

**BALONCUKLU DİKEY AKIŞA KANAL DARALMASININ
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE
MODELLENMESİ**

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MODELING OF
THE EFFECTS OF CHANNEL BLOCKAGE ON BUBBLY
VERTICAL FLOW**

BERKİN TÜRKİZ PINARBAŞI

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

NÜKLEER ENERJİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2012

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **NÜKLEER ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Doç. Dr. Ayhan Yılmaz

Üye (Danışman) :.....
Yrd. Doç. Dr. Şule Ergün

Üye :.....
Doç. Dr. Cemil Kocar

Üye :.....
Doç. Dr. Cemal Niyazi Sökmen

Üye :.....
Dr. Özgür Ekici

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından 15/08/2012 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

BALONCUKLU DİKEY AKIŞA KANAL DARALMASININ ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ

Berkin Türkiz PINARBAŞI

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, baloncuklu dikey akışa kanal daralmasının etkisinin deneysel olarak incelenmesi ve baloncuk davranışı ile ilgili analizlerin yapılmasıdır. Deneyde kanal daralmasının etkisini incelemek için nükleer santrallerde kullanılan yakıt ayıracına benzer bir yapı kullanılmıştır ve farklı çaplardaki baloncuklarda yakıt ayıracından geçerken meydana gelen şekil değişikliği incelenmiştir. İlk olarak süper hızlı bir kamera ile baloncukların görüntüleri kaydedilmiştir. Daha sonra bu görüntüler bir görüntü işleme yazılımı ile incelenmiştir. Böylece baloncuk görüntü oranının (E) hesaplanması için gerekli baloncuk yatay ve dikey çapları bulunmuştur. Baloncuğun yatay ve dikey çapları, bir denklemde kullanılarak baloncuk görüntü oranının baloncuk hızına etkisi gözlenmiştir. Bununla birlikte farklı çapta baloncukların terminal hızları deneysel olarak hesaplanıp terminal hız denkleminde kullanılmak üzere bir katsayı bulunmuştur. Deney düzeneğinin tasarımı ve deneylerde kullanılan ekipman literatürde gerçekleştirilen benzer çalışmaların incelenmesiyle belirlenmiştir.

Ayrıca, çalışmada deney düzeneği Fluent programı ile modellenmiştir. Modellerin çözümü için bir çift fazlı akış çözüm yöntemi olan Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF) kullanılmıştır. Bu yöntemin avantajı iki faz arasındaki ara yüzeyi takip ederek çözüm gerçekleştirmesidir.

Sonuç olarak yakıt ayırıcı olmadığı durumda deney sonuçları ile uyumluluk gösteren denklem sonuçlarının yakıt ayırıcı bulunduğu durumda uyumluluk göstermediği görülmüştür. Bu çalışmada bunun nedenleri tartışılmıştır. Ayrıca VOF yöntemi ile yapılan benzeşimlerin, bu çalışmada oluşturulan modeller ve kullanılan çözüm yöntemleri ile baloncuk davranışı için doğru hesaplama yapamadığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Baloncuklu dikey akış, kanal daralmasının etkisi, akışkan hacmi yöntemi, hava-su deneyi.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şule ERGÜN, Hacettepe Üniversitesi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü

EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MODELING OF THE EFFECTS OF CHANNEL BLOCKAGE ON BUBBLY VERTICAL FLOW

Berkin Türkiz PINARBAŞI

ABSTRACT

Aim of this study is experimental investigation of the effect of channel blockage on bubbly vertical flow and performing analysis on bubble behavior. In order to analyze the effect of channel blockage, spacer grid-like structure, that is used in a nuclear reactor, was built in the experimental part and the change in bubble shape was analyzed through the channel blockage for different bubble diameters. First of all, the images of the bubbles were captured and recorded with a super fast camera. The images obtained were analyzed by using an image processing software. By using these images, horizontal and vertical bubble diameters were determined to calculate bubble aspect ratio (E). Horizontal and vertical bubble diameters were used in a correlation and the effect of bubble aspect ratio on bubble rise velocity was observed. In addition to that, an empirical constant for terminal velocity correlation was evaluated by using terminal velocities of various sized bubbles determined experimentally. Design of experimental setup and equipment were finalized by investigating similar studies in literature.

The experimental setup was modelled by using Fluent which is a Computational Fluid Dynamics program. Volume of fluid (VOF) method was used to simulate established models. This two phase flow modeling method was selected since it has the advantage of performing the analysis by tracking the bubble interface.

In conclusion, it was observed that, the agreement between the experimental data and results of calculations obtained by using correlation get worse to estimate the bubble behavior through channel blockage. This is discussed in this study. Additionally, it was concluded that VOF method cannot predict bubble behavior with the models and solutions used in this study.

Keywords : Bubbly vertical flow, effect of channel blockage, volume of fluid method, air-water experiment.

Advisor: Assistant Prof. Şule ERGÜN, Hacettepe University, Department of Nuclear Engineering.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda beni destekleyen danışmanım Yard. Doç Dr. Şule Ergün'e ve tecrübesiyle bana destek olan Nükleer Yüksek Mühendis Veda Duman'a teşekkür ederim.

Hacettepe Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Otomotiv Programı'ndan deneylerim sırasında ve sonrasında benden desteğini esirgemeyen Doç. Dr. Murat Köksal'a teşekkür ederim.

Jüri üyelerim, Doç. Dr. Ayhan Yılmaz, Doç. Dr. Cemil Kocar, Doç. Dr. Cemal Niyazi Sökmen ve Öğr. Gör. Dr. Özgür Ekici'ye tezime yapmış oldukları olumlu katkılardan dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında ve hayatımın en güzel zamanlarında yanımda olan çok sevdiğim canım sevgilim Hale Ünal'a çok teşekkür ederim. Seni her zaman seveceğim. Son olarak beni her konuda sonuna kadar destekleyen anneme ve babama çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1 GİRİŞ	1
2 LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Literatür Araştırmasının Sonucu	11
3 DİKEY BALONCUKLU AKIŞA KANAL DARALMASININ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	14
3.1 Deney Düzeneği	14
3.1.1 Deneyde kullanılan suyun özellikleri.....	16
3.1.2 Ölçüm Alanı	16
3.1.3 Ölçüm Aleti ve Görüntü İşleme Programı	17
4 ÖLÇÜM YÖNTEMİ VE GÖRÜNTÜLERİN İNCELENMESİ.....	19
4.1 Deney Düzeneğinin Hazırlanışı.....	19
4.2 Ölçüm Yöntemi	22
4.3 Görüntülerin İncelenmesi	24
4.4 Baloncuk Hızının Teorik Olarak Hesaplanması [16].....	27
4.5 Yüzey Aktif Maddelerin Baloncuk Dinamiğine Etkileri [16].....	29
5 CFD MODELİ.....	30
5.1 CFD Modelinin Oluşturulması ve Kullanılan Çözüm Yöntemleri	31
6 VERİLER VE SONUÇLAR.....	33
6.1 Deneylerin Tekrarlanabilirliği	33
6.2 Genel Analiz Sonuçları.....	34
6.3 Yakıt Ayırıcı ile Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları.....	40
6.4 Nümerik Analiz Sonuçları	46
7 TARTIŞMA VE YORUM.....	50
8 İLERİDE YAPILACAK ÇALIŞMALAR	52
9 KAYNAKÇA.....	53

10	EKLER DİZİNİ	56
10.1	Çok Fazlı Akış Modelleri.....	56
10.1.1	Euler – Lagrange Yaklaşımı	56
10.1.2	Euler – Euler Yaklaşımı	57
10.1.3	Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF).....	57
10.1.4	Karışım Modeli	57
10.1.5	Eulerian Modeli	58
10.2	Akışkan Hacmi Yönteminin (VOF) Gelişimi	58
10.2.1	Akışkan Hacmi (VOF) Yöntemini Sınırlayan Koşullar [22].....	62
10.2.2	Hacim Oranı Denklemi	62
10.2.3	Örtük yaklaşım	63
10.2.4	Açık Yaklaşım.....	63
10.2.5	Ara Yüzey Hesaplamaları	64
10.2.6	Malzeme Özellikleri	64
10.2.7	Momentum Denklemi	64
10.2.8	Enerji Denklemi	65
10.2.9	Geometrik Yeniden Yapılandırma Yöntemi.....	66
10.2.10	Yüzey Gerilimi.....	66
10.2.11	Cisim Kuvveti.....	67
10.2.12	Duvara Yapışma Etkisi	67
10.2.13	Akışkan Hacmi Yönteminde faza özgü koşullar	68
10.3	Görüntü İşleme Yazılımında Kullanılan Fonksiyonların Özellikleri	69
ÖZGEÇMİŞ		70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1	17x17 Kontrol yakıt demetinin yakıt ayırıcı.....	1
Şekil 2	Deney düzeneğinin tasarım ve gerçek görüntüleri.....	14
Şekil 3	Yakıt ayırıcının tasarımı ve gerçek görüntüsü.....	15
Şekil 4	Yakıt ayırıcı tutma aparatı ve üzerindeki bağlantı noktaları (a), yakıt ayırıcı üzerindeki soket tasarımı (b).....	17
Şekil 5	(a) Kamera, (b) Objektif	17
Şekil 6	NI Vision Assistant programı arayüzü.	19
Şekil 7	Yakıt ayırıcı tutma aparatının deney düzeneği içine yerleştirilmiş hali. ...	20
Şekil 8	Yakıt ayırıcının, yakıt ayırıcı tutma aparatına yerleştirilmiş hali.....	20
Şekil 9	Kompresör ve Selenoid vana	21
Şekil 10	Deney düzeneği, kamera ve bilgisayar.	21
Şekil 11	(a) Tek baloncuk, (b) Yakıt ayırıcı ile tek baloncuk.	22
Şekil 12	(a) Saf Su, (b) Sabunlu Su.....	23
Şekil 13	(a) Saf Su, (b) Sabunlu Su.....	23
Şekil 14	Vision Assisstant programı ile görüntünün incelenmesi.	25
Şekil 15	Baloncuklar arası mesafenin ve yatay-dikey çapların ölçülmesi.	26
Şekil 16	Kutuplardan Yassılaştırmış Baloncuk.....	27
Şekil 17	Küremsi baloncuk.....	28
Şekil 18	CFD modelleri (a) ilk model, (b) ikinci model.	30
Şekil 19	Hızları ve boyutları aynı üç ayrı baloncuk davranışı.....	33
Şekil 20	Hızları ve boyutları aynı üç baloncuğun yakıt ayırıcından geçişi.	34
Şekil 21	Baloncuk terminal hız katsayısı hesabı.	36
Şekil 22	2,7 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken hız profili.	37
Şekil 23	2,7 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken davranışı.	37
Şekil 24	3,0 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken hız profili.	38
Şekil 25	3,0 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken davranışı.	38
Şekil 26	3,3 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken hız profili.	39
Şekil 27	3,3 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken davranışı.	39
Şekil 28	2,7 mm baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken ve bulunmuyorken görüntü oranları.	41
Şekil 29	3,0 mm baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken ve bulunmuyorken görüntü oranları.	41
Şekil 30	3,3 mm baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken ve bulunmuyorken görüntü oranları.	42
Şekil 31	2,7 mm çaplı baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken hız profili.	43
Şekil 32	2,7 mm çaplı baloncuğun yakıt ayırıcından geçerken davranışı.	43
Şekil 33	3,0 mm çaplı baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken hız profili.	44
Şekil 34	3,0 mm çaplı baloncuğun yakıt ayırıcından geçerken davranışı.	44
Şekil 35	3,3 mm çaplı baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken hız profili.	45
Şekil 36	3,3 mm çaplı baloncuğun yakıt ayırıcından geçerken davranışı.	45
Şekil 37	Fluent modelinin sonuçları; (a) duvar sınır koşulu, (b) simetri sınır koşulu.	47
Şekil 38	2 mm çaplı baloncuk için Fluent modelinin sonuçları; (a) deney düzeneğinin tamamı, (b) hız girişi sınır koşulu.	48
Şekil 39	2 mm çaplı baloncuğun (a) girişte, (b) yakıt ayırıcındaki görüntüleri.	48

Şekil 40	Sabunlu suyla gerçekleştirilen deneylerdeki baloncuk şekli ve CFD modelinde oluşturulan baloncuk şekli.	49
Şekil 41	Saf su ile yapılan deneylerde gözlenen ve Fluent ile oluşturulan baloncuk.	64
Şekil 42 (a)	Görüntü işleme fonksiyonları, (b) Renk işleme fonksiyonları, (c) Gri tonlamalı işleme fonksiyonları, (d) İkili işleme fonksiyonları.	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

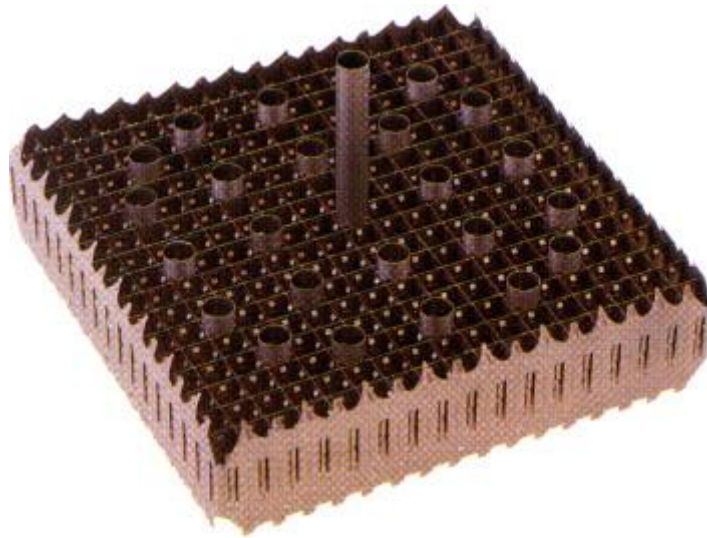
Sayfa

Çizelge 1	Saf suyun ve deneyde kullanılan sabunlu suyun özellikleri.....	16
Çizelge 2	C1614-M 16mm 1:1.4 (KP) Objektif Özellikleri [15].....	18
Çizelge 3	CFD modelinin çözümünde kullanılan yöntemler ve ayarlar.	31
Çizelge 4	1,5 mm ve 2,1 mm çaplı baloncukların Denklem 11'den hesaplanan ve deneylerden elde edilen enjektör çıkışı hız değerleri.	35
Çizelge 5	Farklı baloncuk çapları için maksimum terminal hızları.	35
Çizelge 6	Çok Fazlı Akışlarda Çözüm Yöntemleri [22]	61
Çizelge 7	Akışkan hacmi yöntemi (VOF) için faza özgü ve karışım koşulları [22].	68

1 GİRİŞ

Baloncuk-akışkan etkileşiminin modellenmesi doğal olaylarda, mühendislik ve tıp alanları gibi birçok alanda büyük öneme sahiptir. Hava-deniz gaz transferleri, baloncuk kolonu reaktörleri, petrol/doğal gaz transferleri, kaynamalı ısı transferleri, gemi hidrodinamiği, mürekkep püskürtmeli yazıcı sistemleri ve tıbbi ses üstü görüntüleme baloncuk dinamiğinin önemli olduğu yerlerden sadece birkaç tanesidir. Bunlara ek olarak, bu çalışmaya da kaynak olan, baloncuk-hava etkileşiminin gerçekleştiği diğer bir sistem nükleer güç santrallerinin soğutucu kanallarıdır.

Nükleer güç santrallerinin en yaygın olanları ise hafif sulu reaktörlerdir (LWR). Hafif sulu reaktörlerde güvenli operasyonun sağlanması için yakıtın çevresinden sürekli bir soğutucu su akışı olmalıdır. Bu soğutucu su aynı zamanda enerji transferinin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Kaynamalı su tipi nükleer santraller (BWR), normal işletme koşullarında, baloncuklu akış rejimi ile çalışmaktadırlar. Bu nedenle bu tip santrallerde baloncuk-sıvı fazlarının etkileşimi ısı transferi açısından büyük öneme sahiptir. Hafif sulu nükleer santrallerde yakıtları ayırmak için yakıt ayırıcı (spacer grid) adı verilen ve aynı zamanda yakıt çubuklarında meydana gelen titreşimleri azaltarak mekanik sorunların gerçekleşmesini engelleyen yapılar kullanılmaktadır (Şekil 1). Aşağıdaki şekilde gösterilen yakıt ayırıcı bacınçlı su tipi bir nükleer santralde 17x17 boyutlarında bir kontrol yakıt demetine aittir. [1]



Şekil 1 17x17 Kontrol yakıt demetinin yakıt ayırıcı.

Basıncılı su reaktörlerinde (PWR) de, kaynama oluşabilir ve baloncuk oluşumu meydana gelebilir. Hafif sulu reaktörlerde baloncuk oluşumu, kritik ısı akısı gerçekleşene kadar ısı transferini hızlandırmaktadır, fakat kritik ısı akısı geçildiği durumda oluşan kaynama yakıttan yeterince ısı taşınamamasına neden olabilmektedir ve bunun sonucunda yakıt zarfı malzemesinde yapısal sorunlar ortaya çıkabilir. Yakıt ile yakıt ayırıcı arasında oluşan baloncuğun davranışı, yakıt ile soğutucu arasındaki ısı transferini etkilemektedir. Nükleer santrallerde yakıt ile yakıt ayırıcı arasında oluşan baloncukların yakıt yüzeyinde birikmesi durumunda yakıttan soğutucuya gerçekleşen ısı transferi kötüleşebilmektedir. Baloncuk ara yüzey alanından iki faz arasında kütle, enerji ve momentum transferi gerçekleşir, bu çalışmada yalnızca momentum transferi incelenmiştir.

Baloncuklu dikey akış, baloncukların sıvı içinde serbest olarak yükselmesi ve bu yükselme sırasında birbirleri ile etkileşimleri olarak betimlenebilir. Baloncuk hızının az ve boyutunun küçük olduğu durumda yüzey gerilimi kuvveti etkili olur ve baloncuğun küresel şeklini korumasını sağlar. Baloncuk şekli ve boyutu, baloncuk etkileşme mekanizmalarının da farklılık göstermesine neden olur.

Bu çalışmada hava-su karışımı kullanılarak, durgun suda kanal daralmasının baloncuk şekline etkisi incelenmiştir. İlk olarak yakıt ayırıcı olmaksızın baloncuk davranışı ve tekrarlanabilirliği incelenmiştir. Daha sonra ise yakıt ayırıcı ile deneyler gerçekleştirilmiştir ve baloncuk şeklindeki değişim gözlenmiştir. Deneyde kullanılan baloncukların çapları 1,5 – 3,3 mm arasında değişmektedir ve baloncukların küresel şekillerini korumaları için deneyde kullanılan suya sıvı sabun eklenmiştir. Sıvı sabun yüzey gerilimini azalttığı için baloncukların küresel şekli korunmuştur. Baloncuk şeklinin küresel kalmasının istenmesinin sebebi, görüntü işleme sırasında baloncuk yatay ve dikey çaplarının rahatlıkla okunmasını sağlayarak görüntü oranının hesaplanmasını sağlamaktır.

Bu tezde gerçekleştirilen deneylerde fazlar arasında yalnızca momentum transferi gerçekleşmektedir. Ayrıca, baloncuk hareketinden ve akışkan hızından kaynaklanan kinetik enerji değişimi türbülanslı akışları etkilemektedir.

Bu çalışmada ayrıca kanal daralmasının baloncuk davranışına etkisinin hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları ile modellenip modellenemeyeceği

araştırılmıştır. Bunun için Fluent yazılımı ile deney düzeneği modellenmiştir ve baloncuk hızı, boyutu, davranışı incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile modellemelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak kanal daralması sırasında baloncuk davranışının modellenebilirliği incelenmiştir.

Bu tezde ilk olarak literatürde baloncuk davranışının incelendiği deneysel araştırmalar ve modellemeler özetlenmiştir. Daha önce gerçekleştirilen analizlerden nasıl faydalandığı ve bu analizlerin sonuçlarından nelerin alındığı anlatılmıştır. Bir sonraki bölümde deney düzeneğinin geometrik boyutları ve malzeme özellikleri, deneyde kullanılan ölçüm aletlerinin ve yazılımın özellikleri ve ölçüm alanı anlatılmıştır. Dördüncü bölümde ölçüm yönteminden bahsedilmiştir ve görüntü işleme yazılımı kullanılarak görüntülerin nasıl incelendiği anlatılmıştır. Beşinci bölümde deney düzeneğinin modellenmesi, nümerik analiz için kullanılan yöntem ve bu yöntemin özellikleri ile kullanılan diğer çözüm metodlarından bahsedilmiştir. Altıncı bölümde deneysel veriler kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları özetlenmiştir. Bu bölümde ayrıca nümerik modelleme sonuçları verilmiştir; bu kısımda deneylerden elde edilen görüntüler ile modelleme sonuçları karşılaştırılmıştır. Yedinci bölümde elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

2 LİTERATÜR TARAMASI

Çift fazlı akışlarla ilgili yapılan deneysel çalışmalarda görüntüleme, modelleme vb. teknikler kullanılarak gaz- sıvı fazlarının akış dinamiği, baloncuk çevresindeki akış, baloncuklar arası etkileşim, artan sistem basıncının baloncuk sütununda yükselen bir baloncuğun davranışına etkileri ve baloncuk hız profili incelenmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalardaki deneylerin her birinde ölçüm süreleri ve deney düzeneklerinin boyutları birbirinden farklıdır. Bu nedenle aşağıda detaylı olarak anlatılan deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak baloncuk sütununda gerçekleştirilen çift fazlı (Gaz-Sıvı) akış çalışmaları incelenmiştir ve bu tezde kullanılan deney düzeneğinin boyutlarının ve diğer özelliklerinin belirlenmesinde kaynak olarak kullanılmışlardır.

Bu tezde baloncuklu dikey akışa kanal daralmasının etkilerinin incelenmesi için baloncuk şeklinin kanal alanının değişimiyle değişmesi incelenmiştir. Çift fazlı akışlarda fazlar arası ara yüzey alanı belirlenerek, ara yüzey momentum, enerji ve kütle transferi denklemleri çözülür ve ikinci fazın dağılımı hesaplanır. Ara yüzey momentum transfer kuvveti denklemleri, ikincil fazda gerçekleşen kopma ve birleşmelerden kaynaklı batma ve kaynak terimlerine göre, ara yüzey alanındaki değişimi tanımlar. Bu kuvvet denklemleri, sürüklenme, kaldırma, duvar kayganlık, türbülant dağılım ve sanal küttedir [2].

A. Tomiyama ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada [3], fluorokarbon tüplerin kullanıldığı bir kanalda, hem durgun suda hem de belirli bir hıza sahip suda, baloncuk hızının ve şeklinin değişimi incelenmiştir. Baloncuklar bu tüplerin ortasına gelecek şekilde enjekte edilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen en önemli sonuç, baloncukların şeklinin ve sıvı içindeki hareketlerinin, baloncuk çapının baloncuğun geçtiği kanalın hidrolik çapına oranına (λ) bağlı olduğunun gözlenmiş olmasıdır. $\lambda < 0,9$ olduğu durumda baloncuklar çoğunlukla küresel olmaktadır ve baloncukların terminal hızı Tomiyama ve arkadaşları tarafından önerilen teorik bir model ile bulunabilmiştir. $\lambda > 0,9$ olduğu durumda ise baloncukların diğer akış kanallarına kaymasıyla gaz fazın sürüklenmesi durumu meydana gelmiştir. Bu baloncuklar için de ayrı bir bağıntı kullanılmıştır.

Durgun suda gerçekleştirilen deneylerin sonunda, küresel baloncukların ($\lambda < 0,6$) zikzak yaparak ya da helezonlu bir hareket yaparak yükseldiği gözlenmiştir.

Kutuplardan yassılaşıp baloncukların ($0,6 < \lambda < 0,9$) altlarında dört adet kanada benzeyen bir yapı oluştuğu ve bu yapıların diğer kanallara geçmediği gözlenmiştir. Mermi şeklinde olan (cell-Taylor) baloncukların ($\lambda > 0,9$) ise daha büyük kanatlara sahip olduğu ve bu kanatların komşu kanallara geçtiği gözlenmiştir. Bununla birlikte kutuplardan yassılaşıp baloncukların ve mermi şeklinde olan baloncukların kanal içerisinde doğrusal bir hareket izlediği gözlenmiştir.

Yukarıda bahsedilen gözlemlere göre, baloncukların şekillerinin ve hareketlerinin baloncuk çapının baloncuğun geçtiği kanalın hidrolik çapına oranına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte küçük baloncukların ($\lambda < 0,9$) terminal hızları, Tomiyama ve arkadaşlarının önerdiği teorik model ile doğru olarak hesaplanmıştır.

Yakın zamanda baloncuklu akışa yakıt ayıraçlarının etkisinin incelenmesi ile ilgili bir çalışma da yapılmıştır [4]. Zhang'in yapmış olduğu bu çalışmada, 2x3 'lük yakıt çubukları ve yakıt ayırıcı kullanarak baloncukların izledikleri yollar gözlenmiştir, boşluk dağılımı (void distribution), hız dağılımı ölçülmüştür ve bu ölçümleri hesaba katarak yakıt ayırıcının baloncuk hareketine etkisi incelenmiştir. Baloncukların izledikleri yolun gözlemlenebilmesi için yüksek hızlı bir kamera, boşluk dağılımı (void distribution) için "Sobel" filtreleme ve "Hough" dönüşüm yöntemlerine dayalı bir görüntü işleme yöntemi, hız dağılımı için ise Parçacık Hızı Görüntüleme (PIV) sistemi kullanılmıştır. H.C.Ünal'ın çalışmasına [5] göre normal çalışma koşullarındaki bir basınçlı su reaktöründe yakıt çubukları ile yakıt ayıraçları arasında bulunan baloncuk çapı 0,18 mm ile 1,24 mm arasındadır. Bu çalışmada ise çapı 0,1 mm ile 0,9 mm arasında bulunan baloncuklar için yukarıda bahsedilen analizler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde oda sıcaklığında bulunan hava ve musluk suyu kullanılmıştır. Sıvı fazın hızının baloncukların hareketine etkisinin incelenmesi için basınçlı su reaktörlerinde kritik ısı akısının oluşması durumunda (DNB) oluşan soğutucu hızı (1 – 4 m/s) kullanılmıştır. Deney düzeneğindeki yakıt ayıraçları 0,5 mm kalınlığında paslanmaz çelik plakalardan yapılmıştır.

