemde (5.5) görüldüğü gibi yalnızca hız alanı ile taşınır. Denklem (5.5) ilk kısmı geçici terim, ikinci kısmı taşınım terimi, üçüncü kısmı ise OPENFOAM yazılımı tarafından sunulan sıkıştırma terimi ve son kısım ise kaynak terimidir. Sıvı – buhar ara yüzeyinin keskin olması ve ara yüzeyin diğer örgülere bulaşmaması çok önemlidir. Bu sebeple OPENFOAM denklemdeki (5.5) sıkıştırma terimini sunar. Bir örgüdeki, akışkana ait herhangi bir malzeme özelliği(özkütle, özgül ağırlık vb.) hesaplanması için aşağıdaki denklem kullanılır.

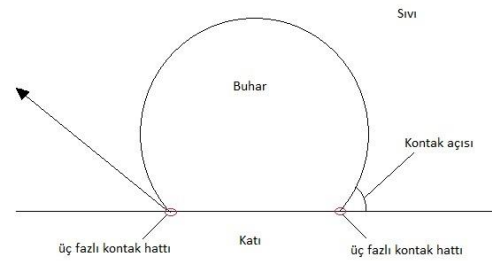
$$\varphi = F\varphi_l - (1 - F)\varphi_v \quad (4.2)$$

Çift fazlı bir akışta ara yüzün diğer örgülere bulaşmaması ve keskin kalması çok önemlidir. OPENFOAM tarafından denkleme (5.5) eklenen sıkıştırma terimi bunu tam olarak sağlayamaz. Bu sebeple mevcut tezde Dietl [2] tarafından uygulanan ara yüz yeniden yapılandırma metodu kullanılmıştır. Ara yüz yapılandırma metodunun temel ilkesi örgü içerisindeki hacim dağılım parametresi örgünün köşelerine dağıtılır ve örgüde  $F=0.5$  olan nokta belirlenerek ara yüzün bu noktadan geçmesi sağlanır.

## 4.2 Mikro Bölge



Şekil 4.1 Mikro bölge [3]



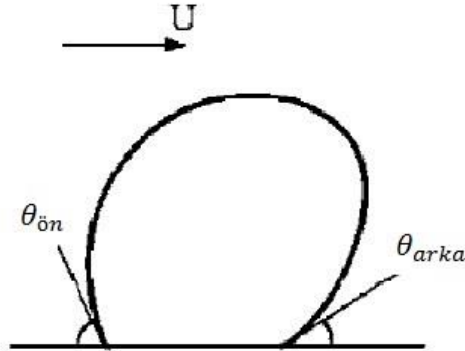
Şekil 4.2 Makro bölge

Kaynama olgusunun en önemli adımlarından birisi mikro bölgenin tanınmasıdır. Kabarcık ayağının duvar ile buluştuğu noktada üç faz birlikte bulunur. Bu noktaya üç fazlı kontak hattı denilir. Soğurulmuş bölgede kabarcık ile duvar arasında gözle görülemeyecek kadar ince bir sıvı film tabakası bulunur. Diğer bir deyişle makro ölçekteki gibi kabarcık ayakları duvar ile temas etmez. Soğurulmuş bölgede ("*absorbed layer*") buharlaşma görülmez ve bu bölgede duvar ile film tabakası arasında yüksek çekim kuvvetleri mevcuttur. Mikro bölgede ise eğim giderek artmaya başlar bu bölgede artan eğim ile birlikte sıvı film kalınlığı ( $\delta$ ) artar ve duvar ile sıvı filmi arasındaki çekim kuvvetleri azalır. Artan eğim ile birlikte kontak açısı belirginleşir. Kontak açısı hesabı yapılırken yüzey gerilimlerinden faydalanılır.

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}} \quad (4.3)$$

Bu denklemde payda sıvı ve buhar arasındaki yüzey gerilimini göstermektedir. Bu değerlerin analitik yollarla elde edilmesi zor olduğu için genellikle deneysel yollar ile elde

edilirler. Akış kaynamasında ise akışın geldiği yöne bağlı olarak kabarcığın önünde ve arkasında 2 farklı kontak açısı oluşur. Mevcut tezde statik kontak açısı kullanılmıştır.



Şekil 4.3 Akış kaynamasında kontak açısı [7]

### 4.3 Courant Sayısı

Temel olarak Courant sayısı bir zaman adımında bir akışkan parçacığının ne kadar uzağa gidebileceğini gösterir. En basit hali ile şu şekilde ifade edilir.

$$Co = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (4.4)$$

Ancak bu sade ifadenin dışında Courant sayısı nümerik çalışmalardaki her bir sınır şartına, yerçekimi ivmesine ve akışkan özelliklerine de bağlıdır. OPENFOAM kullanıcılarına Courant sayısının hesaplanması için iki seçenek sunar. OPENFOAM programında nümerik olarak çalışılacak her bir çalışmanın “*system*” klasörü içerisinde “*ControlDict*” dosyası bulunmalıdır. Bu dosya programda zaman kontrolünü ve veri yazdırılmasını sağlar. Bu dosyadaki bir değişken de “*adjustRunTime*” unsurudur. Birinci seçenekte kullanıcı bu unsuru kapatır ve zaman adımı büyüklüğünü kendisi tanımlar. Belirlenen zaman adımına göre program Courant sayısını hesaplar. İkinci seçenek ise bu unsur açılarak unsur altında maksimum Courant sayısı ve maksimum zaman adı tanımlanır. Bu sayede Courant sayısı tanımlanan Courant sayısını ve zaman adımı büyüklüğünü geçmez. Birinci seçeneğin bir dezavantajı bulunmaktadır. Courant sayısının bir değerini geçtiği durumlar ile karşılaşılabilir. Bu durum sonuçlara olumsuz yansır. Mevcut tezde ikinci seçenek kullanılmış olup maksimum Courant sayısı ve maksimum



ara yüz Courant sayısı 0,4 olarak tanımlanmıştır. Bu bölümdeki alt indisler “*l*” sıvı fazı, “*v*” buhar fazını ve “*s*” katı fazını ifade etmektedir. İndisler katı – sıvı, katı- buhar ve sıvı – buhar arasındaki yüzey gerilimlerini ifade etmektedir.



### TEORİK ÇALIŞMALAR

Bu bölümde kaynama olgusuna etki eden kütle, momentum ve enerji denklemleri, ara yüzey basınç farkı ve korunum denklemleri ile 3 fazlı kontak hattında mikro ölçekteki ısı transferine etki eden denklemler incelenmiştir. Denklem sistemleri hakkında ayrıntılı bilgi için Kunkelmann [1], Dietl [2], Peter Stephan [3] incelenebilir.

#### 5.1 Korunum Denklemleri

Korunum denklemlerinin sadeleştirilmesinde aşağıdaki kabuller uygulanmıştır. [2]

1. Malzeme özellikleri sabit kabul edilmiştir.
2. Sıkıştırılmaz akış kabulü yapılmıştır.
3. Akışkan özelliği Newton türüdür.
4. Viskoz ayrışma ihmal edilmiştir.

$$\nabla \cdot u = \frac{\dot{\rho}}{\rho} \quad (5.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial \tau} + (u \cdot \nabla) \cdot u \right) = f - \nabla p + \nabla \left( -\frac{2}{3} \mu \nabla \cdot u \right) + \nabla \cdot (\mu (\nabla u + (\nabla u)^T)) \quad (5.2)$$

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{h} \quad (5.3)$$

Katı bölge için taşınım ile olan ısı transferi terimi çıkarıldığında enerji denklemi aşağıdaki gibi sadeleştirilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial \tau} = \nabla(k \nabla T) \quad (5.4)$$

Denklem (5.5) akışkan hacim dağılımı denklemidir ve OPENFAOM programında MULES programı ile çözülür. Denklemdeki F değişkeni sıvı fazın hacim dağılımını ifade etmektedir. F değişkeni sıvı fazı için bir değerini alırken buhar fazı için sıfır değerini alır.

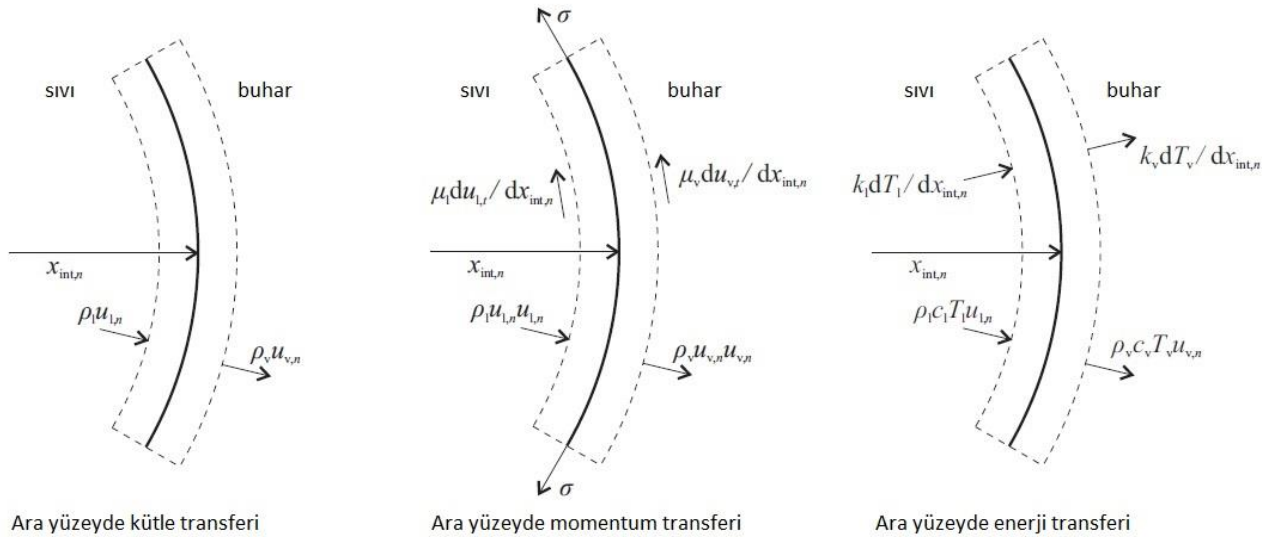
$$\frac{\partial F}{\partial \tau} + \nabla \cdot (uF) + \nabla \cdot (u_r F(1 - F)) = \frac{\dot{\rho}}{\rho} F \quad (5.5)$$

## 5.2 Sıvı-Buhar Ara Yüzeyinde Basınç Farkı ve Korunum Denklemleri

Sıvı-buhar ara yüzeyindeki basınç farkı yüzey gerilimine sebep olmaktadır. Basınç farkını hesaplamamızı sağlayan bu denklem *Young Laplace Denklemi* olarak da bilinir. Bu bölümde ek olarak sıvı-buhar ara yüzeyinde kütle, momentum ve enerji transfer denklemleri belirli kabuller altında elde edilmiştir. [1],[2],[8]

$$\Delta P = P_v - P_l = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (5.6)$$

Ara yüzey çok ince ve kütsüz kabul edilmiştir. Bu sebeple transfer denklemlerini yazarken yüzeye normal doğrultuda ve yüzeyin teğeti doğrultusunda girenleri ve çıkanları eşitlemek yeterlidir. Şekil ve denklemlerdeki “n” alt indisi yüzey normalini ve “t” alt indisi yüzey teğetini belirtmektedir.



Şekil 5.1 Arayüzeyde kütle, momentum ve enerji denklemleri [8].

$$\rho_l u_{l,n} - \rho_v u_{v,n} = (\rho_l - \rho_v) u_{int} \quad (5.7)$$

$$P_v - P_l = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) + \rho_l u_{l,n} (u_{l,n} - u_{int}) - \rho_v u_{v,n} (u_{v,n} - u_{int}) \quad (5.8)$$

$$\mu_l \frac{du_{l,t}}{dx_{int,n}} = \frac{du_{v,t}}{dx_{int,n}} \mu_v \quad (5.9)$$

$$\rho_l (u_{l,n} - u_{int}) \Delta h_V = \rho_v (u_{v,n} - u_{int}) \Delta h_V = -k_l \frac{dT_l}{dx_{int,n}} + \frac{dT_v}{dx_{int,n}} k_v \quad (5.10)$$

### 5.3 Mikro Bölge Denklemleri

Mikro bölge denklemlerinin elde edilmesinde aşağıdaki kabuller uygulanmıştır.

1. Sıvı tabaka incedir. Hız değerinin düşük olmasından dolayı Reynold sayısı çok düşüktür.
2. Mikro bölgedeki ısı transferi duvara dik yönde ve bir boyutludur.
3. Mikro bölge boyunca duvar sıcaklığı aynı kabul edilmiştir.

Bu kabuller doğrultusunda mikro bölge için elde edilen sistem denklemleri aşağıdaki gibidir. Dietl [2]

$$\frac{d\delta}{d\xi} = \delta' \quad (5.11)$$

$$\frac{d\delta'}{d\xi} = \frac{(1+\delta'^2)^{1.5}}{\sigma} \left( p_{cap} - \frac{A}{\delta^3} + \frac{1}{\Delta h_v^2} \left( \frac{T_w - T_{sat} \left( 1 + \frac{p_{cap}}{\Delta h_v \rho_l} \right)}{\sqrt{1+\delta'^2} \frac{\delta}{k_l} + R_{int}} \right)^2 \left( \frac{1}{\rho_v} - \frac{1}{\rho_l} \right) \right) \quad (5.12)$$

$$\frac{dp_{cap}}{d\xi} = -\frac{3\gamma_l}{\delta^3 \Delta h_v} \left( \dot{Q}_{cl} + \rho_l \Delta h_v u_{cl} (\delta - \delta_{ad}) \right) \quad (5.13)$$

$$\frac{d\dot{Q}_{cl}}{d\xi} = \frac{T_w - T_{sat} \left( 1 + \frac{p_{cap}}{\Delta h_v \rho_l} \right)}{\frac{\delta}{k_l} + \frac{R_{int}}{\sqrt{1+\delta'^2}}} \quad (5.14)$$

Mikro bölgedeki bu denklemler sırası ile yüzeye paralel yönde ( $\xi$ ) film kalınlığı, eğiklik, kılcal basınç ve mikro bölgedeki ısı akısı değişimini göstermektedir. Bu denklemlere ek olarak mikro bölgedeki sıvı-buhar ara yüzeyi basınç farkı, sıvı filmi hız denklemi ve ek olarak ara yüzeyindeki termal direnç denklemleri sırası ile aşağıdaki gibidir. [1],[2]

$$\Delta P = P_v - P_l = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) + \frac{A}{\delta^3} \quad (5.15)$$

Bu denklem *Young Laplace Denklemine* “*disjoining*” (ayrılma) basıncının eklenmesi ile elde edilmiştir. Ayrılma basıncı sıvı ve duvar arasındaki moleküllerin çekim kuvveti ile oluşur. Mikro bölgede kabarcığın hemen altında katı yüzey ile kabarcık arasında gözle görülemeyecek incelikte bir sıvı filmi bulunur. Ayrılma basıncı da film kalınlığının üçüncü dereceden kuvveti ile ters orantılıdır.

$$u = -\frac{\delta^2}{\mu_1} \frac{d(\Delta p)}{d\xi} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\eta}{\delta} \right)^2 - \frac{\eta}{\delta} \right] \quad (5.16)$$

Bir numaralı kabul ile birlikte “*lubrication*” yaklaşımı yapılarak hız denklemi elde edilmiştir.

$$R_{\text{int}} = \frac{2-f}{2f} \frac{T_{\text{sat}}^{3/2} \sqrt{2\pi R_{\text{gas}}}}{\rho_v \Delta h_v^2} \quad (5.17)$$

Ara yüzeysel dirençteki  $f$  terimi buharlaşma katsayısı olup 0 ile 1 arasında bulunmaktadır. Bu bölümde “*sat*” alt indisi doymuş kaynama durumunu ifade etmektedir.

### HAVUZ KAYNAMASI

#### 6.1 Havuz Kaynaması

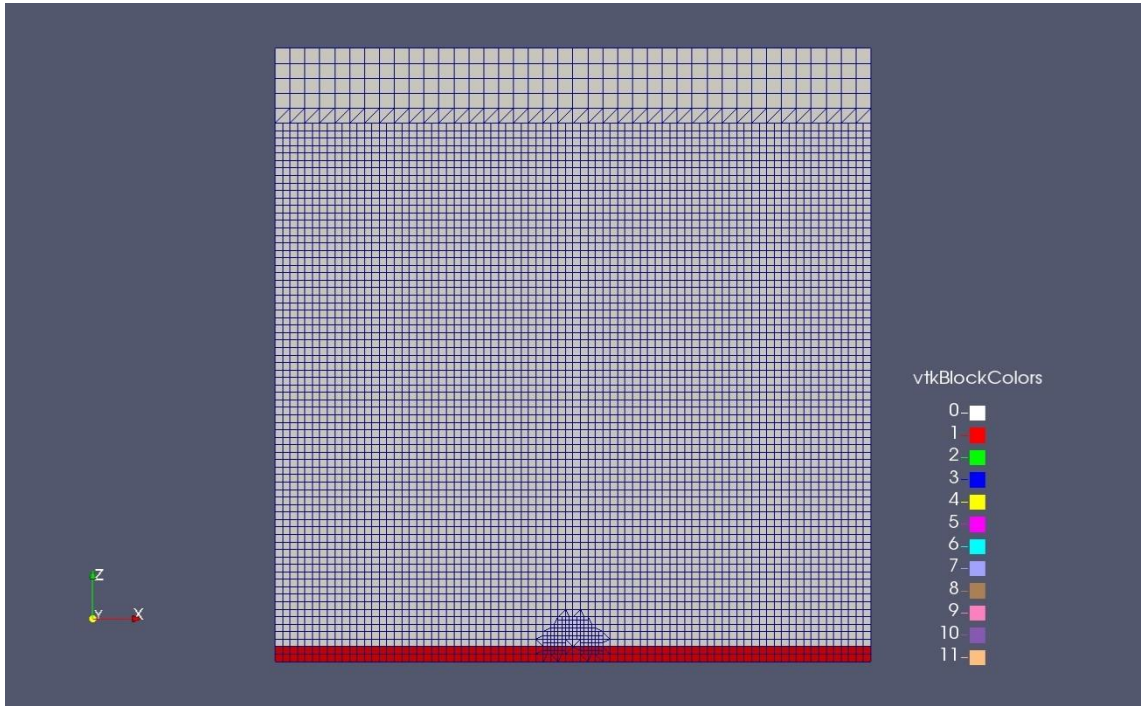
Havuz kaynaması, durgun bir akışkan içerisindeki kaynama modelidir. Bu bölümde kabarcıklı havuz kaynamasında tek bir kabarcığın farklı yerçekimi ivmelerinde 10 Kelvin aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığında ve 5 Kelvin aşırı kızdırılmış akışkan sıcaklığındaki davranışı incelenmiştir.

#### 6.2 Hesaplama Alanı ve Örgü Çözünürlüğü

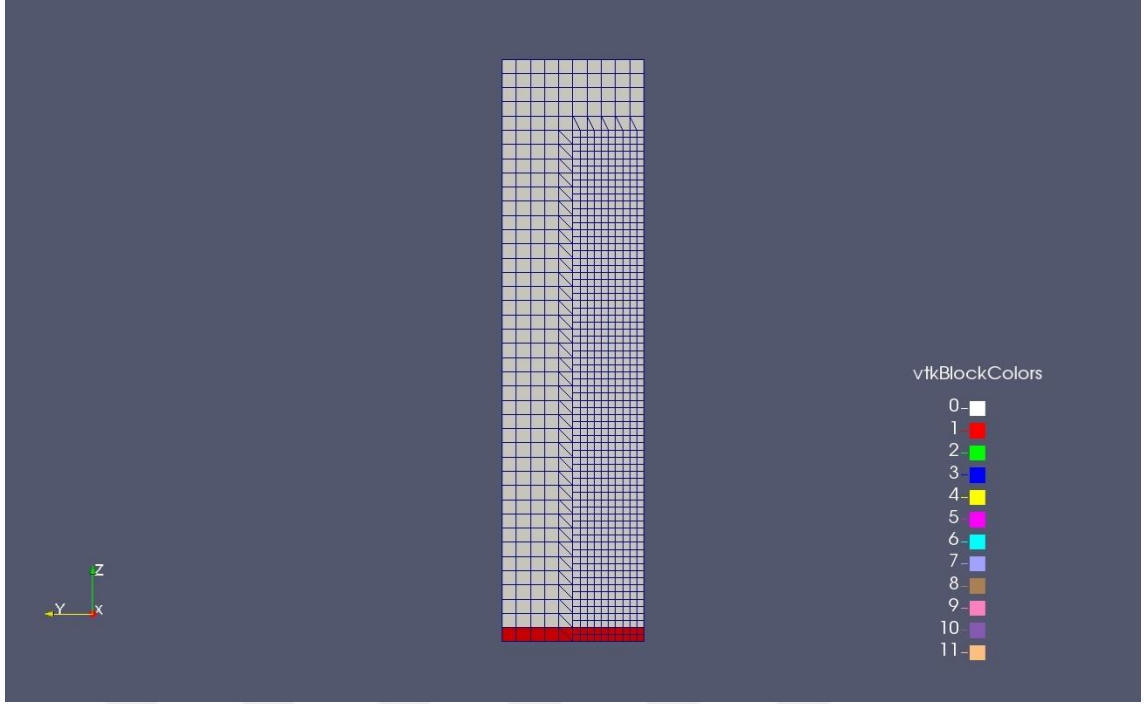
Farklı yerçekimi ivmelerinde yapılan çalışma orta örgü çözünürlüğüne sahip hesaplama alanları için yapılmıştır. Sıvı hesaplama alanının genişliği ve yüksekliği 4 milimetre derinliği ise 1 milimetre olarak seçilmiştir. Başlangıçta genişlik ve yükseklik 40 , derinlik ise 10 eşit parçaya bölünerek kübik örgüler elde edilmiştir. İlk durumda kübik örgülerin her bir uzunluğu 0.1 milimetre uzunluğundadır. Hesaplama öncesinde sıvı hesaplama alanı için “*dynamicMeshDict*” içerisinde genişlik için 0-4 milimetre, yükseklik için 0-3.5 milimetre ve derinlik için 0-0.5 milimetre sınırlarında birinci seviye statik iyileştirilme yapılmıştır. İyileştirme sonrasında belirtilen sınırlar içerisindeki örgülerin tüm koordinatlardaki uzunlukları 0.1 milimetreden 0.025 milimetreye düşmüştür. Kabarcıkta sıvı-buhar ara yüzeyinde ise ikinci seviye dinamik iyileştirilme yapılmıştır. Bu işlem sonrasında başlangıçta kabarcık sıvı-buhar ara yüzeyinde iyileştirilmiş örgünün bir kenarının uzunluğu  $6.25 \times 10^{-3}$  milimetre olarak elde edilmiştir.

Katı bölgesi için oluşturulan hesaplama alanı ise genişlik olarak 4 milimetre derinlik olarak 1 milimetre ve yükseklik olarak 0.1 milimetre boyutlarındadır. Hesaplama alanının

oluşturulmasındaki en önemli etken birbiri ile eşleşen sıvı-katı ve katı-sıvı sınırı tamamen aynı örgü çözünürlüğünde ve aynı büyüklükte olmalıdır. Bu sebeple katı hesaplama alanı her bir örgünün kenarı 0.1 milimetre olacak şekilde bölünmüştür. Sıvı bölgede yapılan statik iyileştirme sonucunda katı bölgesi de sıvı bölgesi ile aynı örgü çözünürlüğüne sahip olmuştur. Dinamik iyileştirme sonrasında ise kabarcık ayaklarının katı üzerinde bulunduğu bölgenin civarı da dinamik olarak iyileştirilmiş ve bu bölgedeki örgü büyüklükleri dinamik örgü iyileştirme işlemi sonrasındaki sıvı-buhar kabarcık ara yüzeyindeki ile eşdeğer olmuştur. İşlem sonrasında sıvı bölge için toplam 73628 adet örgü noktası katı bölge için ise 3376 adet örgü noktası bulunmaktadır.



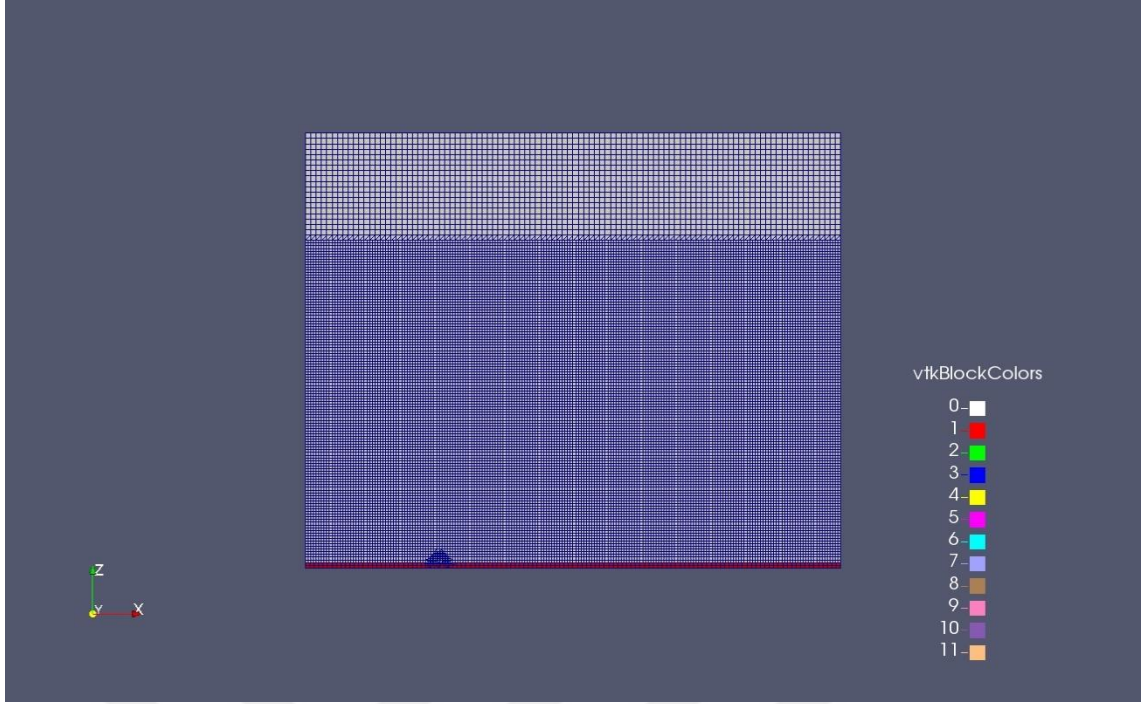
Şekil 6.1 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi  $0,1g_d$ ,  $1g_d$  ve  $10g_d$  için hesaplama alanı ön görünüşü



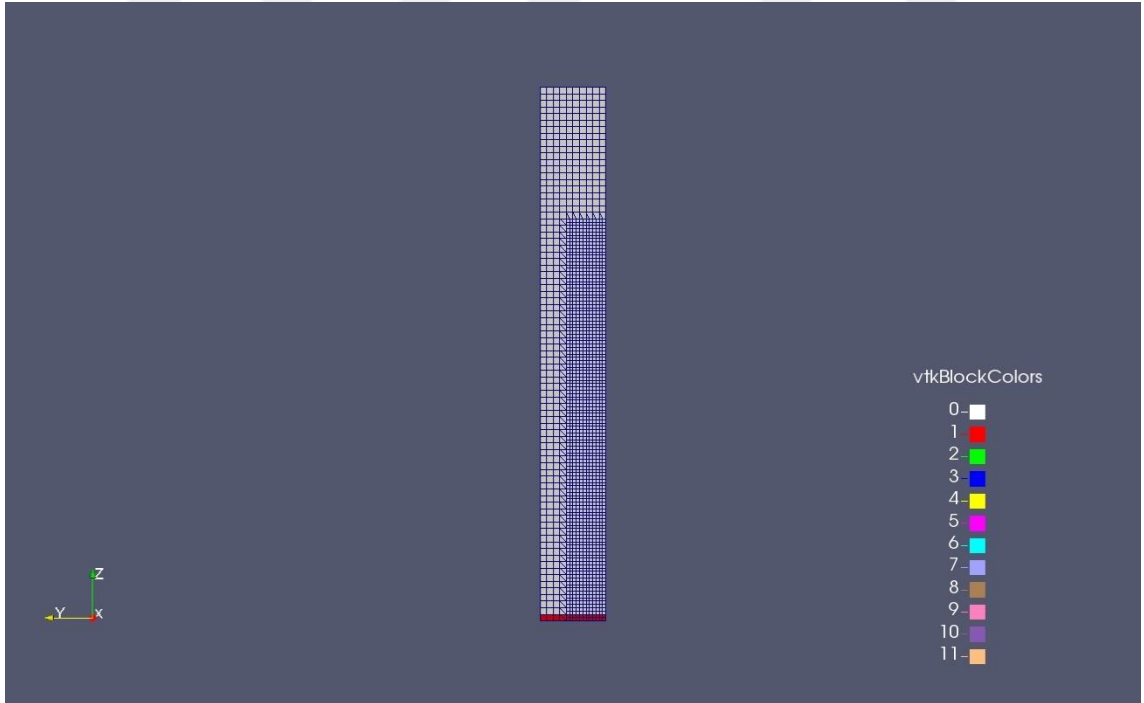
Şekil 6.2 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi  $0,1g_d$ ,  $1g_d$  ve  $10g_d$  için hesaplama alanı yan görünüşü

Şekil 6.1 ve 6.2’de gösterilen geometri ve ağ yapısı  $0.1g_d$ ,  $1g_d$  ve  $10g_d$  için yapılan çalışmalarda kullanılmıştır.  $0.01 g_d$  için yapılan çalışmalarda kabarcığın ayrılma zamanının ve kabarcık ayrılma çapının daha büyük olacağı öngörülerek daha büyük bir hesaplama alanı kullanılmıştır. Sıvı hesaplama alanının genişliği 10 milimetre yüksekliği 8 milimetre ve derinliği 1 milimetre olarak tanımlanmıştır. Katı hesaplama alanının genişliği 10 milimetre derinliği 1 milimetre ve yüksekliği 0.1 milimetre olarak ayarlanmıştır. Bir önceki katı ve sıvı hesaplama alanlarında olduğu gibi her bir örgünün kenarı 0.1 milimetre ve kübik olacak şekilde bölünmüştür. Statik ve dinamik örgü iyileştirmeleri sonucunda elde edilen örgü boyutları bir önceki durumun aynısıdır. Hesaplama alanının boyutlarının ve statik örgü iyileştirmesi yapılan alanın artması sonucunda sıvı hesaplama bölgesi için toplam 363769 örgü noktası katı bölge için ise 5448 örgü noktası bulunmaktadır.



