İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVA-SU İKİ FAZLI AKIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Berk KURTULUŞ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

MAYIS 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAVA-SU İKİ FAZLI AKIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Berk KURTULUŞ
(503101131)

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurdil ESKİN

MAYIS 2014

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503101131 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ahmet Berk KURTULUŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"HAVA-SU İKİ FAZLI AKIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Nurdil ESKİN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Mesut GÜR** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Özden AĞRA Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **05 Mayıs 2014**
Savunma Tarihi : **28 Mayıs 2014**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim süresince gerek tez aşamasında gerek gündelik herhangi bir konuda yardımını hiçbir zaman esirgemeyerek danışmanlığımı sürdürdüğü süre zarfında ilminden faydalandığım ve bu çalışmayı yürütmemi sağlayıp her daim yapıcı telkinleriyle hayatıma pozitif katkılarda bulunan danışman hocam sayın Prof. Dr. Nurdil Eskin'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.
Tez çalışmam çerçevesinde deneylerim boyunca yardım ve teşvikleriyle desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve yanımda olan sayın Makina Yüksek Mühendisi Emrah Deniz'e, her konuda desteğini aldığım ve beraber çalışmaktan onur duyduğum değerli hocam sayın Doç. Dr. Mustafa Atmaca ile maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen mesai arkadaşım Arş.Gör. İlker Turgut Yılmaz'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.
Ayrıca İTÜ Makina Fakültesi Isı Tekniği Laboratuvarı Teknisyenleri Niyazi Güven ve Mehmet Ziya Kumcu'ya da teşekkürlerimi sunarım.
Bu zorlu süreçte göstermiş olduğu özverileri ile bugüne gelmemi sağlayan maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme ve tez çalışmamın son demlerinde hayatıma girerek yaşam motivasyonumu arttıran Sümeyye Arslan'a sonsuz teşekkürler...

Mayıs 2014

Ahmet Berk Kurtuluş
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 6
1.2 Literatür Araştırması 7
2. İKİ FAZLI AKIŞ MODELLERİ **31**
2.1 Parametreler 31
2.1.1 Yerel boşluk oranı 31
2.1.2 Kinematik boşluk oranı 32
2.1.3 Kütlesel gaz fazı oranı 32
2.1.4 Kayma hızı 32
2.1.5 Bağıl hız 32
2.2 İki Fazlı Akış Rejimleri ve Akış Haritaları 32
2.2.1 Akış rejimleri 33
2.2.2 Akış haritaları 34
2.3 Ayrılmış Akış Modeli 35
3. DENEYSEL ÇALIŞMA **37**
3.1 Deney Tesisatı ve Ekipmanları 37
3.2 Ölçüm Süreci 38
3.2.1 Enjektör 38
3.2.2 Test düzeneği 39
3.2.3 İkili optik prop 41
3.2.4 Ölçüm pozisyonları 44
3.2.5 Basınç ölçümleri 45
3.3 Hata Analizi ve Belirsizlik Oranı 46
4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI **51**
4.1 Boşluk Oranı 51
4.1.1 Üst akım bölgesi 52
4.1.2 Test bölümü ve alt akım bölgesi 54
4.1.2.1 Daralma kesiti 54
4.1.2.2 Genişleme kesiti 56
4.2 Kabarcık Sayısı 59
4.2.1 Üst akım bölgesi 59
4.2.2 Test bölümü ve alt akım bölgesi 61
4.2.2.1 Daralma kesiti 61
4.2.2.2 Genişleme kesiti 63

4.3 Kabarcık Büyüklüğü 65
4.3.1 Üst akım bölgesi 65
4.3.2 Test bölümü ve alt akım bölgesi 67
4.3.2.1 Daralma kesiti 67
4.3.2.2 Genişleme kesiti 69
4.4 Basınç Ölçümü 70
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 73
KAYNAKLAR 79
ÖZGEÇMİŞ 87

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{A_i}$: Ara yüzey alan konsantrasyonu [m^{-1}]
$\mathbf{A_{gaz}}$: Gaz fazının kesit alanı [m^2]
$\mathbf{A_{sıvı}}$: Sıvı fazının kesit alanı [m^2]
$\mathbf{b_{1,2}}$: Yer çekimi kuvveti [N]
$\mathbf{c_p}$: Basınç katsayısı
$\mathbf{f_{1,2}}$: Basınç ve yer çekimi dışındaki kuvvetler [N]
$\mathbf{G_{gaz}}$: Gaz fazının görünen hızı [m/s]
$\mathbf{G_{sıvı}}$: Sıvı fazının görünen hızı [m/s]
$\mathbf{L}$: Boru uzunluğu [m]
$\mathbf{m_{gaz}}$: Gaz fazı kütlesi [kg]
$\mathbf{m_{toplam}}$: Karışımın toplam kütlesi [kg]
$\mathbf{\dot{M}_{gaz}}$: Gaz fazının kütlesel debisi [kg/s]
$\mathbf{\dot{M}_{toplam}}$: Karışımın toplam debisi [kg/s]
$\mathbf{n}$: Kırılma indisi [°]
$\mathbf{p}$: Basınç [Pa]
$\mathbf{S}$: Kayma hızı [m/s]
$\mathbf{S_{12}}$: Fazlar arası madde değişim miktarı [kg]
$\mathbf{S_{1,2}}$: Faza dışarıdan ilave edilen madde miktarı [kg]
$\mathbf{t}$: Zaman [s]
$\mathbf{T}$: Toplam zaman aralığı [s]
$\mathbf{T_{gaz}}$: Gaz fazı zamanı [s]
$\mathbf{u_{bağıl}}$: Fazlar arası hız miktarı [m/s]
$\mathbf{u_{gaz}}$: Gaz fazının hızı [m/s]
$\mathbf{u_{sıvı}}$: Sıvı fazının hızı [m/s]
$\mathbf{x}$: Gaz fazının kütlesel oranı
$\boldsymbol{x}$: Bir boyutlu eksenel koordinat
$\mathbf{V_1}$: Vektörel hız [m/s]
$\mathbf{V_{gaz}}$: Gaz fazının hacmi [m^3]
$\mathbf{V_{toplam}}$: Fazların toplam hacmi [m^3]
$\mathbf{\dot{V}}$: Karışımın toplam hacimsel debisi [m^3/s]
$\mathbf{\dot{V}_{gaz}}$: Gaz fazı hacimsel debisi [m^3/s]
$\mathbf{z}$: Bir boyut

Yunan Harfleri

$\boldsymbol{\alpha}$: Yerel boşluk oranı
$\boldsymbol{\beta}$: Kinematik boşluk oranı (hacimsel miktar)
$\boldsymbol{\theta}$: Kırılma açısı [°]
∂ : Kısmi türev
$\boldsymbol{\lambda}$: Değişken parametre
$\boldsymbol{\rho}$: Yoğunluk [kg/m^3]
$\boldsymbol{\rho_{gaz}}$: Gaz fazının yoğunluğu [kg/m^3]
$\boldsymbol{\rho_{hava}}$: Havanın yoğunluğu [kg/m^3]

$\rho_{sıvı}$: Sıvı fazının yoğunluğu [kg/m^3]
ρ_{su} : Suyun yoğunluğu [kg/m^3]
σ : Yüzey gerilimi [Pa]
μ : Dinamik viskozite [kg/ms]
∇ : Operatör
υ_1 : Bir boyutlu hız [m/s]
ψ : Değişken parametre

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar 25
Çizelge 3.1 : Hata ve belirsizlik oranları 46

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yatay borularda iki fazlı akış rejimleri..... 33
Şekil 2.2 : Geliştirilmiş Baker yatay akış diyagramı. 35
Şekil 3.1 : Deney tesisatının şematik gösterimi. 37
Şekil 3.2 : Deney tesisatı. 38
Şekil 3.3 : In-line enjektör. 39
Şekil 3.4 : Test bölgesinin detaylı şematik görünüşü. 40
Şekil 3.5 : Kesit değişimi gerçekleşen test bölgesi. 40
Şekil 3.6 : 4.5° açısında daralma ve genişleme test borusu 40
Şekil 3.7 : 9° açısında daralma ve genişleme test borusu. 41
Şekil 3.8 : 15° açısında daralma ve genişleme test borusu. 41
Şekil 3.9 : İki fazlı akış parametrelerinin belirlendiği ikili optik prop. 42
Şekil 3.10 : Optik probun çalışma prensibi. 42
Şekil 3.11 : Osiloskop..... 43
Şekil 3.12 : Sinyallerin kaydedilerek bilgisayara aktarılmasını sağlayan cihaz..... 43
Şekil 3.13 : İkili optik probun ölçüm noktaları..... 44
Şekil 3.14 : Test bölgesi basınç ölçümünün şematik görünüşü. 45
Şekil 3.15 : Fark basınç sensörü. 45
Şekil 3.16 : USB-6229 Data logger. 46
Şekil 3.17 : Tesisatta kullanılan manometreler ve yerel basınç transmiterinin kalibrasyon eğrileri 47
Şekil 3.18 : Enjektör (üstte) ve üstakım (altta) kanalı fark basınç ölçer kalibrasyon bilgileri ve hata oranları 48
Şekil 3.19 : Kesit değişim bölgesi (üstte) ve altakım (altta) kanalı fark basınçölçer kalibrasyon bilgileri ve hata oranları..... 48
Şekil 3.20 : Kanal sistemi fark basınçölçer kalibrasyon bilgileri ve hata oranları. ... 49
Şekil 4.1 : Üst akım bölgesinde β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı..... 53
Şekil 4.2 : 4.5° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı 54
Şekil 4.3 : 9° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı. 55
Şekil 4.4 : 15° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı 56
Şekil 4.5 : 4.5° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı 57
Şekil 4.6 : 9° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı 58
Şekil 4.7 : 15° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı 58
Şekil 4.8 : Üst akım bölgesinde β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı 60

Şekil 4.9 : 4.5° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı..... 61
Şekil 4.10 : 9° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı..... 62
Şekil 4.11 : 15° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı..... 63
Şekil 4.12 : 4.5° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı. 64
Şekil 4.13 : 9° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı 64
Şekil 4.14 : 15° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı 65
Şekil 4.15 : Üst akım bölgesinde β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı 66
Şekil 4.16 : 4.5° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı 67
Şekil 4.17 : 9° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı 68
Şekil 4.18 : 15° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı 68
Şekil 4.19 : 4.5° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı. 69
Şekil 4.20 : 9° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı. 69
Şekil 4.21 : 15° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı 70
Şekil 4.22 : Alt akım bölgesinde daralan kesitteki basınç değişimleri 71
Şekil 4.23 : Alt akım bölgesinde genişleyen kesitteki basınç kaybı. 72
Şekil 5.1 : Deneylerde oluşan akış rejimleri. 76

HAVA-SU İKİ FAZLI AKIŞ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

ÖZET

Bir iki fazlı akış olgusu olan gaz ve sıvı fazlarının birlikte gerçekleştirdikleri fiziksel duruma, kimyasal, mekanik, nükleer ve uzay uygulamalarında oldukça karşılaşılmaktadır. Bu şartlar altında özellikle nükleer güç santrallerinde kompleks yapıları sebebiyle oldukça fazla teste ve geniş analizlere tabi tutulmayı gerektirmektedir.

Gaz-sıvı akışı, manifoltlarda ve emniyet valfleri gibi endüstriyel uygulamalarda da geniş bir kullanım sahasına sahiptir. Boruların veya kanalların oluşturduğu bu tip sistemler içerisinde kesit değişimleri, sistem gereği tasarımcının karşısına önemli bir tasarım parametresi olarak çıkmakta ve mühendislik hesaplamaları açısından sabit kesitlerden farklı dikkat edilmesi gereken hususlar ortaya çıkmaktadır. Genişleme, daralma veya orifislerden oluşan kesit değişimleri, iki fazlı akışın kesit değişimi boyunca farklı konfigürasyon göstermesine sebep olmaktadır.

Çalışmanın kapsamı; yatay borularda düz ve daralma ile genişleme gösteren kısımlardaki iki fazlı akış parametrelerinin deneysel yöntemler ile araştırılmasıdır. Akışkan çifti olarak hava ve su kullanılan sistemde; ölçümler ikili optik prop ile gerçekleştirilmiş ve operasyonel parametrelerin saptanması sağlanmıştır. Kesit değişiminin etkisini görebilmek için düzgün daralan ve genişleyen kesit şeklinde iki durum kullanılmıştır. Düz bir test bölümünden geçen akış, kesit değişimi gerçekleşen bölüme gelerek her iki durum için de üç farklı açıda genişleme ve daralma gösteren alana giriş yapmaktadır. Deneyler kapsamında üç farklı hava debisi kullanılarak ilgili parametrelerin test bölümü öncesinde, sırasında ve sonrasındaki değişiklikler izlenmiştir.

Bu tez kapsamında; ilk bölümde, iki fazlı akışa giriş yapılmakta ve gaz-sıvı akışı üzerinde durulup tezin amacı ve çok fazlı akışlar ile ilgili literatür araştırmaları sunulmuştur.

İkinci bölümde, iki fazlı akış modelleri irdelenmiş ve kesit değişimini kapsayan modeller ile ilgili parametreler verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez çerçevesinde ortaya konulan deney metodolojisi anlatılmış, deney tesisatı ve ekipmanları ile ölçüm süreci ve akabinde oluşan belirsizlikler ve hatalar irdelenmiştir.

Dördüncü bölümde, deneysel çalışma sonuçları üç farklı kesit için verilmiş; sabit, düzgün daralan ve genişleyen borular boyunca iki fazlı akış değişim karakteristiği incelenmiştir.

Beşinci bölümde, deneysel çalışmanın bulguları yazılarak iki fazlı akışta önemli değişimlere sebebiyet veren fiziksel mekanizmalar açıklanmış ve çalışma kapsamında öneriler sunulmuştur.

INVESTIGATION OF AIR-WATER PARAMETERS ON TWO PHASE FLOW

SUMMARY

A two-phase flow is the phenomenon that both the gas and liquid phases physically implement together, encounters in chemical, mechanical, nuclear, and aerospace applications. Under these conditions, particularly in nuclear power plants due to the complex structure is being subjected rather than tests and require extensive analysis.

Two-phase flow consisting gas and liquid phases is a complex structure, because of having an interface structure which undergoes deformation and compressibility of phases. In this type of flow can be traced to a very broad interface configurations. Containing two-phase flow systems have a large area in the industry and nature; many engineering applications as petroleum, chemical and power generation industries, and fluid transfer lines are encountered in practice. In engineering equipment design and process design, to be determined the relevant parameters and variability rates of these parameters under physical conditions is a significant engineering optimization. The effects of the transmission mechanism may generate results; heat, mass and momentum transfer would cause the results to see the design is an essential boundary condition. Economic and mechanical design, and optimization requirements in order to ensure safe operating conditions, hydrodynamic and thermal characteristics of two-phase flow within the framework of the experimental conditions can be estimated correctly in an appropriate range of values is important.

Flow maps basically pose to determine the distribution of interfacial phase in two-phase continuous media. The characteristics of flow play a major role in heat and mass transfer. Measurement of relevant parameters and operational characteristics of two-phase flow system provides the possibility to work on. Gas-liquid two-phase flow studies on the flow maps, in order to help achieve important practical results and research area is kept at the forefront of academic studies. Various types of flow and the resulting flow regimes, in particular a moving interface between phases in the design calculations is very important. Many parameters, can be effective in the formation of the flow map: temperature, pressure, void ratio, the phase velocity, etc..

Gas-liquid flow is used extensively in industrial applications such as safety valves and in manifolds. Cross-section changes in these systems consisting pipes or channels, are important design parameter for designers. In terms of engineering calculations, unlike the constant cross-section, is emerging issues that need attention. Expansion, contraction or changing in cross-section consisting of orifices, two-phase flow throughout the cross-section change causes to show different configurations.

The disclosed parameters in determining the two-phase flow characteristics: mass flow and velocity, temperature, void fraction, critical heat flux, interfacial film

thickness, flow regime, the wall shear stress and turbulence and velocity distribution in the form listed.

The sudden change in cross section of two-phase flow, there are several approaches in the description. Process engineering is a condition frequently encountered in the security system. Pressure safety relief valve in such systems are preferred. Single-phase two-phase conversion is affected by pressure variations coming or already two-phase as the flowing fluid to determine the flow characteristics of the pair as a basis of design is an essential state. Would cause changes in the physical parameters of sharp corners and pressure changes, sudden changes in cross-section is an important result of the case.

Aim of this study, to investigate the two-phase flow parameters performed by the expansion and contraction of the horizontally aligned pipe using experimental methods. As a pair of fluid, air and water are used in this system; measurements were performed with dual optical probe and determination of operational parameters are provided. To see the effect of changes in cross-sectional narrowing and expanding properly used in both cases. A straight flow through the test section, came to part of section exchange that took place at three different angles for both cases access to the area is showing expansion and contraction. Under air flow experiments are using three different test portion relevant parameters before, during and after changes were monitored.

Sudden changes in cross-section and high pressure resulting from exchange reasons from single phase flow from the inlet to the outlet flow passage may be two-phase. Scope of the study; enlarging the horizontal pipe part and narrowing in a flat two-phase flow parameters is to be examined with experimentally.

Air and water, is used as fluid pairs in the two phase flow; are provided by performing measurements with dual optical probe to determine the operational parameters. To see the effect of changes in cross-sectional narrowing and expanding cross-sectional shape, two cases are used. A straight flow through the test section, come to the test section for both cases in three different expansion and contraction angle (4.5°, 9° and 15°) showing the test section is input. Three different experiments under air flow (30, 50 and 60 l/min) test section of the relevant parameter used before, during and after changes were monitored.

As a result of the experiments, two-phase flow parameters vacancy rate number of bubbles and bubble size distributions were obtained for axial pipes. Also the system during a single-phase and two-phase flow pressure loss suffered was measured.

During the measurements with dual optical probe carried out, to determine the operational parameters are provided. Scope of this thesis only the vacancy rate, the number of bubbles and bubble size were investigated for changes in the test assembly. Within the scope of the experiments, the water flow rate of the liquid phase 3 l/s capacity is kept constant; three different volumetric flow for the air in the gas phase (30, 50, 60 l/min) test section of the relevant parameter used before, during and after changes were monitored.

This thesis consists of five chapters. The first part of this thesis gives information about the two-phase flow and focuses on gas-liquid flow, introduces the subject of the thesis and the research literature on multiphase.

In the second part, two-phase flow models are examined and parameters related with models including cross-sectional variation are given.

In the third part installment, equipment and methodology of the experiment, suggested within the frame of the thesis, is explained, and measurement process of the experiment, the uncertainity and errors of the process are discussed.

In the fourth part, the experimental study results for three different sections are given. Characteristics of two-phase flow through constant, uniformly shrinking and expanding pipes are examined.

In the fifth part, findings of the experimental study are presented. Mechanism, causing significant changes on two-phase flow, are explained and suggestions within the frame of the study are given.

Local void fraction distribution visually indicating graphics formation upstream to the vertical axis coordinates 100% value, while 30 l/min air flow rate 60% was sufficient, narrowing sections 30% and the expansion sections 100% values were included.

Graphical distribution of the number of bubbles being formed, the scale of the injector 50000, 20000 in the upstream region, the contraction in cross-section 40000, and 15000 bubbles in the expansion section number value is used.

Bubble size distribution graph being formed, the scale 20 in the injector, in the upstream 100, the contraction in cross section 25, and 100 mm were used in the expansion section.

1. GİRİŞ

Çok fazlı akışlar genelde iki fazlı akış halindedir. Temel olarak iki fazlı akışlar; sıvı-katı, gaz-sıvı, gaz-katı gibi ikili veya sıvı-sıvı-gaz gibi üçlü komponentlerden oluşurlar. Katı-sıvı-gaz gibi üç fazlı akış durumlarının da olduğu kan akışı gibi fiziksel olaylar gerçekleşebilmektedir. Çok fazlı akışlara köpük, yağmur, denizdeki dalgalar, bulutlar, hava kabarcığı, buharlaştırıcılar ve yoğuşturucular, ısı değiştiricileri, kazanlar, otomotiv endüstrisinde hava-yakıt karışımı gibi oldukça geniş bir sahada karşılaşılmaktadır.

İki fazlı akışlar, karmaşık yapılarından dolayı deneysel çalışmalar ışığında geliştirilmeye çalışılan matematiksel modeller ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Bundan dolayıdır ki bilim insanları tarafından önemli bir araştırma konusu olarak ön plana çıkmaktadır.

Bir iki fazlı akış olgusu olan gaz ve sıvı fazlarının birlikte gerçekleştirdikleri fiziksel duruma, kimyasal, mekanik, nükleer ve uzay uygulamalarında oldukça karşılaşılmaktadır. Bu şartlar altında özellikle nükleer güç santrallerinde kompleks yapıları sebebiyle oldukça fazla teste ve geniş analizlere tabi tutulmayı gerektirmektedir.

Gaz ve sıvı fazlarından oluşan iki fazlı akışta kompleks bir yapı görülmektedir, çünkü deformasyona uğrayan bir ara yüzey yapısı ve fazların sıkıştırılabilme durumu mevcuttur. Bu tip akışlarda çok geniş ara yüzey konfigürasyonları izlenebilmektedir. İki fazlı akış içeren sistemler doğada ve endüstride geniş bir sahaya sahiptirler; birçok mühendislik uygulaması olarak petrol, kimya ve güç üretim endüstrileri ile akışkan nakil hatları uygulamalarında karşılaşılmaktadır. Mühendislik ekipman tasarımlarında ve proses dizaynlarında ilgili parametrelerin belirlenebilmesi ve fiziksel şartlar altında değişkenlik oranlarının tayin edilebilmesi önemli bir mühendislik optimizasyonudur. Aktarım mekanizmalarının etkilerinin oluşturabileceği sonuçlar; ısı, kütle ve momentum aktarımlarının sebep olacağı neticeleri görebilmek tasarımda esas bir sınır koşuludur. Ekonomik ve mekanik

tasarım, optimizasyon gereksinimi ile güvenli işletme şartlarının sağlanabilmesi amacıyla iki fazlı akışların hidrodinamik ve ısıl karakteristiklerinin deneysel şartlar çerçevesinde uygun bir değer aralığında doğru tahmin edilebilmesi önemlilik arz etmektedir.

Akış haritaları, iki faz sürekli ortamında faz ara yüzeyinin dağılımını belirlemede temel teşkil etmektedir. Akış karakteristiği ve ısı ve kütle transfer transferinde önemli bir rol oynamaktadır. İlgili parametrelerin ölçümü ve iki fazlı akış sistemlerinin operasyonel karakteristikleri üzerinde çalışılmaya imkan sağlamaktadır. Gaz-sıvı iki fazlı akışlarında akış haritaları üzerine çalışmalar, önemli pratik sonuçlara ulaşılmasını sağlamakta ve araştırma alanı olarak akademik çalışmalarda ön planda tutulmaktadır. Çeşitli akış tipleri ve sonucunda oluşan akış rejimleri, özellikle hareket halindeki fazlar arası ara yüzeylerin tasarım hesaplamalarında ihmal edilmeyecek şekilde önemi bulunmaktadır. Birçok parametre, akış haritalarının oluşumunda etkili olabilmektedir: sıcaklık, basınç, boşluk oranı, faz hızları vs... [1].

Boru geometrisi, fiziksel özellikler ve iki fazlı akışın debileri, gaz-sıvı ara yüzeyinde karmaşık bir fonksiyon olarak işlem görür ve akış profiline önemli bir etkisi vardır. Akış yapısı analizi iki faz hareketinin anlaşılması ve momentum ve ısı transferi modellerinin geliştirilmesi adına önemlidir [2].

Bertani C. ve diğ. (2010) iki fazlı akış ölçümlerinin belirlenmesi ve anlaşılması aşamasında birçok teknik proses olduğunu vurgulamışlardır; özellikle iş kazası koşullarının hızlı bir biçimde oluşabileceği reaktör sistemlerinde, koşulları belirleme, gerekli kodlamaların yapılabilmesi ve sistemin doğru tanımlanabilmesi adına bu işlemlerin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

İki fazlı akış ölçümlerinde yaklaşık 25 yıldır çeşitli çözüm önerileri sunulmaktadır. Sistem çözümlemeleri için genelde aşağıda belirtilen hususlar çerçevesinde hedefler konmuştur:

- Lokal veya genel bilgiler.
- Ekipmanların ve cihazların yüksek hassasiyeti ve sensörlerin doğruluğu.
- Kolay uygulanabilir teknikler ortaya koyma ve fiziksel olarak yorumlayabilme.

Ancak bu kadar uğraşa ve çabaya rağmen cihazların standardizasyonu ve optimizasyonu günümüzde hala devam etmektedir. Ortaya konan her bir problem için özel bir çözüm ve buna bağlı olarak da araştırmacıların tecrübelerinin ön plana çıkması gerekmektedir. Özellikle ölçüm algoritmalarının geliştirilmesi ve ölçüm sinyallerinin aktarılması işlemleri birçok iki fazlı akış prosesinde uygulanabilirliğinin arttırılması adına ihtiyaç olan bir durumdur.

İki fazlı akışlarda ölçüm sistemlerinin başarılı bir şekilde sürekli uygulanabilirliği mesela nükleer reaktörler için söz konusu değildir, çünkü radyasyon seviyesi veya su miktarının değişimini ortaya koyabilmek kolay olmamaktadır. Ayrıca iki fazlı akış proseslerinde ilgili parametrelerin doğrudan ölçümü de mümkün değildir; yerel kayma veya faz hızları gibi özellikler, kurulan korelasyonlar veya geliştirilen modeller ışığında elde edilebilmektedir. Bütün bunlara rağmen birçok üniversite ve araştırma enstitüsünde bu bağlamda araştırmalar yapılmakta ve iki fazlı akış üzerine günümüzdeki veriler ve bilgilerin azımsanmayacak miktara ulaşmış olduğu ortadadır. Araştırmalar kapsamında deneysel çalışmalar yapılmaktadır ki bu incelemelerde sınır şartları belirlenen proseslerin geniş bir veri ağı altında geliştirilmesi hedeflenmektedir. Bir problem tanımlanır, sistem oluşturulur, ilgili ölçüm sistemleri belirlenerek ekipman ve cihazların kurulumu sağlanır. Sonrasında gerçek duruma bağlı veya yakın şartlar altında yaklaşımda bulunabilmesi için giriş komponentleri ve değerleri belirlenir. Oluşturulan çalışma koşulları ve ölçüm değerleri sonucunda bir model veya korelasyon kurulur ve literatürdeki ilgili veya yakın eşitliklerle karşılaştırılır. Sistemin, ekipmanların ve cihazların kısacası tüm prosesin belirsizlik ve hata analizleri de eklenerek elde edilen çözümlemelerin doğruluğu ve hassasiyeti incelenir. Bu sırada deneysel çalışma yanında nümerik çözümleme ile problemin ideal şartlara ne kadar yakınsayabileceği de ortaya konulur. Böylece her bir açıdan problemi doğrulama ve hassasiyetini belirlemek adına gerekli tüm işlemler gerçekleştirilmiş olur.

İki fazlı akışlar; anlaşılması, tanımlanabilmesi ve model olarak ortaya konması kolay olmayıp proses kapsamında düşünüldüğünde karmaşık sistemlerdir. Örneğin tek fazlı akışlar gibi hız profillerinin, türbülans ve sınır tabakalarının belirlenmesi kolay değildir.

Akış yapıları, akış rejimlerine bağlı karakteristiğinin belirlenebilmesi ilgili parametrelere bağlıdır. Uzaysal ve zaman koordinatlarının belirlenmesi tasarımcılara bağlı gelişmemektedir.

Akış rejimleri ise akışkan özellikleri, akış debileri ve düzenleri ile içlerinde aktıkları hacim geometrileri gibi birçok operasyonel şarta bağlıdır. Akış rejimleri arasındaki düzensizlik veya geçişler çok ileri seviye problemler olarak karşımıza çıkmaktadır.

İki fazlı akış karakteristiğinin belirlenmesinde ortaya konulan parametreler: Kütlesel debi ve hızı, sıcaklık, boşluk oranı, yerel boşluk oranı, kritik ısı akısı, ara yüzey film kalınlığı, akış rejimi, cidar kayma gerilmesi ile türbülans ve hız dağılımı şeklinde sıralanabilir.

Kimya ve petro-kimya endüstrisinde, gaz ve yağ proseslerinde ve de nükleer endüstrisinde; yani ileri sinyal proses teknikleri gereken sahalarda iki fazlı akış ölçümü için ekipman geliştirilmektedir.

Çok fazlı debimetreleri genel anlamda sıvı ve gaz bileşenlerinin akış debilerini tespit etmeye yarar. Bu konuda tek bir cihaz olmamakla birlikte; parametrelerin direkt ölçümünü sağlayan ve bir takım cihazların ekipmanlarla senkron olarak çalıştığı sistemler de mevcuttur. Birçok kombinasyonun mevcut olması, bileşenlerin gerektirdiği ölçüm tekniğini karşılayacak kapasitede olma zorunluluğundandır.

Ölçüm prosedürü için hangi parametrelerin ölçüleceği ve ekipman operasyonel şartların hangi fiziksel prensipler içereceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Şöyle bir kategorizasyon yapılabilir:

- In-line metre: Çok fazlı akışın direkt olarak ölçümünün alındığı ve herhangi bir ayrımın söz konusu olmadığı durumlar.
- Ayrı tip ölçümler:
- Gaz ve sıvının tamamen ayrı olduğu durumlar.
- Gaz ve sıvının kısmen ayrı olduğu durumlar.
- Gaz ve sıvının tek bir çizgisel hatta ayrı olduğu durumlar.

Her bir fazın hacimsel debisi, kesit alanı ile ilgili faz hızının çarpımının karşılığıdır. Bu demek oluyor ki altı tane parametre ölçülebilir veya hesaplanabilir durumdadır. (Sıcaklık, basınç, özgül hacim, yerel ve hacimsel boşluk oranları, yoğunluk)

Parametrelerin belirlenmesinde ekipmanlar kategorik olarak şöyle sıralanabilir:

- Yoğunluk ölçümü
- Hız ölçümü
- Momentum ölçümü
- Kütlesel debi ölçümü

Yoğunluk ölçümü; gama ışını absorbsiyonu, nötron bombardımanı, tüp ağırlığı yöntemi, sıcak film anemometresi, direnç-iletim probu, ultrasonik debimetre ile yapılabilmektedir.

Hız ölçümü; Darbeli-nötron aktivasyonu, elektromanyetik debimetre, türbin tip debimetre, gama ışını çapraz korelasyon metodu, nötron çapraz korelasyon yöntemi, akustik çapraz korelasyon yöntemi, direnç-iletim çapraz korelasyon metodu, lazer doppler hız ölçümü ve ikili optik prop ile yapılmaktadır.

Kütlesel debi ölçümü; kütlesel debimetre, titreşimli tüp ve fark basınç ölçümü ile ölçülmektedir.

Momentum akısı ölçümü; ventürimetre ve sürüklenme diski (türbinmetre) ile hesaplanabilmektedir [3].

İki fazlı akışın ani kesit değişimi tanımlamasında çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır. Proses mühendisliğinin güvenlik sistemlerinde sıkça karşılaşılan bir durumdur. Bu tip sistemlerde basınç emniyet valfi tercih edilir. Tek fazın gelerek basınç değişiminden etkilenip iki faza dönüşmesi veya hali hazırda iki fazlı olarak akan bir akışkan çiftinin akış karakteristiğini belirlemek tasarım esası olarak elzem bir haldir [4].

Keskin köşelerin sebep olacağı fiziksel parametre değişiklikleri ve basınç değişimleri, ani kesit değişimi durumlarının önemli bir sonucudur [5].

Gaz-sıvı akışı, manifoltlarda ve emniyet valfleri gibi endüstriyel uygulamalarda da geniş bir kullanım sahasına sahiptir. Boruların veya kanalların oluşturduğu bu tip sistemler içerisinde kesit değişimleri, sistem gereği tasarımcının karşısına önemli bir tasarım parametresi olarak çıkmakta ve mühendislik hesaplamaları açısından sabit kesitlerden farklı dikkat edilmesi gereken hususlar olarak belirginleşmektedir.

Genişleme, daralma veya orifislerden oluşan kesit değişimleri, iki fazlı akışın kesit değişimi boyunca farklı konfigürasyon göstermesine sebep olmaktadır.

Bu tez kapsamında; ilk bölümde, iki fazlı akışa giriş yapılmakta ve gaz-sıvı akışı üzerinde durulup tezin amacı ve iki fazlı akışlar ile ilgili literatür araştırmaları sunulmuştur. İkinci bölümde, iki fazlı akış modelleri irdelenmiş ve kesit değişimini kapsayan modeller ile ilgili parametreler verilmiştir. Üçüncü bölümde, tez çerçevesinde ortaya konulan deney metodolojisi anlatılmış, deney tesisatı ve ekipmanları ile ölçüm süreci ve akabinde oluşan belirsizlikler ve hatalar irdelenmiştir. Dördüncü bölümde, deneysel çalışma sonuçları üç farklı kesit için verilmiş; sabit, düzgün daralan ve genişleyen borular boyunca iki fazlı akış değişim karakteristiği incelenmiştir. Beşinci bölümde, deneysel çalışmanın bulguları yazılarak iki fazlı akışta önemli değişimlere sebebiyet veren fiziksel mekanizmalar açıklanmış ve çalışma kapsamında yapılan deneysel metodun ileriye yönelik hedefleri anlatılmıştır. Geliştirilmeye uygun modeller hakkında bilgi verilerek ilgili parametrelerin öne çıkarılması ön görülmüştür.

