

**TÜRBÜLATÖRLERİN
İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Gökhan ÖMEROĞLU

**Doktora Tezi
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI
2012
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**TÜRBÜLATÖRLERİN İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Gökhan ÖMEROĞLU

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2012**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

TÜRBÜLATÖRLERİN İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI danışmanlığında, Gökhan ÖMEROĞLU tarafından hazırlanan bu çalışma 23.10.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından.
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oybirliği/oy
çokluğu (.../...) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mehmet YILMAZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Süleyman KARSLI

İmza :

Üye : Doç. Dr. Abdurrahim BÖLÜKBAŞI

İmza :

Üye : Doç. Dr. Turan ÇALBAN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Şendoğan KARAGÖZ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer ÖZYURT

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

TÜRBÜLATÖRLERİN İKİ FAZLI AKIŞ KARARSIZLIKLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gökhan ÖMEROĞLU

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

İki fazlı akışlar, soğutma sistemleri, buhar üreteçleri, nükleer reaktörler, rafineriler gibi endüstriyel işletmelerin bir parçası olduğu gibi yağmur damlalarının bulutlar içerisinde oluşmasından, suyun buz oluşumunda gösterdiği davranışa kadar birçok alanda yer almaktadır. İki fazlı akışların ısı transfer katsayısının tek fazlı akışlara göre daha yüksek olması ve yüksek ısı akısı gerektiren uygulamaların endüstrideki varlığı nedeniyle zaman içerisinde önemi gittikçe artmıştır.

Bu çalışmada iş yapan akışkanı su, test kısmı yatay bir boru olan zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı deney düzeneği kurularak iki fazlı akışların dinamik kararsızlıklarına ısı transfer iyileştirmesinin etkileri incelenmiştir. Bu osilasyonlar üzerine aşırı soğutma miktarının, akışkan giriş debisinin ve boru içerisine yerleştirilen farklı ısı transfer iyileştirme elemanlarının yaptıkları etkiler sabit ısı güç ve çıkış kısıtlayıcısı şartlarında araştırılmıştır. Beş farklı ısı transfer yüzey konfigürasyonu kullanılmıştır.

Yapılan çalışmaların sonucunda yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyot ve genliklerinin basınç düşümü tipi osilasyonların periyot ve genliklerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Sisteme verilen ısı güç arttıkça karakteristik eğride minimum noktanın sağa doğru kaydığı ve iki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde ısı güç arttıkça basınç düşümünün arttığı görülmüştür. Akışkan giriş sıcaklığındaki azalmayla yani aşırı soğutma seviyesinin artmasıyla kaynamanın başladığı noktanın daha düşük kütleli debilere doğru kaydığı ve iki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümünün arttığı gözlemlenmiştir. İki fazlı bölgede en yüksek basınç düşümü iç yay içeren Boru-2 (yay adımı:5mm) ve Boru-3 (yay adımı:10mm) borusunda, en düşük basınç düşümü ise Boru-1’de meydana gelmiştir. İç yay içeren borularda ise adımı düşük olan Boru-2 borusu adımı yüksek olan Boru-3 borusundan daha yüksek basınç düşümü oluşturmuştur.

2012, 161 sayfa

Anahtar Kelimeler: İki Fazlı Akış, kararsızlık, osilasyon, ısı transferi iyileştirmesi, su

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF TURBULATORS ON TWO-PHASE FLOW INSTABILITIES

Gökhan ÖMEROĞLU

Atatürk University
Institute of Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI

Two-phase flows, with the behavior of formation of raindrops in clouds to the formation of ice water as well as a part of industrial enterprises with cooling systems, steam generators, nuclear reactors and refineries, are seen in many areas. Heat transfer coefficient in the two phase flows is higher than the single-phase and applications that require high heat flux increased significantly in importance over time due to the presence in the industry.

The effect of heat transfer enhancement on two phase flow dynamic instabilities are investigated in a horizontal tube system whose working fluid is water. The effect of subcooling rate, fluid flow rate and heat transfer enhancement devices placed into tubes are investigated conditions of constant heat power and exit restriction. Five different tube surface configurations are used.

As a result of the studies, the periods and amplitudes of the density wave type oscillations were lower than those of pressure drop type oscillations. It was found that with increasing heat power minimum point of characteristic curve proceeded toward to right and increasing heat power increased the pressure drop for given value of mass flow rate in two phase region. It was also determined that with decreasing inlet fluid temperature the point in which the boiling proceeded toward to lower mass flow rate and increasing inlet fluid temperature increased the pressure drop for given value of mass flow rate in two phase region. The results showed that the highest pressure drop occurred in Tube-2 (spring pitch: 5mm) and Tube-3 (spring pitch: 10mm) with inner spring the lowest pressure drop in the Tube-1. In the tubes with interior spring, however, the Tube-2 with lower pitch performed higher pressure drop than the Tube-3 with higher pitch.

2012, 161 Pages

Keywords: Two phase flow, instabilities, osilation, heat transfer enhancement, water

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım esnasında her zaman güvenini ve desteğini gördüğüm danışmanım Sayın hocam Prof. Dr. Ömer ÇOMAKLI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmaların yapılmasında bilgisinden, yardımından ve desteğinden çokça yararlandığım aynı zamanda yardımcı danışmanım Sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Şendoğan KARAGÖZ'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Süleyman KARSLI, Sayın Yrd. Doç. Dr. Tevhit KARACALI ve Sayın Araştırma Görevlisi Eyüphan MANAY'a, Sayın Makine Mühendisi Abdulkadir BAYRAKÇEKEN'e, sistemin kurulmasında büyük emeği geçen Tekniker Ahmet CEBE, Tekniker Abit CÖMERT ve Tek.Yrd. İsrail ÇALIK'a teşekkür ederim.

Son olarak her zaman desteklerini hissettiğim kıymetli ailem ve eşim Mevlana ÖMEROĞLU'na en içten şükran duygularımı sunarım.

Gökhan ÖMEROĞLU

Temmuz 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. İki Fazlı Akış Araştırmaları	3
1.2. Tezin Kapsam ve Amacı	24
2. KURAMSAL TEMEL	28
2.1. İki Fazlı Akışlar	28
2.2. Kaynamalı Kanalda Basınç Düşümü-Debi Karakteristikleri	32
2.3. İki Fazlı Akış Kararsızlıkları ve Tipleri	35
2.3.1. Statik kararsızlıklar	37
2.3.1.a. Akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı)	38
2.3.1.b. Kaynama krizi	40
2.3.1.c. Akış rejimi relaxation kararsızlıkları	42
2.3.1.d. Geysering	43
2.3.1.e. Bumping	43
2.3.1.f. Chugging	44
2.3.2. Dinamik Kararsızlıklar	44
2.3.2.a. Yoğunluk değişim osilasyonları	45
2.3.2.b. Basınç düşümü osilasyonları	48
2.3.2.c. Termal osilasyonlar	51
2.3.2.d. Akustik osilasyonlar	54
3. MATERYAL ve YÖNTEM	56
3.1. Deney Düzenegi	56
3.1.1. Akışkan besleme bölümü	57
3.1.2. Test bölümü	60

3.1.3. Akışkan depolama bölümü	64
3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi	66
3.2.1. Sıcaklık ölçümleri	66
3.2.2. Basınç ölçümleri	67
3.2.3. Debi ölçümleri	68
3.2.4. Isı gücü ölçümleri	69
3.2.5. Osilasyon periyotlarının Tesbiti.....	69
3.3. Deneysel Yöntem	70
3.3.1. Kararlı durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri	72
3.3.2. Kararsız durum karakteristiklerinin belirlenmesi deneyleri	74
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	76
4.1. Kararlı Durum Karakteristikleri	76
4.2. Osilasyon Sınırları	81
4.3. Basınç Düşümü Tipi Osilasyonlar	86
4.4. Yoğunluk Değişim Tipi Osilasyonlar	116
4.5. Tüm Test Boruları İçin Kararlılık ve Osilasyonların Karşılaştırılması.....	146
5. SONUÇ	150
5.1. Sonuçlar	150
5.2. Öneriler	154
KAYNAKLAR	155
EKLER.....	161
EK 1.....	161
ÖZGEÇMİŞ	162

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

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^2s]
h	Isı Taşınım Katsayısı [W/m^2K]
H_l	Sıvı Faz Entalpisi [J/kg]
H_g	Gaz Fazı Entalpisi [J/kg]
H_{lg}	Buharlaşma Gizli Isısı [J/kg]
H_y	Yay Adımı [m]
L	Test Borusu Uzunluğu [m]
$\dot{m}$	Kütlesel Debi [kg/s]
Nu	Nusselt Sayısı
P	Basınç [bar]
ΔP	Basınç Düşümü [bar]
ΔP_{kon}	Konvektif İvmeli Akış Durumunda ki Basınç Düşümü [bar]
ΔP_y	Yer Çekim Kuvvetinin Etkili Olduğu Basınç Düşümü [bar]
P_a	Ana Besleme Tank Basıncı [bar]
P_0	Orifis Çıkış Basıncı [bar]
ΔP_A	İvmeli Harekette ki Basınç Düşümü [bar]
ΔP_0	Orifiste Ki Basınç Düşümü [bar]
$\dot{Q}$	Isı Akısı [kW/m^2]
Q	Isıl Güç [kW]
R	Yarıçap [m]
Re	Reynolds Sayısı
t	Zaman [s]
ΔT	Sıcaklık Farkı [$^{\circ}C$]
T	Sıcaklık [$^{\circ}C$]
ΔT_s	Cidar Sıcaklık Farkı [$^{\circ}C$]
T_f	Akışkan Sıcaklığı [$^{\circ}C$]
U	Hız [m/s]
V	Hacim [m^3]
V'	Boru Net İç Hacmi [m^3]
$\dot{V}$	Hacimsel Debi [m^3/s]
Z	İki Termokupul Arasında ki Uzaklık [m]
ΔZ	Her Bir Hesap Adımında ki Uzaklık [m]
$\bar{Z}$	Eşdeğer Uzunluk [m]
α	Boşluk Oranı (Void Fraction)
β	Kısıtlayıcı Parametresi

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_{itp}	Belirsizlikle İlgili Terim
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_a	Hassasiyetle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_l	Lineerlikle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_T	Tekrarlanma İle İlgili Belirsizlik Terimi
σ_c	Kalibrasyonla İlgili Belirsizlik Terimi
σ_{all}	Toplam Hata Oranı İle İlgili Terim
σ_{sys}	Sistematik Hata Analizi İle İlgili Terim
σ_x (%)	Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
τ	Geçiş Zamanı [s]
δ_x (%)	Ölçüm Düzenekleri İle İlgili Belirsizlik Terimi
$\bar{x}$	Ortalama Data Değeri
x'	Ölçüm Elemanlarından Alınan Gerçek Okuma Değeri

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. İki fazlı akış içeren sistemlerin genel sınıflandırılması	28
Şekil 2.2. İki fazlı akışların genel sınıflandırılması	29
Şekil 2.3. Yatay borulardaki akış rejimleri	30
Şekil 2.4. Karakteristik durum eğrisi	34
Şekil 2.5. Karakteristik durum eğrisi	35
Şekil 2.6. Ledinegg kararsızlığının şematik olarak gösterimi (Karagöz 2007)	39
Şekil 2.7. Yatay bir ısı değiştirici borusunda oluşan “burn-out” olayı	41
Şekil 2.8. “Burn-out” olayının ortaya çıkmasında etkin parametreler (Karslı 2000)...	42
Şekil 2.9. Yoğunluk Değişim Osilasyonlarının Şematik Olarak Gösterilişi (Liu 1993).....	47
Şekil 2.10. Basınç düşümü tipi osilasyonların şematik olarak gösterilişi	49
Şekil 2.11. Termal osilasyonların mekanizması (Karagöz 2007).....	53
Şekil 2.12. Geçiş kaynama modeli (Karagöz 2007).....	53
Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Karagöz 2007).....	58
Şekil 3.2. Ana Besleme Tankı	59
Şekil 3.3. Suyun test borusuna sabit sıcaklıkta girmesini sağlayan düzenek	59
Şekil 3.4. Dengeleyici Tank	61
Şekil 3.5. Deney düzeneğinin dengeleyici tank ile test borusu arasındaki kısmı	62
Şekil 3.6. Test Borusu ve Bağlantı Flanşları	62
Şekil 3.7. Termoeleman bağlantı şekilleri	63
Şekil 3.8. Test borusu izolasyon tabakasının ve termoeleman uçlarının şematik gösterimi	63
Şekil 3.9. Test borusu elektriksel bağlantısı	63
Şekil 3.10. Çıkış kısıtlayıcısının şematik gösterimi	64
Şekil 3.11. Yoğuşturucu	65
Şekil 3.12. Test borusu cidar sıcaklığı ölçüm noktaları	67
Şekil 3.13. Termoçiftlerin data okuma kartına bağlantısının şematik gösterimi	67
Şekil 3.14. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri	71
Şekil 3.15. Isı transfer iyileştirme elemanları	72
Şekil 4.1. Boru-1 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri.....	78
Şekil 4.2. Boru-4 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri.....	78
Şekil 4.3. Boru-5 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri.....	79
Şekil 4.4. Boru-3 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri.....	79
Şekil 4.5. Boru-2 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri	80
Şekil 4.6. Beş farklı test borusu için kararlı durum karakteristikleri $\phi_g = 7.5 \text{ bar}, Q = 24 \text{ kW}, T_g = 25^\circ \text{C}, \beta = 0.45$	80
Şekil 4.7. Boru-1 için osilasyon sınırları	82
Şekil 4.8. Boru-4 için osilasyon sınırları	83
Şekil 4.9. Boru-5 için osilasyon sınırları	83
Şekil 4.10. Boru-3 için osilasyon sınırları	84
Şekil 4.11. Boru-2 için osilasyon sınırları	84
Şekil 4.12. Tüm borular için osilasyon sınırlarının karşılaştırılması	85