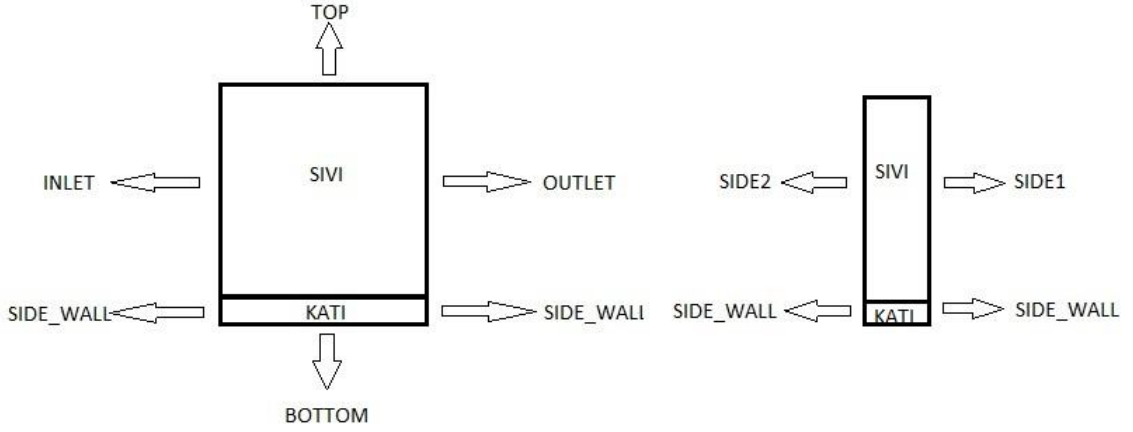


Şekil 6.3 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi  $0,01g_d$  için hesaplama alanı ön görünüşü



Şekil 6.4 Havuz kaynamasında yerçekimi ivmesi  $0,01g_d$  için hesaplama alanı yan görünüşü

### 6.3 Sınır Şartları



Şekil 6.5 Tüm hesaplama alanları için sınır şartları

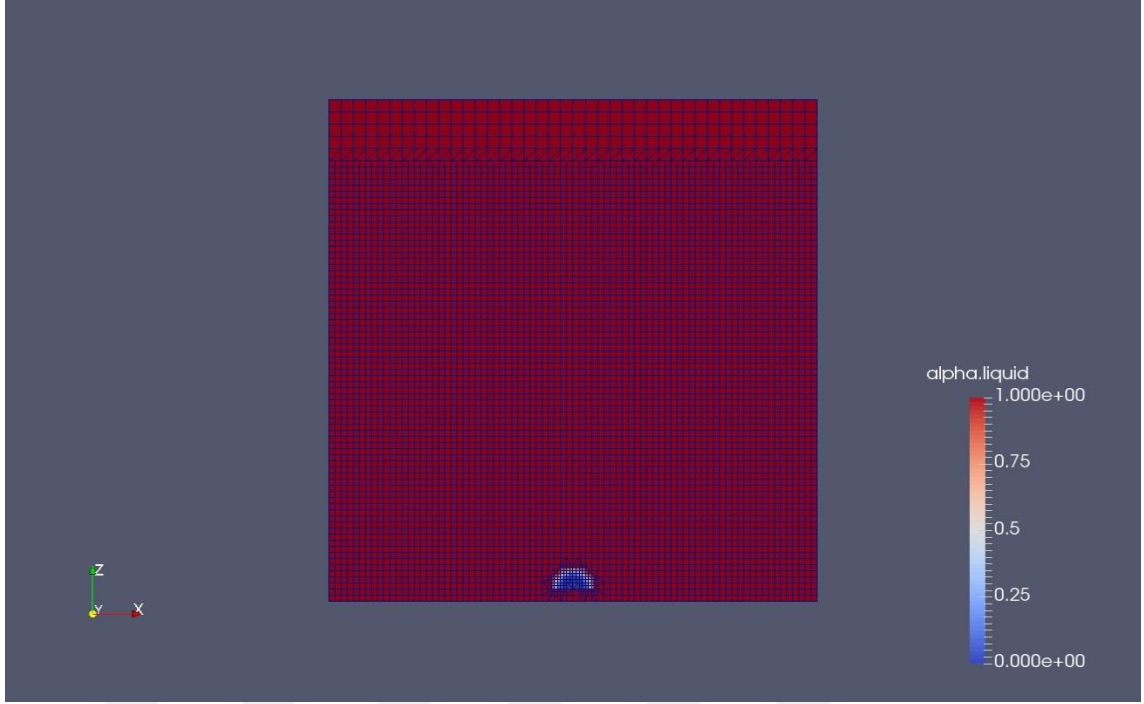
Şekil 6.5 tamamen temsilidir ve hesaplama alanlarının gerçek boyutlarını göstermez. Şekilde gösterilen sınır şartı isimlerine ek olarak sıvı ve katının eşleştiği kısımda sıvı tarafındaki sınır şartı "*FLUID\_SOLID*" ve katı tarafındaki sınır şartı "*SOLID\_FLUID*" olarak tanımlanmıştır. Kabarcık yan görünümdeki SIDE1 sınır şartında tanımlanmıştır. Bu tez çalışmasındaki tüm çalışmalarda bütün sınır şartı isimleri ve türleri bu kısımda gösterildiği gibi tanımlanmıştır.

Çizelge 6.1 Tüm çalışmalardaki sınır şartı isimleri ve türleri

Sınır Şartı	Tür	Sıcaklık (K)	Basınç (kg/ms <sup>2</sup> )	Hız (m/s)	Alpha Liquid (F=0-1)	Isı Akısı (W/m <sup>2</sup> )
TOP	Patch	ZeroGradient	ZeroGradient	ZeroGradient	ZeroGradient	-
INLET	Patch	58.53	ZeroGradient	fixedValue(0)	ZeroGradient	-
FLUID_SOLID	MappedCouplewall	63.53	FixedFluxPressure (0)	fixedValue(0)	1	-
OUTLET	Patch	ZeroGradient	FixedValue(0)	ZeroGradient	ZeroGradient	-
SIDE1	Patch	ZeroGradient	ZeroGradient	ZeroGradient	ZeroGradient	-
SIDE2	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane	symmetryPlane	-
SIDE_WALL	Wall	ZeroGradient	-	-	-	-
BOTTOM	Wall	63.53	-	-	-	-
SOLID_FLUID	MappedCouplewall	63.53	-	-	-	20000
Solid Internal Field	-	63.53	-	-	0	-
Fluid Internal Field	-	58.53	Uniform (0)	Uniform (0)	1	-

Çizelgedeki tüm değerler program ve kullanılan kütüphaneler içerisinde geçen orijinal terimlerdir. Bu sebep ile Türkçe karşılıkları yer almamaktadır.

Çizelgedeki basınç, hız, alpha.liquid ve ısı akısı sınır şartı isimleri tüm çalışmalar için aynıdır. Tüm çalışmaların sınır şartları arasındaki fark ise sıcaklığın sayısal değerleridir. Katı bölgesinde herhangi bir ısı üretimi yoktur. Her simülasyonda başlangıç kabarcık yarıçapı 0.15 milimetre olarak tanımlanmış ve x koordinatında 2 milimetre y ve z koordinatlarında 0 milimetre olacak şekilde katı-sıvı ara yüzeyine oturtulmuştur.



6.6 Havuz kaynaması simülasyonları için kabarcığın ilk durumu

#### 6.4 Simülasyon Zamanı ve Veri Yazdırma

Çizelge 6.2’deki değerler sıcaklığın sayısal değerleri hariç tüm çalışma simülasyonları için geçerlidir. Parametreler “*system/ControlDict*” dosyasında bulunur. Simülasyonların tamamında kullanılan kütüphaneler, şemalar ve sıcaklık, hız, basınç, alpha.liquid için çözüm yöntemleri tamamen aynıdır. Nümerik çözüm programları “Ek D” bölümündedir. Tüm simülasyonlar hesaplama alanları 4 bölüme ayrılarak 4 çekirdekli bilgisayarlarda yapılmıştır.

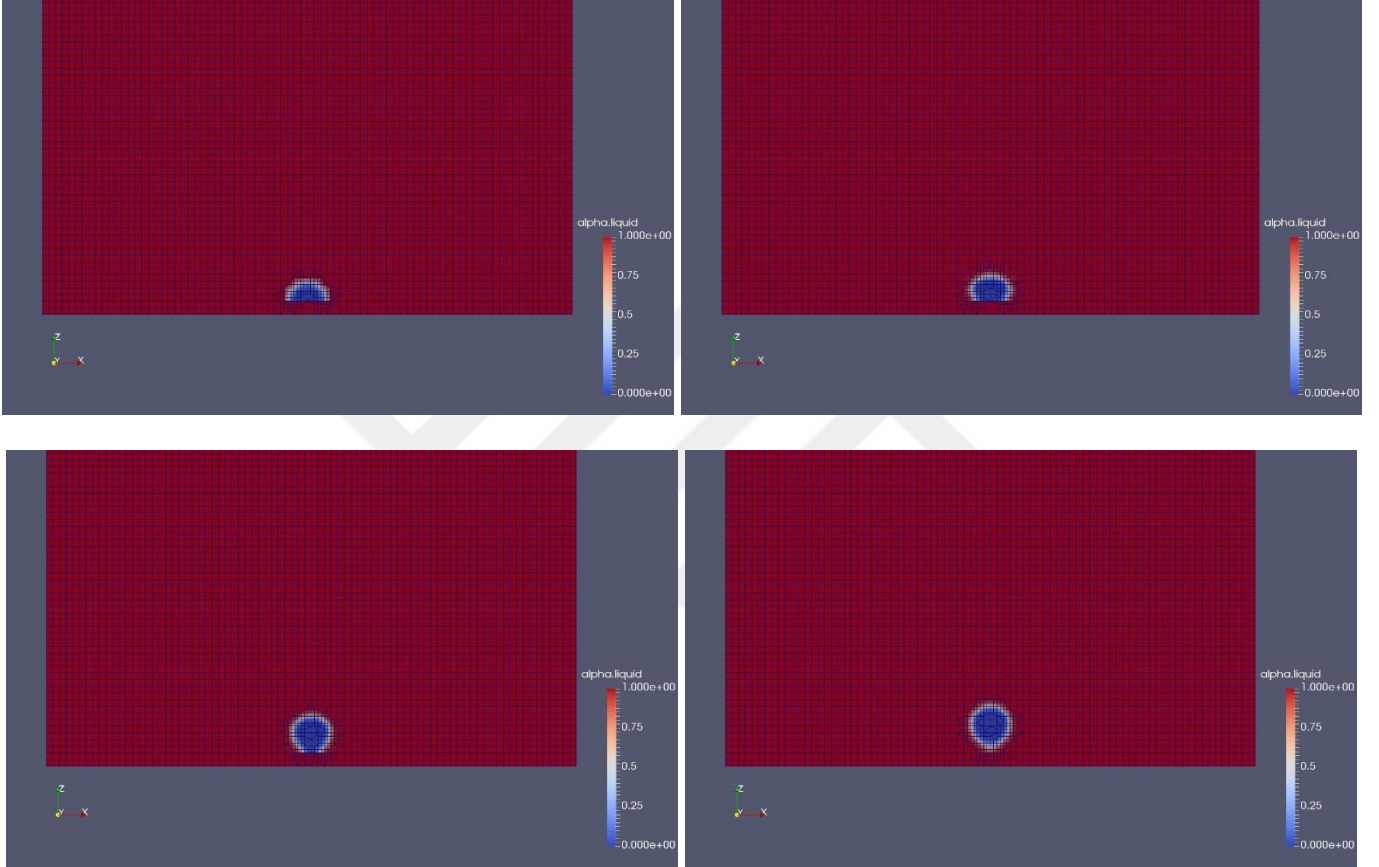
Çizelge 6.2 Simülasyonlarda zaman ve veri yazdırma parametreleri

	Başlangıç Zamanı (s)	Bitiş Zamanı (s)	Zaman Adımı (s)	Veri Yazdırma Türü (Write Control)	Veri Yazdırma Sıklığı (Write Interval)	Adjust Time Step	Max Co	Max Alpha Co	Max Delta T(s)
Simülasyonlar	0	0.1	$1 \times 10^{-10}$	Zaman Adımı	20	Yes	0.4	0.4	$2 \times 10^{-4}$

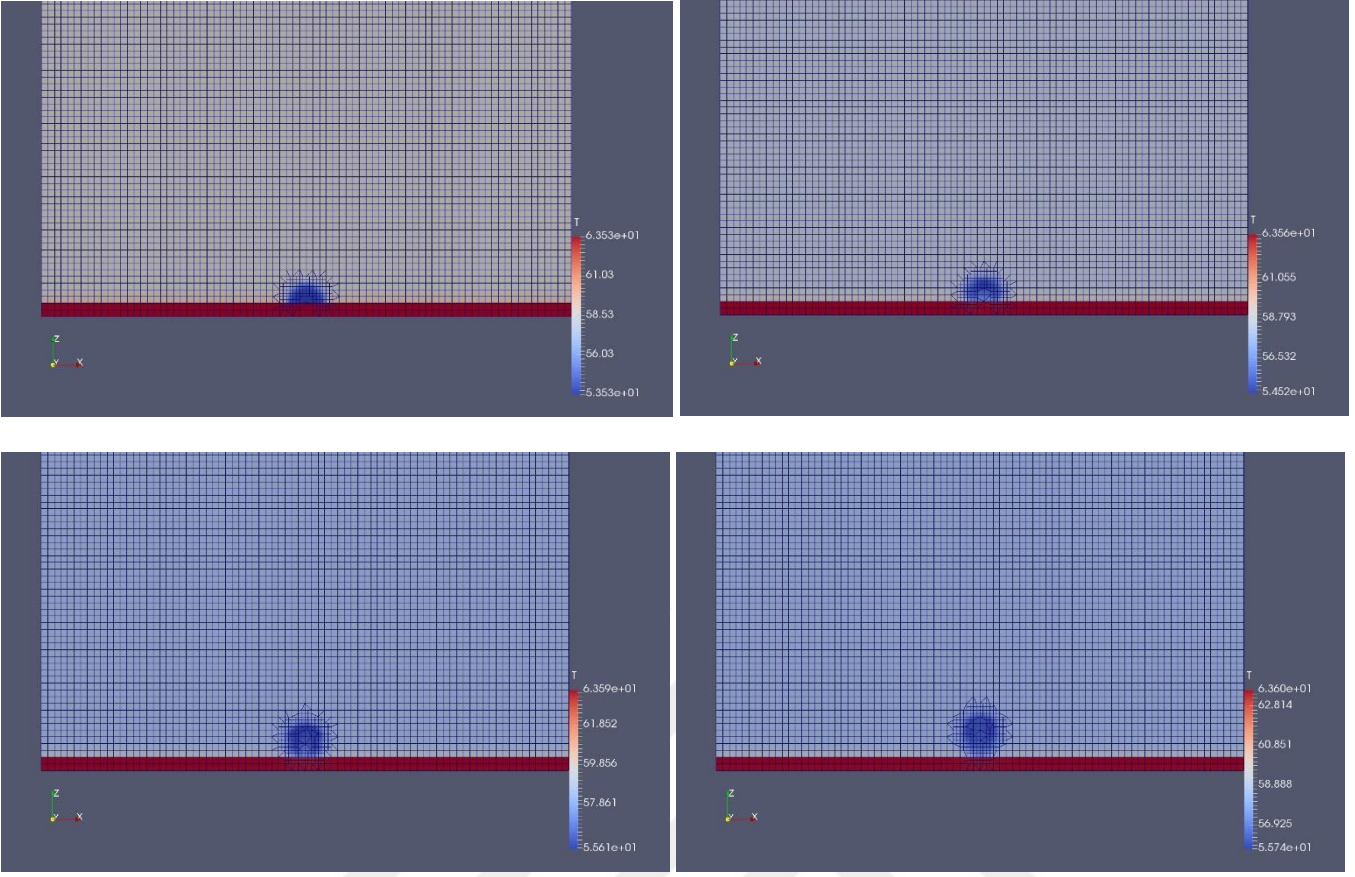
## 6.5 Havuz Kaynaması için Simülasyonlar

Bu bölümde  $10g_d$  ,  $1g_d$ ,  $0.1g_d$  ve  $0.01g_d$  yerçekimi ivmelerindeki simülasyon sonuçları 5K aşırı kızdırılmış sıvı sıcaklığında ve 10K aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığında ayrı ayrı incelenmiştir.

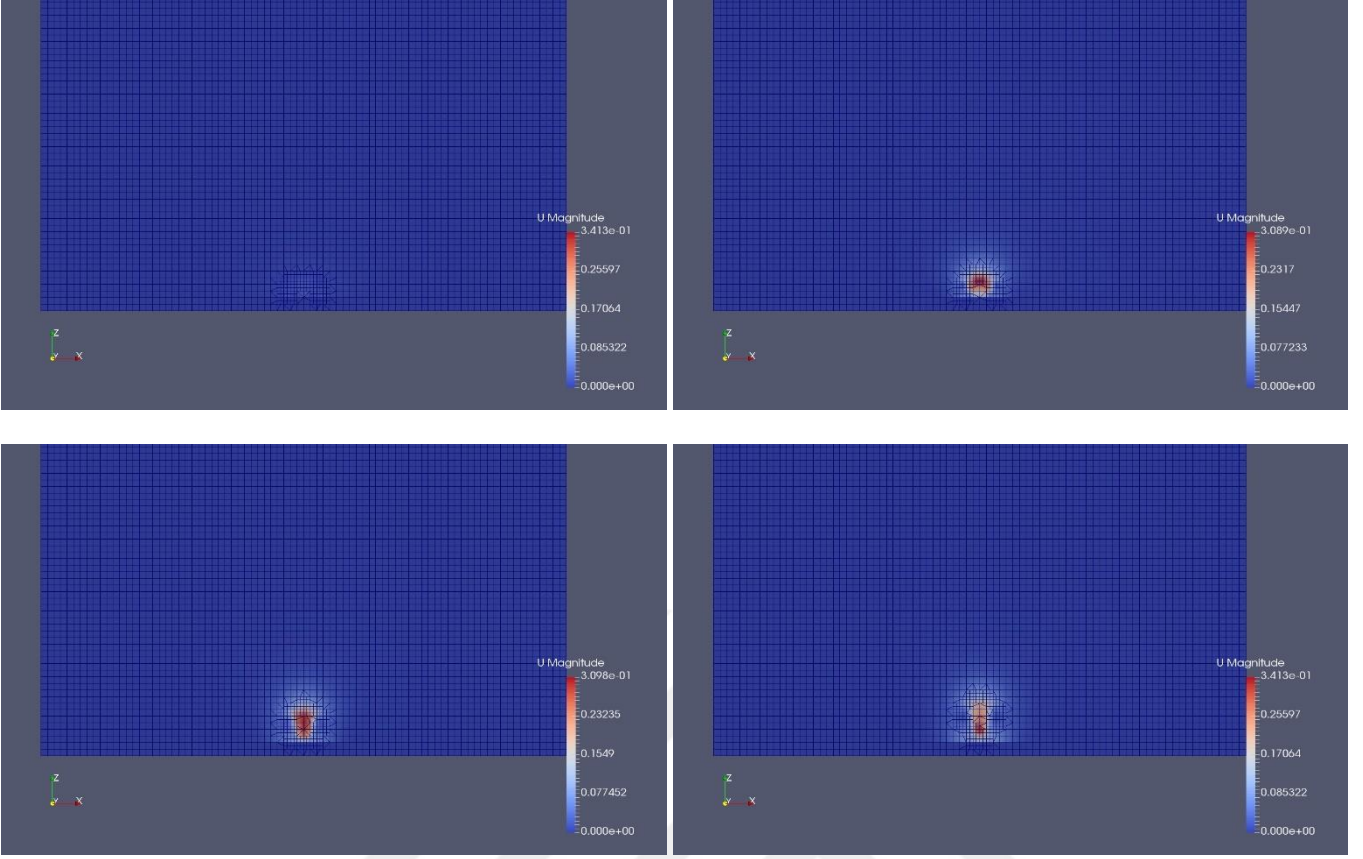
### 6.5.1 Yerçekimi İvmesi $10g_d$ Olan Havuz Kaynaması için Simülasyonlar



Şekil 6.7 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $10g_d$ ) kabarcık gelişimi



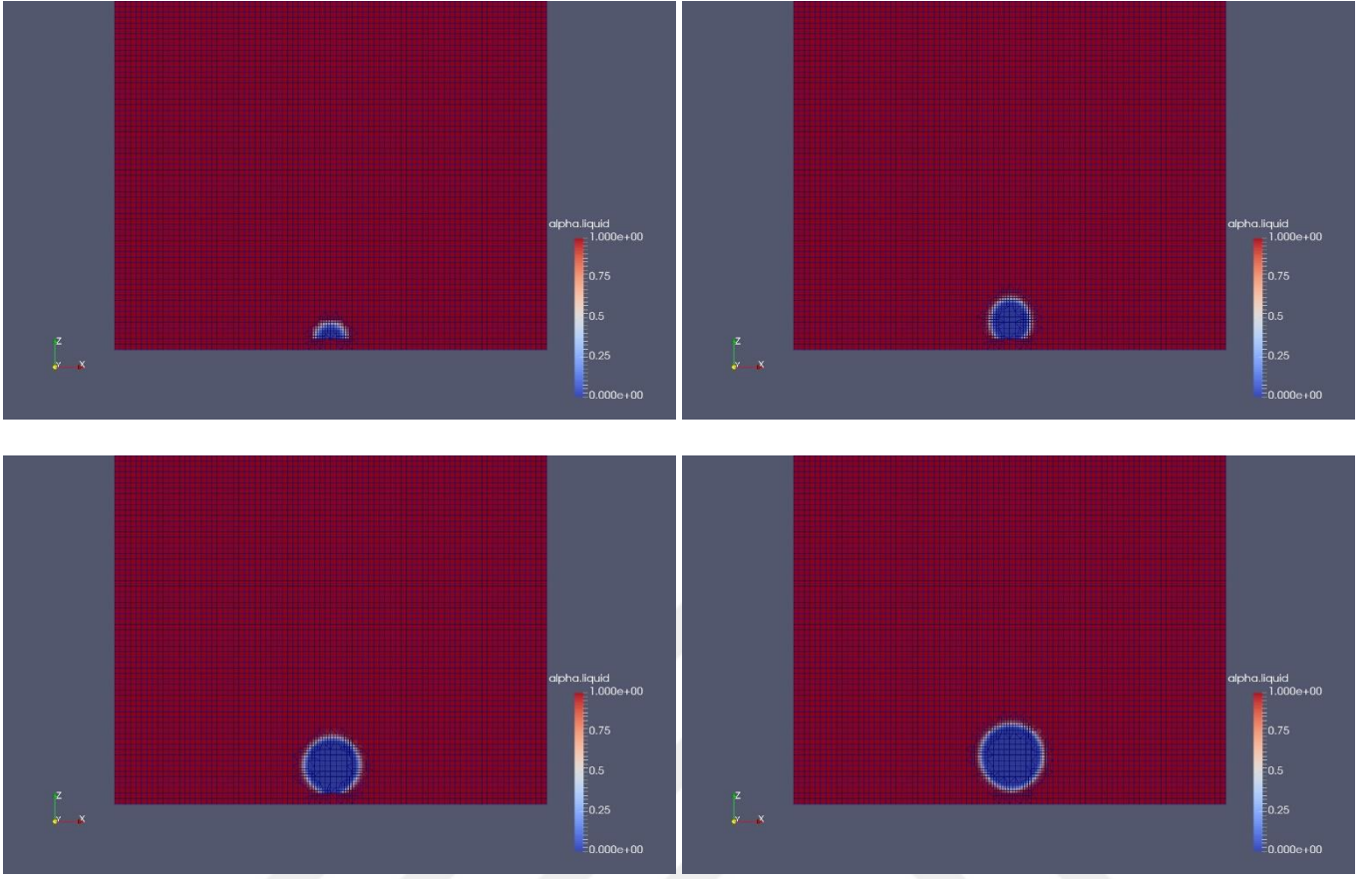
Şekil 6.8 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $10g_d$ ) sıcaklık dağılımı



Şekil 6.9 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $10g_d$ ) hız dağılımı

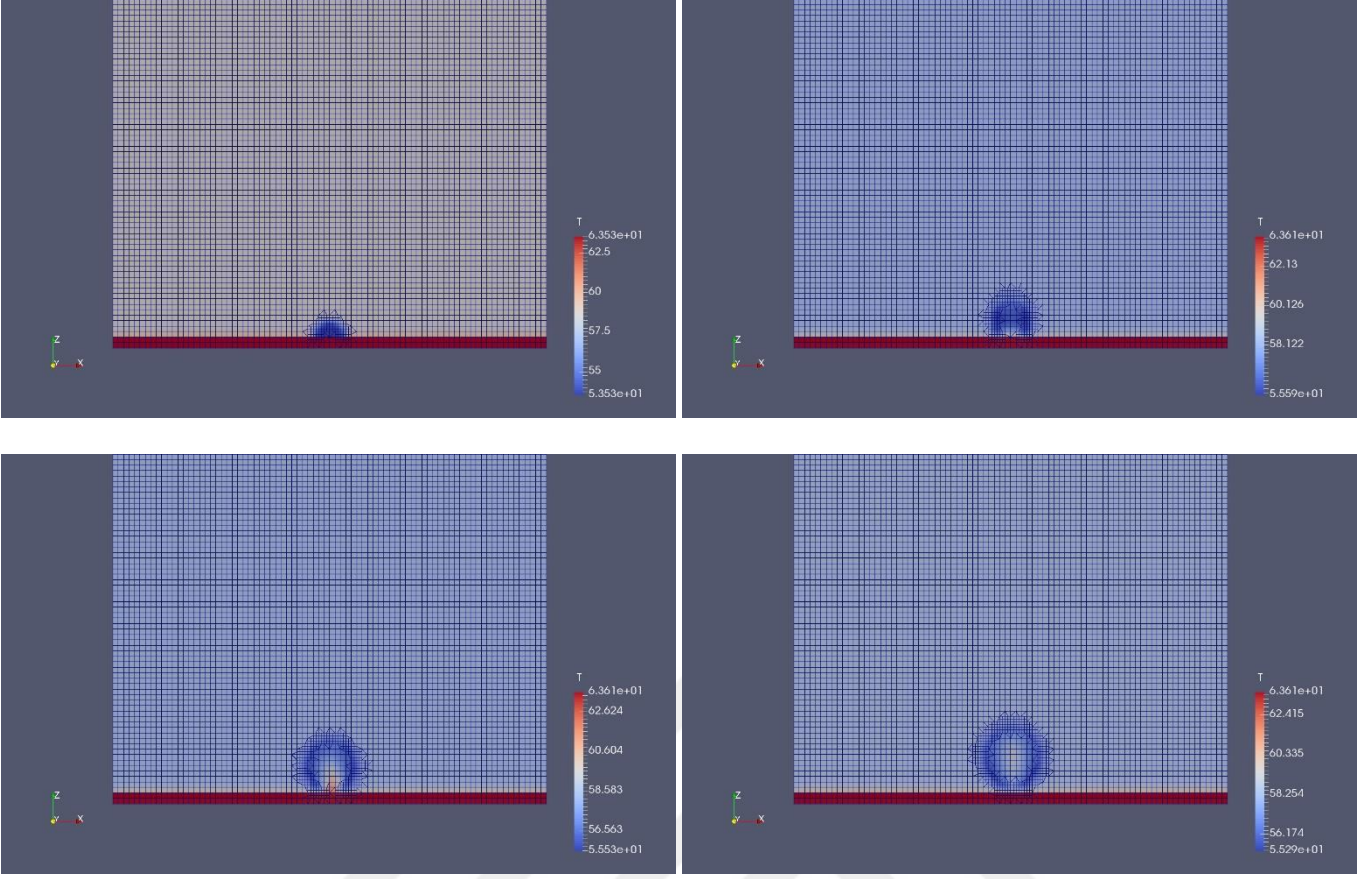
Kabarcık ayrılma süresi 0,001325367 saniye olarak belirlenmiş ve kabarcık ayrılma çapı 0,32 milimetre olarak ölçülmüştür.