1.1 Tezin Amacı

Takip eden bölüm itibariyle görülmüştür ki literatür kapsamında gaz ve sıvı akışkan çiftlerinin oluşturduğu konu hakkında çok sayıda deneysel ve teorik çalışma yapılmıştır. Bu konuda önemli bir uygulamaya sahip güvenlik valfleri de bulunmaktadır.

Güvenlik valfi ekipmanın çalışma sahası olarak güç tesislerinde yüksek basıncı emniyetli bir şekilde tahliye yöntemi olarak kullanılır. Otomatik olarak boşaltım mekanizmasına sahip emniyet valflerinde, enerji harcamaksızın tasarım parametresi olarak belirlenen üst limit değerindeki basıncı aşması ile birlikte; kendiliğinden kapanarak çalışma şartları için tasarlanan normal basınç değerlerine düşmesi sağlanır. Basıncın kontrol altına alınması istenen tüm şartlar için bu tarz bir sisteme gereksinim duyulmaktadır. Böylece olası zararların da önüne geçilmesi sağlanmış olur.

Ani kesit değişimi ve yüksek basınç değişikliklerinden kaynaklanan sebeplerden ötürü girişten çıkışa doğru tek fazlı akıştan iki fazlı akışa geçiş olabilmektedir. Çalışmanın kapsamı; yatay borularda düz ve daralma ile genişleme gösteren

kısımlarındaki iki fazlı akış parametrelerinin deneysel yol ile incelenmesini sağlamaktır.

Akışkan çifti olarak hava ve su kullanılan iki fazlı akışta; ölçümler ikili optik prop ile gerçekleştirilerek operasyonel parametrelerin saptanması sağlanmıştır. Kesit değişiminin etkisini görebilmek için daralan ve genişleyen kesit şeklinde iki durum kullanılmıştır. Düz bir test bölümünden geçen akış, test bölümüne gelerek her iki durum için de üç farklı genişleme ve daralma açısı (4.5°, 9° ve 15°) gösteren test bölümüne giriş yapmaktadır. Deneyler kapsamında üç farklı hava debisi (30, 50 ve 60 l/dk) kullanılmış olup ilgili parametrelerin test bölümü öncesinde, sırasında ve sonrasındaki değişiklikler izlenmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Literatür incelemesi, iki fazlı akış olan durumlarda karşılaşılabilecek ve yapılan çalışma kapsamında benzerlik gösteren tüm durumlar esas alınarak yapılmıştır.

Öncelikle vurgulanan iki fazlı akışta debi ölçümleri üzerine ventürimetre ve türbinmetre ölçüm metodolojilerinin yaklaşımlarından bahsedilmiştir. Akabinde çeşitli komponentler arasında akışların yer aldığı durumlardan bahsedilmiştir, sırasıyla; adyabatik veya izotermal olmayan buhar-sıvı, çeşitli gaz-sıvı bileşenli akışlar, hava-yağ, iki fazlı ancak üç bileşenli akış, sıvı-sıvı akışlar ve son kısımda çalışma bileşenleri olan hava ve su komponentlerinin olduğu yatay düzlemde sabit kesitte ve kesit değişimi olan durumlar ile U-dönüşü olan prosesler literatür üzerinde araştırılmıştır.

Xing L. ve diğ. (2014) gaz sıvı akışlarında aynı anda iki fazın debi ölçümünde ultrasonik ve Coriolis debimetreler kullanmışlardır. Gaz fazının hacimsel debi ölçümünü ultrasonik debimetre ile gerçekleştirirken, Coriolis debimetresi ile kütlesel debi ölçümü gerçekleştirilmiş ve karekök ortalama hatası ile verilen giriş değerleri %3.09 ve %12.78 miktarında hata oranı tespit edilmiştir [6].

Steven R. (2008) yatay akışta yerleştirilen ventürimetre ile boyutsal analiz gerçekleştirmiştir. Türetilmiş boyutsal gruplar ile doppler metre çıkış verileri karşılaştırılmış ve korelasyonlar oluşturulmuştur. Sonuçlar neticesinde elde edilen boyutsuz sayılar, endüstriyel işlemlerde kullanılabilir olmakla birlikte; iki fazlı

akışlarda yatay akışlar için ve gelecekteki olası çalışmalar için tercih edilebilir olduğu görülmüştür [7].

Ghassemi H. ve Fasih H. F. (2011) sabit kütlesel debi verilip alt bölgenin basınç değişiminden bağımsız ventüri tip kanalda kavitasyonu incelemişlerdir. Debi, üst akım bölgesindeki basıncının test bölgesinden geçerken sıvının ayrılmasına ve yoğunluğuna bağlı olduğu ifade edilerek deneysel çalışmalar kapsamında üç farklı kesit kullanılmış, debideki ventüri etkisi kavitasyon üzerinde araştırılmıştır. Üst ve alt akım bölgesinde basınç oranının %20 fark oluşturduğu sonucuna ulaşılmıştır. Basınç kaybı, ventüri etkisine ve viskoz etkilere bağlı olarak azalma eğilimindedir [8].

Huang Z. ve diğ. (2005) tarafından gaz-sıvı akışı için yeni bir debi ölçüm metodu geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmada elektriksel kapasiteli tomografi tekniği ve ventürimetre üzerinde durulmuştur. Tikhonov düzeltmesiyle görüntü algoritması üzerinde araştırmalar yapılmıştır. İlgili kesitlerdeki boşluk oranı bu şekilde tespit edilmiştir. Ventürimetre ile hız ölçülmü sağlanmıştır. Deneysel sonuçlar, iki tip ekipmanın da uygulanabilirliğinin efektif olduğunu ortaya koymuştur [9].

Xu L. ve diğ. (2003) ventürimetrenin doğalgaz ve yağ endüstrisinde ıslak gaz ölçümünde önemli rol oynadığını belirtmişlerdir. Debi ölçümlerinde ıslak gaz kavramının etkili olduğu parametreler olarak kütle akış debisi ve miktarı tanımlanmıştır. Ventürimetreye yapılacak bir takım eklemelerle bu iki parametrenin aynı anda ölçülebileceği belirtilmiştir. Statik modelde; ventürimetreden gelen sinyalin fark basınç cihazında değerlendiribileceği görülmüştür [10].

Reis E. D. ve Goldstein L. J. (2008) gaz-sıvı kütlesel debi ölçümünde, ventüri ile kapasitif sensör kullanmışlardır. Akışkan çifti olarak hava-su karışımı kullanılmıştır. 13 m uzunluğunda ve 34 mm iç çapa sahip yatay plexiglas borularda yapılan deneylerde hava-su akış haritaları çıkartılması amacıyla tabakalı, dalgalı ve tıkaç akış tipleri kullanılmıştır. Basınç farkı ölçümünden gaz-sıvı kütlesel debisi hesaplanmıştır. Basınç sensörü uçları, ventüri uçlarına ve kapasitif sensörün olduğu yerdeki tutulma oranının kayda değer biçimde artış gösterdiği noktaya yerleştirilerek üç alternatif metot denenmiştir. Akış miktarı ve karışım yoğunluğu kullanılarak hedeflenen haritaların çıkarımı sağlanmıştır. Deneyler esnasında kapasitif sensör ile ventürimetre arasında su birikimi olduğu görülmüştür. Bu akış, tutulma oranı

ölçümlerinde hataya sebep olabilme ihtimaline karşı doğru metodoloji yöntemi olarak öneri şeklinde literatüre sunulmuştur [11].

Sun B. ve diğ. (2011) yatay ventürimetre boyunca iki fazlı akış için zamana bağlı sinyal işleme prosesi ile Uyarlanabilir Optimal Kernel (AOK) teorisinde incelemelerini yapmışlardır. Öncelikle gaz-sıvı akışında toplanan dinamik fark basınç sinyallerine post-proses işlemi yapılmıştır. Sonrasında ise AOK teorisi kullanılarak veriler analiz edilmiştir. Zaman-frekans spektrumunda iki fazlı akışın mekanizması üzerinde durularak; deneylerde gaz debisinin artması ile akışın kabarcıklı akıştan tıkaç akışa doğru geçtiğinde; sinyal frekanslarının enerji dağılımının da 15-35 Hz bandından 0-8 Hz değerlerine indiği görülmüştür. Akış haritası oluşturulmasında yeni bir yöntem olabileceği üzerinde sonuç bildirmişler ve %91.11 doğruluk tespit edildiği araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir [12].

Zheng G. B. ve diğ. (2008) iki fazlı akışlarda akış debisi ölçüm problemleri önemli seviyede olduğunu belirtip bunun için yağ akışı ölçümü üzerine yeni bir model geliştirmişlerdir. Türbin tip debimetre ve petal tip akış ayırıcı kullanılarak verilen sinyallerde 104 farklı durum için yağ-hava akışkan çiftlerinde deneysel ortamda çalışmalar sürdürülmüştür. Ölçümlerde %7.9 hata tespit edilmiş ve çalışmanın bulguları olarak bu ekipmanların kullanımının gaz-sıvı iki fazlı akış endüstrisinde özellikle gaz üretiminde kullanılabilme potansiyelinin yüksek olduğu görülmüştür [13].

Zhang F. ve diğ. (2010) çok fazlı akışlarda yüksek hacimsel gaz sürtünmesinin gaz-sıvı akışta önemli bir araştırma alanı olduğunu belirtmişlerdir. Fark basıncı ölçümü ile türbinmetre vasıtasıyla debi ölçümü yapılmaya çalışılmıştır. Halkasal yatay akışta araştırmalar sürdürülmüş; iki tip küçük türbin kullanılarak gaz fazının kütlesel sürtünmesini tespit etme ve kütlesel debi ölçümü yapılmıştır. Basınç kaybı ölçümleri beş farklı büyüklükteki türbinle yapılmış olup; türbin büyüklüğü ve yerleştirildiği konum üzerinde durulmuştur. Gaz fazının kütlesel sürtünmesi, gaz kütle debisi ve toplam kütlesel debi sırasıyla %7, %5 ve %10 hata mertebelerinde oldukları belirlenmiştir. Yüksek hacimsel gaz sürtünmesi ve düşük basınçlı gaz-sıvı akışlarında ikili türbinmetre kullanımının efektif olduğu görülmüştür [14].

Harms T. M. ve diğ. (2003) iklimlendirme ünitelerinin ayrıntılı sistem simülasyonlarından katalog değerleri elde etmek için araştırma yapmışlardır. Isı

değiştiricilerinin iki fazlı rejimde olduğu yerlerde boşluk oranı parametresi ile çalışmalar sürdürülmüştür. Yatay ısı değiştiricilerinde genelde halkasal akış izlenmektedir. Analitik halkasal akış modellerinde boşluk oranı hataları baskın rol oynamaktadır ki bundan dolayı boşluk oranı modelleri geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen modelde yatay boruda sıvı-buhar ara yüzeyindeki momentum eddy difüzyon değerlerinin değişimi ortaya konmuştur. Cidardaki kayma gerilmeleri için yaklaşımlarda bulunulmuştur. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer boşluk oranı değerleri ile karşılaştırılarak kütlesel akıların etkisinde uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır [15].

Cioncolini A. ve Thome J. R. (2011) adyabatik ve buharlaşan halkasal iki fazlı akış için analitik türbülans modeli üzerinde momentum aktarımını ve ısı transferini de göz önünde bulundurarak halkasal sıvı filmi üzerinde çalışmışlardır. Yoğunlaşılan bu modelde sıvı sürtünmesini ve eksenel basınç gradyeni dikkate alınmıştır. Deneyler; su, iki tip hidrokarbon ve altı farklı soğutucu akışkan için yatay ve dikey 1.03 ile 14.4 mm çaplarındaki borularda ve 0.1 ile 7.2 MPa basınç altında yapılmıştır [16].

Lima R. J. S. ve diğ. (2009) çalışmalarını yeni iki fazlı akış haritalarının geliştirilmesinde R717 soğutucu akışkan için paslanmaz çelik tipten imal edilmiş boruda ısı geçişi altındaki kaynama ve adyabatik iki fazlı durumdaki basınç düşümü sonuçları üzerine yoğunlaştırmışlardır. Bulguların literatür içerisindeki diğer kaynakları da baz alarak ulaştığı hata oranı %20 ile 30 civarında gerçekleşmiştir [17].

Magalhães G.R. ve diğ. (2013) yatay tıkaç akışta gaz çözünürlüğünün akışkan dinamiği özellikleri kapsamındaki etkilerini incelemişlerdir. Ölçümler, sıvı fazın yayılımını ve uzun kabarcıkların etkisinin sıvı film hızıyla etkileşimi ve basınç düşümü kapsamındadır. Gölge görüntüleme (SS) ve parçacık hızı görüntüleme (PIV) teknikleri ile araştırılan parametrelerin elde edilmesi sağlanmıştır [18].

Çomaklı Ö. ve diğ. (2002) çalışmalarını kaynayan yatay borulu bir sistemde iki fazlı akışın kararsızlığı üzerine yoğunlaştırmışlardır. Tüm deneyler sabit ısı girişi ve basınç koşulları altında yapılmıştır. Neticede test borusu uzunluğunun kararlılık üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve düşük giriş sıcaklığının kararlılıkta artış gösterdiği belirlenmiştir [19].

Cavallini A. ve diğ. (2001) çeşitli soğutucu akışkanların yatay boruda ısı transfer katsayılarını ve basınç kayıplarını deneysel olarak araştırmışlardır. HCFC-22

akışkanı değerleri için referans alınan deneylerde buhar miktarı, kütlesel hızlar, buharlaşma noktası sıcaklığı ve ısı transfer katsayısına etki eden cidar sıcaklığının etkileri incelenmiştir [20].

Quiben J. M. ve diğ. (2009) adyabatik olmayan iki fazlı kaynama olayı gösteren yatay pürüzsüz 2 ve 3 mm çapındaki bakır borularda deneyler yapılmıştır. R22 ve R410A soğutucu akışkanları kullanılan deneylerin sonuçları literatürdeki basınç kaybı haritaları ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modelin basınç kaybı doğruluğu %30 mertebesinde olduğu tespit edilmiştir [21].

Quiben J. M. ve Thome J. R. (2007) iki fazlı akışların termal sistemlerde basınç kaybı önemli bir husus olduğunu belirtip ilgili korelasyonların hassasiyeti üzerinde araştırmalarını sürdürmüşlerdir. Ampirik veya yarı-ampirik ifadelerin basınç kaybı hesaplamalarında geniş bir uygulama sahasına sahip olduğu görülmüştür. Geniş bir deneysel veriler sisteminde çok çeşitli şartlar için basınç kaybı hassasiyeti üzerine çalışmalarını devam ettirmişlerdir. İlgili şartların ne kadarının ve hangilerinin hesaplamalarda önem atfettiği ortaya konmuş olup; düşük, orta ve yüksek basınçta üç farklı soğutucu akışkan, iki farklı iç çapa sahip boru, sekiz kütlesel hız ve dört ısı akısı mertebeleri adyabatik ortamın oluşmasını sağlayacak şekilde deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak basınç kaybı için beş farklı akış rejimine ulaşılmıştır [22].

Grauso S. ve diğ. (2013) iki farklı soğutucu akışkan olan R-1234ze(E) ve R-134a için yerel ısı transfer katsayısını, adyabatik şartlarda sürtünmeye bağlı basınç gradyenini ve iki fazlı akış rejimini belirlemek için deneyler yapmışlardır. 6 mm iç çapa sahip dairesel pürüzsüz yatay borularda sürdürülen deneyler ışığında R-1234ze(E) için literatürde kullanılabilecek akış haritalarını oluşturmayı başarmışlardır [23].

Quiben J. M. ve Thome J. R. (2007) yatay borularda kaynamalı akışın analitik model kurulmasına ilişkin çalışmalarda bulunmuşlardır. Yine kendilerine ait başka bir makalede iki fazlı akıştaki basınç kaybı üzerine deneysel veriler elde etmişler ve bu verilerin modellerde geçerliliğini kanıtlamışlardır. Bu çalışmada ise ara yüzeydeki fazlar arası geçişlerin analitik model olarak kurulması hedeflenmiştir [24].

Padilla M. ve diğ. (2011) iki fazlı akış rejimlerinin HFO-1234yf ve R-134a akışkanları için 6.7 mm iç çaptaki cam kanallarda yüksek hızlı kamera ile görüntülemeleri sağlanmıştır. İki akışkan için çok önemli bir fark gözükmediği belirlenmiştir. Bu akışkanlara ilaveten R-410A akışkanı ile yatay boruda 819

noktadan basınç ölçümleri yapılmıştır. Müller-Steinhagen ve Heck modelleri çerçevesinde sonuçların %30 hata bandında olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki hata oranının önemli sebebi maksimum basınç gradyeni ve ilişkili olduğu buhar miktarı ile alakalıdır. Her bir akış rejimi için de istatistiksel analiz geliştirilmiştir [25].

Idsinga (1975) adyabatik ve ısı akısı verildiği şartlar altında geniş bir veri aralığı, basınç, kütlesel akı, boru çapı parametreleri ile deneylerini yaparak deneysel basınç kaybı ölçümleri ile literatürdeki korelasyonları incelemiş ve hata analizlerini gerçekleştirmiştir. Sonrasında farklı şartlar altındaki elde ettiği boşluk oranı değerlerini Thom, Martinelli-Nelson ve homojen akış modelleri ile kullanmış olup RMS hata ve standart sapmasını tespit etmiştir. Sonuç olarak vardığı; Baroczy (1965) korelasyonunun ve Thom (1964) modelinden sonra homojen akış modelinin en iyi sonuçları verdiği tespit edilmiştir [26].

Huang X. ve Sciver S. W. V. (1995) basınç kaybını ve boşluk oranını belirlemeye çalıştıkları araştırmalarında, yatay boruda akışkan olarak helyumu kullanmışlardır. Atmosfer şartlarına yakın bir mertebede basınç aralığı seçilmiştir. Boşluk oranı tespiti için in-line kapasitif prop kullanılmıştır. Kayma oranının, kütlesel debi ve sistem basıncının artmasıyla birlikte artış gösterdiği izlenmiştir. Homojen model ile gerçekleştirilen parametrik çalışma, Lockhart-Martinelli korelasyonundan daha etkili olduğu görülmüştür [27].

Grauso S. ve diğ. (2014) endüstride analiz yöntemi olarak tercih edilen Organik Rankine Çevrimlerinde ve ısı pompalarında oldukça fazla kullanılan soğutucu akışkanların kaynama olayındaki ilgili parametre değişimleri incelenmiştir. Yapılan çalışmada CO_2 ve R410A akışkanları için 6 mm iç çapa sahip yatay pürüzsüz boruda iki fazlı akış fiziğinde adyabatik sürtünme basınç değişimleri araştırılmıştır. Halkasal akış rejimi ve CO_2, R410A, R134a ve yeni bir akışkan olan R1234ze(E) göz önünde bulundurularak literatürdeki önceden çalışılmış araştırmalar üzerinde değerlendirmelerde bulunulmuştur [28].

Padilla M. ve diğ. (2013) R-134a akışkanının 10 mm iç çapa sahip ani kesit değişimindeki akış rejimi, görüntüleme teknikleri ile üst ve alt görünüşlerden belirlenmeye çalışılmıştır. Ani daralmanın test bölümündeki üst ve alt bölgede ne kadar etkin olduğuna dair karakteristik uzunluk belirlenmeye çalışılmış ve HFO-1234yf, R-134a ve R-410A akışkanlarının yatay boruda ani daralma etkileri 360

basınç kaybı noktasında ölçülerek değerlendirilmiştir. Literatürden altı makale irdelenmiş ve Abdell metodunun en iyi sonucu verdiği %30 hata ile görülmüştür. Test bölümünün geometrik değişiminden kaynaklanan momentum değişimi, sürtünmeye dayalı basınç kaybı ve kesit değişimi etki uzunluğu incelenmiştir [29].

Swanand M. B. ve Afshin J.G. (2014) çalışmalarının temel amacı gaz-sıvı akışları için geniş bir korelasyon grubu oluşturmak ve bunun için 0.5 ile 305 mm arasındaki çap değerlerinde dairesel, halkasal ve dikdörtgensel boru kesitlerinde birçok akışkan çifti ve başta dağılım parametresi ile ara yüzey hızı olmak üzere hedeflenen fonksiyonlar için farklı boşluk oranı giriş değerleri çerçevesinde deneysel veriler elde edilmiştir [30].

Sur A. ve Liu D. (2012) gaz-sıvı iki fazlı akışlarında mikro kanallar için 100 ile 150 μm hidrolik çaplardaki borularda makro boyuta sahip kanallardaki çeşitli akış yaklaşımlarını karşılaştırmışlardır. Mikro kanallarda basınç düşümü ve iki fazlı haritaların durumu araştırılmıştır. Çalışmada boru büyüklüğü ve faz hızlarının oluşturdukları etkilerin deneysel sonuçların akış haritalarında ve dairesel kanalda su-hava akış çifti korelasyonları için incelenmesi hedeflenmiştir. İki fazlı akış haritaları, dört temel tip olarak: kabarcıklı, halkasal, tıkaç ve ring akışları, yüksek hızlı kamera etkisi ile ortaya konmuştur. Akış rejimlerinin birbirleri arasındaki geçişlerde sınır değişimleri izlenmiştir. Düzlemsel olarak geliştirilen Weber Sayı'sı akış haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır. Sürtünme sonucu oluşan basınç gradyeninin deneysel bulguları mikro kanallar için; homojen ve ayrılmış akış modellerinde ve akış haritaları modellerinde ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sonuçların temel model akış haritalarında iki fazlı basınç düşümü için ispatlanabildiği görülmüştür [31].

Tribbe C. ve Steinhagen H. M. M. (2000) gaz-sıvı iki fazlı akışta basınç düşümünün belirlenebilmesi için formal analiz yöntemi ile literatürdeki çalışmaları incelemişlerdir. Çeşitli yatay akış haritaları, geniş bir deneysel veri havuzu kapsamında istatiksel logaritmik analiz tekniği ile incelenmiştir. Yoğunluğun fonksiyonunun hassasiyetinin akış sisteminde mertebe olarak çok fazla olmadığını ve ampirik metotların çalışma kapsamında geliştirilen modelle aynı sonuçta olduğu belirlenmiştir [32].

Pacucar C. B ve diğ. (2011) deneysel olarak tek bir geniş kabarcığın ani ve düzgün daralan dairesel ve dikdörtgensel kesitli kanallarda çalışmalar yapmışlardır.

Görüntüleme tekniği ile kabarcığın kesit değişimi öncesi ve sonrasındaki değişimleri tüm boru numuneleri için analiz edilmiştir. Proses işlemi ile de iki boyutlu hız dağılımları izlenmiştir. Kabarcığın daralma esnasındaki koparak ayrılma süreci ve sonrasında izlediği hareket incelenmiştir. Düzgün daralan boru numunesinde kabarcık, hızlı deformasyona uğrasa da kopma gerçekleşmediği tespit edilmiştir [33].

Aloui F. ve diğ. (1999) kabarcıklı akış rejiminde iki fazlı akışın teorik ve deneysel olarak eksenel yönde kanal geometrisinin simetrik şekilde ani genişleme gösterdiği durum üzerine çalışmışlardır. Basınç düşüşünün genel olarak tanımlanabileceği bir model ve ilgili hidrodinamik parametrelerin alt bölgede nasıl ifade edilebileceği üzerine deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Cidar kayma gerilmesi, her faz için türbülans değerleri ve hız profilleri integre edilerek genel bir basınç kaybı ifadesi elde edilmiştir. Çalışma kapsamında basınç kaybı, cidar kayma gerilmesi, yerel ve genel boşluk oranları, kabarcıkların ortalama ve salınım hızları ile kabarcık büyüklüğü verileri üzerinde durularak literatürdeki bazı çalışmaların kabarcıklı akışın sıvı fazı için veri havuzu oluşturulmuştur [34].

Ottens M. ve diğ. (2001) sıvı çalkantısı ve basınç gradyenini sürekli hal şartı altında yatay gaz-sıvı boru akışında her iki faz için genel momentum denklemini kullanarak iki farklı modeli, cidar kayma gerilmesi ve ara yüzey sürtünme faktörünü hesaplama için kullanmışlardır. Bulgular; ayrılmış, tabakalı ve halkasal akış tipleri için literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ara yüzey hız parametresi, sıvı çalkantısı ve basınç gradyeni için geliştirilen model kapsamında kullanılmıştır. Ayrıca Andritsos ve Hanratty'nin sürtünme modeli Taitel ve Dukler'in cidar sürtünme faktörü için kullanılarak basınç gradyeninin maksimum hata oranı tespit edilirken, Grolman ve Fortuin'in sürtünme modeli Hart'ın cidar sürtünme faktöründe uygulanarak sıvı çalkantısının maksimum hata değerleri elde edilmiştir [35].

Ahmed W. H. ve diğ. (2008) hava-yağ iki fazlı akışının yatay boruda alt bölgedeki ani genişleme esnasında farklı değişim oranları ile deneysel karakterizasyonunu ortaya koymuşlardır. Türbülans yoğunluğu, ortalama sıvı hızı, zamana bağlı ortalama yerel boşluk oranı, kesit değişimine bağlı yerel boşluk oranı ve basıncın eksenel değişimi sıcak film anemometresi ile ölçülmüştür. Alt akım bölgesinde tam gelişmiş boşluk oranı, üst bölgeye göre hem artma hem de azalma eğilimi göstermekte olup genişleme boyunca akış haritaları değişim göstermektedir. Türbülans yoğunluğu

genişleme bitiminde artış gösterdiği sonrasında ise eksenel olarak azalarak belli bir mesafe sonra sabit değere ulaştığı tespit edilmiştir [36].

Aloui F. ve Souhar M. (1996) sayısal kodlama için yatay boruda ani genişlemenin gaz-sıvı kabarcıklı iki fazlı akışta deneysel verilerin elde edilmesini sağlamışlardır. Sıvı fazının ortalama ve çalkantılı hız değerleri için sıcak film anemometresi kullanılmıştır. Hızlı kamera ile daha sonra yapılan ölçümlerin anemometre ile elde edilen değerlere yakınsadığı belirlenmiştir [37].

García F. ve diğ. (2007) yatay boruda gaz-sıvı akışkan çifti 2560 deney sonucu fazların bağıl hızları göz önünde bulundurularak sürtünme faktörünün elde edilmesi amaçlanmıştır. Reynolds sayısının, karışım hızı ve sıvı kinematik viskozitesine bağlı olduğu ve gaz-sıvı akışı için Fanning sürtünme faktörünün de karışım hızı ve yoğunluğa bağlı olduğu esas alınmıştır. Literatürdeki 21 korelasyon ve model deneysel veriler kapsamında kullanılmıştır; çünkü her model ve korelasyonun temelinde farklı Reynolds sayısı ve Fanning sürtünme faktörleri tanımları olabilmektedir. Sonuçta bu çalışmanın doğruluğunun diğer çalışmalara göre daha fazla olduğu görülmüştür [38].

Ekberg N. P. ve diğ. (1999) iç içe geçmiş yatay borularda iki fazlı akışın boşluk oranı ve basınç kaybı parametrelerinin akış rejimi belirlenmesi için çalışmalar yapılmıştır. Çeşitli akış tipleri oluşturulmuştur. Ortalama boşluk oranı değerlerinin Butterworth tarafından ortaya konmuş korelasyonlar ile hesaplanması yapılırken Lockhart ve Martinelli modelleri ile ölçülen boşluk oranının doğruluğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Friedel korelasyonu ile basınç kaybı üzerine araştırmalar yapılmıştır [39].

Ding H. ve diğ. (2007) yatay boruda gaz-sıvı akışı için Hilbert-Huang dönüşümlerinin dinamik karakterizasyonu üzerinde uygulamasını yapmışlardır. Fark basınç ölçüm sinyalleri çeşitli metotlarla zaman-frekans-enerji bağlamında değerlendirilmiştir [40].

Lee H. ve diğ. (2013) ayrılmış akış rejiminde yatay gaz-sıvı akışı için minimum enerji yayılımı konsepti üzerine bir hidrodinamik model ileri sürmüşlerdir. Tutulma oranı ve basınç kaybının ara yüzey sürtünme faktörüne gerek kalmadan belirlenmesine çalışılmıştır. Model doğrulamasının gayet olumlu sonuçlandığı ifade edilmiştir [41].

Liu X. ve diğ. (2012) hacimsel akışkan metodu temelli; yatay boruda gaz-sıvı iki fazlı akışının zamana bağlı çeşitli yer çekimi etkileri altında üç boyutlu matematiksel model geliştirmeye çalışmışlardır. Bu kapsamda akış haritaları, boşluk oranı dağılımları ve çalkantılar, 7 ve 10 mm çapa sahip dairesel borular için ortaya konmuştur. Kabarcıkların toplanması ve birikmesi; sıvı filmi ile gaz yüzeyleri arasındaki yer çekimi etkilerinin artışına sebebiyet verir. Yer çekiminin etkisi yüzey gerilmelerinden dolayı etkisiz kaldığı görülürken iki fazlı akış hızının artış göstererek atalet kuvvetlerini arttırması ile aynı etkide olmadığı tespit edilmiştir [42].

Kadri U. ve diğ. (2010) genelde gaz üretimi proseslerinde tıkaç akış görüldüğünü belirtmişlerdir. Yüksek basınçlı üretimde kısa hidrodinamik tabakaların olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında gaz-sıvı akış çiftinin ölçümleri ile farklı tabaka tipleri ve basınca hassasiyetleri araştırılmıştır [43].

Tzotzi C. ve Andritsos N. (2013) Andritsos ve Hanratty modelinin ara yüzey sürtünme faktörü ve basınç kaybı üzerine gaz-sıvı yatay akışları için geliştirilmesi üzerinde durmuşlardır. Yeni deneysel parametreler olarak düşündükleri gaz yoğunluğu etkisi ve yüzey gerilimi, literatürdeki yarı-teorik dalgalı rejim ve ara yüzey sürtünme faktörü için farklı ampirik ifadeler incelenmiştir [44].

Sampaio P. A. B. D. ve diğ. (2008) yatay dairesel borularda gerçekleşen gaz-sıvı ayrılmış iki fazlı akışının deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemesini yapmışlardır. Tam gelişmiş akış kabulü ve k-ω türbülans modeli ile sonlu elemanlar metoduyla çözümlemeye gidilmiştir. Çözüm işleminde ara yüzey dalgalanmaları ihmal edilerek pürüzsüz bir ara yüzey tanımı yapılmıştır [45].

Ribeiro A. M. ve diğ. (2006) kare kesitli yatay kanalda gaz-sıvı akışı için modeller ve korelasyonlar kullanılarak deneysel sonuçlar karşılaştırmışlardır. Akış rejimi, deneylerde dalgalı-tabakalı ve sanki-tıkaç akış tipleri şeklinde gözükmektedir. Basınç kaybı sonuçları sadece dalgalı-tabakalı akış için elde edilmiştir. Friedel korelasyonuna göre basınç düşümü sonuçları gayet uygun bir şekilde neticelenmiştir [46].

Cook M. ve Behnia M. (2000) aralıklı akış kapsamında gaz-sıvı akışında basınç kaybı araştırmışlardır. Deneyler 32 ve 50 mm iç çaptaki borular ile sürdürülmüştür. Geliştirilen model ile deneysel sonuçların tutarlılık gösterdiği tespit edilmiştir [47].

Hemamalini R. R. ve diğ. (2005) kontrol valflerinin endüstride oldukça fazla kullanılmasına rağmen literatürde gereği kadar operasyonel parametreleri üzerinde çalışma olmadığını belirtmişlerdir. Çalışmada akışkanların çeşitli boşluk oranı değerleri için oluşan basınç kaybı üzerinde durulmuş ve akışkan çifti olarak palm yağı ve hava kullanılmıştır [1].

Fang L. D. ve diğ. (2012) yatay boruda iki fazlı akışta yer çekimi kaynaklı basınç salınım sinyalleri araştırmışlar ve direkt olarak iki fazlı akışın tutulma oranına bağlı ölçümlere ulaşılarak ara yüzey kuvvetlerini tespit etmeye çalışmışlardır. Fark basınç sinyallerinin karakteristik parametreleri dalga analizi ile çözümlenmiştir. Deney sonuçlarının hassasiyeti için tabakalı akıştan halkasal akışa geçiş sağlanmıştır [48].