Deneylerin sonunda baloncukların yakıt ayıraçlarına çarpmadan yakıt çubuklarına yaklaştığı ve yakıt çubuğu yüzeyinde biriktiği gözlenmiştir. Ayrıca baloncukların yakıt çubuklarına doğru gerçekleşen yatay hareketinin, eğilen akım hareketi tarafından indirgenen merkezkaç kuvvetinin yarattığı akım hareketlerinden daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Çift fazlı akışlarla ilgili gerçekleştirilen başka bir çalışmada [6] ise baloncuk kolonunda baloncuk oluşumu ve baloncuk dinamiği Fluent 6.3 programı kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF) ile birlikte Sürekli Yüzey Kuvvet (CSF) Yöntemi kullanılarak zamana bağlı kütle ve momentum denklemleri çözülmüştür. Yüzey gerilimi ve yer çekimi kuvvetleri hesaba katılarak da, Ayırma Operatörleri ile Kapalı Basınç Hız Eşleştirme (PISO) algoritması ve Parçalı Doğrusal Arayüz Hesaplama Yöntemi (PLIC) uygulanmıştır. CSF Yöntemi, fazlar arasındaki yüzey geriliminin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu yöntem, iraksaklık teoremine göre hacimsel kuvvetin içindeki yüzey gerilimini değiştirerek bunu momentum denkleminin kaynak terimine eklemektedir. CSF Yönteminin denklemi aşağıda verilmektedir. Buna göre, $K = \nabla \cdot \hat{n}$, $\hat{n} = (n/|n|)$, $n = \nabla F_q$ 'dur. F ise hacim oranı fonksiyonudur.

$$F_{Kaynak} = \sigma \frac{\rho K \nabla F_{siv1}}{0.5(\rho_{siv1} + \rho_{gas})} \quad (1)$$

Analizde kullanılan iki boyutlu sistem 50 mm genişliğinde ve 100 mm yüksekliğindedir. Baloncuklar birer birer dar bir kanal aracılığıyla hava enjekte edilerek oluşturulmuştur. Bu kanalların çapı 0,1 mm ile 0,5 mm arasında ve havanın hızı 0,2 – 0,3 m/s'dir. Durgun baloncuğun çapı girişte 4 mm civarındadır fakat yükseldikçe 6 mm ve daha yukarıda 10 mm çapında olduğu gözlenmiştir. Baloncuklar kaldırma kuvvetinin etkisiyle hızlanmaktadır. Bunun sonucu olarak baloncuklar denge hızına 0,3 saniyede ulaşmışlardır. Baloncuğun modellenenbilmesi için gaz fazın hızının kanal içinde düşük olduğu ve baloncuğun sisteme küresel bir formda girdiği kabul edilmiştir. Baloncukların, kolonun boyutlarından çok küçük olması nedeniyle kolon duvarlarının etkisi ihmal edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmanın sonunda, yüzey geriliminin artmasının baloncukların kopma zamanlarını arttırdığı (baloncuk oluşumu frekansı azalıyor) ve bunun sonucu olarak da daha büyük çaplı baloncukların olduğu gözlenmiştir. Sıvının viskozite değeri arttığı takdirde ise yine yüzey geriliminin artmasında gözlenen etki gibi baloncuk çapının büyümesine ve baloncuk oluşum frekansının azalmasına sebep olduğu anlaşılmıştır. Sıvı fazın yoğunluğu artırıldığında ise baloncuk oluşum frekansının arttığı fakat baloncuk çapının küçüldüğü gözlenmiştir.

Yüksek sıvı yoğunluğunun baloncığa uygulanan kaldırma kuvvetini arttırması ile baloncuklar daha hızlı kopma eğilimi göstermişlerdir. Daha erken kopan baloncukların içinde daha az hava bulunmaktadır, böylece baloncuk çapları küçülmüştür. Enjekte edilen gaz fazın hızının artırılması sonucunda baloncukların çaplarının büyüdüğü ve baloncukların kopma frekansının arttığı gözlenmiştir. Sıvı fazın hızı arttırıldığında ise baloncukların kopma frekansının arttığı fakat baloncukların çaplarının küçülmesine sebep olduğu gözlenmiştir. Enjekte edilen iki baloncğun birleşip birleşmediği incelenmiştir ve ilk başta baloncuklar arası mesafe fazla iken anafor (wake) etkisinden dolayı ikinci baloncğun birinci baloncğu bir süre sonra yakaladığı gözlenmiştir. Bununla birlikte yüzey geriliminin ve sıvının viskozite değerinin ayrı ayrı arttırılması iki baloncğun daha geç birleşmesine neden olmuştur. Bunun sebebi yüksek yüzey geriliminde baloncukların daha geç kopması ve baloncğun viskozite sürünme kuvvetinin basınç değişimine neden olması olarak yorumlanmıştır (sıvının viskozitesindeki değişim baloncğu daha az etkilemiştir).

Diğer bir çalışmada [7], yüksek basıncın dikdörgensel bir baloncuk sütununda yükselen bir baloncğun hızına, boyutuna ve şekline etkileri incelenmiştir. Bu çalışma da daha önce bahsedilen çalışmalarda da olduğu gibi hem deneysel hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın deneysel kısmı yukarıdaki benzer çalışmalarda olduğu gibi yüksek hızlı kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baloncukların serbest yüzey hareketlerini ve yüzey bozulmalarını modelleyebilmek için akışkanın hacminin hesaba katıldığı hacim izleme metodu kullanılmıştır. Literatürde yapılan diğer çalışmalara bakıldığında, yüksek basınçtaki akış alanı hesabının deneysel olarak kolaylıkla yapılamadığı görülmüştür. Oluşturulan modelde baloncuk çapının, hesabın yapıldığı sistemin alanına oranının çok düşük olmasından dolayı sistemin yan duvarlarının baloncuk davranışı üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Hesaplardan elde edilen veriler ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler ışığında, basınç artışının kararlı baloncuk boyutunu düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada kullanılan ve çapları 7,5 mm olan baloncukların 100 kPa basınç altında, 19,4 MPa altındakinden daha hızlı yükseldiği gözlenmiştir. Diğer bir analiz sonucunda, yüksek basınç altındaki baloncukların başlangıçta oluşturulan küresel şeklinden önce elliptik tepe şekline sonra yassı bir şekle ve en sonunda doğrusal

olarak yassılaşmış bir şekle dđnđřtđđđ gözlenmiştir. Anafor içindeki yukarı yđnlđ sıvı kuvveti ile birlikte gaz dolaşımının merkezsel kuvveti baloncudđ iyice yassılaştırarak üç parçaya ayırmıştır. Daha sonra ise bu üç kđçđk baloncudđun ayrı ayrı yükselmeye devam ettiği gözlenmiştir.

Baloncuklu akışın dinamiğini incelemek amaçlı hem deneysel hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak yapılan bir çalışmada [8], gaz fazın akış hızının, baloncukların enjekte edildiği sistem tasarımının ve sıvı fazın fiziksel özelliklerinin akış dinamiğine etkileri incelenmiştir. Bunu başarmak için benzer çalışmalarda kullanılan dikdörtgensel baloncuk sütunu tasarlanmış ve sütunun yüzeyindeki basınç dalgalanmaları ölçđlerek yukarıda bahsedilen ve akış dinamiğini etkileyen özellikler üzerinde çalışmalar gerçekteştirilmiştir. Ölçülen basınç değerlerine ek olarak farklı sistem parametrelerinin etkisini daha iyi gözlemlemek amacıyla yüksek hızlı kameralar kullanılarak baloncuk boyutu ölçđmđ yapılmıştır. Deneysel yapılan çalışmada elde edilen bilgi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak yapılan modelin (Fluent 4.5) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak yapılan modelleme çalışmasında nümerik olarak çift fazlı akışın karakteristik davranışını yakalayabilmek için “Eulerian – Eulerian” yaklaşımı kullanılmış, baloncukların birleşmesi ya da ayrılması durumlarını göz önünde bulundurmak amacıyla da çoklu grup modeli geliştirilmiştir. Kullanılan çoklu grup modelleri, sütundaki baloncuk boyutu dağılımına konveksiyonun etkisini anlamak amacıyla kullanılmıştır.

Yapılan deneyler ve modellemeler sonucunda elde edilen veriler daha önce yapılan benzer çalışmaların [9] sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların birbirlerine yakın olduğu gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, enjekte edilen gazın hızı arttıkça baloncukların deney düzeneğinin duvarlarına yaklaştığı gözlenmiştir. Baloncukların enjekte edildiği deliklerin çapı 0,8-2,0 mm arasında değişmektedir. Dijital kamera ve görüntü işleme programıyla yapılan analizin sonucunda da baloncuk çapının 5 mm olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada gaz fazın hızının düşük olması türbölans girdaplarının baloncuk boyutundan büyük olmasını engellemiştir. Bunun sonucunda türbölans dağılım terimi eklenmeden oluşturulan modelin sonuçları deneysel sonuçlara oldukça yakın çıkmıştır. Sonuç olarak bu çalışmada, baloncuk sütununun duvarındaki basınç dalgalanması ve

baloncuk boyutunun sistemdeki dağılımı ölçülerek baloncuklardan oluşan gaz sütununun dalgalanma süresi ve farklı türde baloncuk enjektörlerinin etkisi incelenmiştir. Örneğin, daha küçük baloncukların daha hızlı salınma girdiğinin gözlenmesi bu çalışmanın sonuçlarından biridir. Baloncukların birleşme/kırılma işlemleri, yoğunluk denge yapısı kullanılarak temsil edilmiştir. Çoklu-grup hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak yapılan modellemelerde kullanılan birleşme/kırılma iç yapısı ile elde edilen veriler, baloncukların birleşme/kırılma işleminin gerçekçi bir şekilde modellendiğini göstermiştir.

Başka bir çalışmada ise görüntü işleme yöntemi kullanılarak, dikdörtgensel baloncuk sütununda, baloncukların hız profilinin ve türbülans yayılım sabitinin ölçülmüştür [10]. Yapılan çalışmada yüksek hızlı görüntüleme sistemi ile görüntü işleme sistemi bir arada kullanılarak kesintisiz veri alımı sağlanmıştır. Yüksek hızlı görüntüleme ve görüntü işleme sistemleri daha önce yapılan çalışmalarda da baloncuk hız profilinin incelenmesinde ve baloncuk boyutunun belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada da [10] ilk olarak baloncukların kendine özgü optik özelliklerinden faydalanarak bağımsız baloncukları belirlenmesi ve izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise baloncuk üzerine uygulanan kuvvetlerden biri olan ve sıvı fazdaki türbülansın kaynaklanan türbülans dağılıma kuvvetini ölçerek baloncukların istatistiksel dağılımı tanımlanmıştır. Baloncuklar, deney düzeneğinin tabanında bulunan tekli ve çoklu enjektör sistemleri aracılığıyla sistemin içine enjekte edilmiştir. Bu enjektör sistemlerinin iç çapı 0,15 mm olarak belirlenmiştir. Bu sistemde oluşturulan baloncukların çapları ise 1 ile 4 mm arasında değişmektedir. Gaz fazın hızının düşük tutulması nedeniyle baloncukların birleşme/kırılma olayları nadiren gözlenmiştir. Böylece deneyler sadece ayırık baloncuklu akış rejiminde gerçekleştirilmiştir. Deneyde alınan görüntülerin işlenmesi sırasında eşik seviyesi ayarlama yöntemi kullanılmıştır. Bu metot kullanılarak seçilen bölgedeki baloncuklar, arka plandan ayrılarak kolayca gözlenebilmiştir. Ayrıca, görüntü işleme tekniği kullanılarak baloncukların boyut dağılımı da incelenmiştir. Burada karşılaşılan en büyük problem baloncukların bir kısmının küresel olduğu kadar bir kısmının da eliptik bir yüzeye sahip olmasıdır. Görüntü işleme sırasında eliptik yüzeye sahip baloncukların boyutları bulunurken önce kenar algılama (edge detection) ve eşik seviyesi ayarlama yöntemleri kullanılmış daha sonra

baloncukların merkezindeki beyaz deliklerin doldurulması (white hole filling method) ile baloncuklar belirgin hale getirilmiştir. Son olarak da eliptik baloncukların uzun ve kısa çapları belirlenmiştir. Eliptik yüzeye sahip bir baloncuğun gözlenemeyen üçüncü boyuttaki çapı ise, uzun çapına eşit olduğu varsayılmıştır.

Aynı çalışmada gerçekleştirilen deneylerde, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu olan CFX ile modellenmiştir. Yapılan modellemelerde ortalama zaman değerlerinin kullanıldığı bir Eulerian-Eulerian modeli olan akışkan çifti (two-fluid) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonunda görüntü işleme metodu kullanılarak, baloncuklu çift fazlı akışta kullanılabilecek alternatif bir baloncuk izleme algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma, sütundaki baloncukların sayısı arttığında dahi baloncukların merkezindeki parlak noktanın izlenerek her bir baloncuğun takip edilebilmesine olanak sağlamıştır. Bu metodla da baloncukların hızlarının dağılımı başarılı bir şekilde ölçülebilmektedir. Bununla beraber, geliştirilen teknik kullanılarak baloncukların yatayda yaptıkları yer değiştirmeler istatistiksel olarak incelenmiş ve sonuç olarak türbülans yayılım sabiti hesaplanmıştır. CFX modelinin sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçların kabul edilebilir derecede birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar yayılım katsayısının, modellemede kullanılan korelasyonun verdiği yayılım katsayısından daha fazla olduğunu göstermiştir.

Sürekli baloncuklu akışın incelendiği bir çalışmada [11], Fluent programında VOF ve CSF yöntemleri kullanılarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellerin analizleri gerçekleştirilmiştir ve bunların sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. 2 boyutlu ve 3 boyutlu modeller için silindirik bir geometride ve durgun suda, enjekte edilen gaz fazın hızının ve enjektör çapının baloncuk boyutuna ve baloncuğun yükselme hızına etkisi incelenmiştir. Modellenen baloncuk sütununun çapı 200 mm, yüksekliği de 1 m'dir. Çalışmada Navier-Stokes denklemlerine bağlı olarak VOF yöntemi kullanılmıştır. Basınç-hız birleşimi yöntemlerinden "PISO" (Pressure-implicit with splitting of operators) metodu kullanılmıştır. Yüzey gerilimi sabit kabul edilmiştir (0,072N/m) ve türbülans model olarak k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Momentum denkleminin çözümü için birinci dereceden akışkan yönü farklar yöntemi, basınç için ise "PRESTO" (Basınç-hız enterpolasyon) yöntemi kullanılmıştır.

Gaz fazın hızının baloncuk boyutuna olan etkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen modellerin sonuçlarına göre, gaz fazın hızının artması ile baloncuk boyutunun arttığı gözlenmiştir. Ayrıca gaz fazın hızı arttığı durumda baloncuklar zikzak hareketi oluşturarak yükselmiştir. Bu davranışın açıklaması ilk olarak meydana gelen baloncuğun arkasından oluşan baloncuklar üzerinde, duvar kuvveti ve diğer yüzey kuvvetlerinin daha az etkili olmasıdır sonucuna varılmıştır. Ayrıca 3 boyutlu olarak gerçekleştirilen modellerde enjekte edilen ilk baloncuğun yükselme hızı 2 boyutlu modellerdeki baloncukların hızından daha fazla olduğu görülmüştür. Hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu modellerin sonuçları Deckwer deneysel korelasyonu ile karşılaştırıldığında 3 boyutlu modelin sonuçlarının Deckwer korelasyonunun [12] sonuçlarına daha yakın olduğu görülmüştür. Bu karşılaştırmaya dayanarak 3 boyutlu baloncukların meydana getirdiği anaför etkisinin 2 boyutlu modelde doğru oluşturulamadığı sonucuna ulaşılmıştır ve baloncuk yükselme hızı ve hidrodinamik karakteristiğinin incelendiği problemler için 3 boyutlu modelleme önerilmiştir.

Gaz dağıtıcısının çapı değiştirilerek gerçekleştirilen 2 boyutlu ve 3 boyutlu modellerde gaz dağıtıcısının çapı arttıkça baloncukların hızının da arttığı görülmüştür. Gaz dağıtıcısının çapının 20 mm olduğu durumda hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu modellerin Deckwer korelasyonunun sonuçlarına uymadığı görülmüş ve bunun sebebinin Deckwer'in çalışmasında birden fazla gaz dağıtıcısı kullanılması olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen modeller, daha önce yapılmış deneyler ve çıkarılan korelasyonlar ile karşılaştırılmış ve sonuç olarak 3 boyutlu modellerin sonuçlarının bu deney ve korelasyon sonuçlarına yakın olduğu görülmüştür.

2.1 Literatür Araştırmasının Sonucu

Bu tezde kullanılmak üzere tasarlanan deney düzeneği, hava enjektör sistemi, ölçüm sistemleri, kullanılan akışkan ve bu akışkanın özellikleri, CFD analizi için uygulanan yöntemler, gözlem ve analiz yöntemleri bir önceki kısımda bahsedilen literatür araştırmalarının incelenmesiyle belirlenmiştir.

Beşinci, altıncı ve yedinci referanslarda, deneylerde kullanılan düzeneğin dikdörtgensel bir geometriye sahip olduğundan behsedilmiştir. Bu çalışmalarda silindir şeklinde bir deney düzeneği kullanılmamasının sebebi hızlı kamera ile görüntü elde edilmesi sırasında derinliğin farklı olması nedeniyle elde edilen görüntüler üzerinde görüntü işleme yöntemiyle analiz edildiğinde, doğru sonuçlara ulaşılamamasıdır. Dikdörtgensel bir geometri kullanıldığı takdirde ise hızlı kamera ile elde edilen görüntülerde derinlik her bölgede aynıdır ve bu durumda görüntü analizi yapıldığında doğru sonuçlar elde edilebilecektir. Bununla birlikte bu çalışmalar ile dördüncü ve sekizinci referanslardaki çalışmalarda kullanılan deney düzeneklerinin boyutları incelenerek bu tezde kullanılan deney düzeneğinin boyutları belirlenmiştir. Üçüncü, altıncı ve yedinci referanslardaki çalışmalardan, gerçekleştirilen gözlemlerin hızlı kamera kullanarak gerçekleştirildiği öğrenilmiştir. Diğer çalışmalarda Parçacık Hızı Görüntüleme (PIV) sistemleri de kullanılmıştır fakat bu tezde, hali hazırda Hacettepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Otomotiv Programı'nda bulunan bir hızlı kamera kullanılmıştır. Hızlı kamera ile elde edilen görüntülerin incelenmesi için ise üçüncü ve beşinci referanslardaki çalışmalarda kullanılan yöntemler kullanılmıştır. Görüntü işleme programı, Hacettepe Üniversitesi tarafından sağlanan "National Instruments Vision Assistant" programı [13] ile gerçekleştirilmiştir. Üçüncü, dördüncü, altıncı ve yedinci referanslarda verilen çalışmalarda kullanılan baloncuk enjektör sistemleri incelenerek ve bu tezde oluşturulan baloncuk boyutları göz önünde bulundurularak deney düzeneğinde kullanılan enjektör sistemi tasarlanmıştır.

Bu tezde kullanılan baloncuk çapları 1,5 – 3,3 mm arasındadır. Saf su ile gerçekleştirilen deneylerde baloncukların küreselliklerini koruyamadıkları görülmüştür. Bunun sonucu olarak da görüntü işleme yöntemleri ile baloncuk görüntü oranının hesaplanmasında güçlük yaşanmıştır. Bu nedenle literatürde baloncuk sütunu deneylerinde sadece yüzey gerilimini değiştirmek amacıyla gliserol, sıvı sabun vb. bazı yüzey aktif maddeler deneyde kullanılan suya eklenmiştir. Bu tezde ilk olarak saf su kullanılmıştır fakat görüntü işleme sırasında baloncukların yatay ve dikey çaplarının ayırt edilmesi mümkün olmadığı için sabunlu su kullanılmasına karar verilmiştir ve bütün deneylerde sabunlu su kullanılmıştır.

Dördüncü, beşinci, altıncı, yedinci ve sekizinci referanslardaki çalışmalarda kullanılan nümerik çözüm yöntemleri incelenmiş ve bu tezde modellenmek istenen sistem için uygun olan çözüm yöntemleri ve kabuller seçilmiştir. Sekizinci referansta 3 boyutlu modellemenin 2 boyutlu modellemeye üstünlüğünden bahsedilmiştir, fakat bu tezde 2 boyutlu modelleme kullanılmıştır. Bunun sebebi, ilk olarak sekizinci referanstaki çalışmada akışkanın durgun olmamasıdır ve bu nedenle türbülans akışın gerçekleşmesidir. Bu tezde, deneyler durgun suda yapıldığı için 3 boyutlu modellemeye ihtiyaç duyulmamıştır.

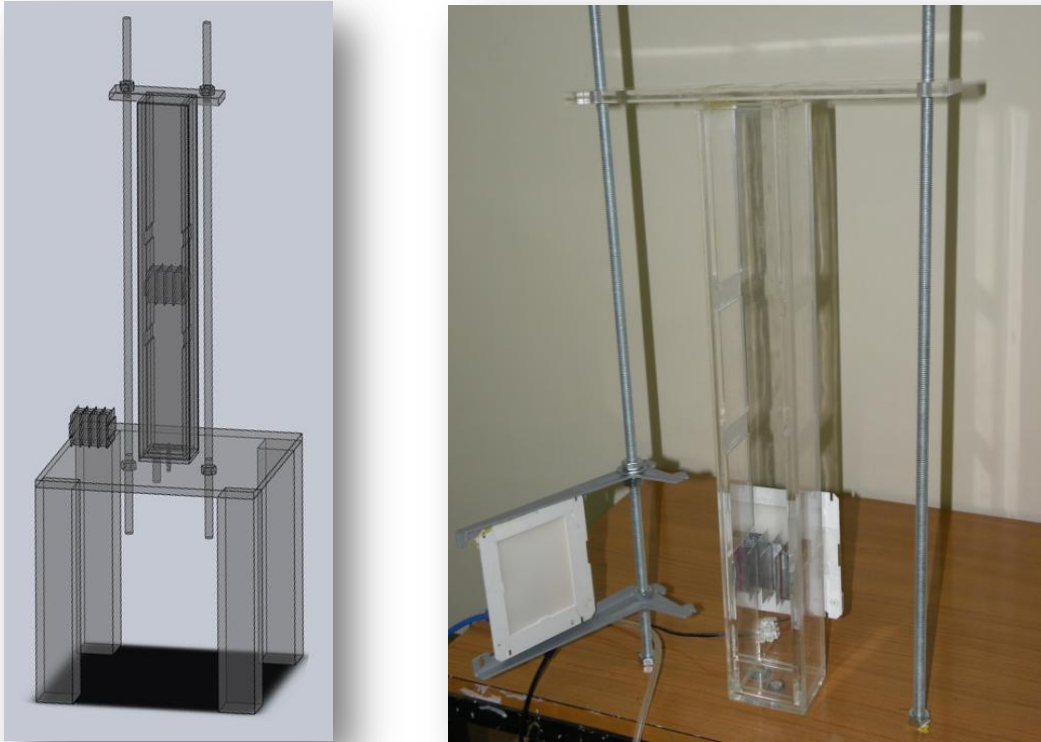
Sonuç olarak bu tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmada ve nümerik analizlerde tasarım, ölçüm yöntemleri, analiz yöntemleri, çözüm yöntemleri ve kabuller literatürde daha önce gerçekleştirilen benzer çalışmaların araştırılmasıyla ortaya konmuştur. Bu tezde gerçekleştirilen deneylerde hava-su kullanılması, deney düzeneği içerisinde herhangi bir akışın olmaması (durgun su) ve deneylerin atmosferik basınçta gerçekleşmesi deneyleri basitleştirmek amacıyla. Hava-su kullanılarak kütle transferinin engellenmesi ve durgun su kullanarak türbülans modellerin kullanılmaması bu tezde gerçekleştirilen deneylerin kolaylıkla yapılabilmesine neden olmuştur. Bunun yanı sıra, akış ve baloncuk-su etkileşimlerinin yalnızca kanal daralmasının etkileri görülebilecek şekilde basitleştirilmesine çalışılmıştır.

İleride gerçekleştirilebilecek çalışmalarda kütle ve enerji transferi ile türbülans modeller hesaba katılarak daha karmaşık deney düzenekleri kurulabilir ve nükleer santral akış kanalları için daha gerçekçi gözlemler yapılabilir.