## 6.5.2 Yerçekimi İvmesi $1g_d$ Olan Havuz Kaynaması için Simülasyonlar

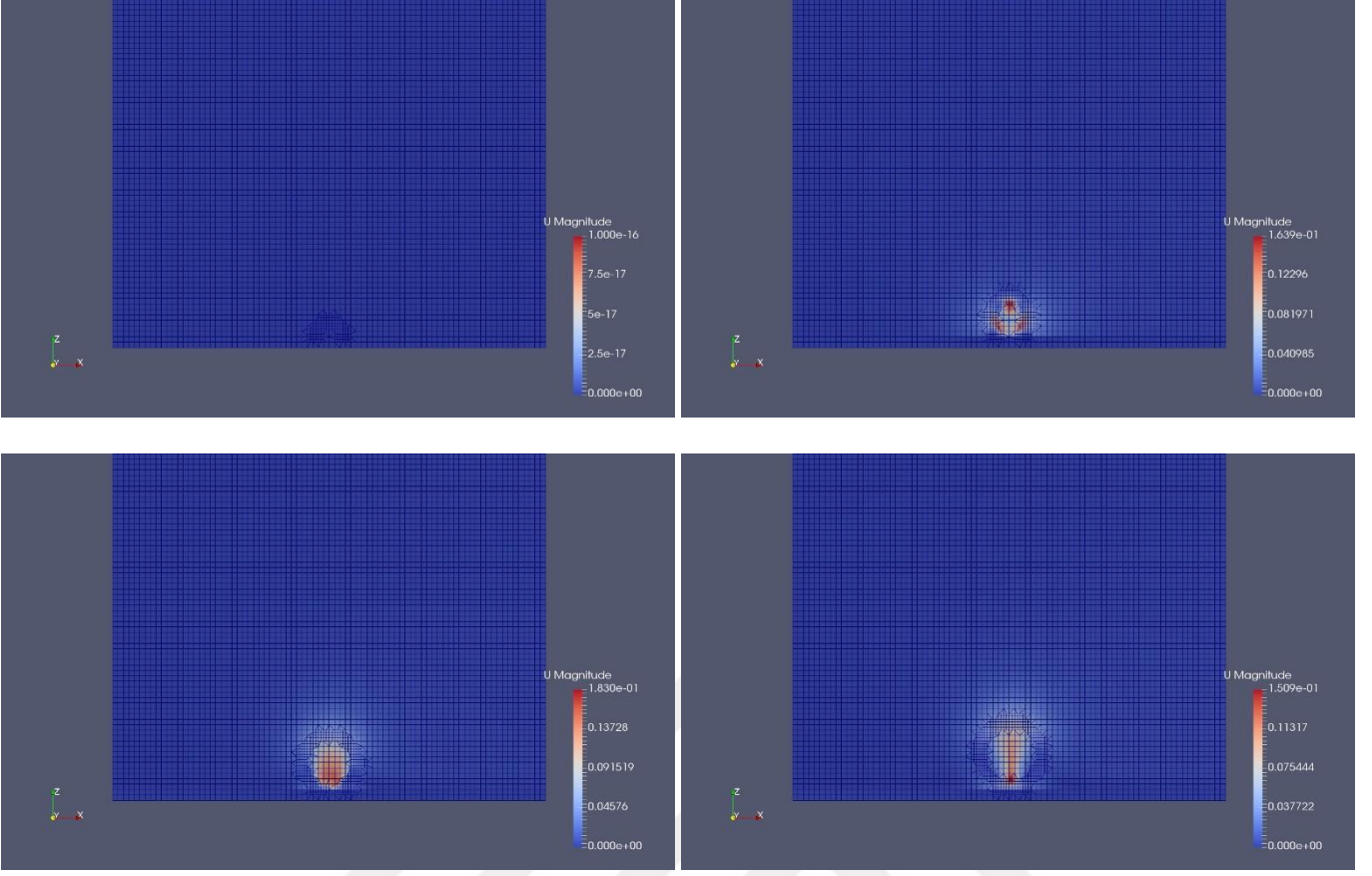


Şekil 6.10 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $1g_d$ ) kabarcık gelişimi





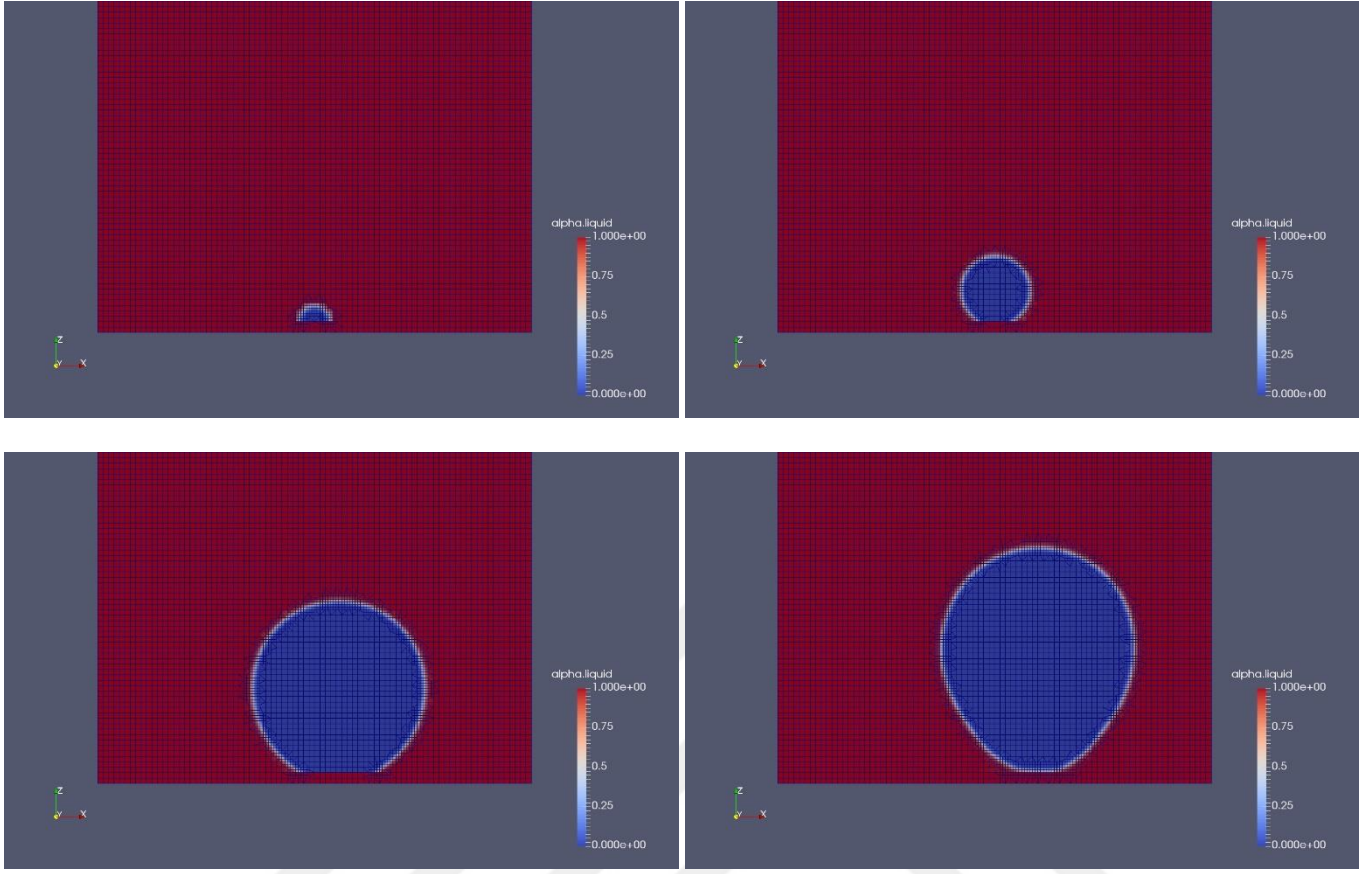
Şekil 6.11 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $1g_d$ ) sıcaklık dağılımı



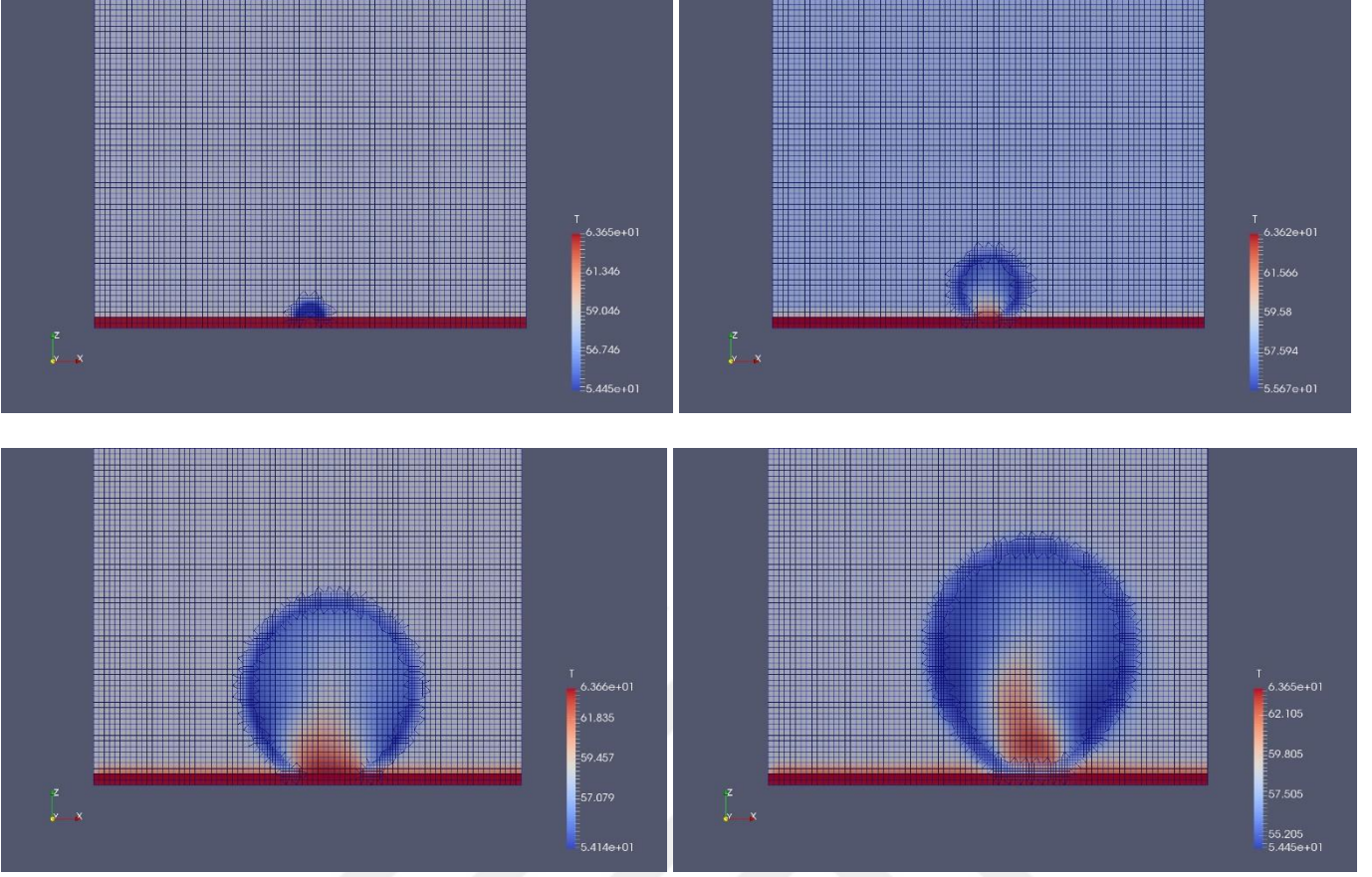
Şekil 6.12 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $1g_d$ ) hız dağılımı

Kabarcık ayrılma süresi 0,0081703 saniye olarak belirlenmiş ve kabarcık ayrılma çapı 0,5 milimetre olarak ölçülmüştür.

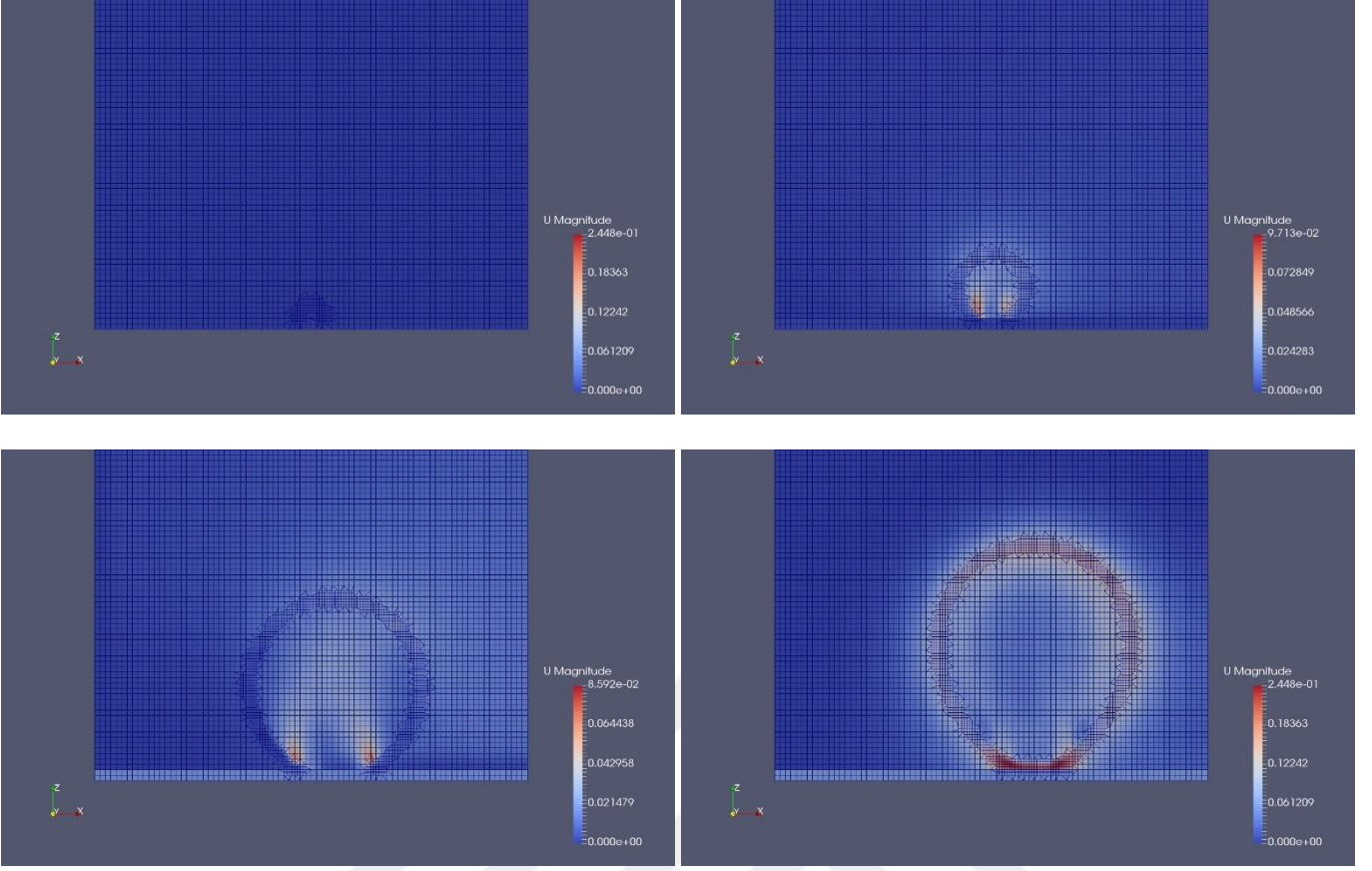
### 6.5.3 Yerçekimi İvmesi $0,1g_d$ Olan Havuz Kaynaması için Simülasyonlar



Şekil 6.13 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,1g_d$ ) kabarcık gelişimi



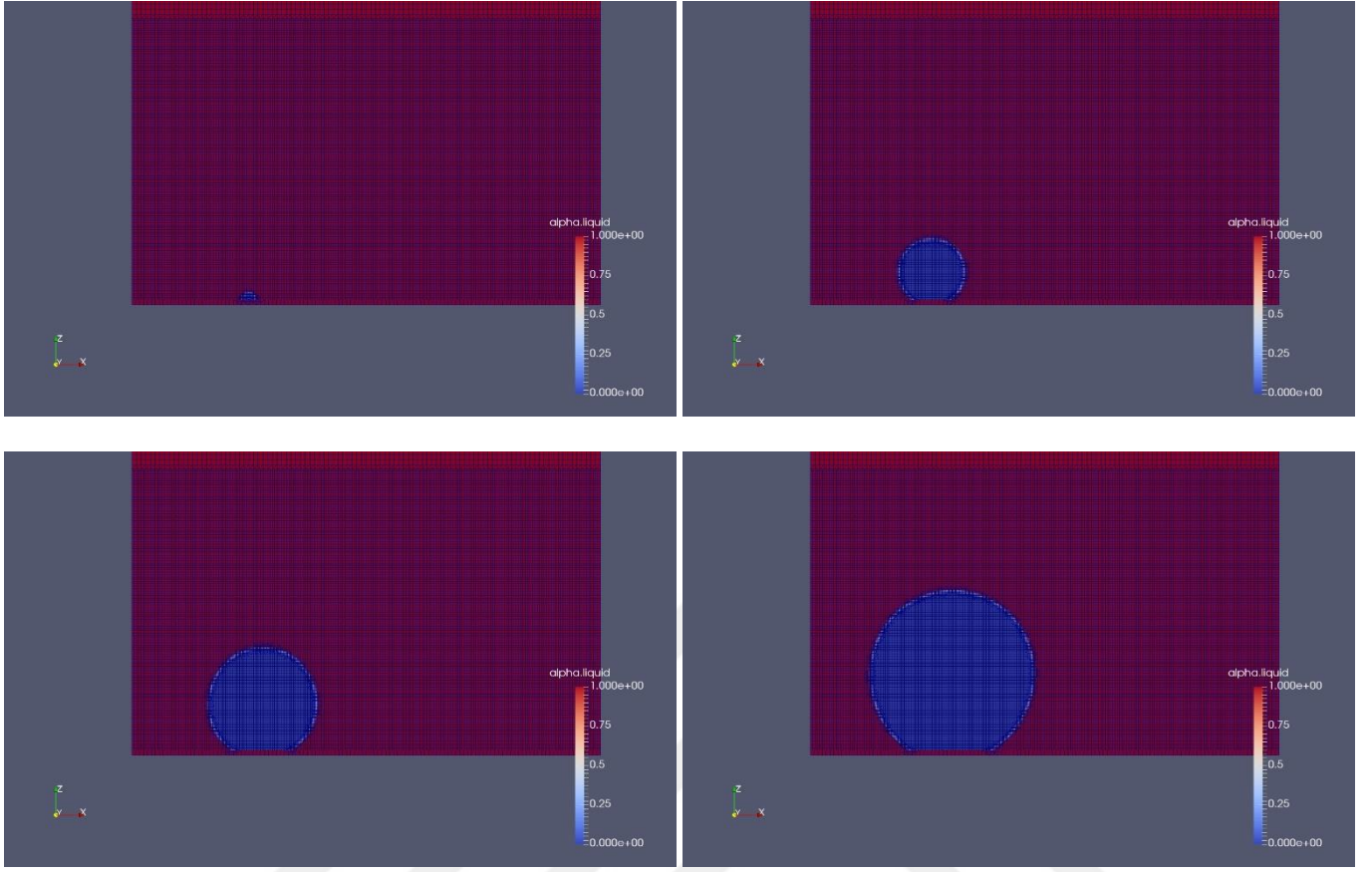
Şekil 6.14 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,1g_d$ ) sıcaklık dağılımı



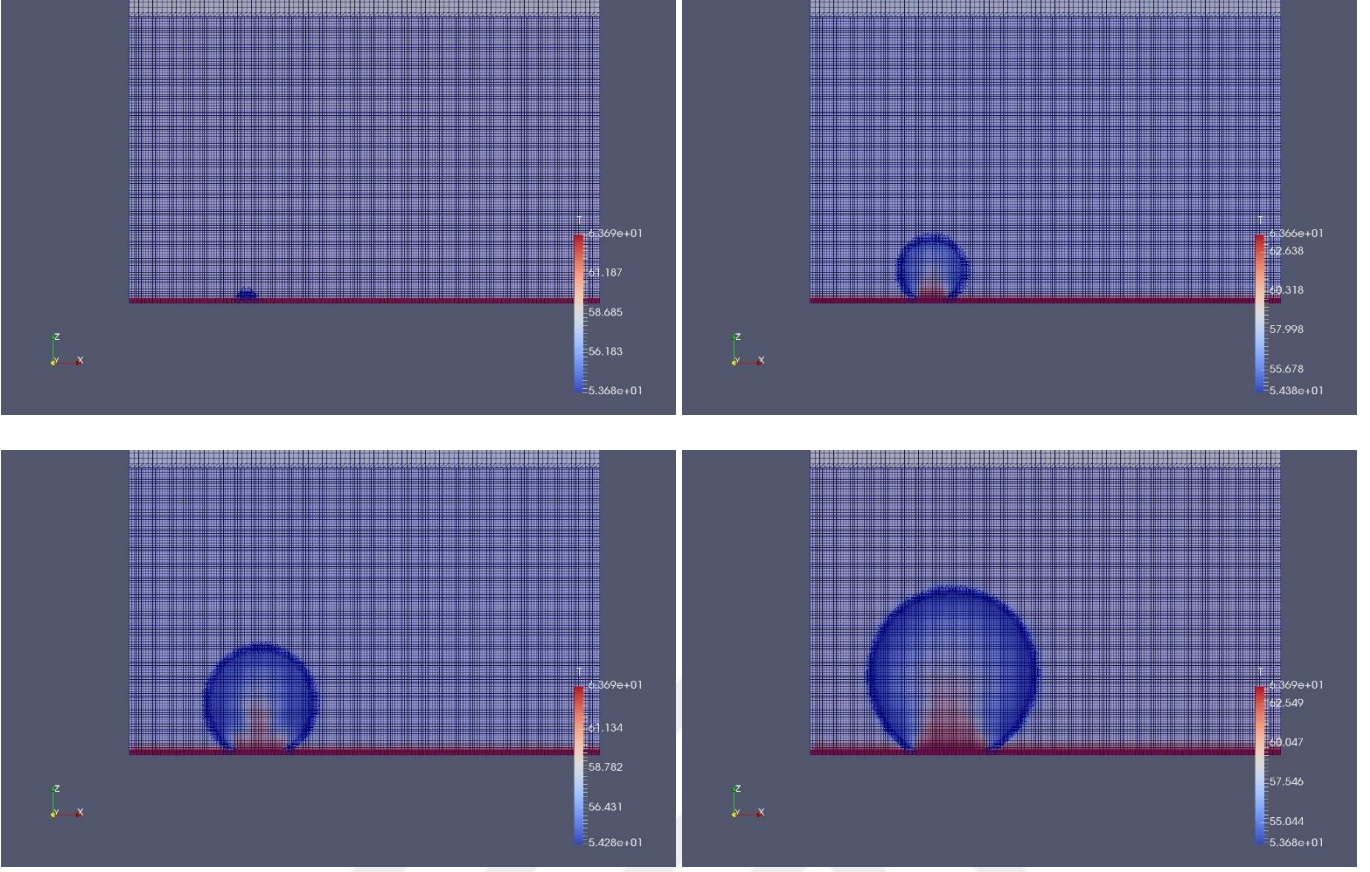
Şekil 6.15 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,1g_d$ ) hız dağılımı

Kabarcık ayrılma süresi  $0,0773541$  saniye olarak belirlenmiş ve kabarcık ayrılma çapı  $1,74$  milimetre olarak ölçülmüştür.

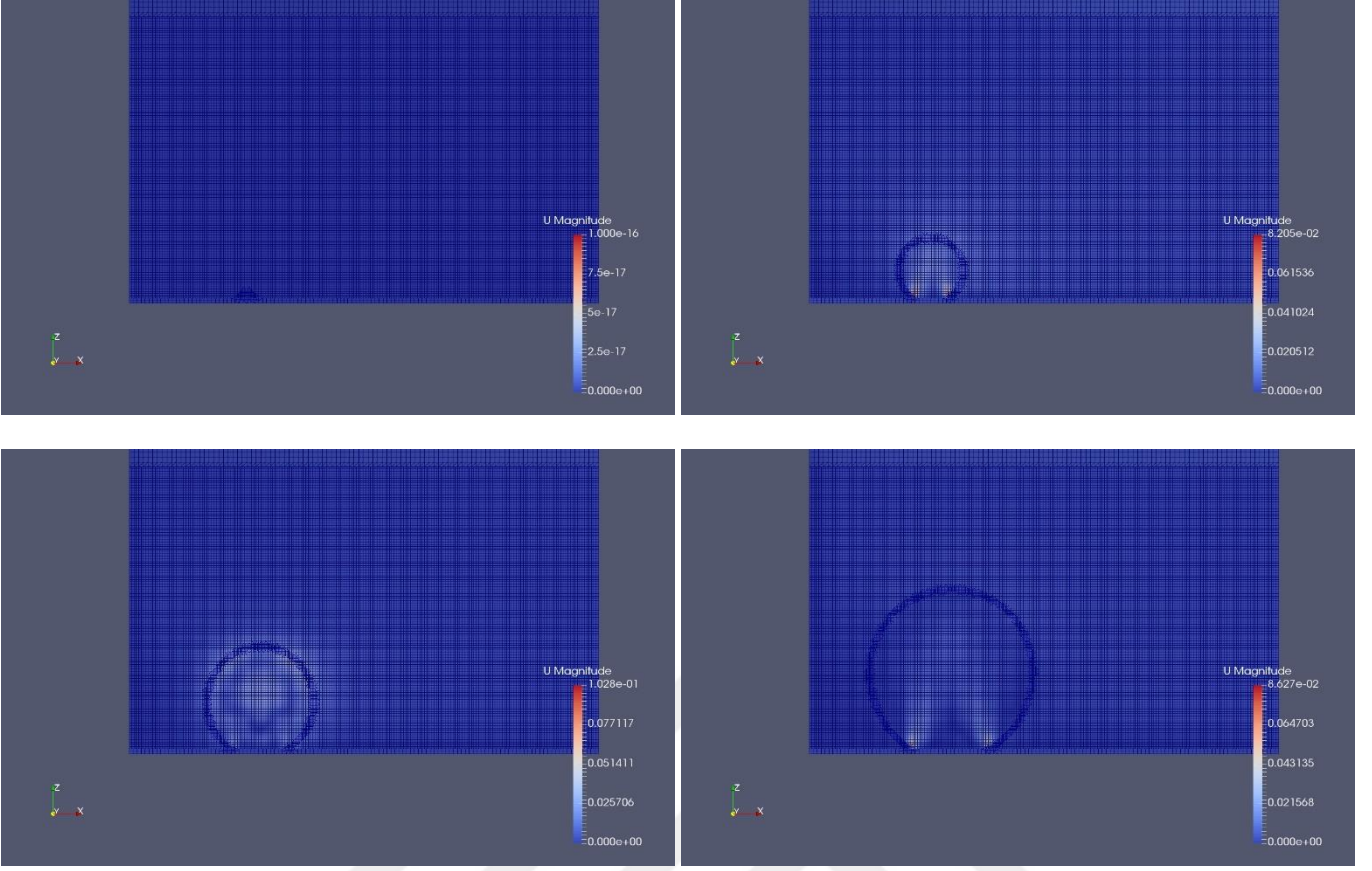
#### 6.5.4 Yerçekimi İvmesi $0,01g_d$ Olan Havuz Kaynaması için Simülasyon



Şekil 6.16 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,01g_d$ ) kabarcık gelişimi



Şekil 6.17 Havuz kaynaması simülasyonlarında (0,01g<sub>d</sub>) sıcaklık dağılımı



Şekil 6.18 Havuz kaynaması simülasyonlarında ( $0,01g_d$ ) hız dağılımı

Simülasyonda  $0,01g_d$  değerinde 0,2223272 simülasyon zamanında kabarcık büyümeye devam etmiştir. Herhangi bir kopma gözlemlenmemiştir.