Şekil 4.13. Boru-1 basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 45 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$).....	87
Şekil 4.14. Boru-1 basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 48 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	88
Şekil 4.15. Boru-1 basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 60 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$).....	89
Şekil 4.16. Boru-4 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 51 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	91
Şekil 4.17. Boru-4 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 51 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$).....	92
Şekil 4.18. Boru-4 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 54 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$).....	93
Şekil 4.19. Boru-5 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 43 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	94
Şekil 4.20. Boru-5 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 47 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	95
Şekil 4.21. Boru-5 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 60 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)	96
Şekil 4.22. Boru-3 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 42 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	97
Şekil 4.23. Boru-3 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 49 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	98
Şekil 4.24. Boru-3 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 62 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)	99
Şekil 4.25. Boru-2 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 45 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	100
Şekil 4.26. Boru-2 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 50 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	101
Şekil 4.27. Boru-2 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 57 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)	102
Şekil 4.28. Boru-1 için basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	104
Şekil 4.29. Boru-1 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	105
Şekil 4.30. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	105
Şekil 4.31. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	106
Şekil 4.32. Boru-4 için basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	106
Şekil 4.33. Boru-4 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	107
Şekil 4.34. Boru-4 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	107
Şekil 4.35. Boru-4 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	108

Şekil 4.36. Boru-5 için basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	108
Şekil 4.37. Boru-5 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	109
Şekil 4.38. Boru-5 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	109
Şekil 4.39. Boru-5 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	110
Şekil 4.40. Boru-3 için basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi.	110
Şekil 4.41. Boru-3 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	111
Şekil 4.42. Boru-3 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	111
Şekil 4.43. Boru-3 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	112
Şekil 4.44. Boru-2 için basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi... ..	112
Şekil 4.45. Boru-2 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi	113
Şekil 4.46. Boru-2 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	113
Şekil 4.47. Boru-2 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	114
Şekil 4.48. Tüm borular için giriş basınç periyotlarına kütleli debinin etkisi	115
Şekil 4.49. Tüm borular için basınç genliklerine kütleli debinin etkisi	115
Şekil 4.50. Boru-1 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 37 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	118
Şekil 4.51. Boru-1 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 38 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	119
Şekil 4.52. Boş boru için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 37 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)	120
Şekil 4.53. Boru-4 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 27 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	121
Şekil 4.54. Boru-4 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 32 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	122
Şekil 4.55. Boru-4 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 27 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$).....	123
Şekil 4.56. Boru-5 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 28 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	124
Şekil 4.57. Boru-5 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 28 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	125
Şekil 4.58. Boru-5 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 24 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)	126
Şekil 4.59. Boru-3 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 26 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	127
Şekil 4.60. Boru-3 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 25 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	128
Şekil 4.61. Boru-3 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 20 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)	129

Şekil 4.62. Boru-2 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 26 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)	130
Şekil 4.63. Boru-2 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 30 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)	131
Şekil 4.64. Boru-2 için yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 36 \text{ g/s}$, $P=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)	132
Şekil 4.65. Boru-1 için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri.....	134
Şekil 4.66. Boru-1 için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	134
Şekil 4.67. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	135
Şekil 4.68. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	135
Şekil 4.69. Boru-4 borusu için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	136
Şekil 4.70. Boru-4 borusu için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	136
Şekil 4.71. Boru-4 borusu için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	137
Şekil 4.72. Boru-4 borusu için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	137
Şekil 4.73. Boru-5 borusu için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	138
Şekil 4.74. Boru-5 borusu için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	138
Şekil 4.75. Boru-5 borusu için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	139
Şekil 4.76. Boru-5 borusu için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	139
Şekil 4.77. Boru-3 borusu için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	140
Şekil 4.78. Boru-3 borusu için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	140
Şekil 4.79. Boru-3 borusu için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	141
Şekil 4.80. Boru-3 borusu için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	141
Şekil 4.81. Boru-2 borusu için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri	142
Şekil 4.82. Boru-2 borusu için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri.....	142
Şekil 4.83. Boru- borusu için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi	143
Şekil 4.84. Boru- borusu için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi	143
Şekil 4.85. Tüm borular için giriş basınç genliklerine kütleli debinin etkisi	144
Şekil 4.86. Tüm borular için giriş basınç periyotlarına kütleli debinin etkisi	145

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Isı transfer iyileştirmesinin iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi (Boure 1973; Kakaç 1994)	26
Çizelge 2.1. İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Sınıflandırılması (Karagöz 2007)	36
Çizelge 2.2. İki fazlı akış kararsızlıklarını etkileyen parametreler (Karagöz 2007)	38
Çizelge 2.3. Sıvı metalde buhar patlaması kararsızlığı olayı	44
Çizelge 2.4. Çeşitli parametrelerin dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi (Karagöz 2007).....	47
Çizelge 3.1. Türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri	68
Çizelge 4.1. Boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması	147
Çizelge 4.2. Osilasyon genlik ve periyotlarının karşılaştırılması.....	147
Çizelge 4.3. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve efektif çap değerleri (Karagöz 2007).....	148
Çizelge 4.4. Farklı kıyas parametreleri kullanılarak Karagöz (2007) doktora tezi verileri ile bu çalışma verilerinin karşılaştırılması.....	149

1. GİRİŞ

İki fazlı akışlar, soğutma sistemleri, buhar üreteçleri, nükleer reaktörler, rafineriler gibi endüstriyel işletmelerin bir parçası olduğu gibi yağmur damlalarının bulutlar içerisinde oluşmasından, suyun buz oluşumunda gösterdiği davranışa kadar birçok alanda yer almaktadır. İki fazlı akışların ısı transfer katsayısının tek fazlı akışlara göre daha yüksek olması ve yüksek ısı akısı gerektiren uygulamaların endüstrideki varlığı nedeniyle zaman içerisinde önemi gittikçe artmıştır.

Kaynamalı ısı transfer olayının gerçekleştiği birçok endüstriyel sistemde, kaynamalı ısı transferi olayına bağlı olarak meydana gelen akış kararsızlıkları, sistemlerde ısı transferinin gerçekleştiği bölümlerin bozulmasına neden olmaktadır. İşletme koşullarında sistem basıncı, debi ve benzer parametrelerin osilasyonlar göstermesi proses sistemlerinin ömürlerini azaltmaktadır. Sistemin ömrünü osilasyonlara bağlı olarak azaltan olayları; ısıl yorulmalar, kaynama krizleri, mekanik titreşimler yüksek geçici sıcaklıkların neden olduğu kontrol zorluğu ve yüzeyde meydana gelen burn-out olayı olarak sıralamak mümkündür. Mühendislik çalışmalarında ekonomik dizayn, optimizasyonun varlığı ve güvenli çalışma şartlarının doğru biçimde uygulanabilmesi için iki fazlı akışların ısıl karakteristik eğrileri ile hidrodinamik kararsızlıklarının önceden tahmin edilmesi, sistemlerin sağlıklı çalışması bakımından oldukça önemlidir.

İki fazlı akış biçimini kategorize eden ana özellik, iki faz arasında meydana gelen ara yüzeylerin aldığı şekillerdir. Oluşan bu şekiller üzerinde akış yönünün etkisi oldukça belirgindir. İki fazlı akışlar akış şekline göre yatay, düşey ve eğik olarak sınıflandırılır. Akış yönü biçimlerine göre yatay, düşey ve eğik sistemlerde meydana gelen akış rejimleri ve karakteristikleri birbirlerinden farklı özellikler gösterirler. Gösterdikleri özelliklere göre ayrılan sistemlerde yerçekimi kuvvetinin akış yönüne göre etki ettiği yön, temel sınıflandırmayı beraberinde getirir. Yatay akış sistemine etkiyen yer çekimi kuvvetinin akış yönüne dik olarak etki etmesi sebebiyle, buhar ve sıvı faz arasında bir ayrılma oluşabilmektedir. Yoğunluğu düşük olan buhar üst bölgede yer bulurken

yoğunluğu yüksek olan sıvı alt bölgede toplanır. Buhar fazının ısı transfer katsayısının sıvı fazından daha düşük olması, yatay sistemlerin üst bölgelerinde “burn-out” diye tabir edilen olayın meydana gelmesine sebebiyet verir. Doğal olarak düşey ve eğik akışlı sistemlerde yerçekimi kuvvetinin akış sistemine paralel veya eğik yönlü etki etmesi, ara yüzeylerin aldığı şekiller bakımından yatay akışlı sistemlerden daha az olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle akış rejimleri, iki fazın mutlak ve bağıl akış debilerine, sistem geometrisine ve fazlar üzerine etki eden kuvvetler arasındaki ilişkiye bağlıdır.

İki fazlı akış sistemlerinde kararsızlıklar, “statik kararsızlıklar” ve “dinamik kararsızlıklar” olmak üzere ikiye ayrılırlar. Akış şartlarının gerçek kararlı durumu küçük bir değişmeye maruz kaldığında yeni çalışma bölgesi gerçek çalışma bölgesinden başka bir yöne doğru asimptotik halde kayıyorsa, bu tip kararsızlıklar “statik kararsızlıklar” olarak adlandırılır. Akış gezintisi, kaynama krizi gibi olaylar statik kararsızlıklar için örnek olarak verilebilir. Eğer atalet ve diğer geri-besleme etkileri proseste önemli bir etkiye sahipse bu durumda ortaya çıkan kararsızlıklara ise “dinamik kararsızlıklar” denir. Bu kararsızlıklar, akışın ataleti ile iki fazlı karışımın sıkıştırılabilirliği arasında yeterli etkileşimden, kaynamanın olduğu kanalda debi, basınç düşümü ve yoğunluktaki değişim arasında çoklu geri-beslemelerden veya sadece geri-beslemelerden kaynaklanabilirler. Basınç düşümü tipi osilasyonlar (BDO), yoğunluk-değişim tipi osilasyonlar (YDO), termal osilasyonlar (TO) ve akustik osilasyonlar olmak üzere 4 ayrı dinamik kararsızlık tanımlanmıştır. Termal osilasyonlar, cidar sıcaklıklarında oldukça büyük salınımlara sebebiyet vererek boru cidarının termal yorulmasına neden olan osilasyonlardır. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ise periyodu, akışkanın geçiş zamanı değerine eşit olan ve genliği basınç düşümü tipi osilasyonların genliğinden daha küçük olan osilasyon tipleridir. Akustik osilasyonlar yüksek frekans değerine sahip osilasyon biçimleridir (Bergles 1977; Kakaç 1994).

Bu çalışmada yatay boş boru ve yüzey artırım elemanları kullanılarak iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine ne gibi etkilerin olduğu araştırılmıştır. Yukarıda bahsedildiği gibi iki fazlı akış şartlarında çalışan endüstriyel sistemlerde, iki fazlı akış kararsızlıklarına bağlı olarak sistemde olumsuz etkiler oluşmaktadır. Bu olumsuz etkilere sebep veren osilasyonların tipleri ve ortaya çıkma biçimleri incelenerek, kararsızlıklar üzerinde etkili olan parametrelerin belirlenmesi için deneysel çalışma yapılmıştır. Birinci bölümde iki fazlı akışlara, iki fazlı akışlarda ısı transferinin iyileştirilmesine ve iki fazlı akış kararsızlıklarına yönelik çalışmalarla ilgili literatür taraması verilmiştir. İkinci bölümde ise iki fazlı akış kararsızlıklarının kuramsal temellerine yönelik bilgiler verilmiştir. Kuramsal temeller kısmında iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine genel bilgi verildikten sonra bu tezin araştırma konusu olan dinamik kararsızlıklar ile ilgili daha detaylı açıklamalar yapılmıştır. Üçüncü bölüm olan materyal ve yöntem kısmında deney düzeneği anlatılmış ve çalışmada uygulanan deneysel yöntemden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde elde edilen veriler sunulmuş ve tartışılmıştır. Son bölüm olan beşinci bölümde ise sonuçlar özetlenmiş ve öneriler sunulmuştur.

1.1. İki Fazlı Akış Araştırmaları

İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili bilinen ilk çalışma 1909 yılında Lorentz tarafından yapılmıştır. Lorentz, gaz-sıvı karışımını homojen kabul ederek borulardaki iki fazlı akışın hidrodinamiğini araştırmış ve deneylerini kararlı hal şartlarında yapmıştır. İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili diğer bir çalışma ise 1938 yılında Ledinegg yapmıştır. Ledinegg ısıtılan paralel buhar jeneratörü kanallarında akış kararsızlığına yol açan koşulları incelemiştir. Ledinegg yaptığı araştırmalarda $\Delta p - \dot{m}$ karakteristik eğrisinde bazı debi aralıklarında eğrinin eğiminin negatif olduğunu görmüştür. Oysaki tek fazlı akışta eğri sürekli pozitif bir eğime sahiptir. Tek bir basınç düşümüne karşılık gelen tek bir debi değeri olmadığından sistemin bir kararlı halde çalışırken diğer bir kararlı hale geçtiğini gözlemlemiştir. Bu akış gezintisi daha sonraları Ledinegg kararsızlığı olarak adlandırılmıştır (Karagöz 2007).

Davidov (1956) deney sisteminde test borularını elektrik gücü ile ısıtarak akış osilasyonları üzerine araştırma yapmıştır. Osilasyon periyotlarının nerdeyse akışkanın test borusu üzerinden geçtiği zamana eşit olduğunu gözlemlemiştir. Sistemdeki test borusunun aşırı soğutulmaya maruz kalan yerinin uzatılmasının ve kanalların birbirleriyle bağlantılı yapılmasının sistem kararlılığını artırdığını, test borusu çıkışına kısıtlayıcı eleman kullanıldığında ise sistem kararlılığının azaldığını belirtmiştir.