Sanchis A. ve diğ. (2011) iki fazlı akışta düşük gaz ve sıvı faz hızlarında hidrodinamik gelişim gösteren kabarcıkların dalga ara yüzey etkileri üzerine araştırmalarda bulunmuşlardır. 31 m uzunluğunda ve 10 cm çapındaki borularda atmosferik şartlar altında yüksek çözünürlüklü cihazlarla görüntülemeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kabarcıkların harmonik hareketleri ve kabarcığın yapısı hakkında genel bilgiye ulaşılması hedeflenmiştir. Bunun için de dalga uzunluğu karakteristiğinin tespit edilebilmesi amacıyla stabilite teorisi tercih edilmiştir. Yapılan çalışma ile kabarcıklaşmanın zamana bağlı rezonans mekanizması üzerinde detaylı veriler elde edilmiştir [49].

Ahmed W. H. ve diğ. (2007) ani genişlemede iki fazlı akışın basınç dağılımının analitik formülasyonu gelişimi üzerinde durmuşlardır. Boşluk oranının genişleme esnasındaki değişimi, üst ve alt akım bölgeleri arasındaki fark basıncı ve cidar kayma gerilmeleri de geliştirilen korelasyonlara dahil edilmiştir. Akışkan çifti olarak hava-yağ kullanılırken deneyler üç farklı genişleme oranına sahip test kesitleri ile yapılmıştır. Literatürde var olan diğer modellerden ilgili parametrelerin eklenmesi ile geliştirilen modelin daha kullanışlı olacağı belirtilmiştir [50].

Spedding P. L. ve diğ. (2006) basınç düşümünün iki fazlı akışlarda ampirik ifadelerin tekrarlanabilir olmasını test etmişlerdir. Korelasyonlar halkasal ve tabakalı tip akışlar için kullanılmıştır. Üç faz olarak gaz-su-yağ akışkanları tercih edilirken; araştırma bulgularında momentum denge modeli üç fazlı basınç düşümü için başarısız neticelenmiştir [51].

Poesio P. ve diğ. (2009) halkasal akış haritalarında çok viskoz sıvı akışkanların etkisini incelemiştir. Üç fazlı akış olarak; çok viskoz yağ, su ve hava kullanılmış ve basınç kaybı üzerine bir model geliştirilmeye çalışılmıştır [52].

Zhai L. S. ve diğ. (2014) yatay yağ-su akışını petrol endüstrisi için araştırmışlardır. Bu tip iki fazlı akışlarda, akış yapısının belirlenmesi için yapılacak yanlış ölçümler, elde edilecek değerlerde büyük hata oranlarını da beraberinde getirebilmektedir. Paralel tel kapasitif prop (PWCP) ile hız ölçümü sağlanabilmektedir. Çalışmada öncelikle probun hassasiyeti sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilmiş, sonrasında ise üst ve alt akım bölgeleri için sinyaller vasıtasıyla hız ölçümleri alınmıştır. Sonuç kısmında kinematik dalga modeli kullanılarak çeşitli durumlardaki yatay yağ-su iki fazlı akışı için ilgili rejimlerde homojen hızlar elde edilmiştir [53].

Yusuf N. ve diğ. (2012) heterojen sıvıların akış haritaları ve basınç gradyeni üzerine araştırma yapmışlardır. Farklı boru kesitleri konfigürasyonları üzerine yağ-su iki fazlı akışı için sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak ayrılmış akış ve homojen model olmak üzere iki tip akış modeli kullanılmış ve basınç dağılımı üzerinde yağ viskozitesinin etkisi incelenmiştir. İki modelin geçerliliği düşük viskoziteli yağ için olduğu vurgulanmıştır [54].

Tan C. ve diğ. (2013) petrol ve kimya endüstrisinde kullanılan yağ-su çiftini ele almışlardır. Akış yapısı gereği ölçümlerin zorluğu, bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Çalışmada sensör ve türbinmetre ile faz sürtünmeleri belirlenerek genel ve yerel debiler tespit edilmeye çalışılmıştır. Suyun hacimsel sürtünme hatası %1.7 oranında belirlenirken, yağ fazının ise %2.8 olarak belirlenmiştir. Sonuç kısmında sensör yardımı ile dikey gaz-sıvı iki fazlı akışı için genel kullanıma girebileceği tespit edilmiştir [55].

An Z. ve diğ. (2014) kompleks akış yapılarından dolayı; tutulma oranı ölçümü, yatay yağ-su akışlarında önem kazandığını belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında ölçüm yapacak olan sensörün iki boyutlu sonlu elemanlar analizi yapılmış ve ölçüm hassasiyetinin sensör geometrisine etkisi incelenmiştir. İki fazlı yağ-su akış haritalarında kullanılabilecek hassasiyette sensör geometri önerisi ortaya konmuştur. Çek valf kullanılarak yağ fazının ani sıçrama mekanizması kontrol edilmiş ve konkav tipteki kapasitif sensör ile ölçümler alınmıştır. Optimize edilmiş sensör ile yapılan

ölçümlerin tutulma oranı değerleri ile gayet tutarlı sonuçlar gösterdiği tespit edilmiştir [56].

Balakhrisna ve diğ. (2010) yatay akış sırasında yüksek viskoziteli yağ ile suyun ani olarak daralan ve genişleyen kanallardaki akış rejimi değişikliklerini incelemişlerdir. Kesit değişimi, fazların yayılımının etkisini araştırma amaçlı ön görülmüş ve bu nedenle basınç kaybı değerleri de araştırılmıştır. Basınç profilinin sıvı viskozitesinden bağımsız olduğu ve basınç düşümü katsayılarının akış rejiminden bağımsız olduğu gözlemlenmiştir [57].

Wahaibi T. A. (2012) ayrılmış akış tipindeki yağ-su deneyleri yatay şartlar altında basınç değişimi Angeli ve Hewitt modeline uygun olarak korelasyon gelişimine çalışmıştır. Zigrang ve Sylvester sürtünme faktörü denklemleri modifiye edilerek iki fazlı yağ-su akışı için uygulanmıştır. Basınç gradyenleri korelasyonları, 11 farklı basınç değişimi modeline uygulanmıştır. Operasyonel şartlar olarak akışkan özellikleri, boru çapları ve materyalleri ile ilgili yağ-su akışkan çifti için literatürdeki en geniş çalışma olarak yer almıştır. İki farklı model ile geliştirilen korelasyonun doğruluğu test edilmiş ve test edilen korelasyonun modellerden daha geçerli olduğu tespit edilmiştir [58].

Zhang X. ve diğ. (2013) deneysel çalışmaları hava-su iki fazlı akış için yatay boruda katkılı ve katkısız poliakrilamid (PAM) ilavesi ile; ısı transferini ve sürtünmeye dayalı basınç kaybını tespit etmek için yapmışlardır. Deneylerde borular için 300 ppm konsantrasyonlu özelliğinde kullanılmıştır. Akışın tıkaç akış şeklinde olduğu gözlemlenen her iki durumda; basınç kaybı %31.9'dan %54.7'ye ve ısı transfer katsayısı ise %36.8'den %70.3'e artış gösterdiği görülmüştür [59].

Orell A. (2005) literatürdeki Taitel ve Barnea'ya ait yatay gaz-sıvı tıkaç akışı yeniden formüle ederken, basınç kaybı için de Cook ve Behnia'nın önerdiği modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model; 12 basınç gradyeni ve 8 tutulma oranı değerlerinde hava-su ve hava-yağ tıkaç akışları tipleri için pürüzlü ve pürüzsüz borularda geniş çapta uygulanmıştır. Deneysel bulgular ışığında geliştirilen modelin tutarlı olduğu tespit edilmiştir [60].

Narrow T. L. ve diğ. (2000) hava-su kapsamındaki iki fazlı akışın mikro boyuttaki boru demetleri üzerinde akış haritalarının ve sürtünmeye dayalı basınç kaybının belirlenmesi üzerine araştırmalar yapmışlardır. 23 cm uzunluğundaki boruların

içerisinde 7 adet 3.17 mm çapında küçük borular mevcuttur. Akış boyunca tamamen ayrılma veya kopma izlenmemekle birlikte basınç kaybının literatürdeki akış haritalarına oldukça uyumlu olduğu görülmüştür [61].

Youguang M. ve diğ. (2010) basınç kaybının mikro kanallarda gaz-sıvı iki fazlı akışları ısı ve kütle transferi proseslerinde temel bir öneme sahip olduğunu belirterek dikdörtgensel kesitli yatay mikro kanallarda fark basınç kaybı sensörleri ile deneyler yapmışlardır. Deneyler kapsamında; basınç kaybındaki kapiler etkisini görme amacıyla sıvı faz için su, etanol ve n-propanol kullanılırken, gaz fazı için hava tercih edilmiştir [62].

Awwad A. ve diğ. (1995) helisel kesitli yatay boruların çeşitli geometrik konfigürasyonları kullanılarak hava-su için deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Deneysel bulgularda boru çapının düşük hızlı akışlarda basınç kaybı için belirgin bir etkiye sahip olmasına rağmen; helisel açının önemli bir tesiri olmadığı görülmüştür [63].

Lee H. J. ve Lee S. Y. (2001) yatay dikdörtgensel kanallar boyunca iki fazlı akışın basınç kaybı üzerine korelasyon geliştirme çalışmaları yapmışlardır. Bu kapsamda küçük aralıklarla 305 veri noktasından ölçümler gerçekleştirilmiştir. Hava ve su akışkan çifti kullanılan deneylerde, kütle akısı ve veri alma aralığı etkileri üzerinde yoğunlaşılmıştır [64].

Badie S. ve diğ. (2000) hava-su ve hava-yağ yatay iki fazlı akışlarda basınç kaybı ve faz bileşen artış miktarı araştırılmıştır. Çalışmalara ek olarak tek fazlı gaz akışı kullanılırken, bir başka durumda da çok düşük hızlı sıvı verilerek kıyaslama yapılmıştır. Görünen pürüzlü yüzey (ARS) ve çift-daire modelleri kullanılarak yukarıda belirtilen parametreler incelenmiştir. ARS modelinin genel olarak faz bileşen miktar yükselişi araştırmasında daha verimli tekrarlanabilir sonuçlar verdiği görülmüştür. Yüksek gaz debisinde hava-su çiftinde her iki modelin de basınç gradyeninde başarılı olduğu izlenmiştir. Ancak hava-yağ akışı ve düşük gaz debili hava-su akışı deneylerinde her iki modelin de başarısız olduğu tespit edilmiştir [65].

Yan C. ve diğ. (2014) hava-su akış çiftinde tıkaç akış hareketi incelenerek 43 mm x 3.25 mm ölçülerinde dikdörtgensel kesite sahip kanalda basınç kaybı araştırmalarını yapmışlardır. Akış komponentlerinin hızları ve kabarcık uzunlukları görüntüleme tekniği ile laminer ve türbülans koşulları için incelenmiştir. Deneysel sonuçlar

göstermiştir ki; gaz fazı hızının artması veya sıvı fazı hızının azalması ile kabarcık uzunluğu ve frekansı azalma eğilimindedir. Laminer akış için; Chisholm modeli, Mishima-Hibiki korelasyonu ve Lee-Lee korelasyonlarında kabarcık hızının gaz yüzey hızına oranlanması ile boşluk oranı elde edilerek sürtünme kaynaklı basınç düşümü hesaplamaları, türbülanslı akış için ise; boşluk oranının Jones-Zuber korelasyonu ile hesaplanarak üç modelin geçerlilik gösterdiği tespit edilmiştir [66].

Ujang P. M. ve diğ. (2006) hava-su iki fazlı akışının yatay borudaki kabarcık gelişiminin hidrodinamik olarak başlamasını ve gelişme sürecini incelemişlerdir. Deneylerde 4 ve 9 barlık atmosfer basıncı altında gaz ve sıvı hızlarının araştırılması amaçlanmıştır. Test bölümündeki boru uzunluğu 37 m olup iç çapı 7.8 cm olarak tasarlanmıştır. Test bölümü boyunca ara yüzey hızlarının ölçümü için eksenel 14 ölçüm noktasında 500 Hz'lik frekans değeri altında veriler kaydedilmiştir. Akış, 3 m boru uzunluğunda tamamen gelişmiş akış özelliğine kavuşmakta ve frekans değeri, gaz ve sıvı faz hızlarından dolayı boru boyunca sürekli azalma eğiliminde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Basınç değerinin artması ile kabarcıklarda çok önemli bir değişim görülmemiştir. Kabarcık uzunluklarının istatistiksel dağılımı ve deney bölümü içerisindeki zamana bağlı değişimleri çalışmada detaylandırılarak literatürdeki standart dağılımlarla incelenmiştir. Kabarcık gelişimi, korelasyonsuz Poisson prosesi ile üssel dağılım göstermiştir [67].

Carneiro ve diğ. (2011) kabarcıkların yatay boruda iki fazlı akış içerisinde istatiksel değerlendirilmesi üzerine deneysel ve sayısal çalışmalarda bulunmuşlardır. Deneysel ölçümde hız alanı ve kabarcık şeklinin belirlenmesi için parçacık hız görüntüleme (PIV), darbeli gölge (PST) ve lazerle desteklenmiş florasan (LIF) tekniklerini kullanmışlardır. İstatistiksel değerlere ulaşmak için görüntülemeler ile iki eksen boyunca görüntülenen düzlemleri hücrelere ayırmışlardır. Nümerik yaklaşım olarak ise bir boyutlu iki-akışkan modeli tercih edilmiştir. Hava ve su bileşenleri kullanılan deneylerde deneysel sonuçların, sayısal çözümlemeyle tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir [68].

Bertola V. (2004) hava-su yatay boruda ani daralma bölgesinde boşluk oranı dağılımının tespitini tekli fiber optik prop ile ölçümler gerçekleştirmiştir. Lokal boşluk oranının iki uzaysal koordinat içerisindeki gelişimi grafikle gösterilmiş olup zamana bağlı gaz birikimi de ifade edilmiştir [69].

Reyes J. N. J. ve diğ. (1998) çok fazlı akışların manyetik rezonans görüntüleme (MRI) tekniği ile akış haritalarını ve zamana bağlı gelişimlerini incelemişlerdir. Hava-su çifti, akış sisteminde yatay düzlemdedir ve sıvı fazında boşluk oranı ve ara yüzey konsantrasyonu tıkaç akış için araştırılmıştır [70].

Dillon C. M. ve diğ. (2005) hava-su çiftinin yatay boruda iki fazlı akış şeklindeki basınç kaybı incelenmiştir. Deneyler iki kategori kapsamında sürdürülmüştür: Birincisinde, hava ve su test bölgesinden önce karıştırılmaktadır, ikincisinde ise; hava, test bölümü başlangıcında suyun içerisine enjekte edilmektedir. Ölçülen basınç kaybı değerleri, homojen model kapsamında bir boyutlu iki fazlı akıştaki sürtünmeye dayalı basınç kaybı korelasyonları ile karşılaştırılmıştır. Mekanik vibrasyon ile test bölümünün ortasında titreşim etkisi oluşturulmuş, genlik değerleri 0.034-0.2 mm ve frekans aralığı da 5-400 Hz arasında elde edilmiştir ki bu sonuç, verilen etkisinin oldukça küçük değerde kaldığını göstermektedir [71].

Fossa M. ve Guglielmini G. (1998) boşluk oranı dağılımlarını ani genişleyen yatay boruda deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneylerde boşluk oranı profilleri ve faz dağılımı karakteristiğinin belirlenmesi ön görülmüştür. Hava-su karışımının elektriksel empedans yöntemiyle değişim bölgesindeki ortalama boşluk oranı tespit edilmeye çalışılmıştır. 70/60 mm ve 70/36 mm kesit değişimlerine sahip test numunelerinin tıkaç akış şeklinde akış rejimi ile ortalama boşluk oranı üst ve alt akım bölgesinde beş farklı lokasyonda elde edilmiştir [2].

Attou A. ve diğ. (1996) iki fazlı akıştaki bileşenlerin ani genişleme boyunca genel korunum denklemleri uygulamasında; fazlar arası ısıl denge olduğu kabulü yapılabilir. Ancak fazların ataletleri arasındaki farklar, kinematik efektin göz ardı edilmeyeceğini ortaya koymaktadır. Çalışmada iki farklı durum analizi yapılmıştır: Öncelikli olarak sonsuz momentum transfer katsayısı yani mekanik denge kabulü yapılmıştır ki bu kapsamda gaz fazının ideal davranışlar gösterdiği düşünülmüştür. İkinci aşamada ise; fazlar arasında momentum transferi gerçekleşmediği kabulüdür. Geliştirilen analitik modelde; deneysel verilerde hava-su kabarcıklı akışının yatayda eksenel simetrik olarak ani genişleme şartları altında, ara yüzey sürüklenmesi de göz önünde bulundurulmuştur. Kabarcık çapının azalmasına bağlı olarak bu modelin limitli kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır [4].

Fossa M. ve Guglielmini (2002) iki fazlı akışın ince ve kalın orifisteki basınç kaybını deneysel olarak araştırmışlardır. 60 ve 40 mm çapındaki yatay borularda hava-su çifti çalışılmıştır ve aralıklı akış gözlemlenmiştir. Üst ve alt bölgelerin doğrusal değişim kabul edildiği basınç profillerinden ekstrapolasyon ile yerel basınç kaybı hesaplanmıştır [72].

Alimonti C. ve diğ. (2010) çok katmanlı orifis valf üzerinde su ve hava çifti iki fazlı akışının karakteristiği; sürtünmeden kaynaklı basınç kaybı ve boşluk oranı, deneysel çalışmalar kapsamında araştırılmıştır. Üç farklı kalınlık değerlerinde valf üzerindeki testler sürdürülmüştür. Kabarcıklı ve tıkaç akış için akış haritaları oluşturulmuştur. Sürtünme çarpanları, sürtünmeye dayalı basınç kaybı ve boşluk oranı analiz edilmiştir. Sonuç olarak valf geometrisi ve kalınlık-iç çap oranı etkisinin, akış karakteristiğinde önemli ölçüde etkin olduğu tespit edilmiştir. İlgili korelasyonlara ait denklemler vasıtası ile hesaplanan basınç kaybı ve ölçülen basınç kaybı karşılaştırılmış, %20 hata sonucuna ulaşılmıştır [73].

Schmidt J. ve Friedel L. (1997) hava ve su, gliserol, sulu kalsiyum nitrat ve freon 12 bileşenleri, iki fazlı akışın ani daralma etkisindeki basınç kaybı üzerinde araştırma yapmışlardır. Çalışma kapsamında getirilen yaklaşımın literatürdeki modeller üzerinde doğruluğu irdelenmiştir [74].

Chen I. Y. ve diğ. (2008) 3x9 ve 3x6 mm iç çaptaki dikdörtgen kesite sahip iki fazlı akışlarda ani daralmanın basınç düşümü üzerindeki etkisi ve akış haritalarını çalışmışlardır. Basınç kaybı ile buhar miktarı arasındaki ilişki üzerinde durulmuştur. Literatürde var olan korelasyonlardaki parametreler incelenmiş yüzey geriliminin etkisi kapsamında, Bond boyutsuz sayısı ve kesit değişimi oranı, değerlendirilmiştir. Homojen modelin gelişimi üzerinde durulmaya çalışılarak yeni korelasyonun %26.18 değerinde tutarlılık gösterdiği belirtilmiştir [5].

Pietrzak M. ve Witczak S. (2013) U-dönüşlerinde iki fazlı gaz-sıvı ve üç fazlı gaz-sıvı-sıvı şeklinde akışların hidrodinamik özellikleri üzerine araştırmada bulunmuşlardır. Çalışma kapsamında ilgili fazların boşluk oranının belirlenmesi ve akış haritalarının oluşturulması hedeflenmiştir. Bunun için hesaplama ve ölçüm metotları ayrıca açıklanmıştır. 180° dönüşte 0.016, 0.022 ve 0.03 m iç çapa sahip boruların, sırasıyla eğrilik yarıçapları da 0.11, 0.154 ve 0.21 m şeklinde imal edilmiştir. Akışkanlar olarak hava, yağ ve su kullanılmıştır [75].

Oliveira P. M. D. ve Barbosa J. R. J. (2014) ısı değiştiricilerinde ve aktarım hatlarında dönüş borularının uygulama sahaları olduğunu belirtip 180° dönüşlü yatay borularda hava-su çalışmalarını yapmışlardır. Borsilikat camdan yapılmış borularda farklı şartlar altında tabakalı, ara geçişli ve halkasal akış tipleri üzerinde araştırmalar sürdürülmüştür. Çalışmada basınç kaybı ve gaz yükselişi hesaplanması hedeflenmiştir. Basınç düşümü; sürtünmeden, ivmelenmeden ve yer çekiminden kaynaklı olarak total olarak hesaplanmıştır. Geliştirilen korelasyonlar, yüksek hızlı karışımlarda etkin olduğu belirlenmiştir [76].

Çizelge 1.1'de verilen literatür araştırmasının deneysel ve tez çalışması ile alakalı olan çalışmalar sunulmuştur.

Çizelge 1.1: Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar - 1

Referans	Kanal Konfigürasyonu	Akışkan Çiftleri	Miktar	Akış Rejimi	Ölçüm Metodu	Parametre	Önemli Bulgular
R. R. Hemamalini ve diğ. (2005)	D= 23.5 mm Dairesel Düz	Hava Palm Yağı	50-150 25-100 l/h	-	• Fark basınç sensörü	• Basınç düşüşü • Valf açılması	• İki faz çarpanı ve • L-M parametreleri uygunluk gösterdi
M. Fossa ve diğ. (1998)	D= 70/60 mm D= 70/36 mm Dairesel Ani daralan	Hava Su	0.2-6.0 0.7-2.5 m/s	Tıkaç (slug)	• Empedans probu	• Basınç düşüşü • Tutulma oranı • Boşluk oranı • Ortalama boşluk oranı	• Armand ve Treshchev korelasyonlarıyla uygunluk
A. Attou ve diğ. (1997)	Ani genişleyen	Hava Su	-	Kabarcıklı	• Analitik yaklaşım	• Mekanik denge modeli • Mekanik donma modeli • Kabarcıklı akış modeli	• İlk iki modelde limitli kullanım • KAM'da kabarcık sürüklenmesi geliştirilmiş ve tutarlı
I.Y. Chen ve diğ. (2008)	3x9 mm/ 3mm 3x6 mm/ 3mm Dikdörtgenden-Dairesel kesite Ani daralan	Hava Su	100-700 kg/m^{2}s	Tabakalı Halkasal Tıkaç (plug/slug) Dalgalı	• Yüksek hızlı kamera • Fark basınç sensörü	• Rejim değişikliği • Basınç düşüşü	• Kesit daralma oranı, gaz miktarı, ve yüzey gerilimi ile kaldırma kuvveti arasındaki ilişki incelendi • Basınç ölçümleri, homojen model ile uygunluk gösterdi
L. Xing ve diğ. (2014)	D= 50 mm L= 100 m Dairesel Düz	Hava Su	0.05-0.12 0.05-1.45 kg/s	Tabakalı Halkasal	• Ultrasonik ve • Coriolis debimetresi	• Düşük sıvı miktarında kütlesel debi	• %5'ten az hata oranı ile sonuçlarda tutarlılık
R. Steven (2008)	Daralan ve genişleyen (ventüri)	-	-	-	• Fark basınç sensörü	• Ventüri tasarımı	• Kuru gaz ölçümleri doğru sonuçlar gösteriyor • Sıvı katılımında ise sonuçların doğruluğu sıvı miktarı açısından çok limitli
H. Ghassemi ve diğ. (2011)	Daralan ve genişleyen (ventüri)	Hava Su	P= 6-20 bar 0.06-1.5 kg/s	-	• Fark basınç sensörü	• Ventüri açıklığı	• Ventüri boşluğu arttıkça kavitasyon görülmekte
Z. Huang ve diğ. (2005)	Daralan ve genişleyen (ventüri)	Hava Yağ	0-30 0-15 m^3/h	-	• Tomografi • Fark basınç sensörü	• Boşluk oranı • Faz hızları	• Efektif sonuçlar
L. Xu ve diğ. (2003)	Daralan ve genişleyen (ventüri)	Hava Yağ	50-100 m^3/h	-	• Fark basınç sensörü	• Karışım kütlesel debi • Kütle miktarı	• Lin denklemi ve statik durum tutarlılık gösteriyor

Çizelge 1.1: Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar - 2

Referans	Kanal Konfigürasyonu	Akışkan Çiftleri	Miktar	Akış Rejimi	Ölçüm Metodu	Parametre	Önemli Bulgular
E.D. Reis ve diğ. (2008)	Daralan ve genişleyen (ventüri)	Hava Su	1.3-6.0 0.08-0.8 m/s	Tabakalı Dalgalı Tıkaç (slug)	• Fark basınç sensörü	• Akış rejimi	• Akışkanlaşma ölçümlerde hataya sebep olabiliyor
B. Sun ve diğ. (2011)	Daralan ve genişleyen (ventüri) D=50 mm	Hava Su	1.1-4.45 8.99 m^3/h	Kabarcıklı Tıkaç (slug) Tıkaç (plug)	• Fark basınç sensörü	• Zaman-frekans ilişkisi • Akış rejimi	• AOK metodu çalışıyor • Yüksek frekansta doğru bulgular
G.B. Zheng ve diğ.(2008)	D= 125 mm D= 80 mm Düz	Hava Yağ Su	Toplam debi= 0.1-2.5 m^3/h	Tıkaç (slug)	• Türbin tip debimetre • İletim sensörü • Yüksek hızlı kamera	• Toplam akış debisi	• Geliştirilen yeni metot başarılı.
F. Zhang ve diğ. (2010)	D= 50 mm Düz	Hava Su	75-124 0.085-0.34 m^3/h	-	• Fark basınç sensörü • Konik ventüri tıpası	• Basınç düşüşü	• Yüksek hacimsel gaz oranı ve düşük basınçta geliştirilen metot başarılı
T.M. Harms ve diğ. (2003)	D= 9 mm Düz	R-22 R-410A R-134a CO_2	-	Halkasal	• Model karşılaştırması	• Boşluk oranı	• Ara yüzey fiziğinde momentum eddy difüzivitesi ihmal edilemez • Halkasal akış modelleri kütle akısına bağlı değil
A. Cioncolini ve diğ. (2011)	D= 14.4 mm Düz	Su 2 H.karbon 6 Soğutucu Akışkan	-	Halkasal	• Model karşılaştırması	• Halkasal film boyunca aktarım mekanizmalar	• Halkasal akışta makro veya mikro ölçekteki geçişler modellerle uygunluk gösteriyor
R.J.D.S. Lima ve diğ. (2009)	D= 14 mm Düz	R717	50-160 kg/m^2s	Tabakalı Dalgalı Tıkaç (slug) Halkasal	• Model karşılaştırması	• Basınç düşüşü	• 124 adyabatik ölçümde kütlesel debi arttıkça basınç değişimi yükseliyor
G.R. Magalhães ve diğ. (2013)	D= 19 mm Düz	Hava Su	315 1000 l/h	Tıkaç (slug)	• Gölge görüntüleme • PIV	• Gaz çözünürlüğü	• CO_2'nin su içerisinde çözünmesi basınç düşüşünü artırıyor. • Dukler, Hubbard ve Orell modelleriyle %5'e yakın tutarlılık.
Ö. Çomaklı ve diğ. (2002)	D= 14.6 mm Düz	Nitrojen	9-75 g/s	-	• Fark basınç sensörü • Termokupl	• Dinamik kararlılık	• Kanal uzunluğu iki faz kararlılığını etkiliyor • Kütlesel debisiyle dalga yoğunluk genliği doğru orantılı
A. Cavallini ve diğ. (2001)	D= 8 mm Düz	R-134a R125-R32 R236ea	100-750 kg/m^2s	Halkasal Tabakalı	• Fark basınç sensörü • Termokupl	• Isı transfer katsayısı • Basınç düşüşü	• HFC için Kosky ve Staub modelleri uygulanabilir değil

Çizelge 1.1: Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar - 3

Referans	Kanal Konfigürasyonu	Akışkan Çiftleri	Miktar	Akış Rejimi	Ölçüm Metodu	Parametre	Önemli Bulgular
J.M. Quiben ve diğ. (2009)	D= 2 mm D= 3 mm Düz Yassı tüplerde; D= 8.6 mm D= 7.17 mm D= 6.25 mm D= 5.3 mm	R22 R410A	150-500 kg/m^{2}s	Halkasal	• Fark basınç sensörü • Coriolis debimetresi • Termokupl	• Basınç düşüşü	• Quiben-Thome modelinde tutarlı sonuçlar • Isı akısı basınç gradyenini etkilemiyor • Geometri farklı olsa da araştırma bulguları yakınsıyor
J.M. Quiben ve diğ. (2007)	D= 8 mm D= 13.8 mm Düz	R134a R22 R410A	70-700 kg/m^{2}s	Halkasal	• Fark basınç sensörü • Coriolis debimetresi • Termokupl	• Basınç düşüşü	• Boşluk oranı modelleri için basınç düşüşü güvenli sonuçlar veriyor
S. Grauso ve diğ. (2013)	D= 3mm Düz	R134a R1234ze	146-520 kg/m^{2}s	Tıkaç (slug) Halkasal Ara yüzey	• Yüksek hızlı kamera • Coriolis debimetresi • Termokupl • Fark basınç sensörü	• Sürtünme kaynaklı basınç düşüşü • Isı transfer katsayısı	• Buhar miktarı ve kütlesel akı akış rejimlerinde geçişlere sebep oluyor • Buhar miktarı, basınç kaybını arttırıcı etki yapıyor • Wojtan haritasına uyumluluk
J.M. Quiben ve diğ. (2007)	-	-	-	Halkasal Tabakalı Dalgalı Kabarcıklı	• Analitik model geliştirme	• Basınç düşüşü	• Geliştirilen model deneysel sonuçlarla tutarlı • Wojten-Ursenbahcer-Thome akış haritalarıyla uyumlu sonuçlar • Basınç düşüşü ve buhar miktarı arasında ilişki kurulumu • Gelecek çalışmalar için esas teşkil edilecek model kurulumu
M. Padilla ve diğ. (2011)	D= 7.9 mm D= 10.85 mm Düz	HFO-1234yf R-134a R-410A	187-1702 kg/m^{2}s	Tıkaç (slug) Halkasal Ara yüzey	• Yüksek hızlı kamera • Fark basınç sensörü	• Akış haritaları • Basınç düşüşü	• Yüksek basınçta Wojtan haritasıyla uyumluluk • 819 basınç verisi literatürdeki ve homojen modelle karşılaştırma • En iyi sonuç Müller-Steinhagen ve Heck ile %30 hata oranı
Idsinga (1975)	-	-	271.2-4339 kg/m^{2}s	-	-	• Boşluk oranı • Basınç düşüşü	• Baroczy korelasyonu ve Thom modelinden sonra homojen model en iyi sonucu veriyor

Çizelge 1.1: Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar - 4

Referans	Kanal Konfigürasyonu	Akışkan Çiftleri	Miktar	Akış Rejimi	Ölçüm Metodu	Parametre	Önemli Bulgular
X. Huang ve diğ. (1995)	D= 5.33 mm D= 4.57 mm Düz	Helyum	0.5-2 g/s	-	• Kapasitans probu	• Boşluk oranı • Basınç düşüşü	• L-M korelasyonu homojen modelden daha verimli • Kütlesel akı, sürtünmede etkili değil
S. Grauso ve diğ. (2014)	D= 6 mm Düz	CO_2 R410A	150-500 kg/m^{2}s	Halkasal	• Coriolis debimetre • Fark basınç sensörü	• Basınç düşüşü	• Müller-Steinhagen ve Heck modelleri verilerle tutarlı
M. Padilla ve diğ. (2014)	D= 10.85 /7.9 mm D= 7.9/5.3 mm Ani daralan	HFO-1234yf R-134a R-410A	188.7-966.1 kg/m^{2}s	Tıkaç (slug) Halkasal Ara yüzey	• Yüksek hızlı kamera • Fark basınç sensörü	• Basınç düşüşü	• Abdell metodu %30 hata oranı
S. M. Bhagwat ve diğ. (2013)	D= 0.5-305 mm	Soğutucu akışkan Su Alkol Argon Yağ Etanol ile kombinasyonlar	350-2000 kg/m^{2}s	Kabarcıklı Tıkaç (slug) Halkasal Ara yüzey	• Hızlı kapanan valf tekniği • Akış görüntüleme	• Boşluk oranı • Drift akış modeli araştırması	• Geniş bir spektrumda boşluk oranı model uygulamaları araştırması
A. Sur ve diğ. (2012)	D= 100- 500 µm Düz	Hava Su	0.002-192.232 m/s	Kabarcıklı Tıkaç (slug) Halkasal Ring	• Yüksek hızlı görüntüleme • Fark basınç sensörü	• İki fazlı akış haritaları • Basınç düşüşü	• Kesit azaldıkça yüzey gerilimi ve atalet kuvvetleri arasındaki ilişki kuvvetleniyor • Geliştirilen akış haritası modellerden daha geçerli
C.B. Pacurar ve diğ. (2011)	D= 28 mm Ani daralan-düşey Dairesel ve dikdörtgen kesitli	Hava Su	-	Tıkaç (slug)	• Gölge görüntüleme • Yüksek hızlı kamera	• Daralma etkisi • Kabarcık geometrisi	• Büyük kabarcıklar; ani daralmada sistematik parçalanıyor, düzgün daralmada deformasyona uğruyor ama parçalanmıyor
F. Aloui ve diğ. (1999)	D= 20-30-40/60 mm Ani genişleyen-düşey	Potasyum karışımı Nitrojen	$0.99x10^{-6}$ $0.15x10^{-4}$ m^2/s	Kabarcıklı	• Fark basınç sensörü • Elektrokimyasal prop • Sıcak tel probu • İkili optik prop	• Basınç düşüşü • Cidar kayma gerilmesi • Boşluk oranı • Kabarcık ortalama ve salınım hızları • Kabarcık büyüklüğü	• Basınç ile cidar kayma gerilmesinin etkisi incelendi • Ayrılmış faz olarak ele alınarak parametreler incelendi • Ani genişlemede dinamik basınç artıyor • Kabarcık çapları %20 büyüyor
M. Ottens ve diğ. (2001)	D= 12.7-95.3 mm Düz	Hava Su Gliserol Glikol	-	-	• Termokupl • Fark basınç sensörü	• Tutulma oranı • Basınç düşüşü	• Taitel ve Dukler modeli ile Andritsos ve Hanratty kombine modeli basınç gradyeninde tutarlı • Hart ve Grolman-Fortuin modelleri tutulma oranında tutarlı