## 6.6 Havuz Kaynaması için Simülasyon sonuçları

Bu bölümde farklı yerçekimi büyüklüklerinde gerçekleştirilen havuz kaynaması çalışmaları için kabarcıkların yüzeyden ayrıldığı zaman dilimleri ve kabarcıkların ayrılma çapları karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.3 Havuz kaynaması için kabarcık gelişimi sonuçları

Çalışmalar( $1g_d=9,81 \text{ m/s}^2$ )	Kabarcık başlangıç yarıçapı(mm)	Kabarcık ayrılma çapı(mm)	Kabarcık ayrılma süresi(saniye)
10 $g_d$	0,15	0,32	0,001325367
1 $g_d$	0,15	0,5	0,0081703
0,1 $g_d$	0,15	1,74	0,0773541
0,01 $g_d$	0,15	3,39	0,2223272

Çizelge 6.3.1'de de görülebildiği gibi yerçekimi ivmesinin kabarcık gelişimi, kabarcık ayrılma çapı ve kabarcık ayrılma süresi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Sonuç olarak yerçekimi ivmesi azaldıkça kabarcık ayrılma süresinin ve kabarcık ayrılma çapının arttığı sonucuna varılmıştır.

Kabarcık çevrimi esnasındaki en yüksek sıcaklık değerleri kontak hattı civarında ve kabarcığın yüzey ile temas ettiği noktalarda elde edilmiştir.

Kabarcık çevrimi esnasında en yüksek hız değerlerine ilerleyen (kabarcık gelişim periyodu) ve gerileyen kontak hattı (kabarcık ayrılma periyodu) ile birlikte kontak hattı civarında elde edilmiştir. Kabarcık ayrılması esnasında kabarcık yüzeyden koparken en yüksek hız değerleri kabarcığın hemen alt bölgesinde elde edilmiştir.

Kabarcığın ilk durumu ile son durumu arasında yapılan ısı transferi hızı ve kütle transferi hızı verileri Ek A' da verilmiştir. Tam bir kabarcık çevrimi esnasında ısı ve kütle transferi hızları değerleri belirlenen zaman anlarında hesaplanmıştır. Kontak hattı ve geçiş bölgesi transferi hızı değerleri kabarcık çevriminde önce düşük değerlerde elde edilmiş ilerleyen zamanla birlikte en yüksek değerlerine ulaşmış ve kabarcık ayrılması sırasında tekrar düşüş göstermişlerdir. Katı-sıvı bölgeler arasındaki ısı transferi hızı ve toplam ısı transferi

hızı değerleri sıvı ile katı bölge arasındaki sıcaklık farkı azaldığı için devamlı azalma göstermiştir. Elde edilen kütle transferi hızı değerleri ısı transferi hızı değerleri ile paralel bir davranış sergilemiştir.



### DÜZ BİR KANAL YÜZEYİNDEKİ AKIŞ KAYNAMASI

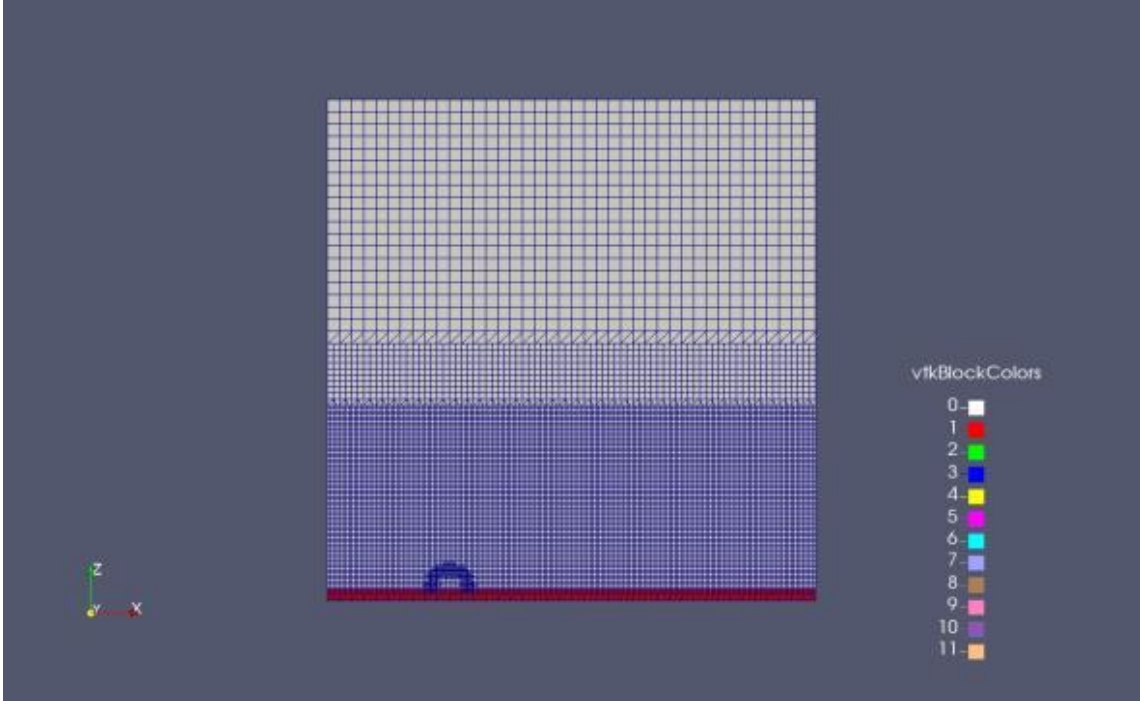
#### 7.1 Düz Bir Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması

Akış kaynaması, hareketli bir akışkan içerisindeki kaynama modelidir. Bu bölümde kabarcıklı akış kaynamasında tek bir kabarcığın sabit dünya yerçekimi ivmesinde ve farklı yağın sıvı hızlarında düz bir kanal yüzeyinde 10 Kelvin aşırı kızdırılmış duvar sıcaklığında ve 5 Kelvin aşırı kızdırılmış akışkan sıcaklığındaki davranışı incelenmiştir. Yağın sıvı hızlarının kanal ortasındaki maksimum değerleri sırası ile 0,01m/s, 0,035m/s, 0,07m/s, 0,3 m/s ve 0,6m/s'dir.

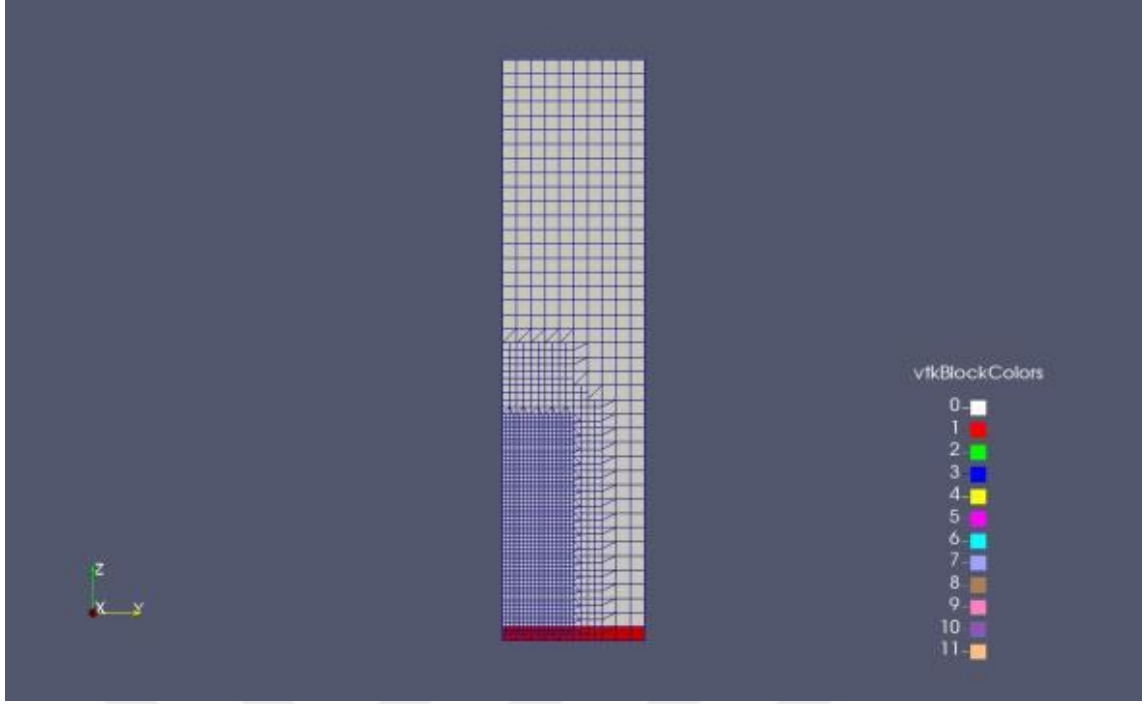
#### 7.2 Hesaplama Alanı ve Örgü Çözünürlüğü

Sabit bir yerçekiminde farklı yağın sıvı hızlarında yapılan çalışma iyi örgü çözünürlüğüne sahip hesaplama alanları için yapılmıştır. Sıvı ve katı hesaplama alanının boyutları havuz kaynaması çalışmalarındaki ( $0.1 g_d$ ,  $1 g_d$  ve  $10 g_d$ ) boyutlar ile tamamen aynıdır. Hesaplama öncesinde sıvı hesaplama alanı için “*dynamicMeshDict*” içerisinde genişlik için 0-4 milimetre, yükseklik için 0-2 milimetre ve derinlik için 0-0.5 milimetre sınırlarında birinci seviye statik iyileştirilme yapılmıştır. Düşük yağın sıvı hızlarında yapılan bu çalışmada sonuçların daha iyi irdelenebilmesi için hesaplama alanına 2.seviye statik örgü iyileştirmesi uygulanmıştır. Sıvı-buhar ara yüzeyindeki dinamik örgü iyileştirme işlemi bir derece arttırılarak 3.seviyeye getirilmiştir. İkinci seviye statik örgü iyileştirme işlemi Birinci seviye statik örgü iyileştirme işleminin sonrasında kübik örgünün bir kenarının uzunluğu 0,025 milimetre olarak elde edilmiştir. İkinci seviye statik iyileştirme işlemi genişlik için 0-4milimetre, yükseklik için 0- 1,5 milimetre ve derinlik için 0-0,5 milimetre

sınırlarında uygulanmıştır. Birinci statik iyileştirme işlemi sonrasında belirtilen sınırlar içerisinde örgü çözünürlüğü 0,1 milimetreden 0,025 milimetreye inmiştir. İkinci statik iyileştirme sonrasında örgü çözünürlüğü belirtilen sınırlar içerisinde 0,025 milimetreden 6,25 mikrometre boyutuna inmiştir. Ara yüzeyde yapılan dinamik iyileştirme sonrasında sıvı-buhar ara yüzeyinde örgü çözünürlüğü 1,56 mikrometre olarak elde edilmiştir. Dinamik iyileştirme sonrasında ise kabarcık ayaklarının katı üzerinde bulunduğu bölgenin civarı da dinamik olarak iyileştirilmiş ve bu bölgedeki örgü büyüklükleri dinamik örgü iyileştirme işlemi sonrasındaki sıvı-buhar kabarcık ara yüzeyindeki ile eşdeğer olmuştur. Tüm örgü iyileştirme işlemlerinden sonra sıvı hesaplama bölgesinde 242080 adet örgü noktası, katı hesaplama bölgesinde 13125 adet örgü noktası bulunmaktadır.



Şekil 7.1 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarının hesaplama alanlarının ön görünüşü

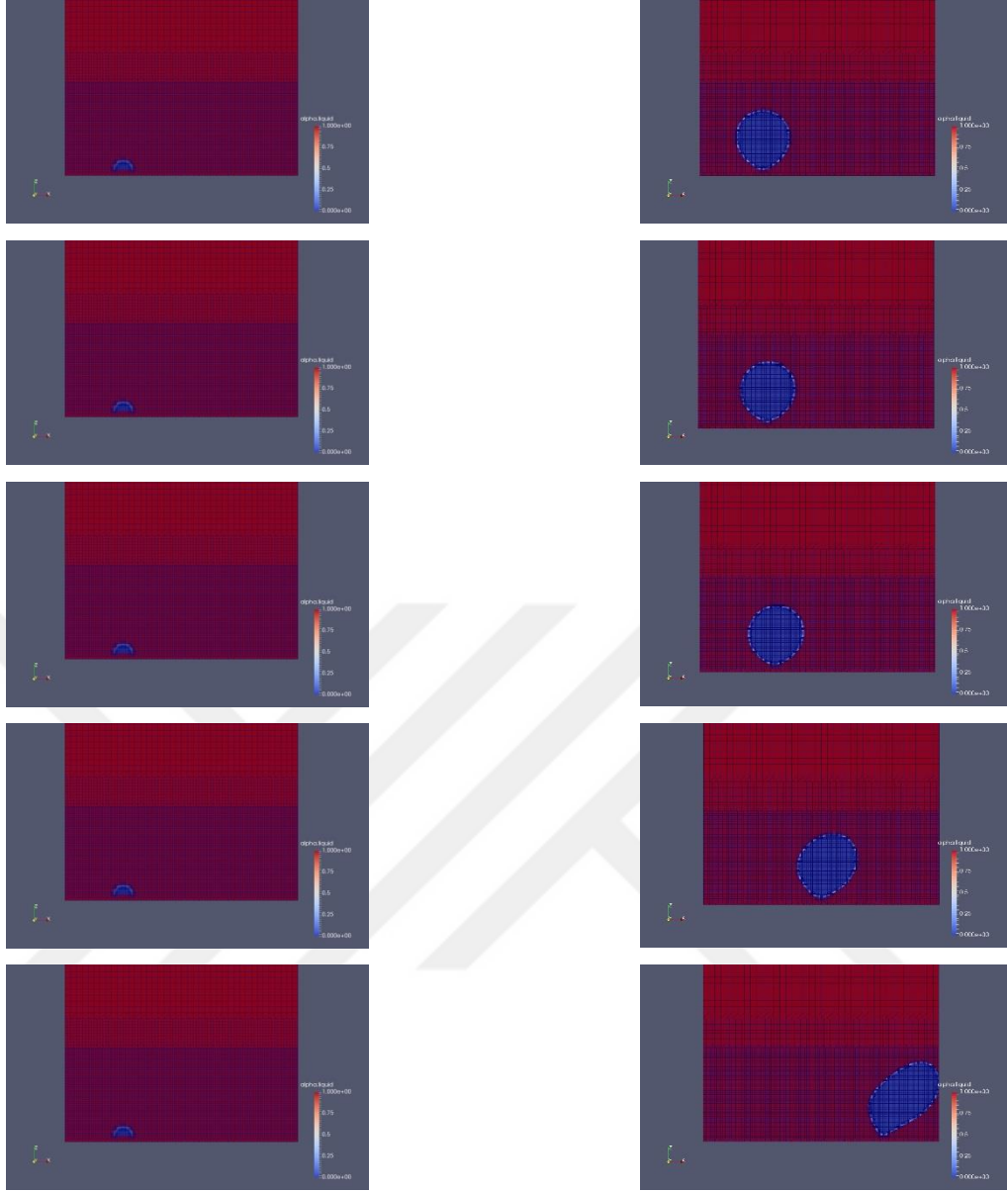


Şekil 7.2 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarının hesaplama alanlarının yan görünüşü

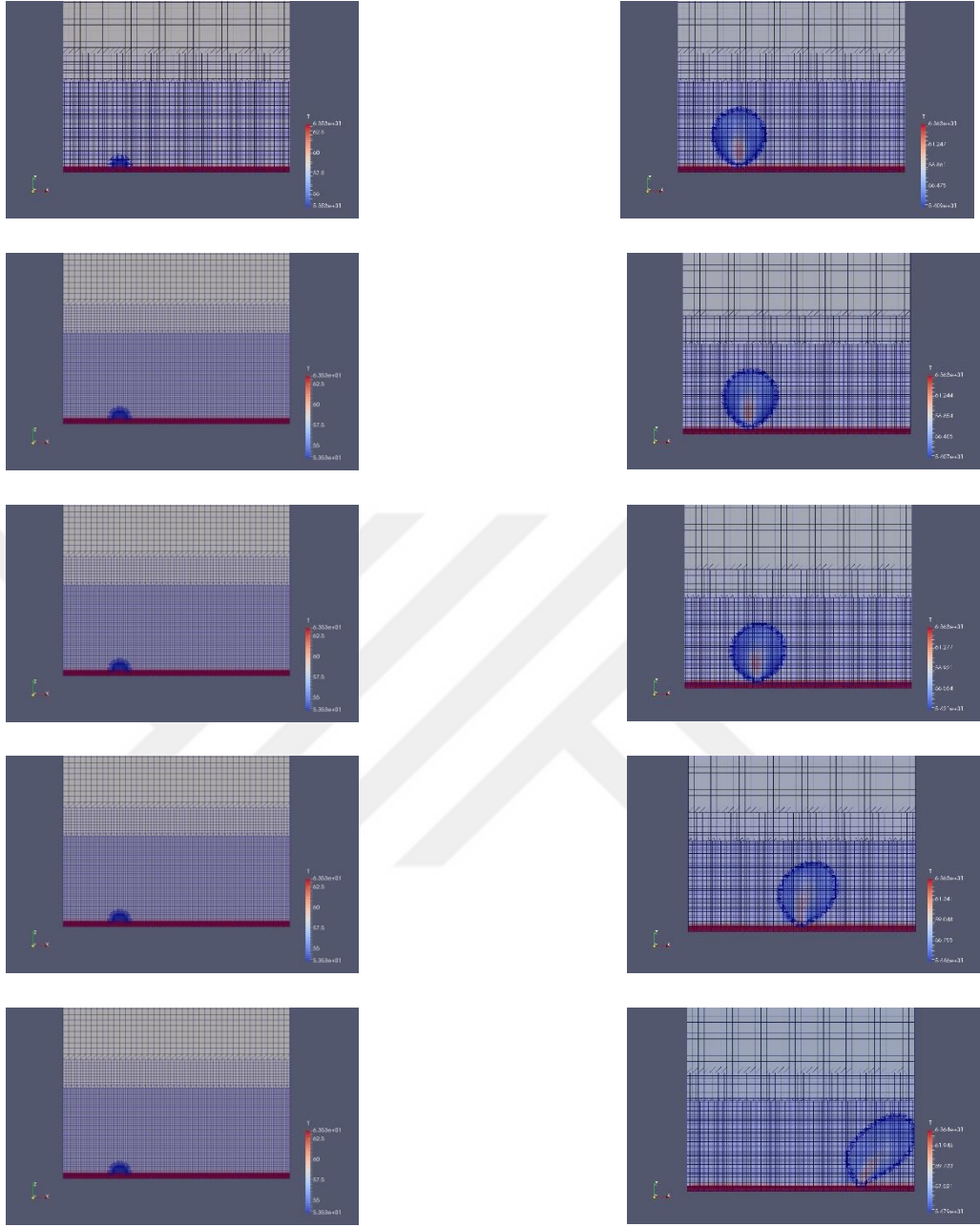
Bu çalışmadaki tüm sınır şartları, giriş parametreleri, simülasyon zamanı ve veri yazdırma havuz kaynaması çalışmaları ile aynıdır. Yalnızca simülasyon öncesi “AllPrepSim.sh” (pre-processing - simülasyon öncesi) dosyası içerisinde yağın sıvı hızlarının maksimum değerleri ve kanal yüksekliği 5 milimetre olacak şekilde tanımlanmıştır.

### 7.3 Düz Bir Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması Simülasyonları

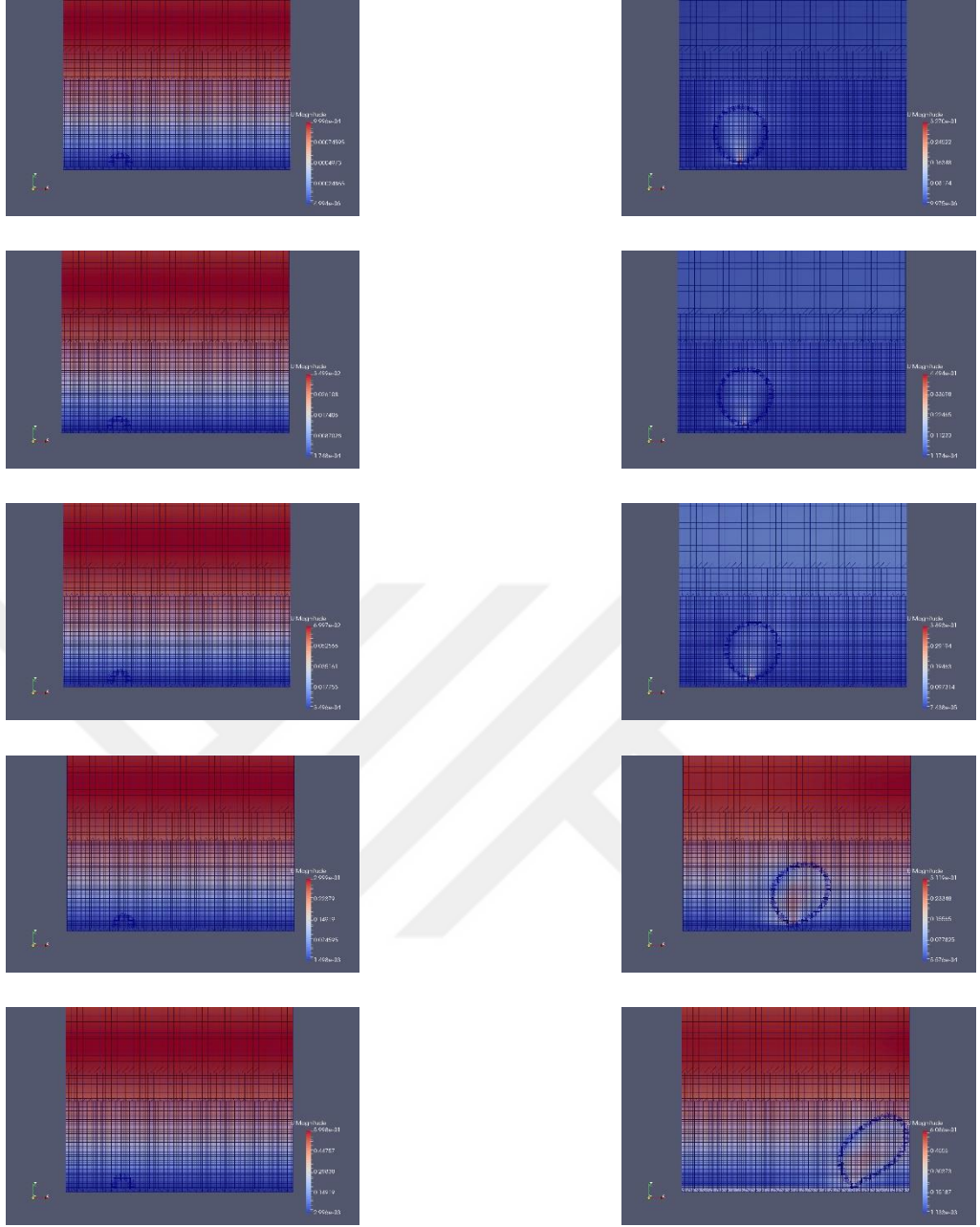
Bu bölümde farklı yağın sıvı hızlarında düz bir kanal yüzeyindeki tek kabarcıklı akış kaynaması simülasyonları gösterilmiştir.



Şekil 7.3 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarında kabarcık gelişimleri



Şekil 7.4 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarında sıcaklık dağılımları



Şekil 7.5 Düz bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarında hız dağılımları

#### 7.4 Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde sabit yerçekimi büyüklüğünde ve farklı yağın sıvı hızlarında gerçekleştirilen akış kaynaması çalışmaları için kabarcıkların yüzeyden ayrıldığı zaman dilimleri ve kabarcıkların ayrılma çapları karşılaştırılmıştır. Literatürde Kunkelmann [1] ve Ding Li [7] akış kaynaması çalışmalarında düz bir yüzeyde farklı yağın sıvı hızlarında aşırı soğutulmuş yağın sıvı sıcaklıkları için gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca benzer çalışmalar bu tez çalışmasına



geçmese de simülasyon olarak yürütülmüştür. Aşırı soğutulmuş yağın sıvı için yapılan çalışmaların sonucunda literatürdeki çalışmalar ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aşırı soğutulmuş sıvılarda yapılan çalışmaların neticesinde yağın sıvı hızı arttıkça kabarcığın yüzeyden daha erken ayrıldığı ve kabarcık ayrılma çapının azaldığı görülmüştür. Aynı çalışmalar bu tez çalışmasında olduğu gibi aşırı kızdırılmış sıvı durumunda yürütülmüştür. Aşırı soğutulmuş sıvıda farklı hızlarda yapılan çalışmaların aksine bu çalışmada yağın sıvı hız arttıkça kabarcık ayrılma süresinin ve kabarcık ayrılma çapının arttığı gözlemlenmiştir. Aşırı soğutulmuş sıvı ve kızdırılmış sıvı çalışmalarının tek ortak sonucu beklenildiği gibi yağın sıvı hızları arttıkça kabarcığın kalkışına kadar geçen sürede kabarcık tarafından yüzeyde alınan yolun artmasıdır.

Çizelge 7.1 Akış kaynamasında tüm yağın sıvı hızları için kabarcık gelişimi sonuçları

Yağın sıvı hızları (m/s)	Kabarcık başlangıç yarıçapı (milimetre)	Kabarcık ayrılma çapı (milimetre)	Kabarcık ayrılma süresi (saniye)
0,6	0,15	1,02	0,01442734
0,3	0,15	0,953	0,01381226
0,07	0,15	0,914	0,01348432
0,035	0,15	0,897	0,01337803
0,01	0,15	0,875	0,01318347
0	0,15	0,5	0,0081703

Yağın sıvı hızının olmadığı (0 m/s) son veri  $1g_d$  sabit yerçekimi ivmesinde gerçekleştirilen havuz kaynaması çalışmasından alınmıştır. Havuz kaynaması çalışmalarının genel sonucu olarak yerçekimi ivmesinin azalması kabarcık ayrılma süresini ve kabarcık ayrılma çapını arttırmaktadır. Bu çalışma da son havuz kaynamasından alınan veri ile diğer veriler karşılaştırıldığında yağın sıvının bir hıza sahip olması ve bu hız değerinin artması yerçekimi

ivmesinin kabarcık gelişimi üzerindeki etkisini azaltmaktadır. Yığın sıvı hızının olmadığı (0 m/s) verileri ile yığın sıvı hızının maksimum olduğu (0,6 m/s) verileri karşılaştırıldığında, aynı yerçekimi ivmesinde yapılan simülasyonlarda yığın sıvı hızının yerçekimi ivmesinin etkisini azalttığı açıkça görülebilir.

Kabarcık çevrimi esnasındaki en yüksek sıcaklık değerleri kontak hattı civarında ve kabarcığın yüzey ile temas ettiği noktalarda elde edilmiştir.

Kabarcık çevrimi esnasında en yüksek hız değerlerine ilerleyen (kabarcık gelişim periyodu) ve gerileyen kontak hattı (kabarcık ayrılma periyodu) ile birlikte kontak hattı civarında elde edilmiştir. Kabarcık ayrılması esnasında kabarcık yüzeyden koparken en yüksek hız değerleri kabarcığın hemen alt bölgesinde elde edilmiştir.

