



**İKİ FAZLI AKIŞLARDA TÜRBÜLATÖRLERİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Yeşim SOLAK

**Yüksek Lisans Tezi
MakineMühendisliği Anabilim Dalı
Termodinamik Bilim Dalı
Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI
2019
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İKİ FAZLI AKIŞLARDA TÜRBÜLATÖRLERİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

Yeşim SOLAK

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Termodinamik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

İKİ FAZLI AKIŞLARDA TÜRBÜLATÖRLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI danışmanlığında, Yeşim SOLAK tarafından hazırlanan bu çalışma 19/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Termodinamik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak (3./3.)oybirliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

İmza:

Üye: Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Faraz AFSHARİ

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun ..11../07../2019.....tarih ve .28../90..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İKİ FAZLI AKIŞLARDA TÜRBÜLATÖRLERİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Yeşim SOLAK

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

Danışman: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

İki fazlı akışın tercih sebebi ısı transfer katsayısının tek fazlı akışlara göre daha yüksek olmasıdır. Nükleer reaktörler, uzay teknolojileri rafineriler, buhar üreticileri ve buna benzer birçok uygulamada iki-fazlı akış kullanılmaktadır. Bu çalışma iki-fazlı akış sistemlerindeki olumsuz etkilerin giderilmesine yönelik daha önce çalışılmış olan konik sarımlı yaylara ilaveten aynı türbülator üzerine çaprazalan ve artan yönde konik sarımlı yayın bir boru elemanı olarak etkilerinin deneysel olarak incelenmesi ve daha önce yapılmış olan çalışmalarla kıyaslanmasını amaçlamaktadır.

Bu deneysel çalışmada test kısmı; iç çapı 17,6mm, dış çapı 25mm olan düzyatay bir boru içerisinde zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı iki fazlı akış sisteminden oluşmuştur. Bu sistemde boru içi ısı transferi iyileştirme elemanı olarak konik sarımlı yay dizilerinden oluşan elemanın akış kararsızlıklarına etkileri incelenmiş ve daha önce yapılmış olan çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Akışkan giriş debisi parametre olarak seçilerek sabit çalışma basıncı, sabit giriş sıcaklığı, sabit ısıl güç ve çıkış kısıtlayıcısı şartlarında konik yayların yaptıkları etkiler ve bu etkilerin daha önce yapılan çalışmalar ile arasındaki farklar araştırılmıştır. Deneyler esnasında bir adet ısı transfer yüzey konfigürasyonu kullanılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda belirli kütleli debide ısıl güç arttıkça basınç düşümünün de arttığı gözlenmiştir. Kullanılan iki farklı boruda basınç düşümünün yüksek olduğu borunun Boru-2 (yay adımı: 10mm olan artan azalan yönde sarımlı konik yay dizisi) olduğu görülmüştür. Daha önce kullanılan ısı transfer iç yüzey elemanları ile yapılan deney sonuçları ile kıyaslandığında da Boru-2 'deki basınç düşümünün fazla olduğu görülmüştür.

2019, 110 sayfa

Anahtar Kelimeler: İki fazlı akış, kararsızlık, osilasyon, ısı transferi iyileştirmesi, su, konik yay

ABSTRACT

MS Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE TURBULATORS IN TWO-PHASE FLOWS

Yeşim SOLAK

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Science of Thermodynamics

Supervisor: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

The preference of two-phase flow is that the heat transfer coefficient is higher than single-phase flows. Two-phase flow is used in nuclear reactors, space technology refineries, steam generators and many other applications. This study aims to experimentally examine the effects of conical winding springs on the same turbulent as a pipe element in addition to the previously studied conical winding springs in order to eliminate the adverse effects in the two-phase flow systems and to compare them with previous studies..

In this experimental study, the test part consisted of forced convection boiling two-phase flow system with an inside diameter of 17.6 mm and an outer diameter of 25 mm. In this system, the effects of the cone-wound spring arrays on the flow instabilities are investigated and compared with the previous studies. Fluid inlet flow rate was selected as a parameter, fixed working pressure, constant input temperature, constant thermal power and output restrictor in the conditions of the effects of conical springs and the effects of these effects were investigated previously. One heat transfer surface configuration was used during the experiments.

As a result of the experiments, it was observed that the pressure drop increased with the increase of the thermal power at the certain mass flow. In the two different pipes used, the pipe with a high drop in the pressure was the Pipe-2 (spring step: 10 mm with the decreasing decreasing conical spring array). Previously used heat transfer When compared with the test results with surface elements, it was seen that the pressure drop in Pipe-2 was high.

2019, 110 pages

Keywords: Two phase flow, unstabilities, oscilation, heat transfer enhancements, conical springs, water

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım esnasında her zaman ilgisini ve desteğini gördüğüm, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım esnasında desteğini eksik etmeyen Sayın Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ'e, Sayın Öğretim Görevlisi Muhammet Kaan YEŞİLYURT'a Sayın Araştırma Görevlisi Orhan YILDIRIM'a, katkılarından dolayı Tekniker Ahmet CEBE ve Tekniker Abit CÖMERT'eteşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında her zaman yanımda olan ve beni sürekli destekleyen anneme ve kız kardeşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam süresince desteklerini esirgemeyen değerli işverenlerim Hayri YILMAZ ve Fatih YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Yeşim SOLAK

Mayıs, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İki Fazlı Akışlarla İlgili Araştırmalar	3
1.2. Tezin Amaç ve Kapsamı	26
2. KURAMSAL TEMELLER.....	30
2.1. İki Fazlı Akışlar	30
2.2. Kaynamalı Kanalda Basınç Düşümü-Debi Karakteristikleri	34
2.3. İki Fazlı Akışlarda Görülen Kararsızlıklar ve Tipleri	37
2.3.1. Statik kararsızlıklar.....	39
2.3.1.a. Akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı)	40
2.3.1.b. Kaynama krizi	41
2.3.1.c. Akış rejimi relaxation kararsızlıkları	43
2.3.1.d. Geysering.....	44
2.3.1.e. Bumping	44
2.3.1.f. Chugging.....	45
2.3.2. Dinamik kararsızlıklar	46
2.3.2.a. Yoğunluk değişim osilasyonları	46
2.3.2.b. Basınç düşümü osilasyonları	50
2.3.2.c. Termal osilasyonlar	53
2.3.2.d. Akustik osilasyonlar	57
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	58
3.1. Deney Düzenegi	58
3.1.1. Akışkan besleme bölümü	58
3.1.2. Test bölümü	60

3.1.3. Akışkan depolama bölümü.....	63
3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi.....	65
3.2.1. Sıcaklık ölçümleri.....	65
3.2.2. Basınç ölçümleri.....	66
3.2.3. Debi ölçümleri.....	67
3.2.4. Isı gücü ölçümleri.....	68
3.2.5. Osilasyon periyotlarının tespiti	68
3.3. Deneysel Yöntem	69
3.3.1. Kararlı durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri	71
3.3.2. Kararsız durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri	72
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	74
4.1. Kararlı Durum Karakteristikleri	74
4.2. Osilasyon Sınırları.....	90
4.3. Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar.....	92
4.4. İki Test Borusu için Kararlılık ve Osilasyonların Karşılaştırılması	99
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	102
5.1. Sonuçlar.....	102
5.2. Öneriler.....	103
KAYNAKLAR	105
ÖZGEÇMİŞ	111

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

$\dot{m}$	Kütlesel Debi [kg/s]
$\dot{Q}$	Isı Akısı [kW/m ²]
$\dot{V}$	Hacimsel Debi [m ³ /s]
V'	Boru Net İç Hacmi [m ³]
$\bar{x}$	Ortalama Data Değeri
$\acute{x}$	Ölçüm Elemanlarından Alınan Gerçek Okuma Değeri
A	Boru Kesit Alanı [m ²]
A_t	Boru Toplam Yüzey Alanı [m ²]
d	Boru Çapı [m]
D	Yay Tel Çapı [m]
D_0	Orifis Çapı [m]
F	Sürtünme Katsayısı
G	Yer Çekim İvmesi [m/s ²]
G	Kütlesel Akı [kg/ m ² s]
h	Isı Taşınım Katsayısı [W/m ² K]
H_g	Gaz Fazı Entalpisi [J/kg]
H_l	Sıvı Faz Entalpisi [J/kg]
H_{lg}	Buharlaştırma Gizli Isısı [J/kg]
H_y	Yay Adımı [m]
L	Test Borusu Uzunluğu [m]
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç [bar]
P_0	Orifis Çıkış Basıncı [bar]
P_a	Ana Besleme Tank Basıncı [bar]
P_y	Yer Çekim Kuvvetinin Etkili Olduğu Basınç Düşümü [bar]
Q	Isıl Güç [kW]
R	Yarıçap [m]
Re	Reynolds Sayısı

t	Zaman [s]
T	Sıcaklık [$^{\circ}\text{C}$]
T_f	Akışkan Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
T_s	Cidar Sıcaklık Farkı [$^{\circ}\text{C}$]
U	Hız [m/s]
V	Hacim [m^3]
Z	İki Termokupul Arasında ki Uzaklık [m]
Z	Eşdeğer Uzunluk [m]
A	Boşluk Oranı (Void Fraction)
B	Kısıtlayıcı Parametresi
ΔP	Basınç Düşümü [bar]
ΔP_0	Orifiste Ki Basınç Düşümü [bar]
ΔP_A	İvmeli Harekette ki Basınç Düşümü [bar]
ΔP_{kon}	Konvektif İvmeli Akış Durumunda ki Basınç Düşümü [bar]
ΔT	Sıcaklık Farkı [$^{\circ}\text{C}$]
$\delta_x(\%)$	Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
ΔZ	Her Bir Hesap Adımında ki Uzaklık [m]
μ	Dinamik Viskozite [kg/ms]
ν	Kinematik Viskozite [m^2/s]
ρ	Yoğunluk [kg/m^3]
Σ	Sıvı-Buhar Ara Yüzeyindeki Gerilim [N/m^2]
σ_a	Hassasiyetle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_{all}	Toplam Hata Oranı İle İlgili Terim
σ_c	Kalibrasyonla İlgili Belirsizlik Terimi
σ_{itp}	Belirsizlikle İlgili Terim
σ_l	Lineerlikle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_{par}	Paralaks Açısı İle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_s	Sık Sık Yapılan Ölçümlerle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_s	Ortalama Değerle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_{sys}	Sistematik Hata Analizi İle İlgili Terim
σ_T	Tekrarlanma İle İlgili Belirsizlik Terimi

$\sigma_x(\%)$	Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
t	Geçiş Zamanı [s]

İndisler

C	Kritik
Ç	Çıkış
D	Doymuş
E	Efektif
F	Sürtünme
G	Giriş
G	Gaz
L	Sıvı Fazı
O	Orifis
S	Cidar
S	Dengeleyici Tank
Sis	Sistem

Kısaltmalar

AO	Akustik Osilasyon
BDO	Basınç Düşümü Osilasyonu
TO	Termal Osilasyon
YDO	Yoğunluk Değişim Tip Osilasyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. İçerisinde iki fazlı akış ihtiva eden sistemlerin genel sınıflandırılması.....	30
Şekil 2.2. İki fazlı akışların genel sınıflandırılması	31
Şekil 2.3. Yatay borulardaki akış rejimleri	33
Şekil 2.4. Karakteristik durum eğrisi	36
Şekil 2.5. Karakteristik durum eğrisi	36
Şekil 2.6. Ledinegg kararsızlığının şematik olarak gösterimi.....	41
Şekil 2.7. Yatay bir ısı değiştirici borusunda oluşan “burn-out” olayı	42
Şekil 2.8. “Burn-out” oluşmasında etkin parametreler	43
Şekil 2.9. Yoğunluk değişim osilasyonlarının şematik olarak gösterilişi.....	49
Şekil 2.10. Basınç düşümü tipi osilasyonların şematik olarak gösterilişi.....	51
Şekil 2.11. Termal osilasyonların mekanizması	55
Şekil 2.12. Geçiş kaynama modeli.....	56
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü	59
Şekil 3.2. Ana besleme tankı.....	60
Şekil 3.3. Dengeleyici tank	61
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin dengeleyici tank ile test borusu arasındaki kısmı	62
Şekil 3.5. Test borusu ve bağlantı flanşları.....	62
Şekil 3.6. Termoeleman bağlantı şekilleri	62
Şekil 3.7. Test borusu izolasyon tabakası ve termočift uçlarının şematik gösterimi	63
Şekil 3.8. Test borusu elektriksel bağlantısı	63
Şekil 3.9. Çıkış kısıtlayıcısının şematik gösterimi.....	64
Şekil 3.10. Yoğuşturucu.....	65
Şekil 3.11. Test borusu cidar sıcaklığı ölçüm noktaları.....	66
Şekil 3.12. Termočiftlerin data okuma kartına bağlantısının şematik gösterimi	66
Şekil 3.13. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri	69
Şekil 3.14. Isı transfer iyileştirme elemanı	70
Şekil 4.1. Boru-1 için kararlı durum karakteristik eğrisi	75
Şekil 4.2. Boru-1 için $m = 72$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	76
Şekil 4.3. Boru-1 için $m = 62$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	77

Şekil 4.4. Boru-1 için $m = 54$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	77
Şekil 4.5. Boru-1 için $m = 50$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	77
Şekil 4.6. Boru-1 için $m = 43$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	78
Şekil 4.7. Boru-1 için $m = 38$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	78
Şekil 4.8. Boru-1 için $m = 31$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	79
Şekil 4.9. Boru-1 için $m = 26$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	79
Şekil 4.10. Boru-1 için $m = 17$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	79
Şekil 4.11. Boru-2 için kararlı durum karakteristik eğrisi	81
Şekil 4.12. Boru-2 için $m = 72$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	81
Şekil 4.13. Boru-2 için $m = 62$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	81
Şekil 4.14. Boru-2 için $m = 54$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	82
Şekil 4.15. Boru-2 için $m = 50$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	82
Şekil 4.16. Boru-2 için $m = 43$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	82
Şekil 4.17. Boru-2 için $m = 38$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	83
Şekil 4.18. Boru-2 için $m = 31$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	83
Şekil 4.19. Boru-2 için $m = 26$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	83
Şekil 4.20. Boru-2 için $m = 17$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları	84
Şekil 4.21. Boru-1 ve Boru-2 için $m = 43$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	85
Şekil 4.22. Boru-1 ve Boru-2 için $m = 38$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	85
Şekil 4.23. Boru-1 ve Boru-2 için $m = 31$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	86
Şekil 4.24. Boru-1 ve Boru-2 için $m = 26$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	86
Şekil 4.25. Boru-1 ve Boru-2 için $m = 17$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	87
Şekil 4.26. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt) için $m = 72$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	87
Şekil 4.27. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt) için $m = 62$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	88

Şekil 4.28. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt) için $m = 54$ g/s kütleel debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	88
Şekil 4.29. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt) için $m = 38$ g/s kütleel debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	89
Şekil 4.30. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt) için $m = 31$ g/s kütleel debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas.....	89
Şekil 4.31. Tüm borular için basınç düşümleri	91
Şekil 4.32. Boru-1 ve Boru-2 için osilasyon sınırları	91
Şekil 4.33. Boru-1 için $m = 38$ g/s kütleel debide osilasyonlar	93
Şekil 4.34. Boru-1 için $m = 17$ g/s kütleel debide osilasyonlar °C	94
Şekil 4.35. Boru-2 için $m = 38$ g/s kütleel debide osilasyonlar	96
Şekil 4.36. Boru-2 için $m = 17$ g/s kütleel debide osilasyonlar	97
Şekil 4.37. Boru-1 ve Boru-2 için kütleel debinin basınç düşümü osilasyonlarının genliklerine etkisi.....	98
Şekil 4.38. Boru-1 ve Boru-2 için kütleel debinin basınç düşümü osilasyonlarının periyotlarına etkisi	99

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi.....	27
Çizelge 2.1. İki fazlı akış kararsızlıklarının sınıflandırılması.....	38
Çizelge 2.2. İki fazlı akış kararsızlıklarını etkileyen parametreler	39
Çizelge 2.3. Sıvı metalde buhar patlaması kararsızlığı olayı.....	45
Çizelge 2.4. Çeşitli parametrelerin dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi	49
Çizelge 3.1. Türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri.....	67
Çizelge 4.1. Boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması	100
Çizelge 4.2. Osilasyon genlik ve periyotlarının karşılaştırılması	100

1. GİRİŞ

Nükleer reaktörler, kimyasal üretim ünite ve rafinerileri, kimyasal ve gıda işleme, ilaç üretimi, petrol üretimi, çevre mühendisliği, soğutma sistemleri, buhar jeneratörleri ve benzer sanayi işletmelerin hemen hemen hepsinde var olan iki fazlı akışlar aynı zamanda yağmur damlalarının bulutlar içerisinde meydana gelmesinden, suyun buz oluşumunda sergilediği davranışa kadar çok sayıda doğal olayda da yer almaktadır. İki fazlı akışların ısı transfer katsayısının tek fazlı akışlardan daha yüksek olması ve yüksek ısı akısı gerektiren uygulamaların sanayideki giderek artan ihtiyacı nedeniyle bu alana ilgi ve çalışmalar zaman içinde artmıştır.

Kaynamalı ısı transferinin gerçekleştiği birçok sanayi sisteminde, sistem basıncında ve akışkan debisinde meydana gelen dalgalanmalar nedeniyle oluşan akış kararsızlıkları, sistemlerin ısı transferinin gerçekleştiği kısımlarında arıza ve bozulmalara neden olmakta ve sistemlerin ekonomik ömürlerini azaltmaktadır. Bu dalgalanmalara bağlı olarak; ısıl yorulmalar, kaynama krizleri, mekanik titreşimler, yüksek geçici sıcaklıkların sebep olduğu kontrol zorluğu ve ayrıca ısı transfer yüzeyinde oluşan burn-out olayı olarak sıralamak mümkündür. Birçok mühendislik çalışmasında ekonomik dizayn, optimum şartların sağlanması ve işletme güvenliğinin doğru şekilde uygulanabilmesi ve sistemlerin sağlıklı çalışması, iki fazlı akışların ısıl karakteristik eğrileri ve hidrodinamik kararsızlıklarının önceden tahmin edilmesiyle doğrudan ilişkilendirilebilir.

İki fazlı akışlarda fazlar arasında oluşan ara yüzeylerin aldığı şekiller iki fazlı akış biçimini belirleyen ana özelliktir. Akış doğrultularına göre iki fazlı akışlar eğik, dikey ve yatay olarak sınıflandırılmaktadır. Bu akış doğrultularının her birinde oluşan akış rejimleri ve özellikleri birbirlerinden farklı karakterdedirler. Özelliklerine göre ayrılan sistemlerde temel sınıflandırmaya çekimi kuvvetinin akış yönüne göre etki ettiği yöndür. Yatay akış sistemlerinde buhar ve sıvı faz arasında ayrılma olmasının sebebi bu sistemlere yer çekimi kuvvetinin dik olarak etki etmesidir. Daha düşük yoğunluktaki buhar boru üst kısmında, daha yüksek yoğunluklu sıvı ise boru alt kısmında yer

alır. Isı transfer katsayısının buhar fazında sıvı fazında olduğundan daha düşüktür. Bununla taşıyıcı sistemlerin üst bölgelerinde "burn-out" olayının oluşması sebeptir. Yukarıda sınıflandırmış olduğumuz diğer dikey ve eğik akışlı sistemlerde yerçekimi kuvvetinin akış sistemini paralel veya eğik yönlü olarak etkilemesi doğal olarak ara yüzeylerin şekilleri bakımından yatay akışlı sistemlerdeki şekillerden daha az olmasına sebep olmaktadır.

Akış rejimlerine etki eden faktörler:

- İki fazın mutlak ve bağıl akış debileri,
- Sistem geometrisi
- Her bir faz üzerine etki eden kuvvetler arasındaki ilişki olarak karşımıza çıkmaktadır.

İki fazlı akış sistemlerinde kararsızlık, "statik" ve "dinamik" olarak ikiye ayrılmış ve bu şekilde sınıflandırılmıştır. "Statik kararsızlıklar" kararlı durumdaki akış koşullarında küçük bir değişim meydana geldiğinde çalışma bölgesinin başka bir yöne doğru asimptotik bir şekilde kayması durumudur. Statik kararsızlıklara, kaynama krizi ve akış gezintisi gibi olaylar örnek olarak gösterilebilir. "Dinamik kararsızlıklar"ın ortaya çıkması ise, atalet ve diğer geri-besleme etkilerinin proseste önemli bir etkiye sahip olduğu durumda olur. Bu kararsızlıkların meydana gelme sebepleri; sadece akışın ataleti ile iki fazlı karışımın sıkıştırılabilirliği arasında yeterli etkileşim olması ve kaynamanın olduğu kanalda debi ve/veya basınç düşümü ve yoğunluktaki değişim arasında çoklu geri-beslemeler olabileceği gibi aynı zamanda sadece geri-beslemeler de olabilir. (Yeşiyurt 2015) Dinamik kararsızlıklar; (a) basınç düşümü tipi osilasyonlar (BDO), (b) Termal osilasyonlar (TO), (c) yoğunluk-değişim tipi osilasyonlar (YDO) ve (d) Akustik osilasyonlar (AO) olmak üzere dört ana başlıkta sınıflandırılmıştır (Bergles 1977; Kakaç 1994).

Bu çalışmada yatay boş boru konik yay sarımlarından oluşan boru içi elemanlar kullanılmak üzere bu elemanların iki fazlı akış kararsızlıklarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalar osilasyonların tipleri, ortaya çıkış şekilleri ile

kararsızlıklar üzerine etkili olan parametreleri belirlemeye ve daha önce yapılmış olan benzer çalışmalarla kıyaslamaya yönelik olarak yapılmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde iki fazlı akışlarla ilgili genel bilgiler ile konuyla ilgilidünyada yapılan çalışmalar ve sonuçlarına ilişkin literatür taraması yer almaktadır. İkinci bölüm ise iki fazlı akış kararsızlıklarının kuramsal temelleri ile ilgili genel bilgiler aktarılarak bu tezin konusu olan dinamik kararsızlıklarla ilgili detay bilgiler verilmiştir.Üçüncü bölümde materyal ve yöntem kısmında deney sistemi ve deneysel yöntem ile birlikte araçlar ile ilgili açıklamalar yapılmıştır. Dördüncü bölümde deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler sunulmuş ve önceden yapılmış olan benzer çalışmalar ile kıyaslanarak tartışılmıştır. Son bölümde ise deneysel sonuçlar özetlenerek sonuçlar ışığında öneriler sunulmuştur.

1.1. İki Fazlı Akışlarla İlgili Araştırmalar

20. yüzyılda sanayi devrimi ve hızla gelişen endüstriyel uygulamalar ile birlikte iki fazlı akışların kullanıldığı sistemler ile iki fazlı akış sorunlarının giderilmesi ile ilgili yapılan çalışmalar artmıştır. İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili ilk bilinen çalışma 1909 yılında Lorentz'in sıvı-gaz karışımlarını homojen bir karışım olarak kabul ederek bu akışın hidrodinamiğini deneysel olarak incelediği çalışmadır. Bu çalışmadan sonra bu alanda çok sayıda çalışmalar yapılmıştır.

Bu alandaki diğer çalışmalardan biri olan, 1938 yılında Ledinegg tarafından ısıtılan paralel buhar jeneratörü kanallarındaki akış kararsızlıklarına yol açan nedenleri araştırma ve daha sonra kendi adıyla “Ledinegg kararsızlığı” diye adlandırılan akış gezintisini açığa çıkaran çalışma oldukça önemlidir. Ledinegg yaptığı araştırmalarda $\Delta p - \dot{m}$ karakteristik eğrisinde tek fazlı akışta daima pozitif olması gereken eğimin bazı debi aralıklarında negatif olduğunu incelemiştir ve tek bir basınç düşümüne karşılık gelen tek bir debi değeri olmadığından sistemin bir kararlı durumda çalışırken diğer bir kararlı hale geçtiğini gözlemlemiştir.

Davidov (1956) yapmış olduğu deneysel çalışmadatest borularına elektrik gücü ile ısı akısı sağlamış ,osilasyonları incelemiş ve osilasyon periyotlarının neredeyse akışkanın test borusundan geçiş zamanı ile aynı zamanda olduğunu gözlemlemiştir.Bu çalışmada aynı zamanda test borusununaşırı soğumaya maruz kalan kısmın uzatılmasının ve kanalların birbirleriyle bağlantılı yapılmasının sistemin kararlılığını arttırdığı, test borusu çıkışında kısıtlayıcı eleman kullanıldığı durumdasisitemin kararlılığını azalttığı sonucuna varılmıştır.

Stenning ve Veziroğlu (1965) yaptıkları deneysel çalışmadaR-11 akışkanını kullanarak üç farklı dinamik kararsızlık tipi belirlemişlerdir. "Yoğunluk değişim tipi kararsızlık ",olarak adlandırılan birinci tip kararsızlıkısııtılan kanal boyunca, yüksek ve düşük yoğunluğa sahip akışkan dalgalarının hareketleri sonucu ortaya çıkmıştır. "Basınç düşümü tipi osilasyonlar" olarak adlandırılan ikinci tip kararsızlık; basınçta, cidar sıcaklığında ve akışkan debisinde büyük genlikli osilasyonlara neden olan kararsızlıktır. Bu tip osilasyonların oluşması için test bölümünün karşısında sıkıştırılabilir bir hacmin bulunması gerektiği de bu çalışmanın sonuçlardandır. "Termal osilasyonlar" olarak adlandırılan üçüncü tip kararsızlık sıvı film tabakasının kararsızlığı ile bağlantılı olan kararsızlıktır.

Veziroğlu ve Lee (1968, 1968b, 1970) iş yapan akışkan olarak R-11 akışkanınıkullanarak dikey bir akış sisteminde, basınç düşümü ve yoğunluk değişim osilasyonları üzerine yaptıkları deneysel çalışmaların sonuçlarını daha önceki yatay kanal üzerinde yapılan araştırma sonuçları ile karşılaştırarak, dikey yukarı akış sistemlerinin yatay akış sistemlerine göre daha kararlı bir durum gösterdikleribelirtmişlerdir.

Wedekind (1971)yaptığı deneysel çalışmadayatay boru sisteminde tam buharlaşmanın görüldüğü yeri "iki-fazlı akış bölgesi" ve "kızgın buhar" bölgesi olarak ikiye ayırmıştır.Bu iki bölgeyi birbirinden ayıran yer olarak nitelendirdiği buhar karışımı geçiş noktasının osilasyonlar yaptığını tespit etmiş ve farklı parametrelerin bu osilasyonlar üzerine yaptıklarıetkileri incelemiştir.

Yadigaroglu ve Bergles (1972) R-113 akışkanını kullanarak kaynamalı kanal deney sisteminde, yoğunluk değişim tipi osilasyonları incelemişlerdir. Statik ve dinamik basınç düşümü salınımları üzerine kaynama sınırının hareketleri incelenmiştir. Cidar ısı kapasitesi ve basınç değişimleri kaynama sınırının hareketine etkisi ile dinamik bir analiz oluşturarak düşük ısı akısında ve yüksek giriş aşırı soğutma seviyelerinde ortaya çıkan bu tip osilasyonların çok daha düşük periyot değerlerine sahip oldukları belirtilmiştir.

Boureet *al.* (1973) iki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili yaptıkları çalışmada, kararsızlıkların birbirinden ayrılmasına sebep olan faktörleri dikkate alarak, birincil ve ikincil olay olma durumuna bağlı olarak sınıflandırmışlardır. Birincil ve ikincil olay olma durumuna bağlı olarak sınıflandırılan bu kararsızlıklar "statik" ve "dinamik" kararsızlıklardır. Çalışmada iki fazlı akış kararsızlıklarını tespit etmekte kullanılan sayısal yöntemler ile tahmin metodlarında kullanılan öne çıkan yazılımların bir listesine yer vermişler ve akış kararsızlıklarına sebep olan parametrik etkilere oldukça geniş yer verilmişlerdir.

Kakaç *et al.* (1974, 1977) düşey akışlı dört adet paralel kanala sahip deney sisteminde R-11 akışkanını kullanarak araştırmalar yapmışlardır. Tek kanala veya çeşitli tiplerdeki paralel kanallara sahip sistemlerde görülen basınç düşümü tipi ve yoğunluk değişim tipi osilasyonların aynı şekilde ortaya çıktığını, bunun yanı sıra ara ara termal osilasyonların da oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada elde edilen sonuçlar benzer sistemlerin periyotları, kararsızlık sınırları ve osilasyonları ile kıyaslandığında, sistemin benzer sistemlerden daha kararlı bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir.

Aritromi *et al.* (1977, 1979, 1982) iş yapan akışkanı su olan zorlanmış konveksiyonlu, kaynamalı, düşey yukarı akışlı paralel bir kanal sisteminde yaptıkları deneysel çalışmalar neticesinde kararsızlıklarla ilgili doğrusal olmayan matematiksel bir model geliştirmişlerdir. İki paralel kanallı sistemden dört tip kararsızlık elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında bu matematiksel modelin deneysel veriler ile uyumlu

olduğu gösterilmiştir. Model daha sonra üç ve dört adet kanala sahip paralel kanallara uygulanmıştır.

Aritromi *et al.* (1982) paralel kaynamalı sistemlerde yoğunluk değişim osilasyonlarını ve kayma oranının etkisini deneysel ve kompleks bir analitik model kullanarak incelemiştir. LMFBF tip reaktörün buhar jeneratörünü simüle etmek amacıyla sıcak su ile ısıtılan R113 akışkanını kullanılarak akış kararsızlıklarının periyotlarına etki eden parametreleri belirlemiştir.

Ünal *et al.* (1977) sodyumla ısıtılan bir deney sisteminde buhar jeneratörünün düz borularında meydana gelen yoğunluk değişimi tipi osilasyonlarını incelemiştir. Kaynama bölgesinin uzunluğunun toplam boru uzunluğuna oranı, Froude sayısı ve kaynama bölgesindeki akışkan miktarının geçiş süresinin osilasyonların periyodunu belirleyen faktörler olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca dinamik kararsızlıkların ilk başladığı çalışma koşulları, buhar jeneratöründeki ortam ve işletme şartlarına bağlı bir katsayı "Sıcak kanal faktörü" olarak bir kanal faktörünü yapmışlardır.

Takitani and Takemura (1978) iş yapan akışkanını su olarak kullanıldığı tek kaynamalı "once-through" akış sisteminde 20-43 atü sistem çalışma basıncında yoğunluk değişim tipi osilasyonları incelemiştir. Bu sistemde test bölgesi paralel bağlı iki borudan oluşmaktadır. Kütleli debi, giriş direnci, sistem basıncı, giriş aşırı soğutma sıcaklığı, çıkış kuruluk derecesinin ve bypass oranının osilasyon sınırları üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda kararsızlık sınırları önceden tahmin etmede kullanılan ampirik korelasyonlara uygun olduğu görülmüştür.

Friedly *et al.* (1979) üniform olarak ısıtılan bir deney sisteminde evaporatör kanallarında oluşan akış kararsızlıklarını incelemiştir. Basınç düşüm oranı (ΔP) Jakob sayısı (Ja) ve çıkış kuruluk derecesi parametresi (X) gibi üç boyutsuz sayı üzerinden yoğunluk değişimi tipi osilasyonlarının stabilite limitleri belirlenmeye çalışılmıştır. Daha önce yapılmış olan çalışmalarda kararlılık sınırı verilerinden yararlanılmış ve boyutsuz parametrelerin aralığı belirlenmiştir. Çıkış valf basıncının etkin olduğu durumlarda sıvı

azot kullanılarak yeni deneysel bulgular toplanmış ve bu bulgular, kararlı ve kararsız davranışlarla Ledinegg kararsızlık bölgesini belirlemede kullanılmıştır. Deney sisteminin test bölgesinde sürtünme oranının artırılması ile sistemin kararsızlığa yaklaştığı belirlenmiştir.

Fukuda and Kobori (1979) analitik yöntemden faydalananarak iki fazlı akış hidrodinamik kararsızlıklarını 8 farklı grup şeklinde sınıflandırmışlardır. Kararsızlıkları karakterize etmeyi kullandıkları analitik yöntemi bazı deneysel bulgulara uygulayarak kolaylaştırmışlardır. Fukuda and Kobori sınıflandırdıkları bu kararsızlıklarınüçünü Ledinegg kararsızlığı veya statik kararsızlık olarak diğer beşini ise dinamik kararsızlıkları olarak ayırmışlardır. Her bir kararsızlık tipini belirlemede yerçekimsel basınç düşümü, sürtünme basınç düşümü gibi farklı tip basınç düşümü terimleri öne sürülmüştür.

Akyüzlü *et al.* (1979) teorik olarak hesaplanan sistem kararlılığı sınırları ile deneysel olarak elde edilen bulguları dikey akışlı, tek kanallı, elektrikle ısıtılan, zorlanmış taşınımlı deney sistemi üzerinde kıyaslamışlardır.Yaptıkları gözlemlerde akışkan giriş sıcaklığının basınç düşümü tipi osilasyonlarda önemli bir rol oynadığı sunucuna varılmıştır.Daha önceki çalışmalarda ortaya koyulan matematiksel ifadelere iki fazlı akışın sıkıştırılabilirliğinin ve yoğunluk değişimi tipi osilasyonların dahil edilmesinin gerekliliği tespit edilmiştir.

Pakopoulos *et al.* (1980) buhar jeneratörlerinde oluşan iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları üzerine yaptıkları çalışmada iki fazlı akış korunum denklemlerinin zamana bağlı olduğu şartlardaki çözümlerini veayrıca ısıtıcı cidarının dinamiğinin teorik olarak analizini yapmışlardır. Sistem kararlılığında ısıl güç ve akış etkileşiminin büyük ölçüde etkisinin olduğu üzerinde durulmuştur.

Lahey (1980) ve Bergles (1981) öncedenBoure'nin yaptığı iki fazlı akışları sınıflandırmaya yönelik araştırmayı daha detaylı olarak ele alarak kararsızlık tipleri

üzerine odaklanmış ve iki fazlı akış kararsızlıklarını sınıflandırma üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Yüncü (1981) iki fazlı akış kararsızlıklarını teorik duruma göre yatay bir kanala sahip deney düzeneğinde kıyaslamıştır. Bunun sonucunda bir analitik yöntem geliştirmiştir. Bu analitik yöntemi kararlı durum karakteristikleri ile BDO ve YDO için kararlılık ve kararsızlık sınırlarını belirlemek için kullanmıştır. Buna ilaveten pertürbasyon analiz yöntemi yardımıyla korunum denklemlerinden kararlı ve kararsız durum çözümleri bulunmuştur. Nyquist kriteri yardımıyla sistemin kararlılık ve kararsızlık sınırlarını belirleyerek kararsız çözümlerin Laplace transformasyonu ile karakteristik denklemine ulaşmışlardır.

Gürgenci *et al.* (1983) sabit basınçta çalışan yukarı akışlı kaynamalı deney sisteminde tek bir kanal düzeneğine sahip, YDO ve BDO sınır çevrimlerini çıkarmak amacıyla sabit özellikli bir homojen akış modeli geliştirmişlerdir. Uygulanan modelin termodinamiksel olarak dengede olduğu kabul edilmiş ve test kanalı cidar ısı depolama etkileri ile akışkan özelliklerinde oluşan değişiklikler yok sayılmıştır. Modelin BDO için verdiği sonuçlar deneysel verilere çok yakın olduğu görülmüştür. YDO içinse modelin periyotları deneysel verilere çok yakın değerlere ulaşırken, genlikler için aynı benzerlik oranı bulunamamış ve bunun sistem boyunca var olan dağılım basınç düşümü değerinin yok sayılmasından kaynaklandığı üzerinde durulmuştur.

Doğan *et al.* (1983) zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı akış kararsızlıklarını yukarı akışlı tek bir kanal sisteminde araştırma yapmışlardır. Kararlı durum ve kararsız durum hallerini iki sayısal model üzerinden bulmaya çalışmışlardır. Uygulanan bu sayısal model, homojen iki fazlı akışlara ve fazlar arasında termodinamiksel denge varsayımına dayanan nümerik bir modeldir. Araştırmalarını ısıtıcı cidarının ısıl kapasitesi, kaynama ara yüzeyinin hareketi, iki fazlı bölgedeki sıkıştırılabilirlik etkileri üzerine yapmışlardır. Debi ve ısıl gücün ve giriş aşırı soğutmasının sistem davranışları üzerine olan etkilerini uygulanan model yardımıyla analiz etmişlerdir. Analizler neticesinde kullanılan

modelin yukarı akışlı zorlanmış konveksiyonlu sistemde oluşan kararsızlık sınırlarını bulmaya uygun olduğu ortaya çıkmıştır.

Ünal (1985) yaptığı çalışmada çeşitli çalışma şartları ve geometrilere sahip 363 sistem datasını kullanarak sodyumla ısıtılan uzun borulu buhar jeneratöründe görülen yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının başlangıç sınırlarını tahmin etmede kullanılan iki ayrı korelasyon geliştirmiştir.

Gurgenci *et al.*(1986) sabit basınç altında çalışan yukarı akışlı tek bir kanal sistemindeki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili çalışmalar yapmıştır. Yaptığı çalışmalarda drift-flux modeli ve homojen akış modelinden faydalanarak yoğunluk değişim tipi ve basınç düşümü tipi osilasyonlarının lineer kararlılık kriterini geliştirmiştir. Teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar mukayese edildiğinde kararlılık sınırlarını tahmin etmede drift-flux modelinin daha uygun sonuçlar verdiği kanısına varılmıştır.

Tewari *et al.* (1988) yaptığı deneysel çalışmada 0.6 bar ila 1 bar basınç aralığında saf su ve sodyum klorür akışkanlarını kullanmıştır. Yatay boruda azalan film tabakası içindeki kaynama için çekirdek kaynamalı ısı transfer katsayısındaki artış tetkik edilmiştir. Atmosfer basıncı ve atmosfer basıncından daha düşük basınçlarda, yatay tip paslanmaz çelik borudaki ince film tabakasında arı su ve sodyum klorür çözeltisi için kaynamalı ısı transfer katsayısını belirlemek için bir korelasyon meydana getirilmiştir. Doyma basıncı azaldıkça kaynamalı ısı transfer katsayısının da azaldığı sonucuna varılmıştır.

Ruderet *al.* (1989) yaptıkları deneysel çalışmada yatay boruda slug akıştan plug akışa geçişi incelemiştir. Slug akıştaki gaz boşluğunun önünün "Benjamin bubble" arkasının ise hidrolik sıçramanın olduğu taraf olduğunu söylemişlerdir. Deney sonuçları, düşük gaz geçişleri için "Benjamin bubble" ifadesini desteklemiştir.

Xu and Chen (1990) deneysel çalışmalarında iş yapan akışkan olarak suyun kullanıldığı dikey tip bir sistemde yoğunluk değişim tipi osilasyonlarını incelemiştir. Deney çalışma koşulları orta basınç seviyelerinde ve birim ısı güçlerinde oluşturulmuştur.

Deney sisteminden elde edilen veriler ile yoğunluk değişim osilasyonlarının sınırlarını belirtenkararlı durum karakteristik eğrilerini çizmişlerdir.

Kakaç *et al.*(1990) R11 akışkanını kullanarak termal osilasyon değerlerini deneysel ve tork olarakdikey yukarı akışlı tek bir zorlanmış kanallı deney sisteminde incelemiştir.Homojen iki fazlı akış modeli teorik kıyaslamada kullanılmıştır.Isı gücü,akışkanın giriş sıcaklığı ve ısıtıcı boru boyutlarının termal osilasyonlar üzerineetkilerini incelemiştir. İki fazlı akış kararsızlıklarından olan yoğunluk değişimi tipi, basınç düşümü tipi ve termal osilasyonlara karşılaşılmıştır. Tatbik edilen modelde tek boyutlu akış denklemleri, termal osilasyonların ortaya hangi şartlarda çıktığı ifade edilmiştir. Teorik sonuçlara göre; osilasyonlar, genlikler ve periyot değerleri açısından deneysel bulgularla uyumlu olduğugözlemlenmiştir. Termal osilasyonlar basınç düşümü tipi osilasyonlara aynı doğrultuda olması ile beraber basınç düşümü tipi osilasyonların maksimum değeri her defasında faz gecikmesi oluşturarak termal osilasyonlarının maksimum değerinden ayrılmıştır.

Padki *et al.* (1991) yaptıkları teorik araştırmada termal osilasyonlar ve basınç düşümü tipi osilasyonları R-11 iş yapan akışkanını kullanılan dikey tip tek kanallı zorlanmış taşınımlı bir sistemde incelemiştir. Sadede basınç düşümü tipi osilasyonların değil aynı zamanda termal osilasyonların datüm ısı girdi değerlerinde oluştuğu görülmüştür. Verilen giriş aşırı soğutma değerinde, osilasyonların periyot ve genlikleri ısı giriş oranı ile orantılı bir şekilde büyümüştür. Termal osilasyonlar basınç düşümü tipi osilasyonlara eşlik etmişler fakat basınç düşümü tipi osilasyonlarının maksimum değeri termal osilasyonların maksimum değeri ile kıyaslandığında termal osilasyonlar geride kalmıştır.

Padki *et al.* (1992) yaptıkları çalışmadadinamik sistem teorisini kullanmışlar ve yeni bir integral formülasyonu geliştirmişlerdir.Basınç düşümü, Ledinegg kararsızlığının stabilite kriteri ve kütleli debi karakteristikleri, basınç düşümü kararlı durum bölgesinin negatif eğim miktarından türetilmiştir. Basınç düşümü ve Ledinegg kararsızlığı arasındaki farklılıklar "bifürkasyon" tipindeki farklılıklara yansımıştır.

Ding *et al.* (1993) iki fazlı akış kararsızlıklarını kaynamalı yatay tip bir boru sisteminde incelemiştir. Giriş basıncı osilasyonlarının genliğinin kütleli debi düştükçe azaldığı, giriş sıcaklık değeri arttıkça ya da giriş aşırı soğutma derecesi azaldıkça arttığı görülmüştür. Periyotlar ise kütleli debi ve giriş aşırı soğutma derecesi ile aynı oranda değişmiştir. Yoğunluk değişimi tipi osilasyonlara negatif eğim bölgesinde rastlanmıştır. Termal osilasyonlar basınç düşümü tipi osilasyonlara devamlı eşlik etmiş ve boru cidarının üst kısmında gözlemlenmiştir.