Çizelge 1.1: Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar - 5

Referans	Kanal Konfigürasyonu	Akışkan Çiftleri	Miktar	Akış Rejimi	Ölçüm Metodu	Parametre	Önemli Bulgular
W.H. Ahmed ve diğ. (2008)	D=25.4 mm Ani genişleyen	Hava Yağ	43 1840 kg/h	Ara yüzey Halkasal-sis Dalgalı	• Yüksek hızlı kamera • Fark basınç sensörü • Ring kapasitif sensör • Sıcak-film anemometresi	• Genişleme etkisi • Boşluk oranı • Ortalama sıvı hızı • Türbülans yoğunluğu	• Boşluk oranı artış gösteriyor • Rejime bağlı değişiklik • Türbülans yoğunluğu genişlemede artıyor • Genişleme oranı ve rejim tipi akışın gelişmişliğini oldukça etkiliyor
F. Aloui ve diğ. (1996)	D= 44/100 mm Ani genişleyen Dikdörtgen kesitli Düz	Hava Su	0.8-2 m/s	Kabarcıklı	• Sıcak film anemometresi • Yüksek hızlı kamera • İkili optik prop	• Ortalama ve salınım hızları • Kabarcık büyüklüğü	• Ortalama hız cidar yakınlığına ve boğaza bağlı • Salınım oranı tek faza göre çok fazla
N.P. Ekberg ve diğ. (1999)	D= 6.6 mm D= 8.6 mm	Hava Su	0.02-57 0.1-6.1 m/s	Kabarcıklı Tıkaç Çalkantılı Tabakalı Halkasal	• Dijital vidyo kamera	• Akış rejimi • Boşluk oranı • Basınç düşüşü	• L-M-Butterworth ile Friedel korelasyonları ve homojen akış modelleri tutarlı
H. Ding ve diğ. (2007)	D= 15 mm D= 25 mm D= 40 mm	Hava Su	0-10 0-3.5 m^3/h	Kabarcıklı Tıkaç Dalgalı	• Fark basınç sensörü	• Basınç ölçümü salınımları • Zaman-frekans-enerji dağılımı	• HHT metodu ile parametreler belirlenebiliyor
U. Kadri ve diğ. (2010)	D= 69 mm Düz	Hava Su	0.2-8.0 0.05-0.5 m/s	Tabakalı Tıkaç (slug)	• Gama yoğunluk ölçer	• Kabarcık şekli	• Sıvı içerisinde yüzey değişikliği kabarcık uzunluğuna ve frekansa etkisi olabiliyor
C. Tzotzi ve diğ. (2013)	D= 24 mm Düz	n-bütan Su	- -	Tabakalı	• Fark basınç sensörü • Paralel tel iletim probu	• Sürtünme faktörü • U tipi manometre	• Andritsos-Hanratty modelinin geçerliliği tutarlı sonuçlar verdi
M. Cook ve diğ. (2000)	D= 32 mm D= 50 mm Düz-eğimli	Hava Su	0.01-8 m/s	Tıkaç (slug)	• Fark basınç sensörü	• Basınç düşüşü • Eğim etkisi	• Viskozite artışı kabarcık ayrımında etkili • %10 eğimle %8 hata oranı
A. Sanchis ve diğ. (2011)	D= 100 mm Düz	Hava Su	0-6.0 0-0.25 m/s	Tabakalı Tıkaç (slug)	• Fark basınç sensörü • Yüksek çözünürlüklü kamera	• Ara yüzey ilişkileri	• Kelvin-Helmholtz stabilite teorisi başarısız oldu

Çizelge 1.1: Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar - 6

Referans	Kanal Konfigürasyonu	Akışkan Çiftleri	Miktar	Akış Rejimi	Ölçüm Metodu	Parametre	Önemli Bulgular
L.S. Zhai ve diğ. (2014)	D= 20 mm Düz	Yağ Su	0.106-2.579 0.111-2.21 m/s	-	• Paralel tel iletim probu	• Faz hızları	• Kinematik dalga modeli, 6 akış rejimi için uygulandı • Prop ölçümü başarılı sonuçlar verdi
A. Awwad ve diğ. (1995)	D= 12.7 mm D= 19.05 mm D= 25.4 mm D= 38.1 mm Düz- Helisel	Hava Su	0.2-50 0.008-2.2 m/s	Halkasal Tabakalı	• Fark basınç sensörü	• Basınç düşüşü • Helis açısı	• Sürtünmeden kaynaklı basınç düşüşü, sadece L-M parametresine bağlı değil; hava ve su debisine de bağlı • Helis açısının basınç düşüşüne etkisi yok
P.M. Ujang ve diğ. (2006)	D= 78 mm Düz	Hava Su	-	Tıkaç (slug)	• Termokupl • İletim probu	• Kabarcık profili	• Ara yüzey özellikleri ve tutulma oranı, kabarcık çapı üzerinde etkili • Kabarcık uzunluğu arttıkça, tam gelişmiş akış düzensizleşiyor
J.N.E. Carneiro ve diğ. (2011)	D= 24 mm Düz	Hava Su	0.788 0.295-0.516 m/s	Tıkaç (slug)	• PIV • Gölge görüntüleme • Lazer içerikli florasan	• Hız alanları • Kabarcık şekli	• Literatürdeki istatistiksel metotla deneysel sonuçlar tutarlı
V. Bertola (2004)	D= 80/60 mm Ani daralan	Hava Su	0.2-6.9 m/s 3 kg/s	Tıkaç Tabakalı	• Optik prop	• Boşluk oranı	• Boru üst bölgesinde boşluk oranı değeri yüksek • Yer çekimi etkisi, iki fazı ayrı tutuyor. • Ani daralma gaz kabarcıklarını büyütüyor
J.N.J. Reyes ve diğ. (1998)	D= 25.4 mm Düz	Hava Su	0.3-14 0.08-1.3 m/s	Tıkaç (slug)	• MRI	• Fazlar arası ara yüzey	• Çok kısa zaman aralığında birçok veri toparlanıyor • MRI sistemi için post-proses çalışmaları geliştirilebilir
C.M. Dillon ve diğ. (2005)	D= 7.93 mm Düz	Hava Su	0.05 g/s 7.6-43 cm/s	Halkasal	• Fark basınç sensörü	• Basınç düşüşü	• Titreşim etkisi zayıf kalıyor • Beattie ve Whalley korelasyonu en başarılı
M. Fossa ve diğ. (2002)	D= 60 mm D= 40 mm Düz	Hava Su	0.3-4.0 0.6-2.0 m/s	Ara yüzey	• Fark basınç sensörü • Elektro-valf	• Orifis etkisi • Basınç düşüşü	• Düşük orifis alanda boşluk oranı daha az miktarda

2. İKİ FAZLI AKIŞ MODELLERİ

Endüstride farklı uygulamalar çerçevesinde çeşitli iki fazlı akış sistemleri vardır. Çeşitli durumlarda ötürü iki fazlı akış, ilgili şartlar altında farklı hareketler göstermektedir, bu durum da sistemin uygun durumlar altında değerlendirilmesi gerekmektedir. İki fazlı akışın modellemesinde iki yaklaşım ön görülmektedir. Homojen ve ayrılmış akış modelleri ön plana çıkmaktadır. Homojen akış modelinde, fazlar tek bir akışkan gibi değerlendirilerek aynı fiziksel özelliklere sahip olduğu kabul edilmektedir. Uygulama kolaylığından ötürü endüstride yaygın bir kullanım sahasına sahiptir ve problemlerin ele alınışında fikir vermesi ve mertebe belirtmesi esasından tercih edilmektedir. Ayrılmış akış modelinde ise; fazlar ayrı ayrı ele alınmaktadır ve detaylı sonuçlar elde edilmektedir. Genel olarak problemin araştırılması ve sonuçların detaylandırılması açısından düşünüldüğünde yaklaşımın belirlenmesi olarak kullanılır. Tez çalışması, ayrılmış akış modelini esas alınarak yürütülmüştür. Çünkü akış homojen olmayıp fazlar gözle görünür biçimde ayrı ayrı akmaktadır.

2.1 Parametreler

İki fazlı akışta genel olarak problemin belirleyici özellikleri açısından aşağıda ifade edilen parametreler kullanılmaktadır.

2.1.1 Yerel boşluk oranı

Gaz fazı hacminin iki fazlı akış sistemi toplam hacmine oranlanması ile ulaşılır:

$$\alpha = \frac{V_{gaz}}{V_{toplam}} = \frac{A_{gaz}L}{(A_{sıvı}+A_{gaz})L} = \frac{A_{gaz}}{A_{toplam}} \qquad \textbf{(2.1)}$$

İki fazlı akışta yerel boşluk oranı değerlerinin belirlenmesi, belirli bir hacim üzerinde elde edilmesinin zorluğundan ötürü zamana bağlı olarak elde edilmektedir. Bu tanımlama sonucunda; boşluk oranı, gaz fazı zamanının toplam zaman aralığına bölünmesi ile elde edilir:

$$\alpha(x,t) = \frac{T_{gaz}(x,t)}{T} \quad \textbf{(2.2)}$$

2.1.2 Kinematik boşluk oranı

Gaz fazı hacimsel debisinin karışımın toplam hacimsel debisine oranıdır:

$$\beta = \frac{\dot{V_{gaz}}}{\dot{V}} = \frac{u_{gaz}A_{gaz}}{u_{sıvı}A_{sıvı}+u_{gaz}A_{gaz}} \quad \textbf{(2.3)}$$

Denklem (1) ve (3) kullanılarak yerel boşluk oranı ile kinematik boşluk oranı arasında ilişki şu şekilde belirlenebilir:

$$\alpha = \frac{1}{1+\frac{1-\beta}{\beta}\frac{u_{gaz}}{u_{sıvı}}} \quad \textbf{(2.4)}$$

2.1.3 Kütlesel gaz fazı oranı

Gaz fazı kütlesinin karışımın toplam kütlesine oranı şeklinde ifade edilebilir:

$$\mathrm{x} = \frac{m_{gaz}}{m_{toplam}} = \frac{\dot{M}_{gaz}}{\dot{M}_{toplam}} \quad \textbf{(2.5)}$$

2.1.4 Kayma hızı

Kayma hızı, gaz fazı hızının sıvı fazı hızına oranlanması ile elde edilir.

$$S = \frac{u_{gaz}}{u_{sıvı}} \quad \textbf{(2.6)}$$

2.1.5 Bağıl hız

Bağıl hız, fazlar arası hız miktarıdır.

$$u_{bağıl} = u_{gaz} - u_{sıvı} \quad \textbf{(2.7)}$$

2.2 İki Fazlı Akış Rejimleri ve Akış Haritaları

İki fazlı akışlarda akış rejim haritaları, akış karakteristiğinin gösterimi olarak ifade edilebilir. Haritalar, deneysel yöntemlerin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Rejimlerin belirlenebilmesi ise; şeffaf görünür kanallarda görüntüleme teknikleri veya teorik temel denklemlerin çözümü ile sağlanmaktadır. Deneysel ortamda yürütülen çalışmalarda elde edilen sonuçlar ve ilgili çözümlemeler, diğer tüm durumlar için kullanılamamakla birlikte hata oranı açısından sadece ilgili şartlar altında sağlayabilmektedir. Bu sebepledir ki akış haritaları, araştırmacılar tarafından vurgulanan belirli çalışma şartları altında değerleri sağlayabilmektedir. Özellikle

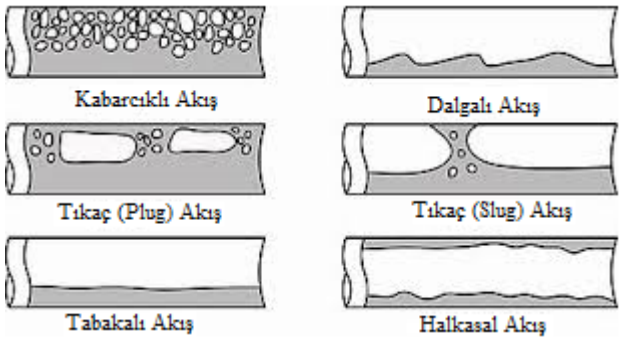
literatürde yazarların çeşitli koordinat sistemleri altında çalışmalarını yaptıkları ve sürekli bir doğrulama gösterilememektedir.

Tez çalışması kapsamında iki fazlı akışın yatay düzlemde parametrelerinin incelendiği göz önünde bulundurulursa; akış rejimleri ve haritaları yatay borular için açıklanmıştır.

2.2.1 Akış rejimleri

Yatay düzlemde boruların yerleştirildiği proseslerde temel olarak yer çekimi etkisinden ötürü farklı akış konfigürasyonları ortaya çıkmaktadır. Yatayda fazların ayrışması yer çekimi kuvvetlerinden dolayı gerçekleşmektedir. Yatay borularda akış rejimleri şu şekilde sıralanabilir:

- Kabarcıklı akış
- Tıkaç (plug ve slug) akış
- Tabakalı akış
- Dalgalı akış
- Halkasal akış



Şekil 2.1: Yatay borularda iki fazlı akış rejimleri.

Kabarcıklı Akış: Gaz kabarcıkları sıvı ortamında dağılmaktadır ve borunun üst kısmına doğru hareket etmektedirler. Bu hareketin sebebi gaz ve sıvının yoğunluk farklarından oluşan kaldırma kuvvetinin tesirinden kaynaklanmaktadır. Sıvı fazı hızı oldukça yüksek olduğunda türbülans yoğunluğundan kaynaklı kabarcık dağılımı boru kesit alanı boyunca gerçekleşir. Akışın köpüklü şekilde olduğu görülür.

Tıkaç (Plug) Akış: Gaz fazı debisinin artması ile tıkaç (plug) akış rejimi görülmektedir. Bu akış konfigürasyonunda kabarcıklar toplanarak mermi şeklini alır

ve tıkaç (plug) şeklinde form kazanarak sıvı fazı içerisinde borunun üst kısmına doğru hareket ederler.

Tabakalı Akış: Düşük sıvı debisinde, gaz fazı ile birlikte hareket ederken tabakalı akış gözükmektedir. Düzgün bir ara yüzey dağılımı ortaya çıkar. Boru boyunca gaz fazı, sıvı fazının üzerinde ayrı bir katman gibi hareket eder.

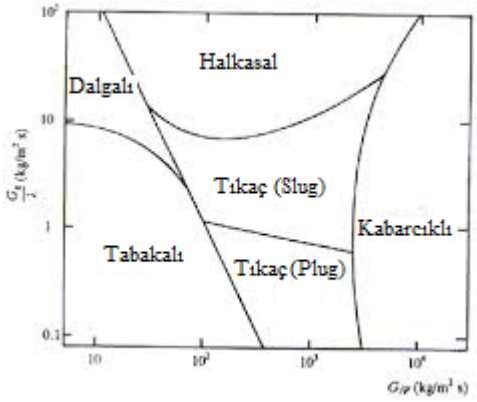
Dalgalı Akış: Gaz fazı hızının artması ile birlikte iki fazlı akışta dalgalı tip akış rejimi görülmektedir. Oluşan dalgalanmalar ara yüzey boyunca yayılım gösterirler.

Tıkaç (Slug) Akış: Dalgalı akışın gaz fazı debisinin artması ile birlikte görülen akış rejimidir. Dalgalar tüpün üst duvarına doğru yükselerek tıkaç (slug) akışa dönmektedir. Bu akış aralıklı olarak diğer bir tıkaç (plug) akış özelliğini göstermektedir. Buradaki akış özelliğinde gaz kabarcıkları daha büyüktür ve sıvı fazı birçok küçük kabarcık içermektedir. Gaz fazı hızı, tıkaç (slug) akışta ortalama sıvı fazı hızından daha yüksektir.

Halkasal Akış: Halkasal akış, gaz fazı hızının yüksek ve sıvı fazı hızının düşük olduğu durumlarda belirginleşmektedir. Sıvı fazı, boru cidarı boyunca ince bir film olarak akarken, gaz bölgesi yoğun hızda hareket etmektedir. Sıvı yüzeyi düzgün olmamakla birlikte dalgacıklardan oluşmaktadır. Gaz fazı içerisinde ayrıklaşmış sıvı parçacıkları olduğundan boru üst yüzeyine doğru bir film oluşturma eğilimindedirler.

2.2.2 Akış haritaları

Baker diyagramı yatay akışlarda en sık kullanılan akış rejimlerinin uygulanabildiği haritadır [77]. Bell ve diğ. (1970) tarafından Baker haritası geliştirilerek modifiye edilmiş Baker yatay akış haritası oluşturulmuştur [78]. Şekil 2.2'de geliştirilmiş Baker diyagramı gözükmektedir.



Şekil 2.2: Geliştirilmiş Baker yatay akış diyagramı.

Fazların görünen kütlesel hızları olarak gaz ve sıvı hızları G_{gaz} ve $G_{sıvı}$ olarak faz debileri M_{gaz} ve $M_{sıvı}$ ile aralarındaki bağıntı akış kesit alanını (A) da kapsayarak şöyle ifade edilmiştir:

$$G_{gaz} = \frac{\dot{M}_{gaz}}{A} \quad \textbf{(2.8)}$$

$$G_{sıvı} = \frac{\dot{M}_{sıvı}}{A} \quad \textbf{(2.9)}$$

Haritanın yatay ve dikey eksenlerinde gözüken λ ve ψ terimleri akışın termofiziksel değerlerini kapsamaktadır:

$$\lambda = \left(\frac{\rho_{gaz}}{\rho_{hava}}\frac{\rho_{sıvı}}{\rho_{su}}\right)^{1/2} \quad \textbf{(2.10)}$$

$$\psi = \frac{\sigma_{su}}{\sigma}\left(\frac{\mu_{sıvı}}{\mu_{su}}\left(\frac{\rho_{su}}{\rho_{sıvı}}\right)^2\right)^{1/3} \quad \textbf{(2.11)}$$

ρ, μ ve σ sembolleri sırasıyla yoğunluk, dinamik viskozite ve yüzey gerilimini ifade etmektedir. Hava ve su için yukarıda ifade edilen değerler, 1 bar basınç ve 20°C sıcaklık değerlerinde alınmıştır.

2.3 Ayrılmış Akış Modeli

Tez çalışması ayrılmış akış modeline uygunluğu gözlenmiştir. Akışın bileşenlerinin ayrı ayrı ele alındığı modeldir. Genel olarak iki fazın ayrı kanallarda aktığı kabul edilir. Kendi içerisinde homojen karışım gibi bir kavram getiren model, her fazın kendine ait bölgesinde yoğunluğu ve cidardaki kayma gerilmesi sabit kabul edilir.
Fazların gözle görünür biçimde ayrı olduğu durumdaki bir boyutlu ayrılmış akış modeli olarak, adyabatik akış ve fazlar arası enerji transferi olmadığından çalışma kapsamında süreklilik ve momentum denklemleri:
Süreklilik Denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho_1(1-\alpha) + \boldsymbol{\nabla}.\left[\rho_1(1-\alpha)\boldsymbol{V_1}\right]\right] = S_{12} + S_1 \quad \textbf{(2.12)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho_2\alpha\right] + \boldsymbol{\nabla}.\left[\rho_2\alpha\boldsymbol{V_2}\right] = -S_{12} + S_2 \quad \textbf{(2.13)}$$

S_{12}, birim hacimde birim zamanda fazlar arasında değişen madde miktarı [kg/m^{3}s]
S_1 ve S_2 ise; birim hacimde birim zamanda her bir faza dışarıdan ilave edilen madde miktarıdır [kg/m^{3}s]
Tek boyutlu olarak süreklilik denklemi boru içerisinde integre edilerek yazılırsa;

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_1(1-\alpha)A] + \frac{\partial}{\partial z}[\rho_1(1-\alpha)v_1A] = \int(S_{12} + S_1)\,dA \quad \textbf{(2.14)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_2\alpha A] + \frac{\partial}{\partial z}[\rho_2\alpha v_2A] = \int(-S_{12} + S_2)\,dA \quad \textbf{(2.15)}$$

Momentum denklemi:

Üç boyutlu vektör olarak iki fazlı akış olan durumlarda momentum denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\rho_1\left(\frac{\partial \boldsymbol{V_1}}{\partial t} + \boldsymbol{V_1}.\boldsymbol{\nabla V_1}\right) = b_1 + f_1 - \boldsymbol{\nabla} p \quad \textbf{(2.16)}$$

$$\rho_2\left(\frac{\partial \boldsymbol{V_2}}{\partial t} + \boldsymbol{V_2}.\boldsymbol{\nabla V_2}\right) = b_2 + f_2 - \boldsymbol{\nabla} p \quad \textbf{(2.17)}$$

b_1 ve b_2; her bir bileşen için birim hacimdeki yer çekimi kuvvetleridir, $\boldsymbol{\nabla} p$; basınç gradyeni, f_1 ve f_2; basınç ve yer çekimi dışındaki kuvvetlerin tümü.

Sıkıştırılamaz Newtonian akışkanlar için $f_{1,2} = \mu_{1,2}\boldsymbol{\nabla^2 V_{1,2}}$ olarak tanımlanır.

Eğer bir boyutlu olarak momentum denklemi tekrar yazılsın:

$$\rho_1\left(\frac{\partial v_1}{\partial t} + v_1.\frac{\partial v_1}{\partial z}\right) = b_1 + f_1 - \frac{\partial p}{\partial z} \quad \textbf{(2.18)}$$

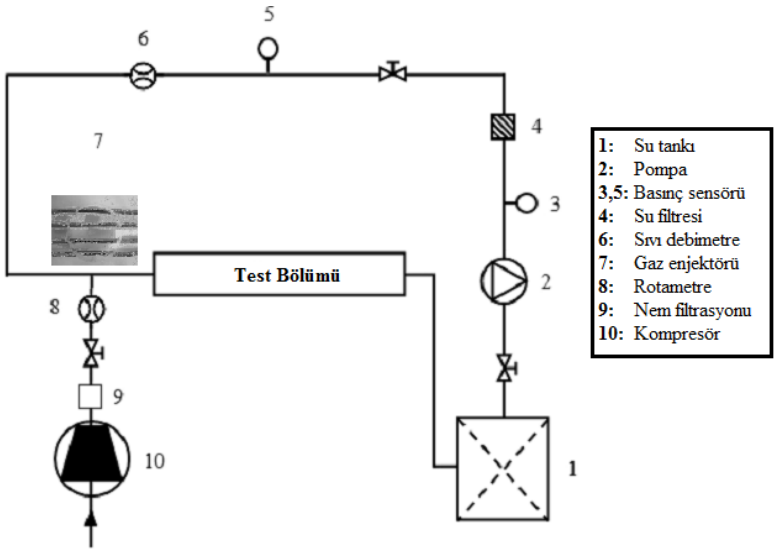
$$\rho_2\left(\frac{\partial v_2}{\partial t} + v_2.\frac{\partial v_2}{\partial z}\right) = b_2 + f_2 - \frac{\partial p}{\partial z} \quad \textbf{(2.19)}$$

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Hava ve su akışkan çiftlerinin boru içerisindeki akışlarının farklı parametreler ışığında incelenmesi amacıyla İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'ne bağlı Duscio Laboratuvarı'nda Emrah Deniz tarafından doktora çalışması amacıyla kurulan deney tesisatı kullanılmıştır. İki fazlı akışa etkiyen boşluk oranı, kabarcık çapı ve kabarcık sayısı ile basınç kaybı parametrelerinin değişimleri araştırılması amacıyla yüksek lisans tez çalışması kapsamında deneyler yapılmıştır. Bu bölümde deney tesisatı gösterilerek tesisat ekipmanları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Sonrasında ölçüm teknikleri belirtilmiş ve ölçüm metodolojisinden bahsedilmiştir. Son kısımda ise çalışmanın belirsizlik analizi tanımlanacaktır.

3.1 Deney Tesisatı ve Ekipmanları

Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi'ne bağlı Duscio Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deney tesisatının şematik diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1: Deney tesisatının şematik gösterimi.

Deney tesisatının içerisinde hava ve su akışkan çiftleri kullanılmıştır. Düzeneğin içerisinde dolaşan akış, kapalı bir çevrimde ve sızdırmazlığı sağlanmış bir sistem içerisindedir.

Deney tesisatının şematik gösteriminde olduğu gibi su deposu, pompa, basınç sensörü, su filtresi, sıvı debimetre, gaz enjektörü, rotametre, nem filtresi ve kompresörden oluşmaktadır. Deney düzeneği ayrıca Şekil 3.2' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Deney tesisatı.

Deney tesisatı ve ekipmanları hakkındaki ayrıntılı bilgi Makine Mühendisi Emrah Deniz tarafından doktora tezinde sunulmuştur.

3.2 Ölçüm Süreci

Bu çalışmada deneylerin yapılmasında hava-su kütlesel oranları, genişleme ve daralma açıları ile bu duruma bağlı olarak boru uzunluklarının değiştirilmesi suretiyle deney test ünitesi boyunca; boşluk oranları, kabarcık sayısı, kabarcık büyüklüğü ile radyal ve eksenel değişimleri ve basınç kayıpları ölçülmüştür.

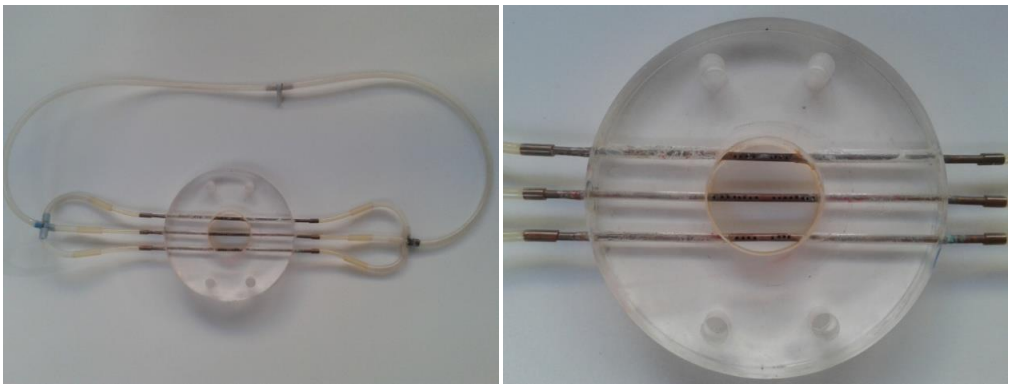
Ölçümler sırasında su ve hava tarafındaki sıcaklık değişimleri ihmal edilebilir seviyede kalması için gerekli önlemler alınmış ve bu amaçla su deposu uygun kapasitedeki bir hacimde tutulmuştur.

3.2.1 Enjektör

Sistem açılırken öncelikle kompresör, pompa ve ölçüm yapılacak parametrelerin ilgili cihazlarının elektrik bağlantıları sağlanmaktadır. İki fazlı akışın oluşabilmesi için kompresörden 3 bar basınç altında, ölçüm parametresi gereği sırasıyla 30, 50 ve 60 l/dk debide, hava ve elektromanyetik debimetre ile ayarlaması yapılan pompadan tüm deneyler süresince sabit 3 l/s hacimsel debide suyun akması test düzeneği

üzerinde ayarlanmaktadır. Kompresördeki hava, regülatörden geçerek kompresörün filtre ekipmanına ulaşır ve buradan sisteme verilecek hava debisi ayarlaması yapılmış rotametre ile hortum yoluyla in-line enjektörden verilir.

Tez çalışmaları kapsamında kullanılan enjektör; in-line enjektör tipinde 1 mm iç çapa sahip 32 delik şeklindedir. Şekil 3.3'te gösterilen üç sıralı tipteki enjektörün delikleri alt ve üst tarafta 8 delik bulundururken orta hatta 16 delik mevcuttur.

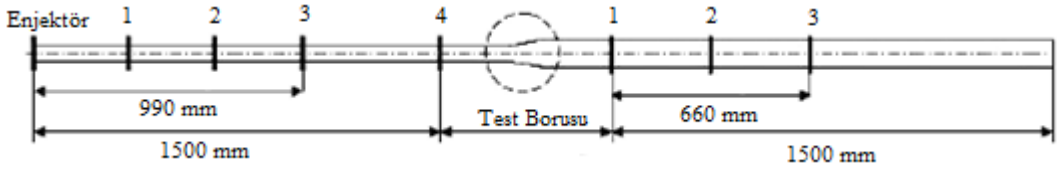


Şekil 3.3: In-line enjektör.

Enjektörün sisteme entegre edildiği nokta öncesine kadar, proses tek fazlı akış halindedir. In-line enjektörün deliklerinden giren hava, prosesi bu noktadan sonra iki fazlı akışa dönüştürür. Düzenek Şekil 3.2'de görüldüğü gibi yeterince uzun tutulmuş ve tek fazlı akışın tamamen gelişmiş özelliği kazanması sağlanmıştır.

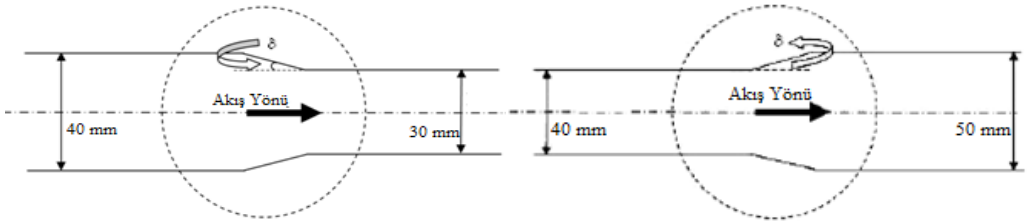
3.2.2 Test düzeneği

Enjektör sonrasındaki ölçüm noktalarında iki fazlı akışın yatay ve düz boruda ilerlerken oluşturduğu profilin incelenmesi amaçlanmıştır. Test bölümü detaylı olarak Şekil 3.4'te verilmiştir. Test bölümü üç ana borudan oluşmaktadır: Upstream diye adlandırılan üst akım bölgesi, test bölgesi; daha önceki bölümlerde ifade edildiği şekliyle teste tabi tutulan kanallar olduğundan tek boru (üç farklı açıda genişleme ve daralma şeklinde) ve downstream diye isimlendirilen alt akım bölgesidir. Şekil 3.4'te siyah kalın çizgiler olarak gösterilen kısımlar ise; ölçüm pozisyonlarıdır. Görüldüğü üzere üst akım bölgesinde dört ve alt akım bölgesinde de üç ölçüm pozisyonu mevcuttur.



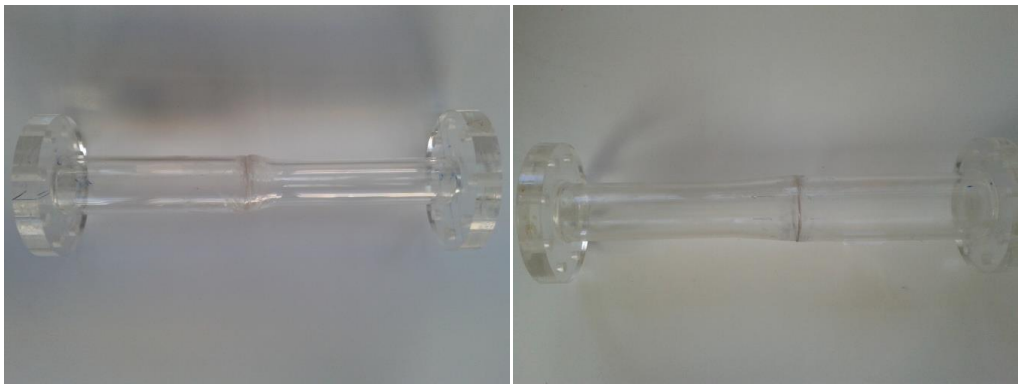
Şekil 3.4: Test bölgesinin detaylı şematik görünüşü.