Kabarcığın ilk durumu ile son durumu arasında yapılan ısı transferi hızı ve kütle transferi hızı verileri Ek B' de verilmiştir. Tam bir kabarcık çevrimi esnasında ısı ve kütle transferi hızları değerleri belirlenen zaman anlarında hesaplanmıştır. Kontak hattı ve geçiş bölgesi transferi hızı değerleri kabarcık çevriminde önce düşük değerlerde elde edilmiş ilerleyen zamanla birlikte en yüksek değerlerine ulaşmış ve kabarcık ayrılması sırasında tekrar düşüş göstermişlerdir. Katı-sıvı bölgeler arasındaki ısı transferi hızı ve toplam ısı transferi hızı değerleri sıvı ile katı bölge arasındaki sıcaklık farkı azaldığı için devamlı azalma göstermiştir. Elde edilen kütle transferi hızı değerleri ısı transferi hızı değerleri ile paralel bir davranış sergilemiştir.

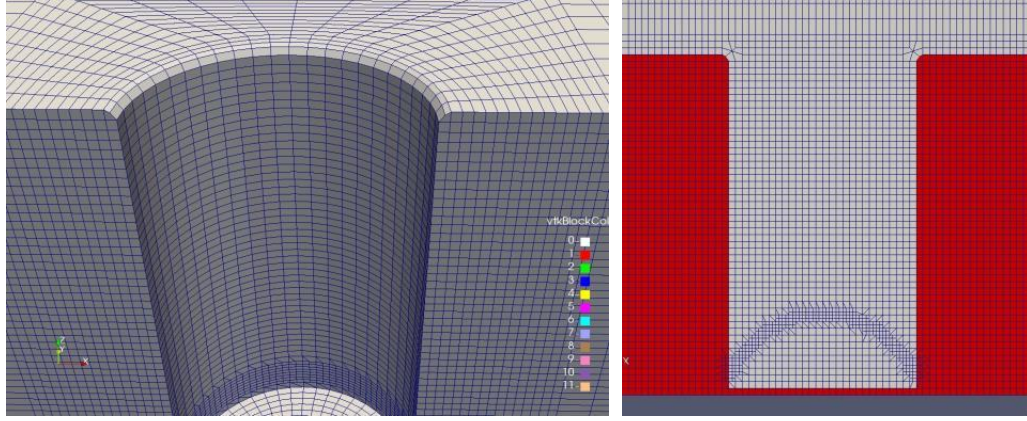
### OYUKLU BİR KANAL YÜZEYİNDEKİ AKIŞ KAYNAMASI

#### 8.1 Oyuklu Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması

Bu bölümde düz bir kanal yüzeyindeki kabarcıklı akış kaynamasında tek bir kabarcığın sabit dünya yerçekimi ivmesinde ve 10 m/s yağın sıvı hızlarında 10 Kelvin aşırı kızdırılmış duvar süper sıcaklığında ve iki farklı yağın sıvı sıcaklığı durumu ve farklı oyuk derinlikleri için incelenmiştir. Yağın sıvı sıcaklıkları 5 Kelvin aşırı kızdırılmış ve doymuş kaynama sıcaklığında seçilmiştir. Yağın sıvı hızlarının kanal ortasındaki maksimum değeri 10 m/s'dir. Oyuk Şekil 8.1'de görüldüğü gibi yarı silindirik bir yapıda olup bütün simülasyonlar için oyuk çıkış çapı 30 mikrometredir. Simülasyonlar oyuk derinlikleri sırası ile 3, 12, 25 ve 50 mikrometre için yapılmıştır.

#### 8.2 Hesaplama Alanı ve Örgü Çözünürlüğü

Tüm simülasyonlarki sıvı bölge için hesaplama alanı aynı olup , genişlik olarak 0-0,4 milimetre, derinlik olarak 0-0,03 milimetre ve yükseklik olarak 0,026 milimetre boyutlarındadır. Havuz kaynaması ve düz bir yüzeydeki akış kaynaması simülasyonlarından farklı olarak bu çalışma mikrometre boyutunda gerçekleştirilmiştir. Geometrilerde herhangi bir statik örgü iyileştirilmesi kullanılmamıştır. Dinamik örgü iyileştirmesi sıvı-buhar ara yüzeyinde 1. derece olarak uygulanmıştır. Sonuç olarak geometrideki en iyi örgü çözünürlüğü sıvı-buhar ara yüzeyinde 0.25 mikrometre olarak ve en kaba örgü çözünürlüğü 5 mikrometre olarak elde edilmiştir.



Şekil 8.1 Oyuklu bir yüzeye sahip kanalda, kanal içerisindeki akış kaynaması çalışmalarındaki oyuk geometrisi ve yapısal olmayan örgü

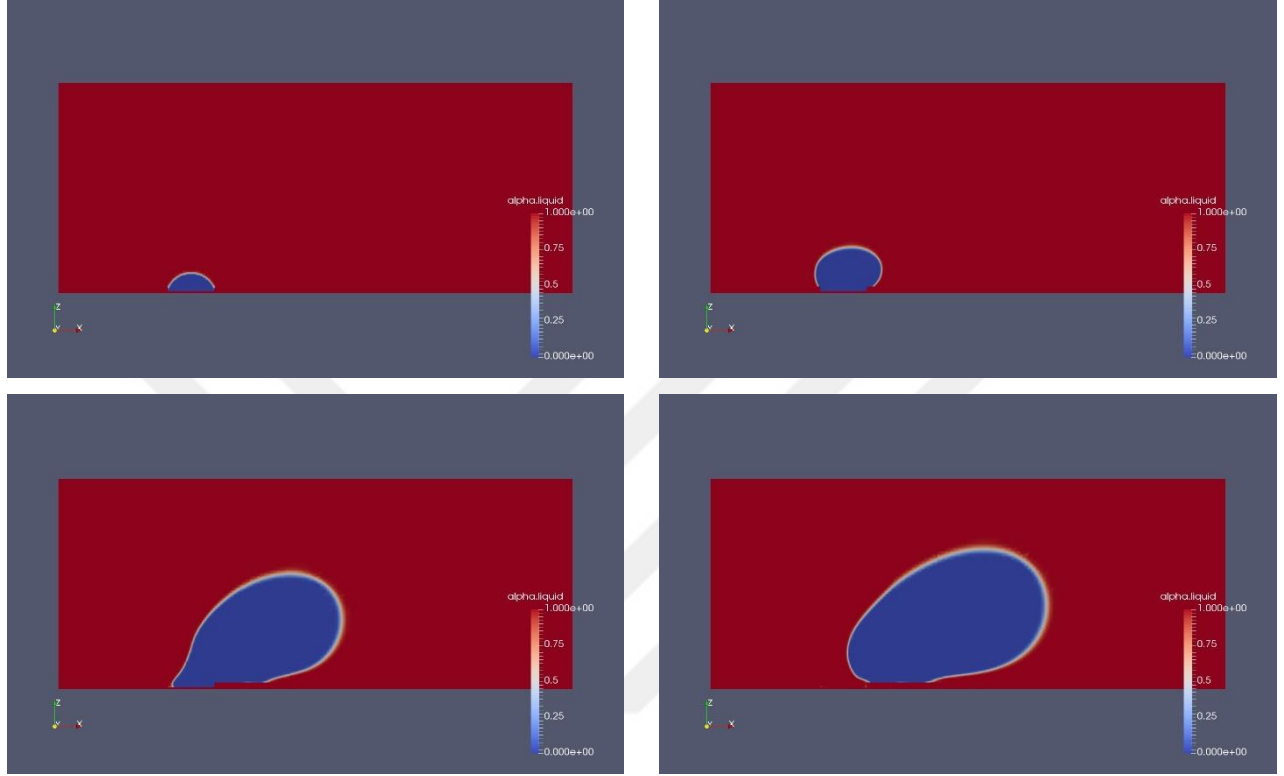
Burada bahsedilmesi gereken 2 önemli kriter bulunmaktadır. İlk olarak oyukun en üst kısmında katı geometride 1 mikrometre büyüklüğünde pah tanımlanmıştır. İkinci olarak pah ile örtüşen sıvı geometrisinde ve pah yüzeyinde aynı yüzey çizgisini paylaşan yapısal olmayan örgü çözünürlüğü tanımlanmıştır. Her iki yapının sebebi de kontak hattının bu bölgeden yumuşak şekilde geçmesi ve dinamik örgü çözünürlüğünün bu bölgede iyi bir şekilde uygulanabilmesidir. Simülasyonlarda kullanılan her oyuk için final geometrileri belirli sebepler doğrultusunda on beş geometriden fazla geometrinin oluşturulup birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Bunların başındaki sebeplerden birkaçı; yukarıda bahsedilen belirli kriterlerin uygulanmak zorunda olması, OPENFOAM'ın adaptif örgü iyileştirmesinin üçgensel örgülerde iyileştirme yapmaması, OPENFAOM'ın "blockMesh" uygulaması içerisindeki hatalar, tanımlanmamış "defaultFaces" yüzeylerin simülasyon sırasında boş yüzey olarak görülmesi, yapısal olmayan örgü yüzeylerinin tanımlansa dahi tanımlanmamış olarak görülmesi, final geometrisindeki herhangi bir hatanın (nonorthogonality, small volume ratio vb.) simülasyonun sonuçlarında çok büyük etki oluşturması gibi nedenler birçok nedenler arasında başı çekmektedir. Geometrilere örgülerin oyuktan uzaklaştıkça büyümesini sağlayan "simpleGrading" uygulaması kullanılmıştır.

### 8.3 Oyuklu Kanal Yüzeyindeki Akış Kaynaması Simülasyonları

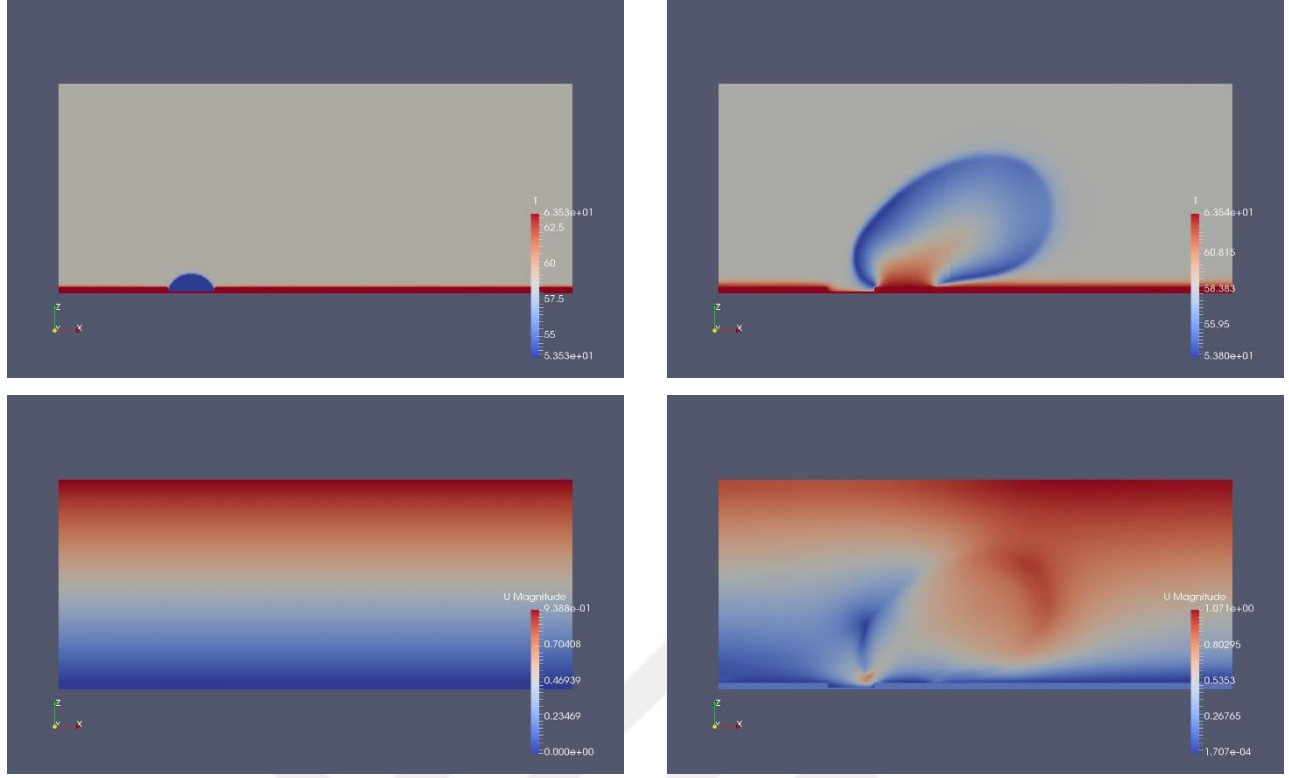
Bu bölümde farklı oyuk derinliklerinde ve farklı yığın sıvı sıcaklıklarında yapılan simülasyonlar gösterilmiştir.

### 8.3.1 3 Mikrometre Derinlikteki Oyukta Akış Kaynaması Simülasyonları

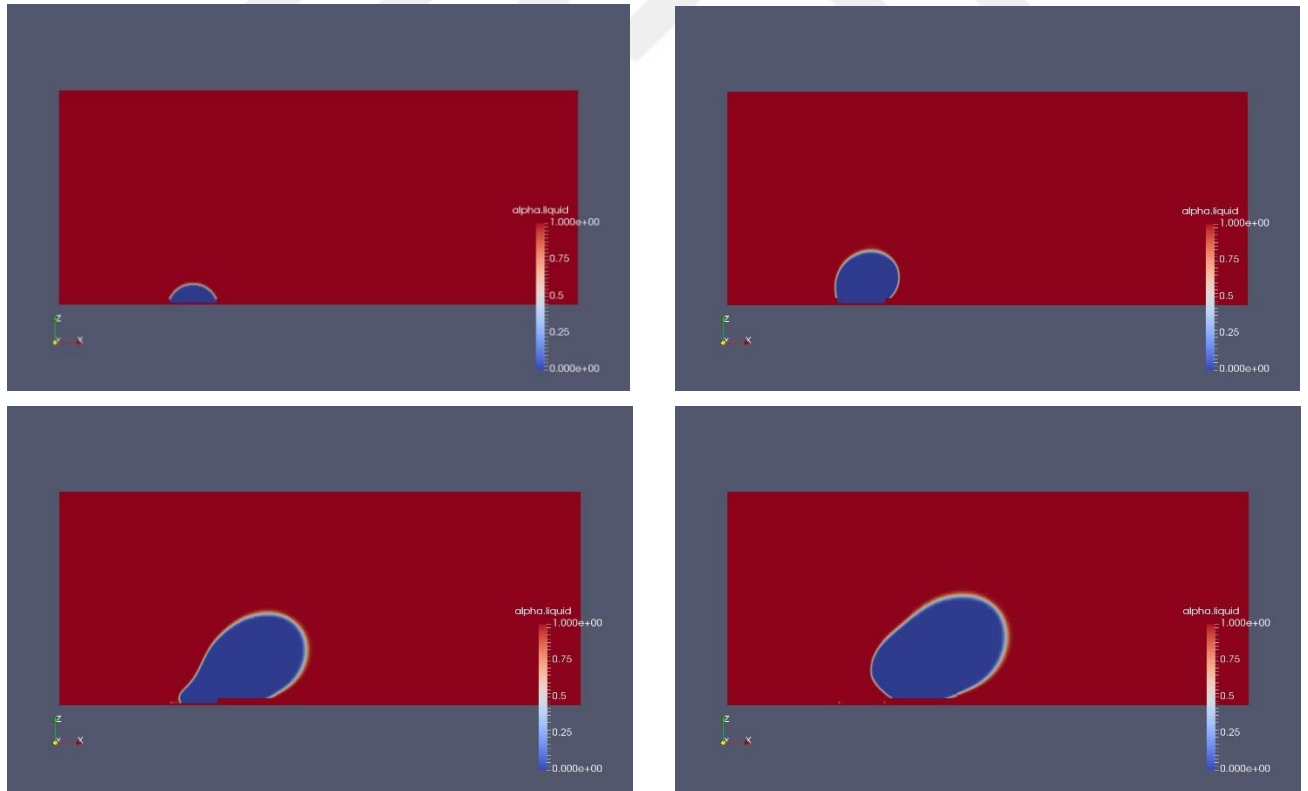
Bu bölümde 3 mikrometre derinlikteki oyukta gerçekleşen FC-72 sıvısının akış kaynaması simülasyonları her iki yığın sıvı sıcaklığı durumu için belirli aralıklardaki kabarcık gelişimi ile kabarcığın başlangıç ve ayrılma durumlarındaki sıcaklık ve hız değişimleri verilmiştir.



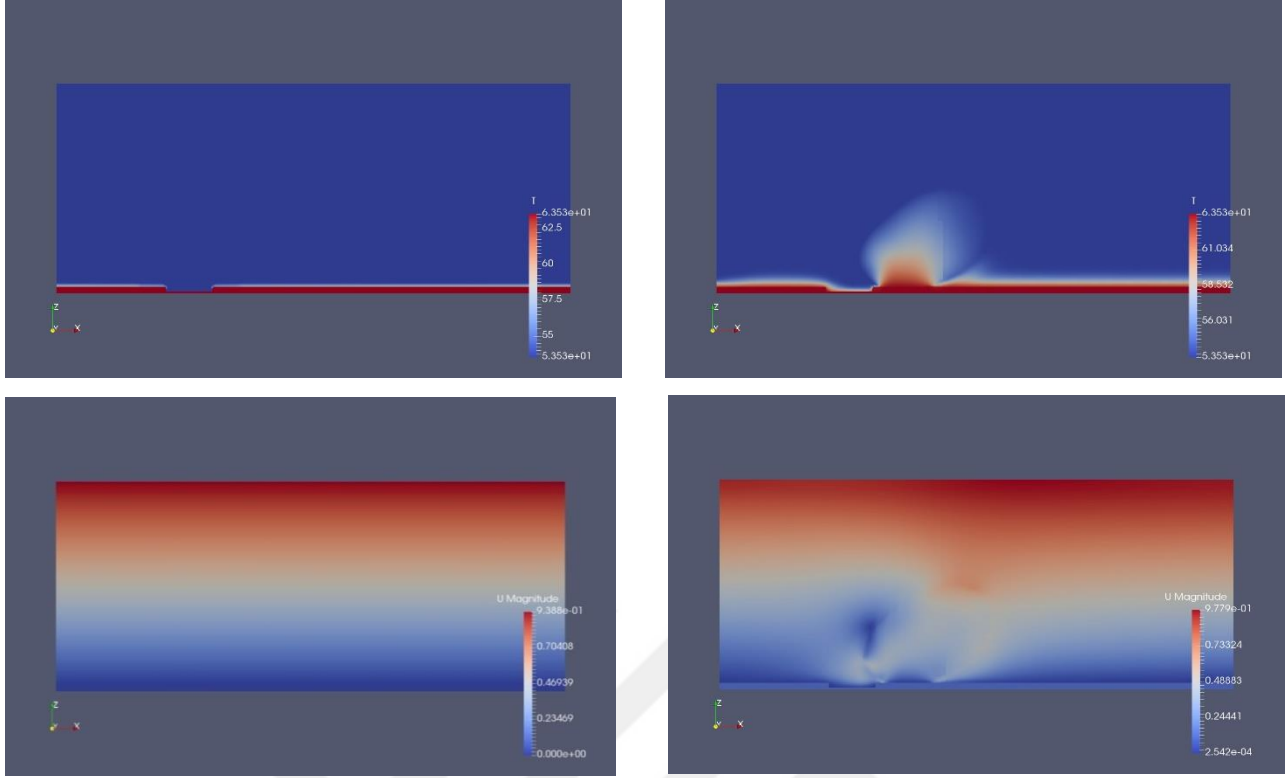
Şekil 8.2 3 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi



Şekil 8.3 3 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları



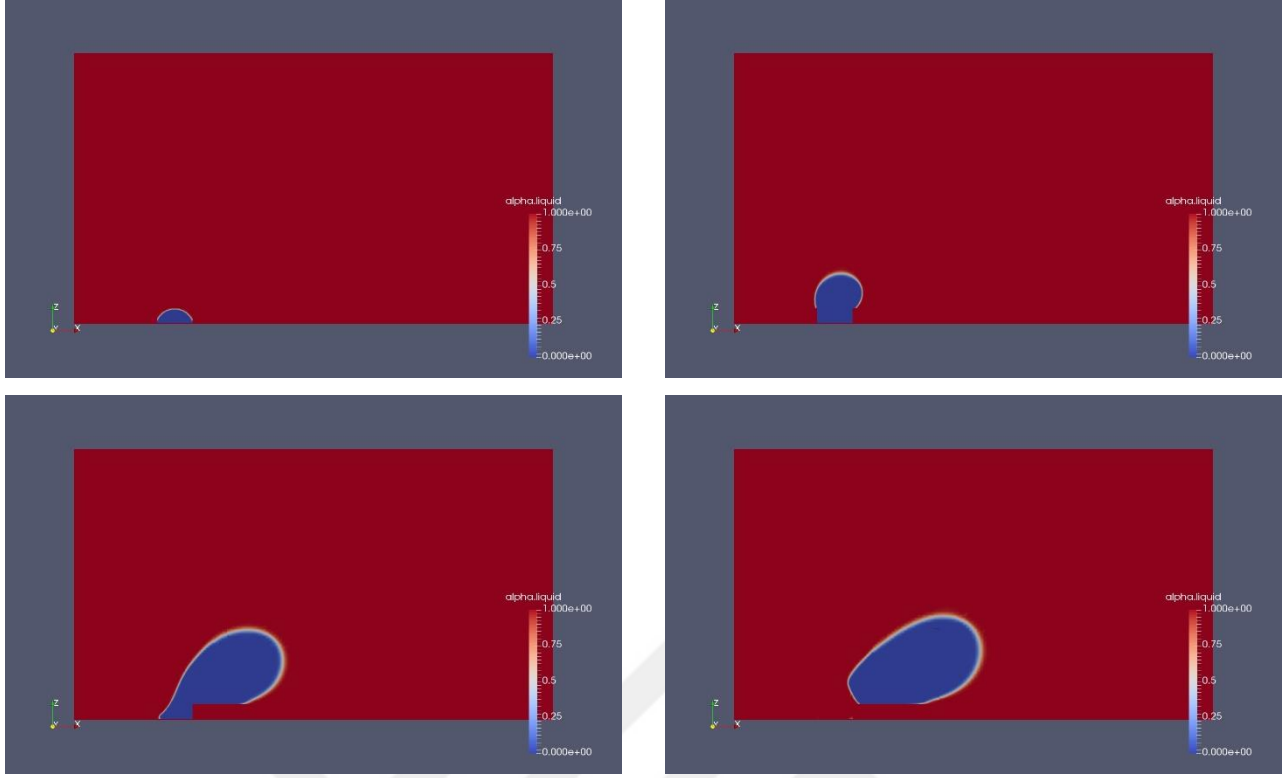
Şekil 8.4 3 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi



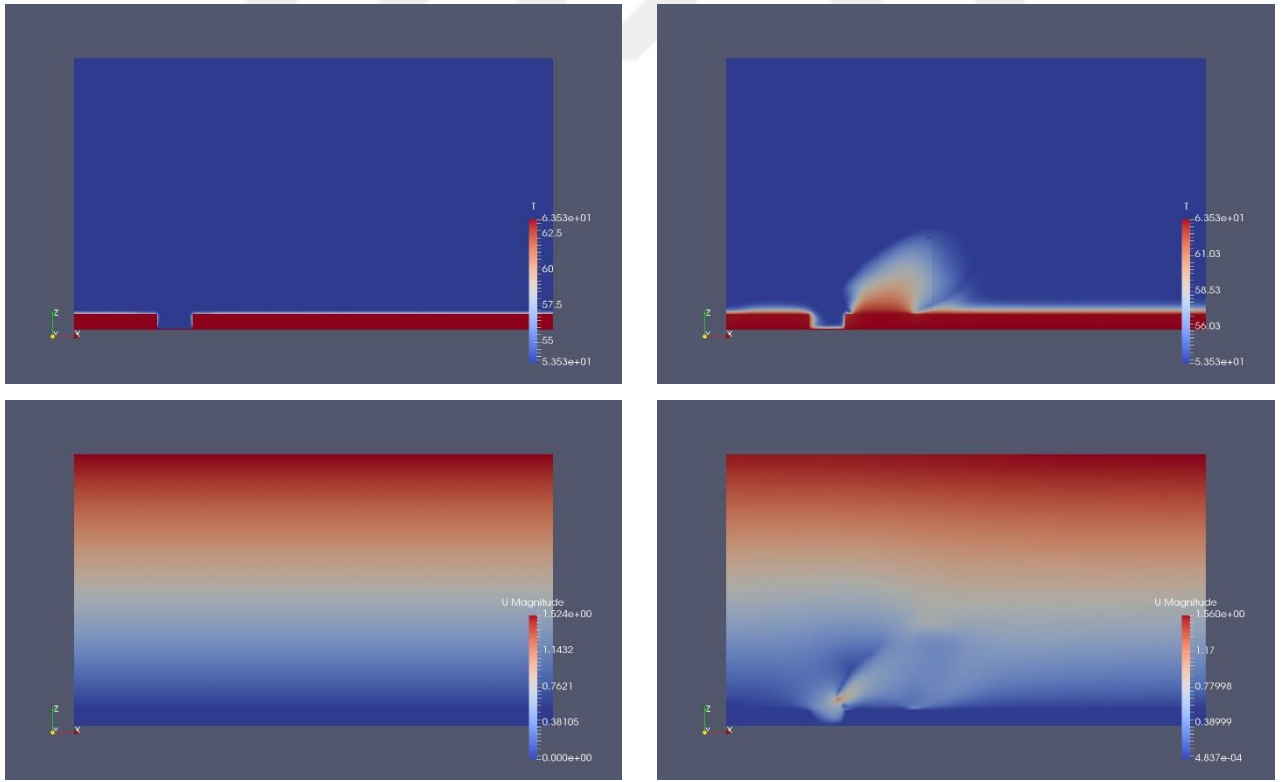
Şekil 8.5 3 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları

### 8.3.2 12 Mikrometrelik Oyuk için Akış Kaynaması Simülasyonları

Bu bölümde 12 mikrometre derinlikteki oyukta FC-72 sıvısının gerçekleşen akış kaynaması simülasyonları aşırı kızdırılmış (5K) yığın sıvı sıcaklığı durumu için ve doymuş kaynama sıcaklığındaki sıvı durumu için belirli aralıklardaki kabarcık gelişimi ile kabarcığın başlangıç ve ayrılma durumlarındaki sıcaklık ve hız değişimleri verilmiştir.