Xu and Chen (1993) iş yapan akışkan olarak suyun kullanıldığı ve üniform olarak ısıtılan dikey yukarı akışlı test borusunda yaptıkları çalışmada yoğunluk değişimi tipi osilasyonlar sebebiyle boru çıkış kısmında cidar sıcaklığında düşük genlikli ve yüksek frekanslı osilasyonlar meydana geldiğini ve sonucunda ısı yorulmaya ve zamana bağlı burn-out olayı gözlemlemiştir. Yoğunluk değişimi tipi osilasyonların periyodunun genel olarak ısı akısı ve sistem basıncı arttıkça azalmıştır. Ayrıca giriş kütleli debisi ve giriş aşırı soğutma derecesi arttıkça yoğunluk değişim tipi osilasyonların arttığı görülmüştür.

Liu *et al.* (1993, 1994) iş yapan akışkan olarak R-12 kullanılan zorlanmış taşınım, kaynamalı, dikey borulu deney sisteminde, iki fazlı akış geçiş kaynamasını, hidrodinamik kararsızlıkları ve termal osilasyonları deneysel olarak incelemiştir. Taşınım geçişinin olduğu kaynama bölgelerinde, cidar sıcaklığında iki farklı modelin olduğu gözlemlenmiştir. Bunlardan biri yüksek frekans ve düşük genlikli diğeri ise düşük frekans ve yüksek genlikli iki ayrı modelde osilasyonlardır. Düşük frekanslı model yöntemleri, ısıtılan cidar kapasitesi, eksen boyunca iletim kapasitesine ve kaynama karakteristiklerindeki geçişe bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Rizwan-Uddin (1994) yoğunluk değişim tipi osilasyonları lineer olmayan, fonksiyonel, integral / diferansiyel iki denkleme dayalı matematiksel bir modelle sayısal olarak incelemiş ve elde ettiği matematiksel model sonuçlarıyla, yoğunluk değişim tipi osilasyonların oluşmasının ana sebebi olan bazı fiziksel mekanizmaları açıklamak için kullanmıştır. Çok parametre ile çalıştığı araştırma neticesinde; (1) hareketli yoğunluk

dalgalarının önemli bir rolü olmadığını ve osilasyonların çok zayıf karakterde hareket eden yoğunluk dalgaları ile de var olabildiğini, (2)daha önce yapılan çalışmalarda osilasyon periyotlarının kanal geçiş zamanının iki katı olduğu tespit edilmiştir.Fakat bu çalışmada üç ila dört katı arası bir mertebede olduğunu ve (3) karışım yoğunluğundaki değişimden daha ziyade kanaldaki basınç düşümü karakteristiklerinin belirlenmesinde karışım hızındaki değişimin etkili olduğunu gösterilmiştir.

Kakaç (1994) önceden yapılan deneysel ve teorik çalışmalardan yararlanarak iki fazlı akış kararsızlıklarını sınıflandırmıştır. Isıl güç, akışkan debisi, giriş aşırı soğutma seviyesi, giriş/çıkış kısıtlayıcıları ve ısı transferi iyileştirme elamanlarının kararsızlıklar üzerine etkilerini inceleyerek kararsızlıkların ana ayrılma mekanizmalarını detaylı bir şekilde incelemiştir.

Kakaç (1995) iki fazlı akış kararsızlıklarını kaynamalı sistemlerde su kullanarak deneysel ve kuramsal olarak incelemiştir. Tek kanallı, yukarı akışlı, dikey sistemde, YDO nun başladığı ısıl güç ve kuruluk derecesi tespit etmiş ve kütleli debi, sistem basıncı, giriş aşırı soğutma seviyesi ve çıkış kısıtlayıcısının etkilerini araştırmıştır. Bunlara ilavetenbu sistem için YDO nunbaşlangıcını; kuruluk derecesive ısıl güce bağlı olarak veren aşağıdaki korelasyonu önermiştir:

$$x_c N_Q = A + B \frac{N_p}{N_{TS}} \quad (1.1)$$

Bu eşitlikte bulunan N_Q , N_p ve N_{TS} boyutsuz sayılardır:

$$N_Q = \frac{4Q_c L_h}{(h_s - h_0) G d} \quad (1.2)$$

$$N_p = \frac{P_e \rho_l}{G^2 L_h} \quad (1.3)$$

$$N_{TS} = \frac{h_s - h_0}{\Delta h_v} \quad (1.4)$$

Bu korelasyon için;

N_Q : Test kısmında toplam ısıtılan uzunluğun sıvı faz tarafından işgal edilen uzunluğa oranı olarak tanımlanır. Aynı zamanda ısıl güç ile giriş aşırı soğutma arasındaki bağlantıyı verir.

N_p : basıncın ve kütleel debinin yoğunluk değişim tipi osilasyonlar üzerindeki etkisini gösteren boyutsuz bir sayıdır.

N_{TS} : Akışkanın termodinamik özelliklerine dikkat çeken ve aşırı soğutmanın etkisini gösteren boyutsuz bir sayıdır.

R11 akışkanının kullandığı yatay sistemde ise kararlı durum karakteristik eğrileri drift-flux yöntemi ile saptanmıştır. Sayısal yöntemde kullanılan sonlu farklar yöntemi explicit sonlu farklar yöntemidir. DeneySEL ve teorik sonuçların birbirleri ile iyi bir uyum içerisinde olduğumuz gözlemlenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda YDO'nun oluşumunda sistem basıncına, giriş aşırı soğutmasına ve çıkış orifis boyutuna bağlı olduğunu; YDO periyodunun sistem karışım partikülünün sistem boyunca hareket etme süresi ile ilişkili olduğunu; kütleel debi osilasyonunun genliğinin oldukça büyük olduğunu ve osilasyon esnasında ters akış oluştuğunu belirtmiştir (Ömeroğlu 2012).

Widmann *et al.* (1995) çalışmalarında yatay borulu kaynamalı akışlı, artırılmış ısı transfer yüzey alanlı bir sistemde deneySEL olarak iki fazlı akış kararsızlıklarının oluşumunu incelemişlerdir. Isı transfer yüzey alanının büyümesinin akış kararsızlıkları üzerine etkisini üç farklı boru tipi için beş farklı giriş sıcaklığı kullanılarak incelenmiştir. Isıl güç, sistem basıncı ve çıkış kısıtlama şartları sabit tutulmuştur. Bu şartlarda yapılan deneylerde her bir boru tipi için dinamik kararsızlık tipleri bulunmuştur, kararlı durum karakteristikleri gözlemlenmiş ve basınç düşümüne karşılık gelen kütleel debi diyagramları meydana getirilmiştir.

Wong *et al.* (1997) iki fazlı hava-su akışında oluşanakış desenlerini oldukça doğru belirlemek için önerdikleri yeni terminoloji için bir hayli fazla araştırmacı tarafından kullanılmış farklı yaklaşımlardan faydalanmışlardır. Bu terminolojiyi büyük ölçüde Spedding ve Nguyen tarafından önerilmiş olanakış modeline dayalı Spedding ve Spence olarak tanımlanan büyük ölçekli bir çalışmanın neticesi olarak nitelendirmişlerdir. Bu çalışmada kullanılan deneysel akış haritası gözlemlenen akış desenlerini birbirinden ayırmak içindir.

Kakaç and Cao (1999) yatay kaynamalı bir boru sistemi içerisinde R-11 iş yapan akışkanını kullanarak yaptıkları deneysel araştırmada bütünsel güçlerde basınç düşüm tipi osilasyonlar ve termal osilasyonların meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Osilasyonların genlik ve periyotları ısı güç ve giriş aşırı soğutmasının artmasıyla artmıştır. Kararlı durum karakteristikleri ve osilasyonlar Drift-flux metodu ile teorik olarak analiz edilmiş ve deneysel bulgularla aynı doğrultuda olduğu tespit edilmiştir.

Guo *et al.* (2000) iş yapan akışkan olarak su kullanılan kapalı sirkülasyonlu helisel kıvrılmış boru sistemi içerisinde basınç düşümü tipi osilasyonlar üzerine incelemeler yapmışlardır. İki fazlı akış döngüsünde sıkıştırılabilen buhar hacim tipleri, basınç düşümü tipi osilasyonların sınırlarının meydana gelmesinde etkin bir rol oynamıştır. Farklı pozisyondaki sıkıştırılabilir gaz hacimleri, basınç düşümü tipi osilasyonların periyotlarını, başlangıç sınırlarını ve osilasyon genliklerini değiştirdiği gözlemlenmiştir.

Guo *et al.* (2001) buhar-su karışımı iki fazlı akışın , basınç düşümü tipi osilasyonların olduğu sarmal bir boru dataşınımla ısı geçişinin etkilerini incelemişlerdir. Buhar su karışımı iki fazlı akış ve doymamış su akışı için kapalı sirkülasyonlu helisel kıvrılmış borulu buhar jeneratöründe geçici ısı transfer özelliklerinin etkilerini incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Sürekli akışlı yerel ısı transferinin homojen olmayan özelliği araştırılmıştır. Deneysel veriler ışığında akış osilasyonu, ikincil akış ve ikincil akış arasındaki etkileşimin etkileri incelenmiştir. Yerel ve titreşimli akış için periferik zaman-ortalamalı Nusselt sayılarının önemli derecede farklı olduğu sonuçlarda görülmüştür. Uniform olarak ısıtılan sarmal bir boru içerisinde buhar-su ihtiva eden iki

fazlı akış için BDO ve sınırları ile ilgili daha öce yapılmış olan araştırmalardan bahsedilmiştir. Basınç düşümü tipi osilasyoları, iş yapan akışkan olarak su kullanılan kapalı sirkülasyonlu helisel kıvrılmış borulu buhar jeneratöründe incelemişlerdir.

Çomaklı *et al.* (2002) yatay, kaynamalı düz borulu sistemde sabit sistem basıncı ve sabit ısı akısında iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Dinamik kararsızlıkların bütün tiplerinin tüm sıcaklık değerlerinde oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Osilasyonların görüldüğü sınırlar bulunmuştur. Giriş sıcaklık değerinin düşmesi ile kararlılık sınırlarının daha düşük kütleli debiye doğru gittiği, yani sistemin kararsızlığının giriş sıcaklığı ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. BDO ile YDO periyot ve genlikleri de azalan kütleli debiyle azalır, azalan sıcaklık giriş değeriyle arttığı gözlemlenmiştir. Bunlara ilaveten iki fazlı dinamik akış kararsızlıkları için kanal uzunluğunun etkin rol oynadığı vurgulanmıştır.

Yu *et al.* (2002) kaynamalı ısı transferi, iki fazlı basınç düşümü, ve suyun kritik ısı akısını, uzunluğu 0,91 m ve iç çapı 2,98 mm olan yatay boru sistemi içerisinde inceledikleri araştırmalarında buldukları basınç farkı ve ısı transfer katsayısı sonuçları sadece küçük kanallarda kaynayan soğutucu akışkanlar için değil aynı zamanda daha büyük kanallarda kaynayan su için geliştirilmiş olan mevcut korelasyonların değişiklikleri ile başarılı bir şekilde ilişkilendirilmiştir. Çalışmada incelenen küçük kanalın iki fazlı basınç düşümü sonuçları aynı kütleli debiler için büyük kanallarda tahmin edilenden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Chisholm korelasyonu ile karşılaştırma yapılmış ve kanal boyutları arasındaki iki fazlı akış rejimi değişiklikleri ile ilişkilendirilmiştir. Chisholm korelasyonunda küçük çaplı kanallarda tahmin doğruluğunu geliştirmeye yönelik değişiklik yapılmış ve ısı gücün küçük kanaldaki suyun kaynamalı ısı transferine önemli ölçüde etkili olduğu görülmüştür.

Karslı *et al.* (2002) iç yüzey değişiminin kaynamalı zorlanmış taşınım akış kararsızlıklarına etkilerini yatay bir boruda incelemiştir. Kaynamalı dinamik akış kararsızlıkları hususundaki geliştirme yapılandırmalarının etkisini kapsamlı olarak araştırmışlardır. Kaynamalı akış kararsızlıkları esas göz önünde bulundurularak boş ve

elemanlı boru konfigürasyonları arasında karşılaştırmalar yapılmış ve geliştirilmiş yapılandırmalar arasındaki farklılıklar eş zamanlı olarak en kararlı ve en kararsız olanı gözlemlemek için belirlenmiştir. Geliştirilmiş yüzeyli borularda basınç düşüm tipi osilasyonlar veya genlik dalgası tipi osilasyonların genlik ve periyotları, boş boru ile kıyaslandığında ona oranla daha yüksek bulunmuş, boş borunun çok kararlı yapıda olduğu görülmüş, aynı tip yüzey artımlı boru için eşdeğer çapı ile sistem kararlılığı arasında ters orantı olduğu sonuçları arasındadır.

Leung *et al.* (2004) yaptıkları deneysel çalışmada ısıtılmış borularda buhar ve su akışı için basınç düşümleri üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. İki farklı laboratuvarda farklı türlerde ısıtılmış boru tipi içerisinde geçen buhar ve su akışı için basınç düşümü ölçümleri elde etmişlerdir. Deneyler su soğutmalı 600'lük boru sisteminde yukarı akışlı yönde yapılmıştır. Isı akısındaki artma ile basınç gradyanındaki azalma aynı kesit ortalama şartlarında tek fazlı akışlar için gözlemlenmiştir. İki fazlı sürtünme çarpanı, kaynama başladıktan sonra, kabarcıklı akış bölgesinde artması akışı ile arttığı gözlemlenmiştir fakat halkalı akış bölgesinde azalmıştır. Isıtılmış yüzey dryout'a yaklaşırken, iki fazlı akış sürtünme çarpanı en üst değere ulaşmış ve dryout olan zamana kadar artan termodinamik kalite azalmıştır. Sonuç olarak düşme eğilimi, sıvı film kalınlığındaki azalmaya ve sıvı sürüklenmesinin sonlanması ile ilişkilendirilmiş ve kritik ısı akısı oluştuğundan sonra sürtünmeli basınç gradyanında kayda değer bir düşüş tespit edilmiştir.

Li *et al.* (2006) yaptıkları çalışmada nitrojen kullanarak düşey yönlü kaynamalı iki fazlı akışın oluşumu esnasında, basınç düşümü karakteristiklerini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Sabit kütleli debi ve değişkenli ısı akısı koşullarında, yukarı doğru kaynamalı iki fazlı akış esnasındaki total basınç düşümünün karakteristikleri, 6mm iç çapında dikey bir boru yardımıyla ve nümerikolarak örneklendirilmiş bir korelasyonla deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlarla sayısal sonuçların karşılaştırılması, basınç düşümü eğrisindeki geçiş noktasının daha evvel olduğunu göstermiş ve basınç düşümü öngörülleri ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

Spedding *et al.* (2006) yaptıkları araştırmada ampirik korelasyonları; çok fazlı yatay boru akışında basınç düşümü öngörüsü için iki fazlı boru akışı verileri ile test etmişlerdir. Önerilen korelasyonlar tabakalı ve annular tip akışı tahmin etmek içindir. Üç fazlı gaz-su-yağ boru akışına uygulanan korelasyonlar, genelde aralıklı slug akış modelini öngörmeye elverişli hale gelmiştir. Boru içerisindeki üç fazlı basınç düşümü tahmini ile momentum balans modeli başarılı olarak ilişkilendirilememiştir.

Kakaç *et al.* (2007) iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarını boru kaynamalı sistemlerde araştırmışlardır. Çalışmalarında drift akış modelleri ve üniform akış modeli çözüm örnekleri ile birlikte açıklanmış ve model sonuçlarının deneysel verileri ile doğrulaması gösterilmiştir. Deneysel bulgularla doğrulanan üniform akış ve sürüklenmeli-akış modellerinin devamlı osilasyonlarının periyot ve genlikleri için yapılmış olant teorik öngörüler en önemli yaklaşımı göstermiş ve farklı çalışma şartları için kararlılık sınırları elde edilmiştir. Her bir faz için ayrı ayrı yazılan korunum denklemleri için; iki fazlı akış sorunlarının en kapsamlı formülasyonu olan ayrılmış akış modeli uygulanmıştır.

Quibén *et al.* (2007) yatay borulardaki buharlaşma süresinde oluşan iki fazlı sürtünmeli basınç düşümünün analitik olarak araştırmışlardır. Deneysel bulgular, akış modeli haritasına dayanan iki fazlı sürtünmeli basınç düşümü modelini geliştirmek amacıyla Wojtan–Ursenbacher–Thome akış modelinin kullanıldığı akış rejimi ile birbirinden ayrılmış ve çalışma için uygulanmış olant yeni modelin tanıtımında detaylı bir şekilde yapılmıştır.

Yılmaz vd (2007) yaptıkları çalışmada iki fazlı akış için kullanılan ısı transferi iyileştirme metodlarını detaylı bir şekilde inceleyerek ana bulguları vurgulamışlardır. Geniş koşullar altında bulunan iki fazlı akış ısı taşınım katsayılarını, çeşitli aktif ve pasif ısı transfer iyileştirme metodlarının artırdığını gözlemlenmiştir.

Çomaklı vd (2007) yaptıkları deneysel çalışmada iş yapan akışkan olarak suyun kullanıldığı yatay bir boruda iki fazlı akış kararsızlık karakteristiklerini incelemiş ve bunun üzerine kararlı durum eğrilerini elde etmişlerdir. Giriş aşırı soğutma sıcaklığı ve

ısı 11 gücün kararlı durum karakteristikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kararlı durum karakteristik eğrisinde kaynamanın başlamış olduğu nokta aşırı soğutma miktarının artmasıyla daha düşük kütle debilerine kaymıştır. Belirli bir kütleli debi değerinde, iki fazlı bölgede giriş sıcaklığı ile basınç düşümünün doğru orantılı olduğu gözlenmiştir. Sisteme verilen ısı 11 gücün artması kararlı durum karakteristik eğrisinde minimum noktanın sağa kaymasına sebep olmuş ve iki fazlı akış artık daha yüksek kütleli debilerde başlamıştır. Basınç düşümü tipi osilasyonlar ile yoğunluk değişimi tipi osilasyonların genlik ve periyotları karşılaştırıldığında basınç düşümü tipi osilasyonların genlik ve periyotlarının daha büyük olduğu görülmüştür.

Sotgia *et al.* (2008) yaptıkları deneysel çalışmada 21 ile 40 mm arasındaki çaplarda yedi farklı ryrex ve pleksiglas borular kullanarak yağ-su karışımları içinde basınç düşümü azalması ve akış rejimlerini analizini yapmışlardır. Akış model haritaları, basınç düşümü ölçümleri ve yağ-su akışının net fotoğrafları kapsamlı yorumları da beraberinde ihtiva eden araştırmada literatürdeki diğer araştırmacıların deneysel sonuçları, teorik bulguları ve ampirik kanunlarla kıyaslanmıştır.

Shannak (2008) hava-su iki fazlı akışın sürtünmeli basınç düşümünü saptamak için nispeten düzleştirilmiş, sırasıyla dikey ve yatay kanallarda deneyler yapmıştır. Deneylerinde iki fazlı akışın sürtünmeli basınç düşümüyle ilişkili hava-su karışımı ölçülmüştür. Çalışmada pürüzlü düşey ve yatay düzleştirilmiş borulardaki göreceli pürüzlülük etkisine ve sürtünmeli basınç düşümüne odaklanılmıştır. Göreceli pürüzlülük etkisinin, bihassa yüksek buhar kalitesi ve yüksek kütle debisi için önem arz ettiğ i belirlenmiştir.

Çomaklı vd (2008) yaptıkları çalışmada yatay bir borudaki kaynamalı iki fazlı akış kararsızlıkları ve akışkan tipinin etkilerini incelemişlerdir. Kararlı durum eğrileri, yoğunluk değişim tipi titreşimleri ve basınç düşümü titreşimlerine akışkan tipinin yaptığı etkile araştırılmıştır. İş yapan akışkan olan su R-11 akışkanı ile kıyaslandığında basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi titreşimlerinin periyot ve genliklerinin, R11 akışkanın değerlerind e daha düşük olduğu saptanmıştır. Giriş sıcaklıkları ile genliklerin ve

periyotların doğru orantılı olduğu, kütleli debi ile de genliklerin ve periyotların doğru orantılı olduğu gözlemlenmiş ve aşırı soğutma seviyesinin artması ile kaynamanın başladığı noktanın daha düşük kütleli debilere doğru gittiği anlaşılmıştır. İlave olarak karakteristik eğrilerin benzer şekilde ve eğrilerin her birinin yatık “S” şeklinde olduğu gözlemlenen sonuçlardır.

Karagöz *et al.* (2008) yoğunluk dalga akış osilasyonları üzerine yatay su kaynamalı, elemanlı boruda yaptıkları çalışmada yoğunluk değişimi tipi osilasyonların diğer dinamik osilasyon tipleriyle karşılaştırıldığında daha küçük genliklere ve daha yüksek frekanslara sahip oldukları gözlemlenmiştir. Elemanlı ve boş borular için kütle akış oranı osilasyonları ve giriş basıncının periyot ve genlikleri kütle debisi ile doğru orantılıdır. Giriş basınç osilasyonlarının periyot ve genliklerinin artan kütle debisi ile arttığı, giriş sıcaklığının azalması giriş basınç osilasyonlarının periyot ve genliklerinin arttığı görülmüştür.

Quibén *et al.* (2009) yaptıkları çalışmalarında 2 ve 3 mm yüksekliğinde, yatay yassılaştırılmış, farklı dört bakır boru kullanmak suretiyle kaynamalı akış için iki fazlı basınç düşümü verileri saptanmış ve iki fazlı sürtünmeli basınç düşümü değerlerine ısı akısının kayda değer ölçüde bir etki yapmadığını gözlemlenmiştir. Moreno Quibén ve Thome'nin eşdeğer çap için kullanılan dairesel boru modeli yassılaştırılmış boru modeli için elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve yassılaştırılmış borudaki basınç düşümü değerlerini belirlemek için uygulanan bu modelin elverişsiz olduğu kanısına varılmıştır.

Kakaç *et al.* (2009) yaptıkları çalışmada dikey ve yatay borulu kaynamalı sistemlerde taşınmalı iki fazlı akış kararsızlıklarını incelemişlerdir. Drift-flux modelinden türetilen nümerik çözüm eşitlikleri ile kararlı durum sistemlerinde basınç düşümü karakteristikleri belirlenmiştir. Nümerik çözümler açık sonlu fark şeması yardımıyla belirlenmiş ve nümerik çözüm verileri deneysel bulgular ile doğrulanmıştır. Osilasyonların genlik ve periyotları, başlangıçtaki negatif eğim noktasında kütleli debi

ile ters orantılı ve Drift-flux modeli ile belirlenmiş kararlı durum karakteristikleri ve osilasyonları deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.

Venkatesan *et al.* (2010) yaptıkları çalışmada, hava ve su kullanılarak, dar bir boru içindeki iki fazlı basınç düşümü verileri üzerine çapın yaptığı etkiyi; 0,6, 1,2, 1,7, 2,6 ve 3,4 mm iç çaplarındaki dairesel borularda incelemişlerdir. Daha küçük boru çaplarında daha farklı ve değişik akış şekilleri izlenmiştir. Basınç düşümü ölçülerek homojen model ve Lockhart-Martinelli modeli gibi farklı mevcut modeller ile karşılaştırılmış fakat mevcut modellerin görüntülenen bütün akış rejimleri için basınç düşümünün saptanmasında yeterli olmadıkları görülmüştür. Annular rejimdeki akım katmanlaşmasının, küçülen yüzey gerilimine etkisinin kayda değer olduğu görülmüştür. Sıvı-gaz etkileşim parametresinin akış rejimi tabanlı modifikasyon yaklaşımı, dar borularda basınç düşümünü saptamak için çok önemli bir metod olduğu görülmüştür.

Liang *et al.* (2010) iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine yatay düz boru evaporatöründe yaptıkları çalışmada basınç düşümü ile kütleli debi arasındaki ilişki, sabit ısı akısı ve buharlaşma basıncı ile ölçülmüştür. Yoğunluk dalga osilasyonlarının neredeyse bütün kütle hızlarında görüldüğü, düşük genliklere sahip oldukları ve periyotlarının 1 ile 3 arasında değiştiği saptanmıştır. Deneysel olarak basınç düşümü tipi osilasyonların ve termal osilasyonların sınır başlangıç verileri elde edilmiş, üç tip osilasyonun test sonuçları ve sınır değerleri matematiksel modellerle belirlenmiştir. Basınç düşümü osilasyonlar ve termal osilasyonların deney başlangıç koşulları deney sonuçlarıyla elde edilmiştir. Ayrıca başlangıç ampirik korelasyonları homojen faz modeli ile elde edilmiştir. Bu araştırmadaki sonuçlar soğutma sistemindeki iki fazlı akış kararsızlıklarının mekanizmalarını daha iyi anlamaya olanak sağlamasının yanı sıra soğutma sisteminin karşılaşılabileceği ciddi osilasyon sorunlarına karşı yapılacak tasarım ve dizayn için kullanılabilir.

Marchitto *et al.* (2011) yaptıkları çalışmada paralel dikey kanallar içerisinde iki fazlı akış dağılımına başlık içindeki akış yönünün etkisini araştırmışlardır. Deneylerinin amacı kompakt ısı değiştiricisi içinde gelişmiş distribütörlerin tasarımını ve akış dağılımını en

uygun şekle getirmek için iki aşamalı bir yatay başlık içerisinde akış dağılımının temel mekanizmalarının anlaşılması içindir. Deneyde; paralel düşey kanalda faz/kütle dağılımının kanal/distribütör geometrisine ve giriş koşullarının etkisine bağlı olduğu gözlemlenmiştir.

Omeroglu *et al.* (2012) sabit basınç, sabit ısıl güç ve sabit çıkış kısıtlayıcısı koşullarında adım, kütsel debi ve giriş sıcaklığının iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine etkilerini yatay dairesel kesitli boru sisteminde incelemişlerdir. Deney sonuçları boş boru sistemi ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarını BDO ve YDO açısından değerlendirmişler ve bütün borular için osilasyon sınırlarını belirlemişlerdir. Kararsız bölge sınırlar arasındaki mesafe arttıkça genişlemiş ve adımlar azaldıkça da sistem daha kararlı hale gelmiştir.

Omeroglu *et al.* (2013) iki fazlı akış kararsızlıklarını bükülü şerit ve yaylardan mamül boru içi elemanlarının zorlanmış taşınımli kaynamalı yatay boru sisteminde incelemişlerdir. Deneyler üç farklı giriş sıcaklığı için, 7,5 bar sistem basıncı ve 24kW ısıl güç uygulanarak sabit çıkış kısıtlayıcısı koşullarında giriş aşırı soğutmasının etkisini incelemek amacıyla yapılmıştır. Sonuç olarak boru içi elemanlarının kullanımı osilasyonların görüldüğü kararsız bölgeyi daraltmış ve efektif çap arttıkça osilasyon sınırları genişlemiştir. Bu sonuçlara ilaveten boru içerisindeki elemanların adımları küçüldükçe sistemin daha kararlı hale geldiği gözlemlenmiştir.

Omeroglu *et al.* (2013) yaptıkları çalışmada iki fazlı akışlarda boru içi yay elemanlarının dinamik kararsızlıklara etkisini araştırmışlardır. Zorlanmış konveksiyon kaynaması için pürüzsüz boru verileri ile kıyaslamışlardır. Deneylerde kullanılan boru modeli dairesel borudur ve iş yapan akışkan olarak su kullanılmıştır. Dairesel enine kesitler ihtiva eden iki farklı adımda ($H/D=2,77-5,55$) sarmal tel kullanılmıştır. Kütsel debi (110g/s -20 g/s) ve giriş sıcaklıkları (15°C-35°C) YDO ve BDO hakkında ayrıntılı fikir sahibi olmak amacıyla farklı değerler arasında değiştirilmiştir. Her yapılandırma için tüm giriş sıcaklıklarında YDO ve BDO'ların oluştuğu gözlemlenmiştir. Analizler kütsel debi ve giriş sıcaklığındaki azalmanın YDO ve BDO genlik ve periyotları ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

Guo *et al.* (2014) yaptıkları deneysel ve teorik çalışmada iki fazlı akış karakteristiklerini, boru içinde ısı transferi süresince yoğunluk değişimini ve basınç düşümünü incelemişlerdir. Basınç düşümünün ısı gücü artışı ile doğru orantılı ve uzun ısı aktarım hattında kısa ısı aktarım hattındakinden daha fazla olduğu bulunmuştur. Basınç düşümündeki artış daha küçük eğim açısında olmuş ve buhar kalitesinin de daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Yesilyurt *et al.* (2015) yaptıkları deneysel çalışmada yatay düz bir boru içinde zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı iki fazlı akış sisteminde ,boru içi ısı transfer iyileştirme elemanı olarak konik sarımlı farklı yay adımlarından oluşan elemanların, sabit basınç sabit giriş sıcaklığı, sabit ısı gücü ve çıkış kısıtlayıcı koşullarında etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak minimum nokta ısı gücünün artmasıyla karakteristik eğri sağa kaymış bununla beraber belirli bir kütleli debide basınç düşümünün ısı gücü ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. İki fazlı bölgede yapılan dört farklı deneysel çalışma için en yüksek ve en düşük basınç düşümünün olduğu sistem saptanmıştır.

Pooya Mirzabeygi, Chao Zhan *et al.* (2015) yaptıkları çalışmada, iki fazlı akışkan akışını ve buhar yüzey kondenserlerindeki ısı transferini simüle etmede hangi modellerin en doğru olduğunu belirlemek için çeşitli türbülans modelleri karşılaştırılmıştır. Sayısal yöntem, yoğunlaştırılmayan gazlar için hem gaz fazı hem de sıvı faz ve kütle kesimi koruma denklemi için kütle ve momentum korunum denklemlerine dayanmaktadır. Modifiye edilmiş standart $k - \epsilon$ ve RNG $k - \epsilon$ modelleri, tüp demetleri ve iki fazlı etkileşimlerin gaz fazı türbülansı üzerindeki etkilerini açıklamak için önerilmiştir. Borulara akan soğutucu akışkandaki sıcaklık farkının etkisini hesaba katmak için yarı-üç boyutlu bir yaklaşım kullanılır. Son olarak, sayısal sonuçlar önerilen türbülans modellerinin performansını değerlendirmek için deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Madhavi *et al.* (2016) Küçük kanallarda kaynayan iki fazlı akış, güç ve proses endüstrilerinde çeşitli uygulamalarda mevcuttur. Isı transferi, kaynama akış rejimleri, akış kararsızlıkları, basınç düşüşü ve kurumuş kanallarda iki fazlı akışla ilgili önemli

konulardan bazılarıdır. Bu çalışmada odak, 19 mm çapında tüplerde iki fazlı akışta kaynamada basınç düşüşü üzerinedir. Bu borular tipik olarak buhar jeneratörlerinde kullanılır. Göreceli olarak sınırlı deneysel veri tabanı 19 mm'lik ID tüpünde mevcuttur. Bu nedenle, bu çalışmada, deney düzeneği, 19 mm'lik ID borusunda, bir buhar jeneratörü tüpünde meydana gelen farklı akış rejimlerinin (alt soğutulmuş suyun önceden ısıtılmasından kuruması için) oluşacak şekilde akış kaynatma çalışması için tasarlanmıştır. Rapor edilen sonuçlar, sırasıyla $9\text{--}27\text{kW/m}^2$ ve $2,9\text{--}5,9\text{ kg/m}^2\text{ s}$ gibi makul bir ısı ve kütle akışı koşullarını kapsamaktadır. Bu çalışmada, var olan korelasyonlar deneysel verilere karşı, atmosferik basınca yakın suyun kaynatılması sırasında tek bir dikey kanaldaki basınç düşüşü açısından değerlendirilmiştir. Bu deneylerin özel bir özelliği, zamana bağlı basınçların kanal boyunca dört noktada ölçülmesidir. Kararlı durum basınç düşüşü tahmin edilir ve kaynama akış rejimlerinin tanımlanması, zaman serileri analizi kullanılarak geçici karakteristiklerle yapılır. Deneysel veriler ve buna karşılık gelen sonuçlar rapor edilen korelasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların, küçük kanallarda akış kaynağının önemli yönlerini anlamak için faydalı olduğu gözlemlenmiştir.

Chirag R. Kharangate *et al.* (2016) Azaltılmış yer çekimlerinde akış kaynatma davranışının anlaşılması, bu alandaki gelişimin önündeki en büyük zorluklardan biridir. Gelecekteki uzay araçlarında iki fazlı termal kontrol sistemleri (TCS) kullanılacaktır. Maliyetli azaltılmış uygun yöntem yer çekiminin akış kaynaması üzerindeki etkisini araştırmak için zemin deneylerini gerçekleştirmektir. Yer çekimine göre farklı yönlerde deneyler yapılmıştır. Bu makale, iki bölümden oluşan bir çalışmanın ilk kısmıdır. Bir duvar boyunca ısıtılan dikdörtgen bir kanalda FC-72 akışlı kaynama mekanizmalarını araştırmayı amaçladı ya da iki karşıt duvar. Denemeler dikey yukarı akış, dikey aşağı akış ve yatay olarak gerçekleştirilir. Akış, kütle hızındaki büyük değişikliklere, giriş kalitesine ve duvar ısı akısına maruz kalır. Detaylı ölçümler oryantasyon etkilerini ve dolayısıyla yer çekimini, kaynama eğrisinde, yerel ve ortalama ısı transfer katsayıları ve basınç düşüşü ve ara yüzey davranışı ile ilişkileri yüksek hızlı video ile yakalandı. Yatay akış için, yer çekiminin etkileri kayda değer şekilde yansıtılır, düşük kütle hızlarında kanal boyunca tabakalaşma, yer çekimine yardımcı olan

buhar çıkarma ve sıvı fazında. Üst ısıtmalı duvar boyunca buhar biriktirir. Kanal boyunca buhar oluşumunda, dikey için hem tek taraflı hem de çift taraflı ısıtma ile yukarı akış ve dikey aşağı akış, daha iyi bir simetri vardır. Isı transfer katsayısı önemli varyasyonlar gösterir. Düşük kütle hızlarında farklı yönelimler ve ısıtma konfigürasyonları arasında, ancak etkisiz hale gelir $800 \text{ kg} / \text{m}^2$ 'nin üzerinde bir oryantasyona, bu kütle hızının etrafındaki herhangi bir yerçekiminin etkisinin eylemsizliğini kanıtlamak etkisizdir. Düşük kütle hızları için, basınç düşüşleri dikey yukarı akış ve dikey aşağı akış için oldukça eşittir ancak yatay akışlardan daha büyüktür. Bununla birlikte, oldukça eşit basınç düşüşleri elde edilir. Tüm yönelimler için yüksek kütle hızları mevcuttur. Genel olarak, bu çalışma iki fazlı basınç üzerindeki gravite etkilerini kanıtlamaktadır.

Sendogan Karagöz *et al.* (2017) Yaptıkları deneysel ve sayısal çalışmada, eşanjör borusu içinde türbülans akışı oluşturan silindirik türbülator ile ısı transfer hızını arttırmak için bir girişimde bulunulmuştur. Kanat geometrisinin etkileri, deney tüpleri içerisindeki ısı transfer oranını araştırmak için de incelenir. Deneyler farklı türbülator aralıklarında (adım_{1,2,3} = 101–216–340 mm) ve çeşitli türbülator açılarında ($\alpha_{1,2,3} = 0^\circ - 45^\circ - 90^\circ$) gerçekleştirilir. Tüp içindeki su akış hızı, istenen Reynolds sayılarına ($Re_{1,2,3} = 6000 - 11.000 - 17.000$) yaklaşmak için üç farklı aralıkta ayarlanır. Nusselt sayısı, Reynolds sayısı ve sürtünme faktörünün etkisi ayrı ayrı incelenmiştir. Tüm deneyler için, kullanılan tüp ekleri nedeniyle Nu sayısındaki artış, ilgili profillerde, birbirleriyle ve düz tüp ile karşılaştırılır. Isı eşanjör tüpüne yerleştirilmiş boru eklerinin, Nu sayısı ve enerji tasarrufunda önemli bir artışa yol açtığı sonucuna varılmıştır. Farklı deneme sayıları arasında, çeşitli Re sayılarında ortalama değer kullanılarak, en yüksek Nusselt sayısı, $Sy_1 = 101 \text{ mm}$ 'de elde edildi; bu, düz tüpünden %24 daha fazla oldu. Bu değer, sırasıyla $Sy_2 = 216$ ve $Sy_3 = 340 \text{ mm}$ için %18.7 ve %8.3 idi. Bu şekilde, sürtünme faktörü için sonuçlara göre 0.30, 0.19 ve 0.14 idi. Sunulan çalışma, akış davranışını ve ısı transfer özelliklerini analiz etmek için ANSYS Fluent 16 yazılımı ile simüle edilmiştir.

Andriyanto Setyawan *et al.* (2017) Hava-su yatay dairesel iki fazlı akıştaki çevresel film kalınlığı dağılımı, iletkenlik probu kullanılarak 26 mm boru çapında incelenmiştir. Yüzeysel gaz ve sıvı hızları sırasıyla 10-40 m / s ve 0.025-0.4 m / s idi. Genel olarak, film hızı, sıvı hızı azaldıkça ve gaz hızı arttıkça azalır. Düşük yüzeysel gaz hızı için, sıvı film kalınlığı dağılımının yüksek asimetrisi genellikle bulunur. İçinde ilaveten, alttan daha düşük olmak üzere borunun üst yarısındaki sıvı filmi çoğunlukla frekanslı dalgaların dalgalanmasından oluşur. Mevcut deneysel aralık en düşük yüzeysel sıvı hızındadır. Tabanda ortalama film kalınlığı 0.24 mm ile 1.3 mm arasında değişmektedir. Bu arada, en yüksek yüzeysel sıvı hızı, yüzeysel gaz hızına bağlı olarak, 1.0 ile 4.29 mm arasında değişir. Yüzeysel gazın hızı arttıkça, sıvı film kalınlığı dağılımının daha üniform bir şekli bulunur. Bu akış koşulu altında, üstteki dalga alt yarıninkine benzer bir frekansa sahiptir ve uyumlu bir sıvı dalgası bulunur. Film kalınlığını herhangi bir çevresel pozisyonda tahmin etmek için üzerinde ampirik bir ilişki önerilmiştir (Fiziğinin temeli). Mevcut deneysel verilerle karşılaştırıldığında korelasyon Çevresel sıvı film kalınlığı dağılımını tahmin etmek için iyi bir özelliğe sahiptir.

Chuanshuai Donga, Takashi Hibikib (2018) Yatay bileşenlerde iki bileşenli gaz-sıvı iki-fazlı slug akışı pek çok endüstriyel uygulamada sık sık meydana gelir. Akış ve ısı transfer özellikleri, aralıklı akış yapıları nedeniyle karmaşıktır. Bu çalışmanın amacı, slug akışının ısı transfer özelliklerini tahmin etmenin önemini göstermektir. İki bileşenli iki fazlı slug akışı için yarı teorik bir ısı transferi korelasyonu geliştirilmesi Reynolds ve Chilton-Colburn analogileri kavramına dayandırılmıştır. İlk olarak, mevcut veritabanları hakkında kapsamlı bir literatür taraması ve iki bileşenli iki fazlı slug akışı için ısı transfer katsayısı korelasyonları yapıldı. Daha sonra 500 deneysel veri ve 8 ısı transferi korelasyonu toplandı. Toplanan veritabanı arasındaki karşılaştırma ve korelasyonlar, korelasyonların hiçbirinin bütün veri tabanını tatmin edici bir şekilde tahmin edemediğini göstermiştir. Isı transferi ve basınç düşüşü arasındaki ilişki teorik olarak incelenmiş ve geliştirilmiş bir yarı teorik Reynolds ve Chilton-Colburn analogileri ve 16 kaynaktan deneysel sonuçlar toplandı. Karşılaştırma analizi yeni geliştirilen korelasyon ile geniş bir test koşulu yelpazesi ve mükemmel bir öngörü yeteneği sağladı. Yeni geliştirilen korelasyon, verilerin %91.5'inin ortalama mutlak değerle $\pm 30\%$ hata içinde

tahmin edildiğini göstermiştir.%14.0 nispi sapma. Ayrıca, yeni korelasyonun diğer yatay iki fazlı akış rejimleri genişletilmesi tartışıldı. Yeni geliştirilen yarı-teorik korelasyon, yatay borularda iki bileşenli iki fazlı akış transfer katsayısı ısıyı tahmin etmek için faydalı olacaktır.

Xin-Cheng Tu *et al.*(2018) Bir plakalı ısı eşanjörünün başlığındaki iki fazlı (sıvı ve gaz) akış dağılımı deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmada doğal gazın sıvılaştırma işleminde sıvı fazın küçük kütle fraksiyonları dikkate alınmıştır.Sıvı ve gaz akış hızı, PIV / PTV / LIF gibi optik yöntemler kullanılarak ölçüldü.Sıvı ve gaz akışlarının akış dağılışı nicelleştirildi ve ele alındı.Gözenekli bir saptırma takılarak veya giriş nozul konfigürasyonunun modifiye edilmesiyle ilgili problem araştırılmıştır.Sonuçlar bir dağıtıcı içeren bir pervane, girdap yaratıcı sıvı ve gaz fazları sıvı akış dağılımına artırdığını göstermiştir

1.2. Tezin Amaç ve Kapsamı

Alternatif enerji kaynaklarının araştırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması üzerine yapılan çalışmalardaki artışın sebebigelişen sanayi, yaşam standartlarını yükselmesi ve yaşam alanlarının genişlemesi nedeniyle kişisel ihtiyaçların giderilmesi için enerji kaynaklarını devamlı ve hızlı bir şekilde tüketmesive enerjinin elde edilmesinin maliyetinin gitgide artmasıdır. Başlıca alternatif kaynak olarak dünya genelinde enerjinin tasarruf edilmesi ve verimli bir şekilde kullanılması birinci öncelik olarak ortaya çıkmaktadır.Enerji ekonomisi ve enerjinin verimli kullanılması açısından dikkat çeken çalışmalar arasında ısı transferini iyileştirmeye yönelik yöntem geliştirme çalışmaları da önem arz etmektedir. Bu yöntemler genelde “pasif”, “aktif” ve “karma” yöntemler şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Bir akışın kararlı olması demek kanal içindeki akış koşulları sürekli durumdan çok az değiştiğinde akışın başka bir sürekli duruma asimptotik olarak yaklaşması demektir. İki fazlı akışlar için ideal akış durumu akışın kararlı olduğu durumdur. Kararsız akış durumu ise; akışın başka bir sürekli duruma asimptotik olarak yaklaşmadığı veya akışın debi,

basınç, sıcaklık gibi hidrodinamik ve ısı özelliklerinde periyodik salınımların yani osilasyonların oluştuğu durumdur.