Stenning and Veziroğlu (1965) iş yapan akışkan olarak R-11 akışkanını kullanarak yaptıkları deneysel çalışmalarında, üç farklı dinamik kararsızlık tipi belirlemişlerdir. Birinci tip kararsızlık “yoğunluk değişim tipi kararsızlık” olarak adlandırılmıştır. Bu kararsızlığın ısıtılan kanal boyunca, yüksek ve düşük yoğunluğa sahip akışkan dalgalarının hareketleri sonucu ortaya çıktığı belirtilmiştir. İkinci tip kararsızlık biçimi ise; basınçta, cidar sıcaklığında ve akışkan debisinde büyük genlikli osilasyonlara neden olan “basınç düşümü tip osilasyon” olarak adlandırılmıştır. Basınç düşüm tipi osilasyonun oluşması için test kısmının önünde sıkıştırılabilir bir hacim varlığının olmasının gerekli olduğu vurgulanmıştır. Üçüncü tip osilasyon tipine “termal osilasyon” denilmiş ve bu osilasyonun sıvı film tabakasının kararsızlığı ile alakalı olduğu belirtilmiştir.

Veziroğlu and Lee (1968a, 1968b, 1970) dikey bir kanal üzerinde iş yapan akışkan olarak R-11 kullanarak, basınç düşümü ve yoğunluk değişim osilasyonları üzerine deneysel araştırma yapmışlardır. Yatay kanal üzerinde yapılan araştırma sonuçları ile çalışmalarında elde ettikleri bulguları karşılaştırmışlar, dikey yukarı akışlı sistemlerin yatay akışlı sistemlere göre daha kararlı bir durum gösterdiklerini belirtmişlerdir.

Wedekind (1971) buhar karışımli geçiş noktasının osilasyon hareketini inceleyen deneysel bir araştırmayı, yatay boru sisteminde incelemiştir. Tam buharlaşmanın görüldüğü yeri “iki-fazlı akış bölgesi” ve “kızgın buhar” bölgesi olarak iki bölüme ayırıp inceleme yapmış ve buhar karışımli geçiş noktasının osilasyonlar yaptığını belirtmiştir. Belirtilen bu geçiş noktasını iki bölgeyi birbirinden ayıran yer olarak nitelendirmiş ve geçiş noktasının osilasyon yapma eğiliminde olduğunu görmüştür. Bu

osilasyonlar üzerine istatistiksel karakteristiklerin, fiziksel mekanizmalarının ve farklı evaporatör parametrelerinin etkisi incelenmiştir.

Yadigaroglu and Bergles (1972) iş yapan akışkan olarak R-113 kullanılan deney sisteminde, yoğunluk değişim tipi osilasyonların kararsızlıklarını kaynamalı kanal üzerinde deneysel olarak incelemişlerdir. Statik ve dinamik basınç düşümü salınımları üzerine kaynama sınırının hareketleri incelenmiştir. Yaptıkları dinamik analizi, kaynama sınırının hareketine etki eden cidar ısı kapasitesi ve basınç değişimlerinin yardımıyla oluşturmuşlardır. Düşük ısı akısında ve yüksek giriş aşırı soğutma seviyelerinde ortaya çıkan bu tip osilasyonların çok daha düşük periyot değerlerine sahip oldukları belirtilmiştir. Yüksek seviyeli bu osilasyonların varlığını, kaynama sınırının dinamik davranışıyla ilişkilendirmişlerdir.

Bergles (1977) iki fazlı sistemlerde görülen iki fazlı akış kararsızlıklarını, kararsızlık mekanizmalarına dayanarak sınıflandırmıştır. Çalışmada akış kararsızlığı üzerindeki parametrik etkiler sistematik olarak belirtilmiştir. Kararsızlık sınırlarını belirlemede faydalanan birçok analitik yöntemden geniş bir şekilde bahsedilmiştir.

Boure *et al.* (1973) iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine inceleme yapmışlardır. İki fazlı akış kararsızlıklarını, kararsızlıkların birbirinden ayrılmasına neden olan etkenleri belirterek ayrı ayrı sınıflandırmışlardır. Kararsızlıkları “statik” ve “dinamik” kararsızlıklar olmak üzere iki ana gruba ayırarak, birincil ve ikincil olay olma durumuna bağlı olarak sınıflandırmaya gitmişlerdir. Sistemde gözlemlenen akış kararsızlıklarına neden olan parametrik etkilerden geniş olarak bahsedilmiştir. Çalışmalarında iki fazlı akış kararsızlıklarını belirlemede kullanılan sayısal yöntemleri sıralayarak tahmin metotlarında kullanılan en belirgin paket programlarının listesine yer vermişlerdir.

Fallows *et al.* (1973) yaptıkları deneysel çalışmalarında, üç paralel devreye sahip bir once-through boyler sisteminde akış stabilite karakteristiklikleri üzerine inceleme yapmışlardır. İncelemelerinde osilasyonların başlangıç sınırlarını, genlik ve

frekanslarını ayrıca dry-out sınırının hareketini ele almışlardır. Kararsız akış başlangıç koşullarını veren ampirik bir formülizasyonu deney bulguları yardımıyla geliştirmişlerdir.

Kakaç *et al.* (1974, 1977) iş yapan akışkan olarak R-11'in kullanıldığı deney sistemlerinde düşey akışlı dört adet paralel kanala sahip, kaynamalı iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları üzerine deneysel araştırma yapmışlardır. Tek kanala veya çeşitli tiplerdeki paralel kanallara sahip sistemlerde görülen basınç düşümü tipi ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlar, yine bu çalışmada ortaya çıkmıştır. Ortaya çıkan bu osilasyonların kararlı ve kararsız durumlarının sınırları birbirinden ayrılmıştır. Görülen BDO ve YDO'nun yanı sıra termal osilasyonlara da zaman zaman rastlanmıştır. Araştırma bulguları benzer yapıdaki sistemlerin periyot, kararsızlık sınırları ve osilasyonları ile kıyaslandığında, daha kararlı bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Aritromi *et al.* (1977, 1979, 1982) zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı iş yapan akışkanı su olan yukarı akışlı paralel bir kanal sisteminde kararsızlıkları deneysel olarak incelemişler ve kararsızlıklarla ilgili lineer olmayan matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Çeşitli giriş hızları, ısı akıları, sıvı sıcaklıkları, kanal kesit alanı ve giriş kısıtlayıcısı vb. parametrelerin paralel kanallarda oluşan giriş akış osilasyonları ile kararsızlık sınırlarına etkileri deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar matematiksel model ile analiz edilmiştir. İki paralel kanalda dört tip kararsızlık olduğu gözlemlenmiştir. Bunlardan üçü tek kanalda da oluşan BDO, YDO ve TO kararsızlıkları iken, dördüncüsü paralel kanallarda kanallar arasındaki etkileşimden meydana gelen kararsızlıktır. Geliştirilen model iki paralel kanallı sistemden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve iyi bir uyum olduğu bulunmuştur. Model daha sonra üç ve dört adet kanal içeren paralel kanallara uygulanmıştır. Aritromi *et al.* (1982) ayrıca paralel kaynamalı sistemde yoğunluk değişim osilasyonlarını deneysel ve analitik olarak incelemişlerdir. Model olarak yeni bir kompleks analitik model kullanılmıştır. Bu model kullanılarak stabilite üzerine kayma oranının etkisi incelenmiştir. LMFBR tip reaktörün buhar jeneratörünü simüle etmek amacıyla deneysel çalışmalarda iş yapan akışkan

olarak R113 kullanılmış ve R113 sıcak su ile ısıtılmıştır. Akış osilasyon periyotlarına etki eden faktörler belirlenmiştir (Karagöz 2007).

Ünal *et al.* (1977) buhar jeneratörünün düz borularında meydana gelen iki fazlı akış kararsızlıklarını sodyumla ısıtılan bir sistemde incelemişlerdir. İki fazlı akış kararsızlıklarından yoğunluk değişim tipi osilasyonları üzerine çalışma yoğunlaştırılmıştır. Kaynama bölgesinin uzunluğunun toplam boru uzunluğuna oranı, Froude sayısı ve kaynama bölgesindeki akışkan miktarının geçiş süresi gibi etkiler dinamik kararsızlıkların periyodunu belirleyen parametreler olduğu belirtilmiştir. “Sıcak kanal faktörü” olarak adlandırılan bir kanal faktörünü, dinamik kararsızlıkların ilk başladığı çalışma şartlarını buhar jeneratöründeki ortamla işletme şartları ile ilişkilendirerek tanımlamışlardır.

Takitani and Takemura (1978) yoğunluk değişim tipi osilasyonları, “once-through” tek kaynamalı akış sisteminde 20-43 atü sistem çalışma basıncında iş yapan akışkanın su olarak kullanıldığı deney sisteminde incelemişlerdir. Deney sistemindeki test bölgesi paralel bağlı iki borudan oluşmuştur. Kararsızlık sınırları üzerine kütleli debi, sistem basıncı, giriş direnci, giriş aşırı soğutma sıcaklığı, bypass oranı ve çıkış kurulum derecesinin etkileri incelenmiştir. Çalışma bulguları kararsızlık sınırlarını önceden tahmin etmede kullanılan ampirik korelasyonlara uygun olacak şekilde ortaya çıkarılmıştır.

Friedly *et al.* (1979) evaporatör kanallarında meydana gelen akış kararsızlıklarını, üniform olarak ısıtılan bir sistemde incelemişlerdir. Jakob sayısı (Ja), çıkış kurulum derecesi parametresi (X) ve basınç düşüm oranı (ΔP) olan üç boyutsuz sayı kullanılarak yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının stabilite limitleri belirlenmiştir. Boyutsuz parametrelerin aralığını belirlemede daha önceden araştırmacıların yaptığı çalışmalarda stabilite- limit verilerinden yararlanılmıştır. Çıkış valf basıncının baskın olduğu şartlarda sıvı azot akışkanı kullanılarak yeni deneysel bulgularda yer verilmiştir. Bu bulgular, kararlı ve kararsız davranışlar ile Ledinegg kararsızlık bölgesini

belirlemede kullanılmıştır. Çalışma sistemindeki test bölgesinin sürtünme oranı yavaş yavaş artırılarak sistemin kararsızlığa yaklaştığı belirlenmiştir.

Fukuda and Hasegawa (1979) iki fazlı akış hidrodinamik kararsızlıkları üzerine paralel çoklu kanallarda araştırma yapmışlardır. Sistemi değerlendirmede türettikleri kararsızlıklar ve osilasyonları karakterize eden denklemlerden yararlanmışlardır. Ayrıca oluşturdukları bu denklemlerin benzer sistemlerin osilasyonlarını önceden karakterize etmede kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Fukuda and Kobori (1979) iki fazlı akış hidrodinamik kararsızlıklarının 8 tipe ayrılabilceğini analitik yöntem yardımıyla ortaya koymuşlardır. Kullandıkları analitik yöntemi bazı deneysel bulgulara uygulayarak kararsızlıkları karakterize etmeyi kolaylaştırmışlardır. Sınıflandırdıkları kararsızlıklardan üçünü Ledinegg veya statik kararsızlık olarak diğer beşini ise dinamik kararsızlıklar olarak ayırmışlardır. Her bir kararsızlık tipini belirlemede gravitasyonel basınç düşümü, sürtünme basınç düşümü gibi farklı tip basınç düşümü terimleri öne çıkmıştır.

Akyüzlü *et al.* (1979) dikey akışlı, tek kanallı, elektrikle ısıtılan zorlanmış taşınımli deneysel sistem üzerinde incelemeler yapmışlardır. Teorik olarak hesaplanan sistemin kararlılığı ile deneysel olarak elde edilen bulgular kıyaslanmıştır. Akışkanın giriş sıcaklığının basınç düşüm tipi osilasyonlar da büyük bir rol oynadığı belirlenmiştir. İki fazlı akışın sıkıştırılabilirliği ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının matematiksel formülasyona dahil edilmesinin gerekliliği bulunmuştur.

Lahey (1980) ve Bergles (1981) çalışmalarını iki fazlı akış kararsızlıklarını sınıflandırmaya yönelik yapmışlardır. Daha önceden Boure'nin yaptığı iki fazlı akışların sınıflandırılmasına yönelik araştırmayı daha detaylı ve geniş bir biçimde ele almışlardır. İki fazlı akış kararsızlıklarını sınıflandırmaya yönelik yaptıkları araştırmalarında, daha çok kararsızlık tipleri üzerine yoğunlaşmışlardır.

Pakopoulos *et al.* (1980) buhar jeneratörlerinde meydana gelen iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları üzerine bir araştırma yapmışlardır. İki fazlı akış korunum denklemlerinin zamana bağlı olduğu şartlardaki çözümlerini ve ayrıca ısıtıcı cidarının dinamiğini de ele alarak teorik analiz yapmışlardır. Isıl güç-akış etkileşiminin sistemin kararlılığı üzerine önemli etkileri olduğu vurgulanmıştır.

Cumo *et al.* (1981) iki fazlı akış kararsızlıklarını, deneysel olarak çalıştıkları sistemde farklı ısı akımlı profillere sahip paralel kanallarda incelemişlerdir. Stabilite haritalarını 116 adet deneysel çalışma sonucunda girişte çeşitli kısıtlama dereceleri ile çıkışta dry-out olan ve olmayan koşullara bağlı olarak oluşturmuşlardır. Çalışma sisteminin özel çalışma koşullarında osilasyon periyotlarının azaldığını ve kanallardaki eksenel ısı akı profil biçimlerinin birbirinden ayrı iki fazlı akışlar oluşturduğu görülmüştür.