3 DİKEY BALONCUKLU AKIŞA KANAL DARALMASININ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

3.1 Deney Düzeneği

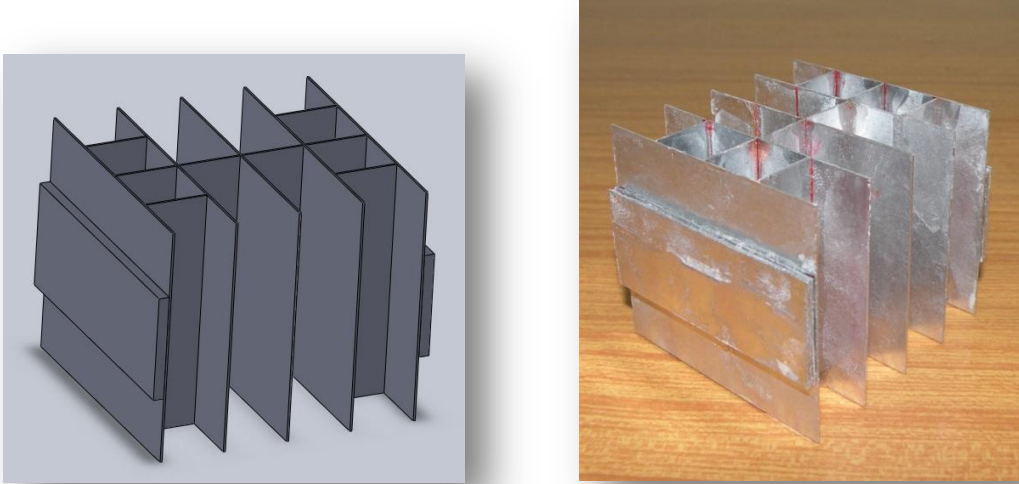
Bu tezin amacı olan kanal daralmasının baloncuklu dikey akışa etkisini incelemek amacıyla kurulan deney düzeneği, plastik cam malzemeden üretilmiş bir dikdörtgen sütundur. Tasarlanan deney düzeneğinin genişliği 72 mm, derinliği 62 mm ve yüksekliği de 500 mm'dir (Şekil 2). Bu geometri literatürdeki benzer çalışmalar incelenerek oluşturulmuştur. Silindir geometri yerine dikdörtgen prizması seçilmesinin sebebi ise aydınlatma ya da dışarıdan kaynaklı yansımaları ve derinlik etkisini engellemektedir. Plastik cam malzeme ise ışık geçirgenliği yüksek (kamera ile görüntüleme için ideal) ve dayanıklı bir malzeme olduğu için seçilmiştir.



Şekil 2 Deney düzeneğinin tasarım ve gerçek görüntüleri.

Deney düzeneği her iki kenarından demir çubuklar ile masaya monte edilmiştir. Böylece gözlem sırasında herhangi bir titreşimin oluşması engellenmiştir. Bununla birlikte gözlem yapılacak bölge arkadan ve önden aydınlatılmıştır. Böylece

baloncukların yakıt ayıracına gelmeden önce ve yakıt ayırıcının bölümleri arasından geçerken görüntülerinin rahatlıkla alınabilmesi sağlanmıştır. Aydınlatma sistemi iki adet dikdörtgen led ekrandan oluşmaktadır ve her bir led aydınlatma 12 voltluk bir AC adaptör ile çalışmaktadır. Yakıt ayıracı alüminyum malzemesinden üretilmiştir ve lazer ile kesilip güçlü bir yapıştırıcı ile bir araya getirilmiştir (Şekil 3). Yakıt ayırıcının yüksekliği 45 mm, genişliği ve derinliği 50 mm'dir. Bu değerler FLECHT - SEASET deneylerinde kullanılan yakıt ayırıcının boyutlarıdır [14]. Baloncuklar, deney düzeneği içerisine 0,15 ile 1 mm aralığında iç çapa sahip şırınga iğneleri aracılığıyla enjekte edilmiştir. Baloncukların enjekte edilmesi için akvaryum tipi bir kompresör kullanılmıştır. Kompresör tarafından verilen hava bir selenoid vana ile kontrol edilerek dikdörtgen sütun içerisine enjekte edilmektedir.



Şekil 3 Yakıt ayırıcının tasarımı ve gerçek görüntüsü.

Gerçekleştirilen deneylerde yüksek hızlı bir kamera kullanılmıştır ve alınan görüntüler bir görüntü işleme programı kullanılarak incelenmiştir. Görüntülerin incelenmesi ile baloncuk yatay ve dikey çapları bulunmuştur ve baloncuk görüntü oranı hesaplanmıştır. Enjekte edilen baloncukların çapı 1,5 – 3,3 mm arasında değişmektedir (Standart bir basınçlı su reaktöründe yakıt ile yakıt ayıraçları arasında oluşan baloncuk çapı 0,18-1,24 mm arasındadır). Deneyde deiyonize su (damacana suyu) kullanılmaktadır. Böylece baloncuk davranışını etkileyecek parçacıkların deneyde kullanılan suyun içinde bulunması önlenmiştir. Baloncukların küresel bir şekil alarak yükselmelerini sağlamak için suya bir miktar sıvı sabun

eklenmiştir. Bu sayede suyun sadece yüzey gerilimi değiştirilerek (azaltılmıştır) baloncukların küresel kalmaları (gözlem ve analiz için uygun hale gelmesi) sağlanmıştır.

3.1.1 Deneyde kullanılan suyun özellikleri

Bu çalışmada kullanılan sabunlu suyun yüzey gerilimi Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümüne ölçtürülmüştür (0,0292 N/m). Bu değer Fluent programı kullanılarak oluşturulan modellerde kullanılmıştır. Kullanılan suyun diğer özellikleri Çizelge 1’de listelenmiştir.

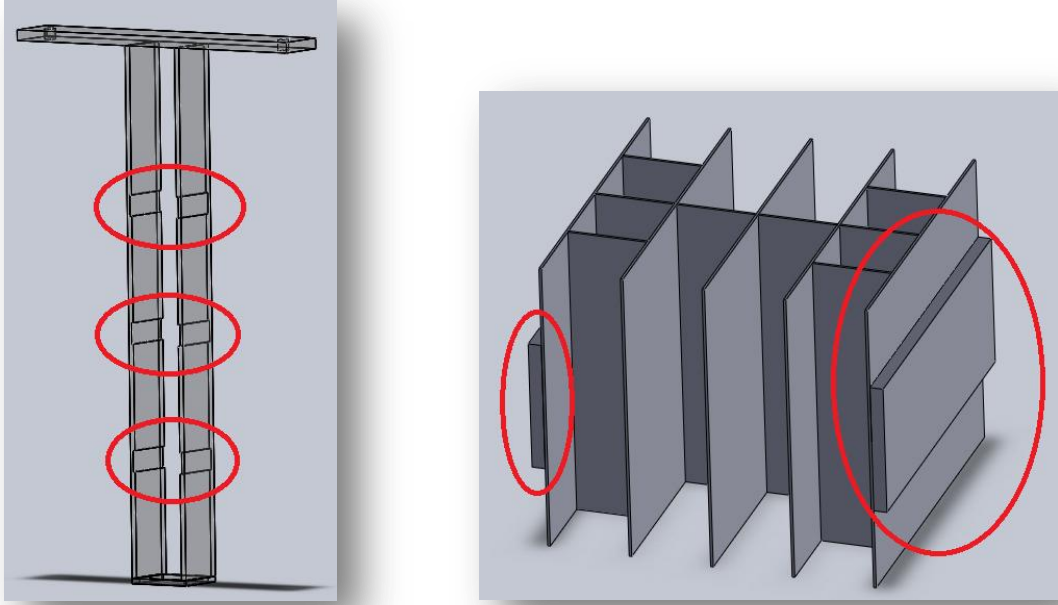
Çizelge 1 Saf suyun ve deneyde kullanılan sabunlu suyun özellikleri.

	Su	Sabunlu Su
Sıcaklık (°C)	20	20
Yoğunluk (kg/m ³)	998,3	998,3*
Viskozite Katsayısı (kg/m-s)	0,001003	0,001003*
Yüzey Gerilimi (N/m)	0,0728	0,0292

*Sabunlu suyun yoğunluğunun ve viskozite katsayısının saf suyunki ile aynı olduğu kabul edilmiştir.

3.1.2 Ölçüm Alanı

Gerçekleştirilen deneylerde yakıt ayıracını farklı yüksekliklerde etkisinin incelenmesi için yakıt ayıracının ve deney düzeneğinin kenarlarına birbirine geçmesini sağlayacak bir soket sistemi oluşturulmuştur (Şekil 4). Yakıt ayıracı, gerçekleştirilen deneylerde hava enjektöründen 75 mm yukarı yerleştirilmiştir. Böylece hızlı kamera ile görüntülenen bölge yakıt ayıracının altında ve üstünde 10 mm bırakacak şekilde yaklaşık olarak 65 mm x 80 mm olarak belirlenmiştir. Ölçüm alanının belirlenmesinde hızlı kameranın odak mesafesine ve aydınlatmanın etkisine dikkat edilmiştir.



Şekil 4 Yakıt ayırıcı tutma aparatı ve üzerindeki bağlantı noktaları (a), yakıt ayırıcı üzerindeki soket tasarımı (b).

3.1.3 Ölçüm Aleti ve Görüntü İşleme Programı

Bu çalışmada kullanılan 75 fps (frame per second/saniyedeki görüntü sayısı) yüksek hızlı kamera Hacettepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü Otomotiv Programı'na aittir. Görüntülerin işlenmesi için kullanılan program ise (NI Vision Assistant) Hacettepe Üniversitesi'ne lisanslıdır. Gözlemlerde kullanılan kamera, "IDS Ueye" markalı süper hızlı kameradır (Şekil 5a). Kameraya monte edilmiş bir Pentax marka objektif ile görüntüler elde edilmiştir (Şekil 5b). Bu objektifin özellikleri Çizelge 2'de listelenmiştir.



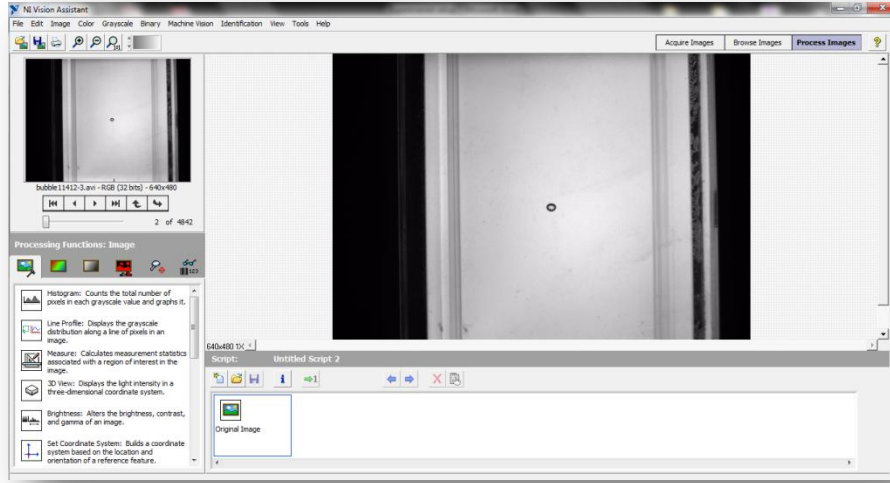
Şekil 5 (a) Kamera, **(b)** Objektif

Çizelge 2 C1614-M 16mm 1:1.4 (KP) Objektif Özellikleri [15]

Fiziksel Özellikler	Boyutlar:	29,5 mm X 33,2 mm
	Ağırlık:	63 gram
	Montaj Parçası:	C-Mount (1-32 UN-2A)
	Filtrenin vida boyutu:	27 mm, P = 0,5 mm
Optik Özellikler	Odak Uzaklığı:	16 mm $\pm 5\%$
	Maksimum Diyafram Açıklığı Oranı:	1:1,4
	İris Mesafesi:	F/1,4 den F/16'ya
	Görüş Açısı:	Diagonal 38,28°
		Yatay 30,97°
		Dikey 23,41°
	Resim Formatı:	8,8 mm X 6,6 mm
	Odak Mesafesi:	Sonsuzdan 0,25 mm'ye
	Arka Odak Uzunluğu:	14,61 mm
	Bağlantı Arka Uzunluğu:	17,526 mm $\pm 0,05$ mm
Mekanik Özellikler	Odak Mekanizması:	Düz Helezon
		Dönüş Açısı 154,3°
		Dönüş Torku 0,2 N cm'den 7,0 N cm'ye
		Odak halkası, 3 bağlantı vidası ile her pozisyonda sabitlenebilir
	İris Mekanizması:	Mandalsız
		Dönüş Açısı 89,3°
		Dönüş Torku 0,5 N cm'den 7,0 N cm'ye
		İris halkası, 3 bağlantı vidası ile her pozisyonda sabitlenebilir
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-20°C'den +50°C'ye	

Çizelge 2'de özellikleri verilen hızlı kamera ile elde edilen görüntüler "NI Vision Assistant" programı ile incelenmiştir. NI Vision Assistant programı, bir hareketli görüntü dosyasından tek bir görüntü seçilerek o görüntü üzerinde ölçme, renk eşik seviyesi değiştirme, objeleri silme-yoğunlaştırma-seyreltme gibi işlemlerin

uygulanmasına ve istenilen veriye ulaşılmasına izin veren bir görüntü işleme programıdır (Şekil 6).



Şekil 6 NI Vision Assistant programı arayüzü.

Hızlı kamera ile elde edilen video Vision Assistant programı ile analiz edilirken ilk olarak istenilen görüntü seçimi yapılmaktadır. Görüntü işleme programının ilk menüsünde görüntü işleme fonksiyonları bulunmaktadır. Bu fonksiyonların işlevleri ile ilgili detaylı bilgi ekler bölümünde verilmektedir.

4 ÖLÇÜM YÖNTEMİ VE GÖRÜNTÜLERİN İNCELENMESİ

Bu kısımda, deney düzeneğinin hazırlanışı, deneye başlamadan önce yapılanlar, ölçüm yöntemleri ve elde edilen görüntülerin işlenmesi anlatılmıştır.

4.1 Deney Düzeneğinin Hazırlanışı

Gözlemler sırasında deney düzeneği tepe noktasında 50 mm boşluk kalacak şekilde sabunlu su ile doldurulmuştur. İlk gözlemde yakıt ayırıcı kullanılmadan baloncuk davranışı incelenmiştir. Bunun için yakıt ayırıcı tutma aparatı (Şekil 4a), Şekil 7’de gösterildiği gibi deney düzeneği içine yerleştirilmiştir. Yakıt ayırıcı kullanılarak gerçekleştirilen gözlemde yakıt ayırıcı dikkatlice yakıt ayırıcı tutma aparatına yerleştirilmiştir (Şekil 8). Baloncuklar deney düzeneğine enjekte edilmeden önce kompresör (Şekil 9) yüksek ayarda çalıştırılarak enjektör iğnenin

bağlı olduğu hortum içindeki su boşaltılmıştır. Şekil 10'da hızlı kamera, bilgisayar ve deney düzeneğinin yerleştirilme şekli görülmektedir.



Şekil 7 Yakıt ayırıcı tutma aparatının deney düzeneği içine yerleştirilmiş hali.



Şekil 8 Yakıt ayırıcısının, yakıt ayırıcı tutma aparatına yerleştirilmiş hali.



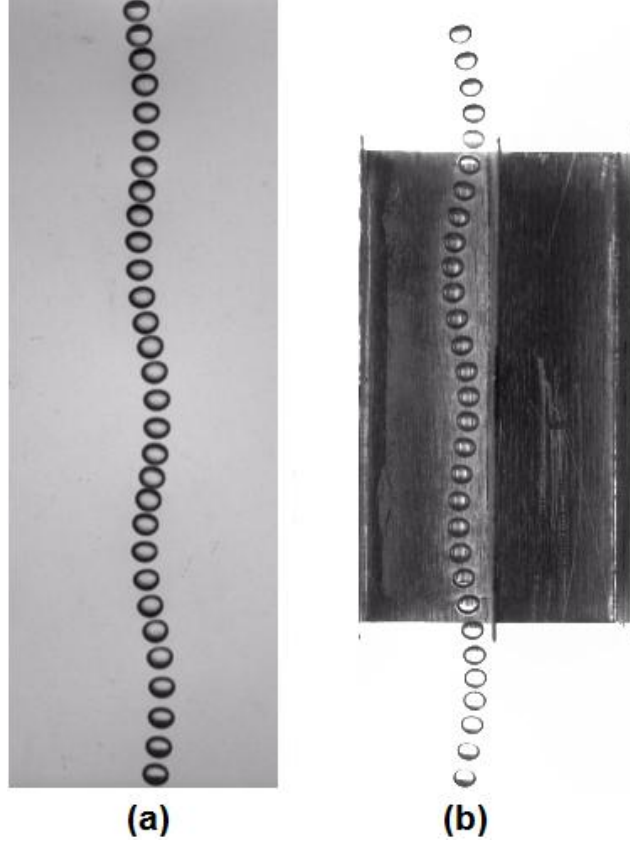
Şekil 9 Kompresör ve Selenoid vana



Şekil 10 Deney düzeneği, kamera ve bilgisayar.

Şekil 11’de tek bir baloncuğun yakıt ayırıcı olmadan ve yakıt ayırıcı bulunuyorken alınan görüntülerinin birleştirilmiş hali görülmektedir. Şekil 11’de gösterilen baloncukların hızlarının hesabı, baloncuğun bir noktadan diğerine vardığı anda geçen zaman ($1/75$ saniye) ve referans bir uzunluğa göre baloncuğun ilk

bulunduğu yer ile son bulunduğu yerde merkezleri arası uzunluğun görüntü işleme yazılımı ile ölçölüp, referans değere göre metreye çevrilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Böylece baloncuğun hız profili elde edilmiş olunur.

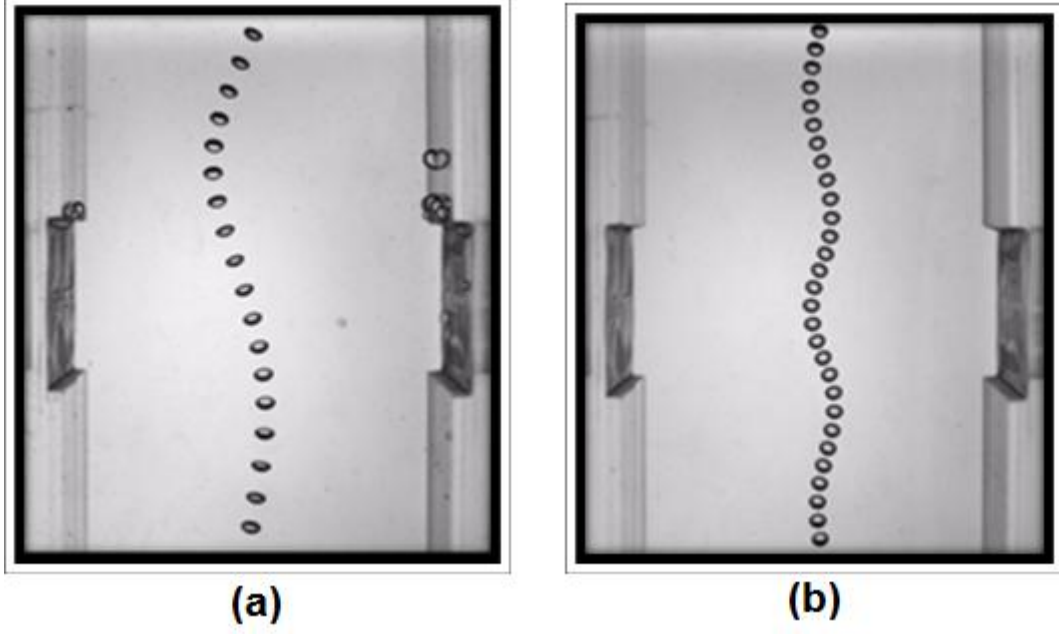


Şekil 11 (a) Tek baloncuk, (b) Yakıt ayırıcı ile tek baloncuk.

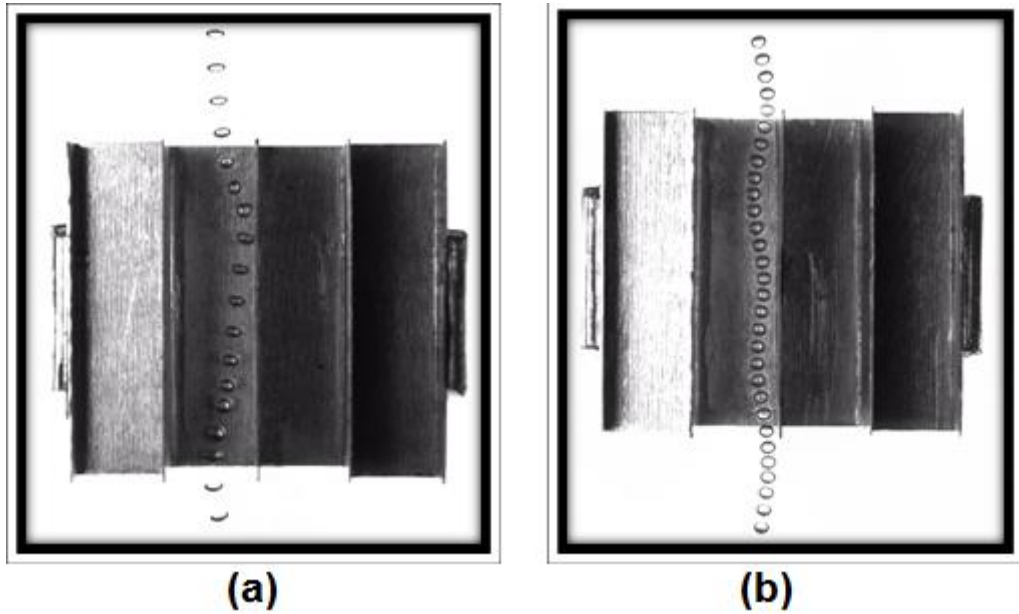
4.2 Ölçüm Yöntemi

Deneylerin gerçekleştirilmesi, sırasıyla, süper hızlı kamera ile gözlem, görüntü işleme programı ile görüntülerin seçilmesi ve ayrıştırılması ve son olarak baloncuğun belirgin hale getirilerek yatay ve dikey çapların ölçülmesi olarak belirlenmiştir. Süper hızlı kamera ile alınan görüntüler Şekil 12 ve Şekil 13'te görüldüğü gibidir. Şekil 12'de yakıt ayırıcı bulunmayan deney düzeneğinde saf su (a) ve sabunlu su (b) için baloncuğun davranışı görülmektedir. Şekil 13'te ise yakıt ayırıcılı deney düzeneğinde saf su (a) ve sabunlu su (b) için baloncuk davranışı görülmektedir. Şekil 12 ve Şekil 13, tek bir baloncuk için hızlı kamerayla çekilen

görüntülerin bir araya getirilmesi ile oluşturulmuştur. Şekil 12(a)'da duvarlarda görülen baloncuklar deney düzeneğine su doldurulması sırasında oluşmuşlardır ve ortadan yükselmekte olan baloncuğu etkilememektedirler.