İçlerinde iki fazlı akışları ihtiva eden; buhar üreteçleri, soğutma sistemleri, buhar kazanları özel ısı değiştiricileri ve nükleer reaktörler gibi sistemlerde akış kararsızlıkları ile oldukça fazla karşılaşmaktadır. Isı geçişinin kaynamalı ısı transferi şeklinde oluştuğu bu gibi sistemlerde farklı tipte oluşan kararsızlıklar dizayn ve işleme aşamalarında dikkate alınmalıdır. Çünkü sistem basıncında ve akışkan debisinde oluşan dalgalanmalardan dolayı meydana gelen kararsızlıklar, sistemlerin ısı transferinin gerçekleştiği kısımlarında arızalarasebep olmakta ve sistemlerin deforme olmasına yol açmaktadır.

Çizelge 01.1. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi (Boure 1973; Kakaç 1994)

Parametre	Karakteristikler
Kararlı Durum Karakteristikleri	1. Tüm iyileştirilmiş yüzeylerde karakteristik eğri yatık S şeklindedir. 2. İki fazlı akış bölgesi karakteristik eğrinin lokal minimum civarında başlar. 3. İyileştirilmiş yüzeylerde giriş sıcaklığı azaldıkça basınç düşümü azalır. 4. İyileştirilmiş yüzeylerdeki basınç düşümleri düz borulardakinden daha yüksektir.
Stabilite Sınırları	1. Giriş sıcaklığı azaldıkça BDO'nun başladığı nokta düşük debilere kaymaktadır. 2. İyileştirilmiş yüzeylerde osilasyonlar karakteristik egride düz boruya göre daha geniş bir bölgeyi kapsar. Bu bölge ne kadar büyük olursa osilasyonlar da o kadar uzun sürer. 3. Yerleşik iyileştirme aygıtı olarak yay elemanı kullanımında efektif çap azaldıkça stabilite artar. Ancak diğer iyileştirilmiş yüzeyler için bu sonuç genelleştirilemez.
Basınç Düşümü Osilasyonları	1. Kütlesel debi azaldıkça BDO'nun periyot ve genlikleri artar. 2. Giriş sıcaklığı azaldıkça BDO'nun periyot ve genlikleri artar. 3. İyileştirilmiş yüzeylerde BDO'nun periyot ve genlikleri düz borudakine göre daha yüksektir.
Yoğunluk Değişim Osilasyonları	1. Kütlesel debi azaldıkça YDO'nun periyot ve genlikleri azalır. 2. Giriş sıcaklığı azaldıkça YDO'nun periyot ve genlikleri artar. 3. İyileştirilmiş yüzeylerde YDO'nun periyot ve genlikleri düz borudakine göre daha yüksektir.
Termal Osilasyonlar	1. İyileştirilmiş yüzeylerin cidar sıcaklıkları düz borulardakine göre daha yüksektir. 2. İyileştirilmiş yüzeylerde cidar sıcaklıklarının periyot ve genlikleri düz borulardakine göre daha yüksektir. 3. Termal osilasyonların periyot ve genlikleri giriş sıcaklığının azalmasıyla artar. 4. Termal osilasyonların periyot ve genlikleri kütlesel debinin azalmasıyla artar.

Bu dalgalanmalar sonucunda oluşan sorunların başında; kaynama krizleri, ısı yorulmalar, mekanik titreşimler, ısı transfer yüzeyinde oluşan burn-out olayı ve yüksek geçici sıcaklıkların neden olduğu kontrol zorluğu gelmektedir. Bilhassa nükleer santrallerin yakıt donanımlarında bulunan boru cidarlarının termal yorulmalar sebebiyle deforme olarak bünyelerindeki radyoaktif malzemenin çevreye yayılmasına sebep olacağından bu sistemlerin tasarımında akış kararsızlıkları dikkatle incelenmesi gereken bir sorundur (Yeşilyurt 2015).

İki fazlı akışlarda değişik tesirlerin etkisi altında farklı karakteristikte olan kararsızlıklar oluşmaktadır. Etki eden tesirler ve oluşma koşulları birbirinden farklı olduğu için bu kararsızlıkların kontrol ve/veya yok edilme yöntemleri de farklıdır. Her bir kararsızlık tipinin oluşum sebeplerini, kararsızlığın gelişiminin temel mekanizmaları bilinmesi etkin bir metod uygulamak açısından oldukça gereklidir. İki fazlı akış kararsızlıklarının ortaya çıkışı üzerinde genel kabul görmüş teorik bir açıklama olmasa da “statik” ve “dinamik” kararsızlıklar olarak iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Diğer yandan, bu kararsızlıklar üzerinde kanal geometrisi, debi, basınç ve sıcaklık gibi işletme ve sınır şartları oldukça belirleyicidir ve her bir değişkenliğin parametre olarak dikkate alınması sonucunda yapılacak deneysel çalışmaların maliyeti ve zaman alması da düşünüldüğünde sınırlı olacağı görünmektedir.

Bu tez, yatay borularda ısı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış rejimleri ve kararsızlıkları üzerine etkisini incelemek ve daha önce aynı sistemde yapılmış çalışmalarla karşılaştırmak amacıyla hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmalar esnasında kullanılan sistem Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı Transferi laboratuvarında bulunan ve daha önce çeşitli deneysel araştırmalarda kullanılan zorlanmış taşınım, yatay borulu, bir/iki fazlı, akış sistemidir. Daha önce bu sistemde iş yapan akışkan olarak R-11 akışkanı ve “su” kullanılarak yapılan çalışmalarda kullanılan boru çapları ve bu borular kullanılarak yapılan deney sonuçları dikkate alınarak ara bir efektif çapta özel test borusunda incelemeler yapılmıştır. Akışı kısmi aralıklarla toplayıp, kısmi aralıklar ile

kendi seyrine bırakmak maksadıyla hazırlanmış konik sarımlı dıştan içe ve içten dışayay dizilerinden oluşan boru içi elemanlar kullanılarak genlik ve periyotlar üzerine etkileri kıyaslanmıştır. Bu tezin bilimsel bilgi birikimine aşağıdaki noktalarda katkı sağlaması umulmaktadır:

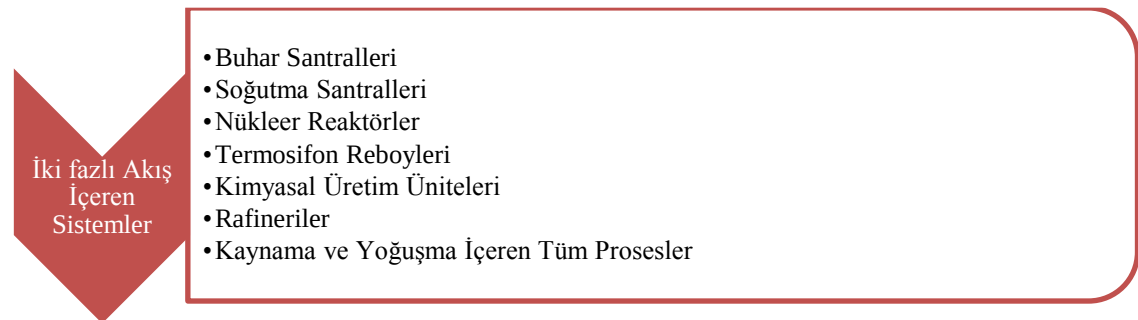
1. İki fazlı akış ihtiva eden yatay borulu evaporatörler ve ısı değiştiricilerin kararsızlıklardan dolayı oluşabilecek burn-out, ısıl yorulma, titreşim ve arızaların meydana gelmesini engelleyecek tasarımının yapılması, çalışma şartlarının buna göre belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Burnout olayı; geometriye (boruların uzunluğu, çapı), çalışma şartlarına (basınç, giriş sıcaklığı, akışkanın hızı, sisteme verilen ısı vs.) ve sınır şartlarına (eksenel ısı akısı dağılımı) bağlıdır. Bu sebeplerle bu parametrelerin kararsızlıklara etkisinin incelenmesi çok önemlidir (Ömeroğlu 2012).
2. İki fazlı akışlarda oluşan osilasyonların sınırları ve akış biçimlerinin yapısı incelenebilecektir. İki fazlı akış kararsızlıklarının boru efektif çapları üzerine etkisi ve sonuçları belirlenebilecek.
3. İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, ısı transfer iyileştirmesinin bu kararsızlıklara etkisini inceleyen araştırmalar sınırlı sayıdadır. Farklı türbülatorler kullanılarak yapılacak çalışmanın ve ardından nümerik modellemenin bu konuya önemli katkı yapacağı düşünülmektedir (Ömeroğlu 2012).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. İki Fazlı Akışlar

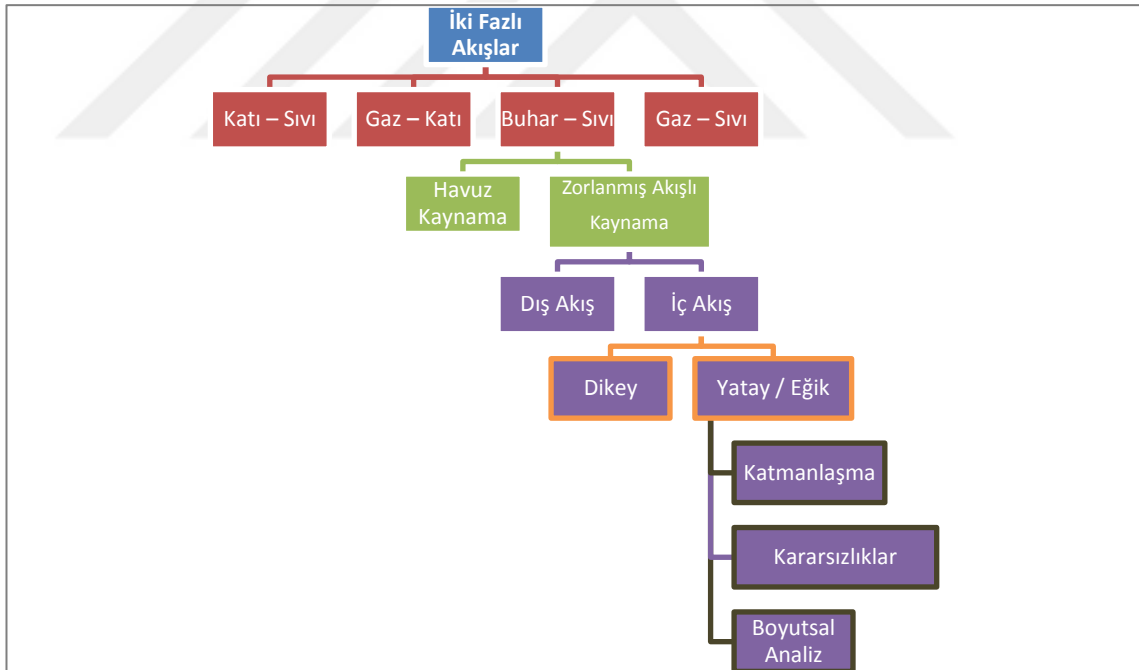
İki fazlı akışın kullanıldığı belli başlı alanlar Şekil 2.1’de sıralanmıştır. İki fazlı akışların en sık kullanıldığı alanlar büyük ölçekli güç santral sistemleridir. Bu sistemler büyük miktarda buhar üretimine ihtiyaç duyduklarından bu buharı üretmek için kullanılan büyük boyutlu kazanlarla ısıtılan boru içerisinde geçirilen basınçlı su zamanla buharlaştırılır. İki fazlı akışın kullanıldığı diğer bir önemli nokta ise nükleer santrallerde iki fazlı akış ile reaktör çekirdeğinden ısıyı çekmek için su kullanılır. Yapılan çok sayıda araştırma borularda oluşabilecek arızaları, basınç düşümlerini ve diğer farklı problemleri önlemeye ya da azaltmaya yöneliktir.

Ayrıca iki fazlı akış pompalarda kavitasyonada sebep olabilmektedir. Buradaki pompanın gösterdiği faaliyet pompalanan sıvının buhar basıncına yakındır. Pompa kanatları yakınlarında yerel olarak oluşabilen basınç daha da düşürse, burada bir faz değişimi oluşarak gaz fazı meydana gelir. Benzer etkiler deniz pervaneleri üzerinde de olabilir ki bu her defasında tasarımcılar için ciddi problemler doğurur. Buhar kabarcığı çıktığında, çok büyük basınç değişimleri oluşturur ki o da türbin veya pervanede büyük hasarlar meydana getirir. Bahsedilen birkaç temel olguda iki fazlı akışı iyi anlamak, tiplerini ve ortaya çıktığı durumları saptamak sistemlerin tasarımı açısından oldukça önem arz etmektedir. (Ömeroğlu 2012).



Şekil 2.1.İçerisinde iki fazlı akış ihtiva eden sistemlerin genel sınıflandırılması

İki fazlı akış iki fazın(gaz, sıvı veya katı) etkileşimli akışını ifade eder ve iki fazlı akıştan bahsedilebilmesi için farklı yoğunluklara sahip iki madde aynı sistemde “dengeli veya dengesiz” şartlar altında eş zamanlı olarak mevcut olmalıdır. En sık görülen iki fazlı akış örnekleri; sıvı-katı, gaz-katı, buhar-sıvı ve gaz-sıvı akışlarıdır. Şekil 2.2’de iki fazlı akışların sınıflandırılması gösterilmiştir. Buhar-sıvı akışı sıvı ısıtıldığı ve sistemde kaynama meydana geldiği zaman elde edilir ve bu akış tipinde iki faz da aynı kimyasal bileşimlere sahiptir. Transport mekanizmasına göre kaynama “havuz kaynama” ve “zorlanmış akışlı kaynama” olarak iki sınıftır. Zorlanmış akışlı kaynama akış şartlarına göre “dış akış” ve “iç akış” olarak iki kategoriye ayrılır. Dış akış düzlem yada eğrisel ısı transfer yüzeyi üzerindeki akışkan akışını, iç akış ise dairesel boru yada diğer geometrik kesitleri olan kanal gibi kapalı bir alandan geçen akışı ifade eder. İç akış, akış yönüne göre “dikey akış”, “yatay akış” ve “eğik akış” olarak sınıflandırılır.



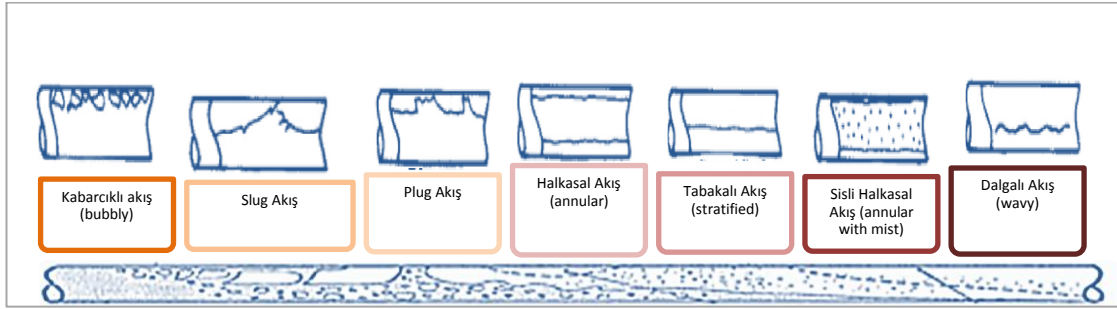
Şekil 2.2. İki fazlı akışların genel sınıflandırılması

İki fazlı akışların ana karakteristik özelliği iki faz arasında bir ara yüzeyin var olması ve gaz-sıvı akışlarında ilgili yüzeyin farklı çeşitlerde şekiller almasıdır. Akış oryantasyonunu ara yüzey üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Yukarıda da

belirtildiği üzere iki fazlı akışlar oryantasyonlarına göre yatay, eğik ve düşey olarak sınıflandırılırlar.

Düşey iki fazlı akışlarda akışın yönü kanalda aşağıyaya doğru olabilir. Yatay iki fazlı akış karakteristikleri düşey iki fazlı akış karakteristiklerinden oldukça farklıdır. Düşey akışlarda akışın hareket yönü ile yerçekimi yönü aynı doğrultuda, boru boyunca herhangi bir kesite dik ve akış borunun eksenine göre simetriktr. Diğer taraftan yatay akışta yerçekimi kuvvetleri akışkan akımına düşey yönde buhar ve sıvı fazları üzerine etki eder, bu ise asimetrik faz dağılımına sebep olur ve faz ayrışması meydana gelebilir. Yerçekimi kuvvetleri yoğunluğu düşükolan buhar fazınıborunun üst taraflarına doğru,yoğunluğu yüksek olan sıvı fazını ise borunun tabanına yönlendirir(Yeşilyurt 2015).

İki fazlı akışlarda belirli şartlar altında meydana gelen akış rejimleri iki fazın bağıl ve mutlak akış debilerine, sistemin geometrisine ve özellikle fazlar üzerine etkiyen kuvvetler arasındaki etkileşime bağlıdır. İki fazlı akışlar için farklı çeşitlerde akış rejimleri tanımlanmış ve çok çeşitli terminoloji kullanılmıştır. Düşey borularda meydana gelen akış rejimleri kabarcıklı akış, slug akış, halkasal akış, halkasal-dağılı akış ve damlacıklı akış rejimleridir. Yatay borularda meydana gelenakış rejimleri düşey borulardakinden oldukça farklıdır.Yatay borularda akış yönüne dik etkiyen yerçekimi kuvvetleri sebebiyle oluşan asimetriklik sonucu düşey akışlardakine nazaran oldukça karmaşıktır. Yatay borulardaki akış rejimleri kabarcıklı akış, slug akış, plug akış, halkasal akış, tabakalı akış, sisli halkasal akış ve dalgalı akış olarak tanımlanır. (Karagöz 2007). Şekil 2.3’de yatay boruda akış rejimleri şematik olarak gösterilmiş ve karakteristikleri ile ilgili kısaca açıklamalar yapılmıştır.



Şekil 2.3. Yatay borulardaki akış rejimleri

A) KABARCIKLI AKIŞ	Bu akış biçimi akışkan içerisinde oluşan kabarcıkların dağınık olarak hareket ettiği akış biçimidir. Yatay boruda kabarcıkların borunun üst kısmına yakın olarak akmasının sebebi yer çekimi ve yoğunluk farklarının etkisidir.
B) SLUG AKIŞ	İki fazlı akışlarda fazlar arasında meydana gelen dalgalanmalar sebebiyle akışkanın boru üst cidarı ile teması sonucunda dağınık şekilde akan kabarcıkların geometrik şekil değiştirmesi ile salyangoz şeklinde birleşerek aktıkları rejimdir.
C) PLUG AKIŞ	Slug akış ve kabarcıklı akış rejimleri arasında özellik gösteren bir rejimdir. Kabarcık yoğunluğunun artması ile şemsiye ya da mermi geometrisinde kabarcıklar oluşur. Bu yeni formdaki akışta yer çekiminin etkisiyle kabarcıklar boru üst cidarına yakın akma eğilimindedirler.
D) HALKASAL AKIŞ	Gaz veya buharın borunun merkezinden aktığı, sıvının ise boru cidarından film tabakası şeklinde aktığı akış rejimidir. Borunun yatay konumu neticesinde alt cidarda oluşan sıvı film tabakası kalınlığı üst cidardakinden daha fazladır.
E) TABAKALI AKIŞ	Sıvı ve buhar fazının yer çekimi etkisi ile birbirinden ayrılması ile yoğunluğu fazla olan sıvı fazının borunun alt cidarında, daha az yoğun olan buhar fazının ise borunun üst cidarında aktığı rejimdir.
F) SİSLİ HALKASAL AKIŞ	Bu akışta gaz fazının çok yüksek değerlere ulaşır. Bu hızlı gaz fazının etkisi ile damla formundaki sıvı fazı pülverize hale gelir.
G) DALGALI AKIŞ	Katmanlı akış rejiminin olduğu bir boruda üst ve alt cidarda bulunan gaz ve sıvı faz şekli, gaz fazı hızının artmasıyla gaz-sıvı arasındaki yüzeyde dalgalı bir geometri oluşumu ile akış biçimi katmanlı akış formundan dalgalı akış formuna geçer.

Ding (1993) yatay boruda akış rejimlerini kabarcıklı, tabakalı, dalgalı, halkasal, plug akış ve slug akış olarak sınıflandırmıştır.

2.2. Kaynamalı Kanalda Basınç Düşümü-Debi Karakteristikleri

Kanal boyunca oluşan basınç düşümü ($\Delta p = p_{giriş} - p_{çıkış}$) ile akış debisi arasındaki ilişki “sistemin kararlı durum karakteristiği” olarak tanımlanır. Bu, bazı araştırmacılarca iç karakteristikler olarak da tanımlanmaktadır. Isıtılan bir kanalda tek fazlı akışta basınç düşümü ile debi arasındaki ilişki aşağıdaki bağıntıyla verilmektedir (Karagöz 2007):

$$\Delta p = k \frac{G^2}{2\rho} + \Delta p_g \quad (2.1)$$

Görüldüğü üzere basınç düşümü debinin karesiyle orantılı olarak değişmekte ve parabolik karakter göstermektedir. Basınç düşümünde oluşanküçük değişikliklere yanıtise aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = k \frac{G_o}{\rho} \frac{dG}{dt} \text{ veya } \frac{dG}{dt} = \frac{d(\Delta p)}{dt} \frac{\rho}{kG_o} \quad (2.2)$$

İki fazlı akışta ise laminer (karışık) momentum denklemi:

$$\Delta p = k\Phi_{2\phi}(G) \frac{G^2}{2\rho} + \Delta p_g(G) \quad (2.3)$$

şeklindedir. Basınç düşümünde oluşan küçük değişikliklere yanıt ise aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = k \frac{G_o}{\rho} \left(\Phi_{2\phi} + \frac{G_o}{2} \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG} \right) \frac{dG}{dt} + \frac{d(\Delta p_g)}{dt}; \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG} < 0 \Rightarrow G \uparrow, \Phi_{2\phi} \downarrow \quad (2.4)$$

veya

$$\frac{d(G)}{dt} = \frac{\rho}{kG_0} \left(\frac{1}{\Phi_{2\phi} + \frac{G_0}{2} \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG}} \right) \frac{d(\Delta p - \Delta p_g)}{dt}; \Phi_{2\phi} + \frac{G_0}{2} \frac{d\Phi_{2\phi}}{dG} \quad (2.5)$$

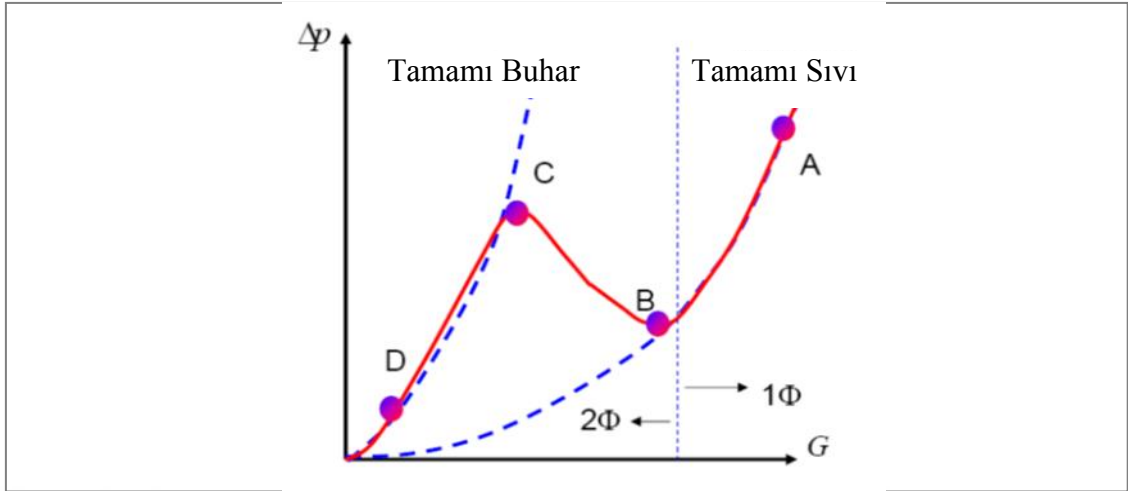
Şekil 2.4’de A noktasında akışkan tek fazlı sıvı haldedir ve debi yüksektir. Sistem basıncı kütleli debinin azalması sebebiyle sürtünme basınç kaybıyla orantılı olarak azalır:

$$(f \approx C/Re^m) \approx G^{2-m} \quad (2.6)$$

Debi azaldıkça B noktasının hemen öncesinde kaynama başlar. Artık buhar üretimi yeterlidir ve iki fazlı akış sürtünmesinden kaynaklanan (Δp) iki fazlı akış yerçekiminden kaynaklanan sürtünmeden (Δp_g) daha etkili olduğundan debinin azalmasıyla basınç düşümü artar. C noktasında hemen hemen bütünüyle buhar fazı vardır. Akış debisi kanalda çok miktarda buhar üretecek kadar düşüktür ve basınç düşümü tekrar tek fazlı buhar yasasına $(\approx G^{2-m})$ uyar. D noktasından sonra yerçekimi prosese baskın olmaktadır. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’den görüldüğü gibi $\Delta p > \Delta p_C$ ve $\Delta p < \Delta p_B$ ise belirli bir basınç düşümü için sadece tek bir debi bulunmaktadır. Oysaki $\Delta p_B < \Delta p < \Delta p_C$ olduğu bölgede tek bir basınç düşümü için birden fazla debi mevcuttur. Bu durumdaki kesişim noktaları tümüyle kararlı değildir. Stabilite kriteri:

$$\frac{\partial(\Delta p)}{\partial \dot{G}} < \frac{\partial(\Delta p_f)}{\partial \dot{G}} \quad (2.7)$$

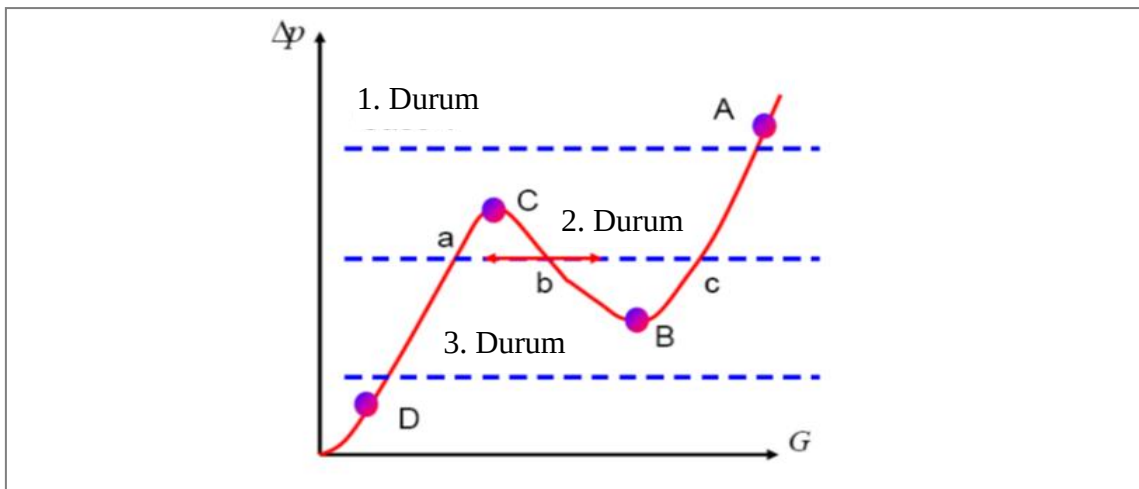
şeklindedir. Bu nedenle (a) ve (c) kesişim noktaları kararlıdır ancak (b) kesişim noktası kararsızdır. (b) noktasında debi hafifçe azalırsa iki fazlı sürtünme basınç kaybı artar, debi (a) noktasına gelinceye kadar daha da azalır.



Şekil 2.4. Karakteristik durum eğrisi

Diğer yanda pompa boyunca basınç artışı sabit değildir ve akış debisiyle değişir. Pompa boyunca basınç artışı (Δp_{pompa}) ile akış debisi arasındaki ilişki pompa karakteristikleri olarak tanımlanır. Bu ilişki ayrıca dış karakteristikler olarak da adlandırılır. Pompa karakteristiği her zaman negatif eğimlere sahiptir; kullanılan pompaya bağlı olarak bu eğim çok dik yada düz olabilir.

$$\frac{d\Delta p_{\text{pompa}}(G)}{dG} < 0 \quad (2.8)$$



Şekil 2.5. Karakteristik durum eğrisi

2.3. İki Fazlı Akışlarda Görülen Kararsızlıklar ve Tipleri

İki fazlı akışlar birçok kararsızlık ve osilasyon olaylarını gösterme eğilimindedirler. Bu sorunların tespit edilmesi ve çözümlenmesi ancak kararlı durumların yani kararsızlıkların sınırlarının belirlenmesiyle mümkün olabilmektedir. Sınır şartları sabitlenmiş bir dizi için birden fazla çözüm bulunmaktadır. Kararsızlıklarının ayrımı genel olarak bütün iki fazlı akış sistemlerinde görülebilen büyük ölçekli (makroskobik) kararsızlıklar ve hidrodinamik kararsızlıklar gibi belirli koşullarda ve yerel olarak oluşan küçük ölçekli (mikroskobik) kararsızlıklar şeklinde yapılması gerekmektedir.

İki fazlı akış kararsızlıkları genel olarak “statik kararsızlıklar” ve “dinamik kararsızlıklar olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Statik kararsızlıklar kararlı durum çalışması açısından bir sistemde süreksizlikleri temsil eder ve bu sistem kararlı durum korunum denklemlerine dayanılarak analiz edilebilir. Statik kararsızlıklar için örnek olarak; akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı), chugging, geysering, burn-out ve bumping gibi olaylar verilebilir. Dinamik kararsızlıklar sık sık osilasyonlara sebep olurlar ve sistemin geçici dinamik ve geri besleme karakteristikleri dikkate alınarak analiz edilirler.

İki fazlı akış statik ve dinamik kararsızlık çeşitleri ile bunların meydana gelmesinde etkin rol oynayan temel mekanizmalar ve karakteristikler Çizelge 2.1’de özetlenmiştir (Karagöz 2007).

Çizelge 2.1. İki fazlı akış kararsızlıklarının sınıflandırılması (Karagöz 2007)

Kararsızlıklar	Kararsızlık Tipi		Mekanizmaları	Karakteristiklikleri
Statik Kararsızlıklar	Temel (veya saf) statik kararsızlıklar	Akış Gezintisi veya Ledinegg Kararsızlığı	Negatif eğimli bölgede karakteristik eğrisi daha dik bir eğime sahiptir.	İç Akış ani ve büyük genlikli dış bir gezinti ile yeni bir çalışma durumuna geçiş yapar.
		Kaynama Krizi	Isıtılan yüzeyden etkin olmayan ısı çekilmesi	Cidar sıcaklık gezintisi ve akış osilasyonu
	Temel relaxation kararsızlık	Akış Rejimi Geçiş Kararsızlığı	Kabarcıklı akış, halkasal akıştan daha düşük boşluk oranına fakat daha yüksek bir basınç düşümüne sahiptir.	Çevrimsel akış rejimi dönüşümleri ve debi değişimleri
	Bileşik relaxation kararsızlığı	"Bumping" (darbeli akış), "Geysering" (püskürtmeli akış) ve "Chugging" (gürültülü akış)	Genellikle çekirdeklenme sitelerinin eksikliği nedeniyle metastabil duruma periyodik olarak ayarlanma	Olası püskürtme ve emmeli aşırı kızgın ve şiddetli buharlaşma
Dinamik Kararsızlıklar	Temel (veya saf) dinamik kararsızlıklar	Akustik Osilasyonlar	Basınç dalgalarının rezonansı	Sistemde oluşan basınç dalgalarının yayılması için gerekli zamana bağlı yüksek frekanslar (10-100 Hz)
		Yoğunluk Değişim Osilasyonları	Debi, yoğunluk ve basınç düşümü arasında gecikme ve feed back etkileri	Sürekli bir dalga geçiş zamanıyla ilgili olarak ortaya çıkan düşük frekanslar (1 Hz)
	Bileşik Dinamik Kararsızlıklar	Termal Osilasyonlar	Değişken ısı transfer katsayısı ile akış dinamikleri arasında meydana gelen etkileşim	Film kaynamada meydana gelir.
		Kaynamalı Su Reaktör Kararsızlığı	Akış dinamikleri ile ısı transferinin yanı sıra boşluk oranı sabiti ve reaktivitesi arasındaki etkileşim	Sadece düşük yakıt zaman ve düşük basınçlar altında şiddetlidir.
		Paralel Kanallarda Kararsızlık	Kanal Az sayıdaki paralel kanallar arasındaki etkileşim	Çeşitli akış dağılım modları
	İkincil olay olarak bileşik dinamik kararsızlıklar	Basınç Düşümü Osilasyonları	Akış gezintisi, kanal ve sıkıştırılabilir hacim arasında dinamik etkileşim başlatır.	Çok düşük frekanslı periyodik proses (0.1 Hz)

2.3.1. Statik kararsızlıklar

Statik kararsızlıkların etkisi altında kararlı sistemler belirli koşullardahilindekararsız hale gelebilir ve bir tedirginlik neticesinde tamamen farklıkararlı çalışma durumuna geçerler. Kararlı bir akış demekoluşan mikroskobik kararsızlıklının sürekli osilasyonlara sebep olmadığı, bu tür tedirginliklerin ve salınıngeçici olduğu akış rejimi demektir. Zaman geçtikçe oluşan tedirginliklerin sebebiyle bir kararlı çalışma noktasından başka bir çalışma noktasınınmeydana geldiği kararsızlıklara "statik kararsızlıklar" denir.

Statik kararsızlıklar aşağıdaki şekildesınıflandırabiliriz:

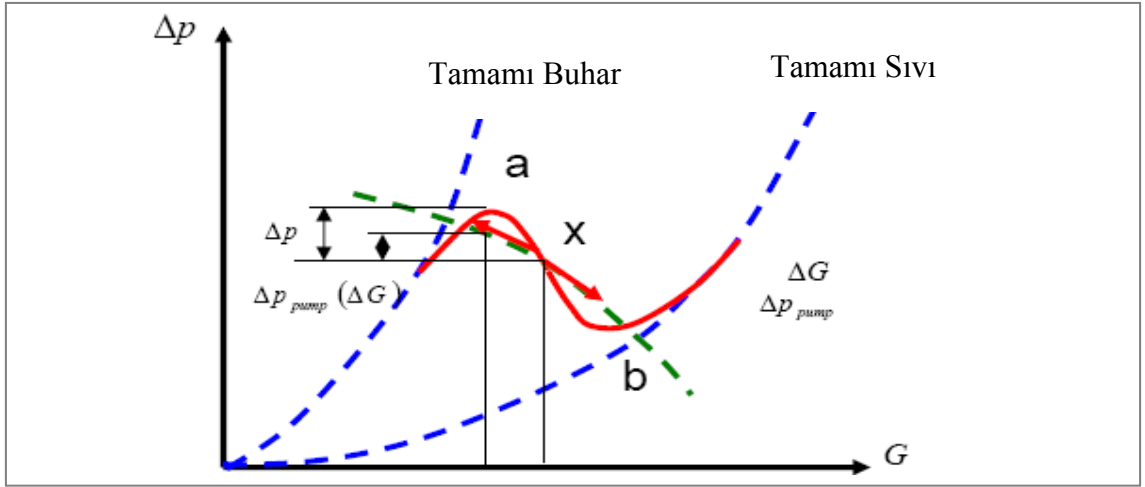
1. Temel veya saf statik kararsızlıklar (akış gezintisi ve kaynama krizi)
2. Temel relaxation kararsızlığı (Akış rejimi geçiş kararsızlığı)
3. Bileşik relaxation kararsızlığı (bumping, geysering ve chugging)

Çizelge 2.2. İki fazlı akış kararsızlıklarını etkileyen parametreler (Karagöz 2007)

Temel Parametre	Parametre
Kanal geometrisi	Kanalın boyutu ve uzunluğu
	Kanalın hacmi
	Yüzey koşulları
	Sistemdeki kanal sayısı (tek veya çok kanal)
	Giriş ve çıkış akış kısıtlayıcıları
Çalışma koşulları	Kanalın yatay ya da dikey oluşu
	Sistem basıncı
	Kütlesel debi
	Isı gücü
	Giriş aşırı soğutması
Sınır şartları	Isıl sınır şartları
	Giriş ve çıkış basınçları

2.3.1.a. Akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı)

İlk olarak Ledinegg tarafından 1938'de analiz edildiğinden bu kararsızlık literatürde “Ledinegg Kararsızlığı” olarak anılmaktadır. Ledinegg, iç karakteristik eğrisinin iki pozitif eğimli kısma ek olarak bir de negatif eğimli bölgeye sahip olduğunu gözlemlemiştir. Böylece akış debisinin basınç düşümü için çok önemli bir parametre olduğunu saptamıştır. En yüksek giriş debisinde kaynama oluşmaz ve basınç düşümü (Δp) tek fazlı sistemin basınç düşümü şeklindedir. Daha düşük debilere gidildikçe, debi azalmasına rağmen toplam basınç düşümü artmaya başlar. Debi daha da azalırsa kanalda kaynama çok daha fazla oluşur. Bunun sonucunda debiyi azaltmanın etkisi iki fazlı akış sürtünmesinin etkisini yener ve toplam basınç düşümü tekrar azalmaya başlar. En sonunda çok düşük debilerde boru tamamen kızgın buhar ile dolar ve basınç düşümü tekrar tek fazlı sistemin basınç düşümündeki gibi olur. Şekil 2.6'daki kesikli çizgi kaynamalı kanalda pompaya ait dış karakteristik eğrisini göstermektedir. Dış karakteristik eğri iç karakteristik eğriden daha düz olduğunda (x) noktasında çalışmak imkânsız olmaktadır ve şekildeki x pozisyonu kararsızdır. Debi küçük bir çalkantı sonucu daha düşük bir değere indiğinde, sistemde dış sistemde mevcut olandan daha fazla basınç düşümü oluşacak ve akış debisi daha da azalacaktır. Bu nedenle debide hafif bir azalış (a) noktasına ani bir değişime sebep olacaktır. Yeni denge noktası (a) genellikle burnout'un oluştuğu düşük bir akış debisine karşılık gelir. (a) noktasında çalışma yüksek buhar çıkış kurulum derecesi, yüksek cidar sıcaklıkları ve olası boru arızası ile ilişkili burnout'a neden olabileceğinden sorunlu olabilir. Görüldüğü gibi düz bir dış karakteristik eğrisiyle iç karakteristik eğrisi üzerinde minimum noktanın sol tarafında çalışmak neredeyse imkansızdır. Bunun aksine debide herhangi bir küçük artış (b) noktasına akış gezintisine sebep olacaktır. Akışın çoğunlukla aşırı soğutulmuş olduğu (b) noktasında çalışan sistemde birkaç sorun ortaya çıkabilir. Bu tip basınç düşümü karakteristikleri daima statik tip kararsızlık sorunu oluştururlar ve sistemi yeniden tasarlayarak veya akış debisiyle orantılı ilave basınç düşümü üreten bir giriş kısıtlayıcısı ilave ederek düzeltilebilir (Ömeroğlu 2012).



Şekil 2.6. Ledinegg kararsızlığının şematik olarak gösterimi (Karagöz 2007)

Ledinegg kararsızlığı ile ilişkili şunlar ifade edilebilir:

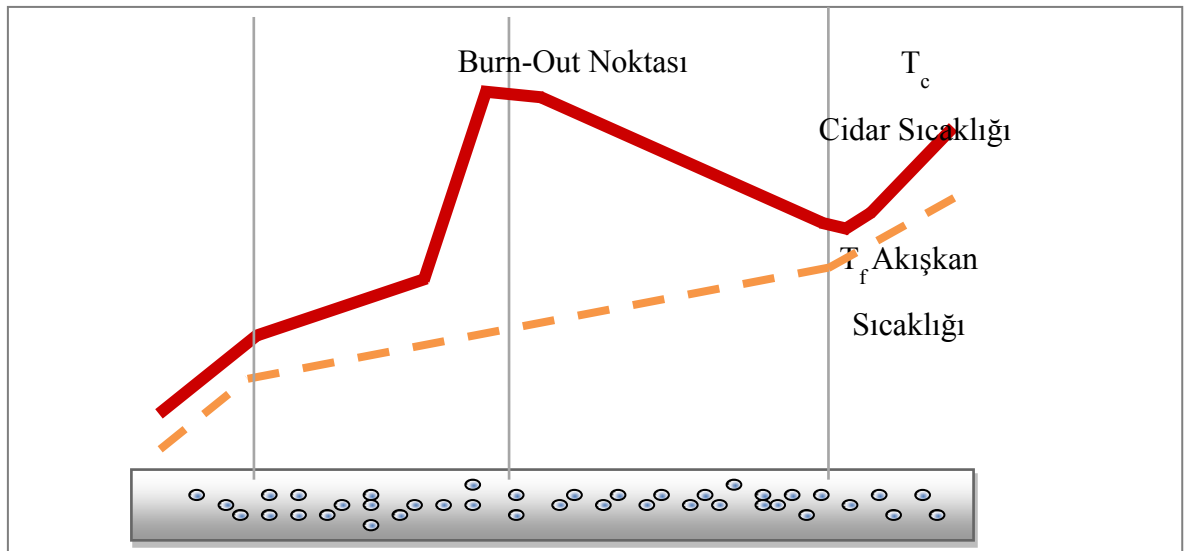
1. Akış gezintisi yada Ledinegg kararsızlığı oluşumunda etkin olan parametreler basınç düşümü ve akışkan debisidir.
2. Bu kararsızlıklar debinin artması sonucu sürtünme, ivmelenme ve yerçekimsel basınç düşümleri toplamının azalması durumunda meydana gelir.
3. Kanal basınç düşümü-Debi eğrisindeki eğimin Sistem basınç düşümü-Debi eğrisindeki eğimden matematiksel olarak daha küçük olması durumunda akış gezintisi meydana gelir.