Test boruları; yatay olarak pürüzsüz ve düz olarak pleksiglastan oluşmaktadır. Deneylerin gerçekleşeceği kesitlerin değişimi daralma ve genişleme olmak üzere şematik gösterimi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

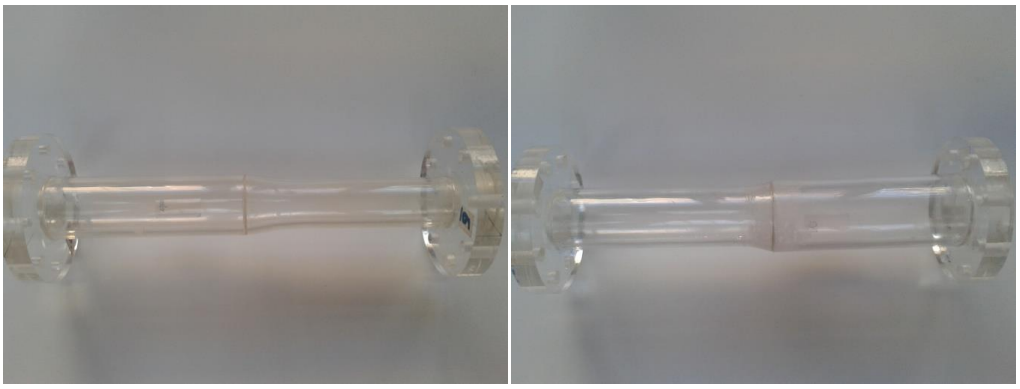


Şekil 3.5: Kesit değişimi gerçekleşen test bölgesi.

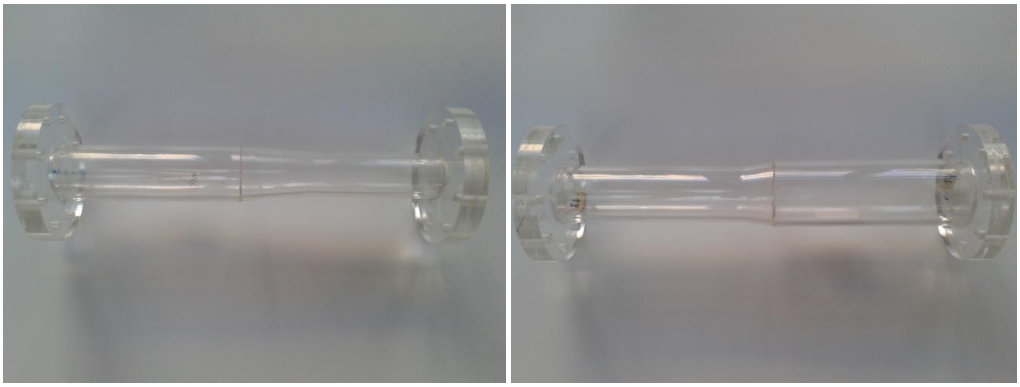
Test bölümünde düzgün daralan veya genişleyen geometride görünür akrilik borular yer almıştır. δ ile gösterilen açı değerleri 4.5°, 9° ve 15° olarak tanımlanmaktadır. Deneye tabi tutulan borular iki kategoride üç farklı açı olmak üzere testler sürdürülmüştür: 4.5°, 9° ve 15° açılar ile genişleme ve daralma bölgesinde test bölümü oluşturulmuştur. Sırasıyla aynı açılardaki daralma ve genişleme test boruları şekil 3.6, 3.7 ve 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6: 4.5° açısında daralma ve genişleme test borusu.



Şekil 3.7: 9° açısında daralma ve genişleme test boruları.



Şekil 3.8: 15° açısında daralma ve genişleme test borusu.

3.2.3 İkili optik prop

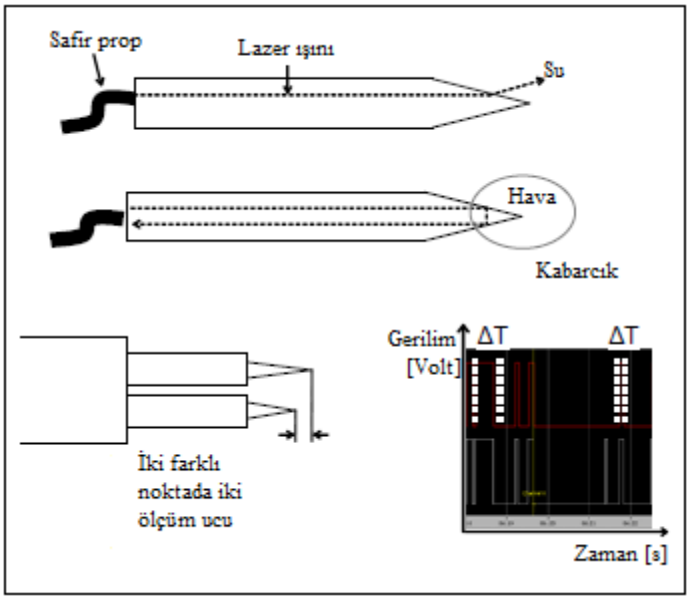
Radyal yönde iki fazlı akış parametreleri ölçümleri yapılırken optik prop kullanılmıştır. Sürdürülen deneysel çalışmalarda su ve hava akışı boyunca parametrik ölçümler ikili optik prop ile gerçekleştirilmiştir. Fransız RBI Şirketi tarafından imal edilmiş olan prop, iki adet safir 30 mikron kalınlığındaki uçtan oluşmakta ve üretici firma tarafından verilmiş hata oranı ± %7 mertebesindedir. 30 mikrondan büyük kabarcıklar için ölçüm gerçekleşmektedir. İki uç arasında 0.91 mm kadar mesafe bulunmaktadır. Şekil 3.9'da ikili optik prop ve uçları gözükmektedir.

İkili optik prop ile iki fazlı akış karakteristiğini belirleyen boşluk oranı, kabarcık sayısı, kabarcık büyüklüğü, ara yüzey yoğunluğu, ara yüzey frekans değeri, kabarcıkların probun iki ucu arasındaki ortalama geçiş süresi ve ara yüzey parametrelerinin ölçülmesi mümkün olabilmektedir. Şekil 3.10'da probun çalışma prensibi gösterilmiştir [79].



Şekil 3.9: İki fazlı akış parametrelerinin belirlendiği ikili optik prop.

Probun çalışma prensibi ölçümler esnasında prop yüzeyinin uçları arasında farklı kırılma indislerin esasına dayanır.



Şekil 3.10: Optik probun çalışma prensibi.

Lazer ışınının yansıması geliş açısına bağlı olarak prop boyunca ve ortamların kırılma indisi Snell yasasına göre şu denklemle ifade edilmiştir:

$$n_0 sin\theta_0 = n_1 sin\theta_1 \qquad \textbf{(3.1)}$$

n ve θ kırılma indisi ve geliş açılarıdır. Prop ucu 45° belli açıda pah kırılmıştır, böylece yansıma prop ucu ve çevre ortam arasında farklı indis olmasından dolayı lazer ışınının yansıması şartı gerçekleşir. Probun n ve θ değerleri sırasıyla 1.62 ve 45°'dir. Denklem itibariyle yerine konan sayılarda eşitliğin sağ tarafında n değeri 1.15 olarak elde edilir. Bu demek oluyor ki prop sadece prop boyunca gelen lazer ışını sadece çevreye yansıma yaptığını gösteriyor ve yansıma indisi 1.15'ten yüksek.

Çünkü hava ve suyun kırılma indisleri sırasıyla 1.33 ve 1'dir. Çevre ortam su olduğundan yansıma gerçekleşiyor ve probun ucunda hava olduğundan prop boyunca gelen lazer ışını yansıtmaktadır [80].

Hava, propun ucunda yansıdığından ışınlar oluşmakta ve prop, suyun içerisinde yansıma yaptığında sinyaller osiloskop vasıtasıyla gösterilmektedir. Deney tesisatı içerisinde kullanılan osiloskop Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Osiloskop.

İkili optik prop, kabarcık veya su ile karşılaştığında zaman içerisinde verileri kaydederek adım diyagramı oluşturmaktadır. Verilerin bilgisayara aktarılmasını sağlayan cihaz Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



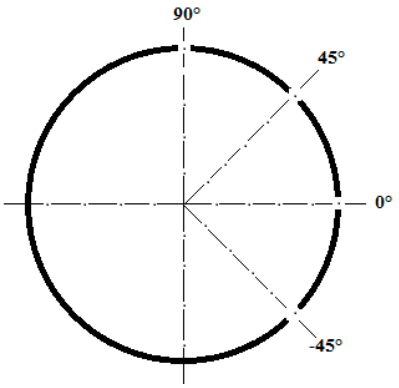
Şekil 3.12: Sinyallerin kaydedilerek bilgisayara aktarılmasını sağlayan cihaz.

Teknik olarak fiziksel yaklaşımı François ve diğ. (2003) tarafından ortaya konmuştur. Yapılan çalışmada; yeni bir veri toplama sistemi geliştirilmiş ve iki fazlı

akışlardaki başarısı test edilmiştir. Sistem içerisinde elde edilen sinyaller, akış haritaları tanımlamasında ve akış karakteristiği elde etmede kullanılmış; boşluk oranı, gaz kabarcık zamanlaması ve ara yüzey hızı gibi parametrelerin daha önceden tercih edilen gerçek zamanlı veri toplama sistemi ile karşılaştırılarak iki fazlı akışın gerçekleştiği sistemlerde kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir [81].

3.2.4 Ölçüm pozisyonları

Optik prop, deney tesisatı üzerinde boru boyunca akış karakteristiğini belirlemek üzere tasarlanmış ve boru üzerinden açılan delikler boyunca ölçüm gerçekleştirmektedir. Dikey eksende açılan delikten konumlandırılan ikili optik prop ile ölçüm yapılacak parametrelerin lokal değerlerinin belirlenmesi amacıyla boru kesiti boyunca taramak mümkün olmaktadır. Akış profilinin ortaya konması açısından ölçümler 2 mm aralıklar ile gerçekleştirilmiştir. İkili optik probun yatay düzlemde kanal içerisine dört farklı eksenden yerleştirilmesi Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



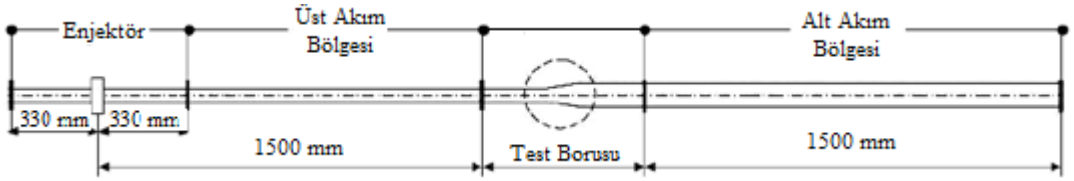
Şekil 3.13: İkili optik probun ölçüm noktaları.

Deneysel veriler, 2 mm aralıklar ile 90 saniye süresince ikili optik prop sayesinde kanal çapı boyunca dört farklı eksenden alınmıştır. Kanal içerisine Şekil 3.13'te görülen deliklerden batırılan probun, boru cidarına kadar ilerlemesi sağlanarak temas ettirildikten hemen sonra 2 mm geriye doğru çekilerek ölçümlerin kanal çapı boyunca alınması sağlanmıştır. Ancak deneysel veriler ve bu konudaki değerlendirmeler yüksek lisans tez kapsamında sadece 90° için verilmiştir. Çünkü hesaplanan ilgili parametrelerin en önemli değişim gösterdikleri eksenin boru boyunca düşey eksen olduğu belirlenmiş olup tez çalışması içeriği olarak iki fazlı akışın eksenel yöndeki boşluk oranı, kabarcık sayısı ve kabarcık büyüklüklerinin izlenmesi hedeflenmiştir. Hava kabarcıklarının iki fazlı akış içerisinde düşey eksende

ne ölçüde boru üst cidarına doğru hareketlendiği izlenmesi hedeflenmiştir. Kabarcıklar hem suyun kaldırma kuvveti hem birbirleriyle olan çekim kuvvetleri hem de kendilerine etkiyen yer çekimi kuvvetleri tesiri altında hareketlerini sürdürürler. Üst cidarda toplanan gaz kabarcıkları, birbirleri ile de çekim altına girerek akış rejiminin değişmesine sebep olabilmektedir. Akış rejimi değiştiği zaman iki fazlı akış prosesinde, yapılacak olan hesaplamalar ile ilgili korelasyonlar ve değişkenleri de değişim gösterebilmektedir. Bahsedilen değişimlerin ve etkilerin sonuçlarının izlenebilirliği için düşey eksendeki değerlerin incelenmesi uygun görülmüştür.

3.2.5 Basınç ölçümleri

Şekil 3.14'te test bölümünün basınç ölçümlerinin gerçekleştirildiği ve bağlantı noktalarının gösterildiği şematik gösterimi sunulmuştur.



Şekil 3.14: Test bölgesi basınç ölçümünün şematik görünüşü.

Ölçüm aralığı 0-10 kPa ve ± %0.25 hata oranı özelliklerine sahip kalibrasyon sertifikasına sahip dört fark basınç sensörü test bölümü boyunca, enjektör öncesi ve sonrası ile üst akım bölgesi, test borusu kısmında ve alt akım bölgesinde ölçümler gerçekleştirmiştir. Fark basınç sensörü Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15: Fark basınç sensörü.

Alınan veriler National Instrument firmasına ait USB-6229 data logger ile bilgisayara aktarılarak LabVIEW programı vasıtasıyla bilgiler elde edilerek çözdürme yapılmıştır. Şekil 3.16'da ilgili cihaz gösterilmiştir.



Şekil 3.16: USB-6229 Data logger.

3.3 Hata Analizi ve Belirsizlik Oranı

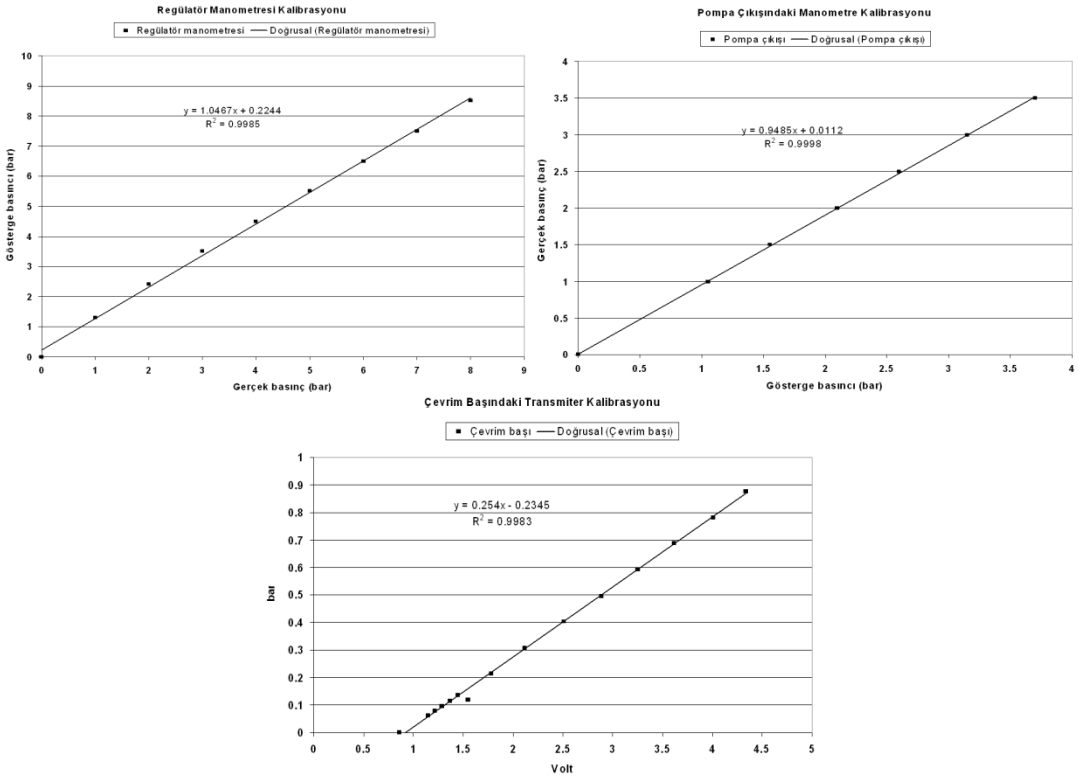
Deney tesisatındaki akışkanların debilerini belirlemek amacıyla kullanılan su debimetresi ve rotametre ile iki fazlı akış karakteristiği parametrelerini ölçmede kullanılan ikili optik prop ve basınç ölçerlerin hata değerleri ve belirsizlikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Hata ve belirsizlik oranları

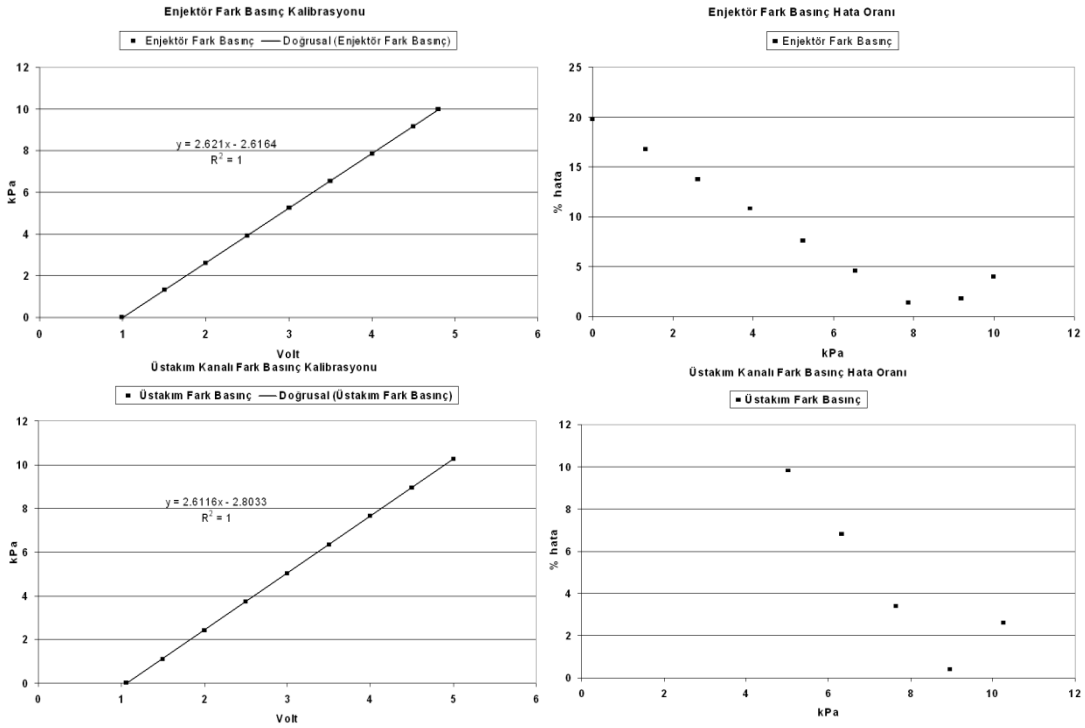
Ekipman	Hata Oranı (%)	Belirsizlik Oranı (%)
Debimetre	1	0.028
Rotametre		2.4
Hacimsel boşluk oranı		0.001
İkili optik prop	7	

Deney tesisatındaki yerel basınç ölçümleri pompa çıkışında ve regülatör girişinde manometrelerle; akışkan çevriminin başında ve su debimetresinden önce ise transmiterle yapılmaktadır. Manometrelerin ve transmiterin hata oranı sırasıyla % 0.6 ile % 0.02 olarak verilmektedir ve kalibrasyon eğrileri Şekil 3.17'de verilmektedir. Yapılan kalibrasyonlarla deney tesisatında gerçekleşen basınç düşüşü voltaj değeri olarak elde edilmektedir.

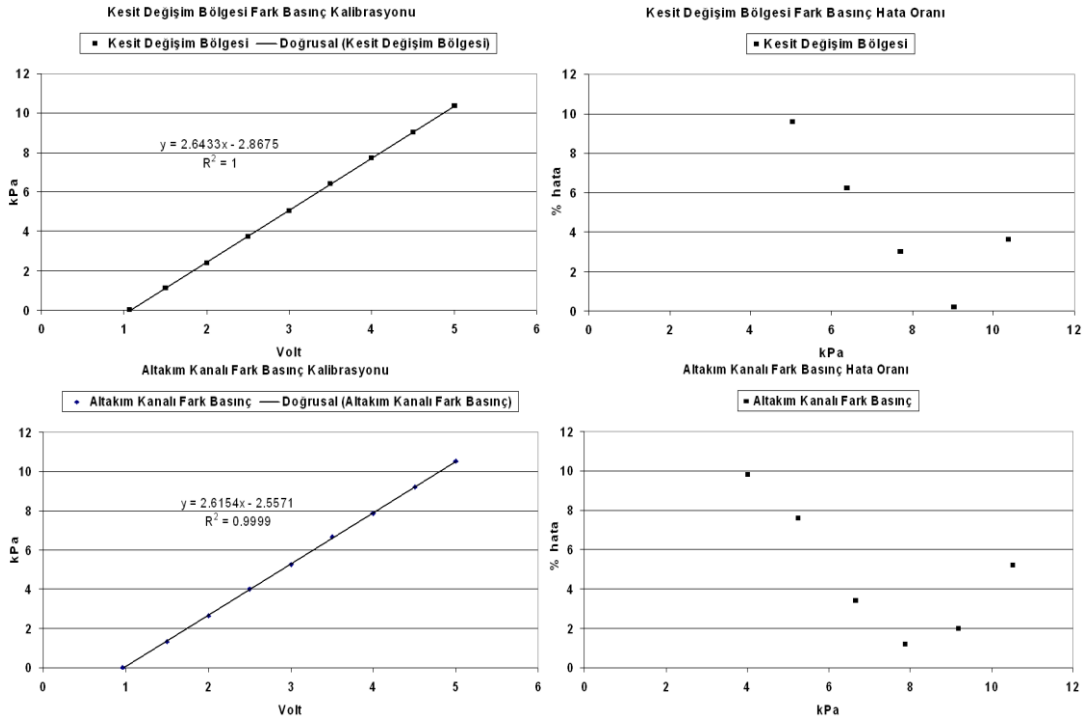
Yerel basınç ölçerlerin haricinde deney tesisatında ayrıca beş adet fark basınç ölçer bulunmaktadır. İki fazlı akıştaki basınç ölçümünde kalibrasyondan kaynaklanan hataları en aza indirmek amacıyla tüm fark basınç transmiterlerinin kalibrasyonları sertifika verme yetkisine sahip bir laboratuara yaptırılmıştır. Ölçüm yaptıkları hatta göre isimlendirilen fark basınç ölçerlerin kalibrasyon eğrileri ve hata oranları Şekil 3.18-20'de verilmiştir.



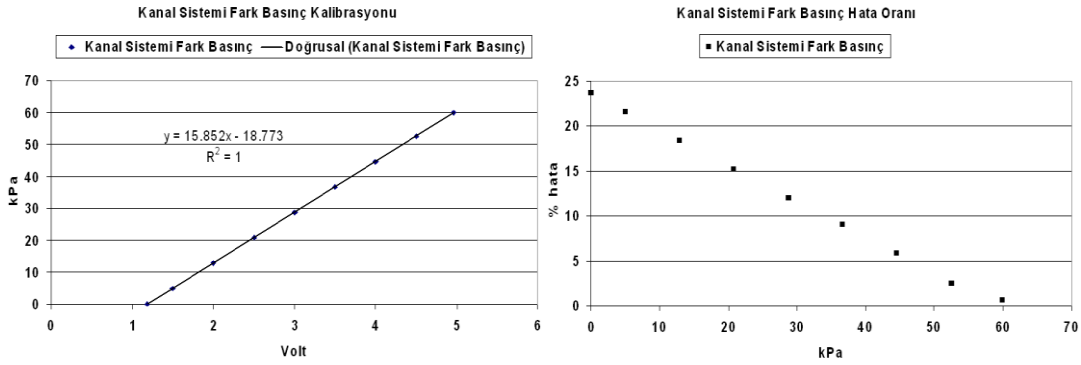
Şekil 3.17: Tesisatta kullanılan manometreler ve yerel basınç transmiterinin kalibrasyon eğrileri.



Şekil 3.18: Enjektör (üstte) ve üstakım (altta) kanalı fark basınç ölçer kalibrasyon bilgileri ve hata oranları.



Şekil 3.19: Kesit değişim bölgesi (üstte) ve altakım (altta) kanalı fark basınçölçer kalibrasyon bilgileri ve hata oranları.



Şekil 3.20: Kanal sistemi fark basınçölçer kalibrasyon bilgileri ve hata oranları.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Deneyler; 30, 50 ve 60 l/dk olarak üç farklı hava debisinde yani %13.87, %21.74 ve % 25.31 kinematik boşluk değerine karşılık gelen değerlerde, iki fazlı akışın başladığı üst akım bölgesi, altı farklı kesite sahip test bölümü ve etkilerinin sürdüğü alt akım bölgesi olarak iki kısımda yapılmıştır.

Tez kapsamının bulguları olarak dört parametre üzerinde durulacaktır: Boşluk oranı, kabarcık sayısı, kabarcık büyüklüğü ve basınç kaybı.

Boşluk oranı, kabarcık sayısı ve kabarcık büyüklüğü parametrelerinin verilen grafiklerde değişimleri incelenmiştir. Üç farklı debi için sunulan sonuçlar, üst akım bölgesi ve test bölgesi ile alt akım bölgesini içeren boru boyunca elde edilen verilerdir.

Tüm grafiklerin düşey eksenleri ilgili parametreleri ifade ederken yatay eksenler de r/D olarak gösterilen boru kesitindeki koordinatın boyutsuzlaştırıldığını belirtmektedir.

4.1 Boşluk Oranı

Gaz fazı hacminin iki fazlı akış sistemi toplam hacmine oranlanması ile ulaşılır:

$$\alpha = \frac{V_{gaz}}{V_{toplam}} = \frac{A_{gaz}L}{(A_{sıvı}+A_{gaz})L} = \frac{A_{gaz}}{A_{toplam}} \qquad \textbf{(4.1)}$$

İki fazlı akışta yerel boşluk oranı değerlerinin belirlenmesi, belirli bir hacim üzerinde elde edilmesinin zorluğundan ötürü zamana bağlı olarak elde edilmektedir. Bu tanımlama sonucunda; yerel (lokal) boşluk oranı olarak tanımlanan iki fazlı akış parametresi, optik prop vasıtasıyla ölçülen gaz fazı zamanının toplam zaman aralığına bölünmesi ile ölçülür.

$$\alpha = {}^{T_{gaz}}/_{T} \qquad \textbf{(4.2)}$$

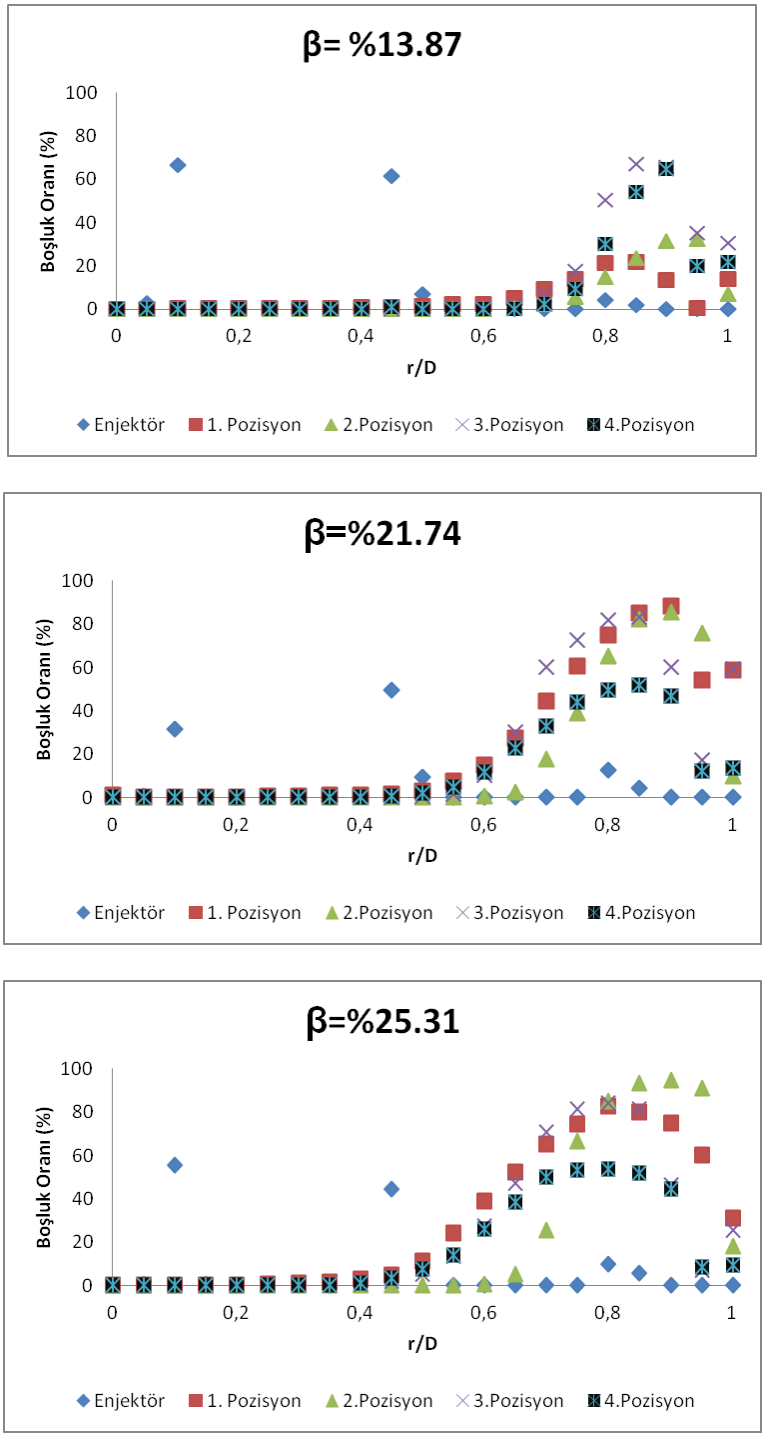
Her bir ölçüm 90 saniye süresince yapılmaktadır. Gaz kabarcıklarının ikili optik prop ile temas sürelerinin, toplam ölçüm süresine bölünmesi ile noktasal ölçümün gerçekleştiği konumdaki boşluk oranı değeri elde edilir.

4.1.1 Üst akım bölgesi

Üst akım bölgesinde yerel (lokal) boşluk oranı değerleri üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.1'de boşluk oranı dağılımı gösterilmektedir. Boşluk oranı değerleri yüzdesel olarak sunulmuştur.

Üst akım bölgesinde yer alan enjektörün, hemen çıkışında ölçülen boşluk oranı değerlerinde r/D= 0.1 ve 0.45 lokasyonlarında %40-60 değerleri arasında olduğu görülmektedir. Diğer noktalarda boşluk oranı değeri olmadığı veya çok küçük değerlerde olduğu görülmektedir. Her üç kinematik boşluk oranına göre r/D= 0.8 noktasında boşluk oranının tekrar % 10 değerine ulaştığı Şekil 4.1'de izlenmiştir.

Boşluk oranı değerinin ilk kinematik boşluk oranı değerinde yaklaşık r/D= 0.7 noktasından sonra arttığı görülmektedir. 1. ve 2. pozisyonlarda düşük değerlerde olan boşluk oranı, 3. ve 4. pozisyonlarda %60 değerlerine ulaşıyor. Kinematik boşluk oranı arttıkça gaz fazı sıvı fazına baskın gelmeye başlayarak kabarcıklar, ilk pozisyonlara nispeten boru üst cidarına doğru toparlanma eğilimi gösteriyorlar. Ayrıca kinematik boşluk oranı değerinin yükselmesiyle birlikte gaz kabarcıklarının daha kısa mesafede boru üst cidarına doğru toplandığı, daha ileri ölçüm pozisyonlarında ise havanın üst kısma çarptıktan sonra alta doğru tabakalaşmaya yöneldiği görülmektedir.