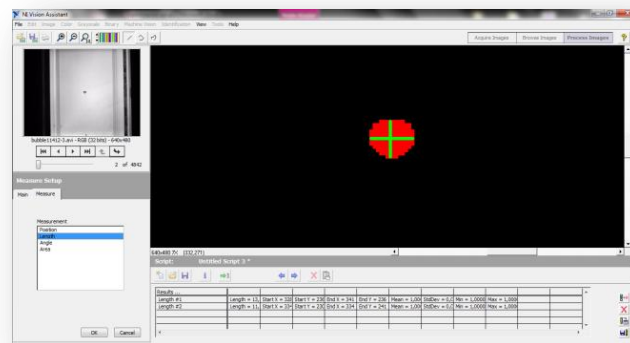
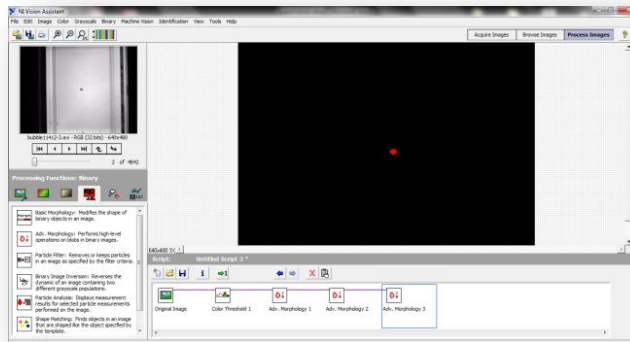
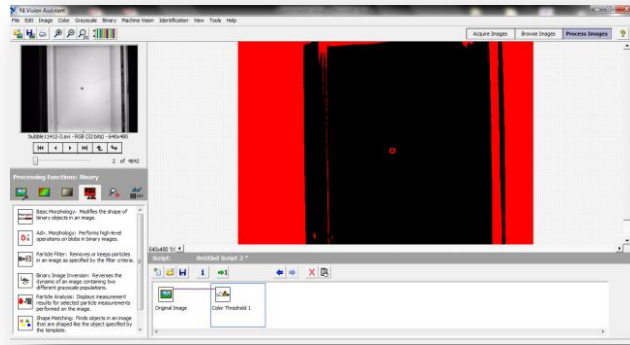
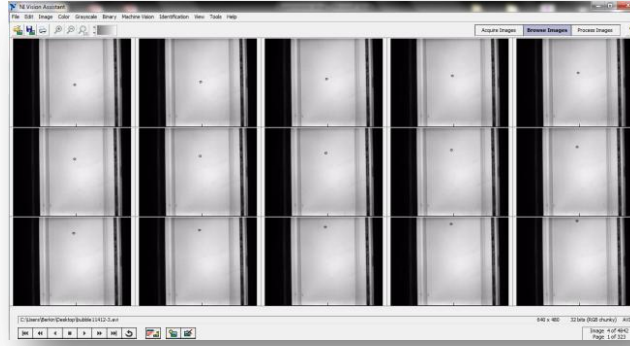
Şekil 12 (a) Saf Su, (b) Sabunlu Su



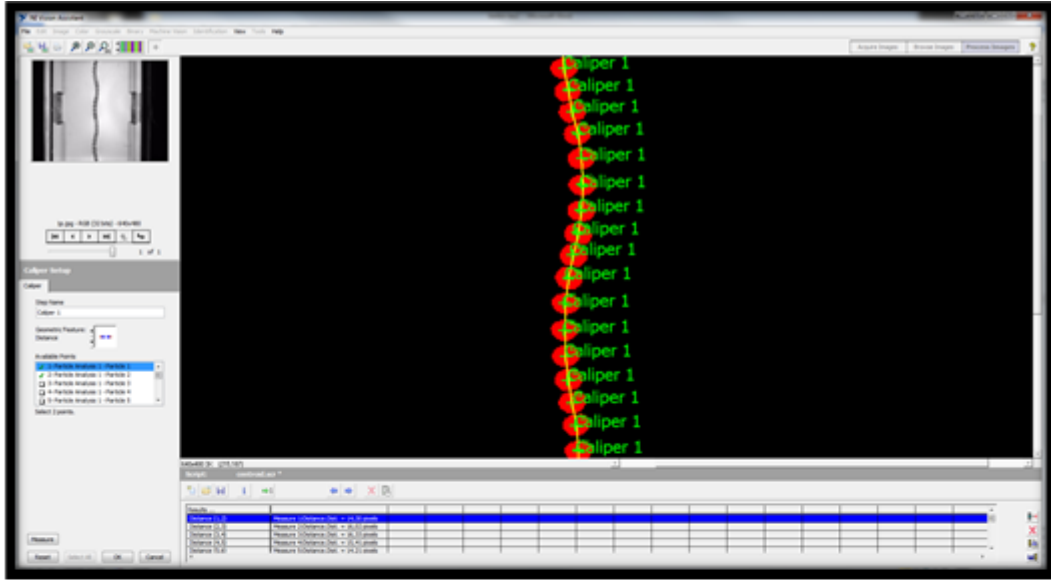
Şekil 13 (a) Saf Su, (b) Sabunlu Su

4.3 Görüntülerin İncelenmesi

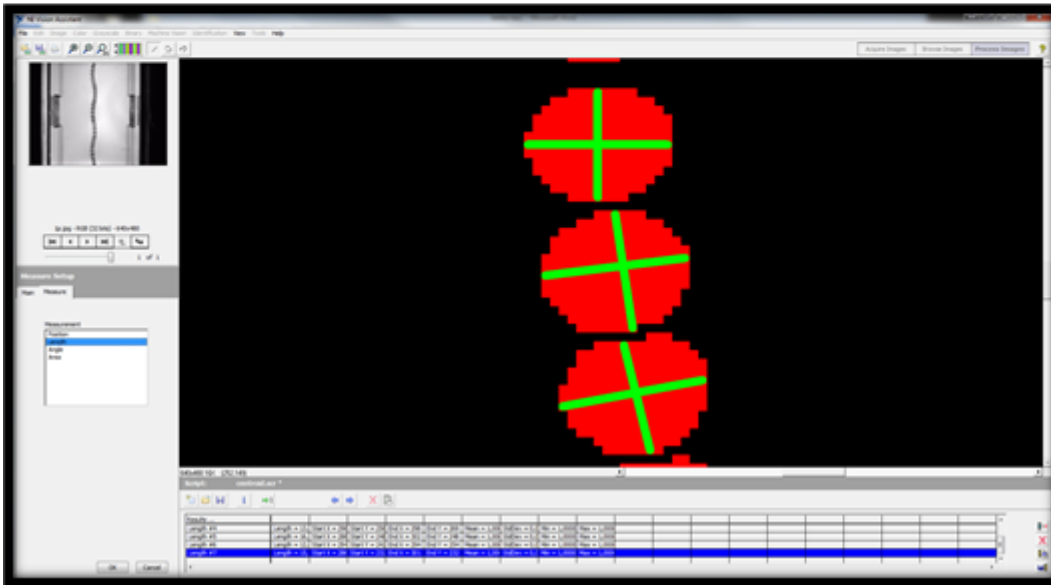
Hızlı kamera ile çekilen görüntüler görüntü işleme yazılımı ile ikili görüntü (binary image) olarak kaydedilmiştir. Daha sonra renklerin eşik seviyeleri değiştirilmiştir, bu sayede baloncuğun çerçevesi oluşturulmuştur. Bir sonraki aşamada istenilmeyen objeler (deney düzeneğinin duvarı, enjektör ucu vb.) görüntüden silinmiştir. Baloncuğu belirgin hale getirmek için çerçeve halinde olan baloncuğun içi doldurulmuş ve küçük objeler silinmiştir. Baloncuğun hızını belirleyebilmek için kalibrasyon seçeneği ile her bir baloncuk arasındaki mesafe hesaplanmıştır. Bir baloncuğun bir yerden diğerine ulaştığında geçen zaman bilinmektedir. Böylece baloncuğun deneysel hız profili çıkarılmış olunur. Teorik olarak baloncuk hızını hesaplayabilmek için baloncuk görüntü oranına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle baloncuğun her hareketinde yatay ve dikey çapları ölçülmüştür. Görüntü oranı ve kullanıldığı korelasyon ile ilgili bilgilerden ileride bahsedilecektir. Şekil 14'te ve Şekil 15'te görüntü işleme yazılımı ile gerçekleştirilen işlemlerin bir kısmı görülmektedir.



Şekil 14 Vision Assistant programı ile görüntünün incelenmesi.



(a)

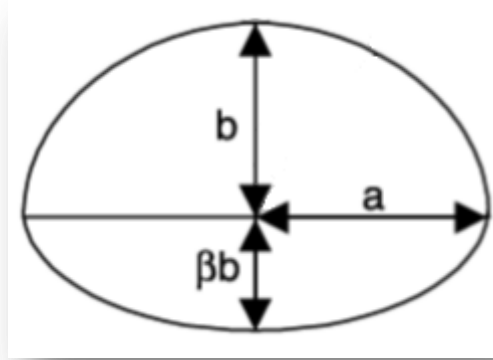


(b)

Şekil 15 Baloncuklar arası mesafenin ve yatay-dikey çapların ölçülmesi.

4.4 Baloncuk Hızının Teorik Olarak Hesaplanması [16]

Şekil olarak küreden farklı olan baloncukların çapları hesaplanırken baloncuk şekline bağlı olan değişkenlere bakılır. Şekil 16’da görüldüğü gibi bu değerler a , b ve β değişkenleridir.



Şekil 16 Kutuplardan Yassılaştırmış Baloncuk.

β değeri, baloncuk şeklinin çeşitlendirilmesini sağlamaktadır. Eğer $-1 < \beta < 0$ ise, baloncuk şekli çukurlu küresel şapka şeklinde, $\beta = 0$ ise küresel şapka şeklinde, $0 < \beta < 1$ ya da $\beta > 1$ ise bükülmüş küremsi baloncuk şeklinde ve $\beta = 1$ olduğu durumda küreye benzer bir şekildedir. Ayrıca çukurlu küresel şapka ve küresel şapka şeklindeki baloncuklar $a = b$ durumuyla da belirtilebilmektedir. Baloncuk görüntü oranı ve cephesel görüntü oranı tanımlanacak olursa, sırasıyla;

$$E = \frac{b + \beta b}{2a} \quad (2)$$

$$E_f = \frac{b}{a} = \frac{2}{1 + \beta} E = \gamma E \quad (3)$$

Bozukluk faktörü (γ);

$$\gamma = \frac{2}{1 + \beta} \quad (4)$$

Son olarak yukarıda bahsedilen değerlerle elde edilen baloncuk hacmi küre hacmine eşitlenerek, baloncuk eşdeğer çapı hesaplanır.

$$\frac{\pi D_{\text{baloncuk}}^3}{6} = \frac{2\pi}{3} (ba^2 + \beta ba^2) \quad (5)$$

$$a = \frac{D_{\text{baloncuk}}}{2E^{1/3}} = \frac{D_{\text{baloncuk}}\gamma^{1/3}}{2E_f^{1/3}} \quad (6)$$

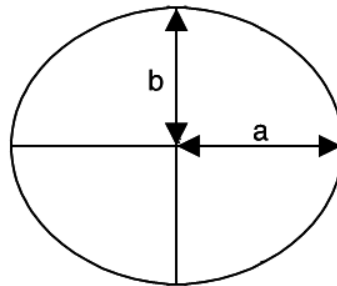
$$b = \frac{D_{\text{baloncuk}}\gamma E^{2/3}}{2} = \frac{D_{\text{baloncuk}}\gamma^{1/3} E_f^{2/3}}{2} \quad (7)$$

$$D_{\text{baloncuk}} = 2aE^{1/3} = \frac{2b}{\gamma E^{2/3}} \quad (8)$$

Küresel bir baloncuğun, yüzey gerilimi kuvvetinin baskın olduğu bir rejimde ($0,7 \text{ mm} < D_{\text{baloncuk}} < 6 \text{ mm}$) terminal hızı Tomiyama ve arkadaşlarının çalışmasıyla aşağıdaki gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$V_T = \frac{\sin^{-1}\sqrt{1-E^2} - E\sqrt{1-E^2}}{1-E^2} \times \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_l D_{\text{baloncuk}}} E^{4/3} + \frac{\Delta\rho g D_{\text{baloncuk}}}{2\rho_l} \frac{E^{2/3}}{1-E^2}} \quad (9)$$

Bu denklemde E , baloncuğun görüntü oranı, σ , yüzey gerilimi ve $\Delta\rho = \rho_l - \rho_g$ 'dir [16]. Salınan baloncuklar için bozukluk faktörü hesaplamak mümkün olmadığından baloncuk şeklinin küresmi (Şekil 17) olduğu kabulü yapılmaktadır ($\gamma = 1$). Bu durumda görüntü oranının terminal hıza etkisi $1,5 \text{ mm} \leq D_{\text{baloncuk}} \leq 5 \text{ mm}$ aralığında baloncuk çapı arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Görüntü oranının deneysel olarak her bir zaman aralığında hesaplanması ve Denklem 9'a eklenmesi ile terminal hız, V_T , birim zamandaki hız, V_z , olarak değişecektir.



Şekil 17 Küresmi baloncuk.

Bu çalışmada baloncukların hızlarının hesaplandığı denklem;

$$V_z = \frac{\sin^{-1} \sqrt{1 - E(t)^2} - E(t) \sqrt{1 - E(t)^2}}{1 - E(t)^2} \times \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_l D_{\text{baloncuk}}} E(t)^{4/3} + \frac{\Delta \rho g D_{\text{baloncuk}}}{2\rho_l} \frac{E(t)^{2/3}}{1 - E(t)^2}} \quad (10)$$

halini almıştır.

Ayrıca Denklem 10, görüntü oranının birden küçük olduğu durumda geçerlidir. Görüntü oranının birden büyük ya da bire eşit olduğu durumlarda Denklem 10 bu durumlara uygun olması için modifiye edilmiştir [17].

4.5 Yüzey Aktif Maddelerin Baloncuk Dinamiğine Etkileri [16]

Bu çalışmada gözlemlenen baloncukların görüntü oranlarının hesaplanabilmesi için baloncukların şekillerinin olabildiğince küresel ya da küresele yakın olması sağlanmıştır. Bunun için deney düzeneğine konulan deiyonize suya bir yüzey aktif madde olan sıvı sabun katılmıştır. Yüzey aktif maddeler baloncuğun büyüklüğüne göre farklı etkiler göstermektedirler. Bu çalışmada oluşturulan baloncuklara etkisi ise yüzey geriliminin azaltılmış olması ile birlikte baloncuk şekillerinin çok fazla bozulmasının engellenmiş olmasıdır.

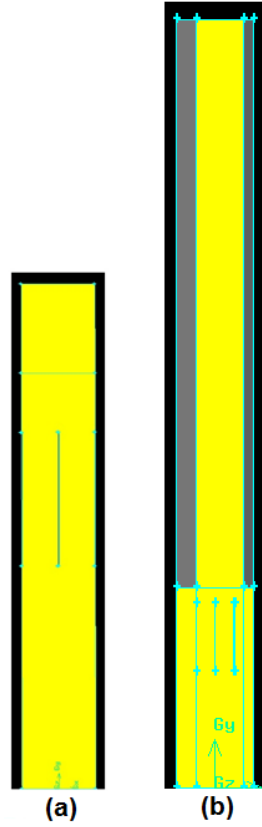
Yüzey aktif maddeler, orta büyüklükteki baloncukların şekillerindeki salınımını azaltarak baloncuk şeklinin, saf sudaki baloncuk şekline oranla, daha az değişmesini sağlamaktadır. Yani baloncuk görüntü oranı artmakta ve hızı temiz sudaki baloncuk hızına yakın olmaktadır. Bununla birlikte baloncuk şekli daha az bozulmaktadır.

Daha büyük baloncuklarda ise yüksek eylemsizlik kuvvetinden dolayı yüzey geriliminin baskın rolü ortadan kalkmaktadır.

Bunlara ek olarak yüzey aktif maddelerin kullanıldığı malzemenin yüzey pürüzlülüğü değişmekte ve bunun sonucu olarak malzeme içindeki akış düzeni değişmektedir. Bu tezde akış olmadığı için yüzey aktif maddenin malzeme üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir.

5 CFD MODELİ

Bu kısımda yakıt ayırıcının baloncuk yüzey alanına etkisinin incelendiği deneysel çalışmanın bilgisayar ortamında bir hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) programı olan Fluent ile modellenmesi anlatılmıştır. Amaç, yapılan deneylerde gözlenen baloncuk davranışının Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF) ile gerçekleştirilen modelde görülüp görülmeyeceğinin incelenmesidir. İki boyutlu modellerden ilki deney düzeneğinin ilgilenilen kısmının (%12) ikincisi ise deney düzeneğinin tamamının modellenmesi ile oluşturulmuştur (Şekil 18).



Şekil 18 CFD modelleri **(a)** ilk model, **(b)** ikinci model.

Modelin oluşturulmasında ve çözüm yöntemlerinin seçilmesinde baloncuk davranışı ile ilgili (literatür özeti kısmında verilmiştir) diğer çalışmalar incelenmiştir ve Akışkan Hacmi Yönteminin (VOF) kullanılmasına karar verilmiştir. Tezin bu kısmında VOF yöntemi kullanılarak, yakıt ayırıcının baloncuk üzerine etkisinin kolaylıkla modellenip modellenemeyeceği incelenmiştir. Bu çalışmada VOF yöntemi Euler – Euler yaklaşımının bir alt modeli olarak kabul edilmiştir. Diğer çok fazlı akış modelleri ve VOF yönteminin gelişimi ile ilgili bilgiler Ek 10,1 – 10,2 – 10,3 kısımlarında verilmektedir.

5.1 CFD Modelinin Oluşturulması ve Kullanılan Çözüm Yöntemleri

CFD modellerinde iki ayrı geometri oluşturulmuştur (Şekil 18). Bunun sebebi ilgilenilen alanın modellenmesinin çözüm için yeterli olup olmayacağını görmektir. Deney düzeneğinde baloncuk yakıt ayırıcından 75 mm uzakta enjekte edilmektedir. Fluent ile oluşturulan modelde de bu değer kullanılmıştır. Geometrik değerlerin yanı sıra basınç, sabunlu suyun etkisi (yüzey gerilimi) ve sınır koşulları gibi özellikler problemin hazırlanması ve çözüm aşamalarında hesaba katılmıştır. Oluşturulan modellerin çözümünde kullanılan yöntemler ve ayarlar detaylı olarak Çizelge 3'te listelenmiştir.

Çizelge 3 CFD modelinin çözümünde kullanılan yöntemler ve ayarlar.

Genel	- Zamana bağlı çözüm - Yer çekimi: 9,81 m/s²
Modeller	- Akışkan Hacmi Yöntemi - Örtük Cisim Kuvveti aktif
Malzemeler	- Su ve hava
Fazlar	- Hava: Birincil faz - Su: İkincil faz - Etkileşim: Yüzey gerilimi katsayısı: 0,0292 N/m, duvara yapışma etkisi aktif
Hücresel Bölge Şartları	- Çalışma yoğunluğu: Havanın yoğunluğu (en düşük yoğunluk)
Çözüm Yöntemleri	- Tekrarsız zaman ilerlemesi - Basınç – hız eşleme: “PISO” - Değişim derecesi: “Least Square Cell Based” - Basınç: “PRESTO!” - Momentum: “First Order Upwind” - Hacim oranı: Geometrik yeniden yapılandırma - Zamana bağlı formülleştirme: Birinci dereceden örtük
Hesapla	- Zaman adımları: 10⁻⁵ saniye

Çalışmanın bu kısmında, oluşturulan modellerde farklı sınır koşulları denenerek sonuçlar arasındaki farklar ve deneysel sonuçlara yakınlık incelenmiştir. İlgilenilen alanın oluşturulduğu modelde üst bölgesinin sınır koşulu “pressure outlet” olarak belirlenmiştir ve atmosferik basınca deneydeki su basıncı eklenerek basınç değeri girilmiştir. Bu modelin kenarları ilk olarak duvar sınır koşulu olarak oluşturulmuştur. Bu model kullanılarak gerçekleştirilen diğer analizde ise model kenarları simetri sınır koşulu olarak oluşturulmuştur. Bu modelde simetri sınır koşulu oluşturulmasının sebebi, baloncuğun duvar sınır koşullu modelde kenarlara yaklaşarak duvardan etkilenmesidir, ancak deney düzeneğinin geometrisi daha büyük olduğu için böyle bir etki görülmemiştir. Oluşturulan ikinci modelde deney düzeneğinin tamamı modellenmiştir ve sınır koşulları olarak kenarlarda duvar, tabanda hız girişi ve tavanda basınç çıkışı kullanılmıştır. Hesaplama gerçekleştirilmeden önce adaptasyon seçeneklerinden bölge seçilerek baloncuğun bulunduğu koordinatlar ve baloncuk yarı çapı girilmiştir. Daha sonra çözüm başlatılıp (initialize) yama seçeneğinde suyun bulunduğu bölge seçilerek hacim oranı “1” olarak, modelin üzerindeki hava ile baloncuk seçilerek hacim oranı “0” olarak belirlenmiştir. Son olarak hesaplama uygulamalarından verilerin ve görüntülerin depolanması için ayarlar yapılmıştır. Bu ayarlardan sonra modellerin çözümü başlatılmıştır.

6 VERİLER VE SONUÇLAR

Bu tezde gerçekleştirilen deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları ayrı alt bölümlerde incelenmiştir. İlk alt bölümde, deneylerin tekrarlanabilir olup olmadıkları incelenmiştir. Deneylerin tekrarlanabilirliği baloncuk davranışlarının doğru yorumlanamsı için gereklidir. İkinci alt bölümde ilk olarak, baloncukların enjektörden çıktıkları andaki hızları bir formül yardımıyla hesaplanarak deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra baloncukların terminal hızlarını hesaplamak için geliştirilen temel bir formül ile baloncukların terminal hızları hesaplanmış ve deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde son olarak, bir denklem (Denklem 10) yardımı ile baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı bulunmadığı durumda hız profilleri hesaplanarak deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Üçüncü alt bölümde ise, baloncukların yakıt ayırıcından geçerken görüntü oranlarının değişimi ve hız profilleri hesaplanmıştır ve deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır.

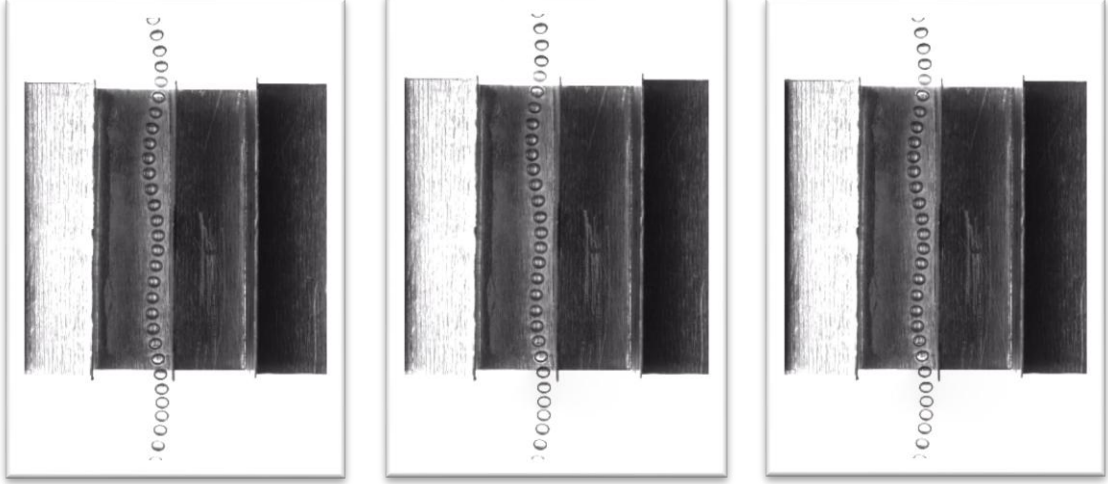
6.1 Deneylerin Tekrarlanabilirliği

Bu kısımda deneylerde oluşturulan baloncukların hızlarının, boyutlarının ve davranışlarının her bir gözlemde aynı olup olmadığı incelenmiştir. Bunun sebebi gözlemlerin daha sağlıklı olmasını sağlamak ve böylece gerçekleştirilen gözlemlerdeki baloncuk hızı ve boyutu gibi değerlerin ortalamalarının daha doğru ve tutarlı olmasını sağlamaktır. Şekil 19'da üç ayrı baloncuğun serbest yükselişleri görülmektedir. Şekilde üç baloncuğun da hızları ve boyutları aynıdır. Bununla birlikte üç baloncuğun davranışları da benzerlik göstermektedir.



Şekil 19 Hızları ve boyutları aynı üç ayrı baloncuk davranışı.

Şekil 20’de hızları ve boyutları aynı üç ayrı baloncuğun yakıt ayırıcı bulunan deney düzeneğindeki davranışları görülmektedir. Bu şekilde görülen üç ayrı baloncuğun davranışları da benzerlik göstermektedir.



Şekil 20 Hızları ve boyutları aynı üç baloncuğun yakıt ayırıcından geçişi.

Sonuç olarak, Şekil 19 ve Şekil 20’den farklı zamanlarda gözlemlenen hızları ve boyutları aynı baloncukların da benzer davranış gösterdikleri ve gözlemlerin tekrarlandığında birbirinden bağımsız sonuçların ortaya çıkmayacağı görülmüştür. Şekil 19 aynı zamanda baloncukların yakıt ayırıcı olmadığı durumlarda da akış yönünü değiştirdiklerini göstermektedir. Bu, baloncukların şekil değiştirmesinden kaynaklanmaktadır.

6.2 Genel Analiz Sonuçları

Bu bölümde ilk olarak 1,5 mm ve 2,1 mm çaplı baloncukların enjektörden çıktıkları andaki hızları Denklem 11 kullanılarak [18] hesaplanmıştır ve deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Denklem 11 ile hesaplanan enjektör çıkışı hız değerleri Çizelge 4’te görülmektedir. Bu denklemde Q , enjekte edilen havanın hacimsel hızı, d_e ise enjektör iç çapıdır.

$$U_b = \frac{Q}{\pi d_e^2/4} \quad (11)$$

Çizelge 4 1,5 mm ve 2,1 mm çaplı baloncukların Denklem 11'den hesaplanan ve deneylerden elde edilen enjektör çıkışı hız değerleri.

Baloncuk Çapı (mm)	İğne iç çapı (mm)	Q (m ³ /s)	Enjektör Çıkışı (Denklem 11) (m/s)	Enjektör Çıkışı (Deneyssel) (m/s)
1,5	0,15	1,8x10 ⁻⁹	0,097	0,100
2,1	0,30	4,9x10 ⁻⁹	0,067	0,078

Denklem 11 ile hesaplanan enjektör çıkışı hız değerlerinin deneysel değerleri ile yakın çıktığı Çizelge 4'te görülmektedir. Çizelge 4'te gösterilen sonuçların birbirlerine yakınlığının göz önünde bulundurulmasıyla, hız ölçümleri doğrulanarak baloncukların terminal hızları deneysel olarak ölçülmüştür. Bu terminal hızlar, yüzey gerilimi ve viskozite etkilerinin çok az olduğu baloncuklu akışlar için geçerli olan bir formülde (Denklem 12) kullanılarak bu çalışmada geçerli olacak bir C katsayısı bulunmuştur.