2.3.1.b. Kaynama krizi

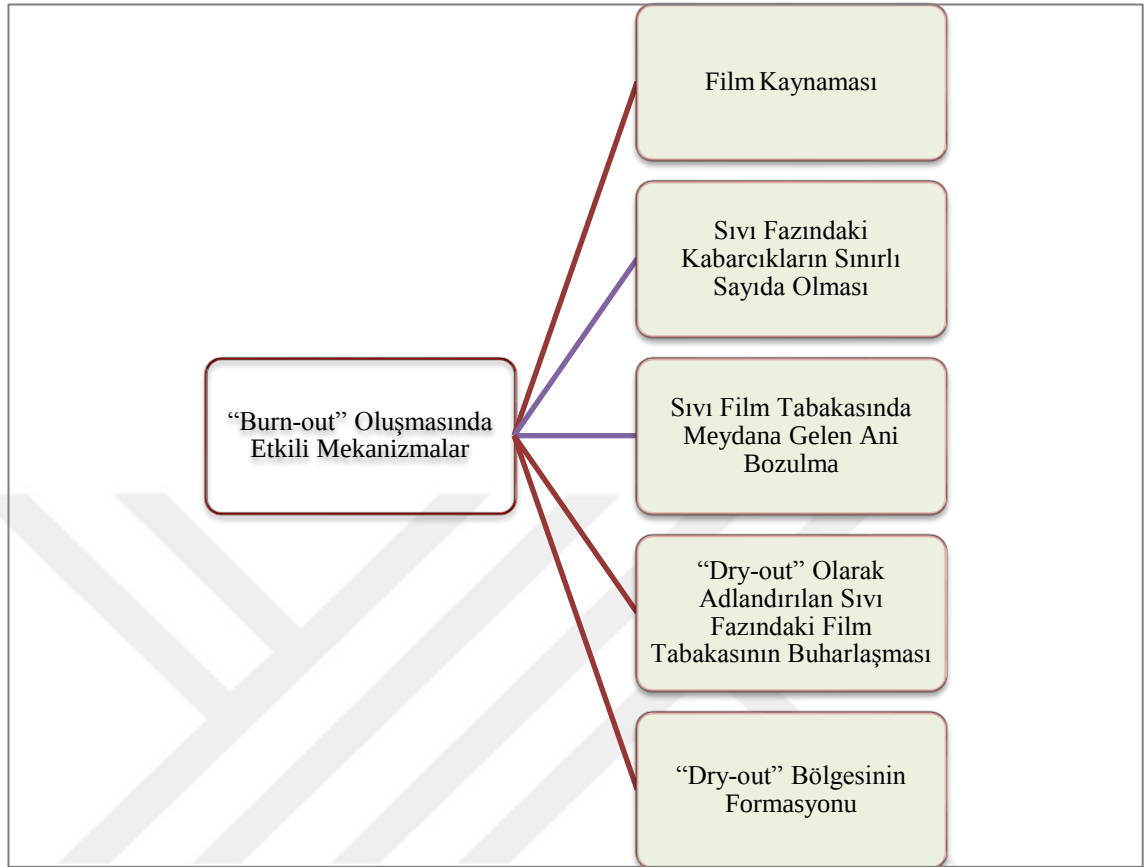
Kaynamakta olan sıvı fazlı bir akışkan ile temas eden bir yüzeye uygulanan ısı akısı tedricen artırıldığında sıvı fazındaki akışkan ile yüzey arasında sürekli temasın kesildiği bir noktaya ulaşılmaktadır. Kaynama krizi olarak tanımlanan bu olay (burn-out) oluştuğuzaman sıvı fazındaki akışkan ile yüzey arasında nispeten daha düşük termal kondüktiviteye sahip buhar fazındaki akışkanın girmesi sonucunda akışkana iletilen ısı transferi oldukça azalmaktadır. Bu nedenleğer kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı azaltılmaz ise kanal yüzey sıcaklığı hızlı bir eğilim ile ani bir şekilde oldukça yüksek sıcaklık limitlerine ulaşacaktır. Bu olay kaynamalı ısı transfer alanında “burn-out” olarak

tanımlanmaktadır. Aynı şekilde “burn-out” olayının gözlemlendiği anda ısıtıcı kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı değeri “kritik ısı akısı (CHF)” olarak tanımlanmaktadır. Zorlanmış konveksiyonlu kaynama koşullarında bu olay iki fazlı akış ortamında oluşmaktadır. Özellikle yatay pozisyonda işletilen buhar kazanları ile boylerlerin sahip olduğu boru demetlerinin uzun ömürlü olarak kullanılmaları için boru cidarları ile buhar-sıvı fazlarından oluşan iki fazlı karışımın sıvı fazı arasında uygun ısı transfer şartlarının korunması gerekmektedir. Şayet bu uygun ısı transfer korunmaz ise bunun sonucunda oluşacak termal gerilmeler boru kanalı cidarlarında çatlama, yırtılma ve patlama gibi deformasyonlara neden olacaktır. Yatay bir boyler borusundan oluşan “burn-out” olayı Şekil 2.7’de verilmiştir.

Bu olay genellikle annular akış olarak tanımlanan halkasal akış rejiminde oluşmaktadır. Burn-out olayı eğer kanal uzunluğu kısa ve ısı akısı yeterli miktarda ise kabarcıklı akış rejiminde de oluşabilmektedir. Yine bu olay boru uzunluğu ve ısı akısı limitlerinin yanı sıra diğer etkili parametrelere değerlerine bağlı olarak plug akış rejiminde de ortaya çıktığı araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Yukarıda genel olarak açıklanmaya çalışılan tüm burn-out olaylarının meydana gelmesinde esas rolü oynayan bazı ana mekanizmalar Şekil 2.8’de verilmiştir (Karlı 2000).



Şekil 2.7. Yatay bir ısı değiştirici borusunda oluşan “burn-out” olayı



Şekil 2.8. “Burn-out” oluşmasında etkin parametreler (Karslı 2000)

2.3.1.c. Akış rejimi relaxation kararsızlıkları

Farklı akış rejimlerinin basınç düşümü karakteristikleri, akış rejimi relaksasyon kararsızlıklarına neden olmaktadır. Bu kararsızlıklar sonucunda akışta periyodik değişimler oluşur. Bu duruma örnek olarak aynı gaz ve sıvı debilerinde slug akışlardaki basınç düşümü kabarcıklı akıştakinden daha düşük olması verilebilir. Şayet bir sistem kabarcıklı akış rejiminde akış rejimi sınırının yakınında çalışıyor ise sıvı akış debisinde küçük bir negatif çalkantı slug akışa geçişe sebep olabilir. Bunun neticesinde kanaldaki basınç düşümü azalır. Şayet kanal sabit basınç düşümü şartlarında çalışıyorsa sınır şartlarını sağlamak için daha çok sıvı kanala girecektir. Böylelikle bu durum sistemi kabarcıklı akış rejimine geri döndürecektir. Akış şartları kabarcıklı ve halkasal akış arasında geçişe yakın olduğu zamanki buharlaşan akışlarda örnek olarak verilebilir. Debide geçici bir azalma oluştuğunda;

- Buhar üretimi artar
- Kabarcıklı akış rejiminden halkasal akış rejimine geçilir.
- Basınç düşümü azalır.
- Akış hızlanır ve buharlaşma yavaşlar
- Halkasal akıştan kabarcıklı akışa dönüş oluşur.

Akışın hızlanması ile yavaşlaması arasındaki zaman gecikmesi düzenli aralıklarla bu çevrimin tekrarlanmasını sağlayacak kadar yeterlidir (Karagöz 2007).

2.3.1.d. Geysering

Geysering, doğal sirkülasyon çevriminin düşey kanalında yada tabandan ısıtılan kapalı uçlu boruda meydana gelir. Isı akısı yeterli miktarda yüksek olduğunda, kaynama alt kısmından başlar. Düşük basınçlı sistemlerde, ısı akısı arttığında hidrostatik basınçta düşme nedeniyle buhar üretimi ani olarak artar ve genellikle buharın kanaldan püskürtülmesiyle neticelenir. Daha sonra buharın yerine sıvı gelir ve aşırı soğutulmuş kaynamasız durum yeniden oluşur ve çevrim yeniden başlar. Temel sebebi tek fazlı akıştakinden daha küçük hidrostatik yük sebebiyle iki fazlı akış için olan toplam basınç düşümünün azalmasıdır. Yeterli buhar üretildiğinde ($\Delta p < \Delta p_{siv}$) iki fazlı karışım püskürtülür ve yerine sıvı gelir (Karagöz 2007).

2.3.1.e. Bumping

Doğal konveksiyon ile şiddetli çekirdekli kaynama arasında bir değişim buhar patlaması kararsızlığı (bumping) olarak adlandırılır. Bu kararsızlık, ısıtılan katı yüzeyde bulunan büyük oyuklarda buharın birikmesini engelleme eğilimi gösteren ıslatma oranı yüksek olan sıvılarda oluşur. Alkali sıvı metalleri ve florokarbonlar örnek olarak verilebilir. Her iki akışkan da mühendislik yüzeylerinde sıfıra yakın temas açılarında sahip akışkanlar sınıfında olduklarından bu kararsızlık bu akışkanlarda sıklıkla meydana gelir. Bu şekildeyi ıslatabilme özelliği olan sıvılarda, büyük boşlukların tümü sıvı ile dolabilir, taşabilir ve çekirdekleşme için yüksek aşırı ısıtmaya ihtiyacın olduğu bir durum

meydana gelir. Isı akısı arttığında, çekirdekleşme ve bununla ilişkili sıcaklık gezintisi izlenir. Kararsızlığın karakteristik özelliği yüksek aşırı ısıtma olan bir sıvıda buhar fazının birdenbire ortaya çıkması ve hızlı büyümesidir. Düşük basınçtaki sıvı metal göz önünde bulundurulduğunda meydana gelen buhar patlaması kararsızlığı olayı Çizelge 2.3’de özetlenmiştir (Karagöz 2007).

2.3.1.f. Chugging

Genellikle bir akış kanalından periyodik olarak akışkanın püskürtülmesiyle karakterize edilen çevrimsel olay için Chugging terimi kullanılır. Chugging terimi ilk Fleck tarafından kullanılmıştır. Püskürtme, genellikle kanalın uçlarından basit geçici giriş ve çıkış debi değişimlerinden soğutkanın büyük miktarlarda şiddetli püskürtülmesine kadar değişebilir. Diğer iki fazlı akış kararsızlık olaylarında olduğu gibi çevrim; kuluçka, çekirdekleşme, püskürtme ve akışkanın tekrar girişinden meydana gelmektedir. Chugging kararsızlığının TRIGA vb. çeşitli reaktörlerde olduğu gözlemlenmiştir. Şayet bir boşluk oluşturmak maksadıyla buhar kabarcıkları kanalın en sıcak kısmında birleşirlerse negatif boşluk katsayısı hemen reaktör gücünü azaltır. Azalan güç seviyesinde buhar boşluğu reaktör gücünü orijinal seviyesine döndürecek şekilde ayrışır ve proses tekrar eder (Ömeroğlu 2012).

Çizelge 2.3. Sıvı metalde buhar patlaması kararsızlığı olayı

Sıvı metal yüzeyi çok etkili bir şekilde ıslatır.	Doğal konveksiyon
Birkaç tane çekirdekleşme sitesi kalır.	
Kaynama başlamadan önce sıvı oldukça aşırı ısıtılabilir.	
Sıvı çok hızlı bir şekilde buharlaşır.	Çekirdekli kaynama
Buhar çok büyük bir hacmi işgal eder.	
Sıvı atılır (chugging)	

2.3.2. Dinamik kararsızlıklar

İki fazlı akışta karışımın sıkışabilirliği ile akışın ataleti arasında yeterli etkileşim ve “feed-back” denen geri besleme olayının gecikmesi söz konusu olduğundan yada kaynamalı bir kanalda üretilen buhar üretim oranına göre oluşan yoğunluk değişimi, basınç düşümü ve debi arasında muhtelif “feed-back” olayları söz konusu olduğunda dinamik kararsızlıklar meydana gelmektedir (Karşlı 2000).

Dinamik kararsızlık mekanizmaları herhangi iki fazlı akış sistemlerinde meydana gelen “feed-back” olayı ile alakalı oluşan gecikme zamanlarındaki artışla açıklanabilir. Akış olayında bazen dalga hızı ile orantılı olarak artan geçici türbülans olayı sistemde diğer noktalara da ulaşır. Akışkanın giriş hızındaki türbülansın sistem çıkışında hissedilebilmesi için belirli bir zaman geçmesi gerekmektedir. Sistem boyunca meydana gelen bu gecikmeli türbülansların ardından oluşan yeni türbülanslı akış başlangıçtaki türbülans noktasına geri dönmeye başlar. Belirli koşullar yerine getirildiğinde bu proses kendiliğinden beslenerek süresiz devam edeceğinden sürekli akış osilasyonları oluşacaktır. Bu osilasyonların periyotları sistem boyunca tedirgin bir harekete sahip dalgaların geçiş zamanları ile karakterize edilirler (Karşlı 2000).

Dinamik kararsızlıklar 4 ana gruba ayrılır.

1. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar (YDO, density wave type oscillations)
2. Basınç düşümü tip osilasyonlar (BDO, pressure-drop type oscillations)
3. Akustik osilasyonlar (AO, acoustic oscillations)
4. Termal osilasyonlar (TO, thermal oscillations)

2.3.2.a. Yoğunluk değişim osilasyonları

Yoğunluk değişim osilasyonlarının oluşumu kinematik dalga yayılım olayları ile alakalıdır. İki fazlı akış sistemlerinde akış ortamındaki karışım hızında sıcaklık yada entalpi değerlerinin salınımlı hareketleri neticesinde yine karışımın kinematik dalga hızı

ile birlikte yoğunluk veya “void fraction” olarak bilinen boşluk oranındaki titreşimli hareketi meydana gelmektedir. Bu nedenle içerisinde sürekli olarak daha yüksek veya daha düşük yoğunluklardaki karışım dalgaları akmaktadır. Buharın sıkıştırabilirliği YDO’nun ortaya çıkmasında etkin bir rol oynamaz. YDO’nun ortaya çıkmasında etkin rol oynayan iki ana faktör vardır. Bunlardan birincisi farklı yoğunluklara sahip olan iki bileşenden oluşmuş bir akış durumunun söz konusu olması, ikinci önemli faktör ise bu iki faz bileşeninin farklı oranlarda karışımında bulunduğu halde akışın devam etmesidir (Karşlı 2000).

YDO kararsızlıkları 4 biçimde sınıflandırılabilir (Anglart 2006):

1. Çevrim kararsızlıkları
2. Paralel kanal kararsızlıkları
3. Kanal-kanal kararsızlıkları
4. Nötronik bağlantılı kararsızlıklar

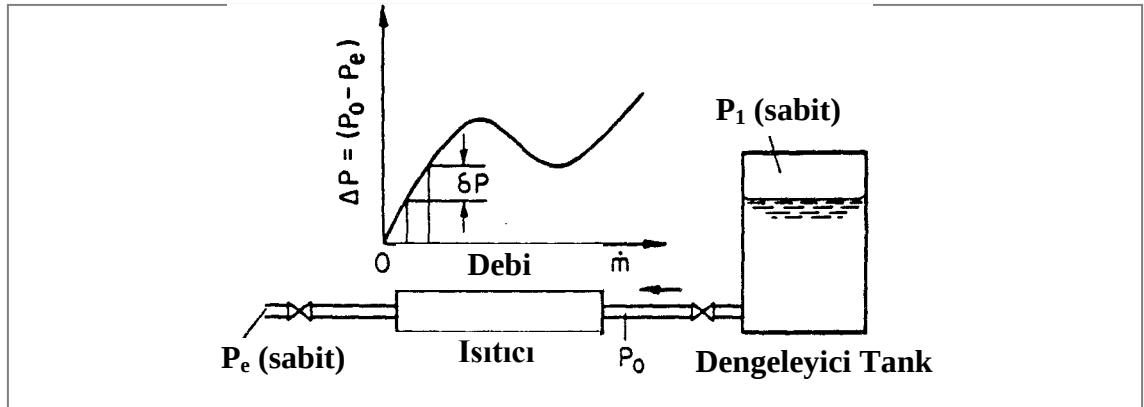
Yukarıda sıralanmış olan YDO kararsızlıklarından öncelikle dikkat edilmesi gereken kararsızlıklar çevrim ve paralel kanal kararsızlıklarıdır. Her bir ayrı kanalında sabit basınç koşullarının olduğu paralel bağlı çok sayıda kanal ihtiva eden sistemlerde “paralel-kanal” kararsızlığı meydana gelir.

YDO’nun oluşumunda etkin rol oynayan bahsedilen parametrelerin daha iyi anlaşılabilmesi için şematik olarak Şekil 2.9’da gösterilen bir ısıtıcı boru analiz edilmiştir. Şekilde 2.9’da ısıtılan boruyu bir kanal ve akış kısıtlayıcısı takip etmektedir. Isıtılan boruda üretilen buhar miktarının sabit olduğu ve sistemin sabit bir çıkış basıncında olduğu kabul edilmiştir. Basınç düşümü-debi eğrisinin pozitif eğimli bölgesinde kısıtlayıcı boyunca olan basınç düşümü debideki değişimle doğru orantılı olarak değişim gösterir, bu azalan debi değeri ile basınç düşümü miktarı da azalması anlamına gelir. Yüksek yoğunluk değerine sahip olan karışımın kısıtlayıcıya erişmesi ile basınç düşümü miktarının artar. Çıkış basıncındaki sabitliğin etkisi ile sistemin debisi azalır. Ayrıca düşük yoğunluklu karışım, buhar üretiminin sabit olması koşuluyla

oluşur. Devam eden proseste yüksek yoğunluklu karışım kısıtlayıcıdan geçmesinin ardından düşük yoğunluklu karışım kısıtlayıcıya ulaşır ve düşük yoğunluklu karışım kısıtlayıcıdan geçtiğinde kısıtlayıcı boyunca olan basınç düşümü miktarı düşerek sistemin debisinin artmasına sebep olur (Liu 1993).

YDO'nun oluşma şekli giriş debisinde ani bir azalma olması göz önünde bulundurularak aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır (Park 2006):

1. Buharlaşma miktarı ani olarak yükselir.
2. Yerel basınç gradyenti artar
3. Kaynama daha erken başlar, yani kaynamanın başladığı nokta kanalın girişine yaklaşıp.
4. Kuruluk derecesi ve boşluk oranı artar.
5. Sıvı filmi halkasal akış bölgesine sıkışır.
6. Giriş bölgesinde meydana gelen akışkanın özgül entalpisi artar.
7. Akış olağandan daha da hızlanır.
8. Daha yüksek yerel sıcaklıklar oluşur ve aşırı soğutma miktarı azalır.
9. Akışın sabit yükü için (tek ve iki fazlı) iki fazlı basınç gradyentindeki artış tek fazlı basınç yükünde azalmaya neden olur ve giriş debisini azaltır.
10. Girişte meydana gelen orijinal çalkantı ile girişteki etkiyi hissetme zamanı arasında bir zaman farkı olur.
11. Osilasyon meydana gelir.



Şekil 2.9. Yoğunluk değişim osilasyonlarının şematik olarak gösterilişi (Liu 1993)

Çizelge 2.4’de çeşitli parametrelerin yoğunluk değişim osilasyonlarına etkisi özet olarak verilmiştir. Çizelgede artar terimi kararlılığın arttığı, azalır terimi ise kararlılığın azaldığı anlamına gelmektedir.

Çizelge 2.4. Çeşitli parametrelerin dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi (Karagöz 2007)

	Kararsızlık Tipi		
	Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar	Yoğunluk Değişimi Tipi Osilasyonlar	Termal Osilasyonlar
Isıtıcı gücünde artış	Azalır	Azalır	Azalır
Çıkış basınç düşümünde artış	Azalır	Azalır	Azalır
Giriş basınç düşümünde artış	Artar	Artar	Artar
Sistem Basıncında Artış	Artar	Artar	Artar
Giriş aşırı soğutmasında artış	Artar	Artar (yüksek ve orta aşırı soğutmalarda)	Artar
Kütleli debide artış	Artar	Artar	Artar
Ortalama yoğunluk oranında artış	Azalır	Azalır	Azalır
Isıtılan uzunlukta artış	Azalır	Azalır	Azalır
Osilasyon periyodu	Orta seviye	En küçük	En büyük

2.3.2.b. Basınç düşümü osilasyonları

İki fazlı akışta basınç düşümü, iki fazlı akışkanların taşınması ve aynı zamanda doğal sirkülasyon sistemlerinde sirkülasyon oranını saptamak için gereken pompalama gücünü düzenleyen, önemli bir tasarım değişkendir. Basınç düşümü osilasyonlarının oluşumunda etkili olan ana faktör akış ortamında sıkıştırılabilir bir hacmin olmasıdır. Bu tip osilasyonlar yalnızca test bölümüne karşılık gelen basınç düşümü, debideki artışla azalmaya başladığı esnada oluşur ve oluşan osilasyonların periyotları sistemde var olan sıkıştırılabilir hacim ile şekillenmektedir (Karlı 2000). Bu osilasyonlar genellikle kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmaktadır.

İki fazlı akış için korunum denklemleri çok fazlı akışlar için olanlarının bir alt kümesi olarak düşünülebilir. Sabit kesit ve kararlı akış durumu için kanallarda geçerli momentum denklemlerinin basitleştirilmiş formlarını kullanmak gerekir. Basınç düşümü osilasyonlarını belirlemede aşağıda sıralan modellerden yararlanılır.

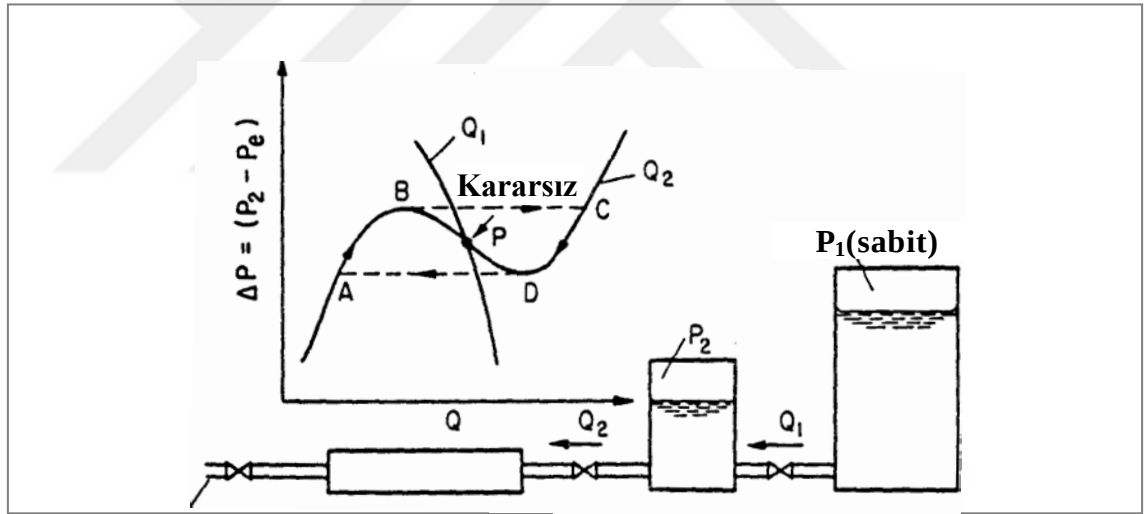
- Homojen Modeli
- Ayrık Akış Modeli
- Olgusal Modeller

Sıkıştırılabilir hacim, dengeleyici bir tank yardımıyla ısıtılan kanalın dış tarafında olabildiği gibi, uzun test bölümlerinin ($L/d > 150$) iç sıkıştırılabilirliği ile de sağlanabilir. Şayet test kısmı çok uzunsa, buradaki iç sıkıştırılabilirlik BDO tip osilasyonlarının oluşması için yeterli olabilir. Ancak iç sıkıştırılabilir hacim durumunda büyük olsa bile iç kısıtlayıcı sistemi kararlı hale getirmeyecektir. Eğer iç sıkıştırılabilirlik yeterli değilse sıkıştırılabilir hacim test kısmının önüne yerleştirilen bir dengeleyici tank ile sağlanır. Dış sıkıştırılabilir hacim kullanılması durumunda, test bölümü ve sıkıştırılabilir hacim arasındaki bir kısma valfi sistemi kararlı hale getirmek için kullanılabilir. BDO tip osilasyonlar, uzun osilasyon periyoduna ve daima yüksek osilasyon genliğine sahip olan ve aşırı cidar sıcaklık yükselmesinin eşlik ettiği osilasyonlardır. Bu nedenle buhar

üretiminin olduğu sistemlerde bu tip osilasyonların oluşmasını engelleme cihazın güvenlik içinde çalışması için çok önemlidir (Karagöz 2007).

BDO tip osilasyonların periyotları genellikle YDO tip osilasyonların periyotlarından daha büyüktür. Bu osilasyonların periyotları sıkıştırılabilir hacmin miktarıyla ilgisabit olan zaman aralığı ile belirlenir. BDO tip osilasyonların periyotları şu parametrelere bağlıdır:

- Sistemdeki buharın hacmine
- Sistemdeki buharın sıkıştırılabilirliğine
- Dengeleyici tank tarafından test kısmının ön tarafında oluşturulan sıkıştırılabilirliğe



Şekil 2.10. Basınç düşümü tipi osilasyonların şematik olarak gösterilişi

BDO tipi osilasyonların mekanizmalarının şematik olarak gösterildiği Şekil 2.10'daki sisteme uygun olan kararlı durum için basınç düşümünü ifade eden bağıntılar şöyle yazılabilir:

$$(P_a - P_s)_s = K_1 \dot{m}_1^2 \quad (2.9)$$

$$(P_s - P_\zeta)_s = f(\dot{m}_2) \quad (2.10)$$

Burada P_a ve P_ζ sırasıyla ana besleme tankı basıncı ile ısıtıcı boru çıkış basıncını, P_s dengeleyici tank basıncını, $\dot{m}_1$ ve $\dot{m}_2$ dengeleyici tank giriş ve çıkış debilerini, K_1 ana besleme tankı ile dengeleyici tank arasındaki sürtünmeli basınç düşümü sabitini, f ise sistem basınç düşümünü ısıtıcı test borusu giriş debisi $\dot{m}_2$ 'ye ilişkilendiren bir fonksiyonu göstermektedir. Herhangi bir kararlı durum çalışma noktası (P) için $\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2$ olması gerekmektedir. Şekil 2.10'dan da görülebileceği gibi sabit P_a ve P_ζ değerleri için iki adet $P_s - \dot{m}$ eğrisi çizilebilir. Bu eğrilerden birisi P_s 'yi $\dot{m}_1$ 'in fonksiyonu olarak göstermektedir. Bu iki faktör arasındaki bağıntı (1) denklemiyle verilmektedir ve bu bağıntıya “dış karakteristikler” adı verilmektedir. Diğer eğri ise P_s 'yi $\dot{m}_2$ 'nin fonksiyonu olarak göstermektedir. (2) denklemiyle ifade edilen bu ilişki “iç karakteristikler” olarak adlandırılmaktadır. Şayet bu iki eğri $d(P_s - P_\zeta)/d\dot{m}_2 < 0$ olan bir bölgede kesişirlerse (Şekil 2.9'da bu kesişim noktası P ile gösterilmiştir) P_s 'deki küçük bir artış $\dot{m}_2$ 'nin $\dot{m}_1$ 'den daha fazla azalmasına neden olacaktır. Bu da dengeleyici tankta sıvı birikimine neden olacak ve bunun sonucunda P_s basıncı daha da artacaktır. Bu yüzden çalışma noktası B noktasına ulaşınca kadar $\dot{m}_2$ eğrisi boyunca hareket eder. Bu proses, dengeleyici tank giriş ve çıkış debileri arasındaki dengesizlik nedeniyle B noktasında durmayacak ve çalışma noktasını C 'ye götüren bir akış gezintisi meydana gelecektir. C noktasında $\dot{m}_2$ debisi $\dot{m}_1$ 'den daha büyüktür ve dengeleyici tanktaki sıvı seviyesi düşer. Dengeleyici tanktaki azot-buhar karışımının basıncının azalmasından dolayı P_2 basıncı azalır ve çalışma noktası eğri boyunca C 'den D 'ye hareket eder. D noktasında başka bir akış gezintisinden dolayı çalışma noktası A 'ya doğru hareket eder ve proses $ABCD$ limit çevrimi boyunca tekrarlanır. Bu model BDO tipi osilasyonları genel olarak açıklar ve bu osilasyonların periyotlarının belirlenmesinde iyi sonuçlar verir (Karşlı 2000).

2.3.2.c. Termal osilasyonlar

Bu tip osilasyonların sıvı filmindeki kararsızlıkla ilgili olarak meydana geldiği belirlenmiştir. Sabit ısı akılı sistemlerde ısıtıcı test borusunun cidar sıcaklıklarında büyük dalgalanmalar söz konusu olmaktadır. Isıtıcı test borusu boyunca verilen bir nokta için film kaynaması arasında akışın titremesi sonucu büyük genlikli sıcaklık osilasyonları oluşmaktadır. YDO, termal osilasyonların ortaya çıkması için gereklidir. Bu tip osilasyonlar çok sık görülmeyen bir akış kombinasyonuna ve termal karakteristiklere sahiptirler. Termal osilasyonlar proseste çok zararlı etkilere neden olmaktadır. Basınç varyasyonları ile birlikte oluşan sıcaklık varyasyonlarının da 300°C'yi aştığı saptanmıştır. Yukarıda temel oluşum mekanizmaları ayrıntılı olarak verilen iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarına etki eden temel parametreler aşağıda sıralanmıştır (Karlı 2000).

- Kanal Geometrisi
- Çalışma Şartları
- Sınır Şartları

Dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarının en yaygın olan tipleridir YDO, BDO ve akustik tip osilasyonlardır. Bununla beraber iki fazlı akış sistemleri ile ilgili daha birçok akış kararsızlıkları mevcuttur. Bu kararsızlıklardan biri Stenning and Veziroğlu (1965) / Veziroğlu and Kakaç (1980) tarafından tanımlanmış olan termal osilasyonlardır. Termal osilasyonlar bileşik dinamik kararsızlıklardır ve sıvı filminin kararsızlığı ile ilgilidir. Isıtıcı cidar sıcaklığında büyük sıcaklık dalgalanmaları meydana getirirler. Belirli bir noktada akış, film kaynaması ile geçiş kaynaması arasında osilasyon oluşturur ve böylece büyük genlikli termal osilasyonlar oluşur (Ding 1993). YDO tipi osilasyonlar termal osilasyonlarını başlatmak için gereklidir. İki fazlı akış sistemlerinde termal osilasyonlar istenmeme nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Karagöz 2007):

- Elemanların zorlanmış mekanik titreşimine sebep olabilirler.
- Yerel ısı transfer karakteristiklerini etkileyebilirler ve kaynama krizi oluşturabilirler.

- Cidar sıcaklığının sürekli çevriminin neden olduğu ısıl yorulma oluşturabilirler.
- Sistemde kontrol problemlerine ve cidar sıcaklık artışının neden olduğu boru arızasına yol açabilirler.

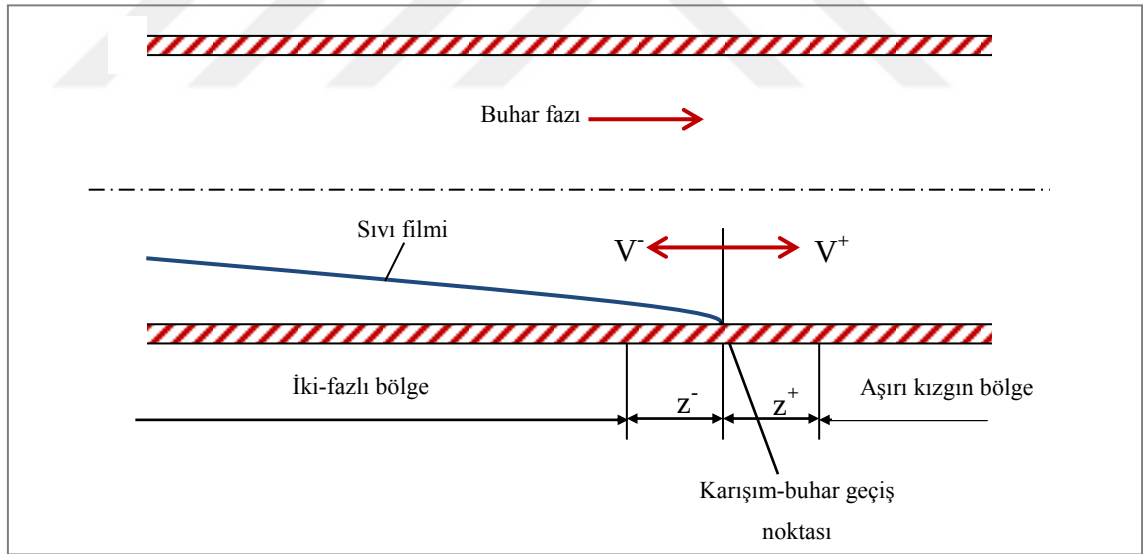
Bu nedenlerden dolayı termal kararsızlıkları önleme veya kontrol etme maksadıyla etkin yöntemler geliştirme iki fazlı akış içeren birçok endüstriyel sistemlerin tasarım ve çalışması için çok büyük önem arz etmektedir.

Termal osilasyonlar genel olarak iki şekildetanımlanmaktadır:

1. Diğer osilasyonlar ile beraber ortaya çıkan termal osilasyonlar: Bu osilasyonlar, bağımsız olarak üretilmezler, BDO tip veya YDO tip osilasyonların yan ürünüdürler ve cidar sıcaklığının bu osilasyonlara cevabı olarak ortaya çıkarlar.
2. Bağımsız termal osilasyonlar: Bu osilasyonlar bağımsız olarak ortaya çıkan dinamik osilasyonlardandır. Çok küçük debiler hariç BDO tip ve YDO tip osilasyonlar sırasında alt cidar daima bir sıvı tabakası tarafından ıslatılmaktadır. Bu, kütsel debi alt cidar boyunca kanalın tümünün sıvı fazıyla temas etmesini sağlayacak kadar yeterli olduğu için kanalın içerisinde akışkanın tümüyle buharlaşmadığı anlamına gelir. Fakat debi çok küçük değerlere indiğinde, kanala giren sıvı üst cidar civarında tümüyle buharlaşmakta, alt cidardaki sıvı ise kanalın çıkışına doğru tümüyle buharlaşmaktadır.

İki fazlı bölge sıvı ve buhar karışımından oluşurken kızgın buhar bölgesi sadece saf buhardan oluşmaktadır. Evaporatörde sıvının son buharlaştığı eksenel pozisyon “karışım-buhar geçiş noktası” olarak tanımlanır. Bu nokta iki fazlı bölge ile kızgın buhar bölgesi arasındaki sınırı gösterir (Şekil 2.11). Akış bu noktada film kaynaması ile geçiş kaynaması arasında osilasyon oluşturduğundan karışım buhar geçiş noktası osilasyon yapar ve böylece büyük genlikli osilasyonlar meydana gelir. Bu osilasyonlar kuruma ve ıslanmanın neticesidir ve sıvı filminin kararsızlığı ile alakalıdır. Bunlar boru cidar sıcaklıklarında büyük sıcaklık çalkantılarına sebep olurlar. Alt cidarda sıcaklığın büyük genliklerle osilasyon yapması ile ortaya çıkan bu osilasyon tipi “termal osilasyonlar” olarak tanımlanmaktadır.

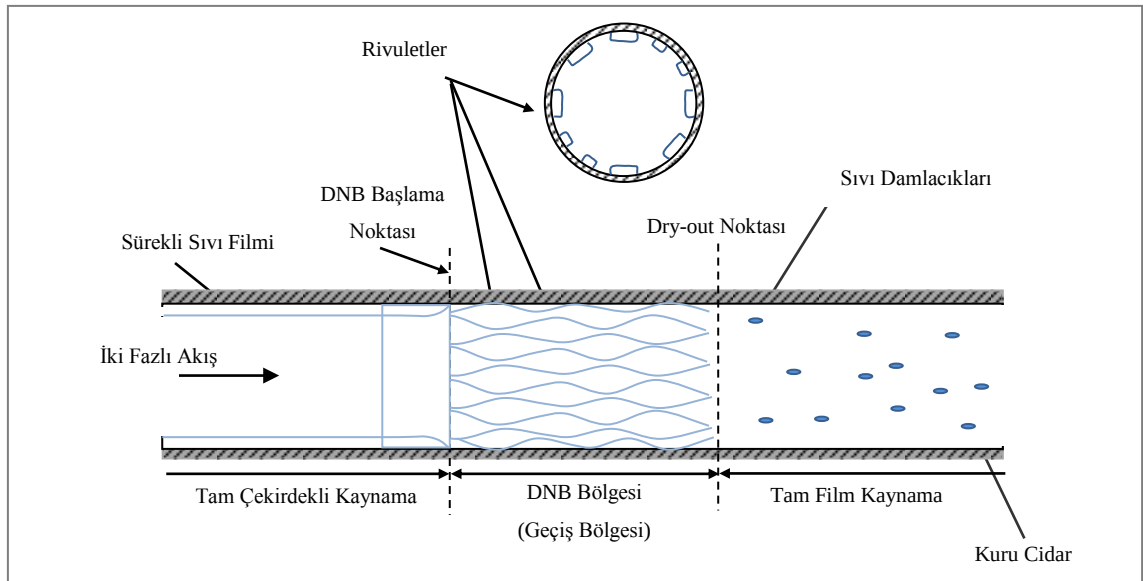
Alt cidarda meydana gelen bu termal osilasyonların sebebi, akışın belli bir noktada düzensiz olarak geçiş kaynaması ile film kaynaması arasında değişiklik göstermesinden ve karışım-buhar geçiş noktasının rastgele hareketinden kaynaklanmaktadır. Geçici noktanın bu düzensiz hareketi termal osilasyonların meydana gelmesinde temel rolü oynamaktadır. Bunun neticesinde sabit ısı akıllı sistemlerde cidar sıcaklığı büyük genliklerle osilasyon oluşturmaktadır. Buna göre aşırı ısınmış bölgede (tam burn-out olayının gerçekleştiği bölge) ve iki-fazlı akış bölgesinde (alt cidar ıslak) termal osilasyon oluşmaz. Widmann (1993) tarafından ifade edildiği gibi termal osilasyonlar 3,4-6,8 bar basınç genliğine ve 300°C kadar sıcaklık değişimine sebep olabilirler. Özellikle alt cidarda büyük genlikli titreşimlerle kendini gösteren bu tip osilasyonlar burn-out olayına sebep olarak boru cidarlarında termal gerilmelerin meydana gelmesine ve bunun sonucunda boru cidarlarında deformasyonlara neden olmaktadır (Ömeroğlu 2012).



Şekil 2.11. Termal osilasyonların mekanizması (Karagöz 2007)

Yatay borularda karışım-buhar geçiş noktasının osilasyon hareketi birçok araştırmacı tarafından yapılan deneysel ve/veya teorik araştırmalarda gözlemlenmiştir. Araştırmacılar bağımsız termal osilasyonları farklı şekillerde açıklamışlardır. Wedekind (1971) yatay buharlaşan akışta geçiş noktasının zamana bağlı hareketinin fotoğrafının kaydını alan bir yöntem geliştirmiştir. Boruda en son sıvının buharlaştığı noktanın yeribu

yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Sürekli akış şartlarında karışım-buhar geçiş noktasının hareketinin osilasyonlu bir karaktere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Geçiş noktasının osilasyonlarına halkasal akış rejiminde sıvı halka boyunca yayılan sıvı dalgalarının sebep olduğunu ve kızgın buhar bölgesine ulaşan dalgaların ısıtıp, kuruttuğunu ifade etmiştir. Wedekind and Stoecker (1966) plaj yüzeyine gelen göl yüzey dalgalarının geçiş noktası osilasyonlarıyla ilişkili dalgalara benzediğini ifade etmişlerdir. Chu *et al.* (1978) evaporatör boruları için DNB osilasyon sıcaklığını ve ısıl gerilmesini karakterize etmek amacıyla kullanılacak bir ıslak termal model (rivulet thermal model) tavsiye etmişlerdir (Şekil 2.12). Bu modele göre DNB başlangıç noktasının önündeki akış dağılılı halkasal akıştır. Sıvı filmi buharlaştıkça kalınlığı azalır ve DNB bölgesinin başlangıcında film ıslak ve kuru bölgelere dönüşür. Bu geçiş kaynama bölgesinde boru uzunluğu boyunca üç veya dört sıvı parçacıkları teğetsel yönde dönerler ve alternatif olarak boru iç cidarını kurutur ve ısıtırlar. Sıvı parçacıkları buharlaştıktan sonra cidar sıvı damlacıkları ihtiva eden buharla kaplanır. Boru cidar yüzeyleri üzerinde sıvı parçacıklarının görünmesi ve kaybolması su parçacıklarının oluşumunun yapısındaki rastgelelik sebebiyle cidar ve kuru cidar arasında osilasyonlara sebep olabilir. Bu durum boru cidar sıcaklığının osilasyon oluşmasına sebep olur.



Şekil 2.12. Geçiş kaynama modeli (Yeşilyurt 2015)

2.3.2.d. Akustik osilasyonlar

Akustik osilasyonlar iki fazlı karışımın sonik hızında hareket eden basınç çalkantıları olarak ifade edilirler. Uygun geometrik karakteristikler ve sonik hız birleşimine sahip iki fazlı sistemlerde akustik osilasyonlar oluşabilir. Tek fazlı gaz akışlarında olduğu gibi bir basınç dalgası devreden akan iki fazlı karışım boyunca yayıldığında “organ-pipe” tip dalgalar oluşabilir. Bu dalgalar bir alan değişimi veya engele eriştiğinde akustik impedansta oluşan değişim ters kutuplu bir basınç dalgasının zıt yönde yayılmasına sebep olur. Uyarım frekansı ve devrenin geometrisi uygun şartlarda akustik osilasyonları meydana getirebilir. Basınç dalga yayılımının gecikme zamanı ve geri besleme etkileriyle ilişkili olan bu osilasyonlar çok yüksek frekanslıdır (10-100Hz) ve çoğu durumlarda tiz bir ses oluştururlar. Bu dalgaların periyodu, bir basınç dalgasının sistem içinde seyahat etmesi için gerekli zamanla mertebe olarak benzer büyüklüktedir. Akustik osilasyonların aşırı soğutulmuş kaynamada, bulk kaynamada ve film kaynamada olduğu gözlemlenmiştir. Genellikle oldukça küçük genliklere sahiptirler; ancak basınç düşümü genlikleri kararlı durum değerlerine göre çok daha büyük olabilir ve giriş basınç çalkantıları basınç seviyesinin önemli bir kısmını oluşturabilir. Bu osilasyonlar, basınç düşümü-debi eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmaktadır.