Yüncü (1981) iki fazlı akış kararsızlıklarını yatay bir kanala sahip deney sisteminde araştırmışlardır. Kararsızlıklar üzerine yaptıkları incelemeyi deneysel ve teorik duruma göre kıyaslamışlardır. Geliştirdikleri analitik yöntemi kararlı durum karakteristikleri ile BDO ve YDO için kararlılık ve kararsızlık sınırlarını belirlemek amacıyla uygulamışlardır. Pertürbasyon analiz yöntemini kullanarak korunum denklemlerinden kararlı durum çözümlerini bulmuşlardır. Ayrıca pertürbasyon yöntemi yardımıyla kararsız durum çözümleri de bulunmuştur. Nyquist kriterini kullanarak sistemin kararlılık ve kararsızlık sınırlarını belirleyerek, karakteristik denklemi elde etmek amacıyla kararsız çözümlerin Laplace transformasyonunu almışlardır.

Yılmaz (1983) iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine yaptığı çalışmada, iki fazlı akışlarda görülen akış mekanizmalarını incelemiştir. İki fazlı akışlarda görülen ana mekanizmaları matematiksel modelleme yardımıyla açıklamıştır.

Gurgenci *et al.* (1983) tek bir kanal sistemine sahip, sabit basınç şartlarında çalışan yukarı akışlı kaynamalı deney sisteminde, yoğunluk değişimi ile basınç düşümü osilasyonlarının sınır çevrimlerini üretmek amacıyla sabit özellikli bir homojen akış modeli geliştirmişlerdir. Uygulanan model için termodinamiksel denge şartlarının var olduğu kabulü yapılmış ve test kanalı cidar ısı depolama etkileri ile akışkan

özelliklerinde oluşan değişikliklerin var olmadığı düşünülmüştür. Uygulanan modelde basınç düşüm tipi osilasyonlar için bulunan sonuçların deneysel bulgularla çok yakın değerler gösterdiği belirtilmiştir. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar için yapılan modellemede, periyotlar deneysel bulgulara göre çok yakın değerlere ulaşırken, genlikler için aynı benzerlik yakalanamamıştır. Genlik değerleri açısından çıkan bu uyumsuzluk sistem boyunca var olan dağılım basınç düşümü değerini modellemede ihmal etmekten kaynaklandığına dikkat çekilmiştir.

Doğan *et al.* (1983) yukarı akışlı tek bir kanal sisteminde zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı akış kararsızlıklarını incelemişlerdir. Nümerik bir model kullanarak kararlı durum ve kararsız durum davranışlarını belirlemeye çalışmışlardır. Uygulanan nümerik model, homojen iki fazlı akışlara ve fazlar arasında termodinamiksel denge varsayımına yönelik sayısal bir modeldir. İncelemelerini kaynama ara yüzeyinin hareketi, iki fazlı bölgedeki sıkıştırılabilirlik etkileri ve ısıtıcı cidarının ısıl kapasitesi üzerine yapmışlardır. Giriş aşırı soğutması, debi ve ısıl gücün sistemin davranışları üzerine olan etkilerini uygulanan model yardımıyla analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda kullanılan modelin zorlanmış konveksiyonlu yukarı akışlı sistemdeki oluşan kararsızlık sınırlarını belirlemeye uygun olduğu vurgulanmıştır.

Ünal (1985) iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine yaptığı incelemede, çeşitli geometri ve çalışma koşullarına ait 363 araştırma datasını ele alarak sodyumla ısıtılan uzun borulara sahip buhar jeneratöründe görülen yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının başlangıç sınırlarını tahmin eden iki ayrı korelasyon geliştirmiştir.

Gurgenci *et al.* (1986) sabit basınç şartlarında çalışan yukarı akışlı tek bir kanal sisteminde iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine inceleme yapmışlardır. Basınç düşümü tipi ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının lineer kararlılık kriteri geliştirilmiştir. Geliştirilen lineer kararlılık kriterinde, homojen akış modeli ve drift-flux modelinden yararlanılmıştır. Teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak drift-flux modelinin kararlılık sınırlarını tahmin etmede daha uygun bir yöntem olduğu kanısına varılmıştır.

Tewari *et al.* (1988) deneyleri, 60-100 kN/m² basınç aralığında damıtılmış (saf) su ve sodyum klorüd akışkanlarını kullanarak yapmışlardır. Çekirdek kaynamalı ısı transferi katsayısındaki artış, yatay boruda azalan film tabakası içindeki kaynama için yazılmıştır. Atmosferik ve atmosfer basıncından daha düşük basınçlar altında, yatay tip paslanmaz çelik borudaki ince film tabakasında damıtılmış su ve sodyum klorüd çözeltisi için kaynamalı ısı transfer katsayısını belirlemek amacıyla bir korelasyon oluşturulmuştur. Sprey film, düşük değerlerde azalan ince bir film tabakasındaki borunun dış yüzeyine püskürtülen sıvı nedeni ile düşük derinliklerdeki kaynamanın yardımıyla ortadan kalkmıştır. Kaynamalı ısı transfer katsayısının doyma basıncı ile azaldığı gözlemlenmiştir.

Wang *et al.* (1989) yatay zorlanmış taşınımlı akışta kritik ısı akısını belirlemek için basitleştirilmiş modelleri, dikey akış için düzeltme katsayısı kullanılarak belirlenen kritik ısı akısından yararlanılarak geliştirmişlerdir. Çalışmalarında geliştirdikleri tahmin yöntemi, homojen olarak ısıtılmış borular için elde edilen deneysel kritik ısı akısı verileri temel alınarak bulunmuştur.

Ruder *et al.* (1989) yatay boruda slug akıştan plug akışa geçişin tanımlanmasını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca slug akıştaki gaz boşluğunun önünün “Benjamin bubble” arkasının ise hidrolik sıçramanın olduğu taraf olduğunu belirtmişlerdir. Deney sonuçları, düşük gaz geçişleri için, boşluğun ön tarafının “Benjamin bubble” ile ifade edileceğini göstermiştir.

Xu and Chen (1990) iş yapan akışkanın su olduğu dikey tip bir sistemde iki fazlı akış kararsızlıklarından yoğunluk değişim tipi osilasyonlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deney çalışma şartları orta basınç seviyelerinde ve üniform ısı güçlerinde oluşturulmuştur. Deney bulguları vesilesiyle kararlı durum karakteristik eğrileri çizilerek yoğunluk değişim osilasyonlarının sınırları belirlenmiştir.

Kakaç *et al.* (1990) iki fazlı akışlarda görülen termal osilasyonları iş yapan akışkan olarak R11 kullanılan düşey yukarı akışlı tek bir zorlanmış kanala sahip deney sisteminde incelemişlerdir. Termal osilasyon değerlerini deneysel ve teorik şartlarda değerlendirmişlerdir. İncelenen parametreler akışkan giriş sıcaklığı, ısı gücü ve ısıtıcı boru boyutlarının termal osilasyonlara etkisidir. İki fazlı akış kararsızlıklarından yoğunluk değişim tipi, basınç düşüm tipi ve termal osilasyonlara rastlanılmıştır. Teorik kıyaslamada homojen iki fazlı akış modeli kullanılmıştır. Uygulanan modelde tek boyutlu akış denklemleri çözülerek iki fazlı akış kararsızlıklarından termal osilasyonların hangi şartlarda ortaya çıkacağı belirtilmiştir. Deneysel bulgularla uygulanan teorik yöntem arasında osilasyonlar, genlikler ve periyot değerleri açısından bir uyum olduğu gözlenmiştir. Termal osilasyonlar basınç düşüm tipi osilasyonlara paralellik göstermiştir. Basınç düşüm tipi osilasyonlarının azami değeri her seferinde termal osilasyonlarının azami değerinden faz gecikmesi oluşturarak ayrılmıştır.

Padki *et al.* (1991) çalışmalarında, termal ve basınç düşümü tipi osilasyon kararsızlıklarına, dikey tip tek kanallı, iş yapan akışkan olarak R-11 kullanıldığı, zorlanmış taşınım maruz kalan bir sistemde teorik bir araştırma yapmışlardır. Hem basınç düşümü tipi osilasyonların hemde termal osilasyonların bütün sıcaklık girdi değerlerinde meydana geldiği görülmüştür. Verilen giriş aşırı soğutma değerinde, osilasyonların periyot ve genlikleri artan ısı giriş oranı ile büyümüştür. Termal osilasyonlar basınç düşümü tipi osilasyonlara eşlik etmişler ve aynı fazda hallerinde görülmüştür. Ancak basınç osilasyonlarının maksimum değeri termal osilasyonların maksimum değeri ile kıyaslandığında her zaman gerisinde kalmıştır.

Padki *et al.* (1992) çalışmalarını dinamik sistem teorisine göre yapmışlardır. İki fazlı akış sistem modeline yeni bir integral formülasyonu oluşturulmuştur. Basınç düşümü ve Ledinegg kararsızlığının stabilite kriteri, kütle akış oranı karakteristikleri, basınç düşümü kararlı durum bölgesinin negatif eğim miktarından türetilmiştir. Basınç düşümü ve Ledinegg kararsızlığı arasındaki farklar “birfürkasyon” tipindeki farklara yansımıştır.

Ding *et al.* (1993) kaynamalı yatay tip bir boru sisteminde iki fazlı akış kararsızlıklarını incelemişlerdir. Giriş basınç osilasyonlarının genliği kütleli debinin düşmesi ile azalmış, giriş sıcaklık değerinin artması veya giriş aşırı soğutma seviyesinin azalması ile artmıştır. Periyotlar kütleli debinin düşmesi ile azalmış, giriş aşırı soğutma seviyesinin artması ile artmıştır. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar negatif eğim bölgesinde görülmüştür. Termal osilasyonlar ise basınç düşüm tipi osilasyonlara daima eşlik etmişlerdir. Yatay akış sisteminde meydana gelen bu osilasyon tipi boru cidarının üst tarafında görülmüştür.

Liu *et al.* (1993, 1994) zorlanmış taşınımlı kaynamalı dikey bir kanaldaki iki fazlı akış geçiş kaynamasını ve termal osilasyonlarını deneysel olarak araştırmışlardır. R-12 akışkanı kullanılarak yapılan bu çalışmada tek kanallı zorlanmış taşınımlı kaynamalı bir sistemde, termal osilasyonlar ve hidrodinamik kararsızlıkları incelemek için deneyler yapılmıştır. Taşınım geçişinin olduğu kaynama bölgelerinde, duvar sıcaklığı dalgalanmalarının iki farklı modele sahip olduğu belirtilmiştir. Biri yüksek frekans ve düşük genliklere diğeri ise düşük frekans ve yüksek genliklere sahiptir. Düşük frekanslı yöntem, ısıtılan duvarın kapasitesine, eksen boyuna değişen iletim yeteneğine ve kaynama karakteristiklerindeki geçişe bağlıdır.

Xu and Chen (1993) test borusunun üniform olarak ısıtıldığı ve iş yapan akışkan olarak su kullanılan dikey yukarı akışlı bir boruda, iki fazlı akışlarda görülen yoğunluk değişim tipi kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Test borusunun çıkış tarafında cidar sıcaklığının osilasyon yapması yoğunluk değişim tipi osilasyonlar meydana gelmesi ile oluşmuştur. Termal osilasyonlarda görülen genlik değerlerinin düşük, frekans değerlerinin yüksek olduğu anlaşılmıştır. Isıl yorulmaya ve ilerleyen zamana bağlı burn-out olayı da ortaya çıkmıştır. Genel olarak ısı akısının ve sistem basıncının artmasıyla yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının periyodu azalmıştır. Giriş kütleli debisinin ve giriş aşırı soğutma seviyesinin artmasıyla, yoğunluk değişim tipi osilasyon periyotlarının arttığı gözlenmiştir.

Xiao *et al.* (1993) iki fazlı akış kararsızlıklarından yoğunluk değişim tipi osilasyonlarını yüksek basınçlı paralel kanal sisteminde analitik model kullanarak incelemişlerdir. Ayrıca yüksek basınçlı buhar-su çevrimi için deneysel araştırmalar yapmışlardır. Paralel kanallarda tek kanallara göre yoğunluk değişim tipi osilasyonları daha belirgin olmuştur.

Menteş *et al.* (1993) çalışmalarını yukarı akışlı tek kanallı sistemde iki fazlı akış kararsızlıkları için yapmışlardır. Yapılan çalışmada ısı değiştiricisinde yapılan küçük değişiklikler kararsızlıkları değiştirmemiştir. Çekirdek kaynamanın arttığı durumlarda sistem genel olarak daha çok kararsız hale gelmiştir. Isıtıcının büyütüldüğü eksenel sıcaklık gradyanında osilasyonların genliği de artmıştır. Osilasyonların periyot ve genlikleri artan giriş aşırı soğutması ile artmıştır.

Rızwan-uddin (1994) iki fazlı akışlardaki yoğunluk değişim osilasyonlarını iki adet lineer olmayan, fonksiyonel, integral/diferansiyel denklemlerine dayanan bir model yardımıyla nümerik olarak incelemiştir. Elde ettiği nümerik simülasyon sonuçlarından bir kısmını yoğunluk değişim osilasyonlarının oluşmasına temel neden olan bazı fiziksel mekanizmaları anlamak için kullanmıştır. Geniş aralığa sahip parametrelerin kullanıldığı araştırma sonucunda şu bulgulara erişilmiştir:

1. Osilasyonlar esnasında hareketli yoğunluk dalgaları önemli bir role sahip değillerdir ve osilasyonlar çok zayıf karakterde hareket eden yoğunluk dalgaları ile de var olabilirler.
2. Osilasyon periyotları literatürde daha önceki çalışmalarda belirtilen kanal geçiş zamanının yaklaşık iki katı mertebesinde değil de üç ile dört katı arası bir mertebededir.
3. Karışım hızındaki değişim genellikle kanal basınç düşümü karakteristikliklerinin belirlenmesinde karışım yoğunluğundaki değişimden daha önemli bir rol oynamaktadır (Karagöz 2007).