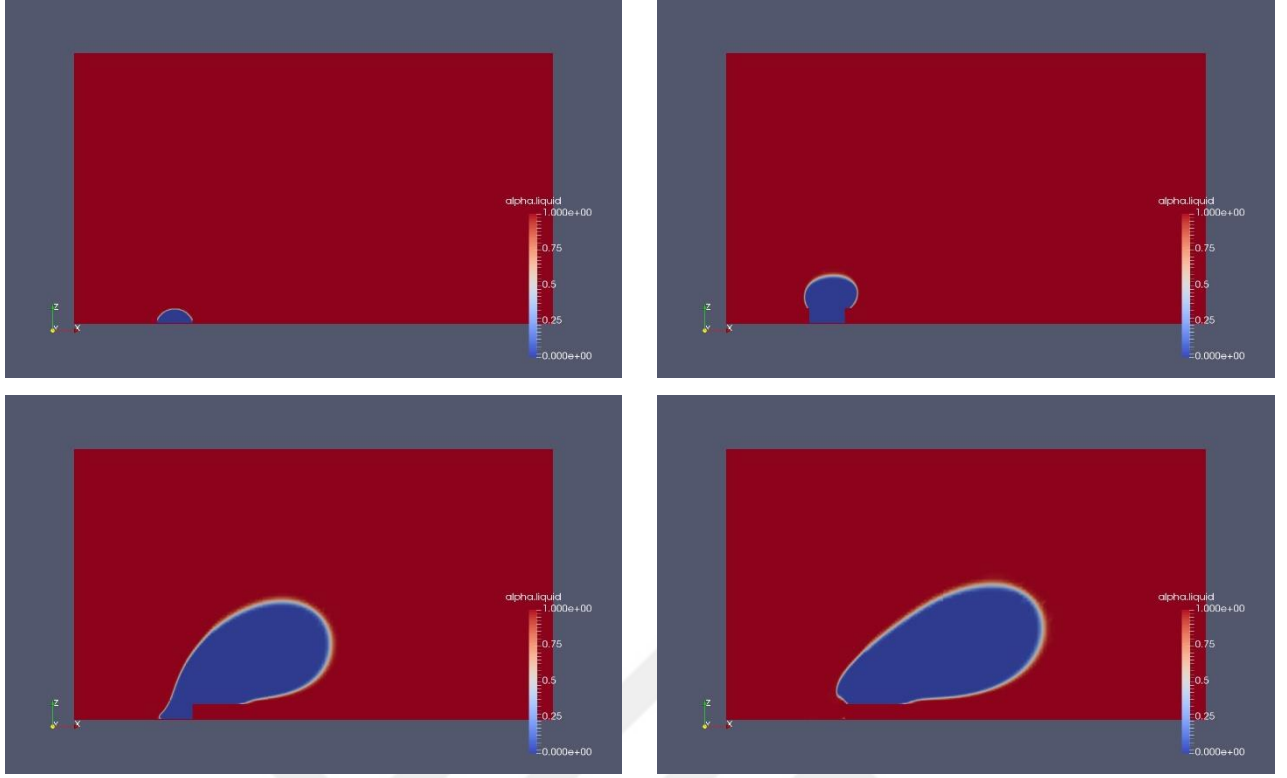


Şekil 8.6 12 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi

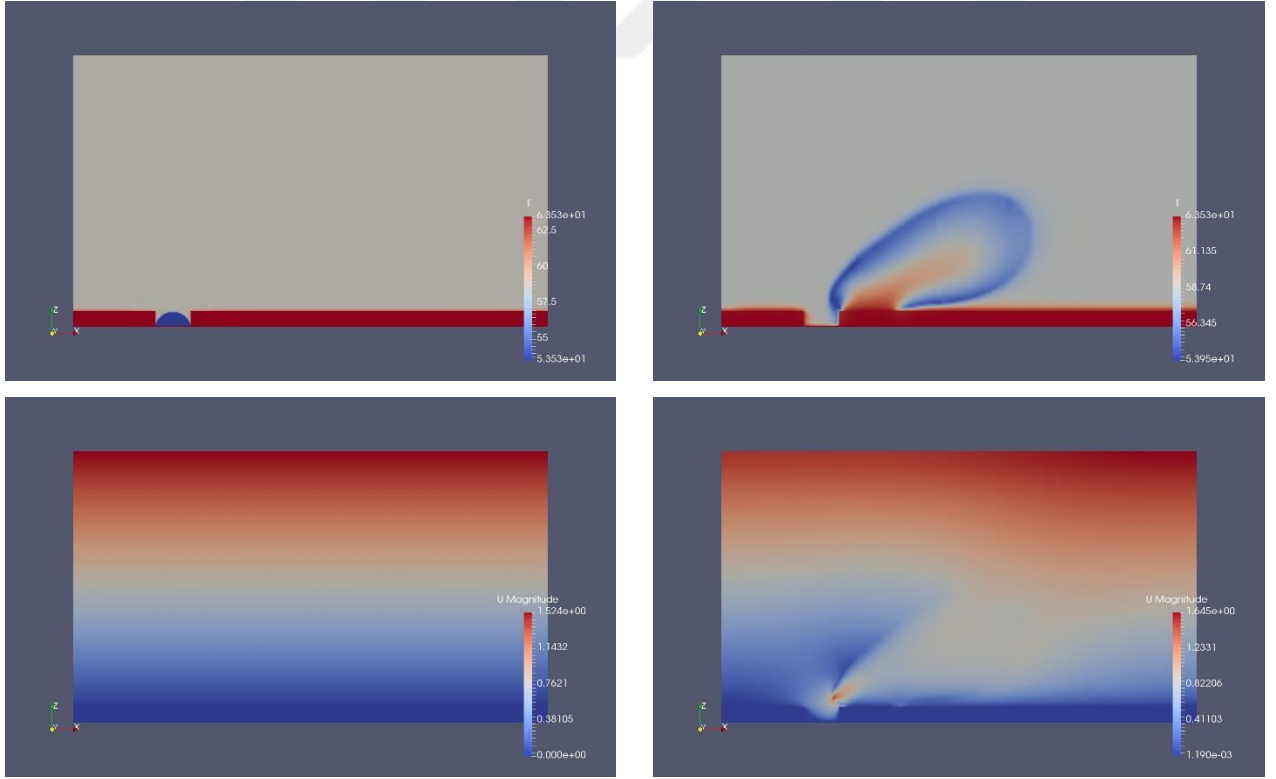


Şekil 8.7 12 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımı





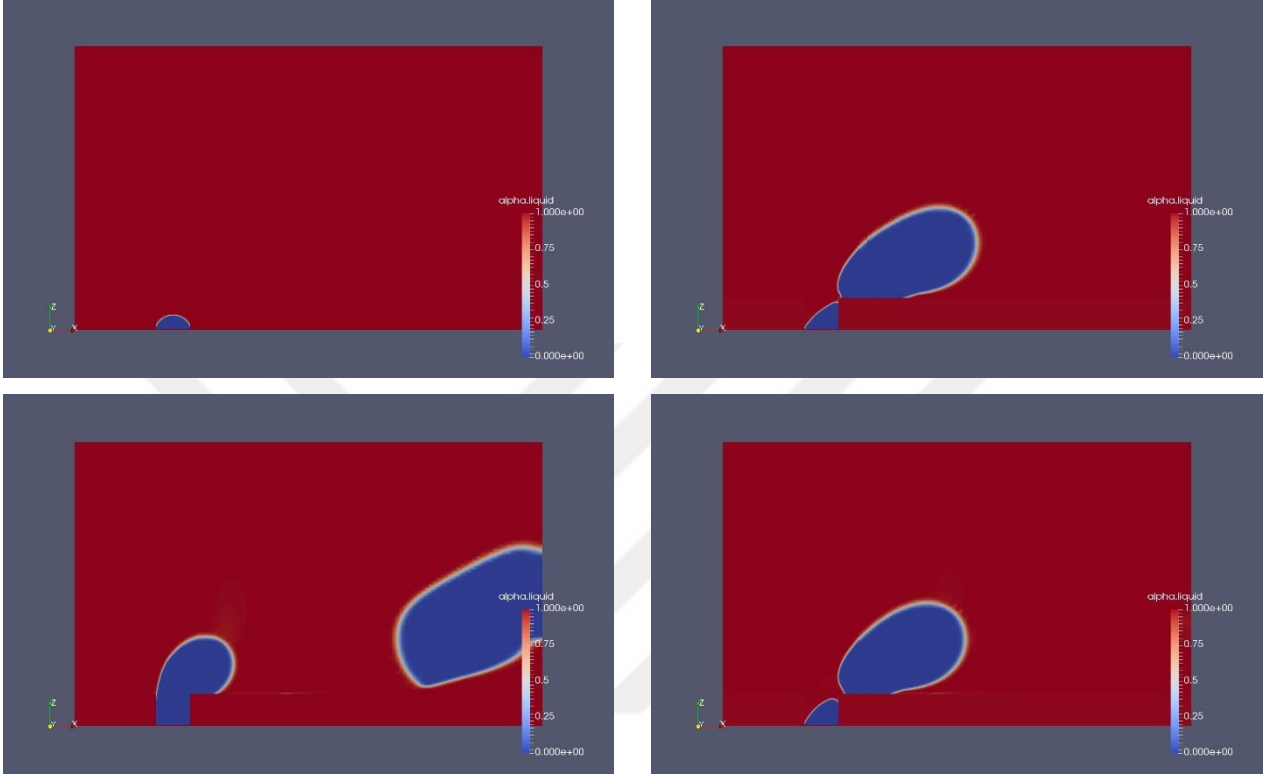
Şekil 8.8 12 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevrimi



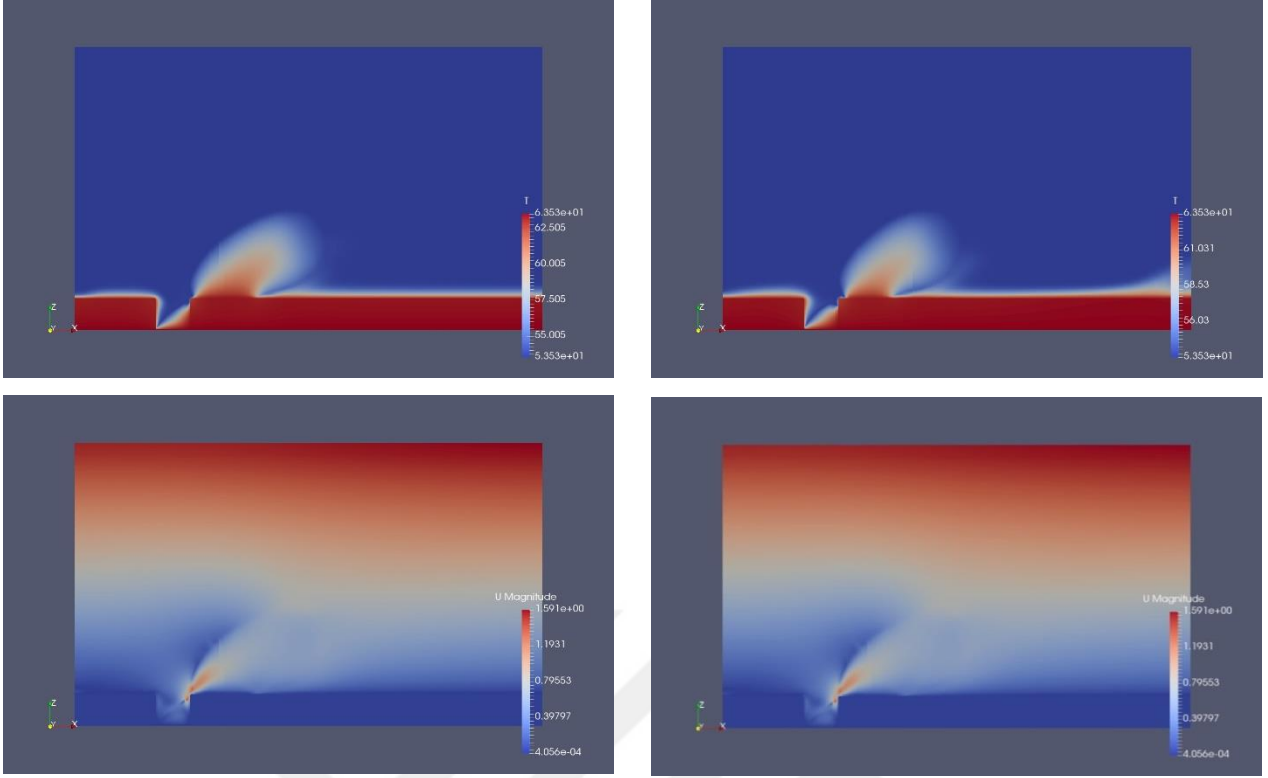
Şekil 8.9 12 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde tam bir kabarcık çevriminde sıcaklık ve hız dağılımları

### 8.3.3 25 Mikrometrelik Oyuk için Akış Kaynaması Simülasyonları

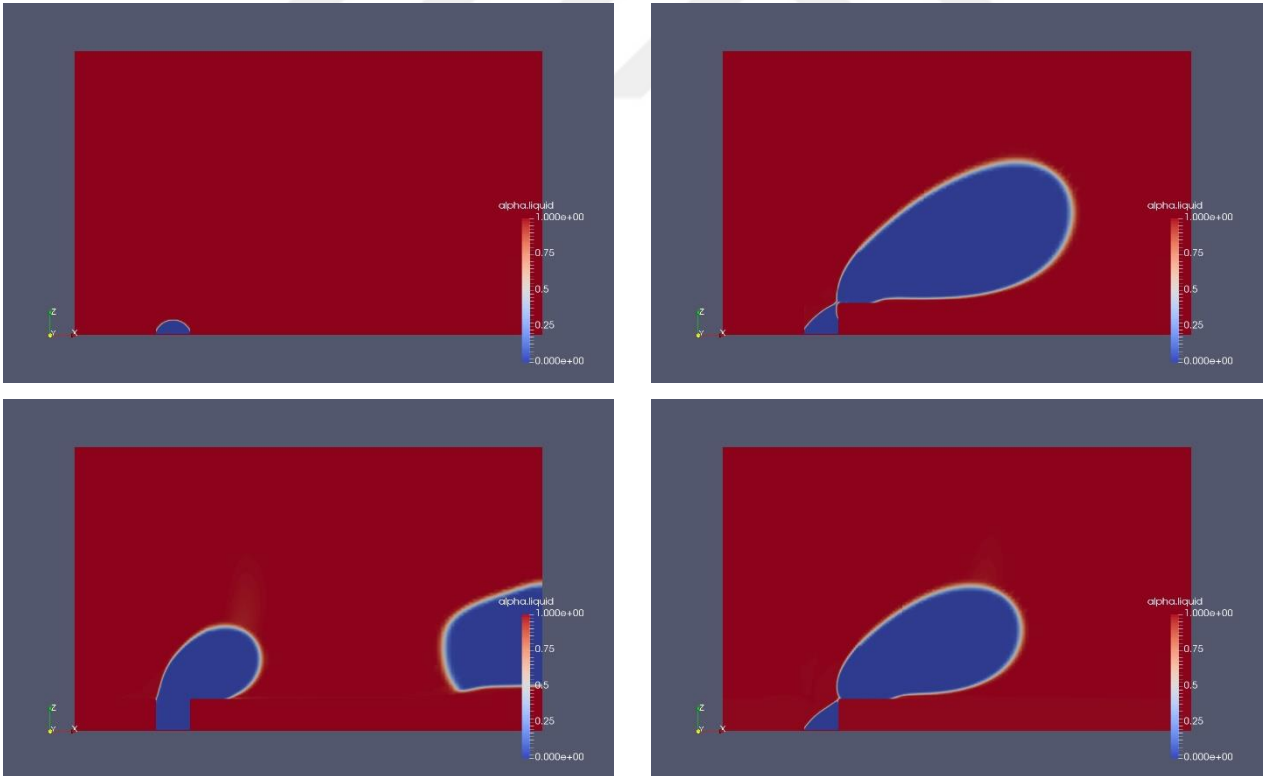
Bu bölümde 25 mikrometre derinlikteki oyukta gerçekleşen akış kaynaması simülasyonları her iki yığın sıvı sıcaklığı durumu için belirli aralıklardaki kabarcık gelişimi ile kabarcığın başlangıç ve ayrılma durumlarındaki sıcaklık ve hız değişimleri verilmiştir.



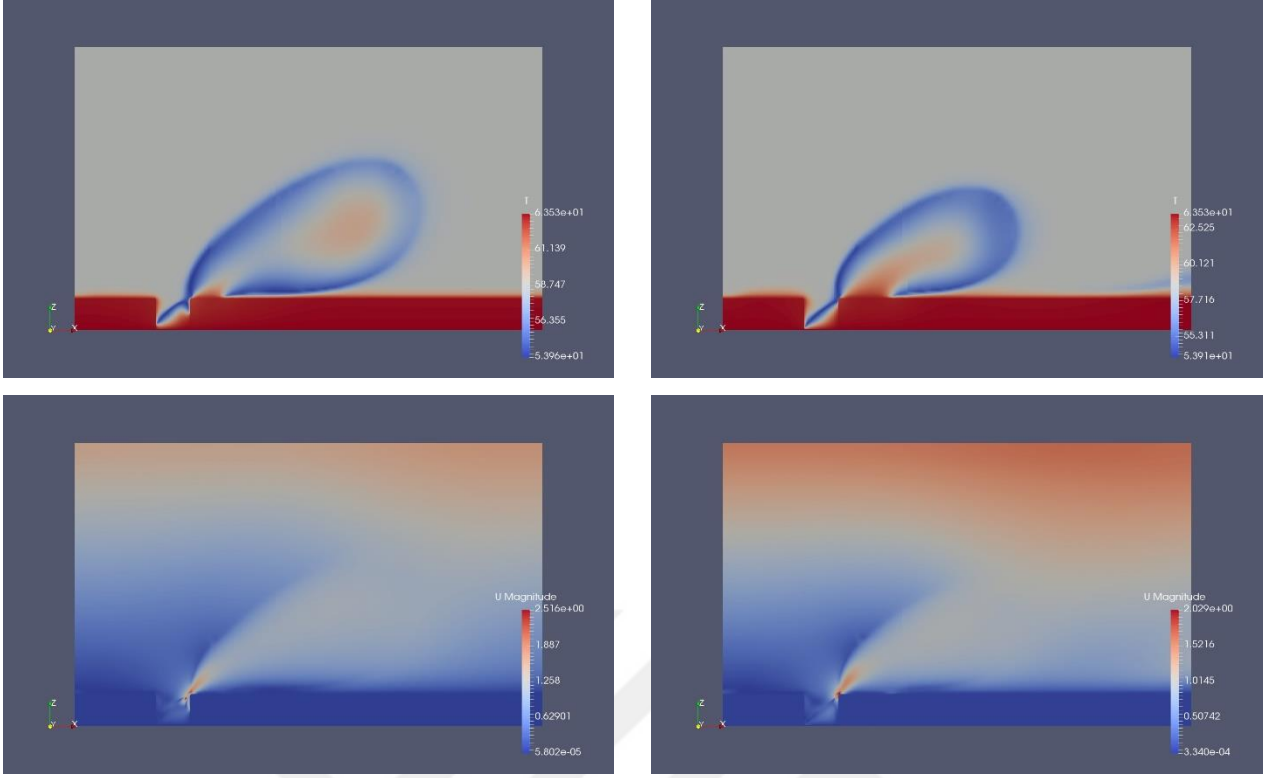
Şekil 8.10 25 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi



Şekil 8.11 25 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevriminde sıcaklık ve hız dağılımları



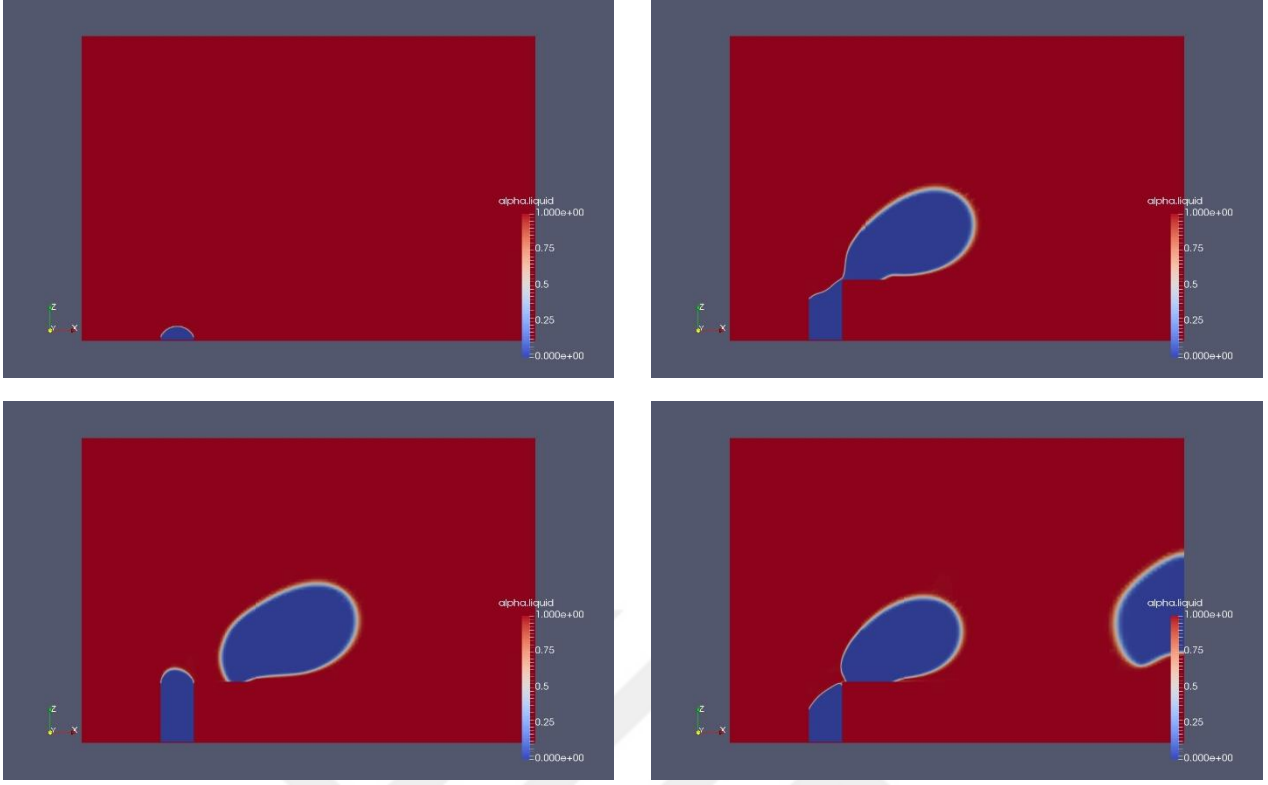
Şekil 8.12 25 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi



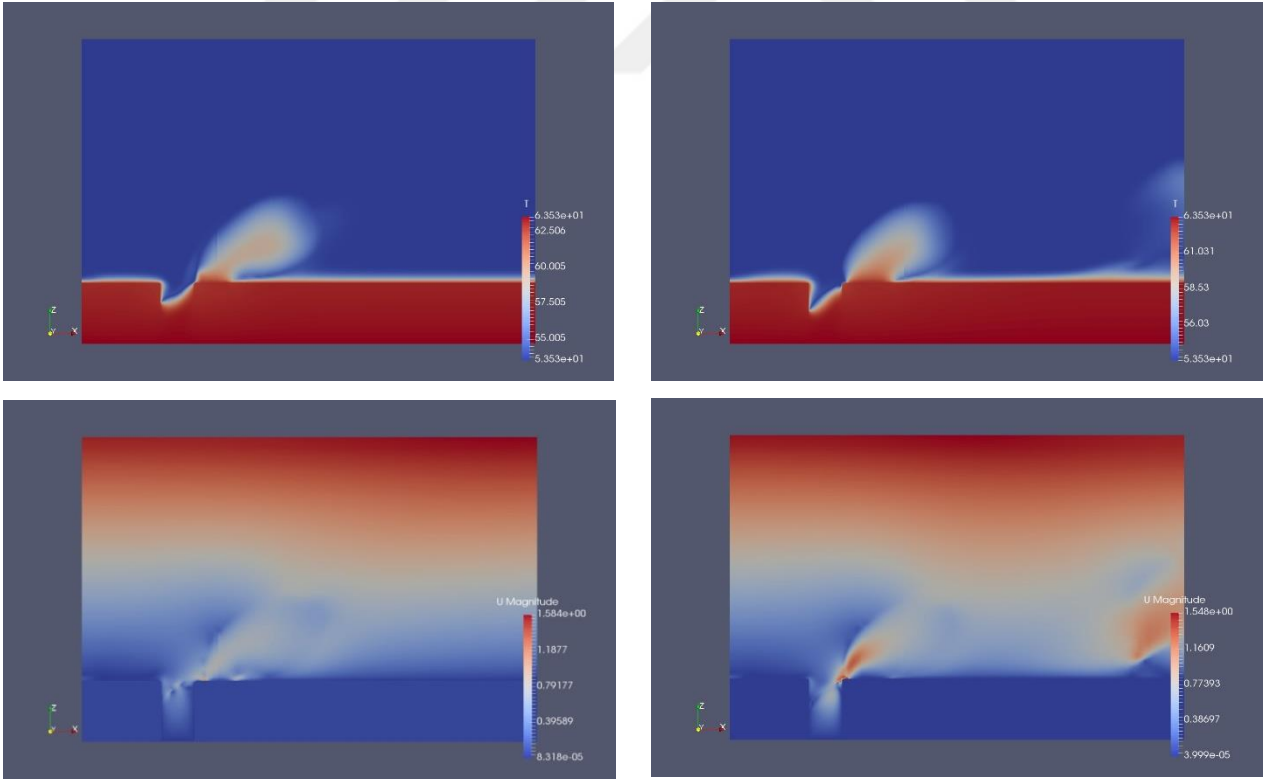
Şekil 8.13 25 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi için sıcaklık ve hız dağılımları

### 8.3.4 50 Mikrometrelik Oyuk için Akış Kaynaması Simülasyonları

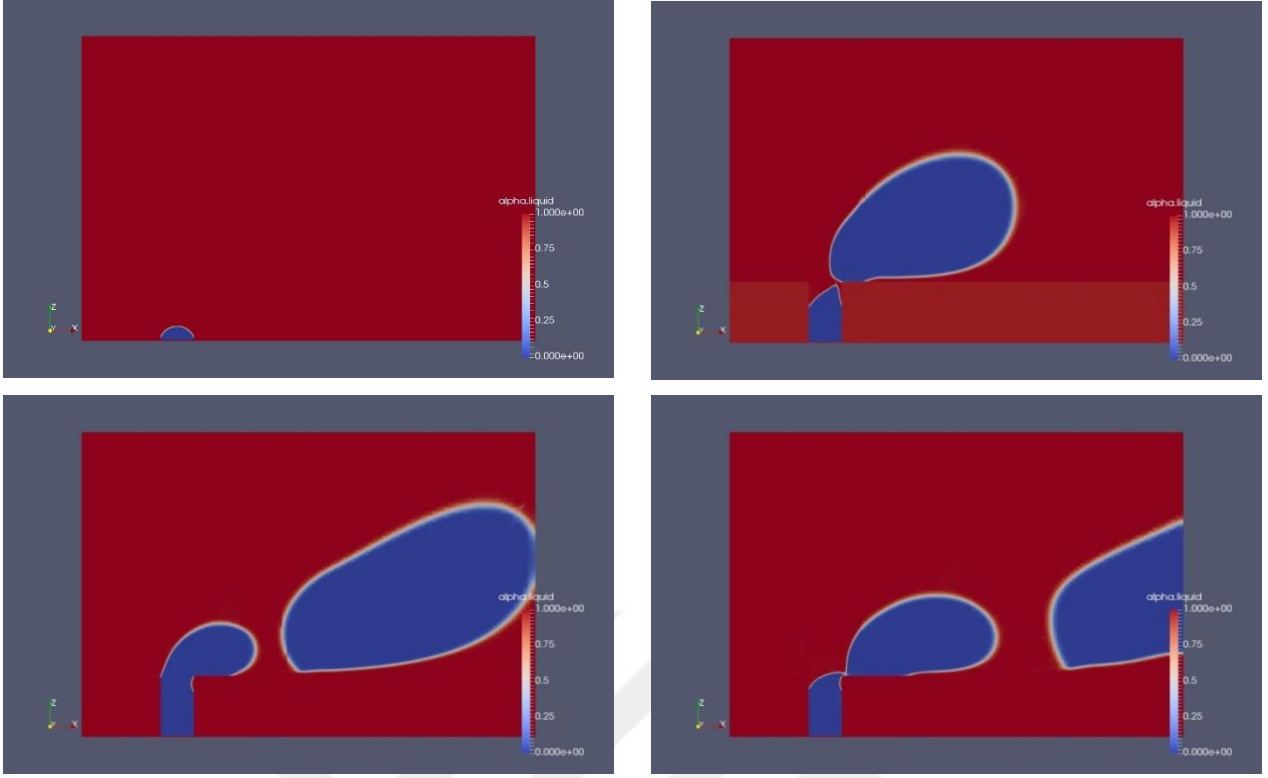
Bu bölümde 50 mikrometre derinlikteki oyukta gerçekleşen FC-72 sıvısının akış kaynaması simülasyonları her iki yığın sıvı sıcaklığı durumu için belirli aralıklardaki kabarcık gelişimi ile kabarcığın başlangıç ve ayrılma durumlarındaki sıcaklık ve hız değişimleri verilmiştir.