Akustik osilasyonların karakteristikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. İki fazlı akışta akustik dalgalar büyür.
2. Aşırı soğutulmuş akıştaki kaynama, CHF'den daha düşük ısı akılarında doymuş akışlı kaynama ve konvektif film kaynamada oluşur.
3. Akustik osilasyon akış üzerine az bir etkiye sahiptir.
4. Yüksek frekanslı osilasyonlardır (10-100Hz).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Düzenegi

Bu çalışma Makine Mühendisliği Bölümü Isı Transferi laboratuvarında bulunmaktadır. Deney düzenegi iki fazlı akış elde etmek ve basınç düşümü tipi osilasyonlar, yoğunluk değişimi tipi osilasyonlar ve termal osilasyonlar oluşturarak incelemeler yapılabilecek şekilde kurulmuştur. Bu araştırmada yatay borulardaki iki fazlı kararlı ve kararsız akış karakteristiklerine; ısı akısının, akış debisinin ve farklı tipte sarımlara sahip konik sarımlı yay dizilerinden oluşan boru içi elemanlarının etkileri incelenmektedir. Materyal ve yöntem açısından Yeşilyurt(2015) tarafından düzenlendiği şekilden hemen hiç değişikliğe uğramamış ve aynen bu çalışmaya da uygulanmıştır.

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere deney düzenegi; akışkan besleme bölümü, test bölümü ve depolama bölümü olmak üzere üç temel bölümden oluşmaktadır.

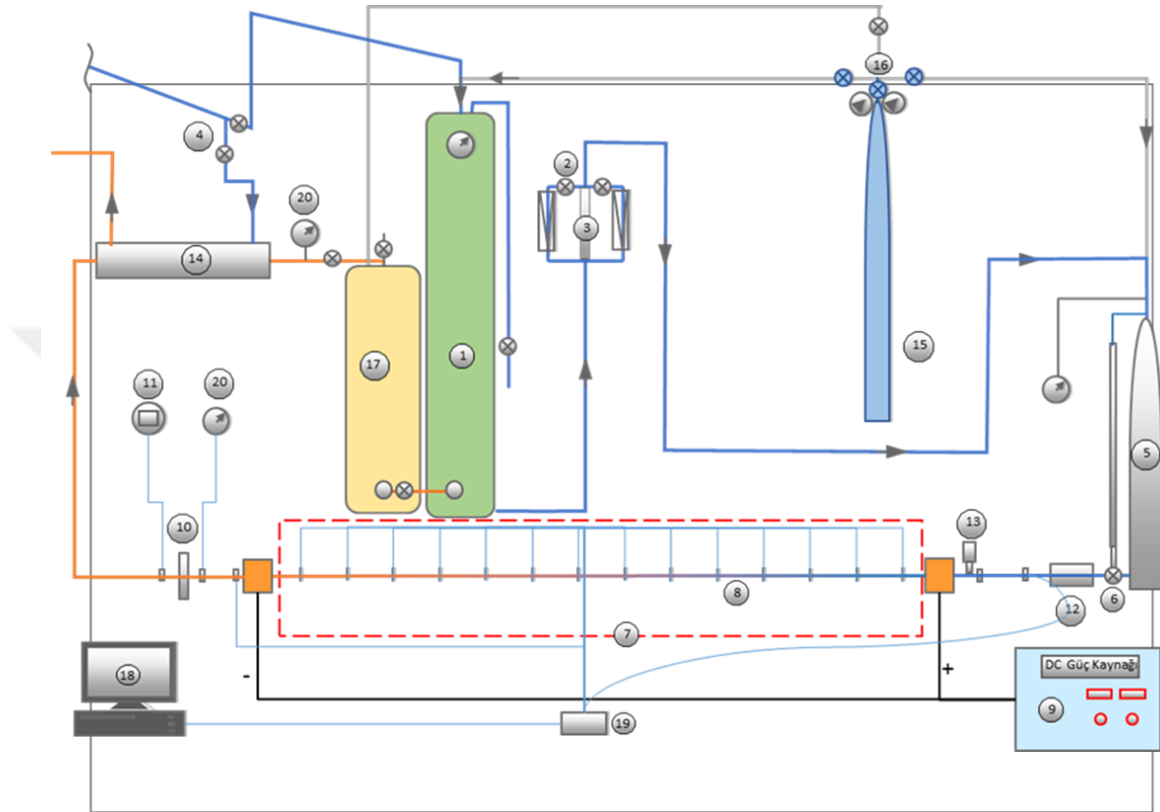
3.1.1. Akışkan besleme bölümü

İş yapan akışkan olan suyun test borusuna giriş şartlarına getirilmesini sağlayan akışkan besleme bölümü; Ana besleme tankı, iki adet flowmetre, debi ayar vanası, , bir debi transdüseri ve sabit basınç elde etmek amacıyla kullanılan azot tankı ile basınç regülatöründen oluşmaktadır.

Silindirik ana besleme tankı dikey yerleştirilmiş 3m yüksekliğinde ve $0,7 \text{ m}^3$ hacimdedir. Bu tank deneyler süresince ihtiyaç duyulan suyun depolanabileceği ve 50 bar işletme basıncına karşı koyacak şekilde imal edilmiştir (Şekil 3.2).

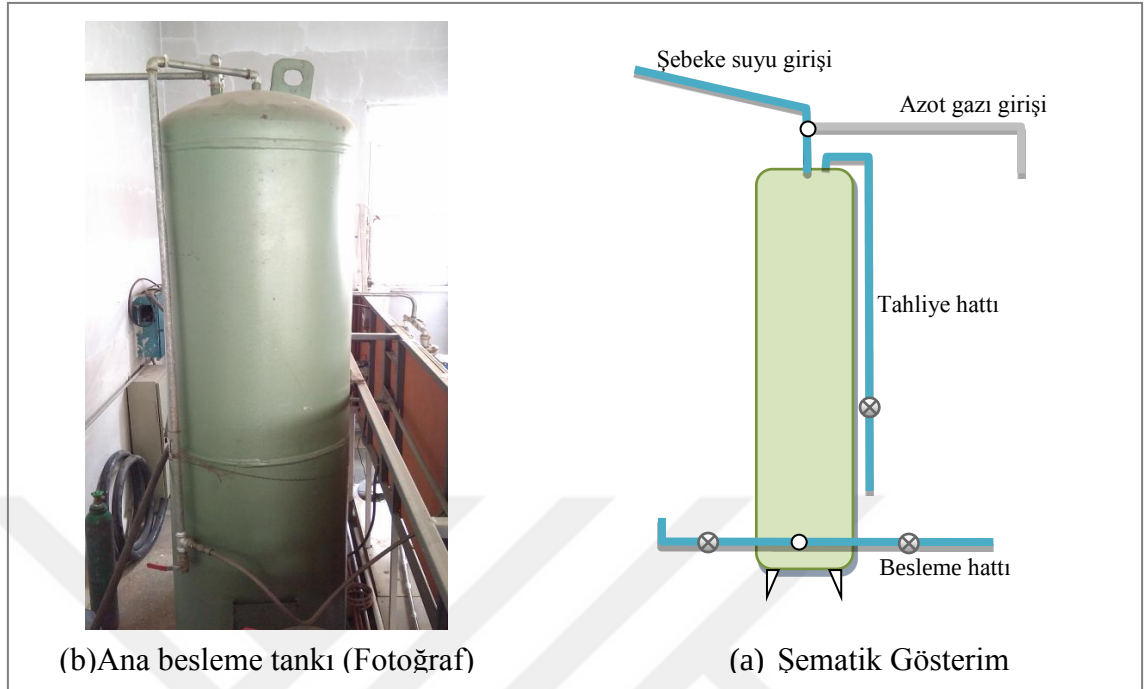
Akışkan debi ayarı besleme hattı üzerinde mevcut kontrol vanası yardımıyla yapılmakta, sistemde bulunan biri 0-400 l/h, diğeri 0-1000 l/h ölçekli iki ibreli flowmetre ve dijital debi transdüseri yardımı ile akışkanın debisinin ölçümü ve ayarı

yapılmaktadır. Bu sistem içerisinde kullanılan her iki tip flowmetre 40 bar maksimum çalışma basıncı ve 100°C maksimum çalışma sıcaklığına sahiptir.



Akışkan Besleme Bölümü	Test Bölümü	Akışkan Çıkış Bölümü
1- Ana besleme tankı	8- Test borusu	15- Azot tankı
2- Debi ayar vanası	9- DC güç kaynağı	16- Regülatör
3- Flowmetre (iki adet)	10- Orifis	17- Akışkan depolama tankı
4- Vana	11- Dijital manometre	18- Bilgisayar
5- Dengeleyici tank	12- Debi transdüseri	19- Data okuma kartı
6- Akışkan giriş kontrol vanası	13- Basınç transdüseri	20- İbrelili manometre
7- Test odası	14- Yoğuşturucu	

Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Şekil 3.2. Ana besleme tankı

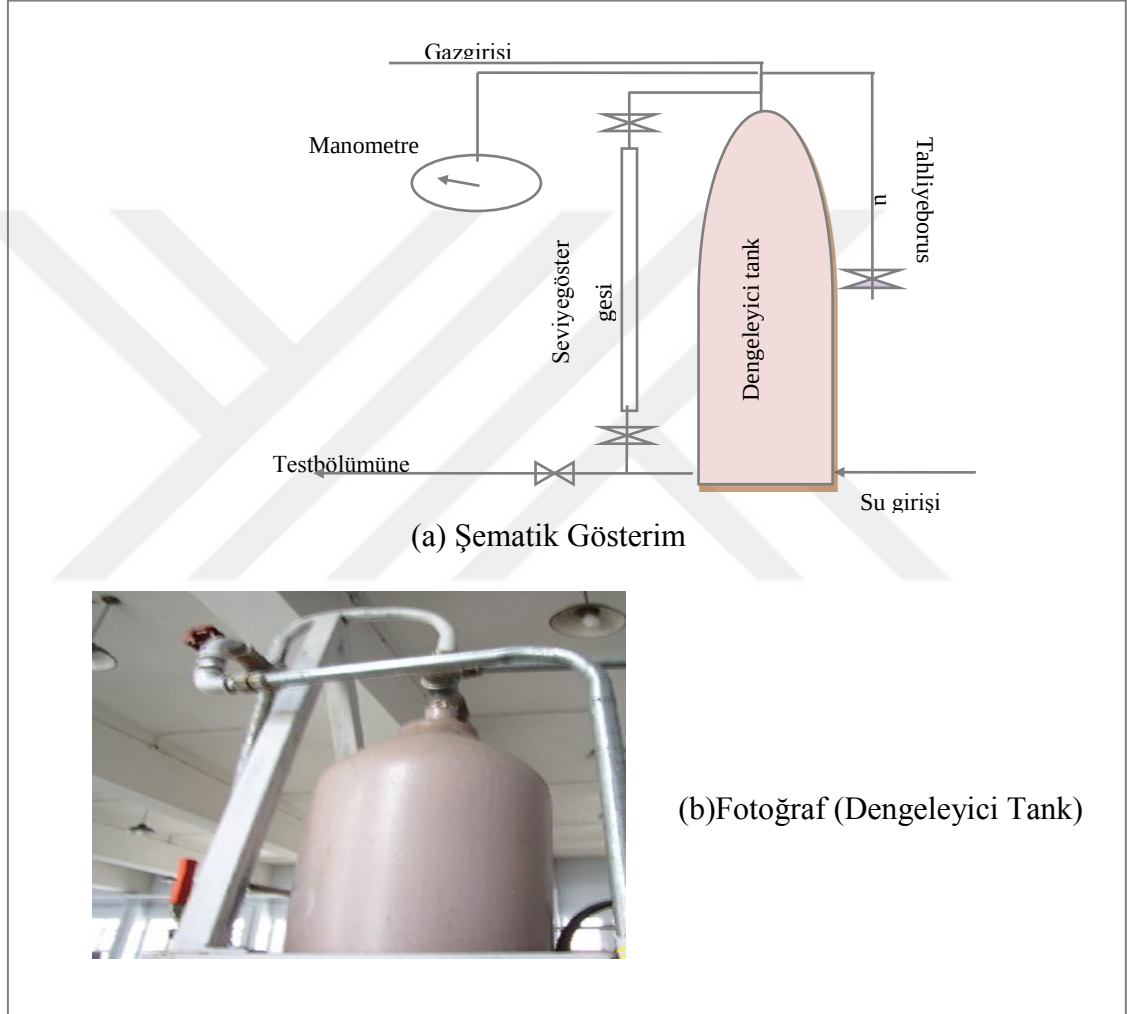
3.1.2. Test bölümü

Test bölümü; dengeleyici tank (5), akışkan giriş kontrol vanası (6), test odası (7), test borusu (8), DC güç kaynağı (9), orifis (10), dijital manometre (11), türbin tipi debi ölçer (12), basınç transdüseri (13) gibi dokuz elemandan oluşur.

Dengeleyici tank, test borusunun yeteri kadar uzunluğa sahip olmaması durumunda sıkıştırılabilir hacim için kullanılır. Deney sisteminde kullanılan dengeleyici tank 0,05 m³ hacmindedir. Ayrıca, Şekil 3.3’de görüldüğü gibi, akışkan ve sıkıştırılabilir hacim seviyelerinde meydana gelecek değişimlerin gözlenebilmesi amacıyla dengeleyici tanka, 30 bar basınca mukavemet eden, şeffaf plastikten üretilmiş seviye göstergesi ve tank basıncını gösteren bir manometre bağlantısı yapılmıştır.

Şekil 3.4’de görüldüğü üzere dengeleyici tank ile test borusu arasına türbin tipi debi ölçer, Bourdon tipi manometre, basınç transdüseri ve sıcaklık ölçüm elemanı yerleştirilmiştir. Türbin tipi debi ölçer akışkan debisinde ortaya çıkan salınımları ölçmek

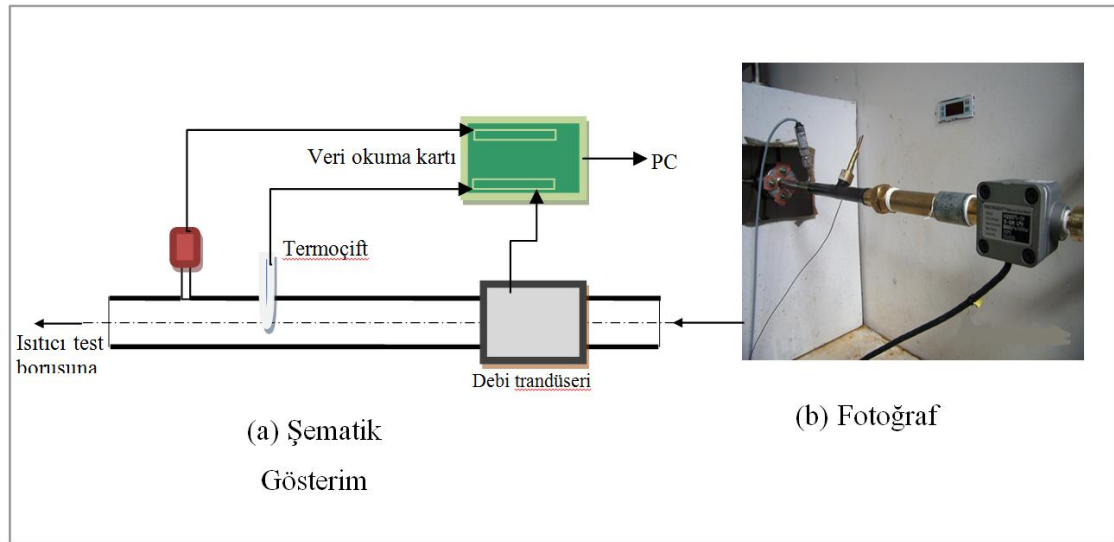
için kullanılmıştır. Bourdon tipi manometre test borusu giriş kısmındaki akışkan basıncını ve basınç transdüseri ise test borusu girişinde akışkan basıncında ortaya çıkan dalgalanmaların ölçümünde kullanılmıştır. Akışkan giriş sıcaklığı T tipi termoeleman ile ölçülmüş ve 17 – 72 g/s kütleli debi aralığında deneyler yapılmıştır.



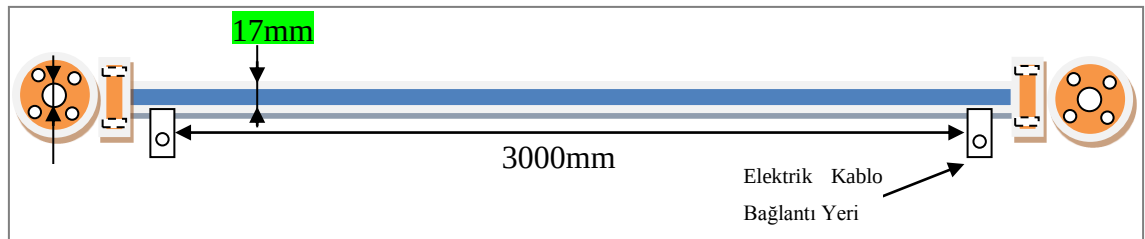
Şekil 3.3. Dengeleyici tank

Şekil 3.8 görüldüğü üzere yaklaşık 40 kW'lık güce sahip DC güç kaynağının pozitif (+) ve negatif (-) uçları test borusunun test odası giriş ve çıkış kısımlarına monte edilmiştir. Böylece test borusuna ısı transferi yapılmış ve ısıtıcı test borusuna verilen ısı gücü değerleri DC güç kaynağı üzerindeki dijital volt ve akım göstergelerinden okunmuştur.

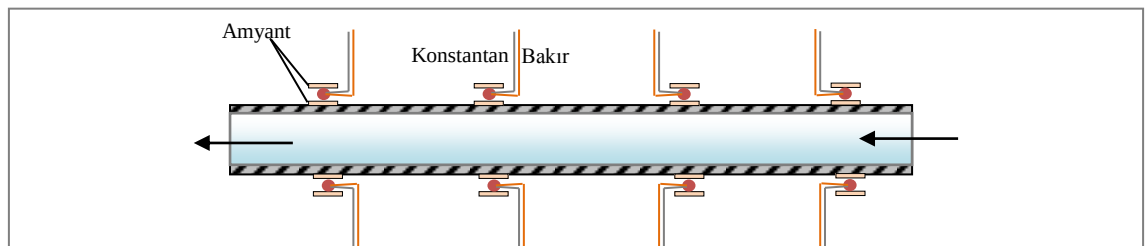
Şekil 3.9’da görüldüğü üzere istenen basınç düşümünü elde etmek ve akış osilasyonları üzerine çıkış kısıtlayıcısının etkilerini saptamak maksadıyla test borusu çıkışına bir orifis levhası monte edilmiştir. Orifis levhasının giriş kısmındaki basınç Bourdon-tipi manometre, çıkış kısmı ise test bölgesi arasında fark basıncını ölçen fark basınç manometresi bağlanmaktadır.



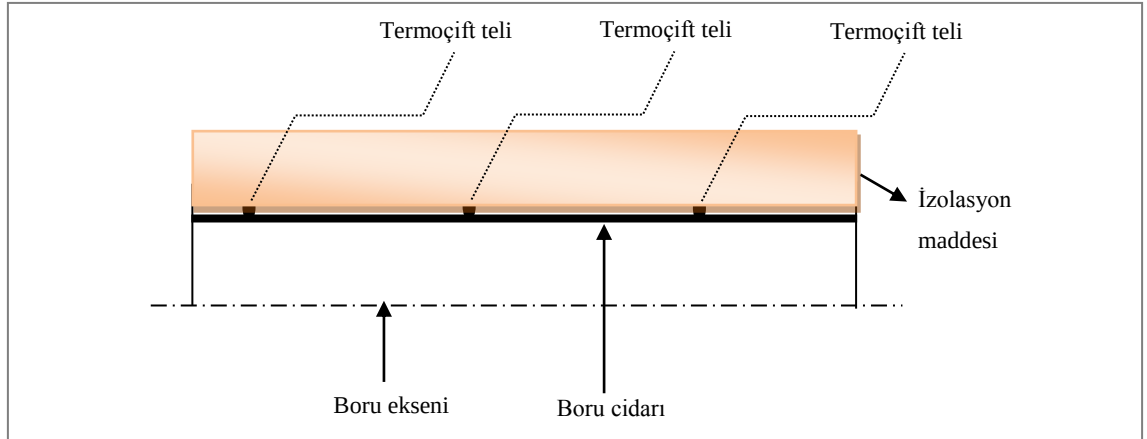
Şekil 3.4. Deney düzeneğinin dengeleyici tank ile test borusu arasındaki kısmı



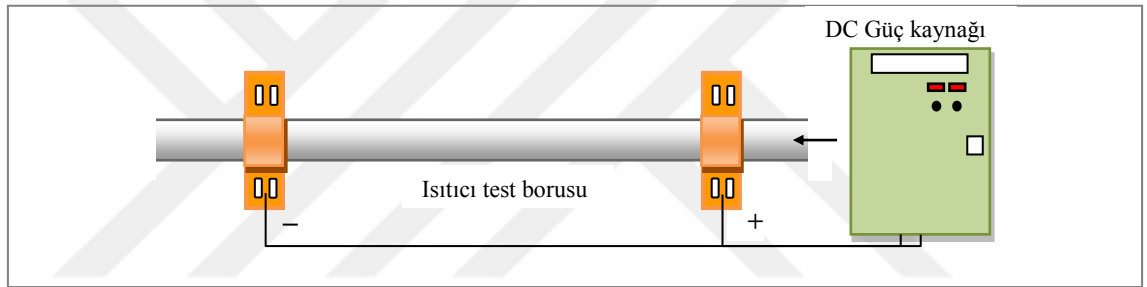
Şekil 3.5. Test borusu ve bağlantı flanşları



Şekil 3.6. Termoeleman bağlantı şekilleri



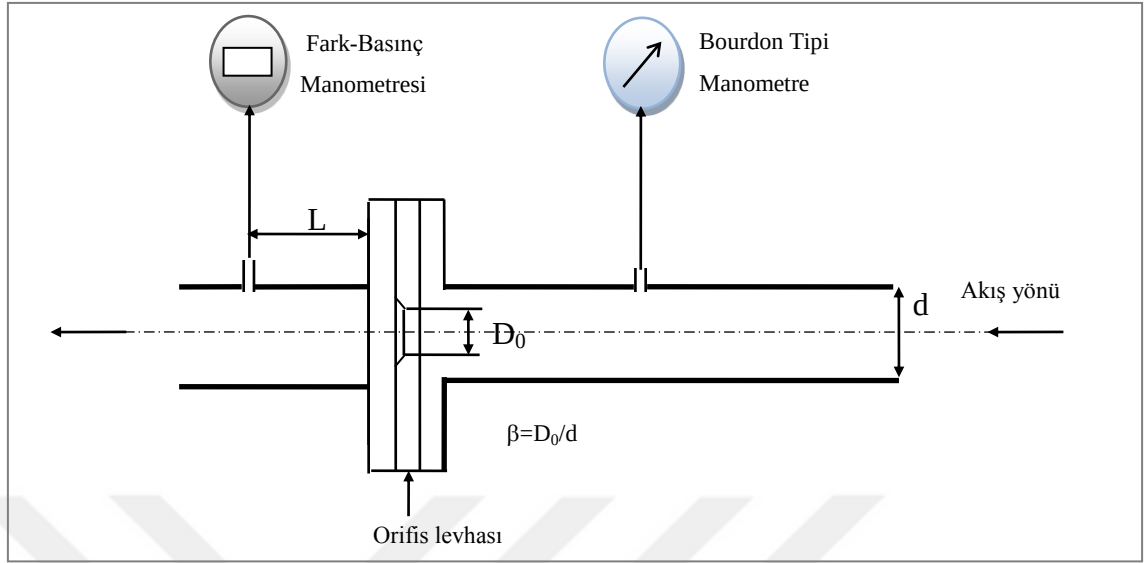
Şekil 3.7. Test borusu izolasyon tabakası ve termocift uçlarının şematik gösterimi



Şekil 3.8. Test borusu elektriksel bağlantısı

3.1.3. Akışkan depolama bölümü

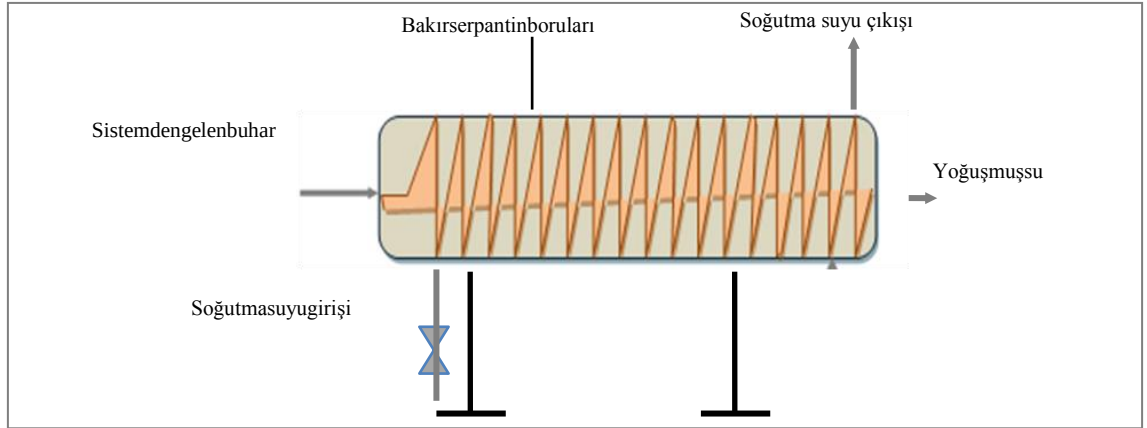
Akışkan depolama bölümü;yoğuşturucu (14),azot tankı(15),regülatör(16) ,akışkan depolama tankı (17) olmak üzere dörtelemadan oluşmaktadır.Depolama bölümüakışkanın test bölümünden sonra geldiği yerdir. Test borusundan genelde buhar fazında çıkan su bu kısımda çalışma başlangıç koşullarına getirilmek maksadıylasu soğutmalıyoğuşturucudan geçirilerek yoğuşturulur ardından depolama tankına sevk edilir. Depolanan su daha sonra azot gazı yardımıyla tekrar basınçlandırılarak ana besleme tankına sevk edilir.



Şekil 3.9. Çıkış kısıtlayıcısının şematik gösterimi

Yoğuşturucu yatay gövde-boru tipe sahip akışkanı buhar fazından sıvı fazına geçirmek amacıyla kullanılan ısı değiştiricidir. Şekil 3.10’da görüldüğü gibi gövdesi 0,16 m çapında ve 1,45 m uzunluğundaki yoğuşturucu dikişli siyah boru malzemesinden imal edilmiştir. İçerisindeki 0,02m çapta spiral olarak yerleştirilmiş bakır borunun dışından soğutma suyu içinden ise test bölümünden gelen akışkan geçmektedir.

Yoğuşturucuda sıvı hale gelen akışkan depolama tankına gönderilir. Depolama tankı 0,75 m çapında, 1,75 m boyunda ve 1 cm cidar kalınlığına sahip dikey konumda yerleştirilmiş düz siyah sac malzemedendir. Deneysel çalışmalar esnasında yüksek basınçlı azot gazı yardımıyla su ana besleme tankına sevk edilir.



Şekil 3.10. Yoğuşturucu

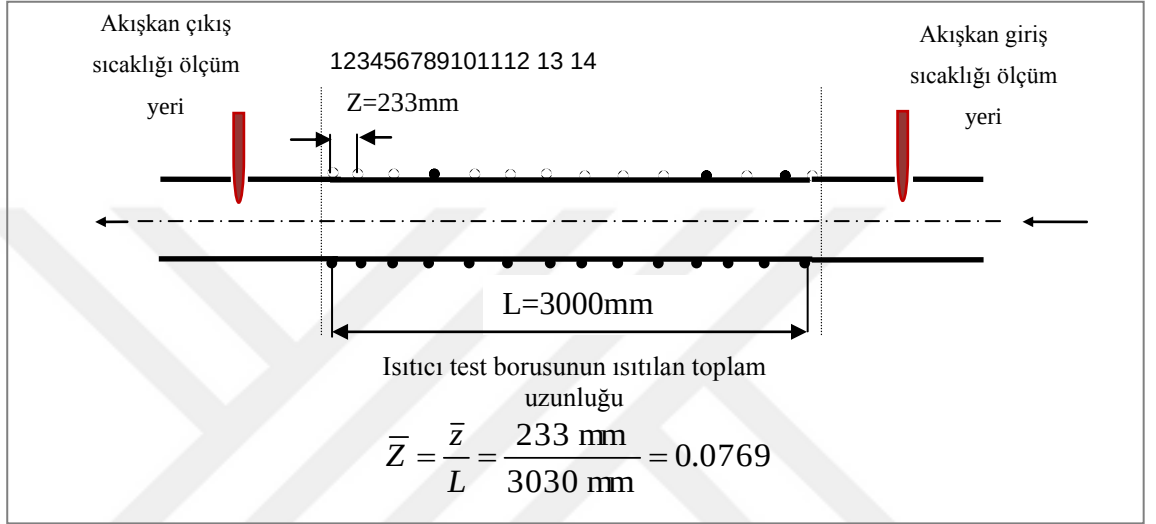
3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi

3.2.1. Sıcaklık ölçümleri

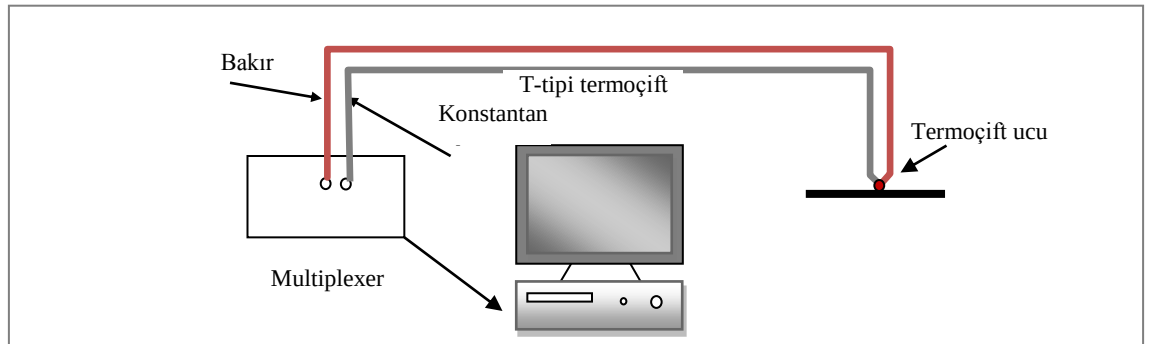
Deney sisteminde 0,25mm çapında T tipi bakır-konstantan termočiftleri ile sistem toplam 30 noktasında $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ hata ile sıcaklık ölçülmüştür. Boru cidar sıcaklıkları test borusu boyunca iki amyant plaka arasına yerleştirilerek boru cidarına tespit edilen termoeleman uçlarıyla okunmuştur. Boru içerisine daldırılmış 5mm çapında bir ucu kapalı ince bakır boru içerisine yerleştirilen termoelemanlar yardımıyla akışkanın test borusu girişi ve çıkışındaki sıcaklıklar ölçülmüştür.

Şekil 3.11 görüldüğü gibi boru boyunca eşit aralıklarla yerleştirilmiş 14 tanesi boru üst tepe noktasına ve 14 tanesi boru alt tepe noktasına olmak üzere toplam 28 T-tipi termoeleman çifti yardımı ile sıcaklıklar ölçülmüştür. Test borusu direkt elektrikle ısıtıldığı için elektriksel gürültüyü yok etmek maksadıyla termočiftlerinin uçları elektriksel olarak yalıtkan ancak termal iletkenliği iyi olan amyant levhalar arasına yerleştirilmiştir. Termoelemanlar ve basınç/debi transdüserlerinin verdiği sinyallerin okunabilmesi ve değerlendirilmesi maksadıyla analog/dijital Advantech Data Okuma kartı ve VisiDAQ 3.1 yazılımı kullanılmıştır. Şekil 3.12’de termočiftlerin data okuma kartına ve bilgisayara nasıl bağlandığı şematik olarak gösterilmektedir. Termoelemanların konstantan ucuna negatif ucuna, bakır ucu ise kartta bulunan bir kanalın

pozitif ucuna bağlanmıştır. Saniyede yüz adet örnekleme yapabilme özelliğine sahip bu kontrol kartından alınan okumalardaki toplam hata oranı kontrol kartının seçilen kazanç değeri seviyesine bağlı olarak $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ile $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir (Karagöz 2007).



Şekil 3.11. Test borusu cidar sıcaklığı ölçüm noktaları



Şekil 3.12. Termoçiftlerin data okuma kartına bağlantısının şematik gösterimi

3.2.2. Basınç ölçümleri

Deney siteminde; ana tank, dengeleyici tank, azot tankı, test borusu girişi, orifisden önce ve orifisden sonra basınçlar ölçülmüştür. Ana tank, dengeleyici tank, azot tankı ve orifisin girişindeki basınçlar 0-100bar arasındaki basınçları okuyabilen Bourdon tipi

manometre yardımıyla ölçülmüştür. Toplam hata oranı analog manometrede $\pm\%0,1$ bar seviyesinde okunmuştur. Orifisin çıkışındaki basınç değeri ise dijital bir manometre yardımıyla ölçülmüştür. Ölçek üzerinde okunan basınç 0,5 bar'dır. Test borusu girişinde kullanılan basınç transdüserinin amacı giriş basıncını ve giriş basıncında oluşacak osilasyonları ölçmektir. 4-20 mA seviyesinde basınç transdüserinden alınan analog sinyaller data okuma kartıyla işlenmiştir (Şekil 3.4) ve alınan datalardaki toplam hata oranının $\pm\%0,1$ seviyesinde olduğu görülmüştür.

3.2.3. Debi ölçümleri

Oldukça hassas bir şekilde belirlenen kütleli debi, akış rejimlerinin osilasyon sınırları ve kararlılık sınırlarının belirlenmesinde kullanılır. Sistemde akışkanın debisini ölçmek ve ayarlamak için ölçülebilir debi aralıkları 0-400 l/h ve 0-1000 l/h ve toplam hata oranı $\pm\%0,4$ olan iki ayrı flowmetre, debi ayarı ise kontrol vanası ile yapılmaktadır. Deneyler minimum 17 ve maksimum 72 g/s kütleli debi aralığında yapılmıştır. Şekil 3.4'de sistemde meydana gelen debi osilasyonlarını ölçmek amacıyla dengeleyici tank ile test borusu arasına yerleştirilen türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Debi ölçerden alınan data okumalarındaki toplam hata oranı $\pm\%1$ 'dir.

Çizelge 3.1. Türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri

Parametre	Değer
Akış Debisi	15-500 l/h
Doğruluk	$\pm\%1$
Maksimum viskozite	1000 centipoise
Maksimum çalışma basıncı	500 kPa
Maksimum çalışma sıcaklığı	80°C
Pulse tipi	Hall effect sensör/reed switch
Pulse/Litre	400
Çıkış sinyali	4-20 mA
Boyut	50mm*50mm

3.2.4. Isı gücü ölçümleri

Deney sisteminde kullanılan DC güç kaynağı yaklaşık 40kW güç kapasitesindedir. Volt ve akım değerleri güç kaynağı üzerinde ayarlanabilmekte ve göstergelerden okunabilmektedir. Toplam hata oranının $\pm\%0,2$ düzeyinde olduğu elektriksel güç değerlerinin ölçülmesi ile tespit edilmiştir.

3.2.5. Osilasyon periyotlarının tespiti

Ortaya çıkan osilasyonların periyotlarının tesbit edilmesi, zaman uzayında gözlenen bir olayın 1/zaman, yani frekans uzayında gözlemlenmesini sağlayan Hızlı Fourier Dönüşümü metodu ile yapılmıştır. Bütün uzayda tanımlı bir $f(t)$ fonksiyonunun w uzayında Fourier Dönüşümü;

$$F(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-iwt} dt \text{ ile elde edilir.} \quad (3.1)$$

Fourier Dönüşümü analitik olarak çeşitli matematik işlemlerin çözümlemelerinde kullanılmaktadır. Ancak bilimsel ve teknolojik uygulamalarda elde edilen ölçüm değeri bir fonksiyon değil belirli eleman sayısı olan sayısal bir dizidir. Dolayısıyla bu tür sayısal verilerin dönüşümlerinde sayısal olarak alınması gerekmektedir. Analitik dönüşümün tüm özelliklerini Sayısal Fourier Dönüşümü sağlar. Fourier Dönüşümü tanımlarından hareketle;

$$F_L = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-2i\pi k l / N} \quad (3.2)$$

Excel Çözümleme Araç Takımı içindeki hızlı Fourier Çözümleme fonksiyonu çalışmalarımızda kullanılmıştır.

3.3. Deneysel Yöntem

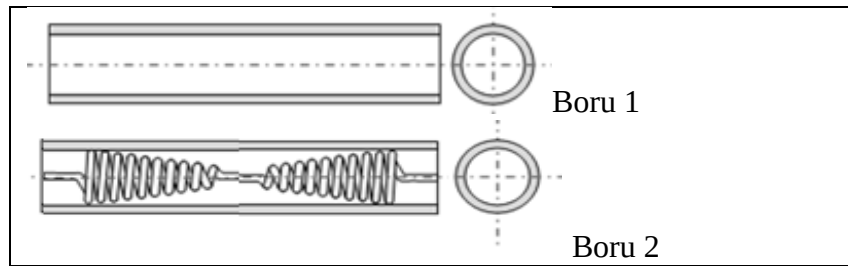
İki bölümde yapılan deneysel çalışmalardan birisikararlı durum karakteristiklerinin saptandığıkararlı deneyler ve diğeriiki fazlı akış dinamik kararsızlıklarının araştırıldığı kararsız deneylerdir. Deneyler 2 farklı boru tipindesabit akışkan giriş sıcaklığında, sabit ısı gücü ve sabit çıkış orifis çapında yapılmıştır.

Şekil 3.14’de karakteristikleri ve ısı transfer yüzeyleri verilen ısı transfer iyileştirme elemanınınfotoğrafıŞekil 3.13’de gösterilmiştir.Boru-1 içinde yüzey artırma elemanı olmayan yalın boru, Boru-2 içerisinde konik sarımlı yay dizilerinden oluşanyüzey artırma elemanı bulunan borudur.

Şekil 3.13’de de gösterildiği gibi ısı transfer yüzeyleri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanan efektif çapla karakterize edilmektedir.

$$d_e = \sqrt{\frac{4V'}{\pi L}} \quad (3.3)$$

Burada V' boru net iç hacmini ve L boru uzunluğunu göstermektedir.



Boru İsmi	Borunun Karakteristiği	de (mm)
Boru-1	Boş boru	17,60
Boru-2	Tel çapı: 1,8mm, 150mm aralıklı, yay adımı: 10mm konik yay dizisi	17,34

Şekil 3.13. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri

Kararlı durum karakteristiklerini bulmak amacıyla boş boru tipinden başlanarak sabit çıkış orifis kısıtlamasında, $p_{sist} = 7.5 \text{ bar}$ ve $T_g = 15^\circ\text{C}$ akışkan giriş sıcaklığında $Q=22\text{kW}$ ısı gücünde deneysel çalışmaları yapılmıştır. Ardından aynı deneysel veriler kullanılarak kararsız deneyler yapılmıştır. Boş boru (Boru-1) deneyleri bittikten sonra Boru-2'de deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.14. Isı transfer iyileştirme elemanı

Her bir deney için aşağıdaki parametreler ölçülmüştür:

1. Test borusu yüzey sıcaklığı (14 alt, 14 üstten olmak üzere 28 adet)
2. Akışkanın test borusuna giriş ve çıkış sıcaklıkları
3. Akışkanın test borusuna giriş ve çıkışındaki statik basınç
4. Test borusu girişindeki debi
5. Test borusu girişindeki debi osilasyonları
6. Test borusu girişindeki basınç osilasyonları
7. Orifisin girişindeki ve çıkışındaki basınç

3.3.1. Kararlı durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri

Kararlı durum karakteristiklerini belirlemek maksadıyla yapılan kararlı durum deneylerinde, kararlı durum karakteristikleri basınç düşümünün debiyle değişimini $\Delta p - \dot{m}$ grafikleri ile gösterilmektedir. Dengeleyici tank basıncıyla orifis plakasından sonraki akışkanın basıncı arasındaki fark buradaki basınç düşümünün göstergesidir. $\dot{m} = 72$ g/s debi ile deneylere başlanmıştır. Yüksek debilerdeki akış tek fazlı ve sıvı akışıdır. Karakteristik eğriyi saptamak maksadıyla debi yaklaşık olarak 8-9 g/s aralıklarla azaltılmıştır. Tamamen buhar akışının karakteristiğini saptamak maksadıyla debi oldukça düşük değerlere azaltılmalıdır. Deneylerde en düşük debi değeri 17 g/s olarak alınmıştır. Burnout olasılığından dolayı deneylerin tamamında daha düşük debi değerlerine ulaşamamıştır. Borunun burnout bölgesine ulaşp ulaşmadığını cidar sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklığı gözlemlenerek kontrolü sağlanmıştır.

Kararlı durum karakteristiklerini saptamak maksadıyla yapılan deneylerde sırasıyla aşağıdaki deneysel çalışma adımları izlenmiştir:

- Ana tank azot gazı ile sistem basıncı seviyesine basınçlandırılmış ve sistem basıncı azot tüpü üzerinde bulunan basınç regülâtörü vanası yardımıyla ayarlanmıştır.
- Dengeleyici tanktaki seviye göstergesi izlenerek bu tank içerisinde bulunan azot gazı kararlı durum deney çalışmalarında kullanılmayan dengeleyici tankta sıkıştırılabilir hacmin olmaması içingiriş çıkış vanaları kapatılmıştır.
- Sistemin debisi kontrol vanası yardımıyla çalışmada tespit edilen en yüksek debi değerine ayarlanmıştır.
- Ana tanktan gelen suyun test borusuna giriş sıcaklığına gelmesi için dijital termostat yardımıyla belirlenen sıcaklığa ayarı yapılmıştır.
- İş yapan akışkanın yoğunlaştırıldığı ısı değiştiricinin soğutma suyu devresi açılmıştır.
- Sistem çalıştırılmış ve kararlı hale gelinceye kadar beklenmiştir.
- Test borusuna gerekli olan ısı gücünü temin eden ayarlanabilir DC güç kaynağı istenen güç değerine ayarlanmış ve sisteme ısı verilmiştir.

- Sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiş ve test borusu yüzey sıcaklıklarında $0,5^{\circ}\text{C}$ 'den daha fazla bir değişim gözlenmediğin zaman sistemin kararlı hale geldiği kararına varılmıştır.
- Sistem kararlı hale geldikten sonra gerekli bütün ölçümler alınmıştır. Böylelikle belirlenen debi için deney tamamlanmıştır.
- Giriş debisi 17 g/s değerine ulaşınca kadar çeşitli debilerde yeni bir debi değeri için yukarıda anlatılan işlemler tekrar edilmiştir.

3.3.2. Kararsız durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri

BDO tipi iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarının araştırıldığı kararsız deneylerde belirliçalışma koşullarında ortaya çıkan kararsızlıkların sınırları ve tipleri belirlenmiş ve oluştukları parametrelerin tespiti yapılmıştır. Kararsızlıkların meydana gelmesi için gerekli hacim, test kısmından önce yer alan dengeleyici tank sıkıştırılabilir hacmi ile sağlanmıştır. Dengeleyici tank içerisindeki su, azot tankından elde edilen sabit gaz basıncı ile belli bir seviyede tutulmuştur. Bütün deneylerde sıkıştırılabilir hacim sabit tutulmuştur. Sıkıştırılabilir büyüklüğü kütleli debi ve basınçta meydana gelen osilasyonlardan dolayı değişmektedir.

Kararsızlık deneyleri sırasıyla aşağıdaki adımlar izlenerek yapılmıştır:

- Sistem basıncı azot tankı üzerinde yer alan regülatör ile ayarlanmış ve ana tank azot gazı kullanılarak sistem basınç seviyesine basınçlandırılmıştır.
- Osilasyonların kıyaslanabilmesi dengeleyici tank sıkıştırılabilir hacminin sabit tutulması ile sağlanabilir, bunu sağlamak için basınçlı azot tankı ve regülatör ile bütün deneylerde dengeleyici tank basınçlandırılmış ve sıkıştırılabilir hacim şeffaf seviye göstergesindeki su seviyesi kontrol edilerek ayarı yapılmıştır.
- Kontrol vanası yardımıyla deneysel çalışmada belirlenmiş olan azami debi değerini sağlayacak şekilde sistem debisi ayarlanmıştır.
- Yoğuşturucuda bulunan ısı değiştiricinin soğutma suyu devresi açılmıştır.

- Sistem güç verilmeden çalıştırılmış,sorunsuzve kararlı bir şekilde çalıştığı yani kararlı hale gelinceye kadar beklenmiş ve kontrol edilmiştir.
- Sistem için ısıl güç temini DC güç kaynağı üzerinden gerekli akım ve gerilim ayarı yapılarak sağlanmıştır.
- Sistemin kararlı hale geldiği yüzey sıcaklık değerlerinin 0,5°C'den daha büyük değişimler göstermediğinde anlaşılmış ve bu sürece kadar beklenmiştir.
- Osilasyon sınırına ulaşılnca, dengeleyici tank basınç değeri ve su seviyesinde hızlı salınımlar meydana gelmeye başlayıncaya kadar deneylere kütleel debi azaltılarak devam edilmiştir.
- Basınç düşümü tipi osilasyonların bittiği ve bağımsız yoğunluk değişim tipi osilasyonların başladığı kütleel debi değerlerini saptamak amacıyla debi çok küçük miktarlarda azaltılmış vesalınım periyotları incelenmiş, düşük periyotlarda geçiş yaptığı görülmüştür.
- Boru cidar sıcaklıkları, azalan kütleel debi etrafıca gözlemlenmiş, TO'nun oluşması sağlanmıştır.
- Burn-out olayının gerçekleştiğinohtalara ulaşıldığı an ısıl güç kesilerek deneysel çalışmalar durdurulmuştur (Karagöz 2007).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu kısımda; bir boş boru ve konik sarımlı yay dizilerinden oluşan boru içi eleman kullanılan boru ile yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar sunularak deneyler için kararlı durum karakteristikleri, osilasyon sınırları, BDO yüzey konfigürasyonları açısından tek tek değerlendirilmiş ve daha önce yapılan çalışmalar ile kıyaslanmıştır.

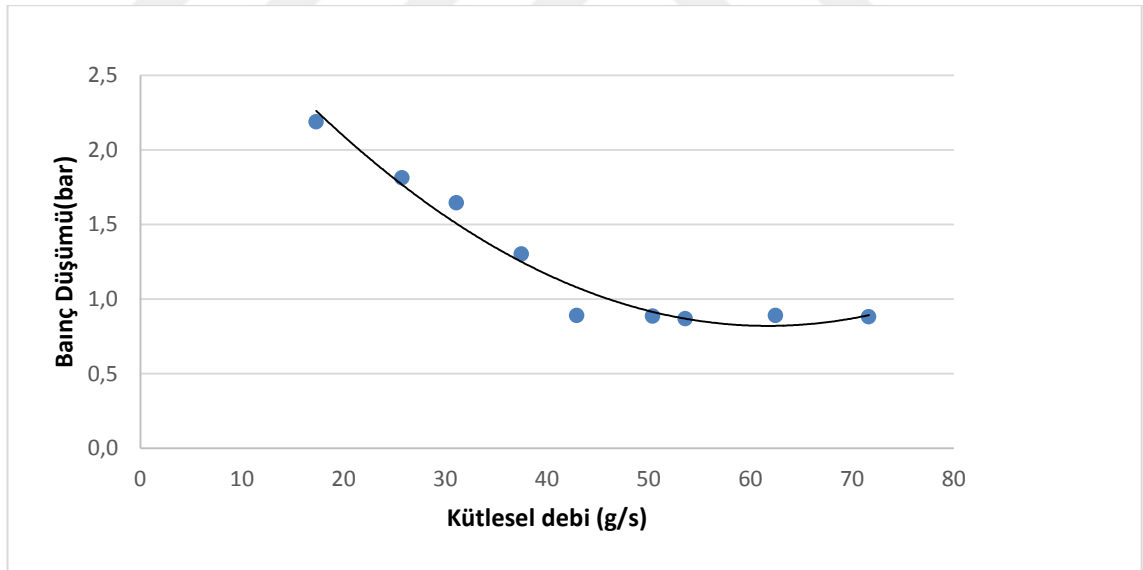
4.1. Kararlı Durum Karakteristikleri

Deney sisteminde kararlı durum karakteristiklerini belirlemek için $\Delta p - \dot{m}$ (test borusunda kütleli debiye karşılık oluşan basınç düşümleri) grafikleriyle ve iki fazlı akışlı sistemlerde literatürde yaygın olarak kullanılan yatık “S” şeklindeki kararlı durum karakteristik eğrileri çizilmiştir. Grafiklerde her iki test borusu için farklı kütleli debilere karşılık, dengeleyici tank basıncıyla test borusu çıkış basıncı arasındaki farkla hesaplanan, basınç düşümü verileri gösterilmektedir. Eğrilerin eğimlerinin pozitif olduğu tek fazlı sıvı bölgesi yüksek kütleli debi değerlerine karşılık gelirken eğrinin negatif eğimli olduğu kısım kütleli debi ve basınç düşümü verilerinin azalmasıyla minimum noktaya geldiği, ilk kabarcıkların meydana geldiği ve iki fazlı akışın başladığı bölgedir. Kabarcıkların nümerik olarak artması ile sıvı ve buhar fazları beraberakmaya başlar ve ortam yoğunluğu sıvı faz ile karşılaştırıldığında daha aşağı düşer, böylelikle basınç düşümü artmış olur. Kütleli debinin iyice azaltılması eğrilerde doygun buhar bölgesi sınırına kadar olan negatif eğimli bölgelerin pozitif eğime geçmesine ve basınç düşümü değerlerinin de azalmasına sebep olur.

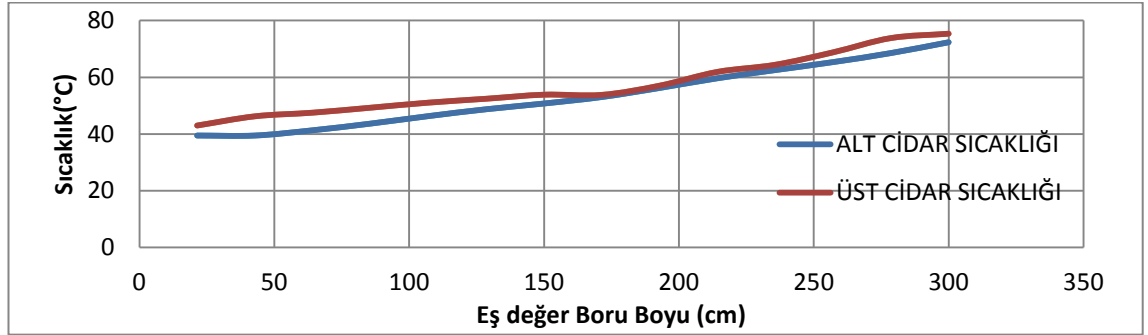
Her iki test borusu için karakteristik durum eğrileri oluşturulmuş ve k değeri açısından kıyaslanmıştır. Akışkan giriş sıcaklığı $T_g = 15^\circ\text{C}$ ve ısı gücü $Q = 22\text{ kW}$ sabit olacak şekilde deneyler yapılmıştır. Yüzey artırım elemanı olmayan boş boru Boru-1, 10 mm adımlı konik yay dizileri içeren boru ise Boru-2 olarak adlandırılmıştır ve her bir boru için karakteristik durum eğrileri verilmiştir. İkinci test borusu için verilen karakteristik

durum eğrilerinde basınç düşümü verilerinde farklılıklar görülmektedir. 10 mm adımlı yay dizilerinden oluşan yüzey artırım elemanı bulunan Boru-2’de elde edilen basınç düşümü değeri Boru-1’de elde edilen basınç düşümü değerinden fazladır.

Basınç düşümü değerleri karşılaştırıldığında Boru-1 < Boru-2 olduğu görülmektedir. Yüzey artırımı boruda akışta katmanlaşma oluşmasının tesiri ile borularda sürtünmeli basınç düşümüne ek olarak buhar fazının neden olduğu ilave basınç düşümü sebebiyle azalan kütleli debi değerlerine karşılık gelen basınç düşümü değerlerindeki artış miktarı boş boru’dakinden daha fazladır. Kararlı durum eğrilerinde negatif eğim açısının dikleştiği bölgeler sistemin kararsızlığının arttığı bölgelerdir. Bu durumda boş boruya ait kararlı durum eğrilerinde yüzey artırım elemanı kullanılan borulara ait eğrilere kıyasla daha az negatif bölge eğimine sahip olması öngörülür ve deney sonuçlarından elde edilen grafiklerin bu öngörüye uygun olduğu görülmektedir.

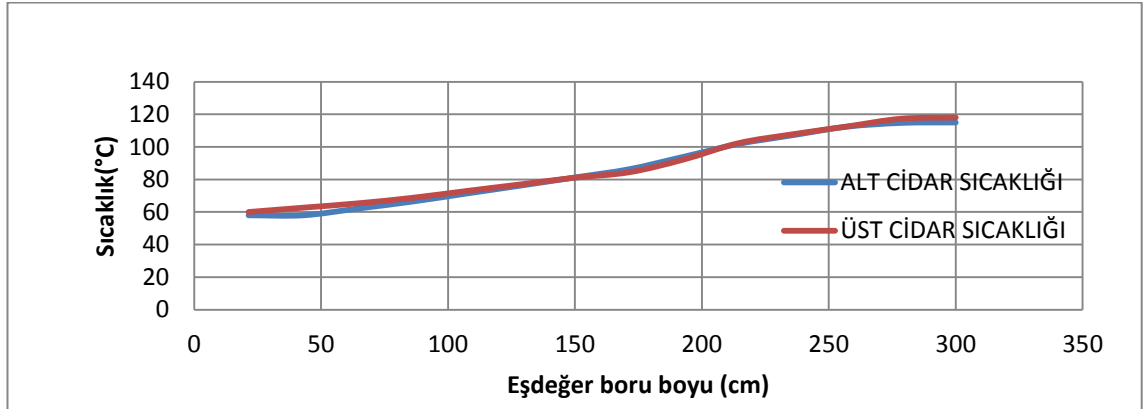


Şekil 4.1. Boru-1 için kararlı durum karakteristik eğrisi

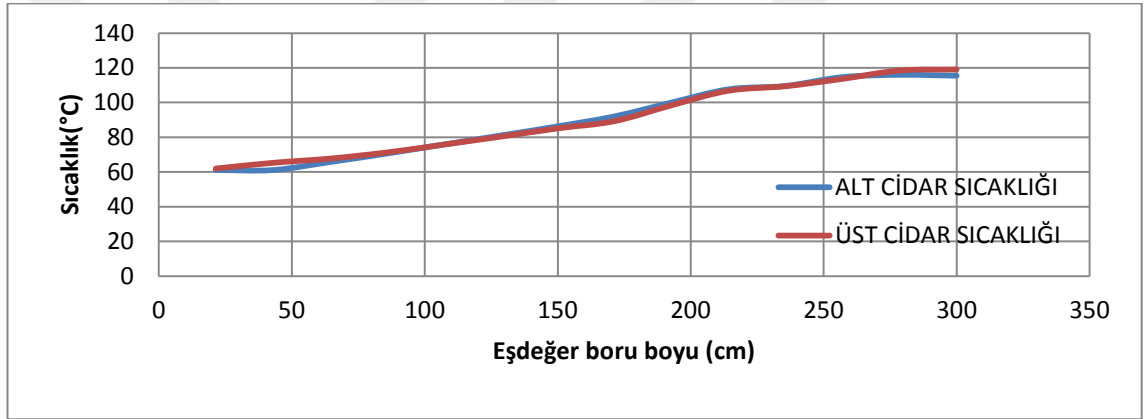


Şekil 4.2. Boru-1 için $\dot{m} = 72$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

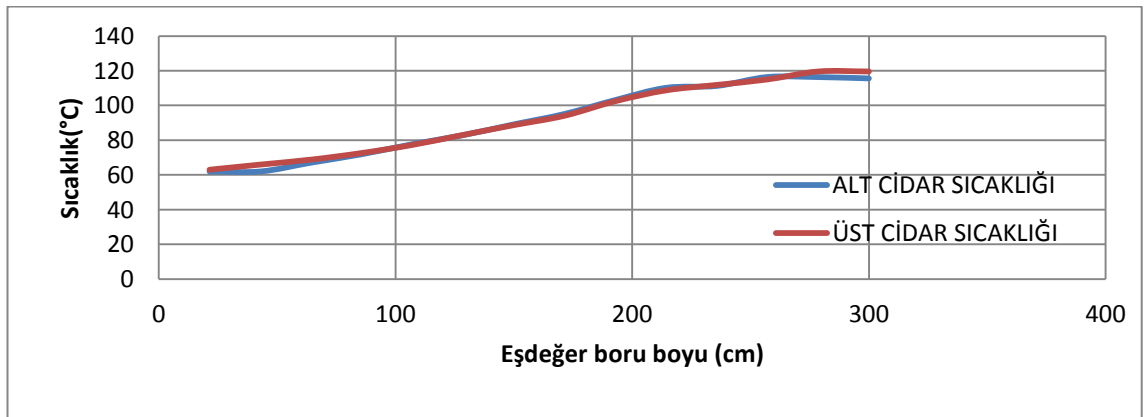
Yüzey artırma elemanı kullanılmayan boş boruda Şekil 4.2 için tek fazlı konveksiyon halindeki sıcaklık profilleri gösterilmiştir. Şekil 4.2’de giriş sıcaklığı $T_g=15^\circ\text{C}$, akışkan giriş debisi $\dot{m}=72$ g/s, ısı gücü $Q=22$ kW olarak ele alınmıştır. Test bölümündeki akış şekillerinden de görüldüğü üzere tek sıvı fazındadır. Test borusunun cidarında üretilen ısı neredeyse tamamı sıvı fazına transfer edilmektedir. Fakat bu akış durumunda üretilen ısı sıvı fazını kaynama noktasına taşıyacak kadar fazladeğildir. Test borusu girişinden itibaren hemen lineer olarak değişen alt ve üst cidar sıcaklıkları görülmektedir. Üst cidar sıcaklığı alt cidar sıcaklığından daha yüksek değerlerde seyretmektedir. Zira kaldırma kuvvetleri sebebiyle daha düşük yoğunluklu sıvı tabakası akış yönünde üst cidara doğru hareket etmektedir. Alt cidarda ise yoğunluğu fazla olan sıvı tabakası bulunmaktadır. Üst cidar boyunca akan daha düşük yoğunluklu sıvı tabakasının sahip olduğu ısı transfer katsayısı alt cidar boyunca akmakta olan yüksek yoğunluklu sıvı tabakasının sahip olduğu ısı transfer katsayısından daha küçük olması nedeniyle üst cidarda ki akışkan tarafından transfer edilen ısı miktarı alt cidardakine oranla daha az olmaktadır. Bunun sonucunda da test borusunda akış yönünde elde edilen üst cidar sıcaklığı daima alt cidar sıcaklığından yüksek olmaktadır.



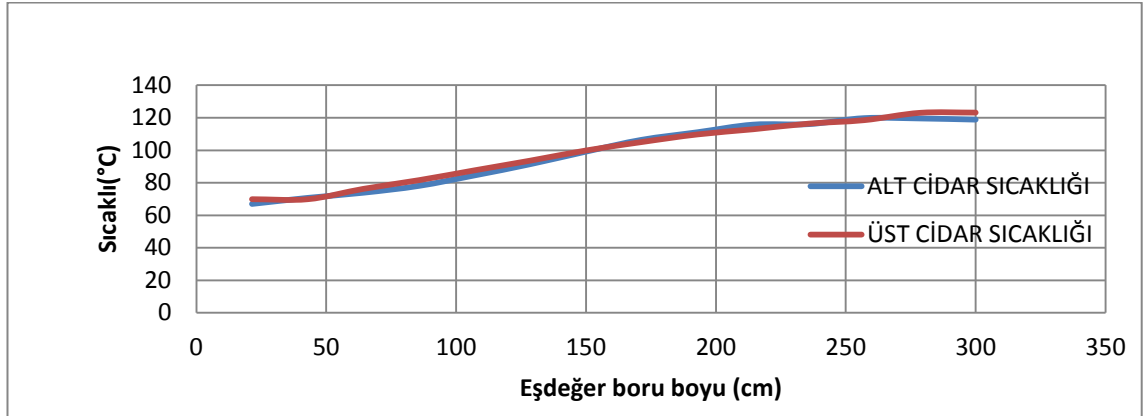
Şekil 4.3. Boru-1 için $\dot{m} = 62$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



Şekil 4.4. Boru-1 için $\dot{m} = 54$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

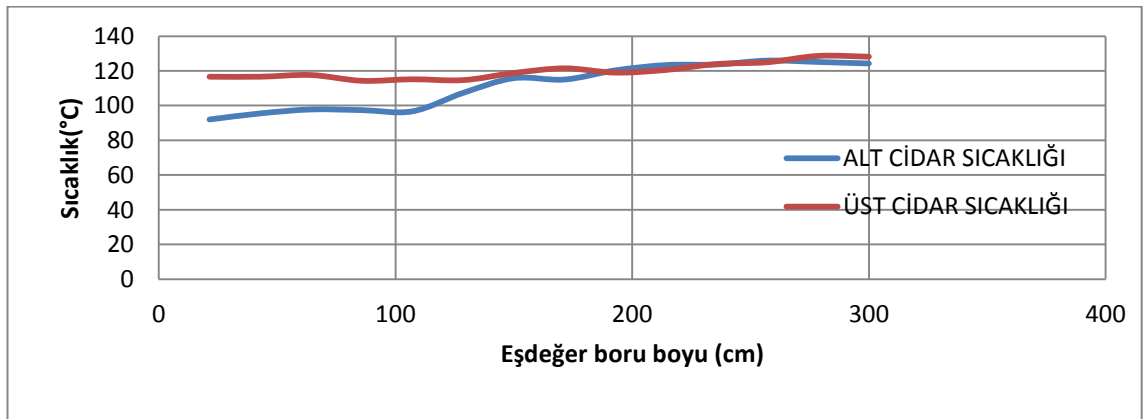


Şekil 4.5. Boru-1 için $\dot{m} = 50$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

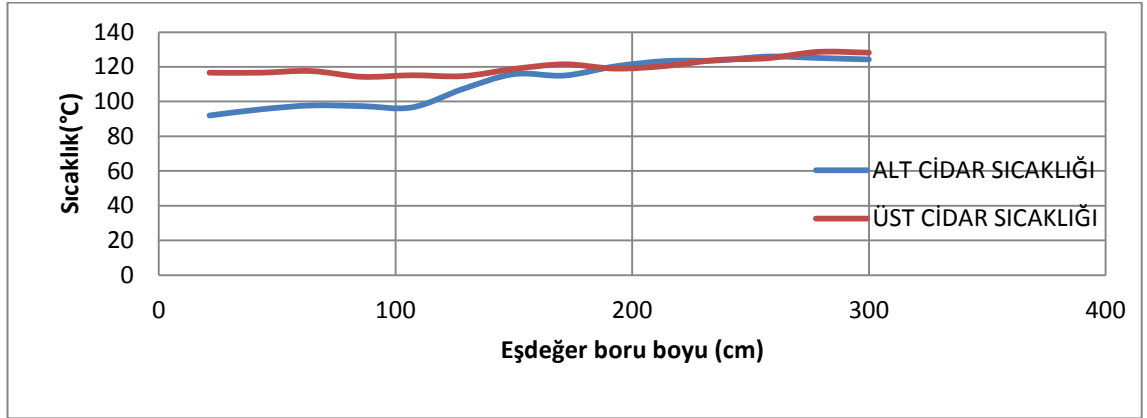


Şekil 4.6. Boru-1 için $\dot{m} = 43$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

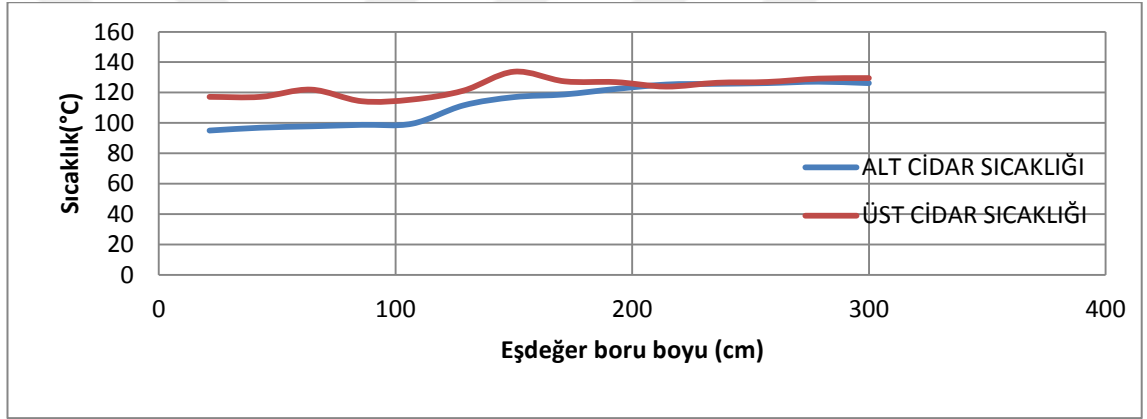
Şekil 4.5, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'deki grafiklerde boş boru için kısmi kaynamada elde edilen sıcaklık profilleri gösterilmiştir. Akış yönünde test borusunun alt cidar ve üst cidar sıcaklıklarında bir artış meydana gelmektedir. Kaynamanın başlamasıyla ısı transfer katsayısındaki artışın asıl nedeninin akış ortamında oluşmakta olan buhar kabarcıklarının büyüyerek test borusu yüzeyinden ayrılmaları ve sıvı faz tabakasında türbülans oranının artmasındandır.



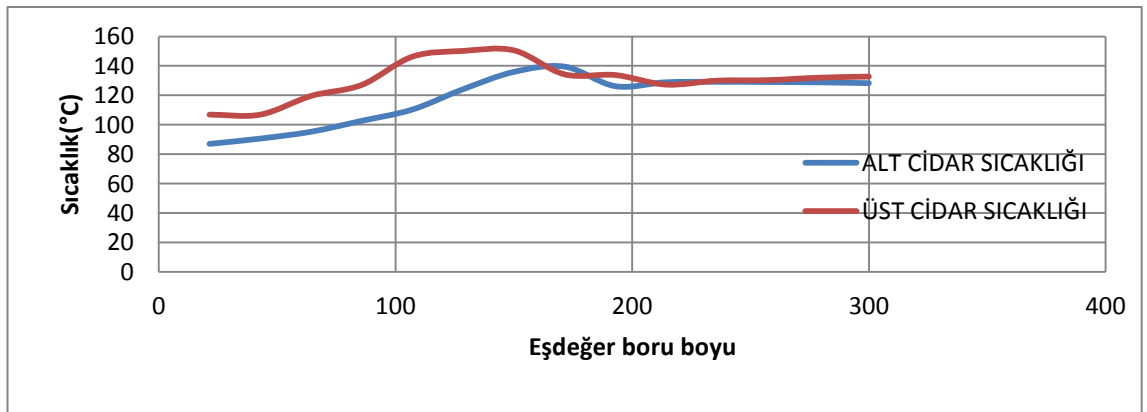
Şekil 4.7. Boru-1 için $\dot{m} = 38$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



Şekil 4.8. Boru-1 için $\dot{m} = 31$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

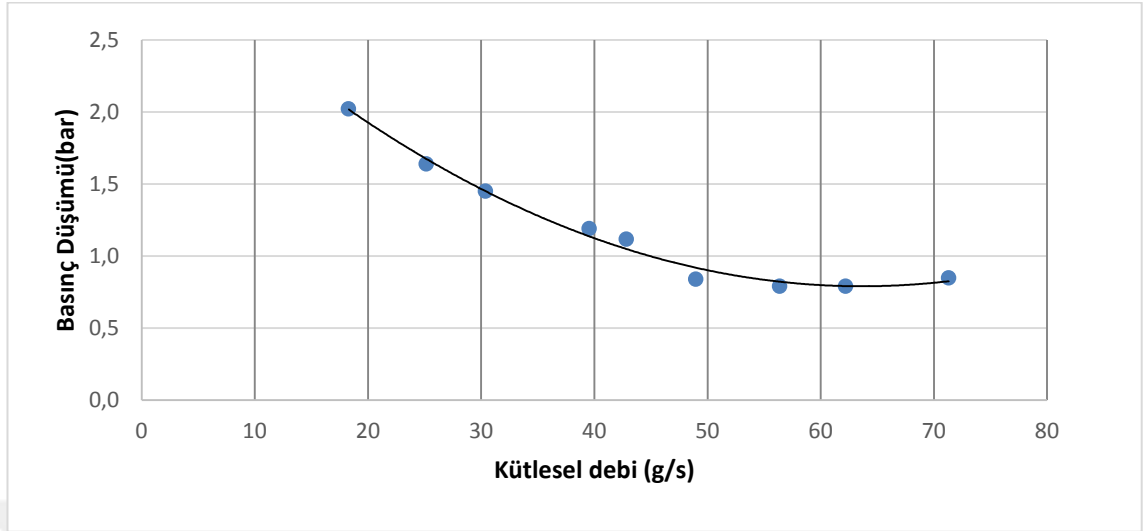


Şekil 4.9. Boru-1 için $\dot{m} = 26$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

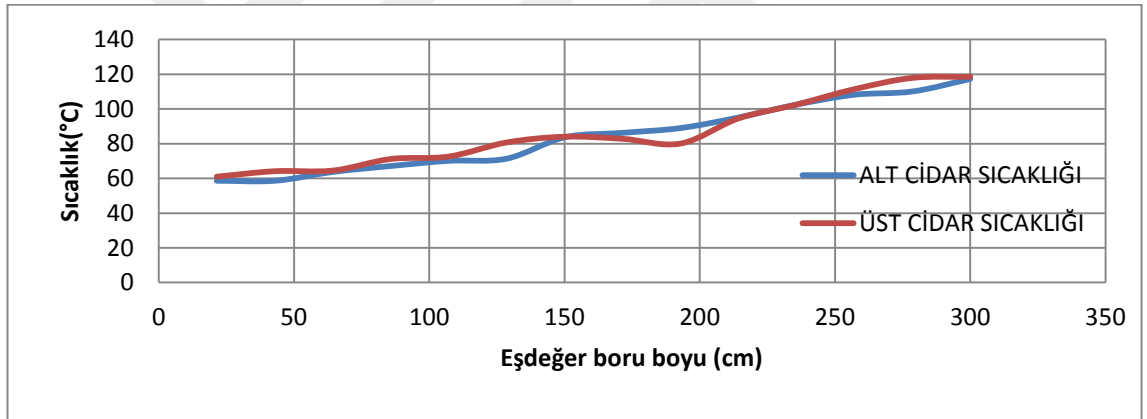


Şekil 4.10. Boru-1 için $\dot{m} = 17$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

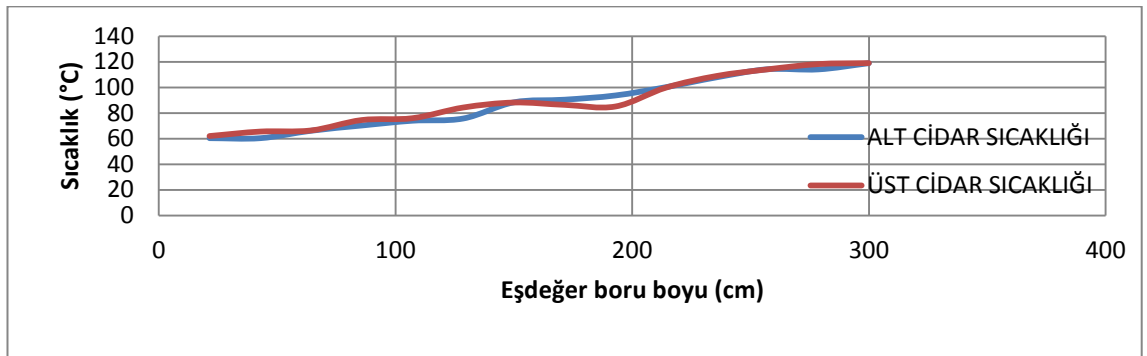
Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9ve Şekil 4.10'de boş boru sıcaklık grafiklerine dikkat edilirse üst cidar sıcaklık değerleri borunun orta kısmına doğru oldukça artmaktadır. Alt cidar sıcaklıkları ise üst cidar sıcaklığına nispeten boru boyunca çok daha kararlı bir artış seyretmektedir. Test borusunun sonuna doğru alt ve üst cidar sıcaklık değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. Alt cidar boyunca ısıtılmaya başlanan sıvı fazındaki akışkan tabakası daha düşük yoğunluğa sahip olması sebebiyle test borusunun içerisindeki akış ortamının tam orta kısmından akmaya başlayacaktır. Bu da alt cidar sıcaklığında bir miktarda olsa artışa sebep olacaktır. Üst cidarda burn-out olayının borunun orta kısımlarına doğru olduğu anlaşılmaktadır. Burada test borusunda akmakta olan akışın üst cidara yakın kısmı boyunca tamamıyla buhar fazında olan akışkan kütlesiyle üst cidarın temas ettiği ve burn-out olayının olduğu noktaya literatürde dry-out noktası denmektedir. Çünkü üst cidara yakın kısımlarda biriken kabarcıkların belirli bir süre sonunda birleşerek üst cidarla sürekli temas halinde olan bir buhar yastığının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı yatay birboru kanalında oluşan iki fazlı akış rejiminde borunun orta kısımlarına yakın yerlerde üst cidarda meydana gelen böyle bir burn-out olayının dikkate alınması gerekmektedir. Bu dikkat sadece test borusunun orta kısımları ile sınırlı kalmamalı aynı zamanda test borusunda burn-out olayının oluşabileceği potansiyel noktaları da içermelidir. Burn-out olayının meydana geldiği bölgeden sonra üst cidar sıcaklığının tekrar azalmaya başladığı görülmektedir. Akış yönünde devam etmekte olan buharlaşmadan dolayı akışın buhar fazı artmaktadır. Buhar fazının daha hızlı akış oranına sahip olmasından dolayı sıvı-buhar ara yüzeyinde daha yüksek genliklere ve dalgalı bir formasyona sahip bir iki fazlı akış rejiminin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu tip akış rejiminde çok hızlı olan buhar fazında ki akış ara yüzeydeki dalgalara çarparak sıvı fazındaki akışkan partiküllerinin buhar fazındaki akışkan kısmına püskürtülmesine neden olmaktadır. Püskürtülen sıvı fazındaki bu partiküllerin bir kısmı test borusu cidarının en üst kısmı boyunca birikmesiyle tüm boru cidarını kaplayarak annular akış olarak bilinen dairesel akış rejimi meydana getirir(Ejder 2013).



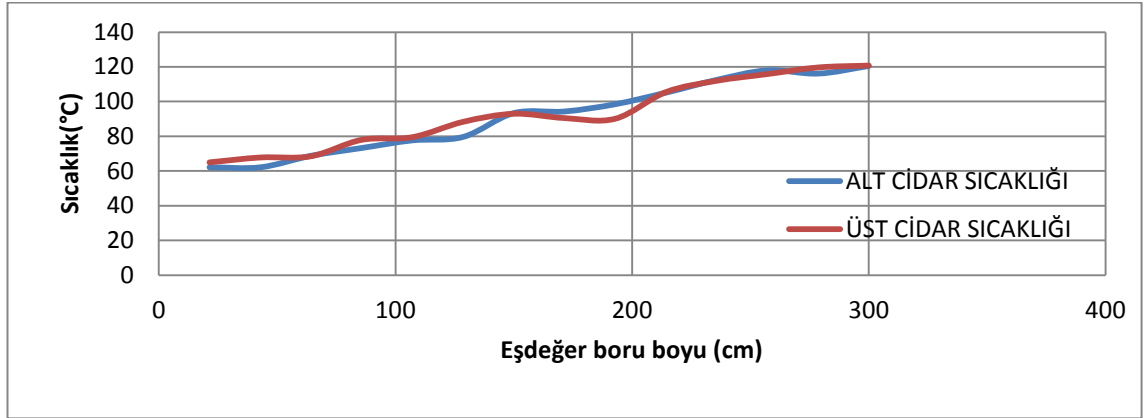
Şekil 4.11. Boru-2 için kararlı durum karakteristik eğrisi



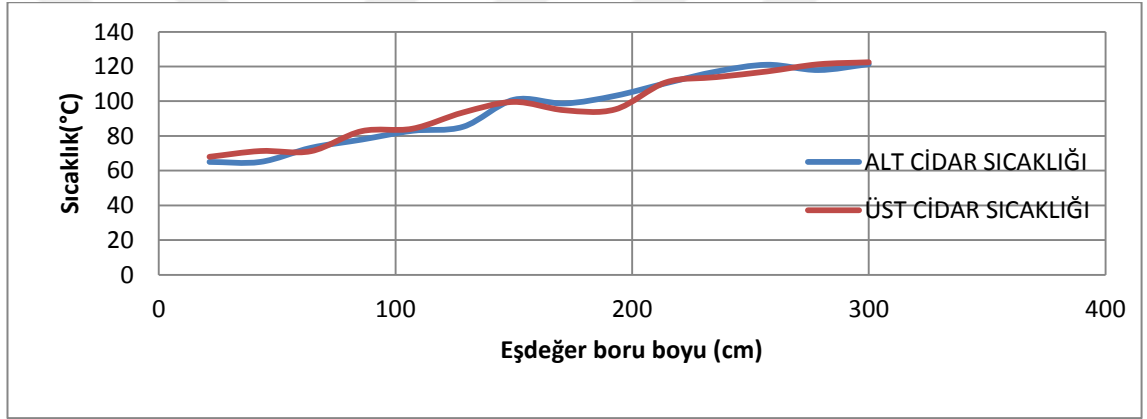
Şekil 4.12. Boru-2 için $\dot{m} = 72 \text{ g/s}$ kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



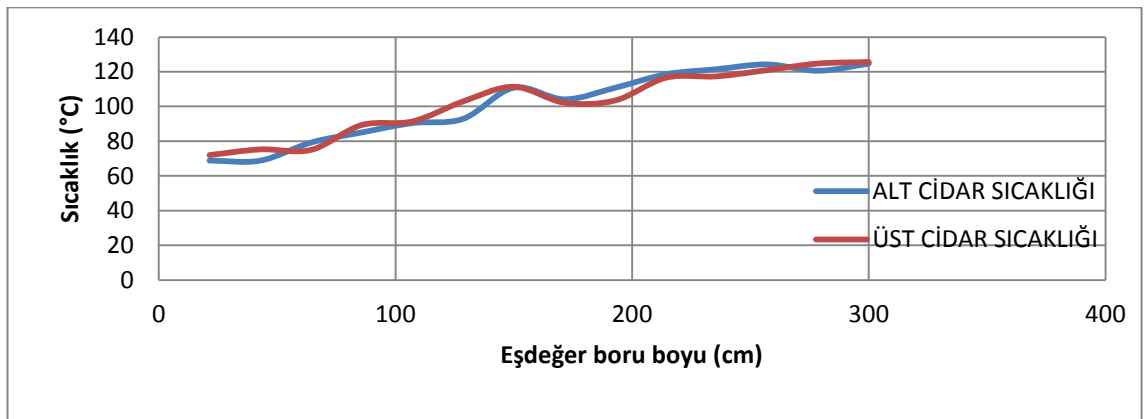
Şekil 4.13. Boru-2 için $\dot{m} = 62 \text{ g/s}$ kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



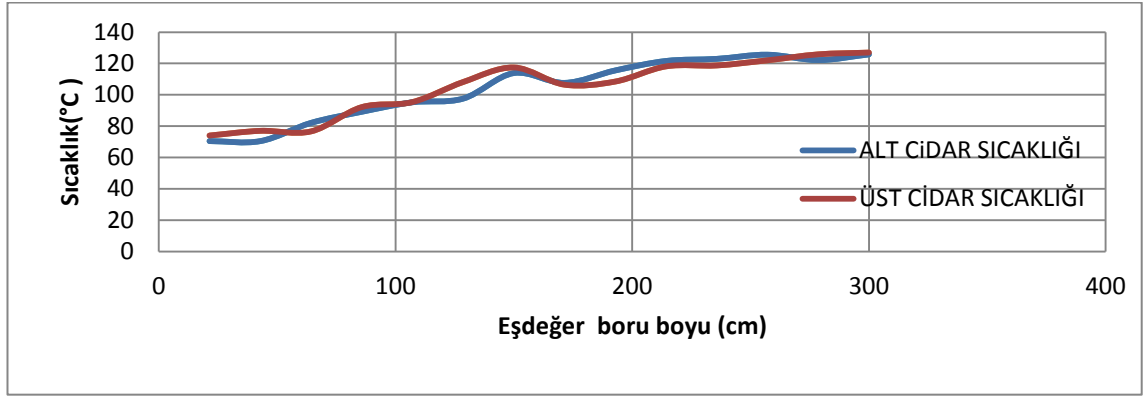
Şekil 4.14. Boru-2 için $\dot{m} = 54$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



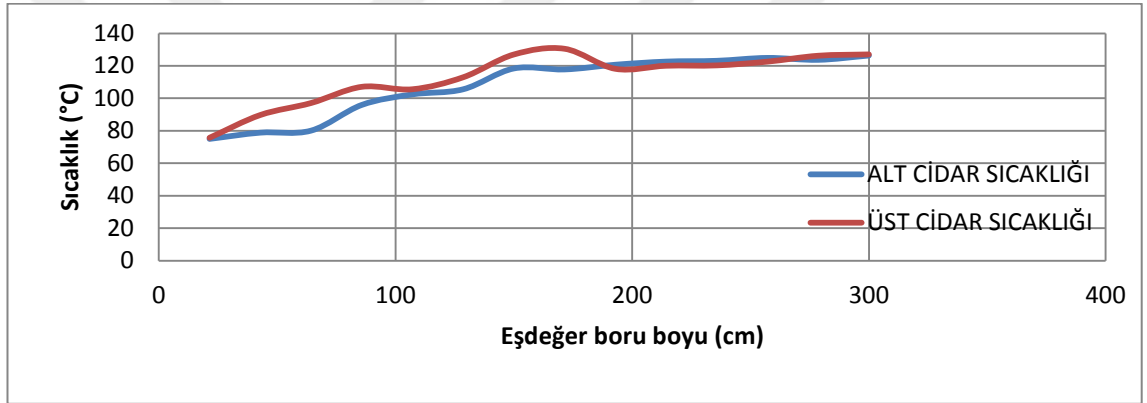
Şekil 4.15. Boru-2 için $\dot{m} = 50$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



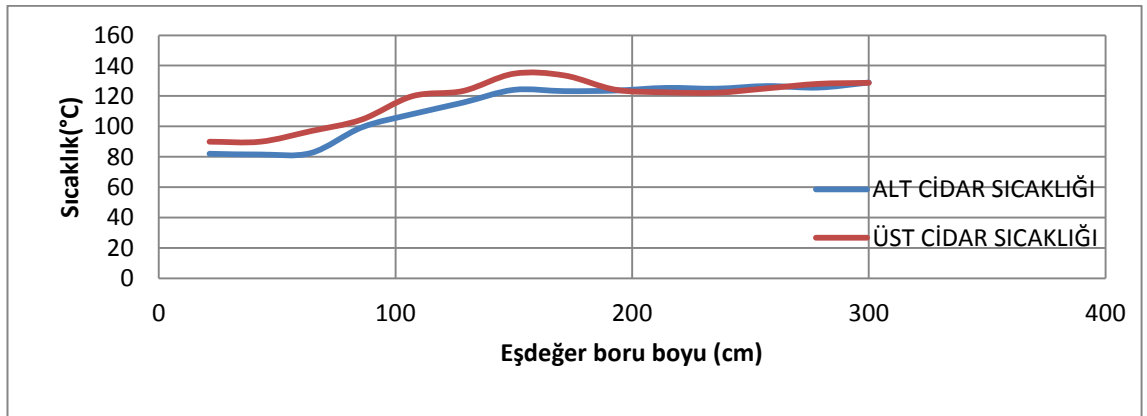
Şekil 4.16. Boru-2 için $\dot{m} = 43$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