Kakaç (1994) iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine yaptığı araştırmada, önceki yıllarda farklı araştırmacılar tarafından yapılan deneysel ve teorik çalışmalardan yararlanmıştır. İki fazlı akış kararsızlıkları sınıflandırarak kararsızlıkların temel ayrılma

mekanizmalarını detaylı bir şekilde incelemiştir. Isıl güç, giriş aşırı soğutma seviyesi, akışkan debisi, ısı transfer iyileştirme elamanları, giriş ve çıkış kısıtlayıcılarının kararsızlıklar üzerine etkilerini incelemiştir.

Kakaç (1995) kaynamalı sistemlerde iki-fazlı akış dinamik kararsızlıklarını sunduğu çalışmasında düşey ve yatay sistemlerde iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Tek kanal içeren yukarı akışlı düşey sistemde iş yapan akışkan olarak su kullanılmış ve YDO nun başladığı ısıl güç ve kuruluk derecesi belirlenmiş ve bunların üzerine sistem basıncı, kütleli debi, giriş aşırı soğutma seviyesi ve çıkış kısıtlayıcısının etkileri incelenmiştir. Ayrıca bu sistem için YDO nun başlangıcını ısıl güç ve kuruluk derecesine bağlı olarak veren aşağıdaki korelasyon önerilmiştir:

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

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

$$N_Q = \frac{4Q_c L_h}{G_s - h_0 G_d} \quad (1.2)$$

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

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

N_Q test kısmında toplam ısıtılan uzunluğun sıvı faz tarafından işgal edilen uzunluğa oranı olarak tanımlanır ve ısıl güç ile giriş aşırı soğutma arasındaki ilişkiyi verir. N_p basıncın ve kütleli debinin YDO üzerindeki etkisini gösteren bir boyutsuz sayıdır. N_{TS} ise akışkanın termodinamik özelliklerini dikkate alan ve aşırı soğutmanın etkisini gösteren boyutsuz sayıdır. Yatay sistemde ise iş yapan akışkan olarak R11 kullanılmış

ve drift-flux yöntemi ile kararlı durum karakteristik eğrileri belirlenmiştir. Nümerik yöntemde explicit sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda kaynamalı iki fazlı akış sistemlerinde YDO nun oluşumunun sistem basıncı, giriş aşırı soğutması ve çıkış orifis boyutuna bağlı olduğu; YDO nun periyodunun sistem karışım partikülünün sistem boyunca hareket etme süresine bağlı olduğu; kütleli debi osilasyonunun genliğinin oldukça büyük olduğu ve osilasyon esnasında ters akış olduğu vurgulanmıştır (Karagöz 2007).

Widmann *et al.* (1995) yaptıkları deneysel çalışmada, yatay borulu kaynamalı akışlı, artırılmış ısı transfer yüzey alanlı bir sistemde, iki fazlı akış kararsızlıklarının nasıl oluştuğunu incelenmişlerdir. Akış kararsızlıkları üzerine ısı transfer yüzey alanının büyüme etkisi, beş farklı giriş sıcaklığı kullanılarak üç farklı boru tipi için uygulanmıştır. Tüm deneyler sabit ısı gücü, sistem basıncı ve çıkış kısıtlama şartları altında yapılmıştır. Farklı boru tipleri için kararlı durum karakteristikleri bulunmuş ve basınç düşümüne karşılık gelen kütleli debi diyagramları oluşturulmuştur. Dinamik kararsızlık tipleri farklı boru tiplerinin her birinde görülmüştür.

Wong *et al.* (1997) iki fazlı hava-su akışında meydana gelen akış desenleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Birçok araştırmacı tarafından kullanılmış farklı yaklaşımların yararlarından faydalanılarak, mümkün olduğu kadar doğru akış desenlerini belirlemek için yeni bir terminoloji önerilmiştir. Bu terminolojinin büyük ölçüde Spedding ve Nguyen tarafından önerilen akış modeline dayalı Spedding ve Spence olarak adlandırılan kapsamlı bir çalışmanın sonucu olduğu vurgulanmıştır. Deneysel akış haritası, bu çalışmada gözlemlenen akış desenlerini birbirinden ayırmak için kullanılmıştır.

Bao *et al.* (1999) dar bir kanal içerisindeki gaz-sıvı akışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada dar kanallarda basınç düşümü ve iki fazlı kaynamayan akışlar için ısı transferi hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Kurulan deney düzeneğinden yerel ısı transfer oranları rahatlıkla tespit edilebilmiştir.

Kakaç and Cao (1999) R-11 iş yapan akışkanı kullanarak yatay kaynamalı bir boru sisteminde iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Tüm ısı güçleri için basınç düşüm tipi osilasyonlar ile termal osilasyonların olduğu görülmüştür. Isıl güç ve giriş aşırı soğutmasının artmasıyla osilasyonların genlik ve periyotları artmıştır. Drift-flux yöntemi kullanılarak kararlı durum karakteristikleri ve osilasyonlar teorik olarak analiz edilmiştir. Teorik modelleme deneysel bulgularla kıyaslandığında paralel bir uyum görüldüğü tespit edilmiştir.

Guo *et al.* (2000) kapalı sirkülasyonlu helisel kıvrılmış bir boru sistemindeki basınç düşüm osilasyonlarını, iş yapan akışkan olarak su kullanılan bir sistemde incelemişlerdir. İki fazlı akış döngüsünde sıkıştırılabilen buhar hacim tipleri, basınç düşümü osilasyonlarının sınırlarının oluşmasını belirgin ölçüde etkilemiştir. Farklı sıkıştırılabilir gaz hacmi pozisyonları, farklı başlangıç sınırlarına, basınç düşüm osilasyonlarının periyotları ve salınım genliklerine karşılık gelmiştir.

Guo *et al.* (2001) basınç düşümü tipi osilasyonlar altındaki sarmal bir boru içinde buhar-su ihtiva eden iki fazlı akışın, taşınılma ısı geçişi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Doymamış su akışı ve buhar su karışımı iki fazlı akış için yapılan deneyler, kapalı sirkülasyonlu helisel kıvrılmış boru buhar jeneratöründe geçici ısı transfer özelliklerinin etkilerini araştırmak amacıyla yapılmıştır. Sürekli akışlı yerel ısı transferinin uniform olmayan özelliği incelenmiştir. İkincil akış, akış osilasyonu ve ikincil akış arasındaki etkileşimin etkisi deneysel verilere dayanarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, yerel ve titreşimli akış için periferik zaman-ortalamalı Nusselt sayılarında önemli farklılıklar bulunduğunu göstermiştir. Düzgün ısıtmalı bir sarmal tüp içinde buhar-su iki fazlı akış için basınç düşümü tipi salınımlar ve eşikleri ile ilgili araştırmalardan bahsedilmiştir. Kapalı dolaşım özelliğindeki helisel boru sarmallı buhar jeneratöründe, basınç düşüm tipi osilasyonları, iş yapan akışkan olarak su kullanılan sistemde incelemişlerdir.

Çomaklı *et al.* (2002) yatay kaynamalı düz boru sisteminde iki fazlı akış kararsızlıklarını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler sabit sistem basıncı ve sabit ısı akısında yapılmıştır. Dinamik kararsızlıkların tüm tipleri bütün sıcaklık değerlerinde

meydana gelmiştir. Osilasyonların görünüm sınırları bulunmuştur. Kararlılık sınırları, giriş sıcaklık değerinin düşmesi ile daha düşük kütleli debiye doğru hareket etmiştir. Yani giriş sıcaklığı arttıkça sistemin kararsızlığının arttığı gözlemlenmiştir. Basınç düşümü tipi osilasyonlar ile yoğunluk değişim tipi osilasyonların periyot ve genlikleri azalan kütle debisi ile düşüp, azalan sıcaklık giriş değeri ile artmıştır. Ayrıca kanal uzunluğunun iki fazlı dinamik akış kararsızlıkları üzerinde önemli bir etkiye yol açtığı belirtilmiştir.

Yu *et al.* (2002) iki fazlı basınç düşümü, kaynamalı ısı transferi ve suyun kritik ısı akısını, test borusu uzunluğu 0,91 m ve iç çapı 2,98 mm olan yatay bir boru sisteminde incelemişlerdir. Basınç farkı ve ısı transfer katsayısı sonuçları hem küçük kanallarda kaynayan soğutucu akışkanlar hem de daha büyük kanallarda kaynayan su için geliştirilen mevcut korelasyonların değişiklikleri ile başarıyla ilişkilendirilmiştir. Bu çalışmadaki incelenen küçük kanalın iki fazlı basınç düşümü verileri, aynı kütle debilerinde büyük kanallarda beklenen verilerden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu karşılaştırma, büyük kanallar için yaygın olarak kullanılan Chisholm korelasyonu ile yapılmış ve kanal boyutları arasındaki iki fazlı akış rejimi farklılıklarıyla ilişkilendirilmiştir. Chisholm korelasyonunda yapılan değişiklik küçük çaplı kanallarda ki tahminin doğruluğunu daha iyi yönde geliştirmiştir. Küçük kanaldaki suyun kaynamalı ısı transferinin, ısıl güce bağlı olduğu bulunmuştur.

Coleman *et al.* (2002) R134a soğutucu gazının yoğunlaşması sırasında yuvarlak, kare ve dikdörtgen kesitli borulardaki iki fazlı akış rejimleri üzerine çalışma yapmışlardır. Akış mekanizmaları dört farklı akış rejimine ayrılmıştır; aralıklı akış, dalgalı akış, halka akışı ve dağınık akış. Buna ek olarak, veri miktarındaki çeşitlilik, iki fazlı akışın farklı türlerini daha iyi anlamayı sağlayan her akış rejimi içindeki birkaç farklı akış şeklinin tarifini sağlamıştır. Bu haritalar üzerinde ilgili akış şekilleri ve rejimleri arasındaki geçiş sınırları, deneysel verilere dayalı olarak kurulmuştur. Benzer hidrolik çaplarda akış rejimi geçişlerinin boru şekil veya boy oranına çok etkin bir şekilde bağlı olmadığı bulunmuştur. Bu haritalar ve geçiş hatları, özellikle verilen kütleli debi için kurulacak

rejim ya da akım modelini, dizayn etme ve boru geometrisini tahmin etmede kullanılabilir.

Karslı *et al.* (2002) yatay bir boruda, kaynamalı zorlanmış taşınımlı akış kararsızlıklarına iç yüzey değişiminin etkisini incelemişlerdir. Kaynamalı akış dinamik kararsızlıklarının özelliklerindeki geliştirme yapılandırmalarının etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Boş ve elemanlı boru konfigürasyonları arasındaki karşılaştırma kaynamalı akış kararsızlıkları esasına göre yapılmıştır. Geliştirilmiş yapılandırmalar arasındaki farklılıklar aynı zamanda en kararlı ve en kararsız olanı gözlemlemek için belirlenmiştir. Geliştirilmiş yüzeyli borular için yoğunluk dalga tipi osilasyonları ve basınç düşüm tipi osilasyonların periyot ve genlikleri, boş boruda olandan (oranla) daha yüksek bulunmuştur. Boş borunun çok kararlı bir yapıya sahip olduğu bulunmuştur. Aynı tip yüzey artırımı boru için eşdeğer çapın azalması ile sistem kararlılığın arttığı bulunmuştur.

Leung *et al.* (2004) ısıtılmış borularda buhar ve su akışı için basınç düşümlerini incelemişlerdir. Farklı türlerde ısıtılmış boru tipi içinden geçen buhar ve su akışı için basınç düşümü ölçümleri iki farklı laboratuarda elde edilmiştir. Deneyleri yapmak için kullanılan test bölümleri, yukarı akışlı su ile soğutulan 600'lük boru ile yapılmıştır. Isı akısındaki artış ile basınç gradyanındaki azalma, aynı kesit ortalama koşullarında tek fazlı akışlar için gözlemlenmiştir. Kaynama başladıktan sonra, iki fazlı sürtünme çarpanı kabarcıklı akış bölgesindeki yükselen ısı akısı ile artmış, ancak halkalı akış bölgesinde azalmıştır. Isıtılmış yüzey dryout'a yaklaşırken, iki fazlı akış sürtünme çarpanı maksimum bir değere ulaşmış ve dryout olana kadarki zamanda artan termodinamik kalite ile azalmıştır. Düşme eğilimi, sıvı film kalınlığındaki azalma ve sıvı sürüklenmesinin sonlanmasına bağlanmıştır. Kritik ısı akısının oluşumundan sonra sürtünmeli basınç gradyanında önemli bir düşüş tespit edilmiştir.

Tadrist (2006) dar alanlarda iki fazlı akış kararsızlıklarını incelemiştir. İki fazlı akış kararsızlıklarının analizini, hidrolik çapı 10mm'den daha büyük boruları baz alarak karşılaştırmıştır. Temel kararsızlık tipleri mevcut deneysel sonuçlar ve modellere göre

kıyaslanmıştır. İki fazlı akış kararsızlıkları, hidrolik çap ne olursa olsun karmaşık bir yapıya sahiptir. Paralel kanal osilasyonları ve tek kanal osilasyonları dar kanallarda açıkça tespit edilmiştir. Kanalin giriş bölgesinin sıkışabilirliğine bağlı olarak, yarı-periyodik basınç dalgalanmaları gözlemlenmiştir. Bu osilasyonlar, atalet veya yerçekimi etkilerine ve duvara verilen ısı akısı ile bağlantılı buhar geri tepme basıncının etkisi nedeniyle ortaya çıkmıştır.

Li *et al.* (2006) iş yapan akışkan olarak nitrojen kullanılan, yukarı doğru kaynamalı iki fazlı akışın oluşumu sırasında, basınç düşümü karakteristiklerini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Sabit kütle debisi ve değişkenli ısı akısı şartlarında, yukarı doğru kaynamalı iki fazlı akış sırasındaki toplam basınç düşümünün karakteristikleri, 6mm iç çapındaki dikey bir boru kullanılarak ve sayısal olarak örneklendirilmiş bir korelasyonla deneysel olarak inceleme yapılmıştır. Deneysel verilere karşı sayısal sonuçların karşılaştırılması, basınç düşümü eğrisindeki geçiş noktasının daha önce olduğunu göstermiş ve basınç düşümü tahminleri deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum göstermiştir.