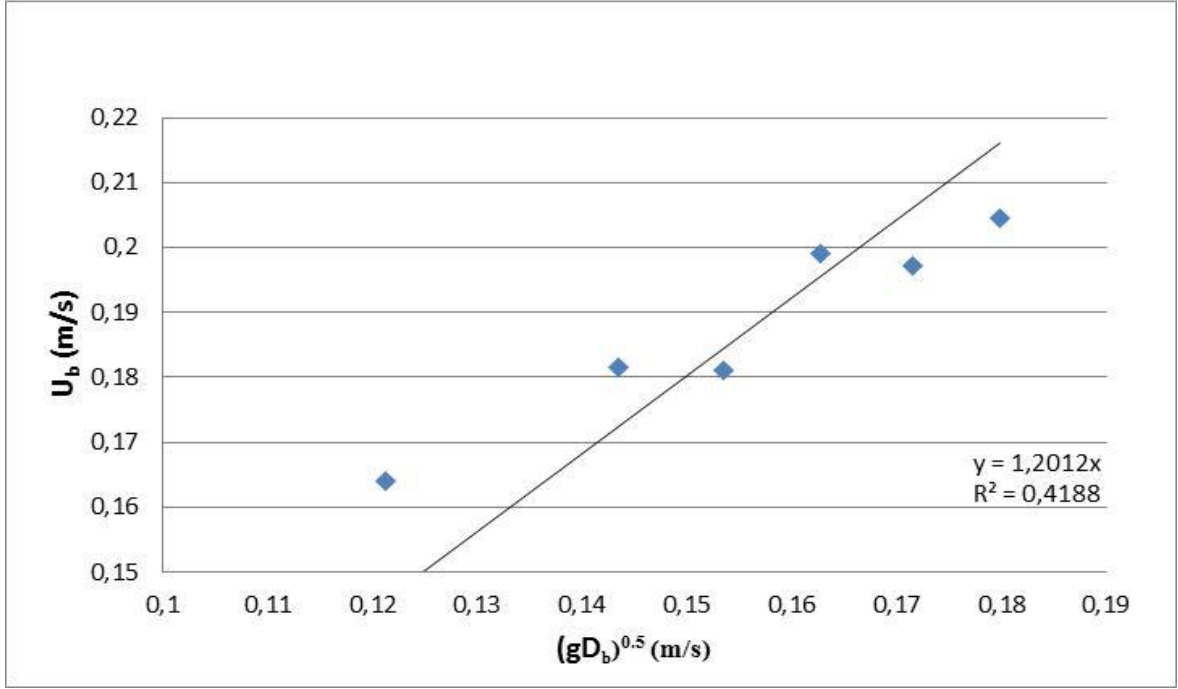
$$U_b = C\sqrt{gD_b} \quad (12)$$

C katsayısının hesaplanması için baloncukların terminal hızları deneysel olarak ölçülmüştür. Baloncukların hızları, şekil değişikliğinden dolayı, sürekli salınım yapmaktadırlar. Bu nedenle hız salınımlarının dengeye ulaştığı yerde maksimum hız değerleri terminal hız değerleri olarak kabul edilmiştir ve bu değerler kullanılarak C katsayısı hesaplanmıştır. Baloncuk çaplarına göre maksimum hız değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5 Farklı baloncuk çapları için maksimum terminal hızları.

	1,5 mm	2,1 mm	2,4 mm	2,7 mm	3 mm	3,3 mm
Maksimum Hız (m/s)	0,16	0,180	0,181	0,20	0,20	0,21

Çizelge 5'te verilen hız değerleri kullanılarak, baloncuk terminal hızına karşılık $\sqrt{gD_b}$ değeri çizilmiştir (Şekil 21) ve grafiğin eğiminden C katsayısı bulunmuştur.

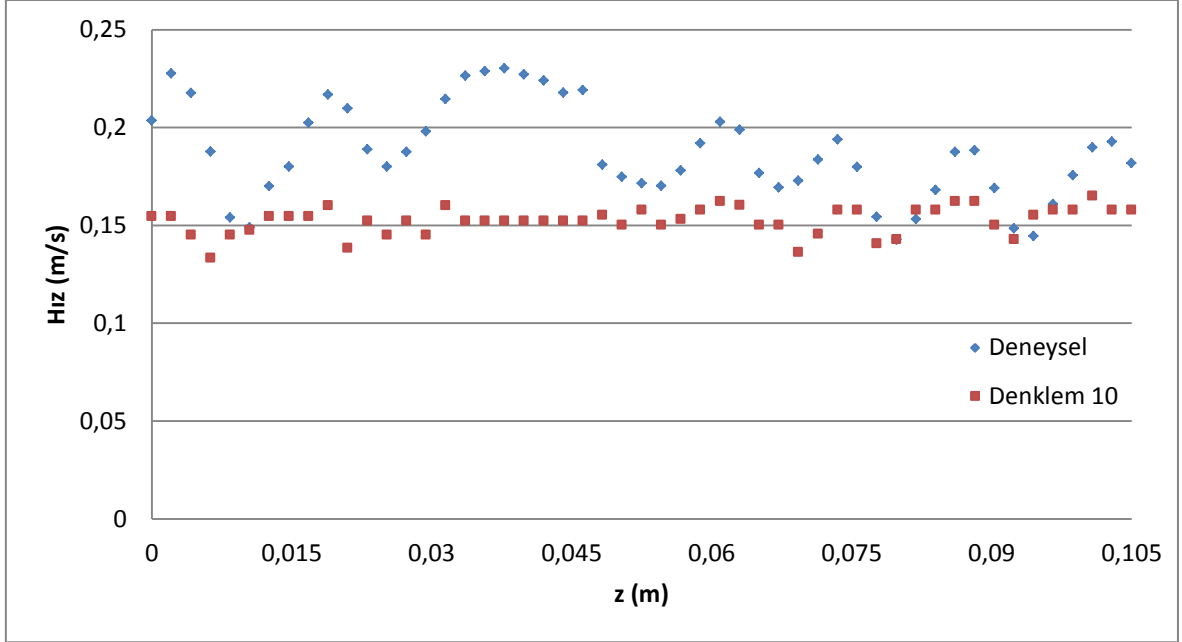


Şekil 21 Baloncuk terminal hız katsayısı hesabı.

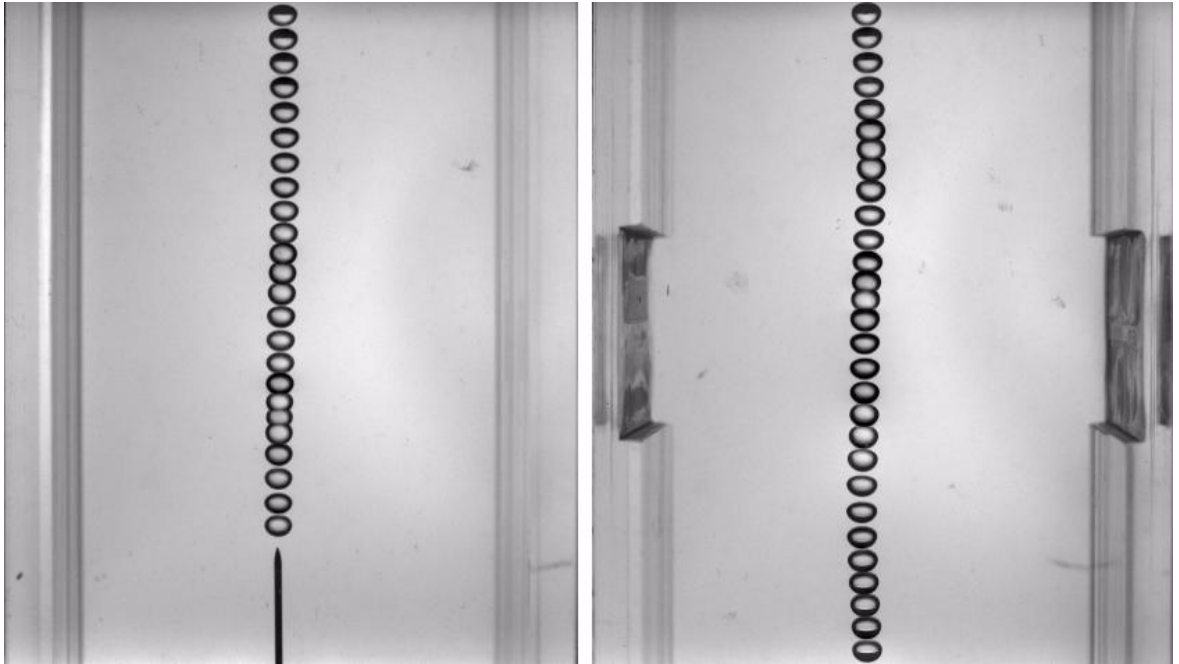
Şekil 21'e göre C katsayısı 1,2 olarak belirlenmiştir. Literatürde C katsayısı, 0,471 [19], 0,707 [20], 0,943 [21] olarak bulunmuştur. Denklem 12'nin kabulleri bu çalışmada görüntülenen baloncuklar için geçerli olmadığından Denklem 12 kullanılarak baloncuk terminal hızının hesaplanması doğru değildir. Bu çalışmada gözlenen baloncukların şekillerinin küremsi olması ve baloncuk görüntü oranının değişmesi göz önünde bulundurularak, baloncuk şekil değişiminin hıza katkısını modelleyen bir denklem (Denklem 10) bir sonraki aşamada kullanılmıştır [16]. Denklem 10, baloncuğun zikzak yaparak hareket ettiğini ve şeklinin küremsi olduğunu kabul etmektedir. Bu çalışmada da gözlenen baloncuklar da zikzak hareketi yapmaktadır ve şekilleri küremsidir.

Üçüncü bölümde, 2,7 mm, 3,0 mm ve 3,3 mm çaplı baloncukların yakıt ayırıcı bulunmadığı durumda enjektörden çıktıktan sonraki hız profilleri Denklem 10 kullanılarak hesaplanmıştır ve deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır. Denklem 10'nun kullanılması için görüntü oranının hesaplanması gerekmektedir. Görüntü oranı, baloncuğun dikey çapının yatay çapına oranıdır. Bu nedenle ilk olarak,

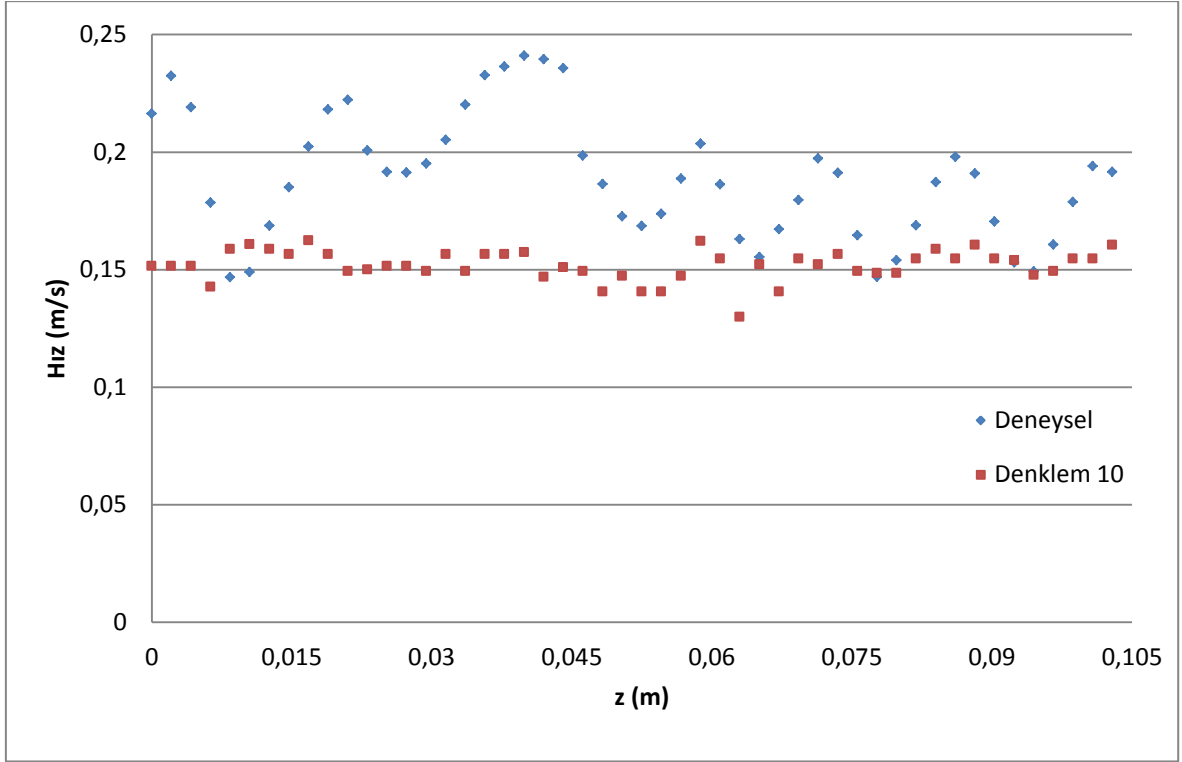
görüntü işleme programı ile baloncuğun yükselirken yatay ve dikey çapları ölçülmüştür. Daha sonra her bir hareketlerine görüntü oranları hesaplanmıştır ve Denklem 10'a yerleştirilmiştir. Denklem 10'un sonuçları ve deneysel değerler ile karşılaştırılması Şekil 22, Şekil 24 ve Şekil 26'da verilmiştir.



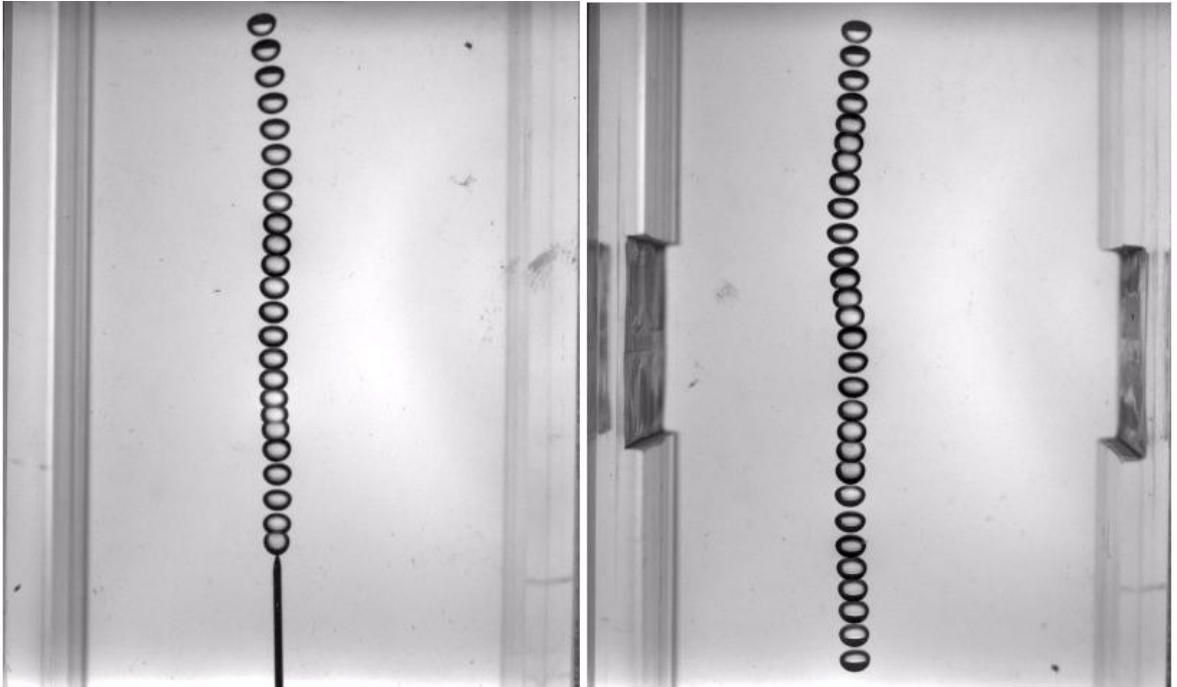
Şekil 22 2,7 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken hız profili.



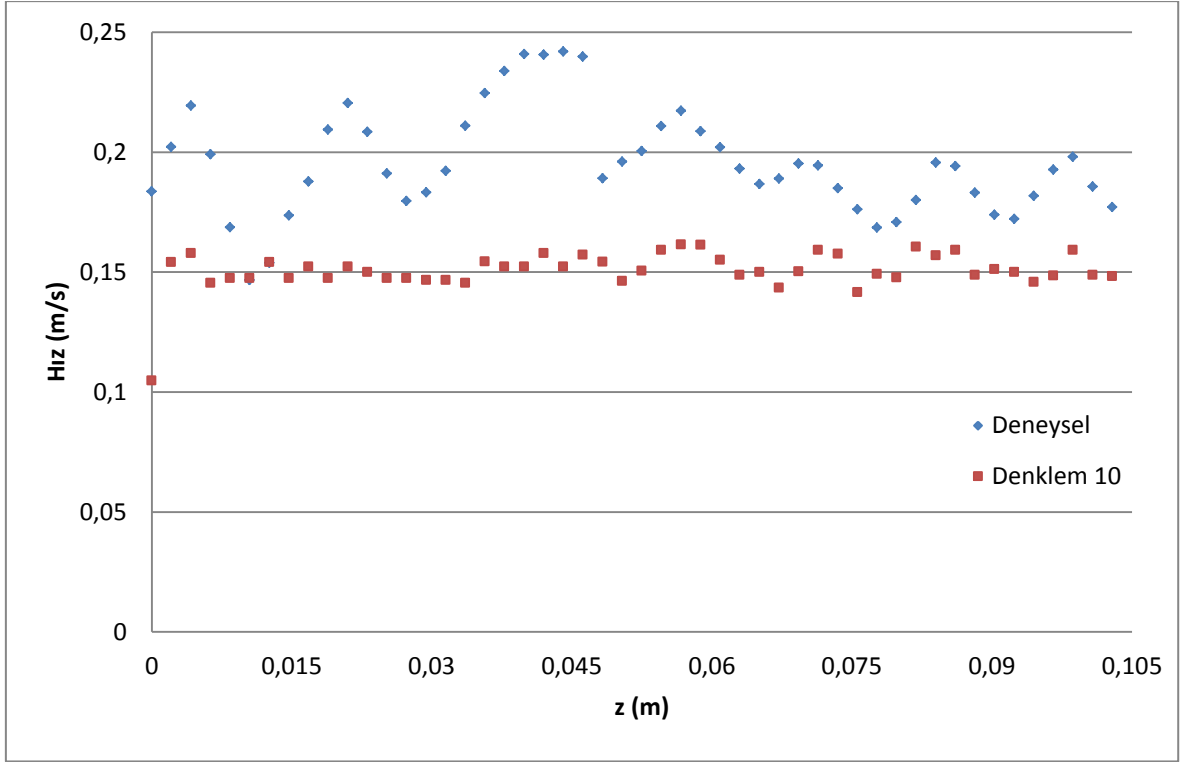
Şekil 23 2,7 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken davranışı.



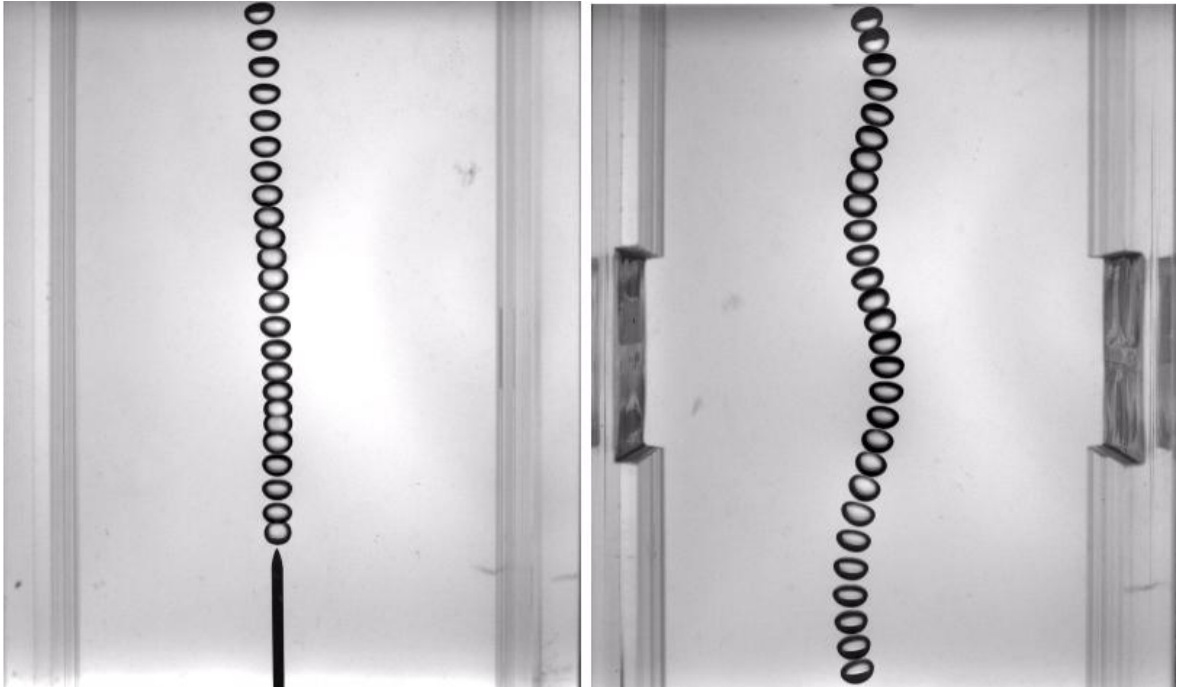
Şekil 24 3,0 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken hız profili.



Şekil 25 3,0 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken davranışı.



Şekil 26 3,3 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken hız profili.



Şekil 27 3,3 mm çaplı baloncuğun girişte ve yakıt ayırıcı yokken davranışı.

Yukarıdaki şekillerde 2,7 mm, 3,0 mm ve 3,3 mm çaplı baloncukların girişte ve yakıt ayırıcı bulunmadığı durumda ölçülen hız değerleri ile denklem sonuçları karşılaştırılmıştır. Denklem, her üç baloncuk için de hız değişiminin meydana geldiği yerleri yakalamıştır fakat denklem sonuçlarının deneysel değerleri yakalayamadığı görülmüştür. Bunun sebebi taşıma kuvveti ve sanal kütle kuvvetinin denklemde hesaba katılmamasıdır. Ayrıca deneylerde sabunlu su kullanılması hata getirmektedir. Denklem çıkarıldığı literatür çalışmasında da değerlerin tutmadığı fakat davranışın yakalandığı sonucuna ulaşılmıştır [16].

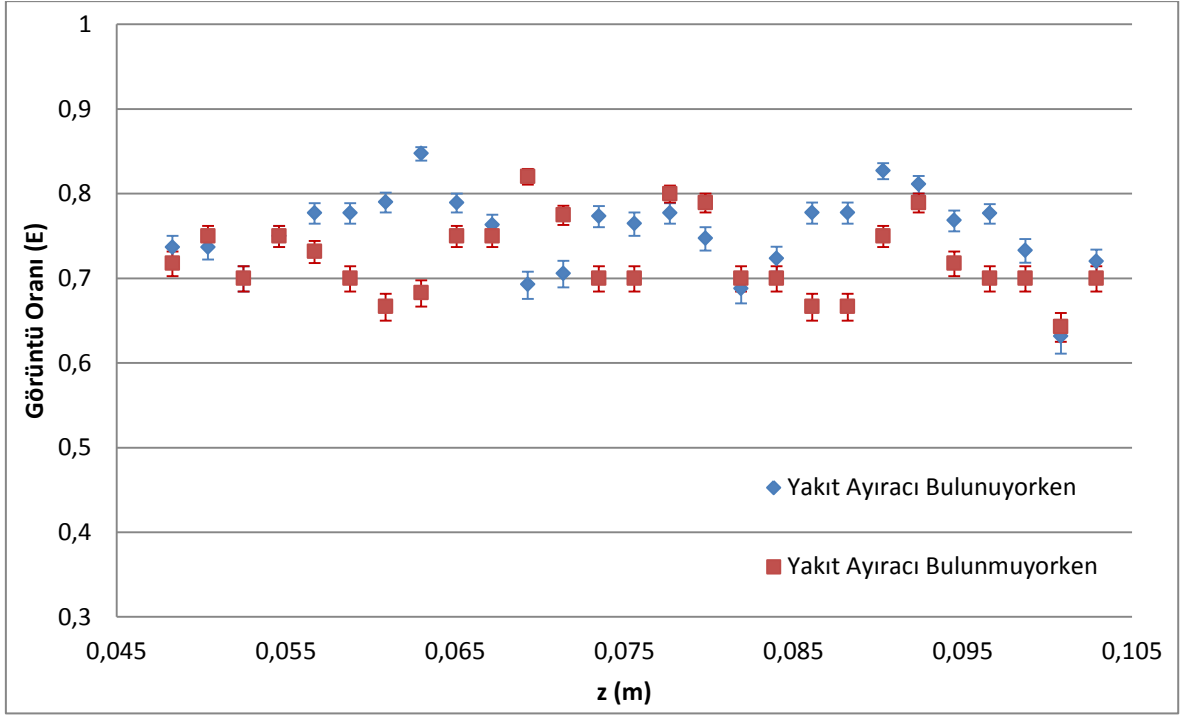
Deneysel hız ölçümlerinde meydana gelen en büyük hata değeri 3 mm/s olduğu için grafikte gösterilmemiştir. Bu hata, bir baloncuğun bir noktadan diğerine geçerken gittiği mesafenin program tarafından hesaplanması sırasında oluşmaktadır.

Bu çalışmada, kullanılan denklem baloncuk şeklinin küresellikten uzak olduğu durumda geçerli olduğu için baloncuk çapı büyüdükçe ve şeklinin daha çok bozulduğu durumda denklem sonuçlarından elde edilen hız profili, deneylerden elde edilen profile daha yakın davranış göstermektedir.