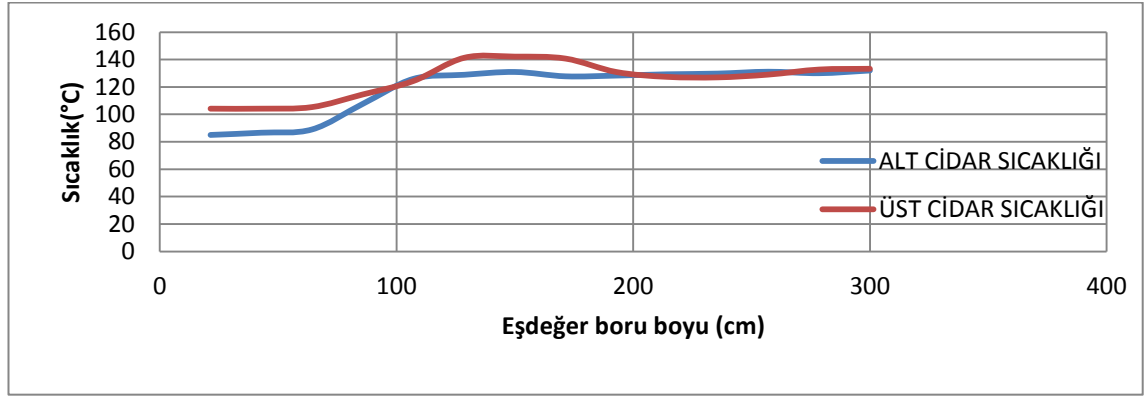
Şekil 4.17. Boru-2 için $\dot{m} = 38$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



Şekil 4.18. Boru-2 için $\dot{m} = 31$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları



Şekil 4.19. Boru-2 için $\dot{m} = 26$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

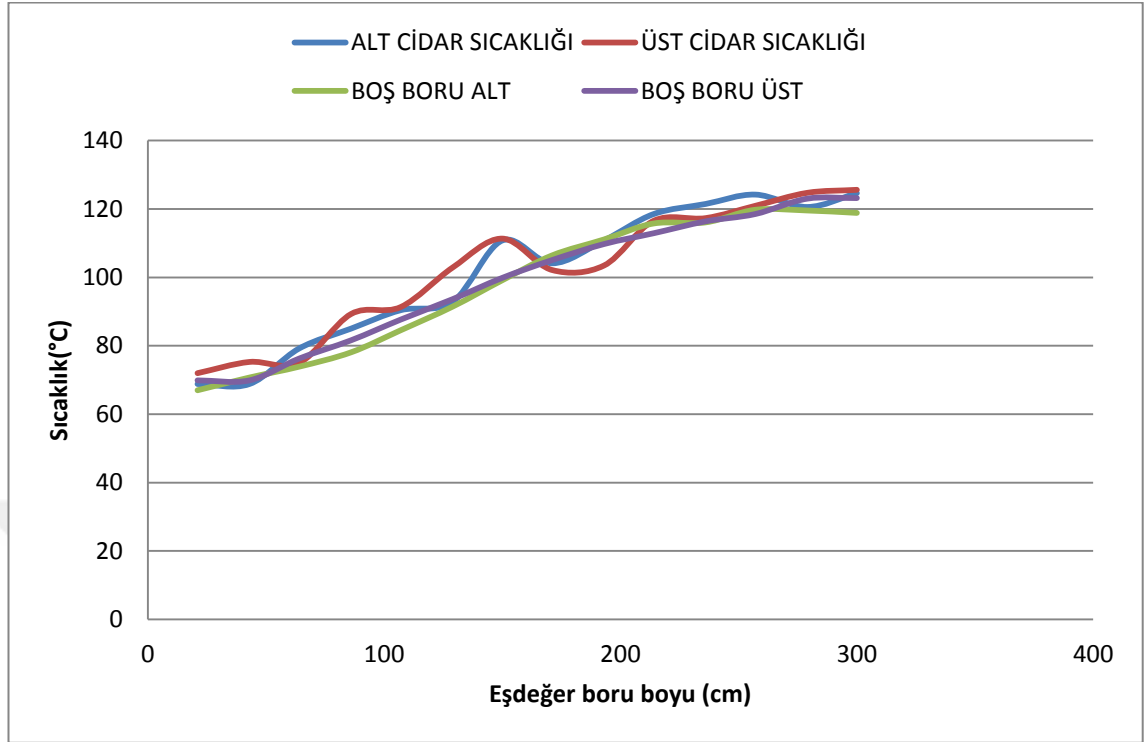


Şekil 4.20. Boru-2 için $\dot{m} = 17$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları

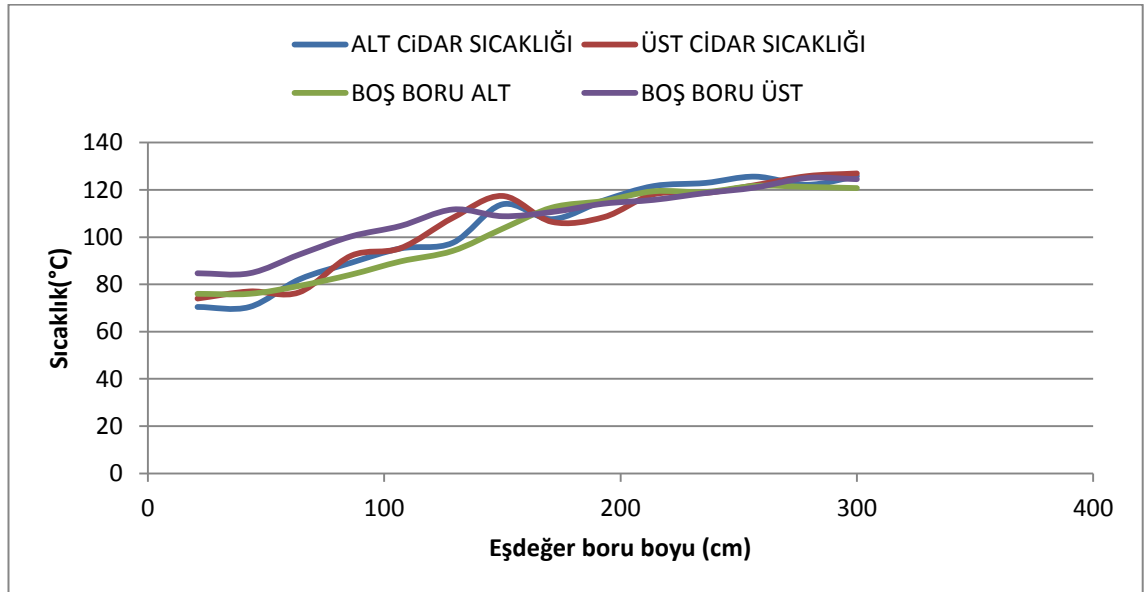
Test borusunun içerisinde; tel çapı 1.8 mm, adımı 10 mm olan bir konik yay elmanı bulunmaktadır ve efektif çapı 17.34mm'dir.

Borunun içerisine yerleştirilmiş olan konik yay elemanı boru boyunca akıştaki türbülans düzeyini arttırarak sıvı ve buhar fazlarının karışık bir şekilde akmasını sağlamaktadır.

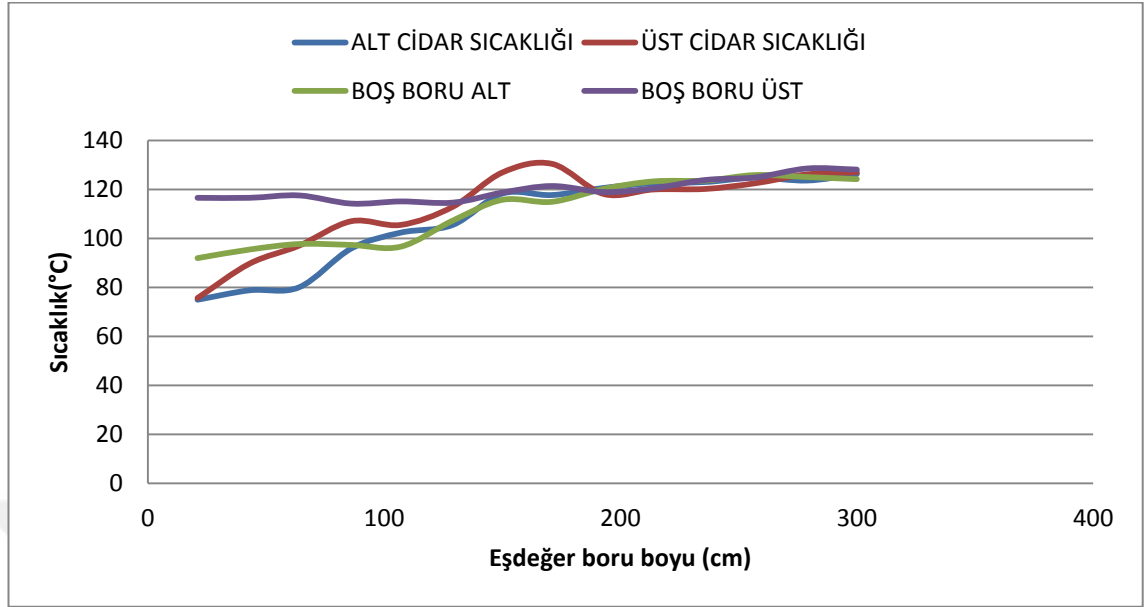
Grafiklere dikkat edilirse tek fazlı bölgede alt ve üst cidar sıcaklıkları boru boyunca lineer olarak artmaktadır. Alt ve üst cidar sıcaklıkları arasında çok fazla bir sıcaklık farkı yoktur. Daha sonra sıvı ve buhar fazlarının karışık bir şekilde akması sebebiyle alt cidar sıcaklık değerleri ile üst cidar sıcaklık değerleri birbirlerine yaklaşmaktadır. En belirgin ayrışmanın düşük debilerde olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca dikkat edilirse eş değer boru boyunun son kısımlarında alt ve üst cidar sıcaklıkları hemen hemen aynı değerde seyretmektedir. Bunun nedeni boru içerisine yerleştirilmiş olan konik yay elemanının akışa sağlamış olduğu türbülanstır. Böylelikle sıvı ve buhar fazları karışık bir şekilde akmaktadırlar.



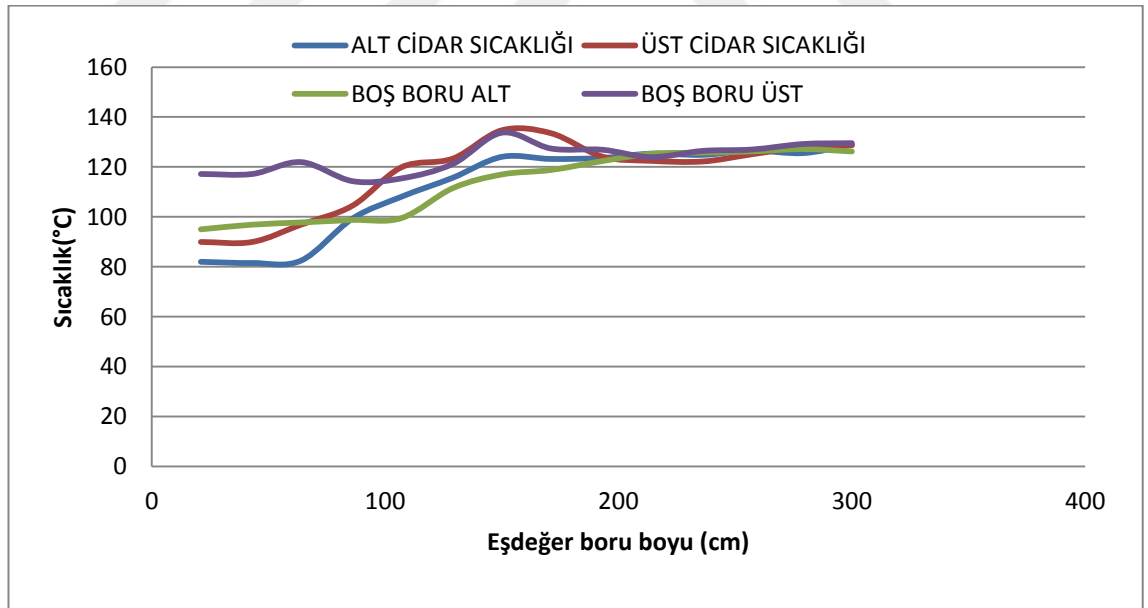
Şekil 4.21. Boru-1 ve Boru-2 için $\dot{m} = 43$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas



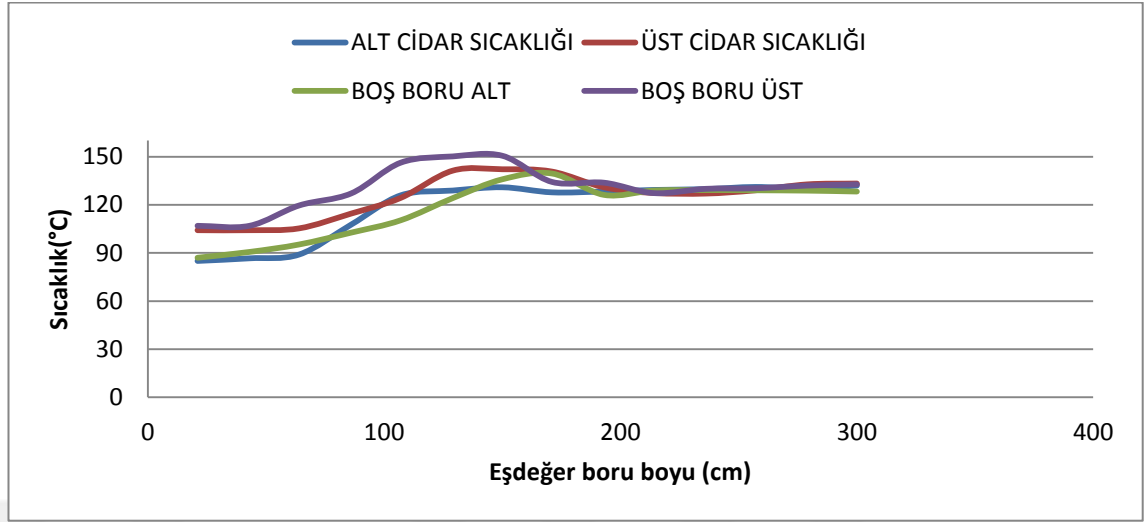
Şekil 4.22. Boru-1 ve Boru-2 için $\dot{m} = 38$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas



Şekil 4.23. Boru-1 ve Boru-2 için $\dot{m} = 31$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas

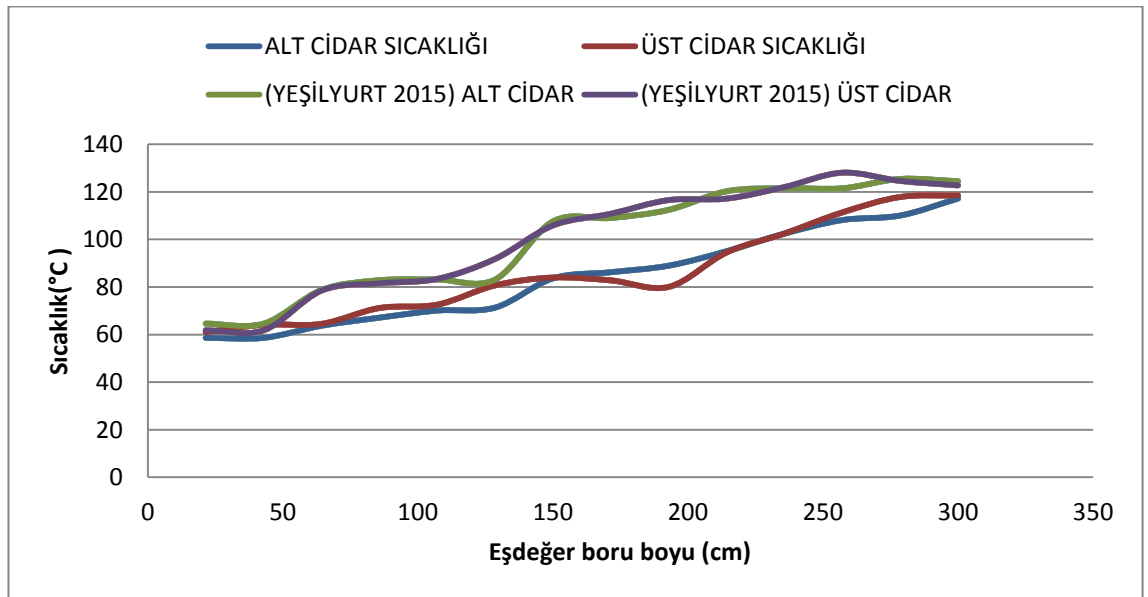


Şekil 4.24. Boru-1 ve Boru-2 için $\dot{m} = 26$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas

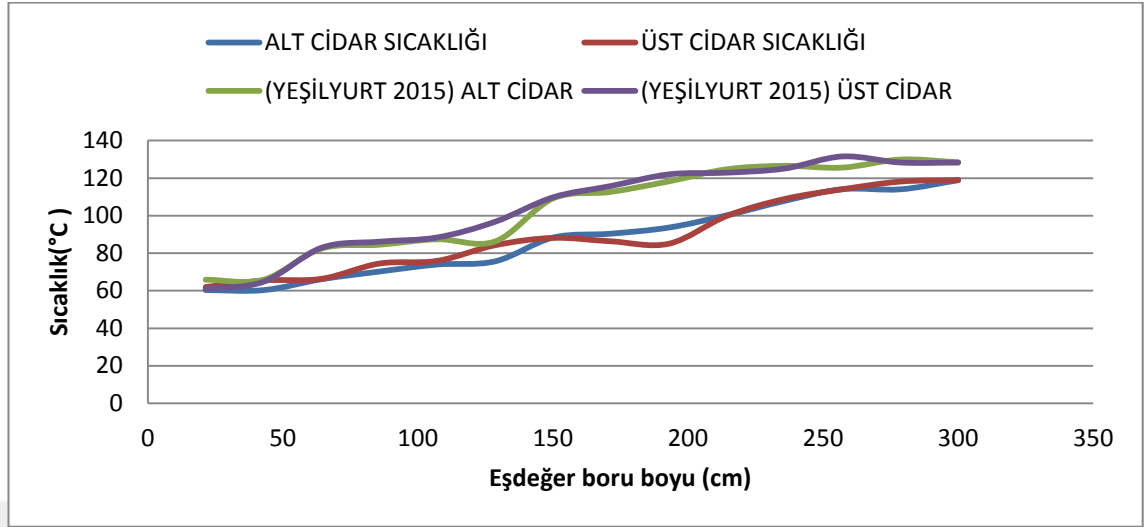


Şekil 4.25. Boru-1 ve Boru-2 için $m = 17$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas

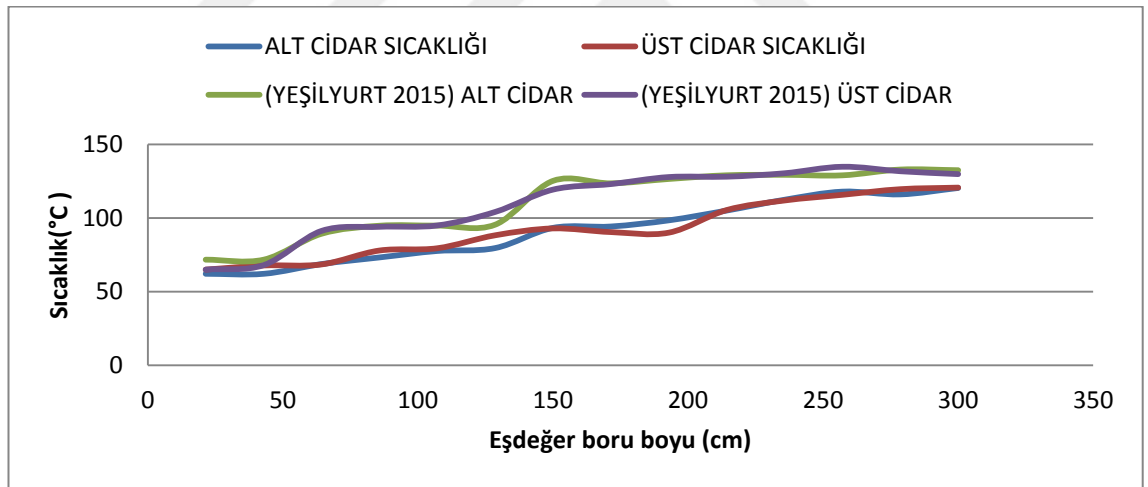
Grafiklerde azalan kütleli debiye göre dikkat edilirse alt ve üst cidar sıcaklıkları boş boruya nazaran oluşan türbülansın dolayısıyla oldukça düşük değerlerde seyretmektedir. Cidar sıcaklıkları boş boruya nazaran azalmıştır. Burn out olayı daha düşük sıcaklık değerlerinde meydana geldiği görülmektedir.



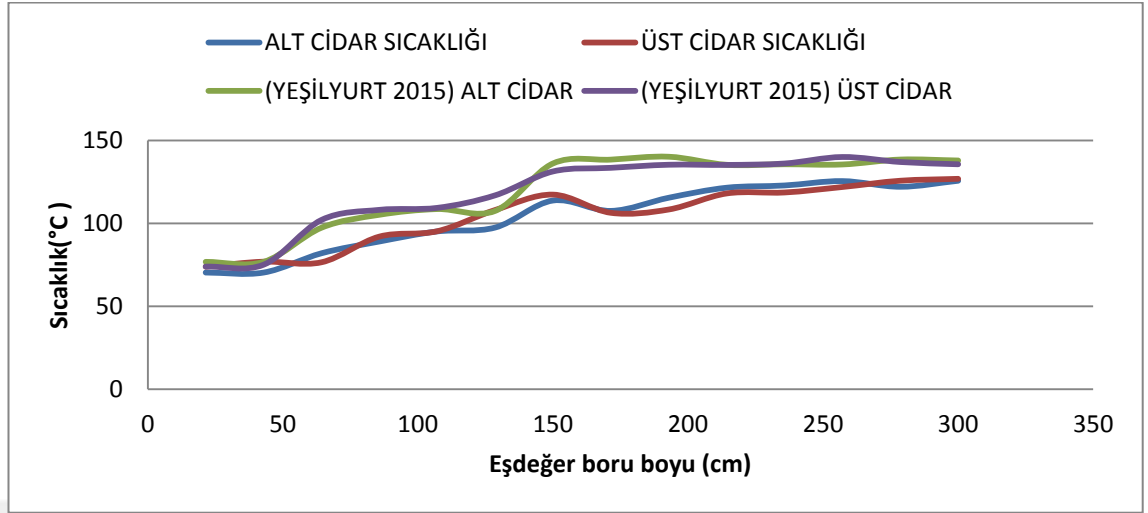
Şekil 4.26. Boru-2 ve Boru-4 (Yeşilyurt 2015) için $m = 72$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas



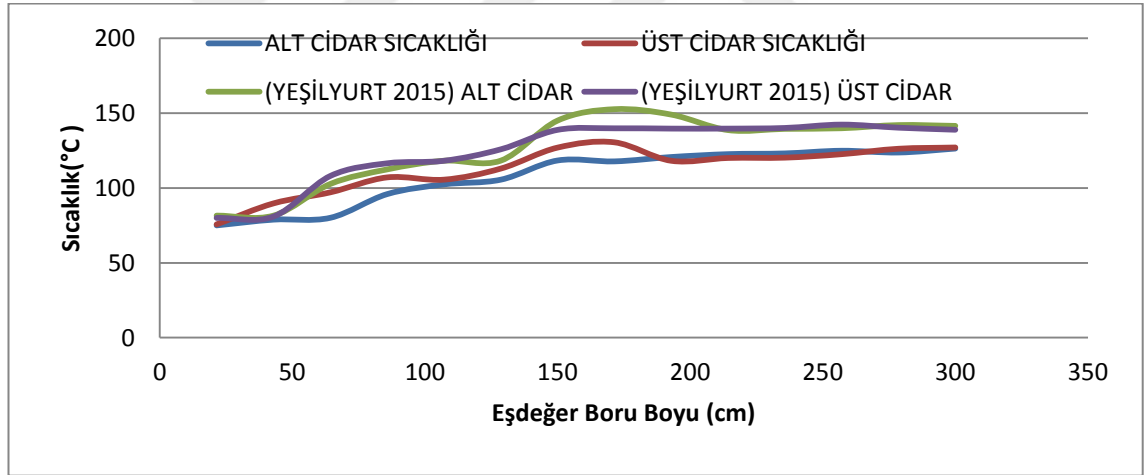
Şekil 4.27. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt 2015)için $\dot{m} = 62$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas



Şekil 4.28. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt 2015)için $\dot{m} = 54$ g/s kütleli debide alt ve üst cidar sıcaklıkları kıyas



Şekil 4.29. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt 2015)için $\dot{m} = 38$ g/s kütleli debide alt ve üst cedar sıcaklıkları kıyas

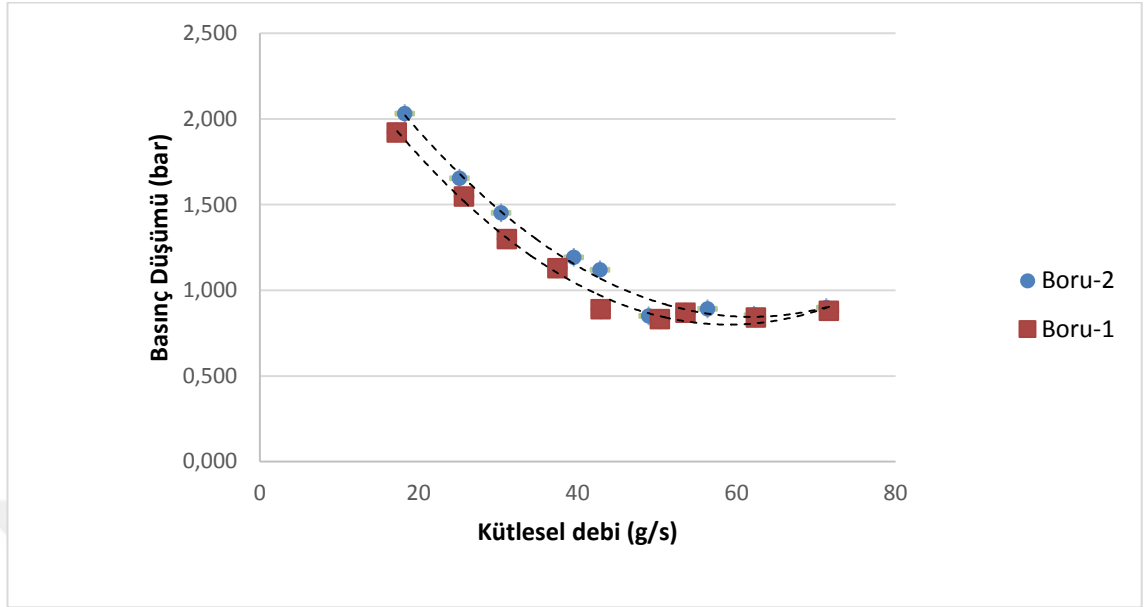


Şekil 4.30. Boru-2 ve Boru-4(Yeşilyurt 2015)için $\dot{m} = 31$ g/s kütleli debide alt ve üst cedar sıcaklıkları kıyas

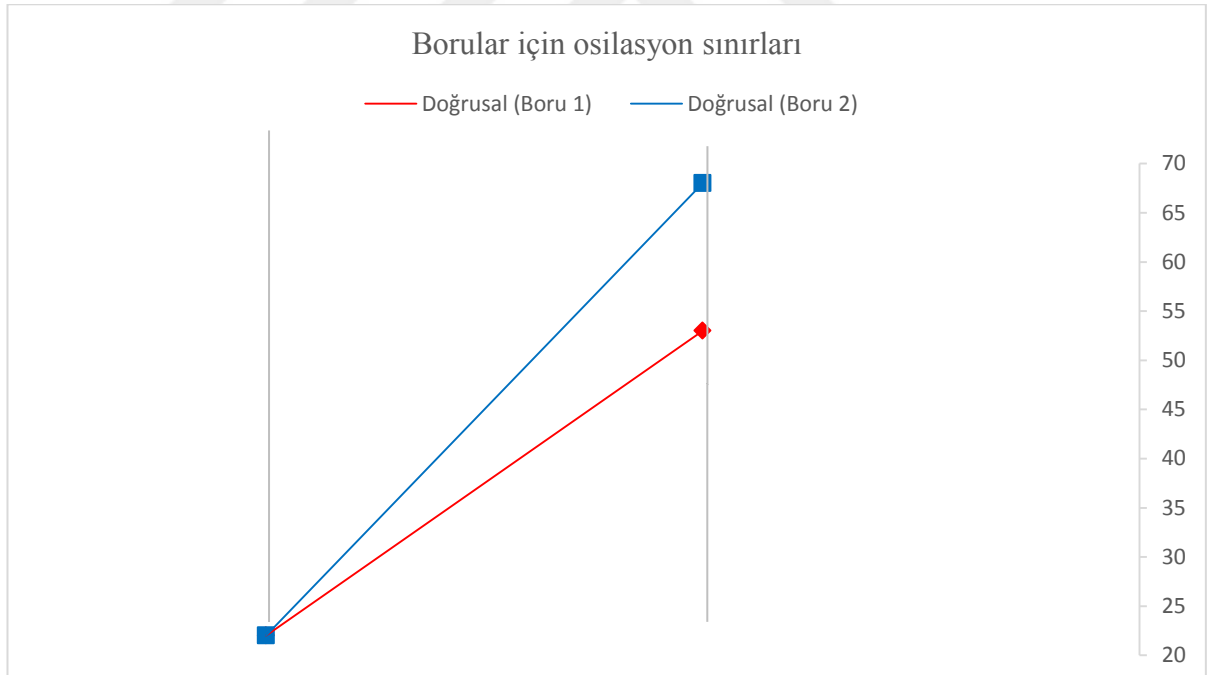
Cidar sıcaklıkları daha önce kullanılan yüzey artırım elemanına nazaran azalmıştır. Burn out olayı daha düşük sıcaklık değerlerinde meydana geldiği görülmektedir. Bu da bizim kullanmış olduğumuz yüzey artırım elemanının daha faydalı olduğunun kanıtıdır. Önceki yüzey artırım elemanına göre bizim kullanmış olduğumuz yüzey artırım elemanı sayesinde boru cidarına verilecek zararlar azaltılmıştır.

4.2. Osilasyon Sınırları

Bu çalışmada ikitest borusunun herbiri için ısıtıl güç, giriş suyu sıcaklığı, sistem basıncı, çıkış kısıtlayıcısı ve sıkıştırılabilir hacim sabit tutulmak suretiyle BDO ve TO'ların farklı kütleli debi verilerine bağılı sınırları, genlikleri ve periyotları incelenmiştir. İki fazlı kararsız akışlı sistemlerde oluşarak sürece ve sistem elemanlarına zarar veren BDO ve TO'ların akış ortamında kontrolleri oldukça zor olduğundan titiz bir şekilde incelenmiştir. Şekil 4.'te iki farklı test borusu için kütleli debi'ye bağılı BDO'ların sınırlarını gösteren grafik bulunmaktadır. Buradaki sınır değerleri, basınç düşümü değerlerine karşılık gelen kütleli debi değerleri ile meydana getirilen kararlı durum karakteristik eğrilerini göstermektedir. Grafiklerde çizgilerin birleştirdiği noktalar arasında kalan alan osilasyonların oluştuğu kararsız bölgeyi göstermektedir. Osilasyonların başlaması, kütleli debi azaldıkça basınç düşümü değerlerinin de azalıp minimum noktaya geldiği ve aynı zamandaki karakteristik eğrinin negatif eğimli olduğu bölgede ilk kabarcıkların meydana gelmesiyle görülmüştür. İçerisinde yüzey artırım elemanı bulunan boruda elemanın oluşturduğu türbülans nedeniyle sıvı-buhar fazlarının karışması neticesinde osilasyonların sınır değerlerinin boş boruya göre daha dar bir kütleli debi aralığında oluştuğu gözlemlenmiştir. Yer çekimi etkisi ile faz ayrışması olan yatay boru sistemlerinde türbülantör kullanımı yoğunluk farkı sebebiyle boru üst cidarında biriken buhar fazını dağıtarak sıvı damlacıklarının meydana gelmesine olanak sağlar. Şekil 4.'de tüm iki test borusu için verilen osilasyon sınırları da gösteriyor ki kararlılık sınır değerleri her iki test borusu için benzer karakteristiktir. Osilasyonların daha geniş bölgede oluşması demek sınır değerleri arasındaki uzaklık ile kararsız akış bölgesi büyümesinin doğru orantılı olması demektir.



Şekil 4.31. Tüm borular için basınç düşümleri



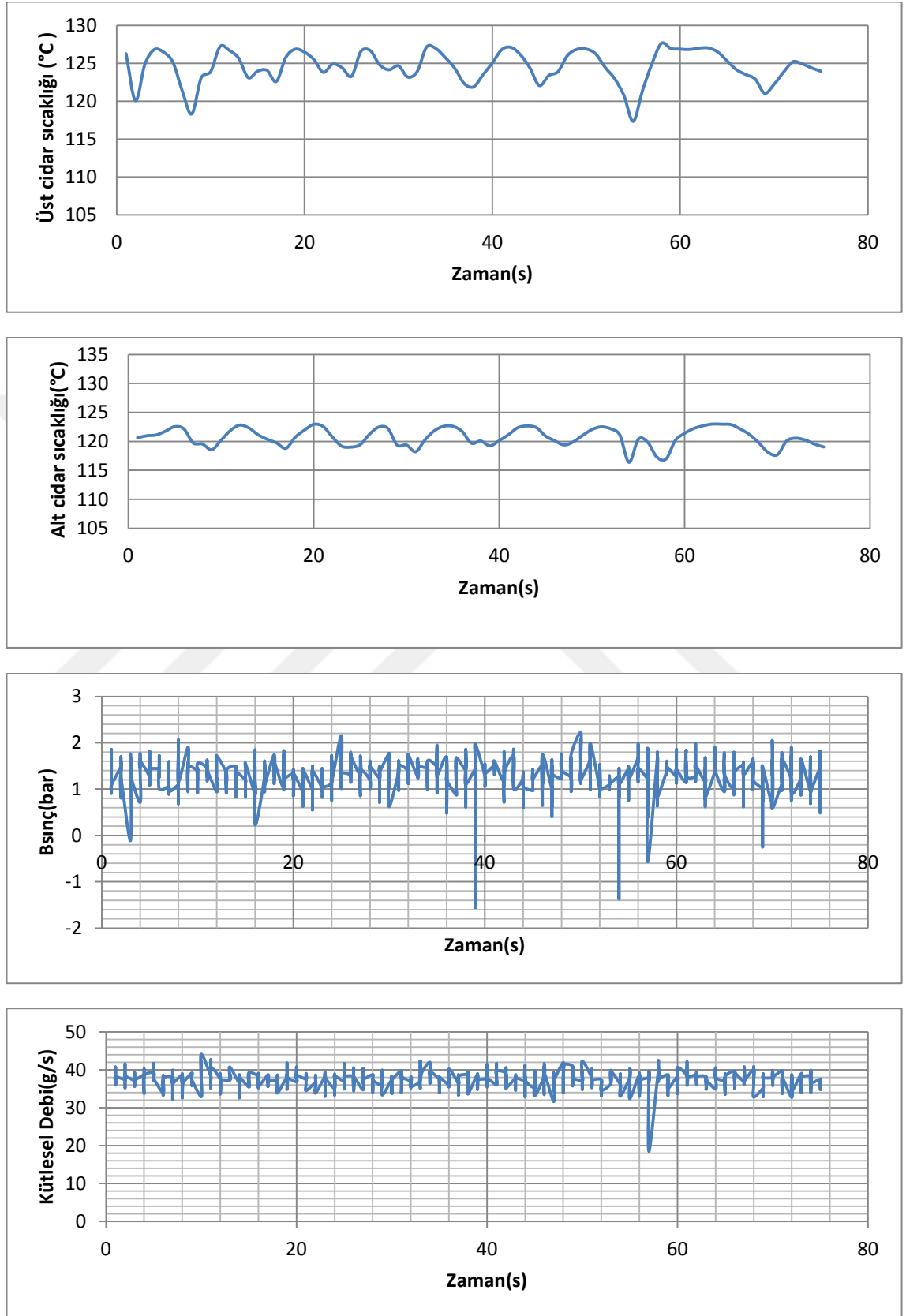
Şekil 4.32. Boru-1 ve Boru-2 için osilasyon sınırları

Şekilde de görüldüğü üzere kütlesel debi bölgesinde osilasyon sınırları açısından Boru-1 Boru-2'den daha geniş bir bölge teşkil etmektedir. Boş boru tipinin (Boru-1) kararsız olduğu içerisinde yüzey artırım elemanı bulunan Boru-2'nin ise kararlı olduğu

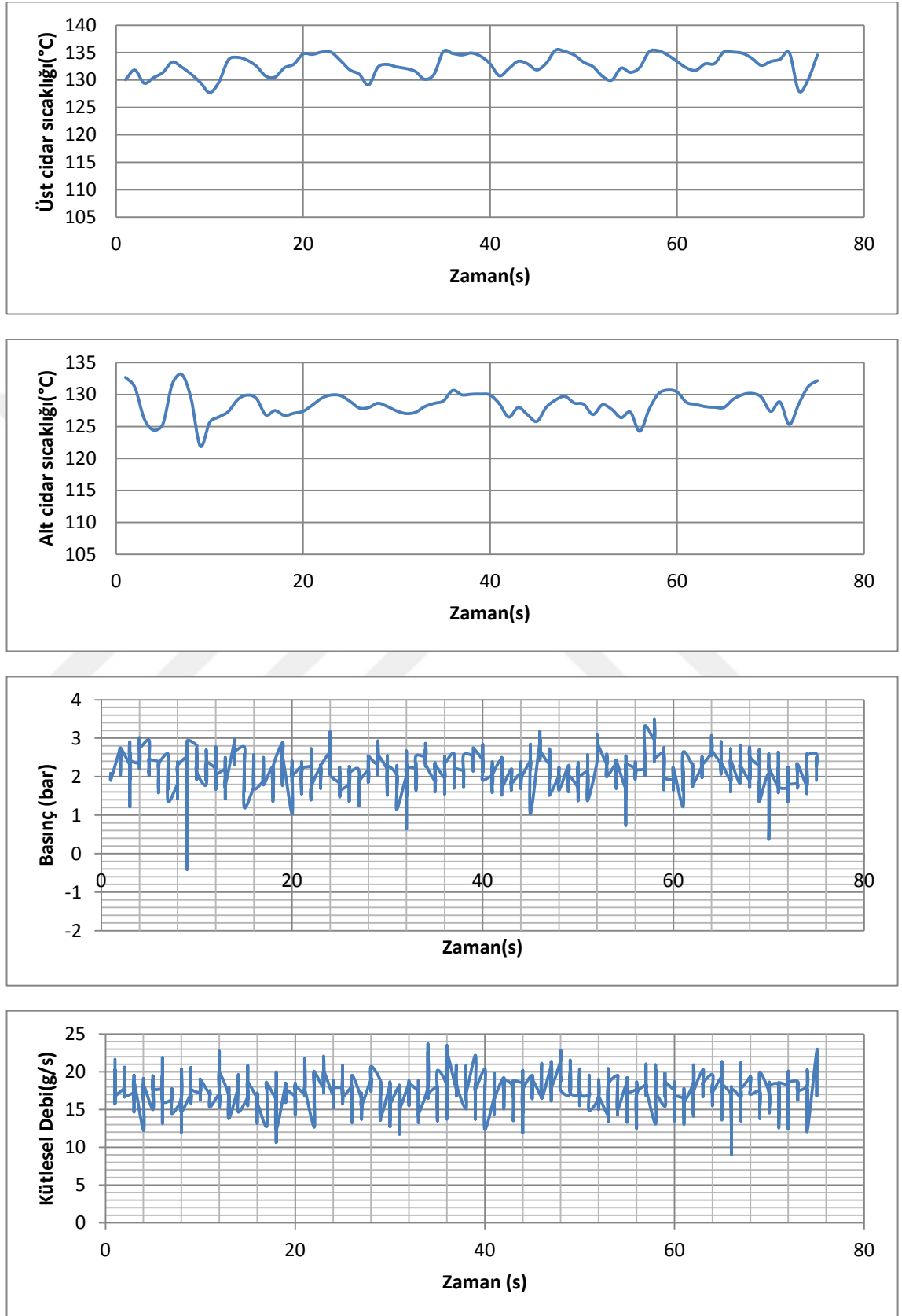
görülmektedir. Daha önceki çalışmalarda kullanılmış olan 10mm yay adımlı konik yay dizisine sahip borunun en kararlı boru olduğu görülmüştür. Buradan yola çıkılarak Boru-2 için 10mm yay adımlı koniklik açısına göre artan ve azalan eksenel yönde sarılmış yüzey artırım elamanının tek yöndeki konik yay dizisi bulunan boruya göre daha kararlı olduğu deneysel sonuçlar ışığında gözlemlenmiştir. Konik yayların cidarlarda akmakta olan sıvı ve buhar fazlarını boru eksenine doğru ve eksenden cidara doğru yönlendirmesi ile fazlar arası birleşmeyi ve etkileşimi sağlaması sistemin kararlılığını arttırmaktadır.

4.3. Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar

Kararsız akış ortamında meydana gelen dinamik kararsızlıklar basınç düşümü tipi osilasyonlara sebep olmaktadır. Bu bölümde farklı test borusu için kütleli debi değişimlerine göre incelemeler yapılmıştır. BDO'ların oluşmasında etken sıkıştırılabilir bir hacmin olmasıdır. Şayet test kısmı çok uzun olursa, buradaki iç sıkıştırılabilirlik, BDO'ların oluşması için yeterlidir. Test kısmının yeteri kadar uzun olmadığı durumda sıkıştırılabilir hacim test kısmının önüne yerleştirilen dengeleyici tank tarafından sağlanır. Deney düzeneğinde sıkıştırılabilir hacim azot gazı tankı ile gerçekleştirilmiştir. BDO kararlı durum eğrisinin negatif eğime sahip bölgesinde yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ile beraber üst üste oluşmaktadır. Grafikler zamana bağlı üst-alt cidar sıcaklıkları, giriş basıncı ve kütleli debi değerleri için çizilmiştir. Boru-1'de üst cidar sıcaklıkları alt cidardan fazla olmuş ve düşük kütleli debilerde ayırılma belirgin bir şekilde görülmüştür. Boru çapının küçük olması sebebiyle oluşan kabarcıkların alt ve üst cidarı kaplaması sonucunda cidarlar arasında aşırı sıcaklık farkları oluşmamıştır. Alt cidarda seyreden yüksek ısı transfer katsayılı sıvı filminin cidarla arasına düşük ısı transfer katsayılı gaz kabarcıkları girmiştir. Böylelikle burn-out yada kaynama krizi olarak adlandırılan aşırı sıcaklık yükselmesi olayının meydana gelmesi engellemiştir. BDO'ların sıcaklık profilleri, kütleli debi ve basınç değerlerinde ne kadar çok çalkantılı oldukları grafiklerden görülmektedir.