Spedding *et al.* (2006) çok fazlı yatay boru akışında basınç düşümü tahmini için yaptıkları araştırmada, ampirik korelasyonları, basınç düşümü tahmini için iki fazlı boru akışı verileri ile test etmişlerdir. Korelasyonlar tabakalı ve annular tip akışı tahmin etmek için önerilmiştir. Bu korelasyonlar üç fazlı gaz-su-yağ boru akışına uygulandığında, genel olarak aralıklı slug akış modelini tahmin etmeye elverişli hale gelmiştir. Momentum balans modeli, borudaki üç fazlı basınç düşümü tahminine başarılı bir şekilde ilişkilendirilememiştir.

Kakaç *et al.* (2007) boru kaynamalı sistemlerde iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarını incelemişlerdir. Çalışmada homojen akış modeli ve drift akış modelleri çözüm örnekleri ile beraber açıklanmış, model sonuçlarının deneysel bulguları ile doğrulaması verilmiştir. Deneysel verilerle doğrulanan homojen akış ve sürüklenmeli-akış modellerinin, sürekli osilasyonlarının periyot ve genliklerinin teoriksel tahminleri en önemli yaklaşımı göstermiştir. Çeşitli çalışma koşulları için kararlılık sınırları elde

edilmiştir. İki fazlı akış problemlerinin en genel formülasyonu olan ayrılmış akış modeli, fazların her biri için ayrı ayrı yazılan korunum denklemleri için uygulanmıştır.

Mauro *et al.* (2007) bu çalışmada, mevcut ve yeni iki fazlı basınç düşümü verilerini tahmin yöntemleri ile kapsamlı bir karşılaştırma yapmak için kullanmışlardır. Akış rejimlerini ayırma verileri ve veri eğilimlerinin tahmini için, Moreno Quibe'n ve Thome tarafından kullanılan yöntem buhar özelliklerinin her aralığında, özellikle aralıklı akış ve dry-out bölgelerinde güvenilir tahminler vermiştir.

Quibén *et al.* (2007) çalışmalarında yatay borulardaki buharlaşma süresinde meydana gelen iki fazlı sürtünmeli basınç düşümünün analitik araştırmasına yer vermişlerdir. Deneysel veriler, akış modeli haritasına dayalı iki fazlı sürtünmeli basınç düşümü modelini geliştirmek için Wojtan–Ursenbacher–Thome akış modelinin kullanıldığı akış rejimi ile birbirinden ayrılmıştır. Çalışmada uygulanan yeni model detaylı bir şekilde tanıtılmıştır.

Yılmaz vd (2007) iki fazlı akışta kullanılan ısı transfer iyileştirme yöntemlerini ayrıntılı olarak incelemiş ve iki fazlı akışlarda ısı transfer iyileştirilmesi ile ilgili temel bulguları vurgulamışlardır. Çeşitli pasif ve aktif ısı transfer iyileştirme yöntemlerinin geniş koşullar altındaki iki fazlı akış ısı taşınım katsayılarını artırdığı belirlenmiştir.

Çomaklı vd (2007) çalışmada iş yapan akışkan olarak su kullanıldığı yatay bir borudaki iki fazlı akış karasızlık karakteristikleri deneysel olarak incelemişlerdir. Kararlı durum eğrileri elde edilmiş ve kararlı durum karakteristiklerine giriş aşırı soğutması sıcaklığı ve ısıl gücün etkisi incelenmiştir. Aşırı soğutma miktarının artması ile kararlı durum karakteristik eğrisinde kaynamanın başladığı nokta daha düşük kütleli debilere kaymıştır. İki fazlı bölgede belirli bir kütleli debi değerinde giriş sıcaklığı arttıkça basınç düşümünün arttığı gözlenmiştir. Sisteme verilen ısıl gücün artmasıyla kararlı durum karakteristik eğrisinde minimum nokta sağa doğru kaymış ve iki fazlı akış bölgesi daha yüksek kütleli debilerde başlamıştır. Yoğunluk değişim osilasyonların

genlik ve periyotları basınç düşümü osilasyonlarının genlik ve periyotlarından daha düşük olduğu görülmüştür.

Sotgia *et al.* (2008) yağ-su karışımları içinde basınç düşümü azalması ve akış rejimlerini deneysel olarak analiz etmişlerdir. 21 ile 40 mm arasında değişen çaplarda yedi farklı ryrex ve pleksiglas borular kullanılmıştır. Basınç düşümü ölçümleri, akış model haritaları ve yağ-su akışının net resimleri kapsamlı yorumlarla beraber bu araştırmada verilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer yazarların deneysel sonuçları, teorik bulguları ve ampirik kanunlar ile kıyaslanmıştır.

Poesio (2008) çalışmasında yağ-su karışımının slug akışı için deneysel araştırma yapmış ve yeni bir veri kümesi oluşturmuştur. İlk olarak, slug akışın varlığını akış haritasında göstermiş ve basınç düşümü ölçümlerini vermiştir. Sıvı-gaz aralıklı akışın aksine, basınç düşümü değerleri akışın dinamiksel yapısının özeliğini vermediği görülmüştür.

Shannak (2008) sırasıyla dikey ve yatay, nispeten düzleştirilmiş kanallarda hava-su iki fazlı akışın sürtünmeli basınç düşümünü belirlemek için deneyler yapmıştır. Bu çalışmada, iki fazlı akışın sürtünmeli basınç düşümü ile ilişkili hava-su karışımı ölçülmüştür. Pürüzlü dikey ve yatay düzleştirilmiş borularda sürtünmeli basınç düşümü üzerine ve göreceli pürüzlülük etkisine odaklanılmıştır. Göreceli pürüzlülüğün etkisinin, özellikle yüksek buhar kalitesi ve daha yüksek kütle debisi için daha önemli olduğu bulunmuştur.

Çomaklı vd (2008) yatay bir borudaki kaynamalı iki fazlı akış karasızlıkları ve akışkan tipinin etkileri üzerine inceleme yapmışlardır. Çalışmada kararlı durum eğrileri, basınç düşümü titreşimleri ve yoğunluk değişim tipi titreşimlerine, akışkan tipinin etkileri incelenmiştir. İş yapan akışkan olan su için basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi titreşimlerinin genlik ve periyotlarının, R-11 iş yapan akışkanı için olan değerlerden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Giriş sıcaklıkları arttıkça genliklerin ve periyotların arttığı, kütsel debi azaldıkça genliklerin ve periyotların azaldığı gözlemlenmiştir. Aşırı

soğutma seviyesinin artmasıyla kaynamanın başladığı noktanın daha düşük kütleli debilere doğru kaydığı anlaşılmıştır. Karakteristik eğrilerin benzer formda ve eğrilerin her birinin yatık “S” şeklinde olduğu gözlemlenmiştir.

Karagöz *et al.* (2008) yatay su kaynamalı, elemanlı boruda yoğunluk dalga akış osilasyonları üzerine araştırma yapmışlardır. Yoğunluk dalga tipi osilasyonlarının diğer dinamik osilasyon tipleri ile kıyaslandığında daha küçük genliklere ve daha yüksek frekanslara sahip oldukları görülmüştür. Giriş basınç osilasyonlarının periyot ve genlikleri artan kütle debisi ile artmıştır. Giriş sıcaklığının azalması, giriş basınç osilasyonlarının periyot ve genliklerini artırmıştır. Elemanlı ve boş borular için kütle akış oranı osilasyonları ve giriş basıncının periyot ve genlikleri artan kütle debisi ile artmıştır.

Quibén *et al.* (2009) çalışmalarında, 2 ve 3mm yüksekliğinde 4 farklı yatay yassılaştırılmış bakır boru kullanılarak, kaynamalı akıştaki iki fazlı basınç düşüm değerleri belirlenmiştir. Isı akısının iki fazlı sürtünmeli basınç düşümü değerleri üzerine önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Eş değer çap için kullanılan Moreno Quibén ve Thome'nin dairesel boru modeli yassılaştırılmış boru için bulunan deneysel verilerle kıyaslanmış, ancak uygulanan modelin yassılaştırılmış borudaki basınç düşümü verilerinin belirlenmesinde yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir.

Kakaç *et al.* (2009) dikey ve yatay borulu kaynamalı sistemlerde taşınmalı iki fazlı akış kararsızlıklarını analiz etmişlerdir. Kararlı durum sistemlerinde basınç düşümü karakteristikleri drift-flux modelinden türetilen sayısal çözüm eşitlikleri ile belirlenmiştir. Sayısal çözümler açık sonlu fark şeması kullanarak belirlenmiş ve sayısal çözüm sonuçları deneysel bulgular ile doğrulanmıştır. Osilasyonların genlik ve periyotları, başlangıçtaki negatif eğim noktasında azalan kütleli debi ile artmıştır. Drift-flux modeli ile belirlenmiş kararlı durum karakteristikleri ve salınımları deneysel sonuçlarla makul bir tutarlılık göstermiştir.

Venkatesan *et al.* (2010) çalışmalarında, dar bir boru içerisindeki iki fazlı basınç düşümü değerleri üzerine çapın etkisini incelemişlerdir. İki fazlı sürtünmeli basınç düşümü üzerine boru çapının etkisi, 0.6, 1.2, 1.7, 2.6 ve 3.4 mm iç çaplara sahip dairesel borularda, hava ve su kullanılarak incelenmiştir. Daha küçük boru çaplarında daha farklı ve değişik akış şekilleri gözlenmiştir. Basınç düşümü ölçülmüş, homojen model ve Lockhart-Martinelli modeli gibi değişik mevcut modeller ile kıyaslanmıştır. Annular rejimdeki akım tabakalaşmanın, küçülen yüzey gerilimine etkisinin çok önemli olduğu anlaşılmıştır. Mevcut modellerin görüntülenen tüm akış rejimleri için basınç düşümünü belirlemede yetersiz oldukları görülmüştür. Sıvı gaz etkileşim parametresinin akış rejimi tabanlı modifikasyon yaklaşımı, dar borularda basınç düşümünü belirlemek için çok önemli bir yöntem olduğu anlaşılmıştır.

Liang *et al.* (2010) yatay düz boru evaporatöründe iki fazlı akış kararsızlıkları üzerine araştırma yapmışlardır. Basınç düşümü ve kütleli debi arasındaki ilişki, sabit ısı akısı ve buharlaşma basıncı ile ölçülmüştür. Yoğunluk dalga osilasyonları hemen hemen tüm kütle hızlarında görülmüş, düşük genliklere sahip oldukları ve periyotlarının 1 ile 3 arasında değiştiği belirlenmiştir. Basınç düşümü osilasyonu ve termal osilasyon sınır başlangıç değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Üç tip osilasyon arasındaki sınır değerleri ve test sonuçları, matematiksel modele göre belirlenmiştir. Deney sonuçlarıyla, basınç düşümü osilasyonları ve termal osilasyonların deney başlangıç koşulları da elde edilmiştir. Basınç düşümü osilasyonları ve termal osilasyonların başlangıç ampirik korelasyonları homojen faz modeli ile elde edilmiştir. Bu çalışmadaki sonuçlar soğutma sistemindeki iki fazlı akış kararsızlıklarının mekanizmalarını daha iyi anlamaya olanak sağlamıştır. Bu sonuçlar aynı zamanda soğutma sisteminin maruz kalabileceği ciddi osilasyon problemlerine karşı yapılacak tasarım ve dizayn için kullanılabilir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bilimsel ve siyasi çalışmalar, enerji kaynaklarının sürekli olarak azaldığı ve giderek daha pahalı elde edildiği günümüzde alternatif enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve

yaygınlaştırılması üzerine yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bugün Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı Küçük Destek Programı (UNDP/SGP) ve AB destek programları enerji tasarrufuna yönelik projelere önem vermektedir. Enerjinin daha etkili ve verimli bir şekilde kullanılması bugün için alternatif enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu kapsamda ısı transferini iyileştirmeye yönelik çalışmalar da enerji ekonomisi açısından dikkate alınması gereken çalışmalardır. Isı transferi iyileştirme yöntemleri genel olarak “pasif”, “aktif” ve “karma” yöntemler olarak sınıflandırılmaktadır.

Bir kanal içerisinde sürekli akan bir akışkanın akım şartları sürekli durumdan çok az değiştirildiğinde akım başka bir sürekli duruma asimptotik olarak yaklaşıyorsa bu akıma kararlı akım, akım başka bir sürekli duruma asimptotik olarak yaklaşmıyor ya da akımın debi, basınç, sıcaklık gibi hidrodinamik ve ısıl özelliklerinde periyodik salınımlar yani osilasyonlar meydana geliyorsa bu akıma da kararsız akım adı verilmektedir. Zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı termal sistemlerin dinamik davranışları hakkında bilgi sahibi olmak, bu sistemlerin lokal ve global kararlılıklarını anlamak açısından çok önemlidir. Kararsızlık olayları ile nükleer reaktörler, buhar kazanları, özel ısı değiştiricileri, soğutma sistemleri, buhar üreteçleri gibi iki fazlı akışların söz konusu olduğu endüstriyel uygulamalarda sıkça karşılaşılabilmektedir. Kaynamalı iki fazlı akışlardan kaynaklanan değişik tipli kararsızlıklar yukarıda bahsedilen endüstriyel uygulamaların dizayn ve işletme aşamalarında dikkate alınmalıdır. Kararsızlıklardan kaynaklanan osilasyonların karakteristiklerinin bilinmesi bu uygulamalarda sistemlerin güvenli bir şekilde işletilmesi için oldukça önemli bir noktadır. İçerisinde sıvı akışkanın ısıtıldığı ve kaynamaya başladığı bütün sistemlerde geri besleme (feed back) mekanizmaları ile oluşan kararsızlıklar; sistemde kontrol problemlerine, kaynama krizlerine, mekanik titreşimlere ve özellikle nükleer santrallerde yakıt donanımlarında bulunan boru cidarlarının termal yorulmalardan dolayı deforme olarak bünyelerindeki radyoaktif malzemenin çevreye yayılmasına neden olacağından bu sistemlerin tasarım ve dizaynında dikkatle incelenmesi gereken bir problemidir (Karagöz 2007).