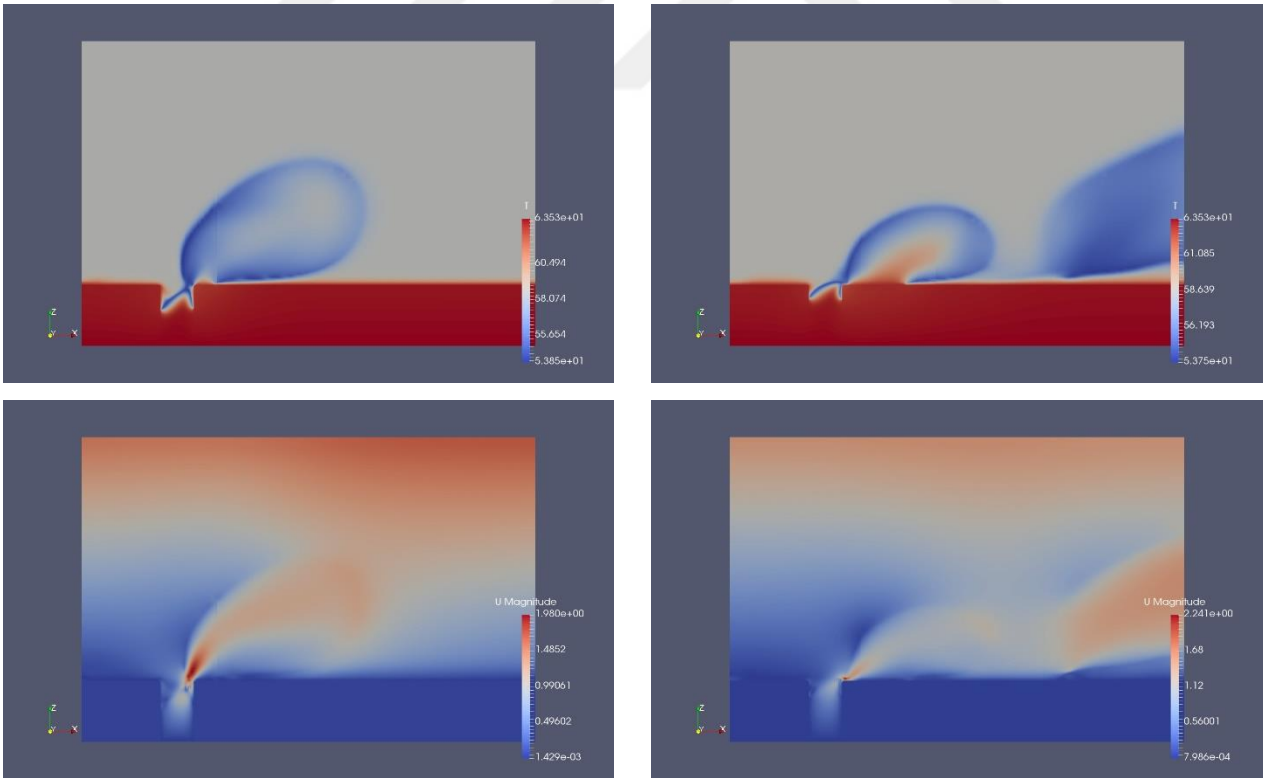
Şekil 8.14 50 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi



Şekil 8.15 50 mikrometre derinlikteki oyukta kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevriminde sıcaklık ve hız dağılımları



Şekil 8.16 50 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevrimi



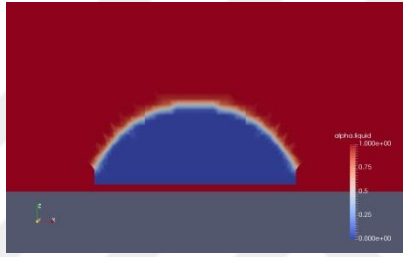
Şekil 8.17 50 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisinde periyodik kabarcık çevriminde sıcaklık ve hız değişimleri

## 8.4 Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde ilk olarak kabarcıkların oyuk içerisindeki hareketleri yani diğer bir deyişle gerçek kabarcıklanma bölgesindeki gelişim süreçleri incelenecektir.

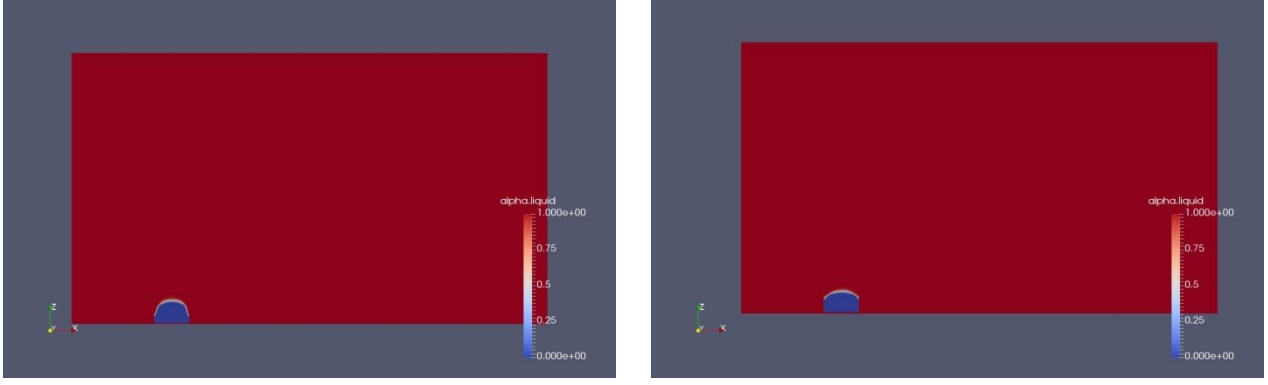
### 8.4.1 Kabarcıkların Oyuklar İçerisindeki Gelişimleri

Üç mikrometre oyuk derinliğindeki simülasyonlarda oyuk derinliği yeterince büyük olmadığı için diğer bir deyiş ile neredeyse düz bir yüzey olduğu için ve simülasyonun başlangıç aşamasında kabarcık yarıçapı 15 mikrometre tanımlandığı için kabarcık ayakları başlangıç aşamasında pah kenarlarındadır. Bu sebep ile kabarcığın oyuk içerisindeki gelişim süreci her iki sıvı sıcaklığında da aynı kabul edilebilir.



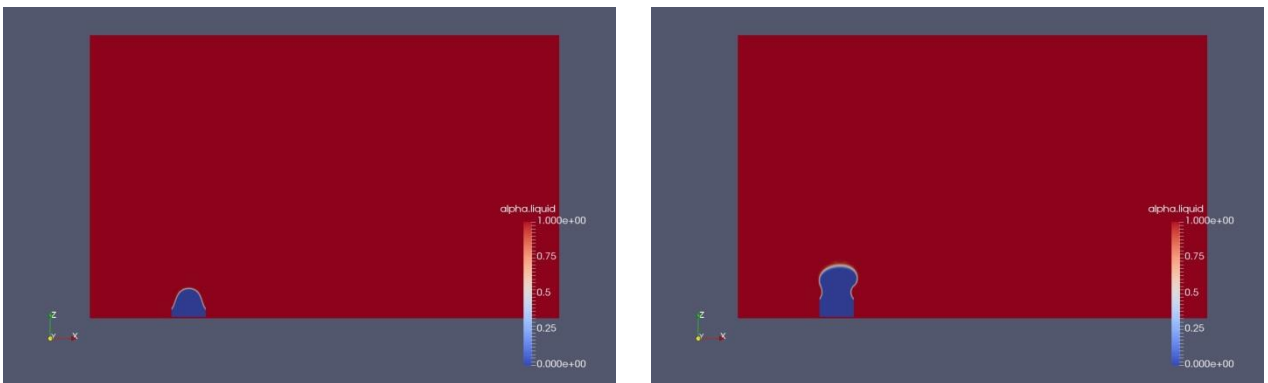
Şekil 8.18 3 Mikrometre derinlikteki oyukta kabarcık başlangıcı

On iki mikrometre oyuk derinliğindeki simülasyonlarda oyuk içerisindeki kabarcık gelişimine bakıldığında aşırı kızdırılmış (5K) yığın sıvı durumundaki kabarcık gelişimi esnasında kabarcığın üst kısmının kabarcığın oyuk duvarları ile bağlantısı olan kabarcık ayaklarına göre çok daha hızlı geliştiği gözlemlenmiştir. Kaynama sıcaklığındaki sıvı durumunda ise kabarcık ayakları ve kabarcık üst kısmının gelişiminin orantılı olduğu elde edilmiştir. Bu durumun sebebi ise tahmin edildiği gibi ilk durumdaki buharlaşma oranının daha yüksek oluşudur.



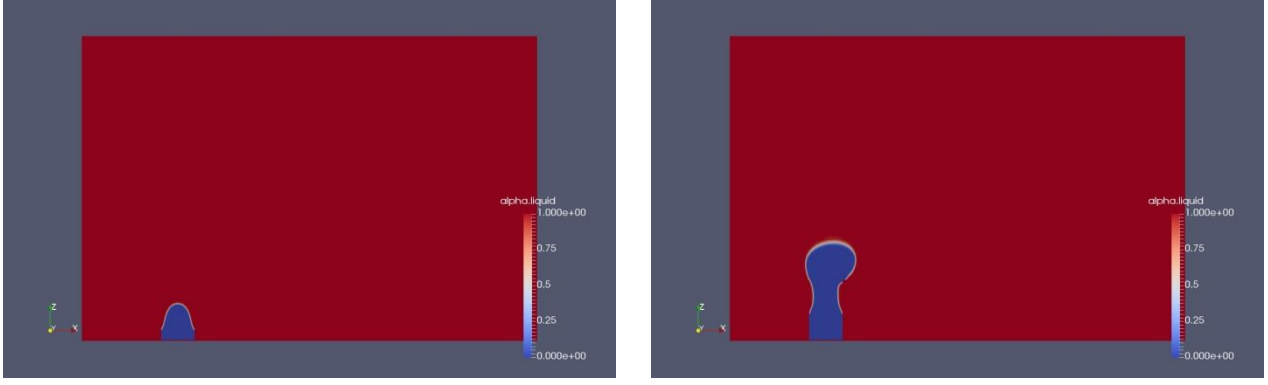
Şekil 8.19 12 mikrometre derinlikteki oyukta, aşırı kızdırılmış sıvı (sol) ve kaynama sıcaklığındaki sıvı (sağ) için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi

25 ve 50 mikrometrelik çalışmalarda kabarcığın oyuk içerisindeki gelişimleri biraz daha farklıdır. 25 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış sıvı durumu için kabarcığın üst kısmı başlangıçtan oyuk üst kısmına çıkana kadar on iki mikrometre derinliğe sahip oyuk durumuna göre daha hızlı gelişmiştir. Kabarcık üst noktası oyuk üst noktasına eriştiğinde kabarcık genişlemeye başlamıştır. Kabarcığın genişlemeye başladığı noktalar pahların olduğu seviyeye denk gelmektedir. Genişleyen ve hızla büyüyen kabarcık ile gelişimi daha az bir hızla devam eden oyuk içerisindeki kabarcık ayakları arasında "bottleneck" ya da boğaz olarak adlandırabileceğimiz bir yapı oluşumu gözlemlenmiştir. 25 mikrometre için geçerli olan bu gelişim sürecinin daha belirgin bir biçimi 50 mikrometre derinlikteki oyukta aşırı kızdırılmış sıvı durumu için daha belirgin olarak gözlemlenmiştir.



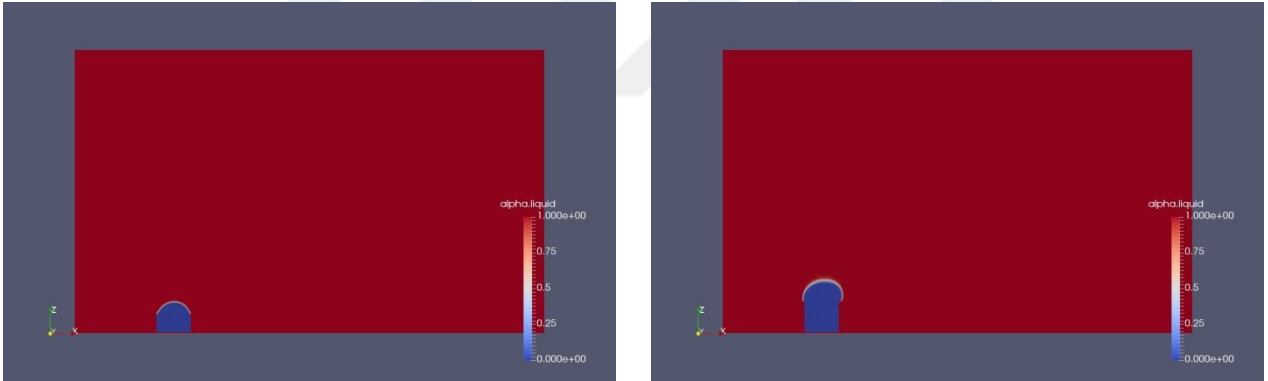
Şekil 8.20 25 mikrometre derinlikteki oyukta, aşırı kızdırılmış sıvı (5K) için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi



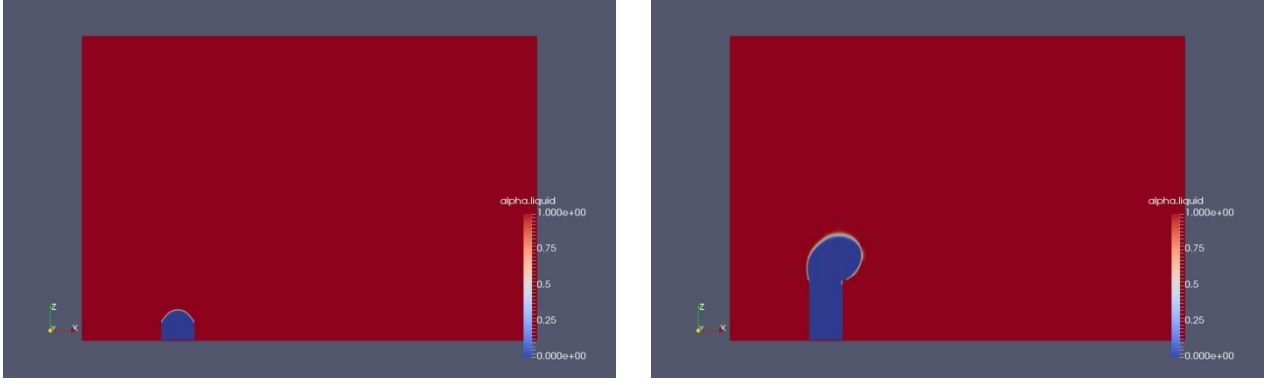


Şekil 8.21 50 mikrometre derinlikteki oyukta, aşırı kızdırılmış sıvı (5K) için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi

Kaynama sıcaklığındaki yığın sıvıda 25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar ile yapılan çalışmalarda aşırı kızdırılmış (5K) sıvı durumuna kıyasla kabarcık üst kısmı kabarcık ayakları ile daha orantılı bir şekilde gelişim göstermiştir. 50 mikrometrelilik oyukta çok küçük bir boğaz oluşumu elde edilse de kabarcık gelişmeye devam ettikçe gelişen kabarcık ayağı ile birlikte bu oluşum sonlanmıştır. 25 mikrometrelilik oyukta ise herhangi bir boğaz oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 8.22 25 mikrometre derinlikteki oyukta, kaynama sıcaklığındaki sıvı için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi



Şekil 8.23 50 mikrometre derinlikteki oyukta,kaynama sıcaklığındaki sıvı için oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi

#### 8.4.2 Kabarcık Kopma Sonuçları

Farklı oyuk derinliklerinde ve 2 farklı yağın sıvı sıcaklığında gerçekleştirilen FC-72 akış kaynamasında kabarcıkların ayrılma süreçleri oyuk derinliklerine göre farklılık göstermiştir.

3 ve 12 mikrometre derinliğe sahip oyuklarda her iki sıvı sıcaklığında yapılan simülasyonlar neticesinde kabarcıklar oyuğu tamamen terk etmişlerdir. Kabarcık ayrılma işleminden sonra oyuk içerisinde herhangi bir buhar fazı gözlemlenmemiştir. Bu sebep ile ilk kabarcık ayrılma işleminden sonra ikinci kabarcık için büyüme ve ayrılma süreçleri olmamıştır.

25 ve 50 mikrometre derinliğe sahip oyuklar ile aşırı kızdırılmış (5K) yağın sıvı içerisinde gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde kabarcıkların başlangıç süreçlerinden oyuğun üst kısmına kadar ki gelişim süreçleri bir önceki bölümde gösterilmiştir. Her iki durum içinde ilk kabarcıklar oyuk içerisindeki gelişimden sonra oyuk üzerinde büyümeye devam etmişlerdir. Oyuk içerisindeki kabarcık gelişimi esnasında her iki oyukta da boğaz oluşumu gözlemlenmiştir. Her iki oyuktaki ilk kabarcık kopma işlemi bu boğazın zamanla incilmesi ile gerçekleşmiştir. Her iki oyuk için de ilk kabarcıklar koptuktan sonra oyuk içerisinde bir miktar buhar fazı kalmıştır. Bu sayede kabarcık kopar kopmaz yağın sıvı sıcaklığının yüksek olması ile birlikte ikinci kabarcık gelişimleri gözlemlenmiştir. 50 mikrometre derinlikteki oyukta ikinci kabarcık kopma anında boğaz yapısı elde edilmiştir ve kabarcık yine bu noktadan kopmuştur. Ancak 25 mikrometre derinlikteki çalışmada ikinci kabarcık oluşumu ve kopma anında boğaz oluşumu gözlemlenmemiştir. Bu oyuk

için ikinci kabarcık kontak çizgisinden kopmuştur. Her iki oyuk durumu için ikinci kabarcıklar koptuktan sonra oyuklar içerisinde bir miktar buhar fazı kalmış ve üçüncü kabarcıkların büyüme süreçleri gözlemlenmiştir.

25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar ile kaynama sıcaklığında yapılan çalışmalarda birinci ve ikinci kabarcıkların kopma süreçlerinde herhangi bir boğaz oluşumu görülmemiştir. Her iki durum için de kabarcıklar kontak hatlarından kopmuşlardır.

#### 8.4.3 Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Kabarcık büyüme ve kopma süreçlerinin farklılıklarından dolayı farklı oyuk derinlikleri ile farklı sıvı sıcaklıklarında yapılan bu çalışmanın sonuçları iki bölüme ayrılarak karşılaştırılmıştır. Kabarcık büyüme kopma süreçlerindeki benzerliklerden dolayı 3 ve 12 mikrometre derinlikteki oyuklarla yapılan simülasyonlar kendi içerisinde karşılaştırılırken 25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar ile yapılan çalışmalar kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8.1 3 ve 12 mikrometre derinlikteki oyuklar için aşırı kızdırılmış sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları

Simülasyonlar (Oyuk derinlikleri) (mikrometre)	Kabarcık başlangıç yarıçapı (mikrometre)	Kabarcık kopma çapı (mikrometre)	Kabarcık kopma zamanı (saniye)	Kopma sonrası oyukta buhar fazı kaldı mı ?
3	15	123	0,000160593	Hayır
12	15	166	0,0002362	Hayır

Çizelge 8.2 3 ve 12 mikrometre derinlikteki oyuklar için kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları

Simülasyonlar (Oyuk derinlikleri) (mikrometre)	Kabarcık başlangıç yarıçapı (mikrometre)	Kabarcık kopma çapı (mikrometre)	Kabarcık kopma zamanı (saniye)	Kopma sonrası oyukta buhar fazı kaldı mı ?
3	15	83,4	0,00027826	Hayır
12	15	108	0,00033701	Hayır

3 ve 12 mikrometre ile yapılan çalışmalarda her iki yığın sıvı sıcaklığı için de kabarcık kopma çapının ve kabarcık kopma süresinin 12 mikrometre derinlikli oyukta daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki oyuk ve yığın sıvı sıcaklığı durumlarında kabarcık kopmasından sonra oyuk içerisinde buhar fazı kalmadığı için ikinci kabarcık gelişimleri gözlemlenmemiştir. Aşırı kızdırılmış (5K) sıvı içerisindeki kabarcık kopma süreleri kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisinde yapılan çalışmalardaki kabarcık kopma sürelerinden daha düşük iken kabarcık kopma çapları daha fazladır. Bu durum yüksek buharlaşma neticesinde gelen anlık kütle transferinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Kabarcık gelişimi esnasındaki en yüksek sıcaklık değerleri kontak hattı civarında ve oyuk içerisindeki buhar fazında elde edilmiştir. Ayrılan kabarcıklar için ise en yüksek sıcaklık değerlerine kabarcığın hala yüzey ile temasta olan noktalarında görülmüştür.

Kabarcık büyümesi esnasında en yüksek hız değerlerine ilerleyen ve gerileyen kontak hattı ile birlikte kontak hattı civarında elde edilmiştir. Kabarcık ayrılması esnasında kabarcık koparken en yüksek hız değeri incelen ve kopmanın gerçekleştiği boyunda görülmüştür.

Çizelge 8.3 25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar için aşırı kızdırılmış sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları

Simülasyonlar (Oyuk derinlikleri) (mikrometre)	Kabarcık başlangıç yarıçapı (mikrometre)	1.Kabarcık kopma çapı (mikrometre)	1.Kabarcık kopma zamanı (saniye)	2.Kabarcık kopma çapı (mikrometre)	2.Kabarcık kopma zamanı (saniye)	Kopma zamanları arasındaki fark (saniye)
50	15	163	0,0001671	124	0,0003991	0.000232
25	15	197	0,000220828	154	0,00065511	0.000434282

Çizelge 8.4 25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar için kaynama sıcaklığındaki sıvı içerisindeki kabarcık gelişimi sonuçları

Simülasyonlar (Oyuk derinlikleri) (mikrometre)	Kabarcık başlangıç yarıçapı (mikrometre)	1.Kabarcık kopma çapı (mikrometre)	1.Kabarcık kopma zamanı (saniye)	2.Kabarcık kopma çapı (mikrometre)	2.Kabarcık kopma zamanı (saniye)	Kopma zamanları arasındaki fark (saniye)
50	15	112	0,0002866	105	0,0006699	0.0003833
25	15	120	0,00032	108	0,000803	0.000483

25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar ile her iki yığın sıvı sıcaklığında yapılan çalışmalarda ilk kabarcıklar koştuktan sonra oyuklar içerisinde ilk duruma göre daha

fazla buhar fazı kalmıştır. Buhar fazı kabarcık kopmalarından hemen sonra buharlaşmanında etkisi ile ikinci kabarcıkların oluşmasını sağlamıştır. İkinci kabarcıklar koştuktan sonra ise her iki durum için de oyuklar içerisinde bir miktar buhar fazı kalmış ve bu sayede 3. Kabarcıkların gelişimleri gözlemlenmiştir.

25 ve 50 mikrometre derinlikteki oyuklar ile aşırı kızdırılmış yığın sıvıdaki çalışmalarda 25 mikrometre oyuktaki kabarcık kopma süreleri ve kabarcık kopma çapları 50 mikrometre derinlikteki oyukta yapılan çalışmadan daha yüksek elde edilmiştir. Kabarcıkların kopma süreleri arasındaki fark ikinci kabarcıkların başlangıcından kopma anına kadar geçen gelişim süresini temsil etmektedir. 25 mikrometre derinliğe sahip oyuk için bu süre 50 mikrometre derinliğe sahip oyuktaki sürenin neredeyse iki katı olarak elde edilmiştir.

25 ve 50 mikrometre derinliğe sahip oyuklar ile kaynama sıcaklığındaki yığın sıvıda yapılan çalışmalarda aşırı kızdırılmış sıvıda yapılan çalışmalara benzer sonuçlar elde edilmiştir. 25 mikrometre derinliğe sahip oyuktaki kabarcık kopma süreleri ve kabarcık kopma çapları 50 mikrometre derinliğe sahip oyuktaki kabarcık kopma sürelerinden ve kopma çaplarından daha büyüktür. 25 mikrometre derinliğe sahip oyuktaki kabarcıkların ayrılması arasında geçen süre 50 mikrometre derinliğe sahip oyuktaki bu süreden daha fazla elde edilmiştir.

25 ve 50 mikrometre derinliklere sahip oyuklar ile her iki yığın sıvı sıcaklığında yapılan tüm çalışmalarda ilk kabarcıkların kopma çaplarının ikinci kabarcıkların kopma çaplarından daha yüksek olduğu elde edilmiştir.

Kabarcık çevrimi esnasındaki en yüksek sıcaklık değerleri kontak hattı civarında ve kabarcığın yüzey ile temas ettiği noktalarda elde edilmiştir.

Kabarcık çevrimi esnasında en yüksek hız değerlerine ilerleyen (kabarcık gelişim periyodu) ve gerileyen kontak hattı (kabarcık ayrılma periyodu) ile birlikte kontak hattı civarında elde edilmiştir. Kabarcık ayrılması esnasında kabarcık yüzeyden koparken en yüksek hız değerleri kabarcığın hemen alt bölgesinde elde edilmiştir.

Tam bir kabarcık çevriminde havuz kaynaması ve oluklu bir yüzeydeki akış kaynaması çalışmaları için elde edilen ısı transfer hızı ve kütle transfer hızı çalışmaları EK-A ve EK-B de verilmiştir. Ancak oyuklu bir kanal yüzeyi simülasyonları için aynı çalışmalar yapılamamıştır. Bunun en büyük sebebi kabarcık oyuk içerisinde iken kabarcık ayakları

oyuk duvarları ile temastadır. Kabarcık oyuktan koştuktan bir süre sonra kanal yüzeyi ile temasa geçmektedir. Bu sebeple simülasyon sonuçlarında özellikle  $\dot{Q}_{mik}(W)$ ,  $\dot{Q}_{geçiş}(W)$  ve  $\dot{Q}_{cl}(W)$  sırası ile mikro bölge, geçiş bölgesi ve kontak hattı bölgesi için elde edilen değerler doğruyu göstermeyecektir. Bu durum kullanılan çözücü programının bir açığıdır. Bu sebeple son çalışma olan oyuklu kanal yüzeyinden gerçekleşen akış kaynaması çalışmalarında ısı transfer hızı ve kütle transfer hızı değerleri tanımlanmamıştır. Dahası bu çalışmalardaki diğer alt indisler olan “*ls*” kabarcığın dışında kalan tüm bölgeleri, “*c*” ise kontak hattını temsil etmektedir. Kabarcık ayağı yani kontak hattı Peter Stephan’ın [3] da çalışmasında belirttiği gibi mikro bölge ve geçiş bölgesinden oluşmaktadır. Detaylı bilgi için kaynağa gidilebilir.



## GİRİŞ PARAMETRELERİ VE SİMULASYON VERİLERİ

## 9.1 Tüm Çalışmalar İçin Giriş Parametreleri

Bu bölümde çalışmaların tamamı için giriş parametreleri verilmiştir.

Çizelge 9.1 Havuz kaynaması giriş parametreleri

		Isı Akısı	Basınç	Yerçekimi İvmesi	Sıvı Sıcaklığı		Başlangıç Kabarcık Durumu	Sıvı Hızı (m/s <sup>2</sup> )	
					Doymuş	Katı Sıcaklığı			
Düz Yüzeyde Tek Kabarcıklı Havuz Kaynaması	0.01G	20000 W/m <sup>2</sup>	P > 1 bar	0.01G	-	Aşırı Kızdırılmış (5 Kelvin) İncelendi	Aşırı Kızdırılmış (10 Kelvin) İncelendi	Yarı Küresel ve yarıçapı 15 milimetre	0
	0.1G			0.1G					
	1G			1G					
	10G			10G					



Çizelge 9.2 Düz bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması giriş parametreleri

					Sıvı Sıcaklığı		Katı Sıcaklığı			
		Isı Akısı	Basınç	Yerçekimi İvmesi	Doymuş	Aşırı Kızdırılmış (5 Kelvin)	Aşırı Kızdırılmış (10 Kelvin)	Boru İçi Akışta Sıvı Maksimum Hızı	Başlangıç Kabarcık Durumu	Boru Çapı
Kanal İçi Düz Yüzeyde Tek Kabarcıklı Akış Kaynaması	0.01 m/s	20000 W/m <sup>2</sup>	P > 1 bar	1G	-	İncelendi	İncelendi	0.01 m/s	Yarı Küresel ve yarıçapı 15 milimetre	4mm
	0.035 m/s							0.035 m/s		
	0.07 m/s							0.07 m/s		
	0.3 m/s							0.3 m/s		
	0.6 m/s							0.6 m/s		

Çizelge 9.3 Oyuklu bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması giriş parametreleri

							Katı Sıcaklığı			
		Sıvı Sıcaklığı (Kelvin)	Oyuk Derinlikleri (Mikrometre)	Basınç	Oyuk Çapı (mikrometre)	Isı Akısı	Yerçekimi İvmesi	Aşırı Kızdırılmış (10 Kelvin)	Boru İçi Akış Yığın Sıvı Maksimum Hızı	Başlangıç Kabarcık Durumu
Kanal İçi Kaviteli Yüzeyde Akış Kaynaması	Aşırı Kızdırılmış Sıvı Sıcaklığı (5 Kelvin)	3	P > 1 bar	30 mikrometre	20000 W/m <sup>2</sup>	1G	İncelendi	10 m/s	Yarı Küresel ve yarıçapı 15 mikrometre	5mm
		12								
		25								
		50								
	Doymuş Sıvı Sıcaklığı	3	P = 1 bar							
		12								
		25								
		50								

## 9.2 Simülasyon Verileri

Bu bölümde daha önce ayrı ayrı incelenen çalışmaların sonuçları ortak başlık altında verilmiştir.