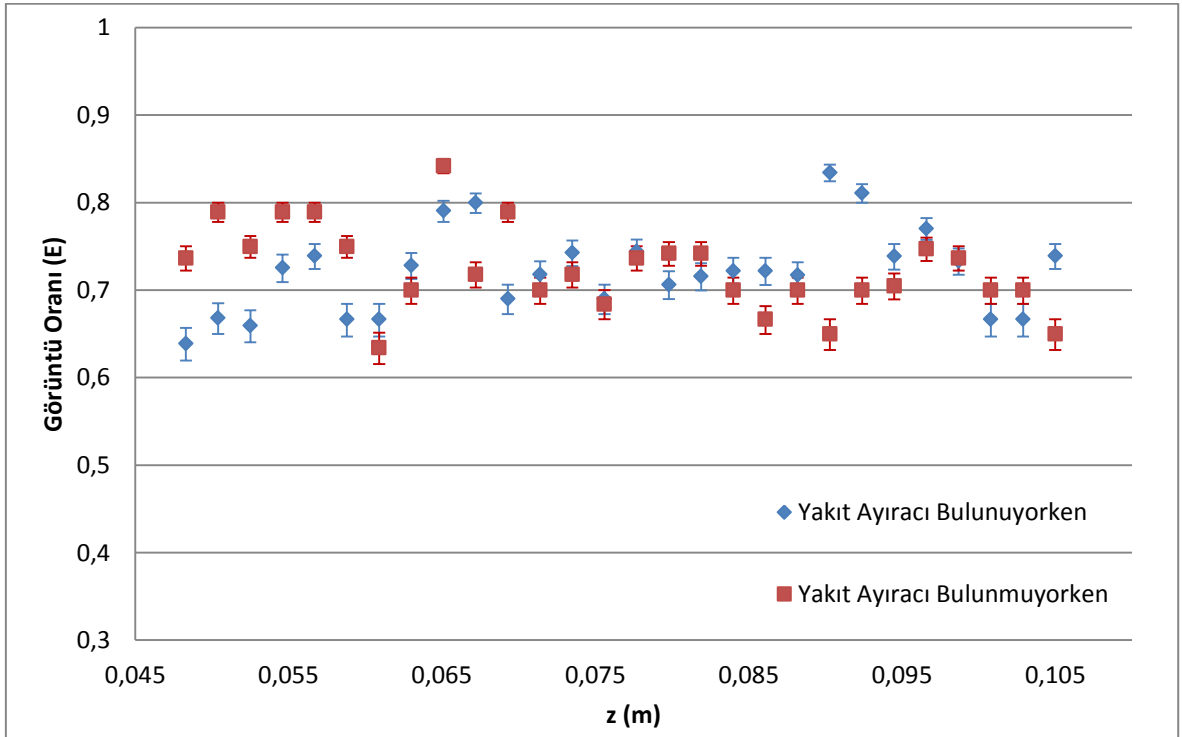
6.3 Yakıt Ayırıcı ile Gerçekleştirilen Deneylerin Sonuçları

Bu kısımda yakıt ayırıcının baloncuk şekline etkisi incelenmiştir. Bu etkiyi görebilmek için baloncukların görüntü oranlarındaki değişim incelenmiştir. Bununla birlikte Denklem 10 kullanılarak baloncukların yakıt ayırıcından geçerken hız profilleri hesaplanmış ve deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır.

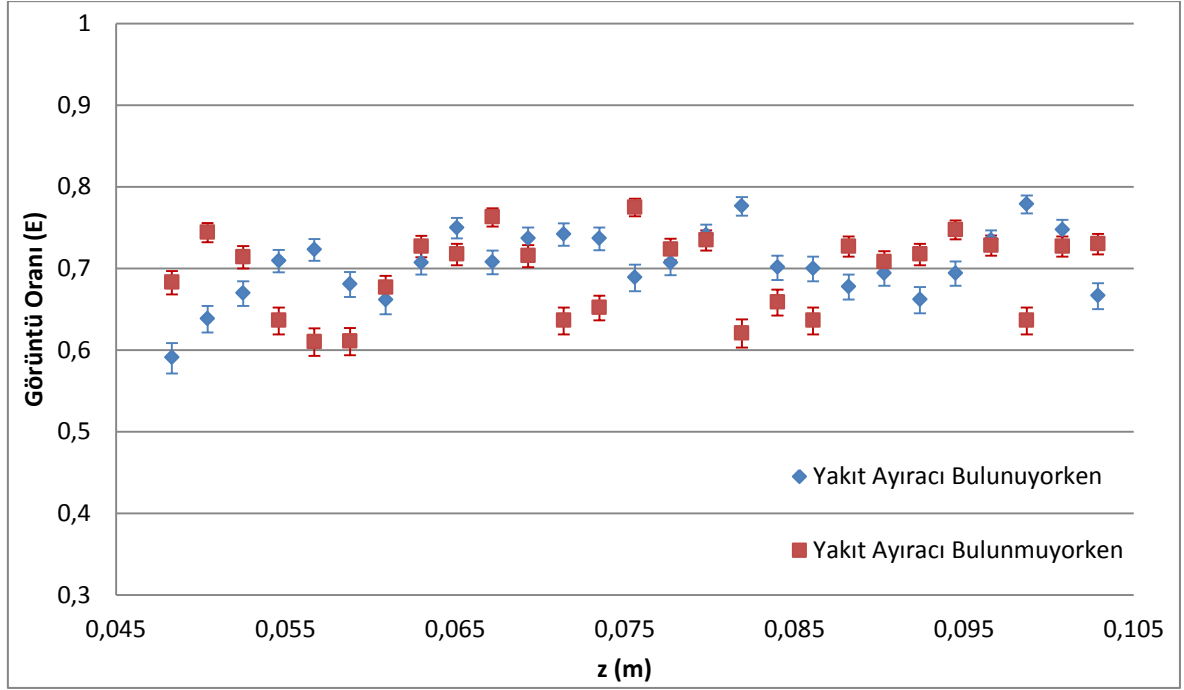
Görüntü oranının hesaplanması için deneysel verilerden görüntü işleme yazılımı kullanılarak elde edilen yatay ve dikey çaplardaki hata ölçümlerden elde edilen tecrübe ile 1 piksel olarak belirlenmiştir ve aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Bu şekillerde yakıt ayırıcının bulunduğu ve bulunmadığı durumlarda görüntü oranları hataları ile birlikte verilmektedir.



Şekil 28 2,7 mm baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken ve bulunmuyorken görüntü oranları.



Şekil 29 3,0 mm baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken ve bulunmuyorken görüntü oranları.



Şekil 30 3,3 mm baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken ve bulunmuyorken görüntü oranları.

Baloncuk görüntü oranının değişiminin denkleme etkisini görebilmek için Reynolds rakamı (Re) ile Haberman-Morton rakamının (Hm) karşılaştırılmıştır. Hm rakamı Denklem 13'te verilmiştir.

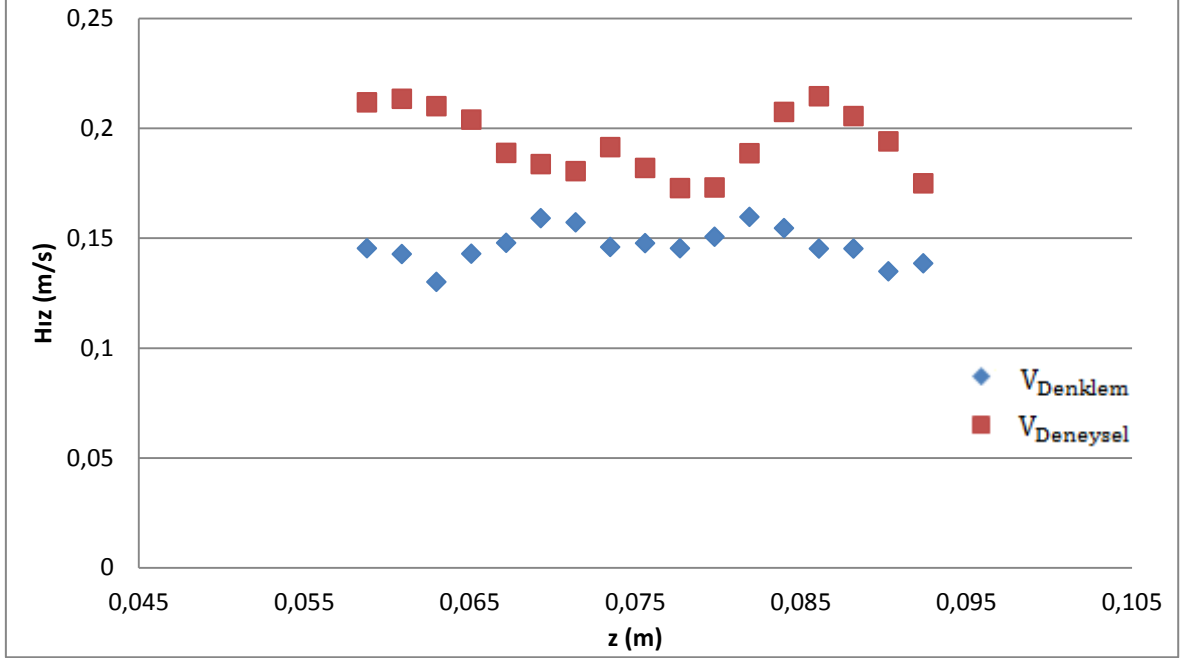
$$Hm = \frac{g\mu^4}{\rho\sigma^3} \quad (13)$$

Hm rakamı ile Re rakamının karşılaştırılması ile baloncuğun küresellikten ne kadar uzaklaştığı görülmektedir. Baloncuk küreselliği, $Re < Hm^{-1/4}$, durumunda korunmakta iken, $Re \gg Hm^{-1/4}$, durumunda baloncuk şekli küresellikten uzaklaşmaya başlamaktadır.

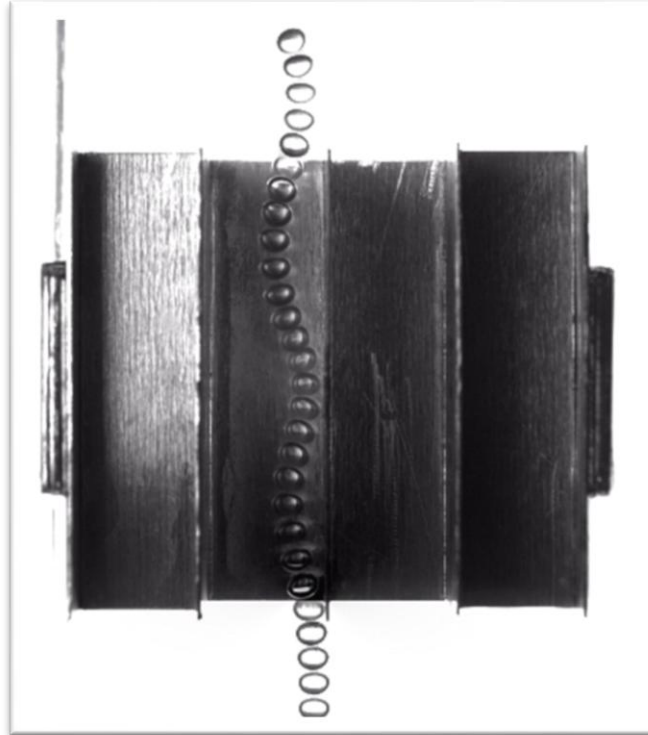
Yakıt ayırıcı ile yapılan deneylerde Re rakamı her üç baloncuk için $Hm^{-1/4}$ değerinden daha büyük çıkmaktadır ve baloncuk çapı arttıkça baloncuğun hızı ve Re rakamı artmaktadır. Bu durumda daha büyük ve dolayısıyla daha hızlı baloncuk için denklem sonuçlarının davranışı deneysel sonuçların davranışına daha çok benzemektedir.

Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30'da yakıt ayırıcı bulunuyorken ve bulunmuyorken görüntü oranları verilen baloncuklar için yakıt ayırıcı bulunduğu durumda Denklem 10 kullanılarak hız profilleri hesaplanmıştır ve deneysel değerler ile

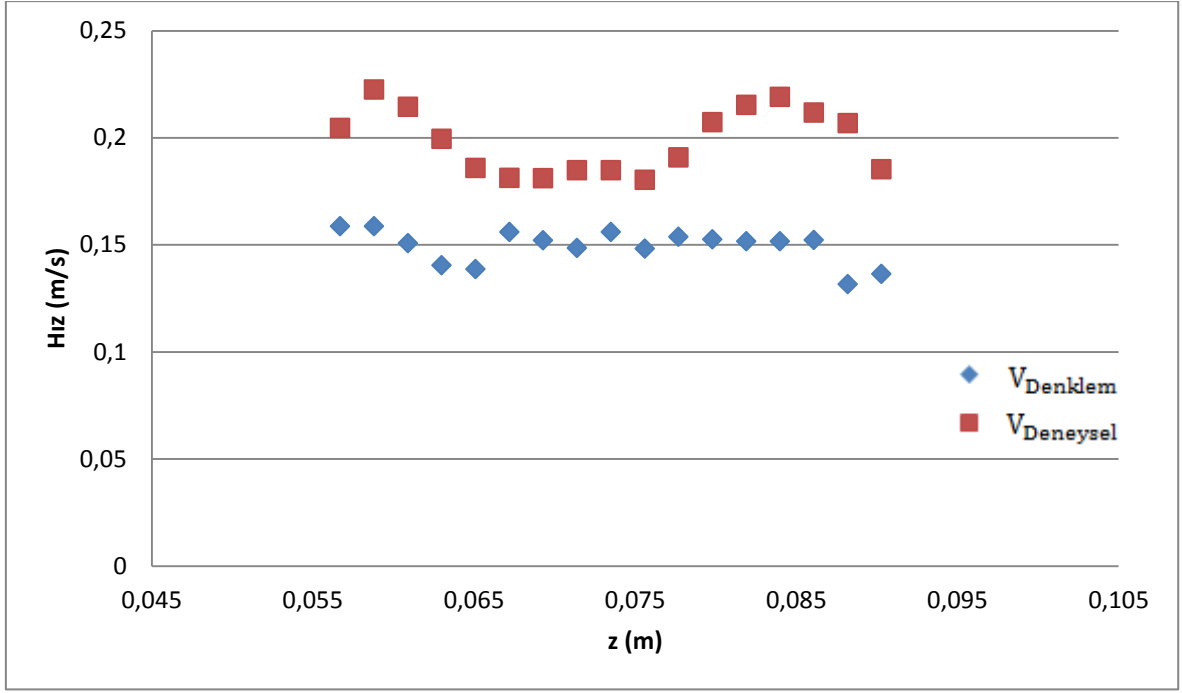
karşılaştırılmıştır. Şekil 31, Şekil 33 ve Şekil 35'te yakıt ayırıcı bulunuyorken hesaplanan hız profili ile deneysel değerler karşılaştırılmıştır. Her bir grafiğin altında o baloncuğun davranışını gösteren görüntüler görülmektedir.



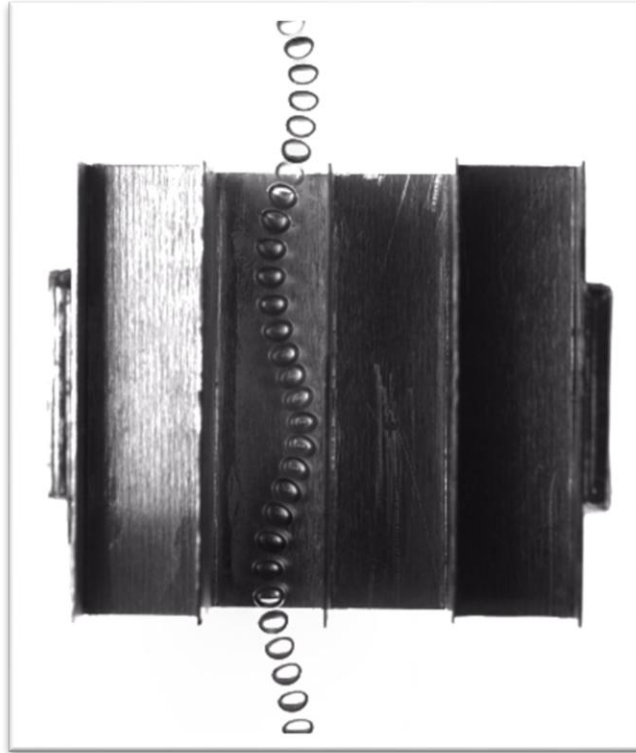
Şekil 31 2,7 mm çaplı baloncuk için yakıt ayırıcısı bulunuyorken hız profili.



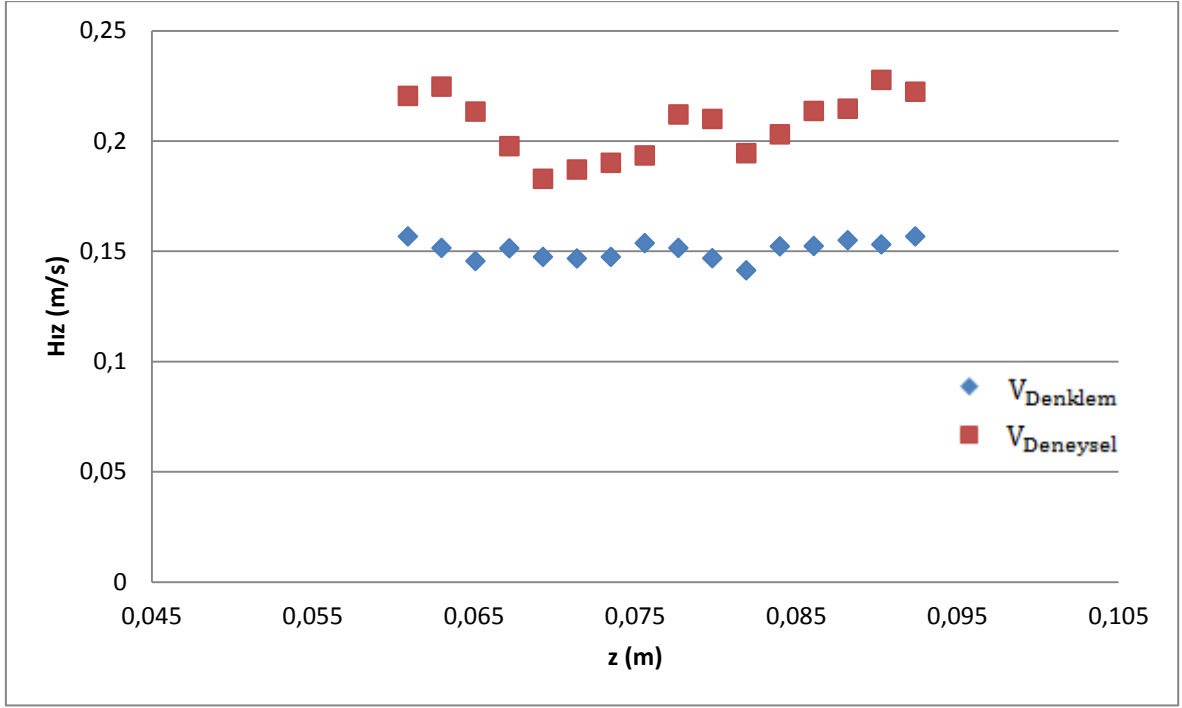
Şekil 32 2,7 mm çaplı baloncuğun yakıt ayırıcısından geçerken davranışı.



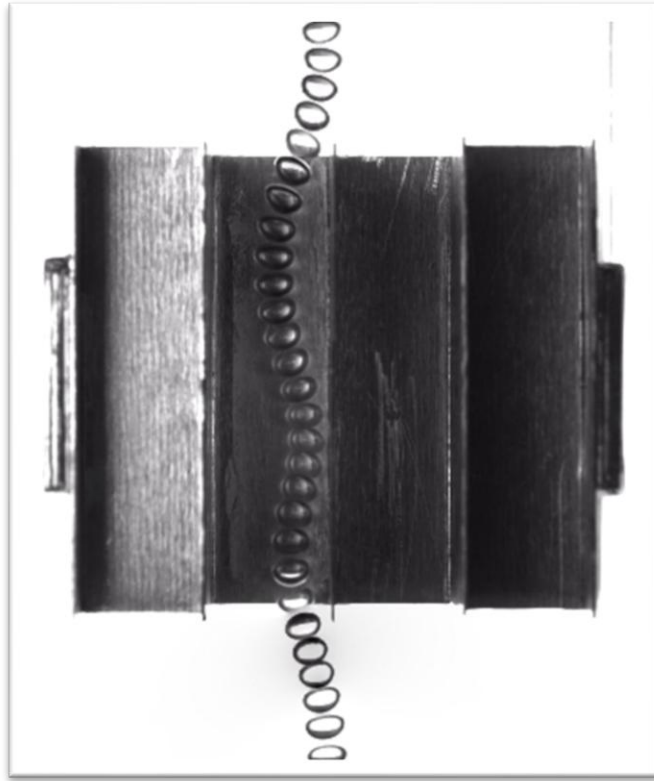
Şekil 33 3,0 mm çaplı baloncuk için yakıt ayıracı bulunuyorken hız profili.



Şekil 34 3,0 mm çaplı baloncuğun yakıt ayıracından geçerken davranışı.



Şekil 35 3,3 mm çaplı baloncuk için yakıt ayırıcı bulunuyorken hız profili.



Şekil 36 3,3 mm çaplı baloncüğün yakıt ayırıcından geçerken davranışı.

Yukarıdaki şekillerde baloncuklarda yakıt ayırıcından geçerken meydana gelen şekil değişikliği ve bu şekil değiştirmenin sonucu olarak hızlarının değişimi görülmektedir. Yakıt ayırıcından geçen baloncukların hızlarının deneysel olarak ölçülmesi sırasında en fazla hata 3 mm/s dir. Bu hata ihmal edilebilir olduğu için şekil üzerinde gösterilmemiştir.

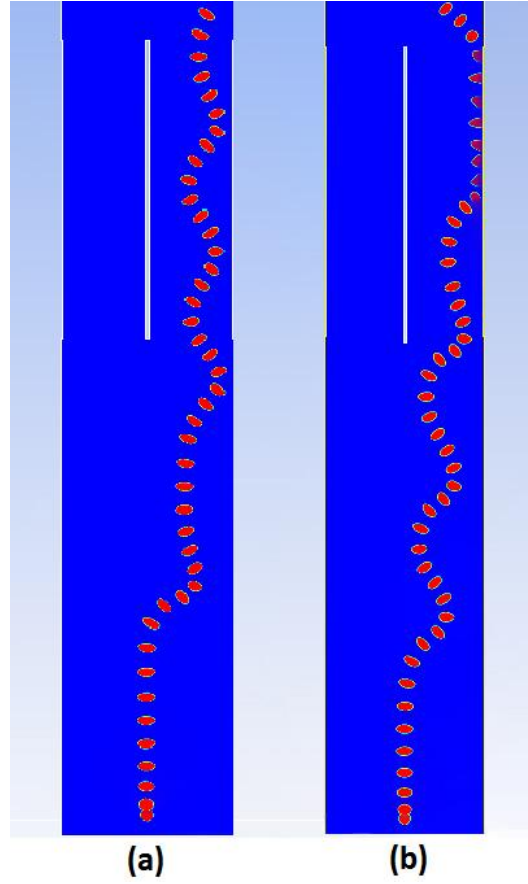
Yakıt ayırıcı bulunmuyorken denklem ile hesaplanan baloncuk hız profilinin deneysel olarak hesaplanan profile uyum göstermesine karşın yakıt ayırıcı bulunduğu durumda hız profillerinin uyum göstermemesinin sebebi denklemde taşıma kuvvetinin, sanal kütle kuvvetinin, yakıt ayırıcından kaynaklı duvar etkisiyle akış hattının (streamline) değişiminin hesaba katılmamasıdır. Ayrıca görüntüler ile hız profilleri karşılaştırıldığında baloncukların yakıt ayırıcı duvarlarından uzaklaştığı durumlarda denklem sonuçları ile deneysel değerler arasındaki fark artmaktadır. Bunun sebebi, yakıt ayırıcı duvarlarının akış hattına etkisinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, yakıt ayırıcının duvarlarının baloncuk üzerine etkisi Denklem 10 ile modellenememektedir.

6.4 Nümerik Analiz Sonuçları

Bu çalışmada yapılan deneylerin VOF yöntemi ile yapılan benzeşimlerinin sonuçlarından elde edilen görüntülerin ilk ikisi Şekil 37'de verilmiştir. Şekil 37(a)'da gösterilen modelde yakıt ayırıcı dahil geometrinin kenarlarında duvar sınır koşulu kullanılmıştır. Şekil 37(b)'de gösterilen modelde ise geometrinin kenarları için simetri sınır koşulu, tabanı için duvar sınır koşulu ve üst kısmı için basınç çıkışı sınır koşulları kullanılmıştır. Şekil 37'de görüldüğü gibi kenarlarda duvar sınır koşulu kullanılan geometride baloncuk duvardan etkilenecek sağa doğru ilk hareketinden sonra büyük frekanslı bir salınım gerçekleşmiştir. Baloncuk yakıt ayırıcının bulunduğu bölgeye girdiğinde ise sol tarafta bulunan diğer duvarın etkisiyle daha küçük frekanslı salınımlar yapmaya başlamıştır.

Şekil 37(b)'de gösterilen görüntüde baloncuğun ilk yön değiştirmesinde, duvar sınır koşulu kullanılmadığı için, küçük frekanslı bir salınım görülmüştür. Baloncuk yakıt ayırıcının olduğu yere ilk geldiğinde yakıt ayırıcından etkilenecek ondan uzaklaşan bir davranış göstermiştir. Fakat diğer yakıt ayırıcının etkisi ile yine sağ taraftaki yakıt ayırıcına yaklaşarak yapışmıştır. Yakıt ayırıcından çıkan baloncuk

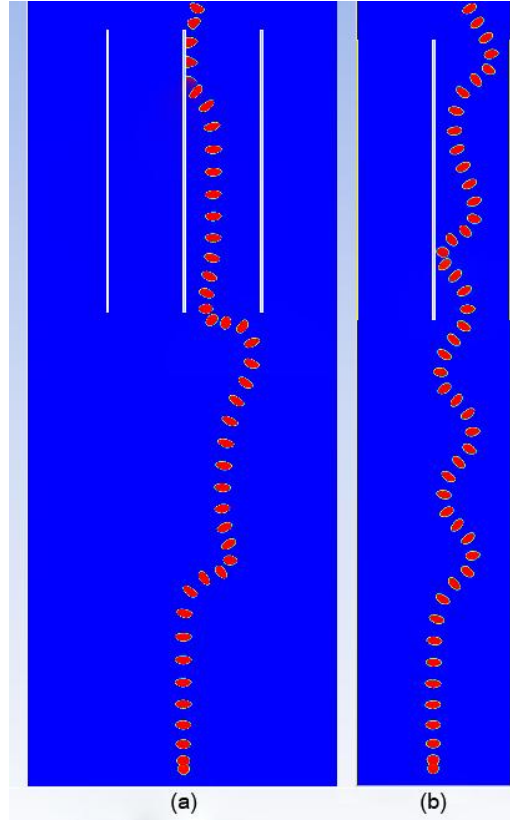
koparak salınımına devam etmiştir. Şekil 37'deki görüntülerden anlaşılmaktadır ki her iki durumda da baloncğun ilk hareketi şeklinin bozulmasından kaynaklanmaktadır. Yani eliptik şekil alan baloncukların bir kenarı daha hızlı yükselmeye başlamıştır.