Çizelge 1.1. 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 eğride 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.

İki fazlı akışlarda kararsızlıklar farklı tesirler sonucu farklı karakterlerde ortaya çıkmaktadırlar. Ortaya çıkış nedenleri ve karakterleri farklı olduğundan kontrol veya yok etme metotları da farklıdır. Bu nedenle her tip kararsızlığı oluşturan nedenlerin ve kararsızlığın gelişiminin temel mekanizmalarının bilinmesi gerekir. Halen iki fazlı akış kararsızlıklarının ortaya çıkış mekanizmaları üzerinde genelde kabul edilmiş teorik bir açıklama olmasa bile iki fazlı akış kararsızlıkları statik ve dinamik kararsızlıklar olmak üzere iki ana grupta incelenebilmektedir. Diğer taraftan, bu kararsızlıklar kanal geometrisi, basınç, debi, sıcaklık gibi işletme ve sınır şartları ile değişmektedir. Tüm bu değişkenlikleri parametre olarak dikkate alarak yapılacak deneysel çalışmalar ya sınırlı kalacak ya da hepsini gerçekleştirmek oldukça fazla zaman ve deneysel maliyeti beraberinde getirecektir.

Literatür taramasından görüldüğü gibi iki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili araştırmalar daha çok düşey boru/kanallar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu tez ısı transferi iyileştirmesinin yatay borulardaki iki fazlı akış rejimlerine ve iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini incelemek amacıyla hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan sistem Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Isı Transferi laboratuvarında bulunan ve daha önce çeşitli deneysel

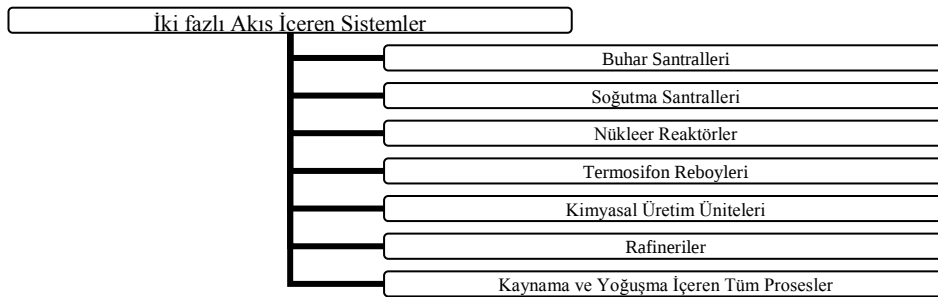
araştırmalarda kullanılan bir /iki fazlı akış sistemidir. Daha önce bu sistem kullanılarak yapılan araştırmalarda iş yapan akışkan olarak R-11 akışkanı ve “su” kullanılmıştır. R-11 ve “su” akışkanları için yapılan deneylerde kullanılan boru çaplarından daha düşük efektif çapa sahip test borusu için incelemeler yapılmıştır. İki fazlı akış kararsızlıkları incelenmiş, osilasyonların sınırları belirlenmiş, basınç düşümü değerleri ve genlik, periyotlar üzerine farklı elemanlar üzerinde kıyaslamalar yapılmıştır. Bu tezin bilimsel bilgi birikimine şu noktalarda katkı yapması umulmaktadır:

1. İki fazlı akış içeren yatay borulu evaporatörler ve ısı değiştiricilerin kararsızlıklar sonucu oluşabilecek burn-out, ısıl yorulma, titreşim ve arızaların oluşmasına meydan vermeyecek tasarımıının yapılması, çalışma koşullarının buna göre belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Burnout olayı; geometriye (boruların uzunluğu, çapı), çalışma koşullarına (basınç, giriş sıcaklığı, akışkanın hızı, sisteme verilen ısı vs.) ve sınır koşullarına (eksenel ısı akısı dağılımı) bağlıdır. Bu nedenlerle bu parametrelerin kararsızlıklara etkisinin araştırılması çok önemlidir.
2. Boru efektif çapları üzerinde iki fazlı akış kararsızlıklarının etkisi ve sonuçları belirlenebilecektir. Osilasyonların sınırları ve akış biçimlerinin yapısı incelenebilecektir.
3. İki fazlı akış kararsızlıkları ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmasına rağmen, ısı transfer iyileştirmesinin bu kararsızlıklara etkisini inceleyen araştırmalar sınırlı sayıdadır. Farklı türbülatörler kullanılarak yapılacak çalışmanın ve ardından nümerik modellemenin bu konuya önemli katkı yapacağı düşünülmektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

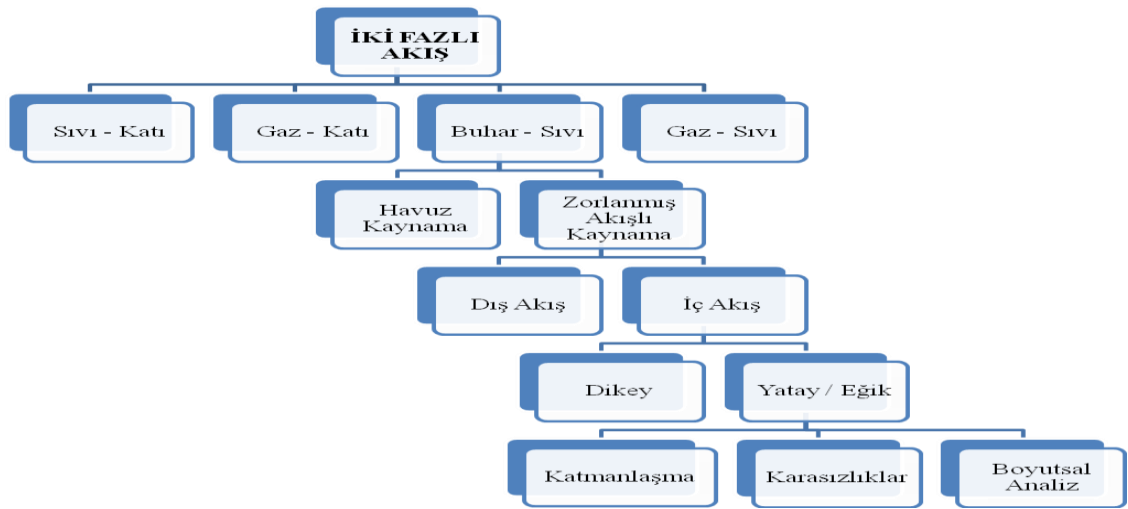
2.1. İki Fazlı Akışlar

İki fazlı akışın en sık kullanıldığı alanlar büyük ölçekli güç santral sistemleridir. Şekil 2.1’de iki fazlı akış içeren sistemlerin kullanıldığı belli başlı yerler sıralanmıştır. Kömür ve gaz yakıtlı santraller, türbinlerinde kullandıkları buharı üretmek için çok büyük kazanlara gereksinim duyarlar. Bu gibi durumlarda, basınçlı su ısıtmalı borular içerisinden geçirilir ve boru içerisinde hareket eden su zamanla buhara dönüşür. Kazanların tasarımını doğru bir şekilde yapabilmek için tek fazlı durumdan önemli ölçüde farklılık gösteren iki fazlı akışın ısı transferi ve basınç düşümünü iyice anlamak gerekir. Daha da önemlisi, nükleer reaktörler, iki fazlı akışı kullanarak reaktör çekirdeğinden ısıyı çekmek için su kullanırlar. Mühendislerde borularda oluşabilecek arızalara, basınç düşümlerine ve problemlere karşı boru dizaynında çok çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Ayrıca iki fazlı akış pompalarda kavitasyonada sebebiyet verebilir. Buradaki pompa, pompalanan sıvının buhar basıncına yakın faaliyet göstermektedir. Pompa kanatları yakınında yerel olarak ortaya çıkabilen basınç daha da düşürse, burada bir faz değişimi meydana gelerek gaz fazı oluşur. Benzer etkiler deniz pervaneleri üzerinde de olabilir ki bu her ne zaman olsa tasarımcılar için ciddi problemler doğurur. Buhar kabarcığı çöktüğü zaman, çok büyük basınç değişimleri meydana getirir ki o da türbin yada pervanede ciddi hasarlar meydana getirir. Bahsedilen birkaç ana olguda iki fazlı akışı iyi anlamak, tiplerini ve var olduğu durumları belirlemek sistemlerin tasarımı açısından oldukça önemlidir.



Şekil 2.1. İki fazlı akış içeren sistemlerin genel sınıflandırılması

İki fazlı akış iki fazın (gaz, sıvı veya katı) etkileşimli akışını ifade eden bir terimdir. İki fazlı akış terimi çok farklı olaylara verilen genel bir isimdir. Bununla birlikte iki fazlı akıştan bahsedilebilmesi için farklı yoğunluklara sahip olan iki madde aynı sistemde dengeli veya dengesiz koşullar altında eş zamanlı olarak mevcut olmalıdır. Sıvı-katı, gaz-katı, buhar-sıvı ve gaz-sıvı akışları en yaygın görülen iki fazlı akış örnekleridir. Şekil 2.2’de iki fazlı akışların sınıflandırılması gösterilmiştir. Buhar-sıvı akışı sıvı ısıtıldığı ve sistemde kaynama oluştuğu zaman elde edilir. Bu akış tipinde iki faz da aynı kimyasal bileşimlere sahiptir. Transport mekanizmasına göre kaynama “havuz kaynama” ve “zorlanmış akışlı kaynama” olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Zorlanmış akışlı kaynama akış koşullarına göre “dış akış” ve “iç akış” olarak iki sınıfa ayrılır. Dış akış düzlem veya eğrisel ısı transfer yüzeyi üzerindeki akışkan akışını, iç akış ise dairesel boru veya diğer geometrik kesitlere sahip kanal gibi kapalı bir alandan geçen akışı ifade eder. İç akış, akış yönüne göre “dikey akış”, “yatay akış” ve “eğik akış” olarak sınıflandırılır.

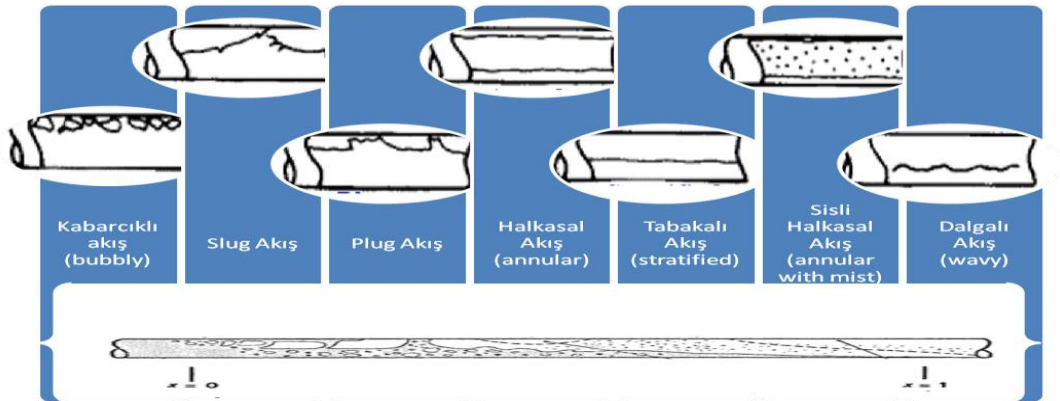


Şekil 2.2. İki fazlı akışların genel sınıflandırılması

İki fazlı akışların temel karakteristik özelliği iki faz arasında bir ara yüzeyin olması ve gaz-sıvı akışlarında bu ara yüzeyin çeşitli şekiller almasıdır. Akış oryantasyonu bu ara yüzey üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yukarıda da belirtildiği gibi iki fazlı akışlar

oryantasyonlarına göre yatay, eğik ve düşey olarak sınıflandırılırlar. Düşey iki fazlı akışlarda akışın yönü kanalda aşağıya veya yukarıya doğru olabilir. Yatay iki fazlı akış karakteristikleri düşey iki fazlı akış karakteristiklerinden çok farklıdır. Düşey akışlarda yerçekimi yönü akışın hareket yönüne paralel, boru boyunca herhangi bir kesite dik ve akış borunun eksenine göre simetriktr. Oysaki yatay akışta yerçekimi kuvvetleri akışkan akımına dik bir yönde buhar ve sıvı fazları üzerine etki yapar, bu ise asimetrik faz dağılımına neden olur ve faz ayrışması oluşabilir. Yerçekimi kuvvetleri yoğunluğu yüksek olan sıvı fazını borunun tabanına, düşük olan buhar fazını ise borunun üst taraflarına doğru yönlendirir (Karagöz 2007).

İki fazlı akışlarda belirli koşullar altında oluşan akış rejimleri iki fazın bağıl ve mutlak akış debilerine, sistemin geometrisine ve özellikle fazlar üzerine etkiyen kuvvetler arasındaki etkileşime bağlıdır. İki fazlı akışlarda çok farklı akış rejimleri tanımlanmış ve çok çeşitli terminoloji kullanılmıştır. Düşey borularda oluşan akış rejimleri kabarcıklı akış, slug akış, halkasal akış, halkasal-dağılı akış ve damlacıklı akış rejimleridir. Yatay borularda oluşan akış rejimleri düşey borulardakinden oldukça farklıdır ve akış yönüne dik etkiyen yerçekimi kuvvetleri nedeniyle oluşan asimetriklik sonucu düşey akışlardakinden çok daha karmaşıktır. Yatay borulardaki akış rejimleri kabarcıklı akış, slug akış, plug akış, halkasal akış, tabakalı akış, sisli halkasal akış ve dalgalı akış olarak adlandırılır (Karagöz 2007). Şekil 2.3’de yatay borulardaki akış rejimleri şematik olarak gösterilmiş ve bu akış rejimlerinin karakteristikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.