Çizelge 9.4 Havuz kaynaması simülasyon verileri

		Sonuçlar				
		1.Kabarcık Kopma Çapı (milimetre)	1.Kabarcık Kopma Süresi (saniye)	2.Kabarcık Kopma Çapı (milimetre)	2.Kabarcık Kopma Süresi (saniye)	Kopma Süreleri Arasındaki Fark (saniye)
Düz Yüzeyde Tek Kabarcıklı Havuz Kaynaması	0.01G	3.39	0.2223272	-	-	-
	0.1G	1.74	0.0773541	-	-	-
	1G	0.5	0.0081703	-	-	-
	10G	0.32	0.0013253	-	-	-

Çizelge 9.5 Düz bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması simülasyon verileri

		Sonuçlar				
		1.Kabarcık Kopma Çapı (milimetre)	1.Kabarcık Kopma Süresi (saniye)	2.Kabarcık Kopma Çapı (milimetre)	2.Kabarcık Kopma Süresi (saniye)	Kopma Süreleri Arasındaki Fark (saniye)
Kanal İçi Düz Yüzeyde Tek Kabarcıklı Akış Kaynaması	0.01 m/s	0.875	0.0131834	-	-	-
	0.035 m/s	0.897	0.0133780	-	-	-
	0.07 m/s	0.914	0.0134843	-	-	-
	0.3 m/s	0.953	0.0138122	-	-	-
	0.6 m/s	1.02	0.0144273	-	-	-

Çizelge 9.6 Oyuklu bir kanal yüzeyindeki akış kaynaması simülasyon verileri

		Sonuçlar						
		Sıvı Sıcaklığı (Kelvin)	Oyuk Derinlikleri (Mikrometre)	1.Kabarcık Kopma Çapı (mikrometre)	1.Kabarcık Kopma Süresi (saniye)	2.Kabarcık Kopma Çapı (mikrometre)	2.Kabarcık Kopma Süresi (saniye)	Kopma Süreleri Arasındaki Fark (saniye)
Kanal İçi Kaviteli Yüzeyde Akış Kaynaması	Aşırı Kızdırılmış	3	123	0.000160593	-	-	-	-
	Sıvı Sıcaklığı (5 Kelvin)	12	166	0.0002362	-	-	-	-
		25	197	0.000220828	154	0.00065511	0.000434282	
		50	163	0.0001671	124	0.0003991	0.000232	
		Doymuş Sıvı Sıcaklığı	3	83.4	0.00027826	-	-	-
	12		108	0.00033701	-	-	-	-
	25		120	0.00032	108	0.000803	0.000483	
	50		112	0.0002866	105	0.0006699	0.0003833	

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 10.1 Sonuç

Farklı parametreler uygulanarak yürütülen tez çalışmasında kabarcık gelişimi süreleri, kabarcık ayrılma çapları, kabarcık çevrimindeki ısı transferi ve kütle transferi hızlarının yanı sıra çevrim boyunca en yüksek sıcaklık değerlerinin ve hız değerlerinin elde edildiği noktalar da incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda tüm parametreler sabit iken yerçekimi ivmesinin düşürülmesi, kabarcığın yüzeyde kalma süresini arttırmıştır. Bunun yanında kabarcığın kopma süresini ve kopma çapını da arttırmıştır. İkinci olarak tüm parametreler sabit tutularak akış kaynamasında kanal içerisindeki hız arttırılmıştır. Literatürdeki tüm çalışmalar aşırı soğutulmuş akış kaynaması durumunda gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışma aşırı kızdırılmış (5K) akış kaynamasındaki sıvı durumu için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda kanal içerisindeki maksimum hız değeri arttıkça kabarcığın gelişim süresinin, kopma çapının ve kopma zamanının arttığı sonucuna varılmıştır. Artan kanal içi akış hızının kabarcığa olan etkisini daha iyi gösterebilmek için sabit dünya yerçekimi ivmesindeki havuz kaynaması sonuçları da aynı yerçekimi ivmesi büyüklüğüne sahip akış kaynaması sonuçlarına eklenmiştir. Karşılaştırma hızın arttığı durumlarda elde edilen sonuçları desteklemektedir.

Son olarak tek kaviteli yatay bir kanal içerisinde incelenen akış kaynaması aşırı kızdırılmış (5K) sıvı için ve kaynama sıcaklığındaki sıvı için yapıldı. Kavite derinlikleri dışında tüm parametreler sabit tutuldu. Sonuçlara göre sıg kavitelere tek bir kabarcık oluşumu ve kopması gözlemlendi. Kabarcık koptuktan sonra kavite içerisinde herhangi bir buhar fazı kalmadı. Ancak derinliğin artması ile birlikte kabarcıklar kaviteden kopsa da bir miktar

kabarcık kavite içerisinde kaldı ve bu sayede periyodik kabarcık oluşumu gözlemlenebildi.

Tüm çalışmalarda kabarcık çevrimi esnasında en yüksek hız değerlerine ilerleyen (kabarcık gelişim periyodu) ve gerileyen kontak hattı (kabarcık ayrılma periyodu) ile birlikte kontak hattı civarında elde edilmiştir. Kabarcık ayrılması esnasında kabarcık yüzeyden koparken en yüksek hız değerleri kabarcığın hemen alt bölgesinde elde edilmiştir.

Tüm çalışmalarda tam bir kabarcık çevrimi esnasında ısı ve kütle transferi hızları değerleri belirlenen zaman anlarında hesaplanmıştır. Kontak hattı ve geçiş bölgesi transferi hızı değerleri kabarcık çevriminde önce düşük değerlerde elde edilmiş ilerleyen zamanla birlikte en yüksek değerlerine ulaşmış ve kabarcık ayrılması sırasında tekrar düşüş göstermişlerdir. Katı-sıvı bölgeler arasındaki ısı transferi hızı ve toplam ısı transferi hızı değerleri sıvı ile katı bölge arasındaki sıcaklık farkı azaldığı için devamlı azalma göstermiştir. Elde edilen kütle transferi hızı değerleri ısı transferi hızı değerleri ile paralel bir davranış sergilemiştir.

## **10.2 Öneriler**

Gelecekteki çalışmalar için üçüncü çalışmada oyuk şekli değiştirilerek, oyuk içerisindeki kabarcığın başlangıç durumundaki çapı arttırılarak veya kabarcığın ilk durumundaki şekli ile oyuk çıkış çapı değiştirilerek yeni çalışmalar yapılabilir. Bu sayede kabarcık davranışları kıyaslanabilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Kunkelmann, C., (2011). "Numerical Modeling and Investigation of Boiling Phenomena", Doktora Tezi, Darmstadt Teknik Üniversitesi, Teknik Termodinamik, Darmstadt .
- [2] Dietl, J., (2015). "Numerical Simulation of Pool Boiling from Reentrant Type Structured Surfaces", Doktora Tezi, Darmstadt Teknik Üniversitesi, Teknik Termodinamik, Darmstadt.
- [3] Kunkelmann, C. ve Stephan, P., (2009). "CFD Simulation of Boiling Flows Using The Volume of Fluid Method within OPENFOAM", Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 56:8, 631-646.
- [4] Liu, J., Wang, G., Zhang, L., Shi, Y., Zhang, H. ve Yao, S., (2017). "Numerical Simulation of Single Bubble Behaviour", Propulsion and Power Research, 6(2):117-125.
- [5] Kunkelmann, C., Ibrahim, K., Schweizer, N., Herbert, S., Stephan, P. ve Gambaryan-Roisman, T., (2011). "The Effect of Three-Phase Contact Line Speed on Local Evaporative Heat Transfer: Experimental and Numerical Investigations", International Journal of Heat and Mass Transfer, 55:1896-1904.
- [6] Stephan, P., Sielaff, A., Fischer S., Dietl, J. ve Herbert, S., (2012). "A Contribution to The Basic Understanding of Nucleate Boiling Phenomena: Generic Experiments and Numerical Simulations", Processing of the 3rd International Forum on Heat Transfer, 3-15 November 2012, Nagasaki, Japan.
- [7] Li, D. ve Dhir, V.K., (2007). "Numerical Study of Single Bubble Dynamics During Flow Boiling", Journal of Heat Transfer, 129/ 864-876.
- [8] Carey, V.P., (1992). "Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena", 2. Edition, Hemisphere Pub. Corp., Washington, D.C.

## HAVUZ KAYNAMASI ISI VE KÜTLE TRANSFER HIZI SONUÇLARI

Çizelge A.1 Yerçekimi  $10g_d$  büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ts}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$2,24025 \times 10^{-8}$	0.000754607	0.000133436	0.02690031	0.0008880445	0.0277883545	63,45685
$8,81262 \times 10^{-7}$	0.00063385	0.002819287	0.02714207	0.003453137	0.030595207	63,27649
$3,38079 \times 10^{-5}$	0.000631681	0.002809627	0.02712394	0.003441308	0.030565248	63,22694
0.0010016	0.000288087	0.0002264902	0.02680727	0.000514578	0.027321848	63,13148
0.0012918	0.000113528	0.0001047111	0.02674954	0.0002182395	0.0269677795	63,18735

Çizelge A.2 Yerçekimi  $10g_d$  büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ts}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplam}(kg/s)$
$2,24025 \times 10^{-8}$	$8.836975 \times 10^{-6}$	$1.562628 \times 10^{-6}$	$3.150214 \times 10^{-4}$	$1.039962 \times 10^{-5}$	$3.254210 \times 10^{-4}$
$8,81262 \times 10^{-7}$	$7.422826 \times 10^{-6}$	$3.301582 \times 10^{-5}$	$3.178526 \times 10^{-4}$	$4.043864 \times 10^{-5}$	$3.582912 \times 10^{-4}$
$3,38079 \times 10^{-5}$	$7.397425 \times 10^{-6}$	$3.290269 \times 10^{-5}$	$3.150214 \times 10^{-4}$	$4.030012 \times 10^{-5}$	$3.579404 \times 10^{-4}$
0.0010016	$3.373700 \times 10^{-6}$	$2.652358 \times 10^{-6}$	$3.176402 \times 10^{-4}$	$6.026068 \times 10^{-6}$	$3.199579 \times 10^{-4}$
0.0012918	$1.329492 \times 10^{-6}$	$1.226240 \times 10^{-6}$	$3.132558 \times 10^{-4}$	$2.555737 \times 10^{-6}$	$3.158115 \times 10^{-4}$

Çizelge A.3 Yerçekimi  $1g_d$  büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{is}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$2,24025 \times 10^{-8}$	0.000754607	0.000133436	0.02690031	0.0008880445	0.0277883545	63,45685
$8,81262 \times 10^{-7}$	0.00063385	0.002819287	0.02714207	0.003453137	0.030595207	63,27649
$3,38079 \times 10^{-5}$	0.000631681	0.002809627	0.02712394	0.003441308	0.030565248	63,22694
0.0004793385	0.000569295	0.000500393	0.02691736	0.001069688	0.027987048	63,21651
0.003319876	0.00051591	0.002338632	0.02598892	0.002854542	0.028843462	63,10122
0.006195258	0.00044638	0.001593691	0.02499685	0.002040077	0.027036927	63,03025
0.007544977	0.000025382	0.000238265	0.02461308	0.000263647	0.024876727	63,00717

Çizelge A.4 Yerçekimi  $1g_d$  büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{is}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplam}(kg/s)$
$2,24025 \times 10^{-8}$	$8.836975 \times 10^{-6}$	$1.562628 \times 10^{-6}$	$3.150214 \times 10^{-4}$	$1.039962 \times 10^{-5}$	$3.254210 \times 10^{-4}$
$8,81262 \times 10^{-7}$	$7.422826 \times 10^{-6}$	$3.301582 \times 10^{-5}$	$3.178526 \times 10^{-4}$	$4.043864 \times 10^{-5}$	$3.582912 \times 10^{-4}$
$3,38079 \times 10^{-5}$	$7.397425 \times 10^{-6}$	$3.290269 \times 10^{-5}$	$3.150214 \times 10^{-4}$	$4.030012 \times 10^{-5}$	$3.579404 \times 10^{-4}$
0.0004793385	$6.666842 \times 10^{-6}$	$5.859951 \times 10^{-6}$	$3.152210 \times 10^{-4}$	$1.252679 \times 10^{-5}$	$3.277478 \times 10^{-4}$
0.003319876	$6.041666 \times 10^{-6}$	$2.738701 \times 10^{-5}$	$3.043484 \times 10^{-4}$	$3.342868 \times 10^{-5}$	$3.377770 \times 10^{-4}$
0.006195258	$5.227421 \times 10^{-6}$	$1.866323 \times 10^{-5}$	$2.927305 \times 10^{-4}$	$2.389072 \times 10^{-5}$	$3.166213 \times 10^{-4}$
0.007544977	$2.972405 \times 10^{-7}$	$2.790249 \times 10^{-5}$	$2.882363 \times 10^{-4}$	$3.087490 \times 10^{-6}$	$2.913238 \times 10^{-4}$



Çizelge A.5 Yerçekimi 0.1g<sub>d</sub> büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ls}(W)$	$\dot{Q}_{kh}(W)$	$\dot{Q}_{toplam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$2,24025 \times 10^{-8}$	0.000754607	0.000133436	0.02690031	0.0008880445	0.0277883545	63,45685
$8,81262 \times 10^{-7}$	0.00063385	0.002819287	0.02714207	0.003453137	0.030595207	63,27649
$3,38079 \times 10^{-5}$	0.000631681	0.002809627	0.02712394	0.003441308	0.030565248	63,22694
0.01029069	$7.6446 \times 10^{-4}$	0.002175627	0.02350557	0.002940093	0.026445663	63.11084
0.04899829	$1.7416 \times 10^{-3}$	0.004118948	0.01651343	0.005860623	0.022374053	63.1681
0.07732665	$2.1288 \times 10^{-4}$	0.001306349	0.01678492	0.001519236	0.018304156	62.81127

Çizelge A.6 Yerçekimi 0.1g<sub>d</sub> büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ls}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplam}(kg/s)$
$2,24025 \times 10^{-8}$	$8.836975 \times 10^{-6}$	$1.562628 \times 10^{-6}$	$3.150214 \times 10^{-4}$	$1.039962 \times 10^{-5}$	$3.254210 \times 10^{-4}$
$8,81262 \times 10^{-7}$	$7.422826 \times 10^{-6}$	$3.301582 \times 10^{-5}$	$3.178526 \times 10^{-4}$	$4.043864 \times 10^{-5}$	$3.582912 \times 10^{-4}$
$3,38079 \times 10^{-5}$	$7.397425 \times 10^{-6}$	$3.290269 \times 10^{-5}$	$3.150214 \times 10^{-4}$	$4.030012 \times 10^{-5}$	$3.579404 \times 10^{-4}$
0.01029069	$8.952360 \times 10^{-6}$	$2.547811 \times 10^{-5}$	$2.752666 \times 10^{-4}$	$3.443054 \times 10^{-5}$	$3.096971 \times 10^{-4}$
0.04899829	$2.039535 \times 10^{-5}$	$4.823575 \times 10^{-5}$	$1.933838 \times 10^{-4}$	$6.863199 \times 10^{-5}$	$2.620157 \times 10^{-4}$
0.07732665	$2.492973 \times 10^{-6}$	$1.529825 \times 10^{-5}$	$1.965631 \times 10^{-4}$	$1.779131 \times 10^{-5}$	$2.143544 \times 10^{-4}$

Çizelge A.7 Yerçekimi 0.01g<sub>d</sub> büyüklüğündeki havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki ısı transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ls}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
0.03934853	0,001901138	0,004535122	0,04355065	0,00643626	0,04998691	63.25652
0.1018604	0,004408237	0,009780163	0,02888661	0,0141884	0,03952324	63.19451
0.1346936	0,00432378	0,0100004	0,02533484	0,01432418	0,03965902	63.30079
0.1640266	0,003852423	0,008561197	0,02332337	0,01241362	0,03573699	63.31748
0.2197227	0,003255486	0,007110834	0,02005642	0,01036632	0,03042274	63.23877

Çizelge A.8 Yerçekimi 0.01g<sub>d</sub> havuz kaynaması çalışmasında belirli zaman aşamalarındaki kütle transfer hızı miktarları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ls}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplam}(kg/s)$
0.03934853	$2,226365 \times 10^{-5}$	$5,310944 \times 10^{-5}$	$5,100085 \times 10^{-4}$	$7,537310 \times 10^{-5}$	$5,853816 \times 10^{-4}$
0.1018604	$5,162353 \times 10^{-5}$	$1,145325 \times 10^{-4}$	$3,382823 \times 10^{-4}$	$1,661560 \times 10^{-4}$	$4,628447 \times 10^{-4}$
0.1346936	$5,063448 \times 10^{-5}$	$1,171116 \times 10^{-4}$	$2,966886 \times 10^{-4}$	$1,677461 \times 10^{-4}$	$4,644348 \times 10^{-4}$
0.1640266	$4,511456 \times 10^{-5}$	$1,002576 \times 10^{-4}$	$2,731329 \times 10^{-4}$	$1,453721 \times 10^{-4}$	$4,185051 \times 10^{-4}$
0.2197227	$3,812401 \times 10^{-5}$	$8,327283 \times 10^{-5}$	$2,348746 \times 10^{-4}$	$3,562715 \times 10^{-4}$	$3,562715 \times 10^{-4}$

### AKIŞ KAYNAMASI ISI VE KÜTLE TRANSFER HIZI SONUÇLARI

Çizelge B.1 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.01m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ls}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	0,000795778	0,0001254166	0,04032149	0,0009211946	0,0412426846	63,35445
0.001630029	0,0001779808	0,0007612639	0,03725297	0,0009392447	0,0381922147	62,81322
0.0059254	0,000672005	0,0012815	0,03031147	0,001953505	0,032264975	63,1081
0.00998608	0,000625562	0,00129766	0,02646116	0,001923222	0,028384382	63,09401
0.01292614	0,0001992678	0,0004634882	0,024669584	0,000662756	0,02533234	63,03447

Çizelge B.2 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.01m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ls}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplam}(kg/s)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	$9,319116 \times 10^{-6}$	$1,468716 \times 10^{-6}$	$4,721928 \times 10^{-4}$	$1,078783 \times 10^{-5}$	$4,829806 \times 10^{-4}$
0.001630029	$2,084279 \times 10^{-6}$	$8,914932 \times 10^{-6}$	$4,362583 \times 10^{-4}$	$1,099921 \times 10^{-5}$	$4,472575 \times 10^{-4}$
0.0059254	$7,869648 \times 10^{-6}$	$1,500726 \times 10^{-5}$	$3,549684 \times 10^{-4}$	$2,287690 \times 10^{-5}$	$3,778454 \times 10^{-4}$
0.00998608	$7,325768 \times 10^{-6}$	$1,519650 \times 10^{-5}$	$3,098786 \times 10^{-4}$	$2,252227 \times 10^{-5}$	$3,324009 \times 10^{-4}$
0.01292614	$2,333565 \times 10^{-6}$	$5,427770 \times 10^{-6}$	$2,888980 \times 10^{-4}$	$7,761335 \times 10^{-6}$	$2,966594 \times 10^{-4}$

Çizelge B.3 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.035m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ls}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplaml}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	0,000795778	0,0001254166	0,04032149	0,0009211946	0,0412426846	63,35445
0,001820532	0,0001393894	0,000634547	0,03688935	0,0007739364	0,0376632864	63,10439
0,006424127	0,000731327	0,001455091	0,02966737	0,002186418	0,031853788	63,07894
0,011516499	0,000496791	0,001001318	0,02549238	0,001498109	0,026990489	63,08496
0,01318333	0,000130418	0,000074652	0,02451039	0,000205070	0,02471546	63,04578

Çizelge B.4 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.035m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ls}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplaml}(kg/s)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	$9,319116 \times 10^{-6}$	$1,468716 \times 10^{-6}$	$4,721928 \times 10^{-4}$	$1,078783 \times 10^{-5}$	$4,829806 \times 10^{-4}$
0,001820532	$1,632347 \times 10^{-6}$	$7,430988 \times 10^{-6}$	$4,320000 \times 10^{-4}$	$9,063336 \times 10^{-6}$	$4,410634 \times 10^{-4}$
0,006424127	$8,564350 \times 10^{-6}$	$1,704013 \times 10^{-5}$	$3,474256 \times 10^{-4}$	$2,560448 \times 10^{-5}$	$3,730301 \times 10^{-4}$
0,011516499	$5,817769 \times 10^{-6}$	$1,172613 \times 10^{-5}$	$2,985335 \times 10^{-4}$	$1,754390 \times 10^{-5}$	$3,160774 \times 10^{-4}$
0,01318333	$1,527285 \times 10^{-6}$	$8,742270 \times 10^{-7}$	$2,870337 \times 10^{-4}$	$2,401513 \times 10^{-6}$	$3,894353 \times 10^{-4}$

Çizelge B.5 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.07m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ts}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	0,000795778	0,0001254166	0,04032149	0,0009211946	0,0412426846	63,35445
0,002050691	0,0001513728	0,0006862006	0,0364128	0,0008375734	0,0372503734	63,09712
0,0067062529	0,000720638	0,001491924	0,02938703	0,002212562	0,031599592	63,0933
0,01022878	0,000632093	0,001290106	0,02634567	0,001922199	0,028267869	63,0641
0,012968439	0,000198902	0,000180592	0,02469443	0,000379494	0,025073924	63,06501

Çizelge B.6 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.07m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ts}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplam}(kg/s)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	$9,319116 \times 10^{-6}$	$1,468716 \times 10^{-6}$	$4,721928 \times 10^{-4}$	$1,078783 \times 10^{-5}$	$4,829806 \times 10^{-4}$
0,002050691	$1,772681 \times 10^{-6}$	$8,035888 \times 10^{-6}$	$4,264193 \times 10^{-4}$	$9,808569 \times 10^{-6}$	$4,362279 \times 10^{-4}$
0,0067062529	$8,439174 \times 10^{-6}$	$1,747147 \times 10^{-5}$	$3,441426 \times 10^{-4}$	$2,591064 \times 10^{-5}$	$3,700533 \times 10^{-4}$
0,01022878	$7,402250 \times 10^{-6}$	$1,510804 \times 10^{-5}$	$3,085262 \times 10^{-4}$	$2,251029 \times 10^{-5}$	$3,310365 \times 10^{-4}$
0,012968439	$2,329281 \times 10^{-6}$	$2,114858 \times 10^{-6}$	$2,891890 \times 10^{-4}$	$4,444139 \times 10^{-6}$	$2,936331 \times 10^{-4}$

Çizelge B.7 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.3m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ts}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	0,000795778	0,0001254166	0,04032149	0,0009211946	0,0412426846	63,35445
0,003397955	0,000262279	0,001027209	0,03412431	0,001289488	0,035413798	62,84884
0,007807111	0,000609373	0,001290705	0,02856403	0,001900078	0,030464108	63,61438
0,01037500	0,00049987	0,001163458	0,02656595	0,001663328	0,028229278	63,0771
0,01248635	0,0002794928	0,0006106492	0,02525415	0,000890142	0,026144292	63,08748

Çizelge B.8 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.3m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ts}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplam}(kg/s)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	$9,319116 \times 10^{-6}$	$1,468716 \times 10^{-6}$	$4,721928 \times 10^{-4}$	$1,078783 \times 10^{-5}$	$4,829806 \times 10^{-4}$
0,003397955	$3,071470 \times 10^{-6}$	$1,202933 \times 10^{-5}$	$3,996195 \times 10^{-4}$	$1,510080 \times 10^{-5}$	$4,147203 \times 10^{-4}$
0,007807111	$7,136183 \times 10^{-6}$	$1,511505 \times 10^{-5}$	$3,345047 \times 10^{-4}$	$2,225124 \times 10^{-5}$	$3,567559 \times 10^{-4}$
0,01037500	$5,853827 \times 10^{-6}$	$1,462490 \times 10^{-5}$	$3,111058 \times 10^{-4}$	$1,947873 \times 10^{-5}$	$3,305845 \times 10^{-4}$
0,01248635	$3,273056 \times 10^{-6}$	$7,151128 \times 10^{-6}$	$2,957437 \times 10^{-4}$	$1,042418 \times 10^{-5}$	$3,061679 \times 10^{-4}$

Çizelge B.9 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.6m/s için belirli zaman aralıklarında ısı transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{Q}_{mik}(W)$	$\dot{Q}_{geçiş}(W)$	$\dot{Q}_{ls}(W)$	$\dot{Q}_{cl}(W)$	$\dot{Q}_{toplamlam}(W)$	$T_{cl,ortalama}(K)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	0,000795778	0,0001254166	0,04032149	0,0009211946	0,0412426846	63,35445
0,00470774	0,0004177868	0,0009042542	0,03218802	0,001322041	0,033510061	63,0961
0,007382678	0,000630978	0,001345821	0,02922193	0,001976799	0,031198729	63,13441
0,01071973	0,000620147	0,00123256	0,02694173	0,001852707	0,028794437	63,15788
0,01404239	0,0002921834	0,0007663426	0,02552904	0,001058526	0,026587566	63,09707

Çizelge B.10 Kanal içerisindeki maksimum yağın sıvı akış hızı 0.6m/s için belirli zaman aralıklarında kütle transfer hızı hesaplamaları

Zaman Adımları	$\dot{m}_{mik}(kg/s)$	$\dot{m}_{geçiş}(kg/s)$	$\dot{m}_{ls}(kg/s)$	$\dot{m}_{cl}(kg/s)$	$\dot{m}_{toplamlam}(kg/s)$
$3.3807909 \times 10^{-5}$	$9,319116 \times 10^{-6}$	$1,468716 \times 10^{-6}$	$4,721928 \times 10^{-4}$	$1,078783 \times 10^{-5}$	$4,829806 \times 10^{-4}$
0,00470774	$4,892575 \times 10^{-6}$	$1,058944 \times 10^{-5}$	$3,769442 \times 10^{-4}$	$1,548202 \times 10^{-5}$	$3,924262 \times 10^{-4}$
0,007382678	$7,389193 \times 10^{-6}$	$1,576050 \times 10^{-5}$	$3,422092 \times 10^{-4}$	$2,314969 \times 10^{-5}$	$3,653589 \times 10^{-4}$
0,01071973	$7,262354 \times 10^{-6}$	$1,443413 \times 10^{-5}$	$3,155064 \times 10^{-4}$	$2,169649 \times 10^{-5}$	$3,372029 \times 10^{-4}$
0,01404239	$3,421671 \times 10^{-6}$	$8,974404 \times 10^{-5}$	$2,989629 \times 10^{-4}$	$1,239607 \times 10^{-5}$	$3,113589 \times 10^{-4}$

## MALZEME ÖZELLİKLERİ

Çizelge C.1 Malzeme özellikleri

Malzeme	Kinematik vizkozite (m <sup>2</sup> /s)	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Termal iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı (J/K.kg)	Yüzey gerilimi (kg/s <sup>2</sup> )	Buharlaşma entalpisi (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
<b>FC-72</b> (sıvı)	2.87x10 <sup>-7</sup>	1625.40	0.0525	1093.7	0.00853	85392
<b>FC-72</b> (buhar)	0.7917x10 <sup>-6</sup>	12.0915	0.0085	880.72	-	-
<b>BaF<sub>2</sub></b> (katı)	-	4890	10.9	410.0	-	-



## NÜMERİK PROGRAMLAR

Çizelge D.1 Nümerik programların listesi

Operatör	Program
Zaman Türevi, $d\phi/dt$	Euler
Gradyen, $\nabla\phi$	Gauss Linear
Diverjans, $\nabla \cdot \phi$	Gauss Linear Gauss Upwind Gauss Vanleer Gauss Interface Compression
Laplas, $\nabla \cdot \nabla\phi$	Gauss Linear
Enterpolasyon	Gauss Linear Gauss Upwind
Yüzey normal Gradyeni	Düzeltilmiş

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Mehmetcan Dönertaş  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 30.03.1991 – Toroslar/Mersin  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : [mmehmetcan786@gmail.com](mailto:mmehmetcan786@gmail.com)

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2018
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	İçel Anadolu Lisesi	2009

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
02.2017 -7.2017	Erener Dizayn	Ar-Ge Mühendisi

## **YAYINLARI**

### **Uluslararası Bildiri**

Dönertaş, M., Franz, B., Sielaff, A., Yıldız, S. ve Stephan, P., “Numerical Simulation of Single Bubble Nucleation Flow Boiling Both From an Artificial Cavity and From a Flat Surface and Pool Boiling From a Flat Surface in Horizontal Channel”, 2. International Conference on Engineering Technology and Innovation (ICETI-2018), Budapest, Hungary