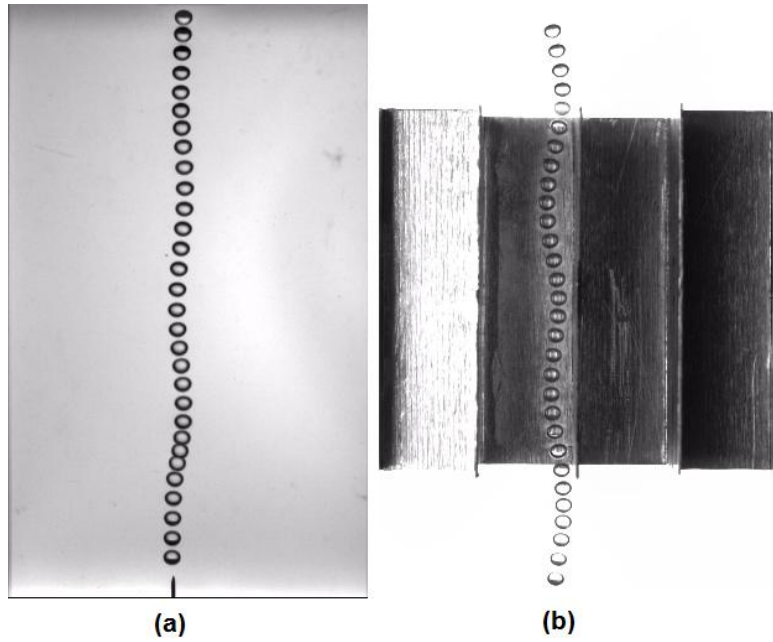
Şekil 37 Fluent modelinin sonuçları; **(a)** duvar sınır koşulu, **(b)** simetri sınır koşulu.

Diğer bir modelde yan duvarlarda simetri sınır koşulu kullanılırken alt kısımda hız girişi sınır koşulu kullanılmıştır ve son modelde ise deney düzeneğinin tamamı modellenmiştir (Şekil 38). Şekil 38(b)'deki görüntüde baloncuk Şekil 37(b)'deki görüntüdeki baloncuk davranışına benzer bir davranış göstermektedir. Fakat Şekil 37(b)'de gösterilen modelde baloncuk yakıt ayıracına girdiğinde sağdaki duvara daha yakın bulunduğu için duvara yapışmıştır. Buna karşılık Şekil 38(b)'de gösterilen modelde baloncuk yakıt ayırıcı duvarına yapışmadan hareket etmiştir. Şekil 38 (a)'da ise baloncuk salınımına başladığı anda büyük frekanslı bir salınım yaptığı gösterilmektedir ve bu modelde baloncuk yakıt ayırıcının etkisi ile iki yakıt

ayıracı arasına girmiştir. Yakıt ayıracının etkisi bu baloncuk üzerinde de görülmüştür ve baloncuk yakıt ayıracının duvarları arasında yükselirken duvara yapışmıştır.



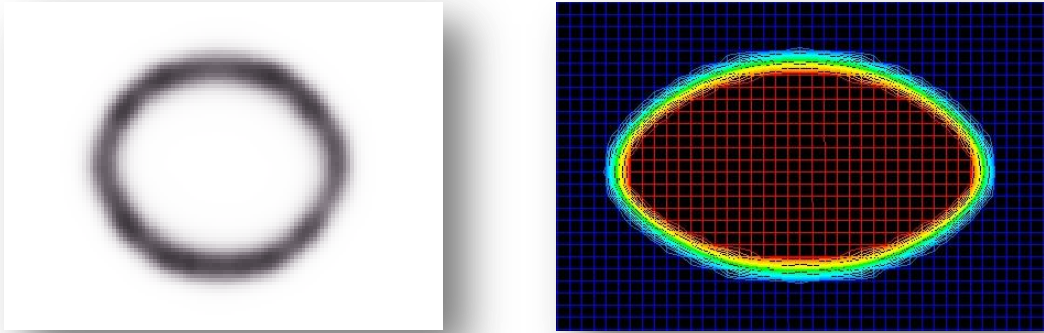
Şekil 38 2 mm çaplı baloncuk için Fluent modelinin sonuçları; **(a)** deney düzeneğinin tamamı, **(b)** hız girişi sınır koşulu.



Şekil 39 2 mm çaplı baloncuğun (a) girişte, (b) yakıt ayırıcındaki görüntüleri.

Deneylerde elde edilen görüntüler Şekil 39 verilmiştir. Şekil 37, Şekil 38 ve Şekil 39 karşılaştırıldığında, baloncuk salınım hareketi ve duvar etkisi bütün şekillerde gözlenmiştir. Fakat Şekil 37(b)'de ve Şekil 38(a)'da gözlenen baloncuğun duvara yapışması deneylerde gerçekleşmemiştir. Ayrıca baloncuk şekilleri incelendiğinde modellerde oluşturulan baloncuk ilk başta küresel olmasına rağmen daha sonra şekli deneylerde görülenden daha çok bozulmaktadır. Şekil 40'da deneylerde gözlenen baloncuk ile CFD modelinde oluşturulan baloncuk görülmektedir. CFD modelindeki baloncuğun deneylerde gözlenen 2 mm çaplı baloncuktan daha eliptik olduğu görülmektedir. Sabunlu suyun yüzey gerilimi kullanılmasına rağmen, CFD modelinde oluşturulan baloncuğun şeklinin saf su ile yapılan deneylerdeki baloncuk şekline ve daha büyük çaplı baloncukların şekline daha çok benzediği görülmüştür (Şekil 41).

Sonuç olarak, deneylerde gözlenen baloncuk hareketinin ve yakıt ayırıcı etkisinin oluşturulan modellemeler ve çözüm teknikleri ile VOF yöntemi kullanılarak doğru modellenemediği görülmüştür.



Şekil 40 Sabunlu suyla gerçekleştirilen deneylerdeki baloncuk şekli ve CFD modelinde oluşturulan baloncuk şekli.

7 TARTIŞMA VE YORUM

Bu kısımda, yapılan analizlerin ve ölçümlerin sonuçları yorumlanmış ve tartışılmıştır.

- İlk bölüm üç alt kısma ayrılmıştır:
 - İlk kısımda enjektör çıkışı baloncuk hızının Denklem 11 ile hesaplanması ve deneysel değerler ile karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Denklem 11 ile hesaplanan enjektör çıkışı baloncuk hızları ile deneysel olarak ölçülen hız değerleri Çizelge 4'te de görüldüğü gibi birbirine yakın çıkmıştır. Bunun sonucunda bu çalışmada kullanılan baloncuk hızı ölçme tekniğinin doğru bir yaklaşım olduğu kabul edilmiştir.
 - İkinci kısımda baloncukların terminal hızları deneysel olarak hesaplanmıştır ve baloncuk üzerine etki eden temel kuvvetlerin dengesinden çıkarılan bir terminal hız formülü (Denklem 12) için bir katsayı (C) bulunmuştur. Bu denklem yüzey gerilimi ve viskozite etkilerinin çok düşük olduğu durumlarda baloncuklu akışta geçerlidir. Ayrıca Denklem 12, baloncuk şeklinin bozulmadığı durumda çalışmaktadır. Bu tez çalışmasında ise yüzey geriliminin azaltılması için saf suya sıvı sabun eklenerek yüzey gerilimi azaltılmıştır. Böylece baloncukların küremsi şekilleri korunmuştur. Bununla birlikte deneylerde baloncuk şeklinin sürekli bozulduğu ve bunun sonucu olarak baloncukların zikzak hareketi yaptığı görülmüştür. Yapılan hesaplamalar sonucu C katsayısı 1,2 olarak bulunmuştur.
 - İkinci kısımda kullanılan Denklem 12'nin bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda baloncuk şeklinin akışa etkisinin incelenmesi için yeterli olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle üçüncü kısımda, baloncuk hızının hesaplanması için baloncuk şekil değişikliğinin ve zikzak hareketlerini hesaba katıldığı bir başka denklem (Denklem 10) sınanmıştır. Bu denklem ilk olarak baloncuk enjekte edildikten sonra yükselirken ve yakıt ayırıcı olmadığı durumlarda kullanılmıştır ve deneysel değerler ile kıyaslanmıştır. Denklem sonuçları deneysel değerlerden daha az çıkmış olsa da baloncuk hızlarının değişimi denklem ile doğru hesaplanmıştır. Denklemin bulunduğu literatür

alışmasında da aynı sonuca ulaşılmıştır. Bunun sebebi, taşıma kuvveti ve sanal kütle kuvveti ile sabunlu suyun etkisinin denkleme eklenmemiş olmasıdır.

- İkinci bölümde, ilk bölümde üçüncü aşamada gerçekleştirilen analiz yakıt ayırıcının bulunduğu durum için incelenmiştir. Bunun amacı yakıt ayırıcının baloncuya etkisinin gözlenmek istenmesidir. Bu nedenle ilk olarak yakıt ayırıcının bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için baloncuk görüntü oranları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmaya göre baloncuk çapı arttıkça baloncuk şeklinin küresellikten uzaklaştığı gözlenmiştir. Denklem 10, baloncuk şeklinin küresellikten uzak ($E < 1$) olduğu durumlarda daha doğru sonuçlar vermektedir. Bu durumda baloncuk çapı arttıkça denklem sonuçları ile deneysel değerlerin daha uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Bu yorumun diğer bir kanıtı da yakıt ayırıcı bulunmadığı durumdaki baloncuk hız profillerinin incelenmesiyle anlaşılmaktadır.
- İkinci bölümde son olarak, yakıt ayırıcından geçen baloncukların hız profilleri Denklem 10 ile hesaplanmıştır ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Denklem 10 ile hesaplanan hız değerleri ile deneysel değerler farklılık göstermektedir. Bunun sebebi, yakıt ayırıcı duvarlarının akış hattını bozmasıdır. Denklem 10'da bu etki modellenmemiştir. Bu sonuca, baloncukların yakıt ayırıcına yaklaşırken denklem ile deneysel değerler arasındaki farkın azalıp, baloncuklar duvardan uzaklaştığında farkın artmasından da varılabilmektedir.
- Üçüncü bölümde, deneylerin VOF yöntemi ile modellenenebilirliği incelenmiştir. VOF yönteminin bu çalışma için seçilmesinin sebebi, kullanıcı tanımlı fonksiyon tanımlamak gibi fiziksel karmaşıklıkları kaldırmaktır. Fakat sınır koşullarının ve çözüm yöntemlerinin belirlenmesinde karmaşıklıklar ile karşılaşmıştır. İki ayrı geometri ve farklı sınır koşulları ile dört ayrı model denenmiştir fakat, deneylerde gözlenen baloncuk hareketi ve yakıt ayırıcının etkisi, oluşturulan modeller ve çözüm yöntemleri ile doğru modellenememiştir.

8 İLERİDE YAPILACAK ÇALIŞMALAR

Bu kısımda deneysel veriler ile denklemlerin daha uyumlu hale getirilebilmesi ve deneylerde gözlenen baloncuk davranışının ve yakıt ayırıcı etkisinin nümerik olarak modellenmesi için ileride yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

- Yakıt ayırıcı olmadığı durumda baloncuk hız profilinin incelendiği bölümde Denklem 10 ile elde edilen hız değerlerinin, deneysel değerlerden farklı olduğu gözlenmiştir. Denklem 10'da hesaba katılmayan taşıma ve sanal kütle kuvvetleri denkleme eklenmesi sonuçların deneysel değerlerle daha uyumlu olmasını sağlayacaktır. Bununla birlikte sabunlu suyun baloncuk şekline ve davranışına etkisi incelenip bu etki Denklem 10'a eklenmesi, deneysel değerlerle Denklem 10'dan elde edilen sonuçlar arasındaki farkın azalmasını sağlayacaktır.
- Yakıt ayırıcı bulunduğu durumda Denklem 10'dan elde edilen sonuçlar ile deneysel değerler arasında büyük farklılıklar görülmüştür. Bu farklılıkların sebebi, yukarıda bahsedilen faktörlerin dışında yakıt ayırıcı duvarlarının baloncuk hareketine yaptığı etkidir. Duvar etkisinin Denklem 10'a eklenmesi, deneysel sonuçlar ile denklem sonuçları arasındaki farkın azalmasını sağlayacaktır.
- Oluşturulan modeller ve kullanılan çözüm yöntemleri ile nümerik olarak çözülmek istenen benzeşimlerde bu çalışmada gözlenmek istenilen sonuçlara ulaşamamıştır. Bu nedenle VOF yöntemi ile daha temel modellerin incelenmesi, değişik ızgara yapılarının denenmesi ve 3 boyutlu modellerin oluşturulması ile baloncuğun zikzak hareketinin ve yakıt ayırıcı etkisinin modellenmesi sağlanabilecektir.

9 KAYNAKÇA

- [1] C. Lea ve Y. Choi, «Comparison of thermo-hydraulic performances of large scale vortex flow (LSVF) and small scale vortex flow (SSVF) mixing vanes in 17 x 17 nuclear rod bundle,» *Nuclear Engineering and Design*, cilt 24, no. 237, pp. 2322-2331, 2007.
- [2] S. Sarı, «Computational Fluid Dynamics (CFD) Modeling of Isothermal Turbulent Bubbly Flows,» 2008.
- [3] A. Tomiyama, Y. Nakahara, Y. Adachi ve S. Hosokawa, «Shapes and Rising Velocities of Single Bubbles rising through an Inner Subchannel,» *Journal of Nuclear Science and Technology*, no. Vol.40, No.3, 2003.
- [4] Z. Zhang, K. Suzuki, S. Hosokawa ve A. Tomiyama, «Motion of Small Bubbles near a Grid Spacer in a Two by Three Rod Bundle,» *Journal of Fluid Science and Technology*, no. Vol.3, No.1, 2008.
- [5] H. Ünal, «Maximum bubble diameter, maximum bubble-growth time and bubble-growth rate during the subcooled nucleate flow boiling of water up to 17.7 MN/m²,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. Vol.19, Issue 6, 1976.
- [6] D. Ma, M. Liu, Y. Zu ve C. Tang, «Two-dimensional volume of fluid simulation studies on single bubble formation and dynamics in bubble columns,» *Chemical Engineering Science*, no. 72, 2012.
- [7] L. Yong, Z. Jianping ve F. Liang-Shih, «Discrete-phase simulation of single bubble rise behavior at elevated pressures in a bubble column,» *Chemical Engineering Science*, no. 55, 2000.
- [8] V. V. Buwa ve V. V. Ranade, «Dynamics of gas-liquid flow in a rectangular bubble column: experiments and single/multi-group CFD simulations,»

Chemical Engineering Science, no. 57, 2002.

- [9] D. Pfleger ve S. Becker, «Modelling and simulation of the dynamic flow behaviour in a bubble column,» *Chemical Engineering Science*, no. 56, 2001.
- [10] A. Zaruba, E. Krepper, H.-M. Prasser ve E. Schleicher, «Measurement of bubble velocity profiles and turbulent diffusion coefficients of gaseous phase in rectangular bubble column using image processing,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 29, 2005.
- [11] A. Akhtar, V. Pareek ve M. Tade, «CFD Simulations for Continuous Flow of Bubbles through Gas-Liquid Columns: Application of VOF Method,» *Chemical Product and Process Modeling*, no. Vol.2, Issue 1, 2007.
- [12] W. Deckwer, *Bubble Column Reactors*, New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [13] National Instruments, *Vision Assistant*, 2009.
- [14] C. Paik, L. Hochreite, J. Kelly ve R. Kohrt, «Analysis of FLECHT-SEASET 163-rod blocked bundle data using COBRA-TF,» 1985.
- [15] PENTAX Precision Co., Ltd., «IDS Imaging,» [Çevrimiçi]. Available: <http://www.ids-imaging.com>.
- [16] A. Tomiyama, G. Celata, S. Hosokawa ve S. Yoshida, «Terminal velocity of single bubbles in surface tension force dominant regime,» *International Journal of Multiphase Flow*, no. 28, 2002.
- [17] A. Tomiyama, «Single Bubbles In Stagnant Liquids And In Linear Shear Flows,» Kobe University, Kobe, Japan, 2002.
- [18] K. Loubière, V. Castaignède ve M. R. Gilles Hébrard, «Bubble Formation At A Flexible Orifice With Liquid Cross-Flow,» Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte, France, 2004.

- [19] D. D. Joseph, «Rise Velocity of a Spherical Cap Bubble,» *Journal of Fluid Mechanics*, no. 488, pp. 213-223, 2003.
- [20] M. A. Talaia, «Terminal Velocity of a Bubble Rise in a Liquid Column,» *World Academy of Science, Engineering and Technology*, no. 28, 2007.
- [21] R. Davies ve S. G. Taylor, «The Mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes,» 1949.
- [22] ANSYS, Inc., «Fluent Theory Guide,» Kasım 2011. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.ansys.com>.
- [23] C. Hirt ve B. Nichols, «Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries,» *Journal of Computational Physics*, no. Vol. 39, Issue 1, 1981.
- [24] J. Brackbill, D. Kothe ve C. Zemach, «A Continuum Method for Modeling Surface Tension,» *Journal of Computational Physics*, no. 100, 1992.

10 EKLER DİZİNİ

Bu kısımda VOF yönteminin gelişiminden, VOF yöntemini sınırlayan koşullardan, VOF yönteminde kullanılan denklemlerden, VOF yönteminin faza özgü koşullarından ve bu çalışmanın nümerik analiz kısmında gerçekleştirilen deney düzeneğinin modellenmesinde ve çözümünde hesaba katılan kuvvetlerden 22. ve 23. referanslar kullanılarak bahsedilmiştir. Ayrıca son bölümde bu çalışmada kullanılan görüntü işleme fonksiyonları ve bunların özelliklerinden bahsedilmiştir.

10.1 Çok Fazlı Akış Modelleri

Çok fazlı akışların modellenmesi için iki ayrı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki Euler – Lagrange yaklaşımı diğeri ise Euler – Euler yaklaşımıdır. Aslında bir diğeri yaklaşım olarak akışkan hacmi yöntemi (VOF) denebilir fakat bu çalışmada Fluent programı kullanıldığından ve akışkan hacmi yaklaşımı Fluent programında Euler – Euler yaklaşımının prensiplerini benimsediği için burada bu yaklaşımın altında bahsedilecektir [22].

10.1.1 Euler – Lagrange Yaklaşımı

Bu yaklaşıma göre, akışkan faz bir süreklilik gibi kabul edilmekte ve zaman ortalamalı Navier – Stokes denklemi ile çözülmektedir. Diğeri faz ise baloncuklardan ya da damlacıklardan oluşan çok sayıda parçacığın izlenmesi yöntemiyle akışkan faz boyunca çözülmektedir. Bununla beraber ayrık faz, akışkan faz ile momentum, kütle ve enerji transferi yapabilmektedir. Bir hesaplamalı akışkanlar mekaniği analiz programı olan Fluent programında bulunan Lagrange ayrık faz modeli de Euler – Lagrange yaklaşımını kullanmaktadır.

Bu yöntemi basit kılan en önemli özellik parçacıklar arası etkileşimin ihmal edilmesidir. Bunun sonucu olarak da, ayrık fazın hacminin akışkan fazın hacmine oranının çok düşük olması koşulu konmuştur. Hatta ayrık fazın kütle akısının birinci fazdan daha yüksek olduğu durumlar dahi kabul edilebilmektedir. Ayrıca parçacıklar arası etkileşim, ayrık element yöntemi ile probleme eklenebilmektedir.

Euler – Lagrange yaklaşımı ile akışkan faz hesaplaması sırasında parçacık ya da damlacık yörüngeleri ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Böylece bu yaklaşım metodu ile sprey kurutucular, sıvı yakıtlı yanma reaksiyonları ve bazı parçacık yüklü akışlar

kolaylıkla modellenebilmektedir. Fakat sıvı-sıvı karışımları, akışkan yatak sistemleri ya da ayrık fazın hacim oranının ihmal edilemediği herhangi bir sistemde Euler – Lagrange yaklaşımı kullanılamamaktadır [22].

10.1.2 Euler – Euler Yaklaşımı

Euler – Euler yaklaşımında farklı fazlar matematiksel olarak birbiri içine geçmiş süreklilikler olarak tanımlanırlar. Herhangi bir fazın hacmi diğer bir fazın hacminin yerine geçemeyeceğinden her bir fazın hacim oranı kavramı tanımlanır. Bu hacim oranları zamanın ve uzayın sürekli fonksiyonu olarak kabul edilir ve toplamı bire eşittir. Her bir faz için korunum denklemleri çözülerek bir dizi denklem seti elde edilir. Çözüm yapılabilmesi için, elde edilen bu denklemler ile deneysel verilerden elde edilen temel veriler bir araya getirilirler.

Üç farklı Euler – Euler modeli mevcuttur ve bunlar Fluent programında da kullanılabilmektedirler: Akışkan Hacmi Modeli (VOF), Karışım Modeli ve Eulerian Modeli [22].

10.1.3 Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF)

VOF modeli iki ya da daha fazla fazla sahip bir sistemde fazlar arası yüzeylerin incelendiği problemler için kullanılmaktadır. Yani VOF modeli sabit Eulerian ızgara yapısına uygulanan bir yüzey izleme tekniğidir. VOF modelinde, tek bir grup momentum denklemi kullanılmakta ve bu denklem her bir faz ve bu fazların ilgilenilen alan boyunca hesaplanan hacim oranları tarafından paylaşılmaktadır. VOF modelinin uygulama alanları, katmanlı akışlar, serbest yüzey akışları, dolum, sıçrama, büyük baloncukların sıvı içindeki hareketi, kırımın ardından sıvı hareketi ve zamana bağlı ya da zamandan bağımsız her türlü sıvı-gaz ara yüzey problemleridir [22].

10.1.4 Karışım Modeli

Eulerian modelinde olduğu gibi karışım modelinde de fazlar birbiri içine geçmiş süreklilikler olarak tanımlanmaktadır. Yine Karışım modeli de Eulerian modeli gibi iki ya da daha fazla fazın kullanıldığı problemler için kullanılmaktadır. Bu fazlar sadece sıvı ya da sadece katı olabilmektedirler. Modelde karışımın momentum

denklemleri çözülür ve ayrık fazın tanımlanması için göreceli hızların çözülmesi sağlanır. Karışım modeli, çoğunlukla az parçacık yüklü akışların, baloncuklu akışların, çökeltme problemlerinin ve siklon ayırıcılarının modellenmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca karışım modeli, ayrık faz için göreceli hız kullanmaksızın homojen çok fazlı akışların modellenmesinde de kullanılabilir [22].

10.1.5 Eulerian Modeli

Eulerian modeli Fluent programı içindeki en kapsamlı çok fazlı akış modelidir. Her bir faz için n tane momentum ve süreklilik denklemi çözülür. Fazlar arasındaki bağlantı, basınç ve fazlar arası değişim katsayıları sayesinde sağlanır. Bu fazlar arasındaki ilişkinin sağlanması, kullanılan fazların tanecikli (katı – sıvı) ya da taneciksiz (sıvı – sıvı) olmasıyla ilgilidir. Fazlar arasındaki momentum değişimi, modellenen karışımın cinsine de bağlıdır. Ayrıca, momentum değişiminin hesaplanması dışarıdan eklenen fonksiyonlar yardımıyla özelleştirilebilir. Eulerian modelin kullanıldığı alanlar ise baloncuk sütunu, akışkan yatak problemleri ve parçacık süspansiyonu problemleridir [22].

10.2 Akışkan Hacmi Yönteminin (VOF) Gelişimi

Bu kısımda, nümerik analiz için kullanılan VOF yönteminin gelişiminden, VOF yöntemini kısıtlayan koşullardan, kullanılan denklemlerden ve bu tezde kullanılan diğer kuvvetlerden bahsedilmiştir.

Serbest yüzey, iki ayrı akışkanın arasında kalan ve yüzey geriliminin sabit olduğu bölgedir. Malzeme ara yüzeyleri, şok dalgaları ve akışkan ile şekli bozulabilen bir yapı arasındaki ara yüzeyler serbest yüzeylerdir. Serbest yüzeylerin nümerik olarak çözülmesinde üç ana problem ile karşılaşmaktadır. Bunlardan ilki farklı şekilde temsil edilmeleri, ikincisi zaman içinde yüzeylerin gelişimi ve üçüncüsü de etkili olacak sınır koşulunun belirlenmesidir.

Süreksiz bir yüzeyi sayısal hücrelerden oluşan bir matrisin içine yerleştirmek için üç ayrı işlem gerekmektedir. İlk olarak, sınırların şeklini ve yerini belirtmek için nümerik bir tanım geliştirilmelidir. Daha sonra bu sınırların zaman içinde değişimini hesaplamak amacıyla bir algoritma belirlenmelidir. Son olarak ise çözülmek istenen yapının çevresindeki ızgara yapısı üzerinde istenilen yüzey sınır

koşullarını kabul ettirmek için bir plan hazırlamak gerekmektedir. Burada yüzeyin nasıl tanımlandığı sınır koşullarının uygulanmasından bağımsızdır.

Bir serbest sınırın tanımlanmasının en basit yolu, o sınırın bir referans hattına olan uzaklığını referans hattı boyunca oluşan konumların fonksiyonu cinsinden tanımlamaktır. Bu yöntem yükseklik fonksiyonu denmektedir. Genişliği Δx ve yüksekliği Δy olan bir dikdörtgen şeklinde ızgara yapısında, h yüksekliğinde bulunan bir sınırı tanımlamak için $h = f(x,t)$ şeklinde bir eğri tanımlanmaktadır. Fakat bu yöntem sınır eğiminin, dh/dx , ızgara yapısının görüntü oranını, $\Delta y/\Delta x$, geçmesi durumunda çalışmamaktadır. Yani bu yöntem kullanılarak baloncuk ya da damla gibi birçok basit yapı doğru tanımlanamamaktadır.