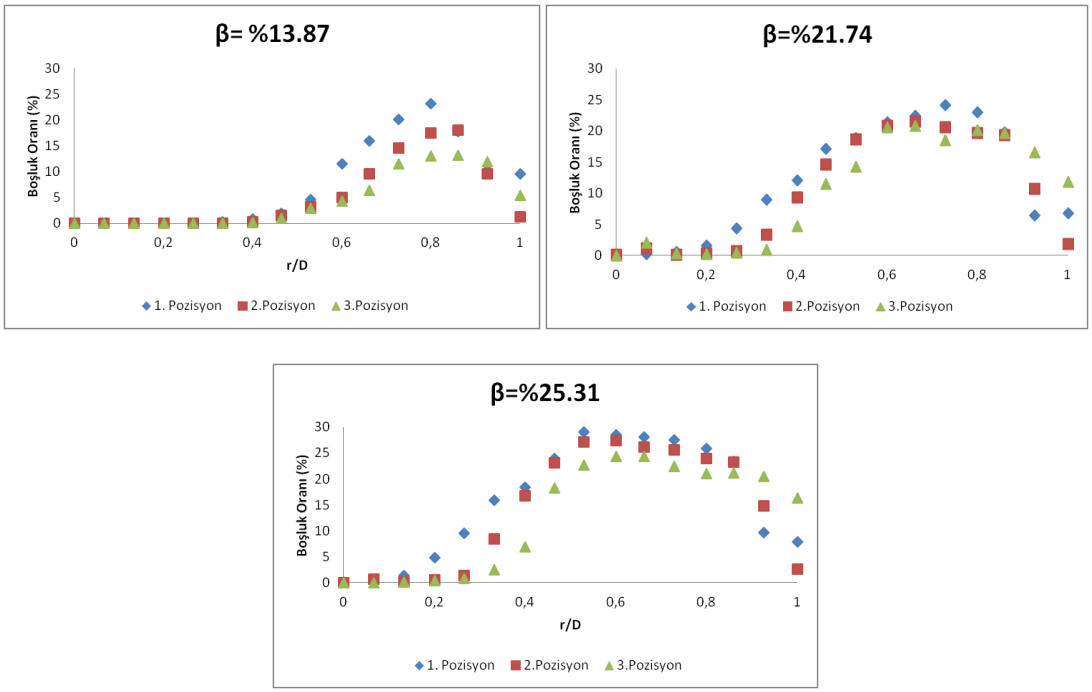


Şekil 4.1: Üst akım bölgesinde β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı.

4.1.2 Test bölümü ve alt akım bölgesi

4.1.2.1 Daralma kesiti

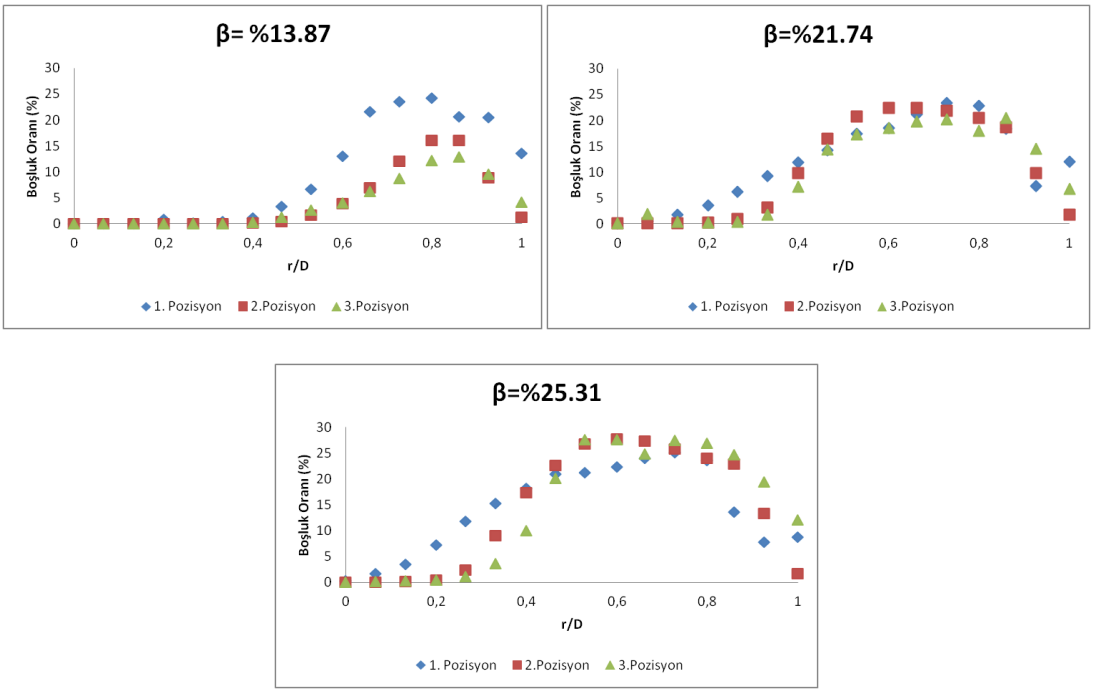
4.5° daralma açısına sahip test borusundaki yerel (lokal) boşluk oranı değerleri üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.2'de boşluk oranı dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.2: 4.5° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı.

Test borusunun 4.5° daralma gösterdiği durumda, kesitin küçülmesiyle gaz kabarcıklarının bir araya gelerek ilerlediği ancak daha sonra havanın suyun içerisinde dağıldığı görülüyor. Kinematik boşluk oranı değerinin artması ile gaz kabarcıkları toplanarak boru alt cidarına doğru yönelim göstermişler ve gaz kabarcık profili genişlemiştir. %13.87 kinematik boşluk oranı değerinde yerel boşluk oranı değerleri üç pozisyon için de birbilerinden uzak değerlerdeyken %25.31 değerine ulaştığında daha yakınlaştığı görülmektedir.

9° daralma açısına sahip test borusundaki yerel (lokal) boşluk oranı değerleri üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.3'te boşluk oranı dağılımı gösterilmektedir.



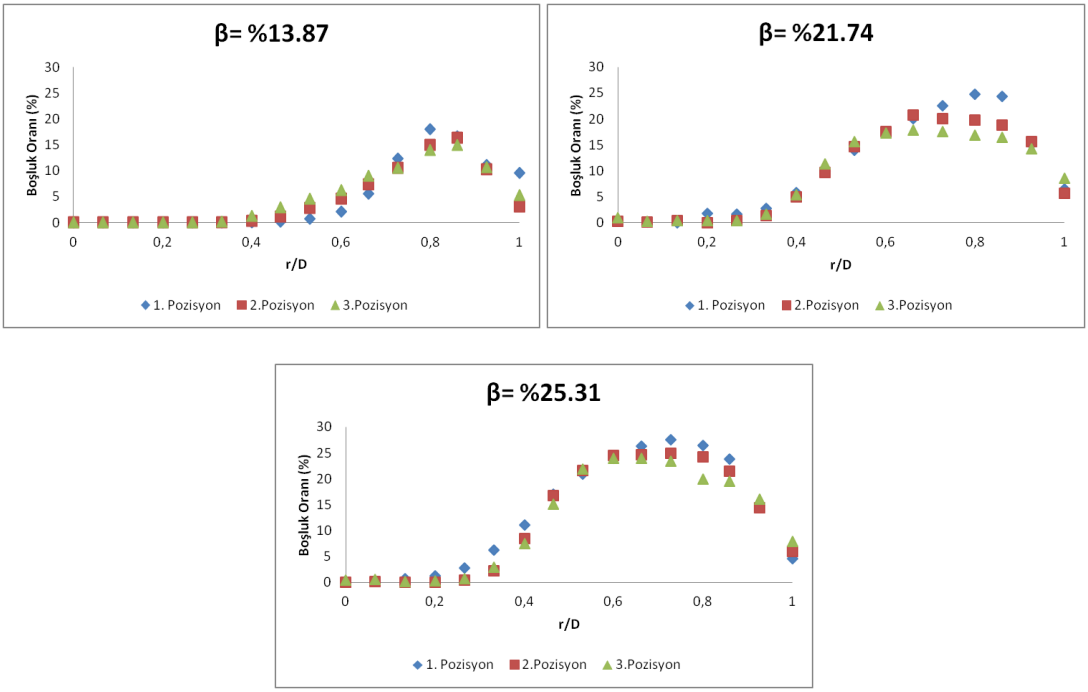
Şekil 4.3: 9° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı.

β= %13.87 değerinde her üç pozisyon için boşluk oranı gelişimi boru orta noktasından itibaren başlamıştır. İlk pozisyondaki boşluk oranı değerleri en yüksek mertebededir. Her bir kinematik boşluk oranı değerinde bir önceki düşük değerine göre boşluk oranı tüm boru boyunca artış eğilimindedir. β= %13.87 kinematik boşluk oranı değerinde sadece ilk pozisyon için %25 boşluk oranı değeri elde edilirken, β= %21.74 değerinde her üç pozisyonda %25 boşluk oranı hesaplanmış olup β= %25.31 değerinde ise boru orta noktasından itibaren %30 boşluk oranı değerlerine yakın mertebede akış görülmüştür.

15° daralma açısına sahip test borusundaki yerel (lokal) boşluk oranı değerleri üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.4'te boşluk oranı dağılımı gösterilmektedir.

15° daralma açısında ilk kinematik boşluk oranı değerinde üç pozisyondaki sonuçlar yakın değerlerdedir ve boru üst kısmına yakın r/D= 0.8 değerinde en yüksek %20 boşluk oranı değerine ulaşılabilmektedir. İkinci kinematik boşluk oranı değerinde ise; r/D= 0.4 noktasından itibaren boşluk oranı değeri artış göstermekte ve r/D= 0.6-0.8 arasında %20 boşluk oranı izleniyor. Üçüncü kinematik boşluk oranı değerinde

de r/D= 0.35'ten itibaren boşluk oranı değerleri artmakta ve %25 değerlerine ulaşmaktadır.



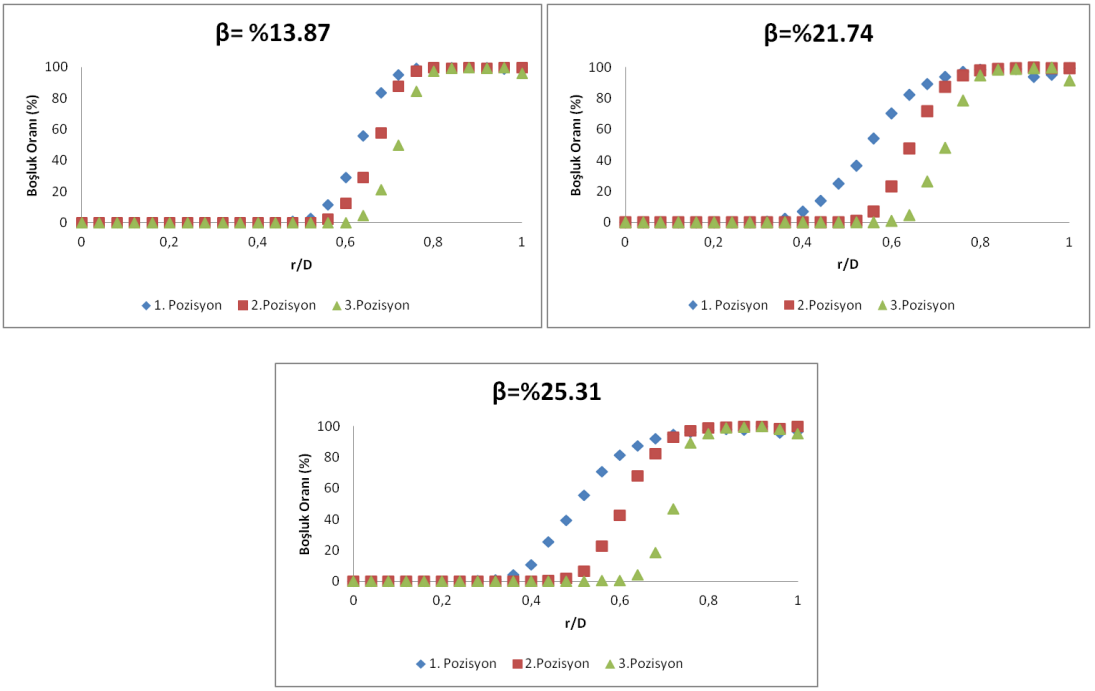
Şekil 4.4: 15° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı.

Daralma açısı arttıkça grafiklerde verilerin oluşturduğu çan eğrisi daralarak yükselişe geçmektedir.

4.1.2.2 Genişleme kesiti

4.5° genişleme açısına sahip test borusundaki yerel (lokal) boşluk oranı değerleri üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.5'te boşluk oranı dağılımı gösterilmektedir.

4.5° genişleme açısında β= %13.87 kinematik boşluk oranında boru orta noktasından üst kısma doğru boşluk oranı değerleri artış göstermektedir. β= %21.74 değerinde ise ilk pozisyonda r/D= 0.4 noktasından itibaren boşluk oranı değeri yükselişe geçmektedir. Kabarcıklar, debinin artması ile son kinematik boşluk oranı değerinde r/D= 0.35 noktasından sonra toplanarak boru üst kısmına doğru toplanarak ilerlemektedir.



Şekil 4.5: 4.5° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı.

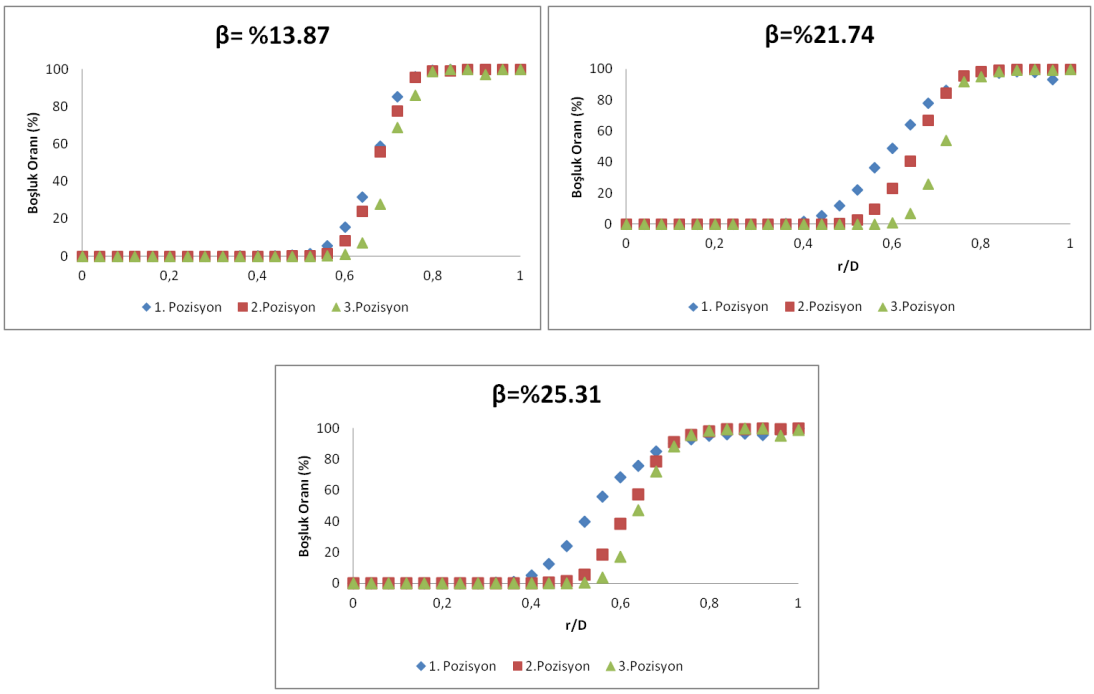
9° genişleme açısına sahip test borusundaki yerel (lokal) boşluk oranı değerleri üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.6'da boşluk oranı dağılımı gösterilmektedir.

Genişleme açısı artarken ilk pozisyonda hava kabarcıklarının boru üst cidarına doğru toplandığı görülmektedir.

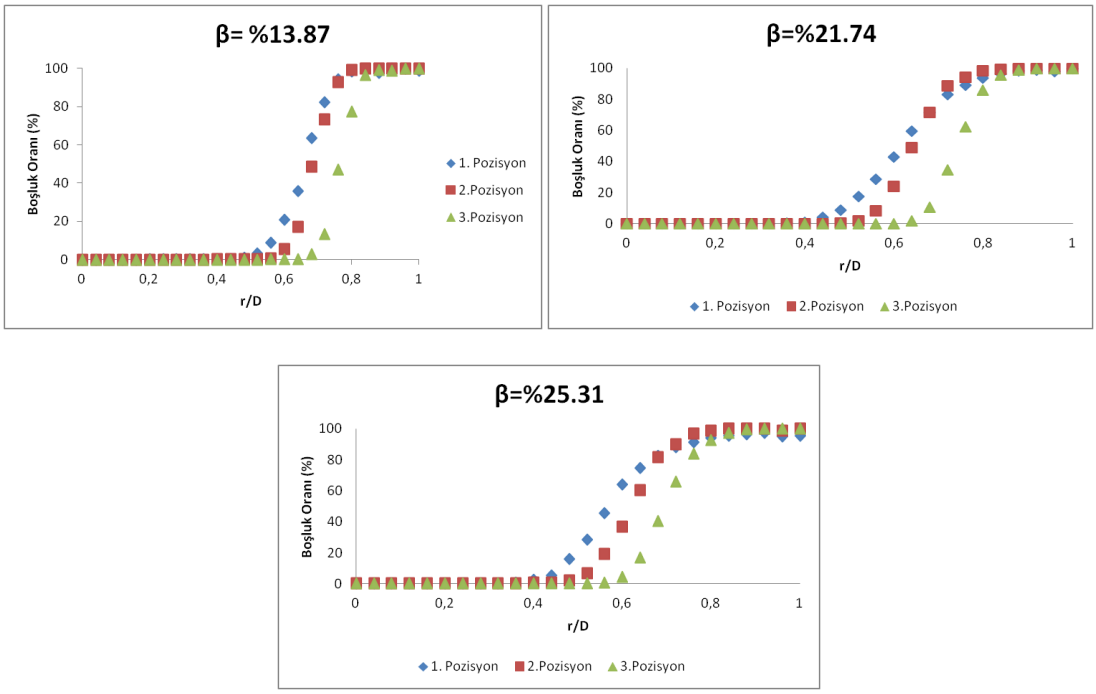
15° genişleme açısına sahip test borusundaki yerel (lokal) boşluk oranı değerleri üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.7'de boşluk oranı dağılımı gösterilmektedir.

4.5°, 9° ve 15° genişleme açılarında boşluk oranı değerleri ilk kinematik boşluk oranı değerinde r/D= 0.6, ikinci kinematik boşluk oranı değerinde r/D= 0.5 ve son kinematik boşluk oranında r/D= 0.4 noktasından itibaren gelişim göstermeye başlamaktadır.

Test bölümünün genişlediği ve sonrasındaki alt akım bölgesinde elde edilen değerler, gaz kabarcıklarının yoğunluğunun düşük olması sebebiyle hızlı bir şekilde boru üst cidarına doğru hareket ettiklerini göstermektedir.



Şekil 4.6 : 9° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı



Şekil 4.7: 15° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için yerel boşluk oranı dağılımı.

Kinematik boşluk oranı değeri yükselirken aynı zamanda sistem içerisine giren hava miktarı arttığından boru orta noktasından itibaren yerel boşluk oranının var olmaya başladığı izlenmiştir.

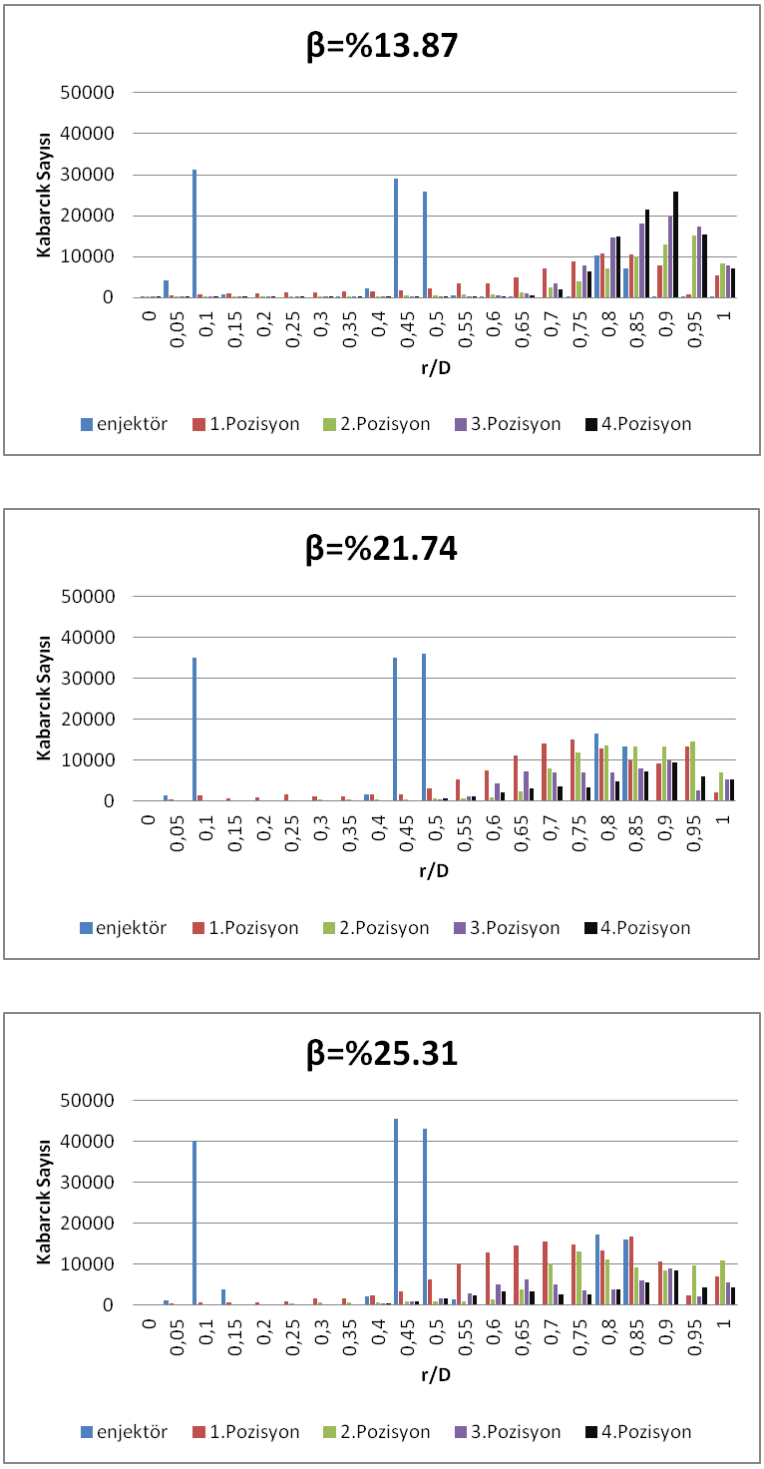
4.2 Kabarcık Sayısı

Kabarcık sayısı, gaz kabarcıklarının ikili optik prop uçlarına çarpmaları sonucu belirlenmektedir. İki uca çarpan kabarcıkların ortalaması alınarak grafiksel gösterimler halinde kabarcık sayısı verilmiştir. Farklı kinematik boşluk oranı değerleri ile, %13.87, %21.74 ve % 25.31, deneyler yapılmış ve kabarcık sayılarının dağılımları incelenmiştir.

4.2.1 Üst akım bölgesi

Kabarcık sayılarının dağılımı üst akım bölgesinde üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.8'de kabarcık sayıları gösterilmektedir.

Enjektör çıkışında yoğun olarak gözüken gaz kabarcıkları, suyun enjektöre arkadan gelerek kesit daralması ile birlikte basıncı azalmakta ve hava aşağıya doğru yönlenmektedir. Bundan dolayı her üç kinematik boşluk oranı değerinde r/D= 0.1 konumunda 30000-40000 arasında kabarcık tespit edilmiştir. Hava debisi arttıkça gaz kabarcıkları boru orta noktasından itibaren gelişim göstermekte ve pozisyonlar arasındaki kabarcık farkı da azalarak boru üst kısmına doğru birikmeye başlamaktadır.



Şekil 4.8: Üst akım bölgesinde β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı.

4.2.2 Test bölümü ve alt akım bölgesi

4.2.2.1 Daralma kesiti

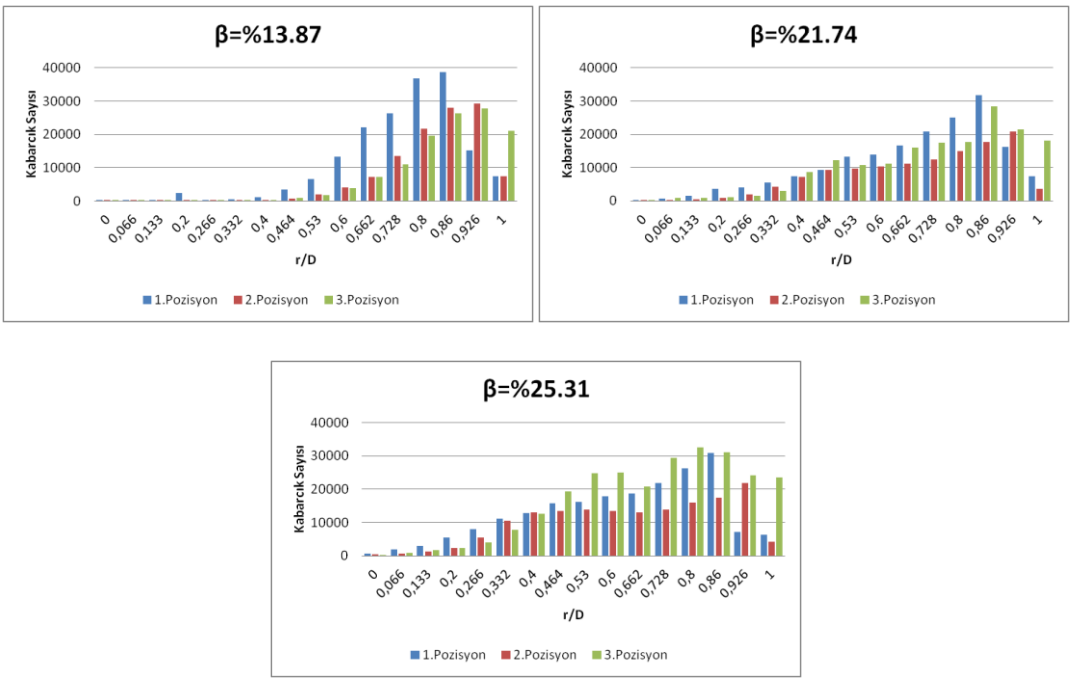
Kabarcık sayılarının dağılımı 4.5° daralma açısında üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.9'da kabarcık sayıları gösterilmektedir.



Şekil 4.9: 4.5° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı.

Daralmanın başlaması ile birlikte gaz kabarcıklarının yoğunlaştığı görülmektedir. Boru üst kısmına yakın olan bölgelerde daralma öncesinde ortalama kabarcık sayısı 10000 kadarken bir anda kabarcık sayısı iki katına kadar çıktığı gözlemlenmiştir.

Kabarcık sayılarının dağılımı 9° daralma açısında üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.10'da kabarcık sayıları gösterilmektedir.

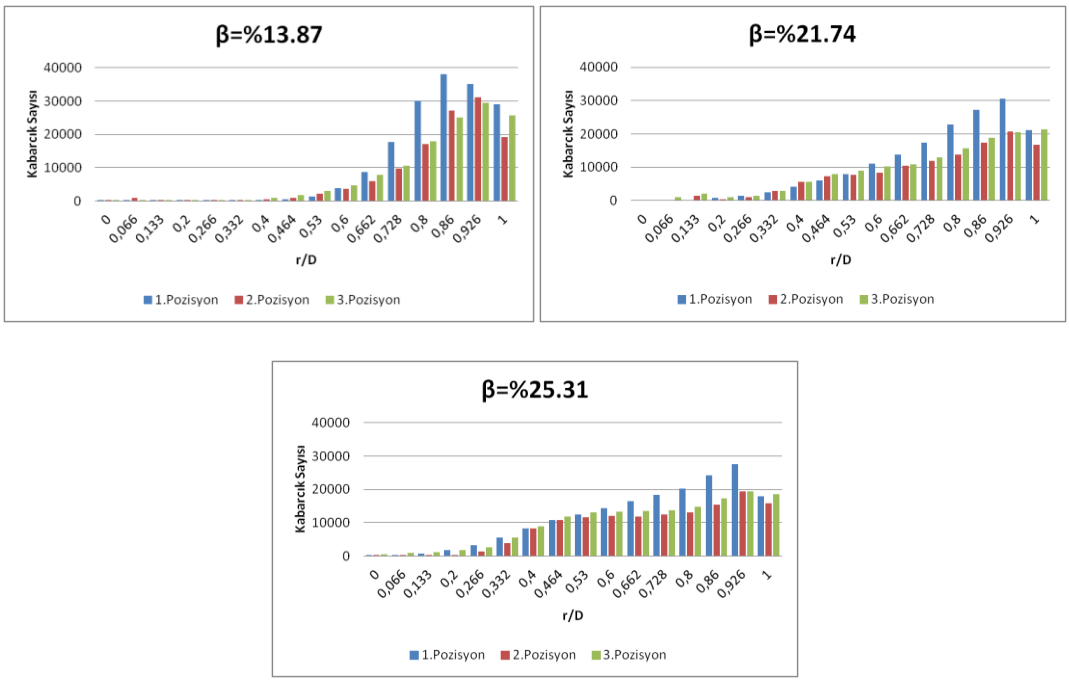


Şekil 4.10: 9° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı.

9° daralma açısında β= %13.87 kinematik boşluk oranında boru orta noktasından itibaren kabarcıklar tespit edilmeye başlanmıştır. Hava miktarının artması ile birlikte iki fazlı akışta gaz kabarcıklarının hızla arttığı β= %21.74 değerinde 10000-20000 değer aralığında iken β= %25.31 değerinde ise 15000-30000 aralığında olduğu görülmektedir.

Kabarcık sayılarının dağılımı 15° daralma açısında üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.11'de kabarcık sayıları gösterilmektedir.

Son pozisyona doğru yoğunluk farkından dolayı; kabarcıkların tüm açı ve her bir kinematik boşluk oranı değerleri için boru üst kısmına doğru konumlandığı görülmektedir. 15° daralma açısında alt akım bölgesinde kinematik boşluk oranı değeri arttıkça tüm boru kesitince kabarcıklar görülmeye başladığı tespit edilmiştir.

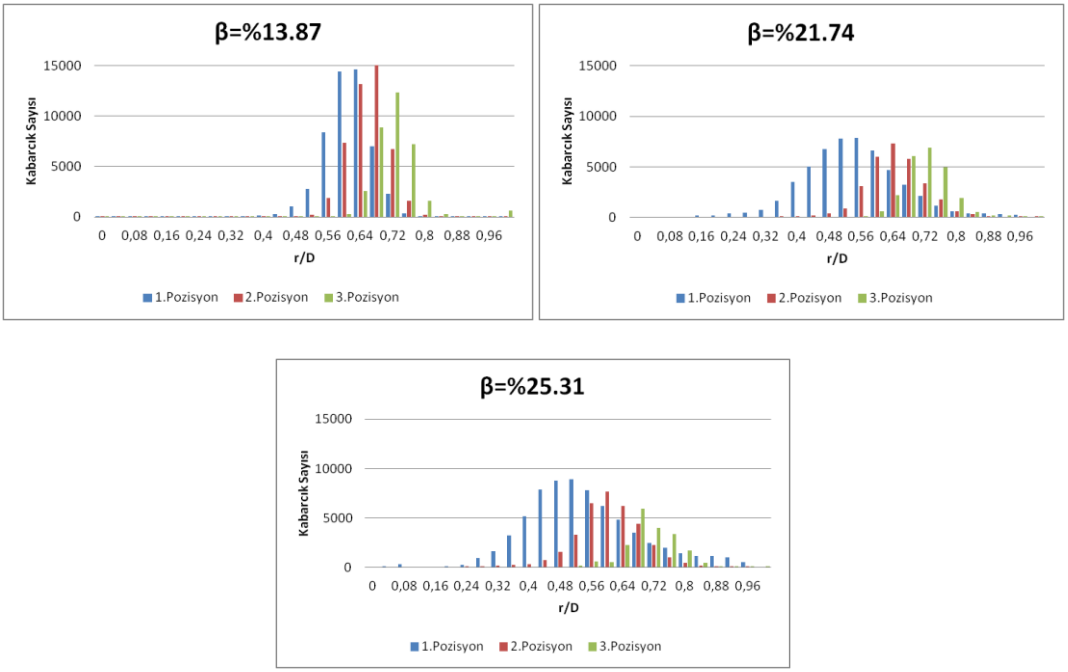


Şekil 4.11: 15° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı.