Şekil 4.33. Boru-1 için $\dot{m} = 38$ g/s kütleli debide osilasyonlar



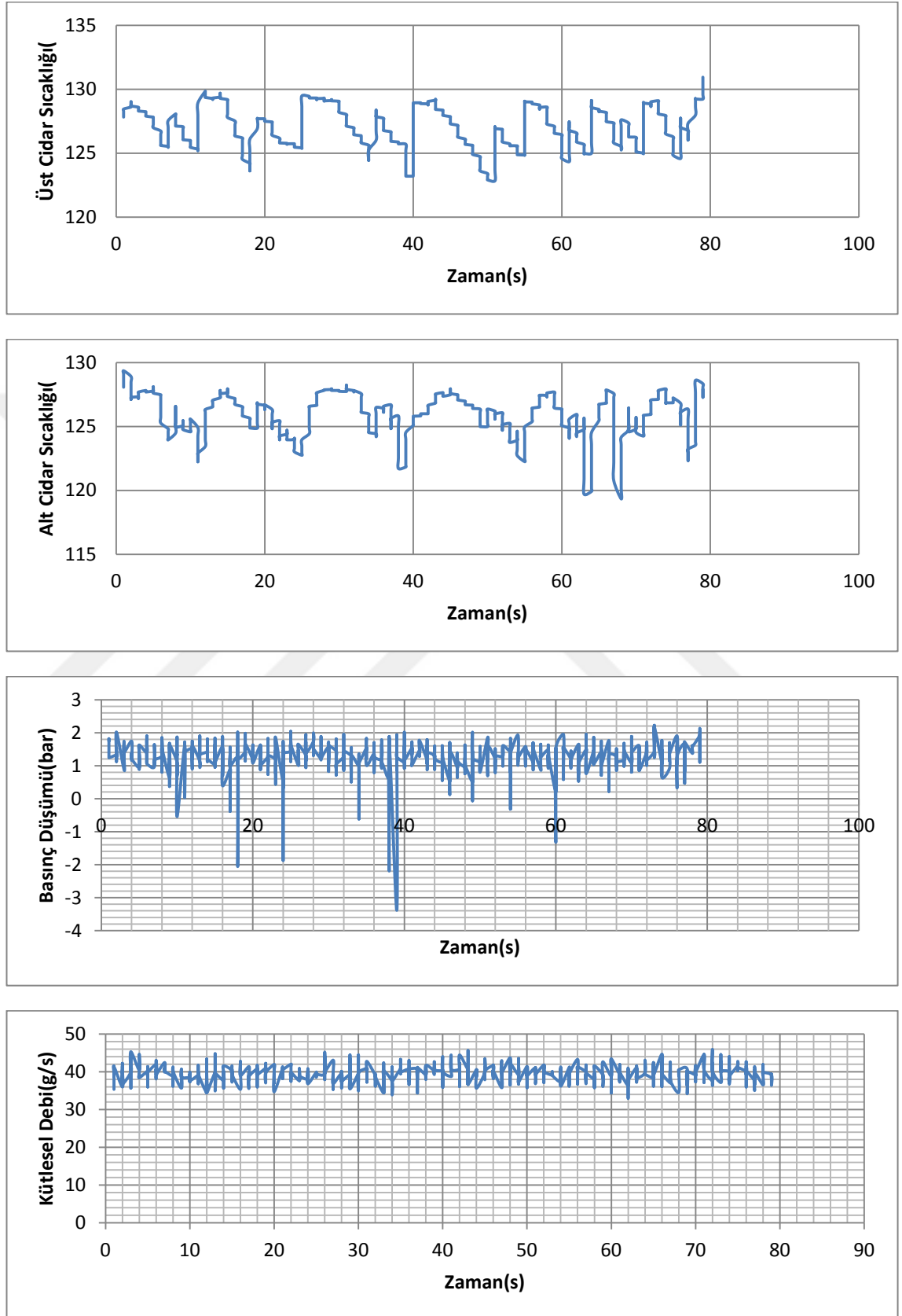
Şekil 4.34. Boru-1 için $\dot{m} = 17$ g/s kütleli debide osilasyonlar °C

Boru-1 Boru-2 için dokuz farklı kütleli debi değeri için deneyler yapılmış olup, bu değerlerden kritik kabul edilen iki kütleli debi değerine ait alt cidar sıcaklığı, üst cidar sıcaklığı, basınç ve kütleli debi grafikleri verilmiştir. Farklı kütleli debilerde iki farklı test borusunun ikisinde de BDO oluşmuş ve bu osilasyonlar debi, giriş basıncı, ve alt ve üst cidar sıcaklıklarında meydana gelen büyük genlikli salınımların sebebidir. BDO her iki boru için de kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde meydana gelmiştir.

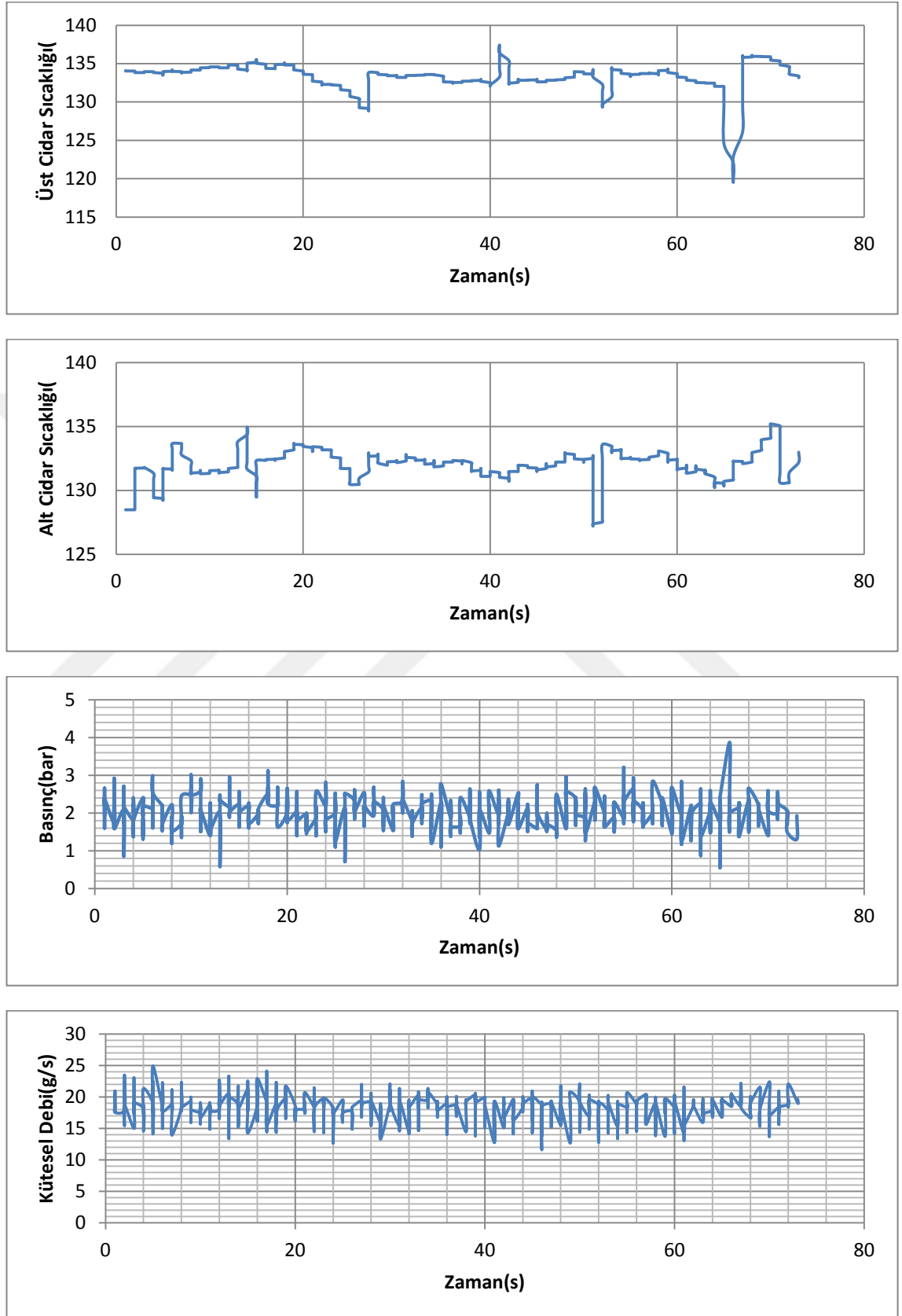
Her iki boruda da giriş basıncındaki osilasyonların kütleli debideki osilasyonlarla paralel olduğu gözlemlenmiştir. Üst cidar ve alt cidar sıcaklıklarının genlikleri açısından borular değerlendirildiğinde, en düşük salınımların Boru 1’de meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Boru-1 için Şekil 4.34 ve 4.35’te değişen kütleli debi verilerine karşılık basınç genliklerinde ve periyotlarında oluşan değişimlerin grafikleri gösterilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı gibi kütleli debi azaldıkça osilasyonların genlik ve periyotlarının da azaldığını görülmektedir. Şekil 4.36, 4.37’de ise akışkanın kütleli debi değerlerine bağlı diğer boru için elde edilen basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genlikleri gösterilmektedir. Her iki test borusu için kritik kütleli debi verilerine bağlı giriş basıncının genliklerinde oluşan değişimler ve basınç düşümü tipi osilasyonların periyotlarına kütleli debinin nasıl etki ettiğini gösterilmektedir.

Grafiklere dikkat edilirse, boş boru için kritik ikidebi değerlerinde boru alt cidarı sıcaklıklarında oluşan çok küçük salınımlar, içerisinde yüzey artırımı elemanı olan konik yay dizilerinin olduğu boruda büyük salınımlar meydana gelmiştir.

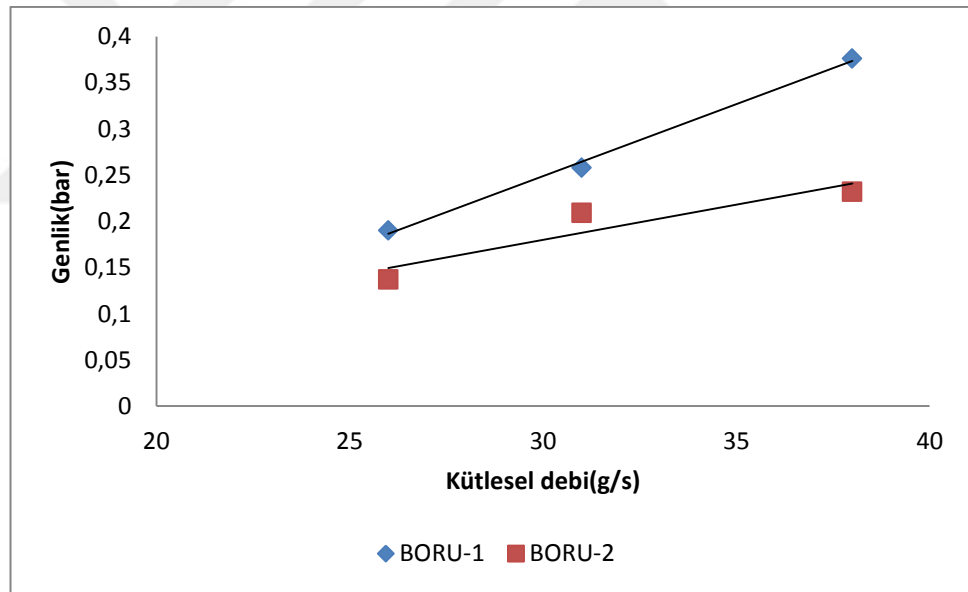


Şekil 4.35. Boru-2 için $\dot{m} = 38$ g/s kütleli debide osilasyonlar

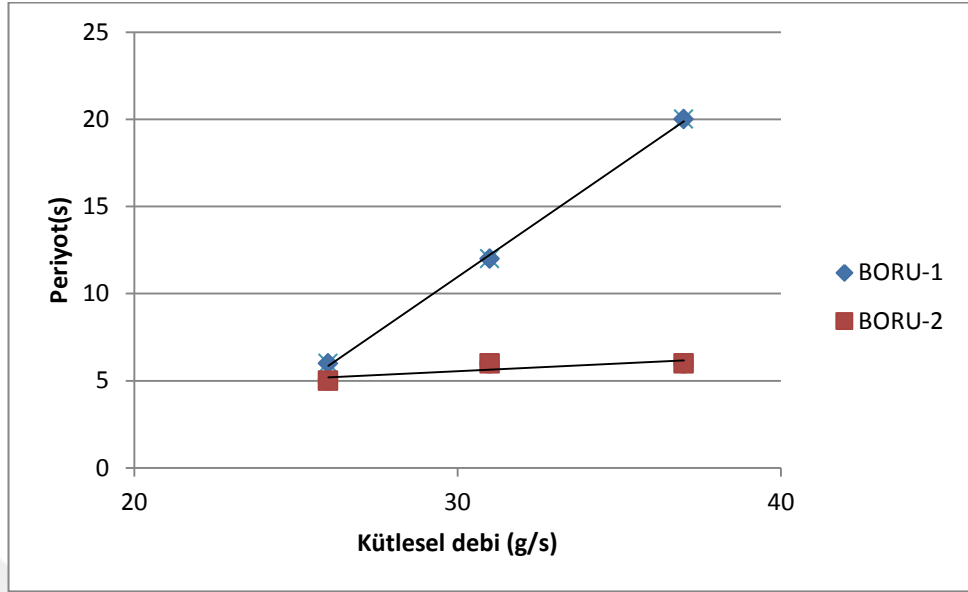


Şekil 4.36. Boru-2 için $\dot{m} = 17$ g/s kütesel debide osilasyonlar

İki test borusu içinde grafikler incelendiğinde boş boruda meydana gelen genlik artışları içerisinde yüzey artırım elemanı bulunan borudakinden daha fazladır. Bundan dolayı içerisinde yüzey artırım elemanın bulunduğu borunun karakteristik eğrilerinde minimum ve maksimum noktalar arası mesafenin boş boruya göre daha küçük olduğu ifade edilebilir. Maksimum ve minimum noktalar arasındaki farkın artması demek akış ortamında daha büyük genlikli osilasyonların oluşması olmak demektir. Kütlesel debinin azalması ile genlik ve periyotların azalması kütlesel debideki azalmaya bağlı olarak üretilen buhar hacminin artması ile sonuçlanmakta ve bunun neticesinde boru içindeki basınç artmakta, dengeleyici tank içindeki sıkıştırılabilir hacim azalmaktadır. Osilasyon genlik ve periyotlarında azalma olmasının bir sebebi de sistemdeki yukarıda belirtilen durumda sıkıştırılabilirliğin azalmasıdır.



Şekil 4.37. Boru-1 ve Boru-2 için kütlesel debinin basınç düşümü osilasyonlarının genliklerine etkisi



Şekil 4.38. Boru-1 ve Boru-2 için kütleli debinin basınç düşümü osilasyonlarının periyotlarına etkisi

Şekil 4.37. ve Şekil 4.38.'de iki adet test borusu için $T_g=15^\circ\text{C}$ 'de kritik kütleli debinin giriş basınç periyotlarına ve genliklerine etkilerinin incelendiği grafikler verilmiştir. Her iki test borusu için kütleli debi miktarının artması ile giriş basınçlarına ait periyot ve genliklerin doğru orantılı olduğu görülmektedir. Genlik ve periyotların büyüklükleri açısından karşılaştırılma yapıldığında boş borudaki genlik ve periyot miktarı büyüklüğü diğer yüzey artırımı boruya oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Efektif çapı büyük olan boş boru genlik ve periyot değeri büyük, efektif çapı küçük olan Boru-2 ise küçük genlik ve periyot değerine sahiptir. Buradan yola çıkarak efektif çap arttıkça periyot ve genliklerin arttığı söylenebilir.

4.4. İki Test Borusu için Kararlılık ve Osilasyonların Karşılaştırılması

Çizelge 4.1'de boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması gösterilmiştir. Boru-2'nin Boru-1'den kararlı olduğu görülmektedir. Bu sıralamanın efektif çap açısından da yapılacak olursa aynı olacağı görülmektedir.

Bu deneysel çalışmadaki osilasyonların genlik ve periyot aralığı Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Boş boruda yani Boru-1’de BDO’nun genliği 0,190 - 0,376 bar aralığında değişirken yüzey artırım elemanlarının kullanıldığı Boru-2’de 0,137 – 0,232 bar aralığında değişmiştir. BDO için en fazla genlik Boru-1’de olduğu Boru-2’nin ise daha az genlik değerinde olduğu görülmüştür. Boru içi yüzey artırım elemanı kullanılan boruda boş borudan daha küçük genlikli salınımlar oluşturmuştur.

Periyotları karşılaştıracak olursak içerisinde yüzey artırım elemanının bulunduğu borudaki BDO periyotlarının boş boru tipine oranla daha düşük olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1. Boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması

	Boru-1	Boru-2
Eşdeğer çap (d_e) ^a	★★★★	★
Tek fazlı basınç düşümü ^b	★	★★★★
Stabilite sınırları ^c	★★★★	★
BDO periyodu ^d	★★★★	★
BDO genliği ^d	★★★★	★

a“★” sayısı arttıkça efektif çap artar.

b“★” sayısı arttıkça tek fazlı basınç düşümü artar.

c“★” sayısı arttıkça efektif çap artar BDO’nun başlangıcı ve bitişi arasındaki mesafe artar.

d“★” sayısı arttıkça osilasyonların genlik ve periyodu artar.

Çizelge 4.2. Osilasyon genlik ve periyotlarının karşılaştırılması

Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar		
	Periyot (s)	Genlik (bar)
Boru-1	6 – 20	0,190 - 0,376
Boru-2	5 – 6	0,137 – 0,232

Bu deneysel çalışma iki fazlı akış olan yatay borulu zorlanmış taşınımli kaynamalı sistemlerde boru içi yüzey artırım elemanı olarak konik yay dizilerinin kullanıldığı ikinci çalışma olması sebebiyle, daha önce yapılan çalışma ile boru içerisine yerleştirildikleri doğrultular açısından karşılaştırılmış ve bunun sonucunda azalan ve artan yönde koniklik açısının değişmesinin her parametre içinde kararlı sonuçlar ortaya çıkardığı görülmüştür.

Bu çalışmadanelde edilen sonuçlar, bilhassa tabakalı akış ve halkasal akış rejimlerinin meydana geldiği iki fazlı akışlı sistemlerinde fazlar arası birleşmeyi ve etkileşimi sağlamak açısından önemli olacağı düşünülmektedir.



5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tez kapsamında, zorlanmış taşınımlı yatay borularda meydana gelen iki fazlı akış sisteminde kararlı ve kararsız akış olayları deneysel olarak incelenmiştir. Isı transfer yüzey artırım elemanının etkileri araştırılmış ve daha önce kullanılmış yüzey artırım elemanı ile karşılaştırılması yapılmıştır. Birisi boş boru ve diğeri 15'er cm aralıkla dizilmiş eşit yay boyu ve koniklik açısına sahip 10mm yay adımına sahip konik yay dizilerini artan ve azalan koniklik açısına göre sarılmış iki farklı boru için ısı transfer yüzey artırım elemanı ile çalışılmıştır. Çalışma esnasında ısıl güç, çıkış orifis çapı ve akışkan giriş sıcaklığı ve giriş basıncı sabit tutulmuş ve her bir konfigürasyona ait iki fazlı akış kararsızlıklarının etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki gibisıra lanabilir:

1. Her iki boru için çizilen grafiklerde karakteristik eğrilerindeki basınç düşümü verileri birbirinden farklılık göstermiştir. Yüzey artırım elemanının kullanılması ile basınç düşümünün attığı gözlemlenmiştir.
2. Yapılan deneylerde basınç düşümü tipi osilasyonları incelenmiştir.
3. Giriş basıncı ve kütleli debide büyük genlikli salınımlara yol açan kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde meydana gelen basınç düşümü tipi osilasyonlardır.
4. Yüzey artırımı boruda genlikler boş borudaki genliklere nazaran daha düşük olmuştur..
5. BDO için kütleli debi miktarı azaldıkça genlik ve periyodların azaldığı gözlemlenmiştir.
6. BDO açısından kütleli debinin artması giriş basıncında oluşan salınımların genlik ve periyotlarının da artmasına sebep olmuştur. Genlik ve periyot değerleri Boru 1 de Boru 2 ye göre daha büyüktür.
7. İki farklı test borusu ile yapılan deneylerde Basınç Düşümü Tipi osilasyonların kütleli debiye bağlı değişim şekli araştırılmıştır. Giriş basıncı – zaman

ve kütleli debi zaman grafikleri çizilerek her ikite test borusu için BDO'ların periyot ve genlikleri, kütleli debi ile değişimi incelenmiştir. BDO iki test borusunun ikisinde de karakteristik eğrinin negatif eğimli bölgesinde oluşmuştur. Giriş basıncında oluşansalınımlarla beraber kütleli debi değerlerinde de salınımların meydana geldiği gözlemlenmiştir.

8. Daha önce kullanılmış olan yüzey artırım elemanı ile yapılan deney sonuçları karşılaştırılmış ve kullanılan yüzey artırım elemanının öncekinden daha iyi sonuçlar verdiği deneysel veriler ışığında görülmüştür.

5.2. Öneriler

Bu tezin amacı zorlanmış taşınımlı, kaynamalı, yatay düz iki fazlı akış boru sisteminde konik azalan ve artan çapa göre sarımlı yay dizilerinin ısı transfer yüzey artırım elemanı olarak ısı transferine, akış kararsızlıkları ve osilasyonlara etkisini araştırmak ve daha önce kullanılmış olan yüzey artırım elemanı ile kıyaslamaktır. Daha önce çok sayıda araştırma yapılan konu ile ilgili aşağıdaki öneriler şöyle özetlenebilir:

1. Daha önce kullanılmış olan farklı şekillerdeki boru içi yüzey artırım elemanların performansları ve etkileri ile kıyaslanmalıdır. Aynı sistem ve şartlarda her bir elemanın etkisini ayrı ayrı inceleyen bir araştırma yapılmalıdır.
2. Yapılan deneyler iki fazlı akış kararsızlıklarına ve osilasyonlara konik sarımlı yayların etkisini araştırmak ve daha önce yapılmış olan çalışma ile yay koniklerinin akış istikametine olan doğrultusu incelenerek karşılaştırmak amacıyla yapılmıştır ancak yeterli değildir. Etkilerin tam olarak belirlenebilmesi için boru içi elemanların geometrik şekilleri açısından birer parametre olan ancak bu çalışmada etkileri incelenmeyip, sabit tutulmuş, her bir yay dizisi arasındaki mesafe, yayların koniklik açısı incelenerek bu çalışma ile kıyaslanmalıdır.
3. Aynı elemanların farklı efektif çaplardaki borulardaki etkisi araştırılabilir.
4. Eşit aralıklarla dizilmiş olan yay dizilerinin mesafeleri ve/veya sarım sayıları değiştirilmek suretiyle bu parametrelerin etkileri incelenmelidir. (Yeşilyurt 2015)

5. Deneysel olarak yapılan bu çalışmanın mevcut sayısal metotlar ile analizi yapılarak deneysel sonuçlar ile karşılaştırması yapılmalı ve sayısal verileri deneysel verilerinkıyaslanması yapılabilir.
6. Bu çalışma yatay borulu sistemde değil de konik sarımlı yay dizileri dikey sistemde kullanılarak elde edilen bu çalışma ile karşılaştırılabilir.
7. Deney sisteminde sabit tutulan parametreler değiştirilerek araştırmalar yapılabilir.
8. Deneysel çalışmalar esnasında sisteme verilen ısı enerjisi elektrik bağlantı kabloları ile gerçekleşmiştir. Fakat bu enerji verme şekliboruya homojen olarak değil borunun giriş ve çıkış yerlerine yakın kısımlarına bağlanması suretiyle yapılmıştır. Bunun sonucunda cidar sıcaklık ölçümlerinde belirsizlikler oluşmuştur. Bu nedenle test borusuna verilecek enerjinin daha homojen bir yöntem kullanılarak uygulanması daha sağlıklı sonuçlar elde etmek için gereklidir (Ömeroğlu 2012).

KAYNAKLAR

- Akyüzlü, K., Veziroğlu, T. N., Kakaç, S. and Doğan, T., 1979. Finite difference analysis of two phase flow pressure drop and density wave oscillations. *Int. J. Multiphase Flow*, 13, p 1-30.
- Andriyanto Setyawan , Indarto , Deendarlianto Experimental investigations of the circumferential liquid film distribution of air-water annular two-phase flow in a horizontal pipe, *Experimental Thermal and Fluid Science* 85 (2017) 95–118.
- Aritomi, M., Aoki, S. and Inoue, A., 1977. Instabilities in parallel channel of forced convection boiling upflow system. *J. Nuclear Science and Technology*, p 1-30.
- Aritomi, M., Aoki, S. and Inoue, A., 1979. Instabilities in parallel channel of forced convection boiling upflow system (II). *J. Nuc. Sci. And Tech.*, 14 (2), p 88-96.
- Bergles, A. E., 1981. Instabilities in two phase flow systems. *Two Phase and Heat Transfer in The Power and Process Industries*, Bergles, A. E., Collier, J. G., Delhaye, J. M., Hewitt, G. F. And Mayinger, F. (ed.), Hemisphere Publishing Corp., p 231-246.
- Boure, J. A., Bergles, A. E. and Tong, L.S., 1973. Review of two-phase flow instability. *Nucl. Eng. Des.*, 25, 165-192.
- Chirag R. Kharangate, Lucas E. O'Neill, Issam Mudawar., Effects of two-phase inlet quality, mass velocity, flow orientation, and heating perimeter on flow boiling in a rectangular channel: Part 1 – Two-phase flow and heat transfer results., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 103 (2016), p 1261–1279
- Chu, C. L., Roberts, J. M. and Daicher, A. W., 1978. DNB Oscillatory Temperature and Thermal Stress Responses for Evaporator Tubes Based on Rivulet Model. *Journal of Engineering for Power.*, 100, 424-431.
- Chuanshui Donga,, Takashi Hibiki., Heat transfer correlation for two-component two-phase slug flow in horizontal pipes., *Applied Thermal Engineering* 141 (2018), p 866–876
- Çomaklı, Ö., Karagöz, Ş., Yılmaz, M., Karşı, S., 2008. Yatay bir borudaki kaynamalı iki fazlı akış kararsızlıkları ve akışkan tipinin etkileri. *Teknoloji*, 11, s 15-24.
- Çomaklı, Ö., Yılmaz, M., Bedir, Ö., Şahin, B., 2007. Isı Transferi İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkisi. *Mühendis ve Makina*, 48 (565), 9-17.
- Çomaklı, O., Karşı, S., Yılmaz, M., 2002. Experimental Investigation of Two Phase Flow Instabilities in A Horizontal in-Tube Boiling System. *Energy Conversion and Management*, 43, 249-268.
- Davidov, A. A., 1956. Elimination of pulsation in once through boilers. *Elektricheskie Stantzu, USSR*, 3, 36-43.
- Ding, Y., 1993. Experimental investigation of two phase flow phenomena in horizontal convective in tube boiling system. Ph.D. Thesis, University of Miami, Florida, USA, p 21-65.
- Doğan, T., Kakaç, S., and Veziroğlu, T. N., 1983. Analysis of forced-convection boiling flow instabilities in a single-channel upflow system. *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 4(3), 145-156.
- Fallows, T., Hitchcock, J. A., Jones, R. C., Lis, J. and Northover, E. W., 1973. A study

- of oscillatory instabilities in the parallel channels of high pressure once through boiler rig. Conf. On boiler dynamics and control in nuclear power station, British Nuclear Energy Society, 14, 1-8.
- Friedly, J. C., Akinjiola, P. O. and Robertson, J. M., 1979. Flow Oscillations in Boiling Channels, The American Institute of Chemical Engineers, 204-217.
- Fukuda, K. and Kobori, T., 1979. Classification of Two-Phase Flow Instability by Density Wave Oscillation Model. Journal of Nuclear Science and Technology, 16(2), 95-108.
- Guo, C., Wang, T., Hua, X., Tang, D., Experimental and theoretical investigation on two-phase flow characteristics and pressure drop during flow condensation in heat transport pipeline. Applied Thermal Engineering, 66, p 365-374
- Guo, L.-J., Feng, Z.-P. and Chen, X.-J. 2001. Pressure drop oscillation of steam-water two-phase flow in a helically coiled tube. Int. J. Heat Mass Transfer, 44, 1555-1564.
- Gurgenci, H., Veziroğlu, T. N. and Kakaç, S., 1983. Simplified nonlinear descriptions of two phase flow instabilities in vertical boiling channel. Int. J. Heat and Mass Transfer, 26 (5), p 671-679.
- Gurgenci, H., Yıldırım, T., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1986. Pressure drop and density wave instability thresholds in boiling channels. ASME winter annual meeting, Anaheim, CA, USA, p 123-128.
- Kakaç, S. and Bon, B., 2007. A Review of two-phase flow dynamic instabilities in tube boiling systems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 51, p 399-433.
- Kakaç, S. and Cao, L., 1999. The effect of heat transfer enhancement on two-phase flow dynamic instabilities in a boiling system. CHMT99, Proceedings of the International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Ed. By Mohamad, A. A. and Sezai, I. Eastern Mediterranean University, G. Mağusa, April 26-29, 1999, 448-462.
- Kakaç, S. and Cao, L., 2009. Analysis of convective two-phase flow instabilities in vertical and horizontal in-tube boiling systems. International Journal of Heat and Mass Transfer, 52 (2009), p 3984-3993.
- Kakaç, S., 1994. A review of two-phase flow instabilities. Advances in Two-Phase Flow on Heat Transfer, Martinus, Nijhoff, Boston. Vol.II, 577-668.
- Kakaç, S., Gavrilescu, C.O. and Çomaklı, Ö., 1995. Two-phase flow instabilities with augmented surfaces in a horizontal in-tube boiling system. 10. Turkish National Conference on Thermal Sciences and Technologies. 6-8 September, 1995, Ankara. 1-26.
- Kakaç, S., Veziroğlu, T. N., Akyüzlü, K. and Berkol, O., 1974. Sustained and transient boiling flow instabilities in a cross connected four parallel channel upflow system. 5 th Int. Heat Trans. Conf., Tokyo, 35, p 11-14.
- Kakaç, S., Veziroğlu, T. N., Ergür, H. S. and Uçar, I., 1977. The effect of inlet subcooling on sustained and transient boiling flow instabilities in a single boiling channel. Proc. 6 th Int. heat transfer conf., paper no. FB-16, 1, p 363-368.
- Kakaç, S., Veziroğlu, T. N., Özboya, N. and Lee, S. S., 1977. Transient boiling flow instabilities in a multi channel upflow system. Wärme Stoffübertragung, 10, p 175-188.
- Kakaç, S., Veziroğlu, T.N., Padki, M.M., Fu, L.Q. and Chen, X.J., 1990. Investigation of thermal instabilities in a forced convection upward boiling system.

- Experimental Thermal and Fluid Science, 3, 191-201.
- Karagoz, S., Faraz Afshari.,Orhan Yildirim.,Omer Comakli., Experimental and numerical investigation of the cylindrical blade tube inserts effect on the heat transfer enhancement in the horizontal pipe exchangers.Heat Mass Transfer,September 2017, Volume 53, pp 2769–2784.
- Karagoz, S., Karšli, S., Yilmaz, M., Comakli, O., 2008. Density-wave flow oscillations in a water boiling horizontal tube with inserts. Journal of Enhanced Heat Transfer, 16(4), p 331-350.
- Karagöz Ş., 2007, Isı Transferi İyileştirmesinin İki Fazlı Akış Kararsızlıklarına Etkilerinin Araştırılması. Doktora tezi, Atatürk Ün. Mühendislik Fakültesi, Erzurum.
- Karšli S., 2000, Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Bir Boru Sisteminde İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora tezi, Atatürk Ün. Mühendislik Fakültesi, Erzurum.
- Karšli S., Yılmaz M., ve Çomaklı Ö., 2001. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış katmanlaştırmasına etkisi. Termodinamik, 102, 68-78, 2001.
- Karšli, S., Yılmaz, M., Çomaklı, O., 2002. The Effect of Internal Surface Modification on Flow Instabilities in Forced Convection Boiling in A Horizontal Tube. International Journal of Heat and Fluid Flow, 23, 776-791,2002.
- Lahey, R. T., 1980. An assessment of the literature related to LWR instability mode.
- Leung, L.K.H., Groeneveld, D.C., Teyssedou, A., Aub'e, F., 2004. Pressure drops for steam and water flow in heated tubes.Nuclear Engineering and Design, 235, p 53–65.
- Li, X., Wang, R., Huang, R., Shi, Y., 2006. Numerical and experimental investigation of pressuredrop characteristics during upward boiling two-phase flow of nitrogen.International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, p 1971–1981.
- Liang, N., Shuangquan, S., Tian, C., Yan, Y.Y., 2010. Two-phase flow instabilities in horizontal straight tube evaporator.Applied Thermal Engineering, 31, p 181-187.
- Liu, H. T., Kakaç, S. and Mayinger, F., 1993. Characteristics of transition boiling and thermal oscillations in an up flow convective boiling system. 29 th ASME/ AIChE/ ANS/ AIAA, National heat transfer conference, Atlanta, Georgia, p 8-11.
- Liu, H. T., Kakaç, S. and Mayinger, F., 1994. Characteristics of transition boiling and thermal oscillation in an upflow convective boiling system. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 8, No. 3, 195-205.
- Liu, H., 1993. Pressure drop type and thermal oscillations in convective boiling systems. PhD Thesis, University of Miami, Florida, p 3-45.
- Madhavi V. Sardeshpande ., Parikshit Shastri . , Vivek V. Ranade.,Two-phase flow boiling pressure drop in small channels,International Journal of Heat and Fluid Flow 61 (2016),p 636–649
- Marchitto, A., Fossa, M., Guglielmini, G., The effect of the flow direction inside the header on two-phase flow distribution in parallel vertical channels. Applied Thermal Engineering, 36, p 245-251
- Omeroglu, G., Comakli, O., Karagoz, S., 2013. Comparison of The Effects of Different Types of Tube Inserts on Two-Phase Flow Instabilities. Journal of Enhanced Heat Transfer, 20 (2), p 179–194
- Omeroglu, G., Comakli, O., Karagoz, S., Manay, E., 2012. Forced convective two phase

- flow analysis in a circular tube equipped with twisted tapes. *Energy Education Science and Technology*, 30 (1), p 561-572
- Omeroglu, G., Comakli, O., Karagoz, S., Sahin, B., 2013. Experimental Research of Dynamic Instabilities in the Presence of Coiled Wire Inserts on Two-Phase Flow. *Hindawi Publishing Corporation Scientific World Journal*, Volume 2013, Article ID 714180, 14 pages
- Padki, M. M., Liu, H. T. and Kakaç, S., 1991. Two-phase flow pressure drop-type and thermal oscillations. *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 12, 240-248.
- Padki, M. M., Palmer, K., Kakaç, S. and veziroğlu, T. N., 1991. Bifurcation analysis of pressure drop oscillations and the Ledinegg instability. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35, p 525-532.
- Padki, M. M., Palmer, K., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1992, Bifurcation analysis of pressure drop oscillations and the Ledinegg instability. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 35 (2), p 525-532.
- Pakopoulos, C. D., El- Shirbini, A. A. and Murgatroyd, W., 1980. Heat flux flow coupling effects in the stability of vapor generators. *Warme Stoffübertragung*, 13, p 275-286.
- Poesio, P., 2008. Experimental determination of pressure drop and statistical properties of oil-water intermittent flow through horizontal pipe. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32 (2008), p 1523–1529.
- Pooya Mirzabeygi., Chao Zhang., Turbulence modeling for the two-phase flow and heat transfer in condensers., *International Journal of Heat and Mass Transfer* 89 (2015), p 229–241
- Quibén, J.M., Cheng, L., Lima, R.J.S., Thome, J.R., 2009. Flow boiling in horizontal flattened tubes: Part I – Two-phase frictional pressure drop results and model.
- Quibén, J.M., 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 (2007), p 1060–1072.
- Rizwan-uddin, 1994. On density wave oscillations in two phase flows. *Int. J. Multiphase Flow*, 20, p 721-737.
- Ruder, Z. and Hanratty, T. J., 1989. A definition of gas-liquid plug flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 16, p 233-242.
- Shannak, B.A., 2008. Frictional pressure drop of gas liquid two-phase flow in pipes. *Nuclear Engineering and Design*, 238 (2008), p 3277–3284.
- Sotgia, G., Tartarini, P., Stalio, E., 2008. Experimental analysis of flow regimes and pressure drop reduction in oil–water mixtures. *International Journal of Multiphase Flow*, 34 (2008), p 1161–1174.
- Spedding, P.L., Benard, E., Donnelly, G.F., 2006. Prediction of pressure drop in multiphase horizontal pipe flow. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33 (2006), p 1053–1062.
- Stenning, A. H. and Veziroğlu, T. N., 1965. Flow oscillation modes in forced convection boiling. *Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*, Stanford Univ. Press., p 301-316.
- Takitani, K. and Takemura, T., 1978. Density wave instability in once-through boiling flow system (I). *J. of Nuclear Science and Technology*, 15, 355-364.
- Tewari, P.K., Verma, R.K. and Ramani, M.P.S., Chatterjee, A., Mahajan, S.P., 1988. Nucleate boiling in a thin film on a horizontal tube at atmospheric and sub

- atmospheric pressures. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 32, p 723-728.
- Ünal, H. C., Van Gasselt, M. L. G. and Ludwig, P. W. P. H., 1977. Dynamic instabilities in tubes of a large capacity straight tube once through sodium heated steam generator. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 20, p 1389-1399.
- Ünal, H.C., 1985. Two simple correlations for the inception of density-wave oscillations in long sodium-heated steam generator tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28(7): 1385-1392.
- Venkatesan, M., Das, S.K., Balakrishnan, A.R., 2010. Effect of diameter on two-phase pressure drop in narrow tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35, p 531-541.
- Veziroğlu, T.N. and Lee, S.S., 1968a. Instabilities in boiling upward flow. *Int. Symp. On Concurrent Gas-Liquid Flow*, sept.
- Veziroğlu, T.N. and Lee, S.S., 1968b. Boiling upward flow instabilities. AEC- Oak Ridge National Laboratory Subcontract No: 2975, Final Report.
- Veziroğlu, T.N. and Lee, S.S., 1970. Boiling flow instabilities in a two paralel channel upflow system. AEC- Oak Ridge National Laboratory Subcontract No: 2975, Final Report.
- Wedekind, G.L. and Stoecker, W.F., 1966. Transient Response of the Mixture Vapor Transition Point in Horizontal Evaporating Flow. *ASHRAE Transactions*, 72, Part 1
- Wedekind, G.L., 1971. An experimental investigation into the oscillatory motion of the mixture-vapor transition point in horizontal evaporating flow. *J. Heat Transfer*, Paper No:70-HT-G, 47-54.
- Widmann, F., Çomaklı, Ö., Gavrilescu, C. O. and Kakaç, S., 1994. The effect of inlet subcooling on two-phase flow instabilities in a horizontal in-tube flow boiling system. In *The 3rd International Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer*, September 19-21, Xi'an, China.
- Widmann, F., Çomaklı, Ö., Gavrilescu, C.O., Ding, Y. and Kakaç, S., 1995. The effect of augmented surfaces on two-phase flow instabilities in a horizontal system. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2(4), 263-271.
- Wong, T.N. and Yau, Y.K., 1997. Flow patterns in two-phase air-water flow, *Int.Comm. Heat Transfer*, 24, p 111-118.
- Wong, Y. L., Groenevel, D. C. and Cheng, S. C., 1989. Chf prediction for horizontal tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 16, p 123-128.
- Xin-Cheng Tu ., Yuting Wua, Hyoun-Bum Kim.,Improvement of two-phase flow distribution in the header of a plate-fin heat exchanger.,*International Journal of Heat and Mass Transfer* 123 (2018),p 523-533
- Xu B, Chen, X.J., 1990. An experimental investigation of two-phase flow density wave type instability in vertical upflow tube. *Proceedings of the Second International Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer*. Ed. by XJ Chen, TN Veziroğlu, CL Tien. 18-21 September, 1989, Xi'an, China, Hemisphere, New York, pp 497-503.
- Xu, B. and Chen, X. J., 1993. An experimental investigation of two phase flow density wave type instability in vertical upflow tube. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 33, p 497-503.
- Yadigaroglu, G. and Bergles, A. E., 1972. Fundamental and higher mode density wave oscillations in two phase flow. *J. Heat transfer*, 26, p 189-195.

- Yeşilyurt., 2015, İki Fazlı Akışlarda Konik Yayların Boru içi Isı transferi ve Akış Kararsızlığı Üzerindeki Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans tezi, Atatürk Ün. Mühendislik Fakültesi, Erzurum.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Karagöz, Ş., Bedir, Ö., 2007. İki Fazlı Akışlarda Isı Transfer İyileştirmesi-1Termodinamik, 176, 76-86.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Karagöz, Ş., Bedir, Ö., 2007. İki Fazlı Akışlarda Isı Transfer İyileştirmesi-2Termodinamik, 177, 76-86.
- Yılmaz, T., 1983. Çok Fazlı Akışlar. KTÜ Müh. Mim. Fak. Yayını, 17, s 1-34.
- Yu, W., France, D.M., Wambsganss, M.W., Hull, J.R., 2002. Two-phase pressure drop, boiling heat transfer, and critical heat flux to water in a small-diameter horizontal tube. International Journal of Multiphase Flow, 28 (2002), p 927–941.
- Yüncü, H., 1981. İki fazlı akımların dinamik kararsızlığı. Doçentlik tezi, O. D. T. Ü. Mühendislik Fakültesi, Ankara, s 5-44.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Erzurum'un Ilıcailçesinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2008 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2013 yılında mezun oldu. 2013 yılı güz döneminde Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalı Termodinamik bilim dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 1 yıl sonra özel sektörde Mekanik Koordinatör olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevi sürdürmektedir.