Yükseklik fonksiyonu yöntemi genelleştirildiğinde çizgi bölümleri yöntemi adı verilen bir yöntem ortaya çıkmıştır. Çizgi bölümleri yöntemi kısa çizgi şeklinde bölümlerden oluşan bir seri ya da bu kısa çizgileri birleştiren noktaları kullanarak işleyen bir yöntemdir ve her bir noktanın koordinatları saklanmak zorundadır. Hatanın en aza indirgenmesi için, birbirine komşu olan iki nokta arası uzaklığın en küçük ızgara aralığından daha küçük bir değer olması gerekmektedir. Bununla birlikte, her bir noktanın koordinatlarının kaydedilmesi ile daha fazla depolama alanı ihtiyacı duyulmaktadır. Bir ızgara yapısındaki ızgaraların ortalama değerlerinin bulunmasıyla bölgesel akışkan hızları hesaplanır ve böylece her bir noktanın hareketi sağlanır. Bu noktaların hareketi çizgi şeklindeki bölümleri hareket ettireceği için çizgi şeklindeki bölümlerin de hareketleri sağlanır.

Çizgi bölümleri yönteminin en büyük dezavantajı iki yüzey kesiştiğinde ya da bir yüzey kendi üzerine katlandığında sıralı bölümlerin, yeni sıralı bölümler eklenmesi ya da çıkarılması yoluyla, yeniden düzenlenmesinin gerekmesidir. Kesişme ya da katlanma durumları bekleniyor ise, bölümlerin yeniden düzenlenmesi işlemi önceden programlanabilmektedir. Fakat bölümlerin kesişmesi ya da birbiri üzerine katlanmasının belirlenmesiyle bu bölümlerin yeniden düzenlenmesi basit bir yöntemle gerçekleştirilememektedir. Bir yüzeyi tanımlayan komşu noktaları tespit etmek ve bununla beraber kesişim ve ekleme – çıkarma algoritmalarını oluşturmak oldukça karışık ve zor bir işlemdir.

İşaretili parçacıklar yönteminde serbest yüzeyleri doğrudan tanımlamak yerine akışkanın kapladığı bölge üzerinden yola çıkılmıştır. Yöntemin işleyişi işaretili parçacıkların bir akışkanın bulunduğu bölgenin tamamına dağılıp, akışkanın hızı ile birlikte hareket etmesi prensibine bağlıdır. Fakat bu yöntem ile bir akışkan modellenirken daha fazla noktasal koordinat kullanılmakta, bu nedenle de daha fazla depolama alanına ihtiyaç duyulmaktadır.

İki akışkan arasındaki serbest yüzey, birinde işaretili parçacık bulunan ve ilkinde komşu olup işaretili parçacık bulunmayan iki hücrenin arasında tanımlanmaktadır. Bu iki akışkan arasındaki serbest yüzeyin gerçek yerini tam olarak belirlemek için işaretili parçacıkların akışkanlar içinde dağılımları göz önünde bulundurularak bazı hesaplamalar yapılması gerekmektedir.

İşaretili parçacıklar yönteminin en büyük avantajı ise kesişen yüzeylerin olduğu problemlerde modelleme sorunlarının olmamasıdır. Yine de bu yöntem sayesinde yüzey kesişmelerinin üstesinden gelinse dahi daha fazla depolama alanına ihtiyaç duyulması ve her bir parçacığın hareketinin hesaplanabilmesi için harcanan zaman, daha iyi bir yöntemle ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

İşaretili parçacıklar yönteminde akışkanın kapladığı her bir noktanın kaydedilmesi çok fazla depolama alanına gereksinim duyulmasına neden olmaktadır. Akışkan hacmi yönteminde bu aşırı depolama alanı gereksinimi ortadan kalkmaktadır. Bu yöntemin temeli, akışkanın bulunduğu bölgelerdeki noktaların birim değerli, akışkanın bulunmadığı yerlerdeki ise sıfır kabul edildiği bir fonksiyon tanımlanması yöntemine dayanmaktadır. Yani bir akışkanın kapladığı hücrede bu fonksiyonun ortalaması, akışkanın o hücredeki hacimsel oranına eşittir. Bir hücredeki noktaların değerleri bir ile sıfır arasında değişiyor ise o hücreden geçen bir serbest yüzey bulunmaktadır. Akışkan Hacmi Yöntemi, işaretili parçacıklar yönteminin sağladığı aynı ara yüzey bilgisini vermekle birlikte daha az depolama alanına ihtiyaç duymaktadır. Çünkü tek bir değer ile bütün bir hücre tanımlanabilmektedir.

Bir akışkanın sınır hücrelerindeki fonksiyonun değerinin hızlı değiştiği yön, bu sınıra dik olan yöndür. Bu yöntemin temelini oluşturan fonksiyon bir basamak fonksiyonudur ve türevi özel bir metot kullanılarak hesaplanmaktadır. Türevin

hesaplanmasıyla da sınır normali belirlenir. Sonuç olarak ta hem sınır normali hem de sınır hücrelerindeki fonksiyonun değerleri belirlenmiş olunur. Bununla birlikte Akışkan Hacmi Yöntemi ile serbest sınırlar belirlenebilmektedir. Bunun için fonksiyonun gelişiminin kesin olarak hesaplanabildiği bir algoritma geliştirilmelidir. Yüzeylerin akışkan içerisinde sabit olmadığı ve fazlardan göreceli hızların bulunduğu problemler için hareket denklemi üzerinde bazı düzeltmeler yapılması gerekmektedir [23].

Birden çok akış rejimi içeren problemler için, ilgilenilen akış rejimi göz önünde bulundurularak çözüm yöntemi seçilir. Yani seçilen yöntem problemin tamamı için değil, sadece çözülmek istenilen rejimin bulunduğu bölüm için doğru sonuç verecektir. Çizelge 6’te çok fazlı akışlarda çözüm yöntemleri listelenmiştir.

Çizelge 6 Çok Fazlı Akışlarda Çözüm Yöntemleri [22]

	Akışkan Hacmi Yöntemi (VOF)	Eulerian Yöntemi	Karışım Yöntemi (Mixture)
Baloncuklu, damlacıklı ve parçacık yüklü akışlarda fazların karışık ve/veya ayrık fazın hacimsel oranının %10’dan fazla olduğu problemler. Bulamaçlı (slurry) akışlar ve su ile katı parçacık taşınma problemleri	-	√	√
Büyük kabarcıklı (slug) akış ve katmanlı/serbest yüzey akışları	√	-	-
Pnömatik taşınım problemleri	-	√ (Tanecikli akışlar)	√ (Homojen akışlar)
Akışkan yatak (tanecikli akışlar) ve çökelme problemleri	-	√	-

10.2.1 Akışkan Hacmi (VOF) Yöntemini Sınırlayan Koşullar [22]

- 1) Akışkan hacmi yöntemi sadece basınca bağlı çözücü (pressure-based solver) ile kullanılabilir, yoğunluğa bağlı çözücü (density-based solver) için kullanılamaz.
- 2) Bir problemde bulunan bütün kontrol hacimleri mutlaka bir fazdan ya da fazların birleşiminden oluşmak zorundadır.
- 3) Fazlardan yalnızca biri sıkıştırılabilir ideal gaz olabilir fakat aynı şey sıvılar için geçerli değildir. Kullanıcı tanımlı fonksiyonlar kullanarak birden fazla sıkıştırılabilir sıvı fazı tanımlanabilir.
- 4) Akışkan hacmi yöntemi, periyodik akış (debi ya da basınç kaybı) modellenmesine izin vermez.
- 5) Açık şemalı (explicit scheme) akışkan yöntemi kullanılan bir problemde ikinci dereceden örtük zaman kademeli formülleştirme kullanılamaz.
- 6) Paralel parçacıkların izlendiği bir problemde, eğer hafıza paylaşımı seçeneği seçili ise, ayrık faz yöntemi ile Akışkan Hacmi Yöntemi bir arada kullanılamaz. (dikkat edilmelidir ki mesaja izin verme seçeneği aktif olduğu durumda, bütün çok fazlı akış modelleri ayrık faz modeli ile uyumlu hale gelir.)

10.2.2 Hacim Oranı Denklemi

Fazlar arası ara yüzeyin takip edilmesi, bir ya da birden fazla fazın hacimsel oranı için süreklilik denklemi çözülmesi yoluyla sağlanır. Süreklilik denklemi, p ve q fazları için:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (14)$$

$\dot{m}_{pq}$, p fazından q fazına gerçekleşen kütle transferi terimidir, S_{α_q} , kaynak terimidir ve varsayılan olarak sıfır kabul edilir. Kaynak terimi sabit bir değer olarak ya da kullanıcı tanımlı fonksiyonlar ile her faz için ayrı ayrı tanımlanabilmektedir [22].

10.2.3 Örtük yaklaşım

Fluent programı, örtük yaklaşım kullanıldığında sonlu fark esaslı interpolasyon yöntemi ile bütün hücrelerde (ara yüzey yakınında bulunan hücrelerde dahil olmak üzere) yüzey akılarını belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Denklem 15'te örtük yaklaşım çözüm yöntemi gösterilmiştir.

$$\frac{\alpha_q^{n+1}\rho_q^{n+1} - \alpha_q^n\rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V \quad (15)$$

Bu yaklaşımda yönden bağımsız transfer denklemleri ile her bir zaman adımında ikincil fazın hacim oranı iteratif olarak çözülür. Çözümün yapılabilmesi için denklemin ihtiyaç duyduğu hacimsel oran değerleri şimdiki (n) zaman adımındaki değerlerdir [22].

10.2.4 Açık Yaklaşım

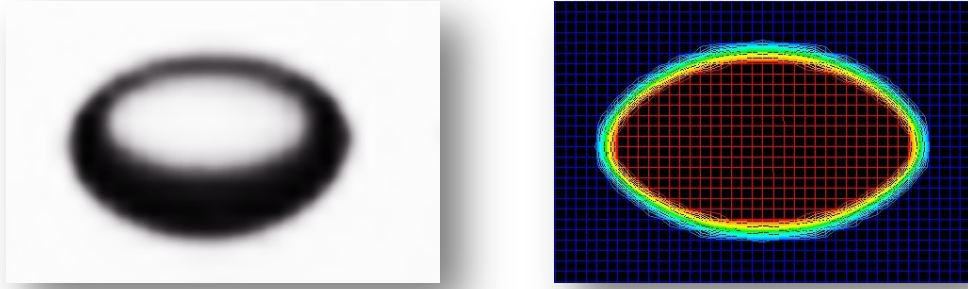
Açık yaklaşımda da örtük yaklaşımda olduğu gibi sonlu farklar esaslı interpolasyon yöntemi, hacimsel oran değerlerine uygulanmaktadır. Yalnız burada kullanılan hacimsel oran değerleri bir önceki zaman adımında hesaplanan değerlerdir. Açık yaklaşımın bir diğer farkı, kullanılan denklemin örtük yaklaşımda kullanılan denkleme olduğu gibi her bir zaman adımında transfer denkleminin iteratif çözümünün yapılmasına ihtiyaç duymamasıdır. Denklem 16, açık yaklaşım modelinde kullanılan denklemi göstermektedir.

$$\frac{\alpha_q^{n+1}\rho_q^{n+1} - \alpha_q^n\rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V \quad (16)$$

Açık yaklaşım sadece zamana bağlı problemlerin çözümünde kullanılmaktadır [22].

10.2.5 Ara Yüzey Hesaplamaları

Şekil 41'te gerçek baloncuk görüntüsü ile Fluent ile oluşturulan modeldeki baloncuk gösterilmiştir. Fluent ile oluşturulan modelde momentum transferi şekildeki ara yüzey alanında hesaplanmaktadır. Ara yüzey alanı geometrik yeniden yapılandırma (10.3.9) yöntemi ile temsil edilmektedir [22].



Şekil 41 Saf su ile yapılan deneylerde gözlenen ve Fluent ile oluşturulan baloncuk.

10.2.6 Malzeme Özellikleri

Taşıyım denklemlerinde kullanılan malzeme özellikleri her bir kontrol hacminde bulunan fazlar ile belirlenir. Çok fazlı akışın bulunduğu bir sistemde her bir hücredeki ortalama yoğunluk:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (17)$$

Diğer malzeme özellikleri de aynı prensip ile hesaplanmaktadır [22].

10.2.7 Momentum Denklemi

Tek bir momentum denklemi, ilgilenilen bütün alan boyunca çözülür ve elde edilen alan boyunca hız, fazlar arasında paylaşılır. Momentum denklemi fazların hacim oranlarına bağlıdır. Aşağıda verilen denklemde momentum denklemi, fazların yoğunluk, ρ , ve viskozite, μ , özelliklerine doğrudan bağlıdır.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (18)$$

Fazlar arasındaki hız farkının fazla olduğu durumlarda ara yüzeye yakın bölgelerde hesaplanan hızlar hatalı olabilmektedir. Bununla birlikte fazların viskozite oranının 1000'den büyük olması durumunda bir takım yakınsama problemleri yaşanabilmektedir. Bu yakınsama problemleri ve hatalı sonuçları ortadan kaldırmak için farklı yöntemler kullanılmaktadır [22].

10.2.8 Enerji Denklemi

Momentum denkleminde olduğu gibi bütün fazlar için tek bir enerji denklemi kullanılmaktadır. Yoğunluk, ρ , ve efektif termal iletkenlik, k_{eff} , fazlar arasında paylaşılmakta ve kaynak terim, S_h , diğer hacimsel ısı kaynaklarından yayılan ısı olduğu kadar ışıınım yoluyla yayılan ısıнын katkısını da içermektedir. Enerji denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{E}) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (19)$$

Akışkan Hacmi Yöntemi, enerjiyi, E , ve sıcaklığı, T , ağırlıklı ortalama değerler olarak kabul eder. Enerji denkleminde, her bir faz için öz ısıya ve fazlar arasında paylaşılan sıcaklığa bağlı olan enerji, E_q olarak tanımlanmıştır.

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (20)$$

Ara yüzeylere yakın bölgelerde hesaplanan hızların, fazlar arasında çok farklı olması durumunda ortaya çıkan yakınsama problemi, burada da fazların sıcaklık değerlerinin birbirinden çok farklı olması ya da fazların özelliklerinin çok hızlı değiştiği durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu problem de farklı yöntemler kullanılarak çözülebilmektedir [22].

10.2.9 Geometrik Yeniden Yapılandırma Yöntemi

Geometrik yeniden yapılandırma yöntemi Fluent programında kullanılan bir interpolasyon yöntemidir. Bu yöntem ile tamamı tek bir faz ile dolu olan bir hücrenin yüzey akısı hesaplanabilmektedir. Geometrik yeniden yapılandırma yöntemi, iki fazın arasındaki ara yüzeylere yakın olan hücreler için kullanılır. Bu yöntemle, parçalı doğrusal yaklaşım kullanılarak akışkanlar arasındaki ara yüzey belirtilir. İki akışkan arasında kalan ara yüzeydeki her bir hücrenin lineer bir eğriye sahip olduğu kabul edilir ve bu lineer eğri, hücre yüzeylerinde meydana gelen konveksiyonun hesaplamasında kullanılır.

Geometrik yeniden yapılandırma yöntemi sadece zamana bağlı problemler için kullanılmaktadır [22].

10.2.10 Yüzey Gerilimi

Yüzey gerilimi bir akışkan içindeki moleküllerin birbirini çekmesidir. Bir akışkan içinde bulunan bir baloncuğun içindeki bir moleküle, komşusu olan başka bir molekül tarafından uygulanan kuvvet sıfır olmasına karşın baloncuğun yüzeyinde içe doğru bir kuvvet uygulanmakta ve bu kuvvette baloncuğun yüzeyinin küçülmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak baloncuğun çukurlaşan kısmında basınç artışı meydana gelmektedir.

Yüzey gerilimi sadece yüzeye uygulanan bir kuvvettir ve baloncuğun içine doğru meydana gelen moleküller arası çekme kuvveti ile baloncuğun yüzeyi boyunca (radyal) dışarı yönde meydana gelen basınç farkından kaynaklı kuvveti dengeleyici rol oynar. Küresel olmayan bir baloncuk meydana gelirse yüzey gerilimi, fazlar arası yüzey alanını azaltarak serbest enerjiyi en az hale getirecek şekilde davranır.

Yüzey geriliminin etkisi boyutsuz nicelikler olan Reynolds rakamı, Re , ve Capillary rakamı, Ca ; ya da Reynolds rakamı, Re , ve Weber rakamı, We ile tanımlanır.

$$Re \ll 1 \text{ ise Capillary rakamı modellemede göz önünde bulundurulur, } Ca = \frac{\mu U}{\sigma}$$

Capillary rakamı, viskoz kuvvetin yüzey gerilimi kuvvetine oranı olarak tanımlanır.

$Re \gg 1$ ise Weber rakamı modellemede göz önünde bulundurulur, $We = \frac{\rho LU^2}{\sigma}$

Weber rakamı ise, akışkan eylemsizliğinin yüzey gerilimine karşı öneminin bir ölçütüdür.

Serbest akış hızı, U ile gösterilmektedir ve $Ca \gg 1$ ya da $We \gg 1$ olduğu durumda yüzey gerilimi etkisi ihmal edilebilmektedir [22].

10.2.11 Cisim Kuvveti

Yüzey gerilimi ya da yer çekimi gibi büyük cisim kuvvetleri çok fazlı akışlarda etkili oldukları zaman, momentum denkleminin içerdiği cisim kuvveti ve basınç değişimi terimi denge halinde bulunmaktadır. Fluent programında, ayrılmış algoritmalar, basınç değişimi ve cisim kuvvetleri hesaba katılmadığı takdirde doğru sonuç elde edilmesi mümkün değildir. Ayrıca Akışkan Hacmi Yönteminin kullanıldığı problemler için hesaplama yoğunluğu (operating density) olarak yoğunluğu en az olan fazın yoğunluğu girilmelidir. Böylece hidrostatik basınç, daha az yoğun olan fazın içinde hesaba katılmaz ve momentum dengesinin tamamlama hassasiyetini artırır. Ortamda sıkıştırılabilir bir faz bulunuyor ise hesaplama yoğunluğunun sıfır olarak girilmesi gerekmektedir.

Cisim kuvvetlerinin bulunduğu ve akışkan hacmi ya da karışım yöntemlerinden birinin kullanıldığı problemler için kısmi dengede olan basınç değişimi ve cisim kuvvetlerinin hesaba katılması, sonucun daha hızlı yakınsamasını sağlamaktadır [22].

10.2.12 Duvara Yapışma Etkisi

Bu seçenek duvara uygulanan bir sınır koşulundan çok akışkanın duvarla yaptığı temas açısını kullanarak duvarın yakınında bulunan hücrelerin yüzey normallerinin ayarlanmasını sağlar [24]. Buna duvara yakın yüzeylerdeki eğrilik ayarı dinamik sınır koşulu sonuçları denir. Duvar ile temas açısı θ_w olursa, duvarın yanındaki hücrede yüzey normali;

$$\hat{n} = \hat{n}_w \cos \theta_w + \hat{i}_w \sin \theta_w \quad (21)$$

Burada $\hat{n}_w$ ve $\hat{i}_w$ sırasıyla birim vektör normali ve duvarın teğetidir. Temas açısı ile duvardan bir hücre uzakta hesaplanan yüzey normali, bölgesel yüzey eğimini belirler. Bu yüzey eğimi, yüzey gerilimi hesaplanmasında cisim kuvvetinin ayarlanması için kullanılır [22].

10.2.13 Akışkan Hacmi Yönteminde faza özgü koşullar

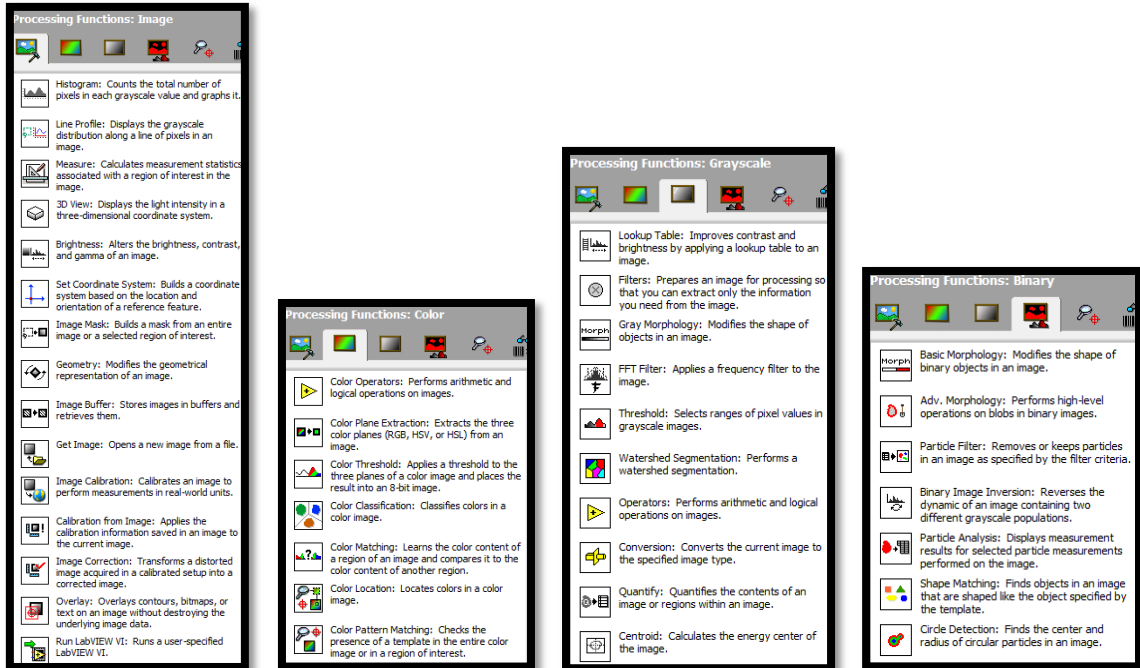
Akışkan hacmi yöntemi kullanıldığı durumda, Çizelge 7’de verilen her bir bölge çeşidi için koşul tanımlanması gerekmektedir [22].

Çizelge 7 Akışkan hacmi yöntemi (VOF) için faza özgü ve karışım koşulları [22].

Tür	Birinci Faz	İkinci Faz	Karışım
Egzoz fanı; giriş kanalı; emme fanı; çıkış kanalı; basınç tanımlı giriş; basınç tanımlı çıkış; hız tanımlı giriş	-	Hacimsel oran	Bütün koşullar
Kütlesel debi giriş	Kütlesel debi/akı	Kütlesel debi/akı	Bütün koşullar
Eksen; fan; dışarı akış; periyodik; gözenekli tabaka geçiş; radyatör; katı; simetri; duvar	-	-	Bütün koşullar
Akışkan	Kütle kaynağı; diğer gözenekli tabaka girişleri	Kütle kaynağı; diğer gözenekli tabaka girişleri	Gözenekli tabaka bölgesi: gözeneklilik; diğer hepsi

10.3 Görüntü İşleme Yazılımında Kullanılan Fonksiyonların Özellikleri

Bu çalışmada baloncukların analizinin yapıldığı görüntü işleme programında kullanılan fonksiyonlar ve bu fonksiyonların özellikleri aşağıda verilmiştir. İlk menüdeki fonksiyonlar, histogram, çizgi profili, ölçme, üç boyutlu görüntü, parlaklık, görüntü maskeleme, koordinat sistemi ayarı, geometri, görüntüyü ön belleğe atma, görüntü açma, görüntü kalibrasyonu, görüntüden kalibrasyon ayarı alma, görüntü doğrulama, görüntü kaplama ve LabVIEW 6 programını çalıştırma komutlarıdır (Şekil 42a). İkinci menüde ise renk işleme fonksiyonları bulunmaktadır ve bunlar renk operatörleri, renk düzlemi çıkarımı, renk eşik değeri, renk sınıflandırma, renk eşleme, renk belirleme, renk kalıbı eşleme seçenekleridir (Şekil 42b). Üçüncü menü gri tonlamalı işleme fonksiyonlarıdır. Bu menüde ise, genel bakış tablosu, filtreler, gri biçim bilgisi, frekans filtresi, eşik değeri, sınır belirleme, aritmetik ve mantıksal operatörler, görüntü çeşidi dönüştürücü, görüntü ölçme ve enerji merkezi hesaplama seçenekleri bulunmaktadır (Şekil 42c). Dördüncü menüde ikili işleme fonksiyonları bulunmaktadır. Bunlar, temel kalıp ayarları, gelişmiş kalıp ayarları, parçacık filtreleme, ikili görüntü çevrimi, parçacık analizi, şekil eşleme ve halka tespiti seçenekleridir (Şekil 42d). Beşinci ve altıncı menülerde karakter ve geometrik eşleme gibi seçenekler bulunmaktadır. Bu çalışmada beşinci ve altıncı menüler kullanılmamıştır [13].



Şekil 42 (a) Görüntü işleme fonksiyonları, **(b)** Renk işleme fonksiyonları, **(c)** Gri tonlamalı işleme fonksiyonları, **(d)** İkili işleme fonksiyonları.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Berkin Türkiz PINARBAŞI

Doğum Yeri : İstanbul

Doğum Yılı : 1985

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise : Muratpaşa Lisesi (1999 - 2002)

Lisans: Hacettepe Üniveristesi Nükleer Enerji Mühendisliği (2004 - 2009)

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrubesi

2011-...: Araştırma Görevlisi, Nükleer Enerji Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.)