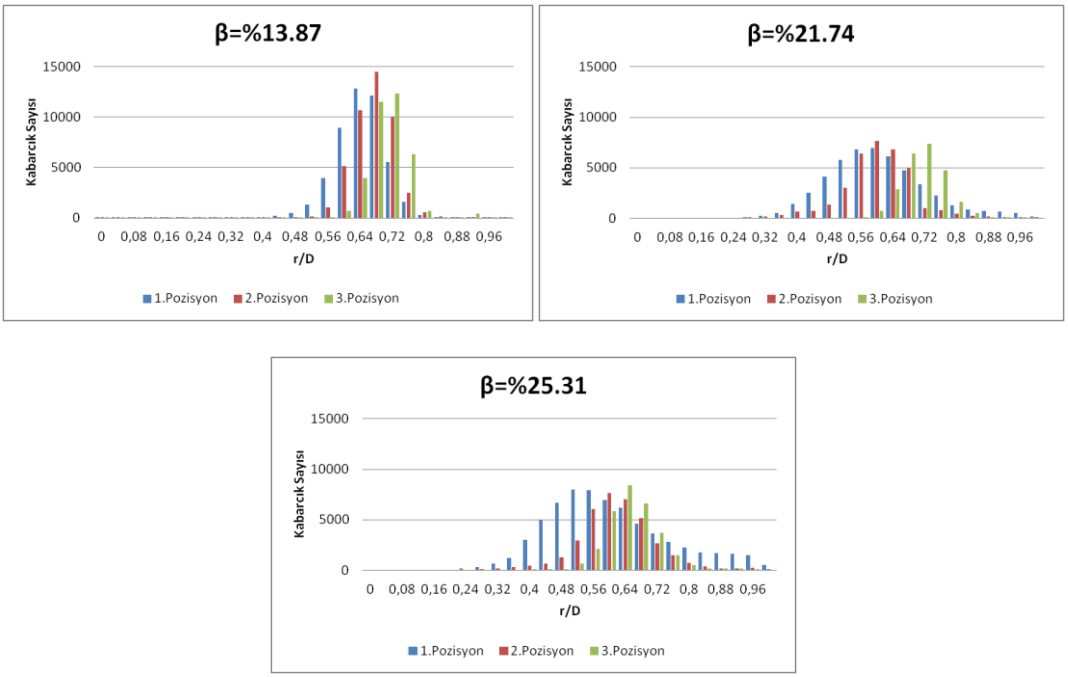
4.2.2.2 Genişleme kesiti

Kabarcık sayılarının dağılımı 4.5° genişleme açısında üç farklı kinematik boşluk oranı, %13.87, %21.74 ve % 25.31, için belirlenmiştir. Şekil 4.12-14'te kabarcık sayıları gösterilmektedir.

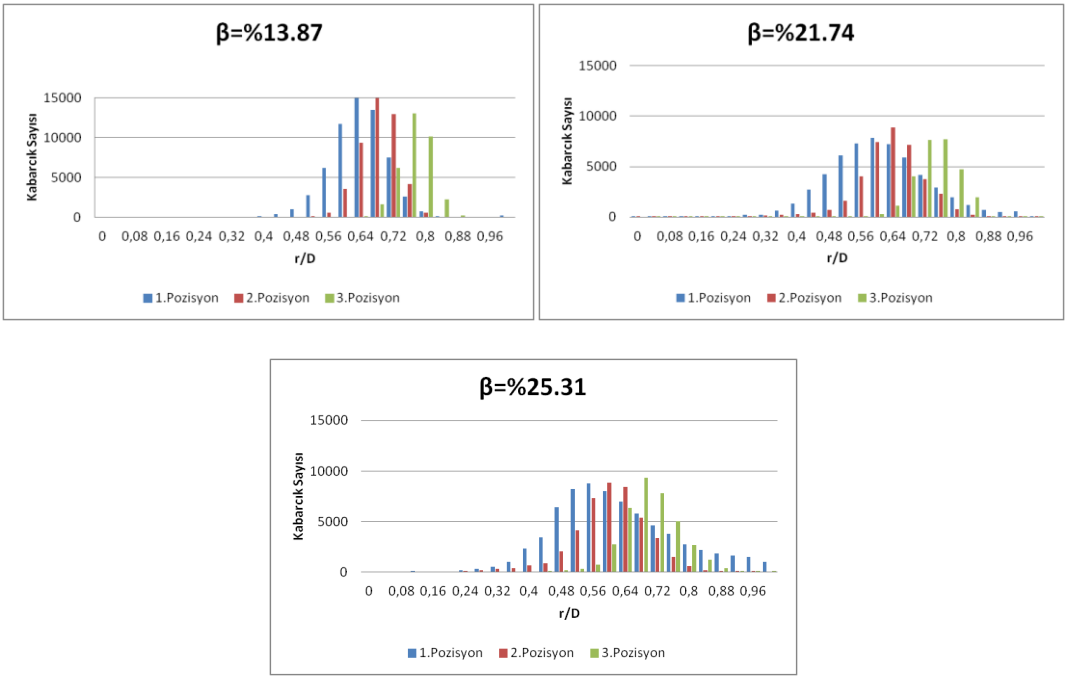
Boru genişlemesi ile birlikte kabarcıkların r/D= 0.4 ile 0.8 konumlarında yoğunlaştığı görülmektedir. Kinematik boşluk oranının artmasıyla ilk pozisyonda diğer pozisyonlara nazaran kabarcık sayısı oldukça fazlayken boru orta noktasında, kabarcıkların ileriye doğru dağılma eğilimine geçtiği görülmüştür. 9° ve 15° genişlemelerde kabarcık dağılımlarının çok farklı olmadığı görülmüştür. Her iki durumda da en kayda değer değişiklik düşük hava debisi β= %13.87 değerinde ilk pozisyonlarında r/D= 0.48-0.66 arası yoğunken son pozisyonda r/D= 0.24-0.72 arasında genişleme göstermektedir.



Şekil 4.12: 4.5° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı.



Şekil 4.13: 9° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı.



Şekil 4.14: 15° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık sayısı dağılımı.

4.3 Kabarcık Büyüklüğü

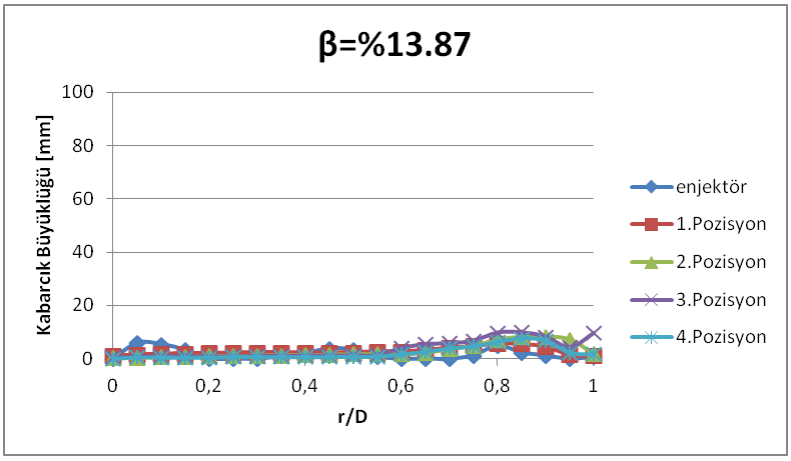
Kabarcık büyüklüğü, gaz parçacıklarının ortalama büyüklüğü olarak hesaplanmaktadır. Küresel bir parçacığın çapının tespit edilebilmesi için hacimsel büyüklüğü ile yüzey alanının oranlanması gerekmektedir.

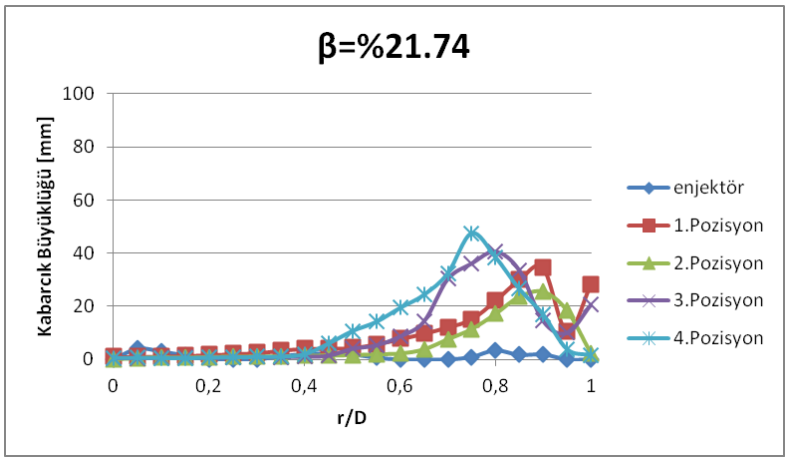
Bu durum, çalışma kapsamındaki ölçüm metodolojisi içerisinde şöyle de ifade edilebilir: Gaz kabarcıklarının ikili optik proptaki geçtikleri süre ile hızlarının çarpılarak prop tarafından belirlenen kabarcık sayısına bölünmesi ile elde edilir. Aynı zamanda bu ifade, boşluk oranının ara yüzey alan konsantrasyonuna oranının 6 katına eşittir [82].

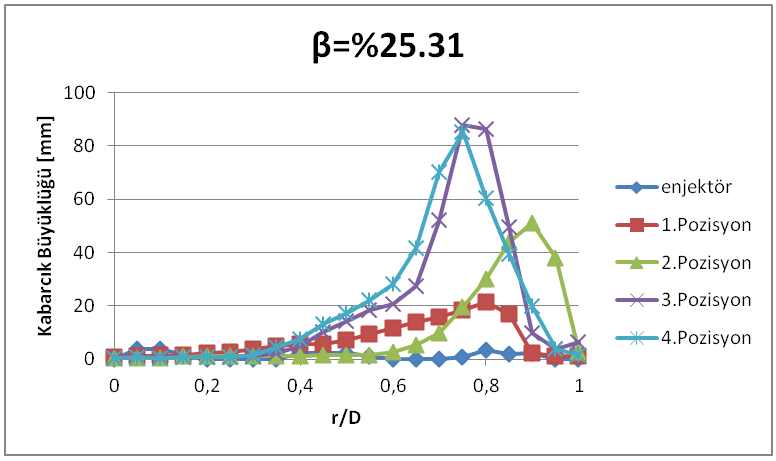
$$d = {}^{6\alpha}/_{A_i} \qquad (4.3)$$

4.3.1 Üst akım bölgesi

Kabarcık büyüklüklerinin dağılımı üst akım bölgesinde %13.87, %21.74 ve % 25.31 kinematik boşluk oranı değerleri için belirlenmiştir. Şekil 4.15'te kabarcık sayıları gösterilmektedir.







Şekil 4.15: Üst akım bölgesinde β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı.

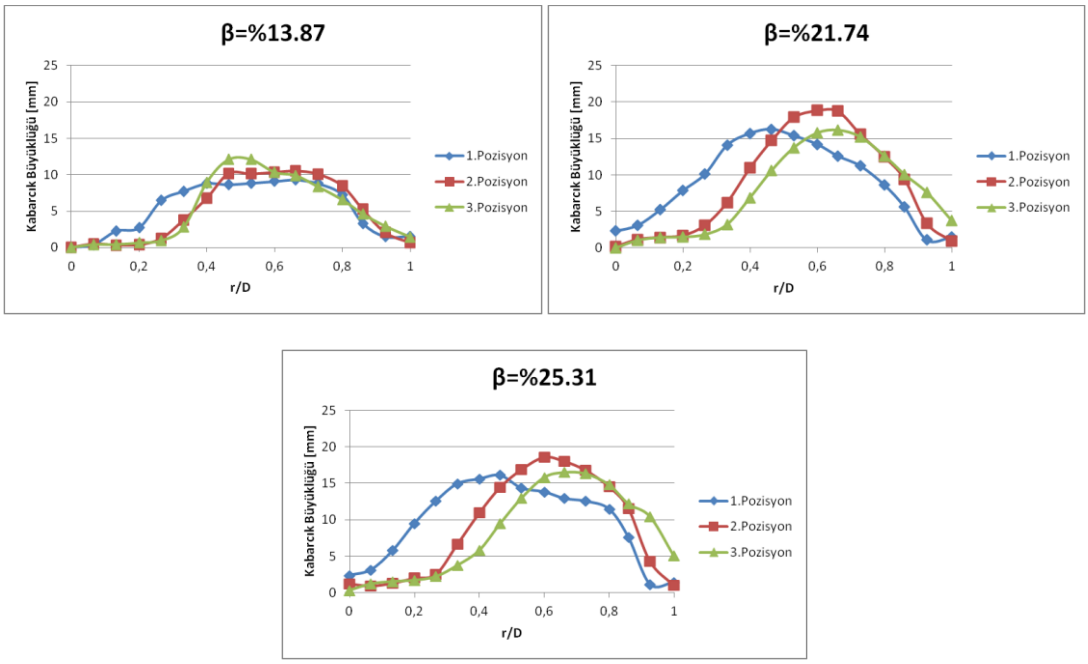
Kinematik boşluk oranı değerinin artış göstermesi, kabarcık büyüklüğü ile orantılıdır. Enjektör çıkışında jet akış özelliği gösterdiğinden dolayı suyun içerisindeki hava kabarcıklarının, parçalandığı görülmüştür. Özellikle son debi değerinde kabarcıkların

3. ve 4. pozisyonlarda genişlediği ve 90 mm değerine yaklaştıkları gözlemlenmiştir. Son pozisyona doğru kabarcıkların birikmesiyle boru üst kısmında gaz kabarcıklarının çapları artmıştır.

4.3.2 Test bölümü ve alt akım bölgesi

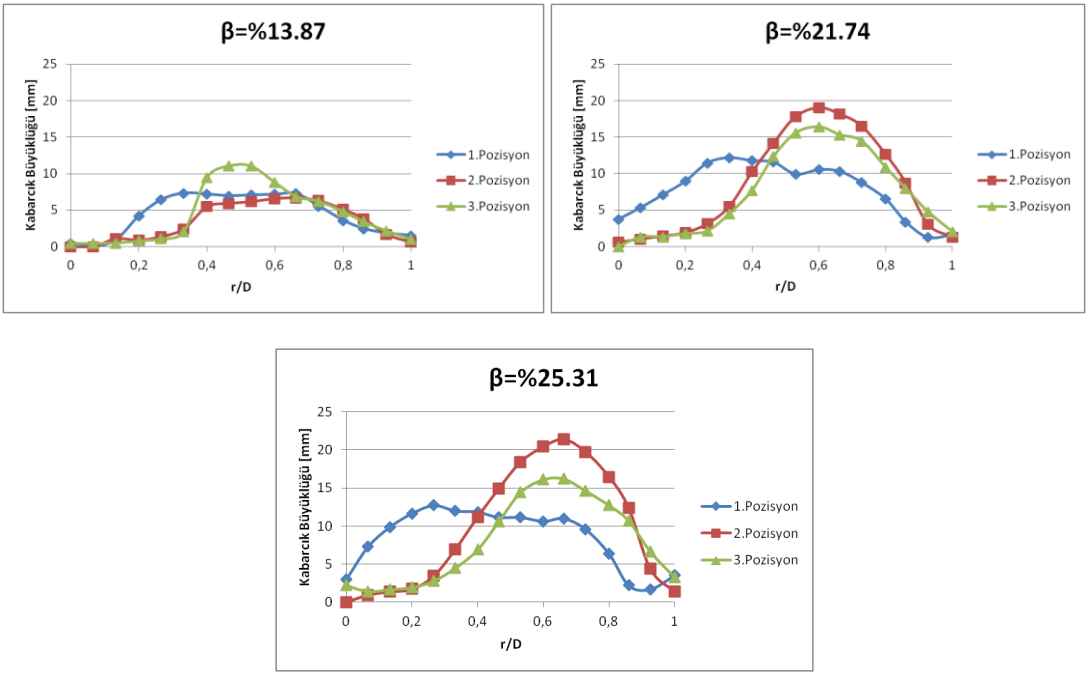
4.3.2.1 Daralma kesiti

Kabarcık büyüklüklerinin boru içerisinde düşey eksendeki dağılımı 4.5°, 9° ve 15° daralma açılarında %13.87, %21.74 ve % 25.31 kinematik boşluk oranı değerleri için belirlenmiştir. Şekil 4.16-18'de kabarcık büyüklüğü gösterilmektedir.

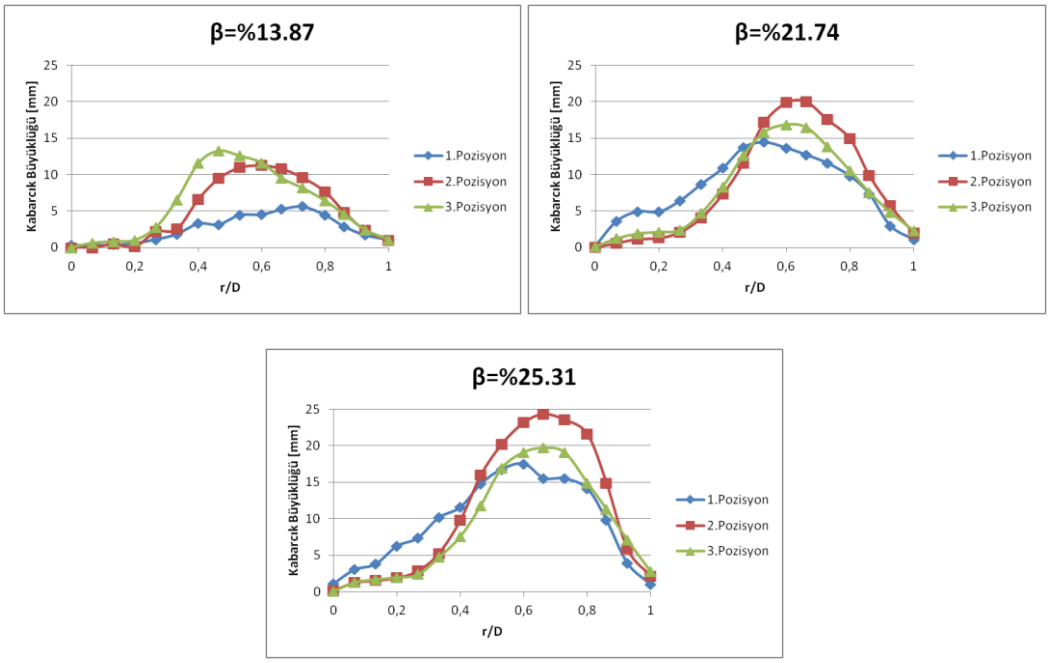


Şekil 4.16: 4.5° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı.

Şekil 4.16 ve 4.17'de ilk pozisyondaki kabarcıkların diğer pozisyonlara göre r/D= 0.4 noktasına kadar eş değer çaplarının daha büyük olduğu görülmüştür. Daralma açısının artması ile birlikte boru orta noktasından üst cidara doğru kabarcık büyüklükleri artış göstermektedir. Şekil 4.18'de daralmanın 15° ile gerçekleşiyor olması ile diğer şekillerdeki sonuçlara nazaran ilk pozisyonda boru orta noktası civarında gelişim gösterdiği tespit edilmiştir. Daralma miktarının artması ile β= %13.87 ve 21.74 değerlerinde önemli bir farklılık olmamakla birlikte β= %25.31 kinematik boşluk oranı değerinde eş değer çap 18 mm'den 25 mm'ye kadar yükseliş göstermektedir.



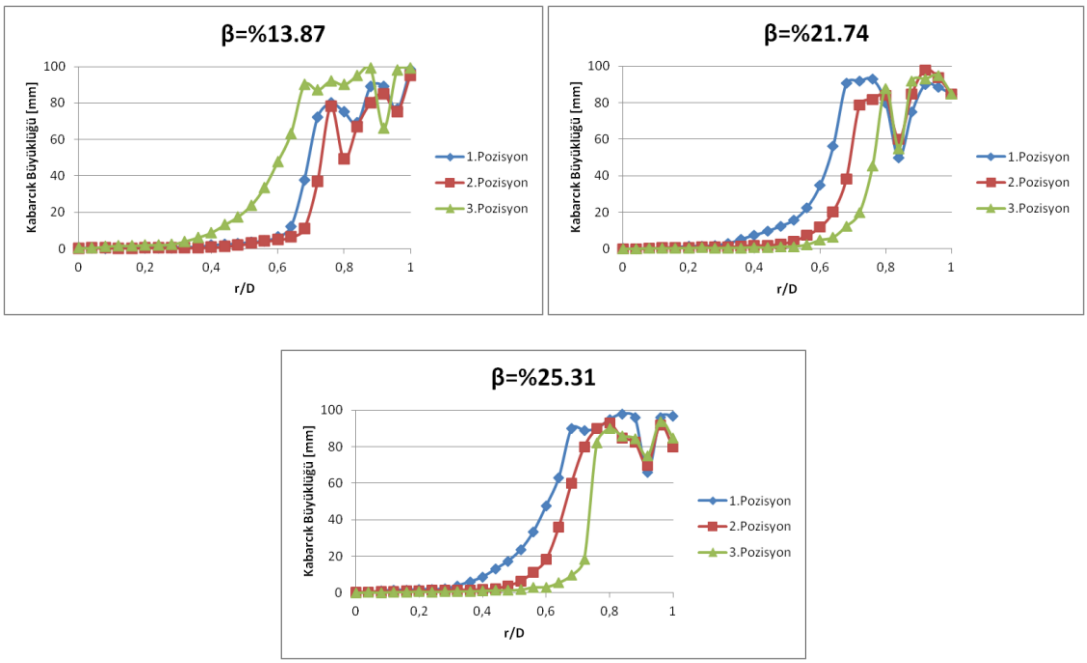
Şekil 4.17: 9° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı.



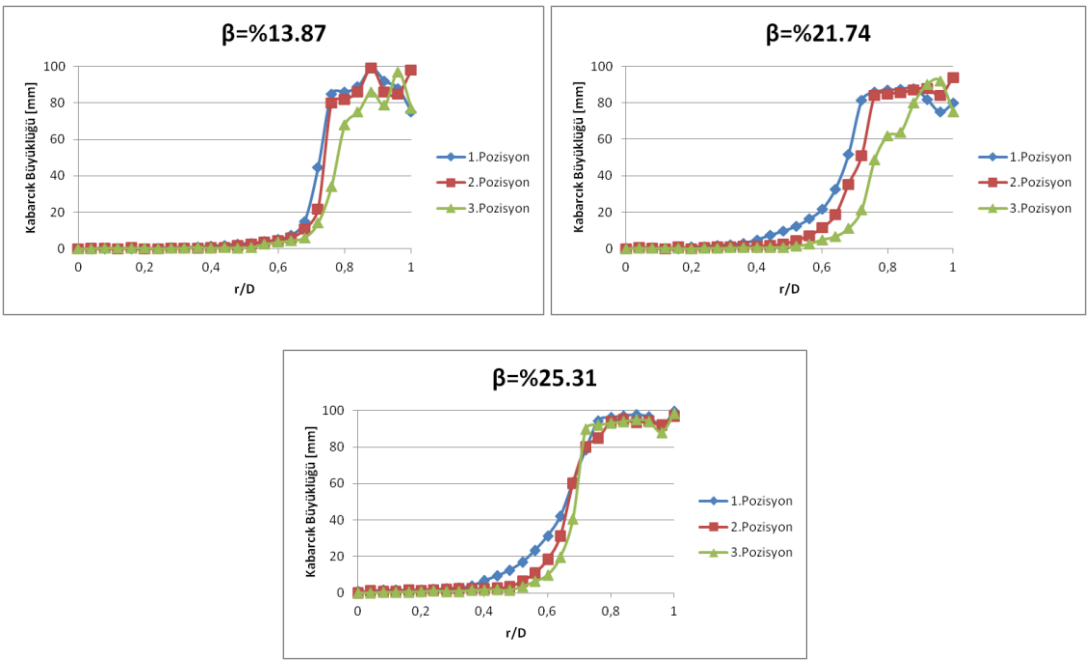
Şekil 4.18: 15° daralma açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı.

4.3.2.2 Genişleme kesiti

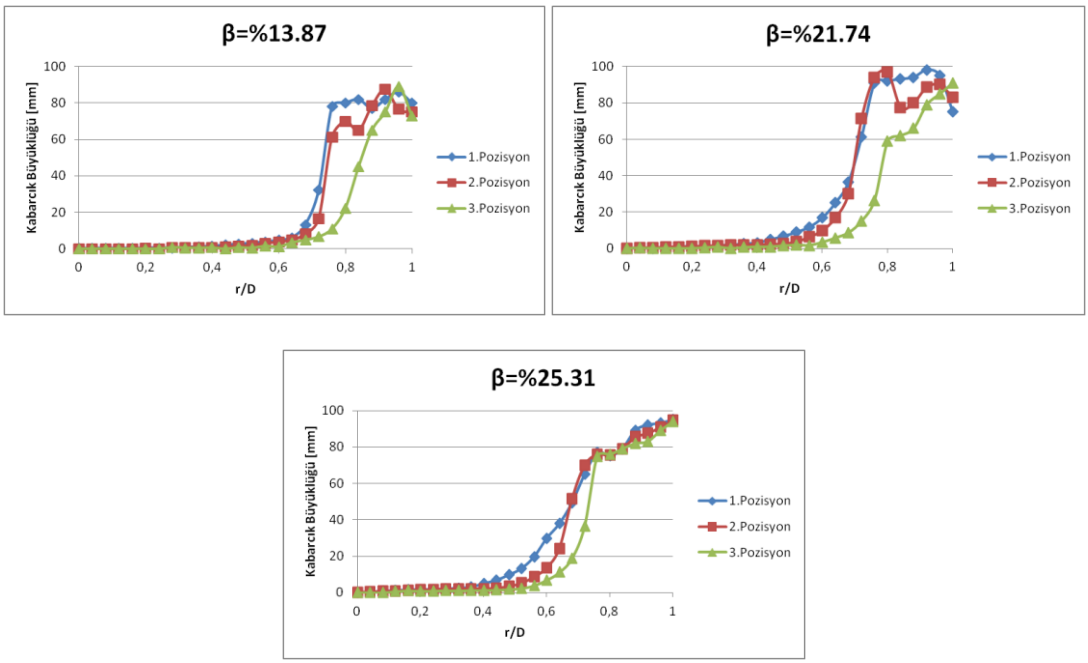
Kabarcık büyüklüklerinin boru içerisinde düşey eksendeki dağılımı 4.5°, 9° ve 15° genişleme açılarında %13.87, %21.74 ve % 25.31 kinematik boşluk oranı değerleri için belirlenmiştir. Şekil 4.19-21'de kabarcık büyüklükleri gösterilmektedir.



Şekil 4.19: 4.5° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı.



Şekil 4.20: 9° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı.



Şekil 4.21: 15° genişleme açısında β= %13.87, 21.74 ve 25.31 değerleri için kabarcık büyüklüğü dağılımı.

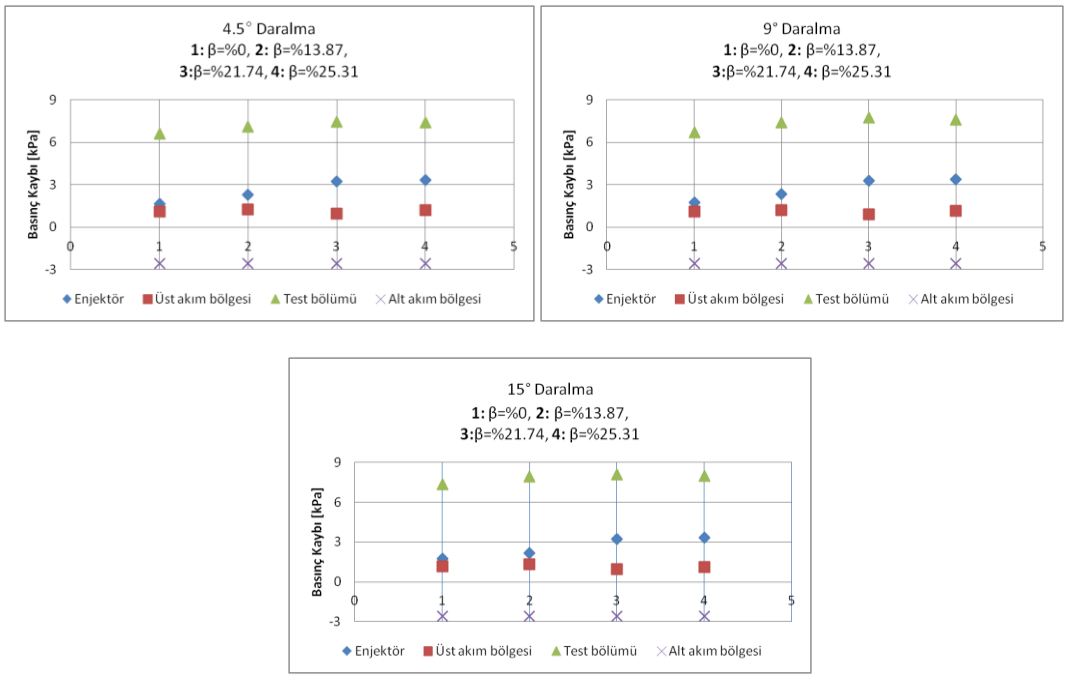
β= %13.87 kinematik boşluk oranı değerinde tüm kesitler için r/D= 0.6 noktasından itibaren kabarcık büyüklükleri büyüme göstermeye başlamıştır. β= %21.74 ve 25.31 değerlerinde ise kabarcıklar yine tüm kesitlerde r/D= 0.4 lokasyonu ile birlikte genişlemeye başlamıştır. Boru orta noktasında kabarcık büyüklükleri 10 ile 20 mm arasındayken orta noktadan itibaren hızlı bir büyüme eğiliminde olduğu görülmüştür. Boru üst cidarına doğru r/D= 0.8'den itibaren kabarcık eşdeğer çap değerleri 80-100 mm arasındadır.

Genişleme ile birlikte gaz kabarcıkları oldukça büyümekte ve her açı durumunda ve kinematik boşluk oranı değeri için boru orta noktasından itibaren hızlı bir şekilde artış gösterdiği izlenmiştir.

4.4 Basınç Ölçümü

Basınç ölçümü altı farklı özellikteki test borularının sisteme entegre edilerek ayrı ayrı dört farklı kinematik boşluk oranı değeri için yapılmıştır. Öncelikle tek fazlı su halinde ölçüm gerçekleştirilmektedir. Sonrasında hava debisi sırasıyla 30, 50 ve 60 l/dk değerlerine ayarlanarak basınç değişimi ölçümleri enjektör, üst akım bölgesi, test bölümü ve alt akım bölgesi için alınmıştır.

Sırasıyla, Şekil 4.22 ve 4.23'te test bölümünün kesitinin daraldığı ve genişlediği borular entegre edilerek sistemdeki basınç değişimi sonuçları verilmiştir.

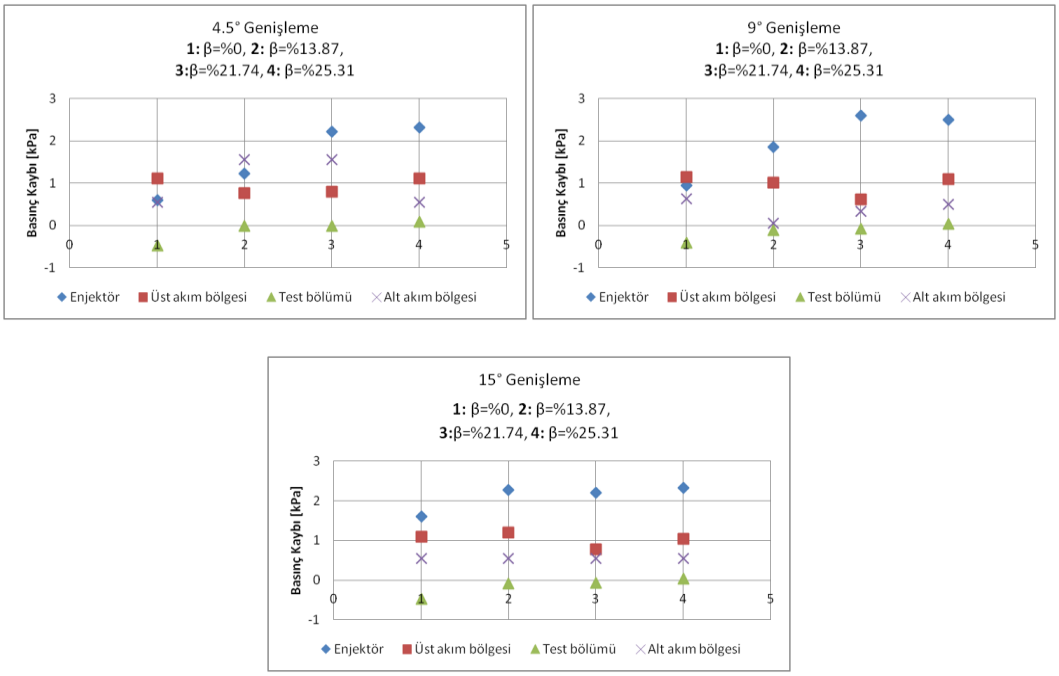


Şekil 4.22: Alt akım bölgesinde daralan kesitteki basınç değişimleri.

Daralma test bölgesini kapsayan deneyler, tek fazlı, β= %0, ve iki fazlı, β= %13.87, 21.74 ve 25.31, durumlar için basınç değişimleri incelenmiştir. 4.5°, 9° ve 15° daralma açılarındaki sonuçlar birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Enjektör öncesi ve sonrasına yerleştirilen fark basınç sensörleri, 2.5 ile 3.2 kPa basınç kaybı belirlemiştir. Üst akım bölgesindeki basınç kaybı değeri ise 1.4 ile 2 kPa arasındadır. Test bölümünde ise 6.1 ile 8.7 kPa basınç kaybı yaşanmıştır. Kesit daraldıkça basınç kaybı artış göstermektedir.

Tek fazlı ve kinematik boşluk oranının β= %13.87 değerinde kesit büyüdükçe enjektör bölgesindeki basınç kaybı artmaktadır. β= % 21.74 ve 25.31 değerlerinde ise önemli bir farklılık tespit edilmemiştir. Üst akım bölgesindeki basınç kaybı verileri 0.7 ile 1.1 kPa arasında elde edilmiştir. Kesit değişiminin olduğu bölgede test bölümünde basınç değişimi yaklaşık olarak 0.5 ile 1 kPa arasındadır.

Basınç ölçümü sonuçlarına göre enjektör ve üst akım bölgesinde tüm test borularında önemli bir fark gözükmemektedir. Farklılaşma, kesit değişimi bölgesi ile başlayıp sonrasında alt akım bölgesi ile devam etmektedir.



Şekil 4.23: Alt akım bölgesinde genişleyen kesitteki basınç kaybı.

Kesit değişimi sonrasındaki alt akım bölgesi basınç kaybı verileri incelendiğinde daralma kesitinde negatif basınç oluşurken, genişlemede pozitif basınç oluşmaktadır. Daralmada - 2.8 ile 3 kPa arasında seyreden değerler, genişleme esnasında, 0, yani basınç kaybının olmadığı durum ile 1.5 kPa değerleri arasındadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan deneyler sonucunda iki fazlı akış parametreleri boşluk oranı, kabarcık sayısı ve kabarcık büyüklüğü dağılımları eksenel boru boyunca elde edilmiştir. Ayrıca sistemin tek fazlı ve iki fazlı akış süresince uğradığı basınç kaybı ölçülmüştür.

Deneyler süresince ölçümler ikili optik prop ile gerçekleştirilerek operasyonel parametrelerin saptanması sağlanmıştır. Tez kapsamında sadece boşluk oranı, kabarcık sayısı ve kabarcık büyüklüğü değişimleri test düzeneği boyunca araştırılmıştır. Deneyler kapsamında sıvı fazı olan su debisi 3 l/s kapasitede sabit tutulurken; gaz fazı olan hava için üç farklı hacimsel debi (30, 50, 60 l/dk) kullanılmış olup ilgili parametrelerin test bölümü öncesinde, sırasında ve sonrasındaki değişiklikler izlenmiştir.

Yerel boşluk oranı değerleri incelendiğinde, üst akım bölgesinde; 1. ve 2. pozisyondaki değerlerin birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Hava debisi değeri yükseldikçe son pozisyondaki değerlerin önce arttığı sonra azaldığı, ancak ilk üç pozisyondaki değerlerin ise sistematik olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Enjektör çıkışında; boru üst kısmında, orta kısmına doğru ve az miktar da boru alt cidarına doğru noktasal olarak boşluk oranı değerleri görülmüştür.

Alt akım bölgesi incelendiğinde yerel boşluk oranı dağılımları hava debisi değeri arttıkça boşluk oranının büyüdüğünü göstermektedir. Daralma test bölümünde kabarcıkların oluşumu boru alt noktalarından itibaren başlamaktadır. Alt akım bölgesinde ilk pozisyon değerleri diğer pozisyonlara göre daha yüksek mertebededir. Düşük hava debisinde pozisyonlar arası boşluk oranlarında fazla fark oluşmamışken debi miktarı yükseldikçe ve özellikle boşluk oranı değerlerinin maksimuma ulaştığı lokasyonlarda tam tersi bir durum vardır. 4.5° ve 9° daralma kesitlerindeki sonuçlar arasında önemli bir farklılık tespit edilmemiştir. 15° daralma kesitinde üç pozisyon için de değerler çok yakın elde edilmiştir. Alt akım bölgesinde yatay eksende boşluk oranı dağılımı ilk pozisyondan sonra gelişmiş bir profil sergilemiştir.

Genişleme kesit bölgesinde, yerel boşluk oranı dağılımları 4.5° ve 9° genişleme kesitleri için benzer şekilde değişim göstermiştir. 30 l/dk hava debisi değerinde boşluk oranının görülmeye başladığı yerden boru üst cidarına kadar kayda değer bir değişim izlenmezken bir anda hızla artış göstererek %90 değerlerine ulaşmıştır. Hava debisi miktarı artış gösterdiğinde, boşluk oranının oluşumu boru alt cidarına doğru yönlenmeye başlamakta ama en yüksek değerlerde boru üst cidarında herhangi bir farklılaşma bulunmamıştır. 15° genişleme kesitindeki boşluk oranı değerleri, 4.5° ve 9° kesitlerindeki değerler arasında yer almıştır.

Yerel boşluk oranı dağılımlarını görsel olarak belirten grafiklerin oluşmasında üst akım bölgesinde düşey eksen koordinatı %100 değerini alırken, 30 l/dk hava debisinde %60 yeterli olmuştur, daralma kesitlerinde %30 ve genişleme kesitlerinde %100 değerleri yer aldı.

Kabarcık sayıları dağılımlarına bakıldığında, üst akım bölgesi için enjektör çıkışında boru alt ve orta bölgesinde 25000-35000, üst noktada ise 15000 civarında kabarcık tespit edilmiştir. 50 l/dk hava debisi değerinde, 1. ve 2. pozisyonların diğer pozisyonlara göre daha fazla kabarcığa sahip olduğu görülmüştür. 60 l/dk hava debisinde ise 1. pozisyon için r/D= 0.45-0.75, 2. pozisyon için r/D= 0.7-1 aralıklarında kabarcık sayıları yüksek miktarda elde edilmiştir. 3. ve 4. pozisyonlarda ise kabarcık sayıları benzer değişimler göstermiştir ancak önceki pozisyonlara göre genel olarak daha az miktarda olduğu tespit edilmiştir. Tüm pozisyonlar için geçerli olan ise boru orta noktasından itibaren kabarcıkların çoğaldığı yönündeki izlenimdir.

Alt akım bölgesinin daralma kesitindeki sonuçlarda kabarcık sayıları boru orta noktasından itibaren gelişim göstermeye başlamıştır. 4.5° daralma kesitinde 1. pozisyon değerleri yüksek iken debi artışı ile tüm pozisyonlar yakın değerler almaya başlamıştır. 9° daralma kesitinde ise 30 l/dk hava debisinde kabarcıklar orta noktadan itibaren oluşurken hava debisi arttığında boru alt noktasına doğru yayılım gerçekleşmiştir. Debi artışı ile kabarcıkların boru alt noktasından itibaren gelişim göstermeye başladığı görülmüştür.

Genişleme test kesitleri sonuçlarına göre; 30 l/dk hava debisi değerinde kabarcık sayıları boru orta noktası etrafında yoğunlaşmıştır. Bütün hava debisi değerleri için pozisyonlar arası önemli bir fark görülmemiştir. Yalnızca 1. pozisyon r/D= 0.48-

0.64, 2. pozisyon r/D= 0.64-0.72, 3. pozisyon r/D= 0.72-0.8 bölgeleri arasında yoğun olarak kabarcıkların mevcut olduğu izlenmiştir.

Kabarcık sayıları dağılımları grafikleri şekillendirilirken skala olarak enjektörde 50000, üst akım bölgesinde 20000, daralma kesitinde 40000 ve genişleme kesitinde 15000 kabarcık sayısı değeri kullanılmıştır.

Kabarcık büyüklükleri dağılımlarında elde edilen sonuçlar, hava debisi miktarı yükseldikçe 1. pozisyon değerleri küçülüyor, 2. pozisyon değerleri artış gösterirken 3. ve 4. pozisyon değerleri daha hızlı bir artış göstermiştir.

Daralma kesitindeki sonuçlar kabarcık çapı değerlerinin boru kesitinin alt bölgesinden oluşmaya başladığı şeklindedir. 1. Pozisyon değerleri en yüksek değerlerdedir. Hava debisinin artışı ile 2. pozisyondaki kabarcık çapları 3. pozisyona göre daha hızlı genişleme göstermiştir.

Genişleme kesitlerindeki sonuçlarda ise kabarcık büyüklükleri r/D= 0.4-0.7 aralığında büyükten küçüğe sırasıyla 1., 2. ve 3. pozisyon olarak belirlenmişken boru üst bölgesinde tüm değerler birbirlerine yaklaşmıştır.

Kabarcık büyüklükleri dağılımları grafikleri şekillendirilirken skala olarak enjektörde 20, üst akım bölgesinde 100, daralma kesitinde 25 ve genişleme kesitinde 100 mm değeri kullanılmıştır.

Basınç kaybı verilerinde enjektörün önüne ve arkasına yerleştirilen fark basınç sensörleri, genişlemede daralmaya göre daha düşük miktarda basınç kaybı değerine ulaşmıştır. Üst akım bölgesinde iki durum için de benzer sonuçlara varılmıştır. Test bölgesi olarak adlandırılan test borusu başlangıcı ve bitişindeki basınç kaybı değeri daralmada 6-9 kPa iken genişlemede 0 kPa değeri civarındadır. Genişlemede neredeyse basınç kaybı olmadığı görülmüştür. Alt akım bölgesinde ise daralma kesitlerinde negatif basınçlar elde edilirken genişlemede pozitif basınç sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca hava debi miktarı arttıkça basınç kaybının yükseldiği görülmüştür ancak 50 ile 60 l/dk debi değerlerinde önemli bir farklılık görülmemiştir.

Boşluk oranı değişimleri ile kabarcık sayısı büyüklüklerinin aynı lokasyonlarda kısmen de olsa doğru oranda değişim gösterdiği izlenmiştir.

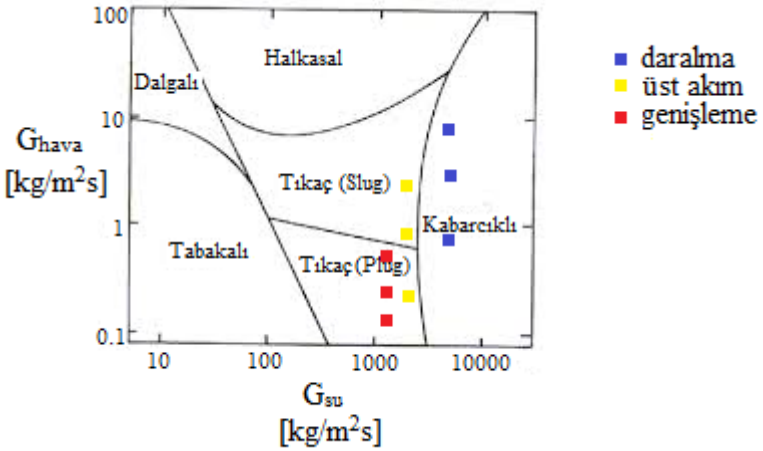
Boşluk oranı değerleri ile kabarcık büyüklüklerinin değişimlerinin benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Kabarcık sayısı ve büyüklükleri eş değer anlamda tutulmamalıdır; çünkü kabarcık büyüklüğü olarak ifade edilen kavram, eş değer çap anlamına gelmektedir. Bazı noktalarda 100 mm'ye kadar yaklaşan kabarcık büyüklükleri, ölçüm cihazının kendi içerisinde gerçekleştirdiği kabullere bağlı olarak tanımlanmaktadır. Büyüyen kabarcıkların, birarada ilerlemesi ile probun yaptığı kabuller çerçevesinde ölçülemeyebilmektedir.

Genel olarak, üst akım bölgesinde kabarcıklar enjektörden çıkış yaptıktan sonra boru üst cidarına doğru toplanma eğilimi göstermektedir. Test edilen kesit değişimi bölgesine kadar gelen akış; daralma esnasında kabarcıklar boru ortasına doğru yaklaşırken, genişleme sırasında kabarcıkların boru üst cidarına doğru toparlanma davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Düşük hava debisi değerlerinde kabarcıklar suyun içerisinde parçalanıyor ve tekrar suyun kaldırma kuvveti çerçevesinde yukarı doğru eğilim gösteriyorlar, ancak gaz debisi yükseldikçe kabarcıkların toplanmasının daha önce gerçekleşmeye başladığı görülmüştür. Bu durum da; hava kabarcıklarının birbirleri ile olan çekim kuvvetlerine bağlı olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.1'de Baker diyagramına göre oluşturulan deneyler süresince izlenen akış rejimleri yer almaktadır.



Şekil 5.1: Deneylerde oluşan akış rejimleri

Genişleme kesitinde sadece tıkaç (plug) akış yer alırken, üst akım bölgesinde hava debisinin artması ile birlikte tıkaç akış plug cinsinden slug cinsine doğru geçiş yapmaktadır. Daralma kesitinde ise tüm hava debileri için kabarcıklı akış izlenmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Hemamalini, R. R., Partheeban, P., Chandrababu, J. S. ve Sundaram, S.** (2005). The effect on pressure drop across horizontal pipe and control valve for air/palm oil two-phase flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ***48***, 2911–2921.

[2] **Fossa, M. ve Guglielmini, G.** (1998). Dynamic void fraction measurements in horizontal ducts with sudden area contraction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, ***41***, 3807–3815.

[3] **Bertani, C., Salve, M.D., Malandrone, M., Monni, G. ve Panella, B.** (2010). State-of-Art and selection of techniques in multiphase flow measurement, *Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie*, **CERSE-POLITO RL 1255/2010**, Report Ricerca di Sistema Elettrico, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

[4] **Attou, A., Giot, M. ve Seynhaeve, J. M.** (1997). Modelling of steady-state two-phase bubbly flow through a sudden enlargement, *International Journal of Heat Mass Transfer*, ***40***, 3375–3385.

[5] **Chen, I. Y., Chu, M. C., Liaw, J. S. ve Wang, C. C.** (2008). Two-phase flow characteristics across sudden contraction in small rectangular channels, *Experimental Thermal and Fluid Science*, ***32***, 1609–1619.

[6] **Xing, L., Geng, Y., Hua, C., Zhu, H., Rieder, A., Drahm, W. ve Bezdek, M.** (Baskıda). A combination method for metering gas–liquid two-phase flows of low liquid loading applying ultrasonic and Coriolis flowmeters, *Flow Measurement and Instrumentation*.

[7] **Steven, R.** (2008). A dimensional analysis of two phase flow through a horizontally installed Venturi flow meter, *Flow Measurement and Instrumentation*, ***19***, 342–349.

[8] **Ghassemi, H. ve Fasih, H. F.** (2011). Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter, *Flow Measurement and Instrumentation*, ***22***, 406–412.

[9] **Huang, Z., Xie, D., Zhang, H. ve Li, H.** (2005). Gas–oil two-phase flow measurement using an electrical capacitance tomography system and a Venturi meter, *Flow Measurement and Instrumentation*, ***16***, 177–182.

[10] **Xu, L., Xu, J., Dong, F. ve Zhang, T.** (2003). On fluctuation of the dynamic differential pressure signal of Venturi meter for wet gas metering, *Flow Measurement and Instrumentation*, ***14***, 211–217.

[11] **Reis, E. D. ve Goldstein, L. J.** (2008). On the measurement of the mass flow rate of horizontal two-phase flows in the proximity of the transition lines which separates two different flow patterns, *Flow Measurement and Instrumentation, **19***, 269–282.

[12] **Sun, B., Wang, E., Ding, Y., Bai, H. ve Huang, Y.** (2011). Time-frequency signal processing for gas-liquid two phase Flow through a horizontal venturi based on adaptive Optimal-Kernel Theory, *Chinese Journal of Chemical Engineering, **19***, 243–252.

[13] **Zheng, G. B., Jin, N. D., Jia, X. H., Lv, P. J. ve Liu, X. B.** (2008). Gas–liquid two phase flow measurement method based on combination instrument of turbine flowmeter and conductance sensor, *International Journal of Multiphase Flow, **34***, 1031–1047.

[14] **Zhang, F., Dong, F. ve Tan, C.** (2010). High GVF and low pressure gas–liquid two-phase flow measurement based on dual-cone flowmeter, *Flow Measurement and Instrumentation, **21***, 410–417.

[15] **Harms, T. D., Li, D., Eckhard, A. G. ve Braun, J. E**. (2003). A void fraction model for annular flow in horizontal tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer, **46***, 4051–4057.

[16] **Cioncolini, A. ve Thome, J. R.** (2011). Algebraic turbulence modeling in adiabatic and evaporating annular two-phase flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow, **32***, 805–817.

[17] **Lima, R. J. D. S., Quiben, J. M., Kuhn, C., Boyman, T. ve Thome J. R.** (2009). Ammonia two-phase flow in a horizontal smooth tube: Flow pattern observations, diabatic and adiabatic frictional pressure drops and assessment of prediction methods, *International Journal of Heat and Mass Transfer, **52***, 2273–2288.

[18] **Magalhaes, G. R., Gonçalves, G. F. N., Loureiro, J. B. R. ve Freire, A. P. S.** (2013). An experimental investigation of the effects of gas solubility on the properties of horizontal slug flow, *International Journal of Multiphase Flow, **50***, 33–40.

[19] **Çomaklı, Ö., Karslı, S. ve Yılmaz, M.** (2002). Experimental investigation of two phase flow instabilities in a horizontal in-tube boiling system, *Energy Conversion and Management, **43***, 249–268.

[20] **Cavallini A., Censi, G., Col, D. D., Doretti, L., Longo, G. A. ve Rosetto, L.** (2001). Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube, *International Journal of Refrigeration, **24***, 73–87.

[21] **Quiben, J. M., Cheng, L., Lima, R. J. D. S. ve Thome J. R.** (2009). Flow boiling in horizontal flattened tubes: Part I – Two-phase frictional pressure drop results and model, *International Journal of Heat and Mass Transfer, **52***, 3634–3644.

[22] **Quiben, J. M. ve Thome J. R.** (2007). Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes. Part I: Diabatic and

adiabatic experimental study, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, ***28***, 1049–1059.

[23] **Grauso, S., Mastrullo, R., Mauro, A. W., Thome, J. R. ve Vanoli, G. P.** (2013). Flow pattern map, heat transfer and pressure drops during evaporation of R-1234ze(E) and R134a in a horizontal, circular smooth tube: Experiments and assessment of predictive methods, *International Journal of Refrigeration*, ***36***, 478–491.

[24] **Quiben, J. M. ve Thome J. R.** (2007). Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes, Part II: New phenomenological model, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, ***28***, 1060–1072.

[25] **Padilla, M., Revellin, R., Haberschill, P., Bensafi, A. ve Bonjour, J.** (2011). Flow regimes and two-phase pressure gradient in horizontal straight tubes: Experimental results for HFO-1234yf, R-134a and R-410A, *Experimental Thermal and Fluid Science*, ***35***, 1113–1126.

[26] **Idsinga, W.** (1975). *An assesment of two-phase pressure drop correlations for steam-water systems*, (yüksek lisans tezi), MIT.

[27] **Huang, X. ve Sciver, S. W. V.** (1995). Pressure drop and void fraction of two-phase helium flowing in horizontal tubes, *Cryogenics*, ***35***, 467–474.

[28] **Grauso, S., Mastrullo, R., Mauro, A. W. ve Vanoli, G. P.** (2014). Two-phase adiabatic frictional pressure gradients for R410A and CO_2 in a macro channel: Experiments and a simplified predictive method for annular flow from low to medium reduced pressures, *Experimental Thermal and Fluid Science*, ***52***, 79–87.

[29] **Padilla, M., Revellin, R. ve Bonjour, J.** (2013). Two-phase flow of HFO-1234yf, R-134a and R-410A in sudden contractions: Visualization, pressure drop measurements and new prediction method, *Experimental Thermal and Fluid Science*, ***35***, 186–205.

[30] **Bhagwat, S. M. ve Ghajar, A. J.** (2014). A flow pattern independent drift flux model based void fraction correlation for a wide range of gas–liquid two phase flow, *International Journal of Multiphase Flow*, ***59***, 186–205.

[31] **Sur, A. ve Liu, D.** (2012). Adiabatic airewater two-phase flow in circular microchannels, *International Journal of Thermal Scinces*, ***53***, 18–34.

[32] **Tribbe, C. ve Müller-Steinhagen H. M.** (2000). An evaluation of the performance of phenomenological models for predicting pressure gradient during gas–liquid flow in horizontal pipelines, *International Journal of Multiphase Flow*, ***26***, 1019–1036.

[33] **Pacurar, C. B., Guigui, C., Line, A. ve Tazi-Pain, A.** (2011). Behaviour of a large bubble flowing through a sudden constriction between a cylindrical pipe and a rectangular cross section channel, *Chemical Engineering Research and Design*, ***89***, 921–929.

[34] **Aloui, F., Doubliez, L., Legrand, J. ve Souhar, M.** (1999). Bubbly flow in an axisymmetric sudden expansion: Pressure drop, void fraction, wall

shear stress, bubble velocities and sizes, *Experimental Thermal and Fluid Science, **19***, 118–130.

[35] **Ottens, M. Hoefsloot, H. C. J. ve Hamersma, P. J.** (2001). Correlations predicting liquid hold-up and pressure gradient in steady-state (nearly) horizontal co-current gas-liquid pipe flow, *Chemical Engineering Research and Design, **79***, 581–592.

[36] **Ahmed, W. H., Ching, C. Y. ve Shoukri, M.** (2008). Development of two-phase flow downstream of a horizontal sudden expansion, *International Journal of Heat and Fluid Flow, **29***, 194–206.

[37] **Aloui, F. ve Souhar, M.** (1996). Experimental study of a two-phase bubbly flow in a flat duct symmetric sudden expansion–Part II: Liquid and bubble velocities, bubble sizes, *International Journal of Multiphase Flow, **22***, 849–861.

[38] **Garcia, F., Garcia, J. M., Garcia, R. ve Joseph, D. D.** (2007). Friction factor improved correlations for laminar and turbulent gas–liquid flow in horizontal pipelines, *International Journal of Multiphase Flow, **33***, 1320–1336.

[39] **Ekberg, N. P., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., Yoda, M. ve Jeter, S. M.** (1999). Gas–liquid two-phase flow in narrow horizontal annuli, *Nuclear Engineering and Design, **192***, 59–80.

[40] **Ding, H., Huang, Z., Song, Z. ve Yan, Y.** (2007). Hilbert–Huang transform based signal analysis for the characterization of gas–liquid two-phase flow, *Flow Measurement and Instrumentation, **18***, 37–46.

[41] **Lee, H., Al-Sarkhi, A., Pereyra, E., Sarica, C., Park, C., Kang, J. ve Choi, J.** (2013). Hydrodynamics model for gas–liquid stratified flow in horizontal pipes using minimum dissipated energy concept, *Journal of Petroleum Science and Engineering, **108***, 336–341.

[42] **Liu, X., Chen, Y. ve Shi, M.** (2012). Influence of gravity on gas–liquid two-phase flow in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow, **41***, 23–35.

[43] **Kadri, U., Mudde, R. F. ve Oliemans, R. V. A.** (2010). Influence of the operation pressure on slug length in near horizontal gas–liquid pipe flow, *International Journal of Multiphase Flow, **36***, 423–431.

[44] **Tzotzi, C. ve Andritsos, N.** (2013). Interfacial shear stress in wavy stratified gas–liquid flow in horizontal pipes, *International Journal of Multiphase Flow, **54***, 43–54.

[45] **Sampaio, P. A. B. D., Faccini, J. L. H. ve Su, J.** (2008). Modelling of stratified gas–liquid two-phase flow in horizontal circular pipes, *International Journal of Heat and Mass Transfer, **51***, 2752–2761.

[46] **Ribeiro, A. M., Ferreira, V. ve Campos, J. B. L. M.** (2006). On the comparison of new pressure drop and hold-up data for horizontal air–water flow in a square cross-section channel against existing correlations and models, *International Journal of Multiphase Flow, **32***, 1029–1036.

[47] **Cook, M. ve Behnia, M.** (2000). Pressure drop calculation and modelling of inclined intermittent gas-liquid flow, *Chemical Engineering Science, **55***, 4699–4708.

[48] **Fang, L. D., Liu, R., Lu, Q. H., Wang, X. J. ve Liang, Y. J.** (2012). The flow pattern transition identification and interphases force detection of gas-liquid two-phase flow, *AASRI Procedia, **3***, 534–539.

[49] **Sanchis, A., Johnson, G. W. ve Jensen, A.** (2011). The formation of hydrodynamic slugs by the interaction of waves in gas–liquid two-phase pipe flow, *International Journal of Multiphase Flow, **37***, 358–368.

[50] **Ahmed, W. H., Ching, C. Y. ve Shoukri, M.** (2007). Pressure recovery of two-phase flow across sudden expansions, *International Journal of Multiphase Flow, **33***, 575–594.

[51] **Spedding, P. L., Benard, E. ve Donnelly, G. F.** (2006). Prediction of pressure drop in multiphase horizontal pipe flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer, **33***, 1053–1062.

[52] **Poesio, P., Strazza, D. ve Sotgia, G.** (2009). Very-viscous-oil/water/airflow through horizontal pipes: Pressure drop measurement and prediction, *Chemical Engineering Science, **64***, 1136–1142.

[53] **Zhai, L. S., Jin, N. D., Gao, Z. K., Zhao, A. ve Zhu, L.** (2014). Cross-correlation velocity measurement of horizontal oil–water two-phase flow by using parallel–wire capacitance probe, *Experimental Thermal and Fluid Science, **53***, 277–289.

[54] **Yusuf, N., Al-Wahaibi, Y., Al-Wahaibi, T., Al-Ajmi, A., Olawale, A. S. ve Mohammed, I. A.** (2012). Effect of oil viscosity on the flow structure and pressure gradient in horizontal oil–water flow, *Chemical Engineering Research and Design, **90***, 1019–1030.

[55] **Tan, C., Wu, H. ve Dong, F.** (2013). Horizontal oil–watertwo-phase flow measurement with information fusion of conductance ring sensor and cone meter, *Flow Measurement and Instrumentation, **34***, 83–90.

[56] **An, Z., Ningde, J., Lusheng, Z. ve Zhongke, G.** (2014). Liquid holdup measurement in horizontal oil–water two-phase flow by using concave capacitance sensor, *Measurement, **49***, 153–163.

[57] **Balakhrisna, T., Ghosh, S., Das, G. ve Das, P. K.** (2010). Oil–water flows through sudden contraction and expansion in a horizontal pipe – Phase distribution and pressure drop, *International Journal of Multiphase Flow, **36***, 13–24.

[58] **Al-Wahaibi, T.** (2012). Pressure gradient correlation for oil–water separated flow in horizontal pipes, *Experimental Thermal and Fluid Science, **53***, 196–203.

[59] **Zhang, X., Liu, L., Cheng, L., Guo, Q. ve Zhang, N.** (2013). Experimental study on heat transfer and pressure drop characteristics of air–water two-phase flow with the effect of polyacrylamide additive in a horizontal circular tube, *International Journal of Heat and Mass Transfer, **58***, 427–440.

[60] **Orell, A.** (2005). Experimental validation of a simple model for gas–liquid slug flow in horizontal pipes, *Chemical Engineering Science*, ***60***, 1371–1380.

[61] **Narrow, T. L., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I. ve Sadowski, D. L.** (2000). Gas–liquid two-phase flow patterns and pressure drop in a horizontal micro-rod bundle, *International Journal of Multiphase Flow*, ***26***, 1281–1294.

[62] **Ma, Y., Ji, X., Wang, D., Fu, T. ve Zhu, C.** (2010). Measurement and correlation of pressure drop for gas-liquid two-phase flow in rectangular microchannels, *Fluid Flow and Transport Phenomena*, ***18***, 940–947.

[63] **Awwad, A., Xin, R. C., Dong, Z. F., Ebadian, M. A. ve Soliman, H. M.** (1995). Measurement and correlation of the pressure drop in air-water two-phase flow in horizontal helicoidal pipes, *International Journal of Multiphase Flow*, ***21***, 607–619.

[64] **Lee, H. J. ve Lee, S. Y.** (2001). Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights, *International Journal of Multiphase Flow*, ***27***, 783–796.

[65] **Badie, S., Hale, C. P., Lawrance, C. J. ve Hewitt, G. F.** (2000). Pressure gradient and holdup in horizontal two-phase gas–liquid flows with low liquid loading, *International Journal of Multiphase Flow*, ***26***, 1525–1543.

[66] **Yan, C., Yan, C., Sun, L., Wang, Y. ve Zhang, X.** (2014). Slug behavior and pressure drop of adiabatic slug flow in a narrow rectangular duct under inclined conditions, *Annals of Nuclear Energy*, ***64***, 21–31.

[67] **Ujang, P. M., Lawrance, C. J., Hale, C. P. ve Hewitt, G. F.** (2006). Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow, *International Journal of Multiphase Flow*, ***32***, 527–552.

[68] **Carneiro, J. N. E., Fonseca, R. J., Ortega, A. J., Chucuya, R. C., Nieckele, A. O. ve Azevedo, L. F. A.** (2011). Statistical characterization of two-phase slug flow in a horizontal pipe, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, ***33***, 251–258.

[69] **Bertola, V.** (2004). The structure of gas–liquid flow in a horizontal pipe with abrupt area contraction, *Experimental Thermal and Fluid Science*, ***28***, 505–512.

[70] **Reyes, J. N. J., Lafi, A. Y. ve Saloner, D.** (1998). The use of MRI to quantify multi-phase flow patterns and transitions: an application to horizontal slug flow, *Nuclear Engineering and Design*, ***184***, 213–228

[71] **Dillon, C. M., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., Jeter, S. M. ve Sadowski, D. L.** (2005). Two-phase pressure drop in a horizontal thin annulus: Effects of channel vibration and wall gas injection, *Experimental Thermal and Fluid Science*, ***30***, 67–78.

[72] **Fossa, M. ve Guglielmini, G.** (2002). Pressure drop and void fraction profiles during horizontal flow through thin and thick orifices, *Experimental Thermal and Fluid Science*, ***26***, 513–523.

[73] **Alimonti, C., Falcone, G. ve Bello, O.** (2010). Two-phase flow characteristics in multiple orifice valves, *Experimental Thermal and Fluid Science, **34***, 1324–1333.

[74] **Schmidt, J. ve Friedel, L.** (1997). Two-phase pressure drop across sudden contractions in duct areas, *International Journal of Multiphase Flow, **23***, 283–299.

[75] **Pietrzak, M. ve Witczak, S.** (2013). Flow patterns and void fractions of phases during gas–liquid two-phase and gas–liquid–liquid three-phase flow in U-bends, *International Journal of Heat and Fluid Flow, **44***, 805–817.

[76] **Oliveira, P. M. D. ve Barbosa, J. R. J.** (2014). Pressure drop and gas holdup in air–water flow in 180° return bends, *International Journal of Multiphase Flow, **61***, 83–93.

[77] **Baker, O.** (1954). Simultaneous flow of oil and gas, *Oil and Gas Journal, **53***, 185–195.

[78] **Bell, K. J., Taborek, J. ve Fenoglio, F.** (1969). Interpretation of horizontal in-tube condensation heat transfer correlations using a two-phase flow regime map, *Chemical Engineering Programme Symposium, **66***, 150–163.

[79] **Kourakos, V., Deniz, E. Rambaud, P., Chabane, S. ve Buchlin, J.M.** (2010). Investigation of the void fraction, bubble size and velocities in divergence geometry, *7th International Conference on Multiphase Flow*, Tampa, Florida, USA, 30 Mayıs - 4 Haziran.

[80] **Deniz, E.** (2009). *Experimental study of bubbly flow in singular geometries*, Belgium, Project Report 2009-09 June 2009, von Karman Institute for Fluid Dynamics Belgium.

[81] **François, F., Garnier, J. ve Cubizolles, G.** (2003). A new data acquisition system for binary random signal application in multiphase flow measurements, *Measurement Science and Technology, **14***, 929–942.

[82] **ISO Software** Two-Phase Flow Study, 2.03 version User's guide, RBI Instrumentation et mesure.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ahmet Berk KURTULUŞ

Doğum Yeri ve Tarihi: BAKIRKÖY/İSTANBUL - 15.12.1988

Adres: Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Akışkanlar Mekaniği Laboratuvarı

E-Posta: berk.kurtulus@marmara.edu.tr

Lisans: Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü - 2010

Mesleki Deneyim ve Ödüller: 2224 Yurt Dışı Bilimsel Etkinliklere Katılma Desteği

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Kurtuluş, A. B., Eskin, N. & Deniz, E. (2013). Experimental Study of Two-Phase Flow in a Horizontal Circular Channel: Influence of Gas Injection on The Bubble Diameters, *Experimental Fluid Mechanics 2013*. Kutná Hora, Czech Republic.

- Kurtuluş, A. B., Eskin, N. & Deniz, E. (2013). Investigation of Gas Injector Effect on Two-Phase Flow, Tenth *International Conference on Flow Dynamics*. Sendai, Japan.

- Kurtuluş, A. B., Eskin, N. & Deniz, E. (2014). Experimental Study of Two-Phase Flow in a Horizontal Circular Channel: Influence of Gas Injection on The Bubble Diameters, *European Physical Journal Web of Conferences*. Sayı 67.