Şekil 2.3. Yatay borulardaki akış rejimleri

(a) Kabarcıklı akış: Bu akış biçiminde boru içerisinde bulunan sıvı içerisinde meydana gelen küçük kabarcıklar dağınık halde hareket ederler. Yatay borunun konumu gereği yerçekimi kuvvetleri ve yoğunluk değerleri etkisinde kabarcıklar hareket ettiği sistemde borunun üst tarafına yakın hareket içerisinde seyrederler.

(b) Slug akış: Kabarcıklı akış biçiminde boru içerisinde dağınık halde hareket eden baloncuklar sıvı fazı halen mevcut iken salyangoz şeklinde birleşip hareket etmeye başlarlar. Fazlar arasında meydana gelen bu dalgalanma boru üst cidarı ile temas ederken bahsedilen baloncukların geometrik şekil değiştirmesi bu akış rejimini doğurur.

(c) Plug akış: Kabarcıklı akış rejimi ile slug akış rejimi arasında özellik gösteren bir akış rejimi biçimidir. Kabarcıkların yoğunluğunun artması ile almış olduğu yeni şekil formasyonu şemsiye veya mermi biçimindedir. Meydana gelen bu yeni formdaki kabarcıklar boru üst cidarına doğru akma eğiliminde hareket ederler.

(d) Halkasal akış: Borunun merkez bölümünde yer alan hızlı hareket eden bir gaz akımı ve boru cidarlarında oluşan sıvı film tabakası biçimindeki akış rejimidir. Boru cidarlarında meydana gelen sıvı film tabaka kalınlıkları borunun yatay konumu gereğince farklıdır. Alt cidarda oluşan film kalınlığı üst cidarda olduğundan daha fazladır.

(e) Tabakalı akış: Borunun üst yarısını kaplayan gaz fazı, alt yarısında bulunan sıvı fazının oluşturduğu akış rejimidir. Bu akış rejiminde fazların birbirinden ayrılmasına sebep olan yerçekimi kuvvetlerinin etkisidir.

(f) Sisli halkasal akış: Bu akış rejiminde gaz fazının hızı oldukça yüksek değerlere erişir. Yüksek hız değerlerine sahip gaz fazının etkisi ile damlalar formundaki sıvı pulverize hale gelir.

(g) Dalgalı akış: Katmanlı akış rejiminde borunun üst ve alt bölgelerini paylaşan gaz-sıvı faz biçimi, gaz fazı akış hızının artması ile gaz-sıvı arasındaki yüzeyde dalgalı bir

geometri oluşturur. Bu yeni geometri oluşumu ile akış biçimi katmanlı akış formundan dalgalı akış formuna geçmiş olur.

Hewitt (1978), Widmann (1993) ve Ding (1993) yatay borulardaki akış rejimlerini kabarcıklı akış, plug akış, katmanlı akış, dalgalı akış, slug akış ve halkasal akış olarak sınıflandırmışlardır.

2.2. Kaynamalı Kanalda Basınç Düşümü-Debi Karakteristikleri

Kanal boyunca oluşan basınç düşümü $\Delta p = p_{\text{giriş}} - p_{\text{çıkış}}$ ile akış debisi arasındaki ilişki “sistemin kararlı durum karakteristiği” olarak adlandırılır. Bu, ayrıca bazı araştırmacılar tarafından iç karakteristikler olarak da adlandırılmaktadır. 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 gibi basınç düşümü debinin karesiyle orantılı olarak değişmekte ve parabolik karakter göstermektedir. Basınç düşümünde meydana gelen küçük değişikliklere yanıt ise aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir:

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = k \frac{G_0}{\rho} \frac{dG}{dt} \quad \text{veya} \quad \frac{dG}{dt} = \frac{d(\Delta p)}{dt} \frac{\rho}{kG_0} \quad (2.2)$$

İki fazlı akışta ise laminar (karışık) momentum denklemi:

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

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

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

veya

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

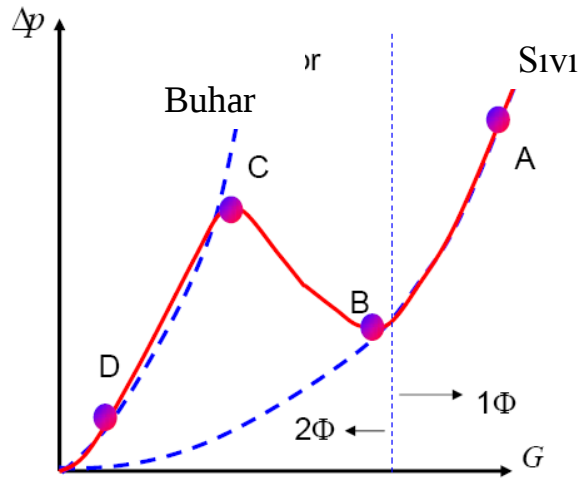
Şekil 2.4'de A noktasında akışkan tek fazlı sıvı haldedir ve debi yüksektir. Sistem basıncı kütleel debinin azalması nedeniyle sürtünme basınç kaybıyla orantılı olarak azalır:

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

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 baskın olduğundan debinin azalmasıyla basınç düşümü artar. C noktasında hemen hemen tümüyle buhar fazı vardır. Akış debisi kanalda çok miktarda buhar üretecek kadar düşüktür ve basınç düşümü tekrar tek fazlı buhar yasasına $\Delta p \approx G^{2-m}$ 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. Stabilité kriteri:

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

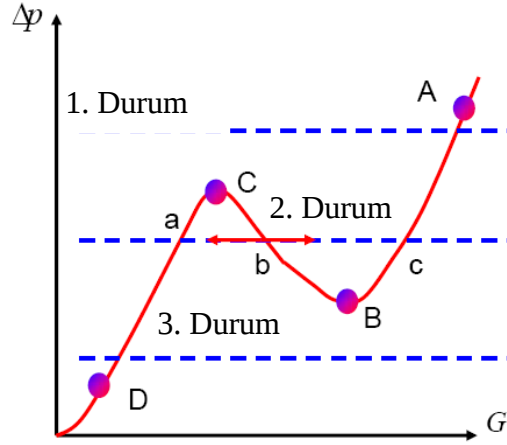
şeklindedir. Bu nedenle (a) ve (c) kesişim noktaları kararlıdır ancak (b) kesişim noktası kararsızdır. (b) noktasında debi hafifçe azalırsa iki fazlı sürtünme basınç kaybı artar, debi (a) noktasına gelinceye kadar daha da azalır.



Şekil 2.4. Karakteristik durum eğrisi

Diğer taraftan pompa boyunca basınç artışı sabit değildir ve akış debisiyle değişir. Pompa boyunca basınç artışı Δp_{pompa} ile akış debisi arasındaki ilişki pompa karakteristikleri olarak adlandırılır. Bu ilişki ayrıca dış karakteristikler olarak da isimlendirilir. Pompa karakteristiği daima negatif eğimlere sahiptir; kullanılan pompaya bağlı olarak bu eğim çok dik veya düz olabilir.

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



Şekil 2.5. Karakteristik durum eğrisi

2.3. İki Fazlı Akış Kararsızlıkları ve Tipleri

İki fazlı akış kararsızlıklarının ayrımı genel manada mikroskobik ve makroskobik olarak yapılmalıdır. Mikroskobik kararsızlıklar yerel olarak ortaya çıkar. Hidrodinamik kararsızlıklar mikroskobik kararsızlıklar için örnek olarak verilebilir. Makroskobik kararsızlıklar ise daha genel bir yapıda olup tüm iki fazlı akış sistemlerinde görülebilir. İki fazlı akış sistemleri birçok kararsızlık ve osilasyon olaylarını gösterme eğilimindedir. Kaynamalı iki fazlı akış sistemlerinin kararlı durum ve bazen de kararsız durum işlemlerinde sınır şartları sabitlenmiş bir dizi için birçok çözüm bulunmaktadır. Küçük tedirginlikler iki yada daha fazla kararsız çalışma koşulları arasında gidip gelen osilasyonlara veya verilen sınır şartları için birçok çözüme sahip olan bir yapıya sebebiyet verebilir. İki fazlı akış kararsızlıkları genel olarak “statik kararsızlıklar” ve “dinamik kararsızlıklar olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır. Statik istikrarsızlıklar kararlı durum çalışması açısından bir sistemde süreksizlikleri temsil eder ve bu sistem kararlı durum korunum denklemlerine dayanılarak analiz edilebilir. Statik kararsızlıklar için akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı), chugging, geysering, burn-out ve bumbing olayları verilebilir. Dinamik kararsızlıklar sık sık osilasyonlara yol açarlar ve sistemin geçici dinamik ve geri besleme karakteristikleri dikkate alınarak analiz edilirler. İki fazlı akış statik ve dinamik

kararsızlık çeşitleri ile bunların oluşmasında etkin rol oynayan temel mekanizmalar ve karakteristiklikleri Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

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 iç karakteristik eğrisi dış karakteristik eğrisinden daha dik bir eğime sahiptir.
		Kaynama Krizi	Isıtılan yüzeyden etkin olmayan ısı çekilmesi
	Temel relaxation kararsızlık	Akış Rejimi Geçiş Kararsızlığı	Kabarcıklı akış, halkasal akıştan daha düşük boşluk oranına fakat daha yüksek bir basınç düşümüne sahiptir.
	Bileşik relaxation kararsızlığı	"Bumping" (darbeli akış), "Geysering" (püskürtmeli akış) ve "Chugging" (gürültülü akış)	Genellikle çekirdekleşme sitelerinin eksikliği nedeniyle metastabil duruma periyodik olarak ayarlanma
Dinamik Kararsızlıklar	Temel (veya saf) dinamik kararsızlıklar	Akustik Osilasyonlar	Basınç dalgalarının rezonansı
		Yoğunluk Değişim Osilasyonları	Debi, yoğunluk ve basınç düşümü arasında gecikme ve feed back etkileri
	Bileşik Dinamik Kararsızlıklar	Termal Osilasyonlar	Değişken ısı transfer katsayısı ile akış dinamikleri arasında meydana gelen etkileşim
		Kaynamalı Su Reaktör Kararsızlığı	Akış dinamikleri ile ısı transferinin yanı sıra boşluk oranı reaktivitesi arasındaki etkileşim
		Paralel Kanal Kararsızlığı	Az sayıdaki paralel kanallar arasındaki etkileşim
		İkincil olay olarak bileşik dinamik kararsızlıklar	Akış gezintisi, kanal ve sıkıştırılabilir hacim arasında dinamik etkileşim başlatır.
			Sistemde oluşan basınç dalgalarının yayılması için gerekli zamana bağlı yüksek frekanslar (10-100 Hz)
			Sürekli bir dalga geçiş zamanıyla ilgili olarak ortaya çıkan düşük frekanslar (1 Hz)
			Film kaynamada meydana gelir.
			Sadece düşük yakıt zaman sabiti ve düşük basınçlar altında şiddetlidir.
			Çeşitli akış dağılım modları
			Çok düşük frekanslı periyodik proses (0.1 Hz)

İki fazlı akış kararsızlıklarını sınıflandırırken Çizelge 2.1’de kullanılan bazı temel kavramların açıklanması aşağıda verilmiştir:

(a) Kararlı Akış: Temel manada sistem parametrelerinde sadece konumun fonksiyonu olduğu akış biçimine “kararlı akış” denilir. Uygulama sistemlerinde akış biçimi, slug akış veya türbülans, çekirdekleşme gibi olayların neticesinde osilasyonlar gösterebilir. Bu osilasyonlar kararsızlık rejimlerinin oluşmasında etkin rol oynarlar. Akış formuna

birden etki edildiğinde yeni çalışma koşulları ilk duruma asimptotik olarak yaklaşıyorsa bu akışın “kararlı akış” olduğu belirtilmiştir.

(b) Statik Kararsızlık: Statik kararsızlığın genel sebebi süreklilik yasaları ile açıklanılabilir. Eğer akış şartları orijinal durumundan az bir miktar değişime uğradığında orijinal halin yakınında başka bir kararlı durum oluşmaz ise akışın “statik kararsızlığa” maruz olduğu belirtilir. Bu nedenle, kararsızlık eşiği sadece süreklilik yasaları kullanılarak elde edilebilir.

(c) Dinamik Kararsızlık: Bir sistemde akışın dinamik kararsızlığa maruz olduğunu belirtmek için atalet ve diğer geri besleme etkilerinin sistemde önemli etkilere yol açması gerekir. Dinamik kararsızlık eşiğini belirlemede süreklilik yasalarını kullanmak yeterli değildir.

(d) İkincil Olay: Birincil olaydan sonra oluşan olaya ikincil olay denilir. “İkincil olay” terimi birincil olayın olması ve ikincil olayın oluşması için gerekli bir şart oluşturduğu durumda kullanılır.

(e) Bileşik Kararsızlık: Kararsızlığın “bileşik kararsızlık” olarak isimlendirilebilmesi için farklı temel mekanizmalar sistemde etkileşmeli ve ayrı olarak incelenemiyor olması gerekir.

İki fazlı akış kararsızlıklarına etkiyen parametreler Çizelge 2.2’de verilmiştir.

2.3.1. Statik Kararsızlıklar

Statik kararsızlıklara maruz kararlı duruma sahip sistemler belirli koşullar altında kararsız hale dönüşürler ve bir tedirginlik sonucunda tamamen farklı, kararlı durum çalışma haline geçerler. Bir akışın kararlı hale sahip olduğunu söyleyebilmek için akış

ortamında oluşan küçük ölçekli yerel kararsızlıkların herhangi bir sürekli osilasyona sahip olmaması ve akışta geçici tedirginlikler ya da osilasyonların oluşması gerekir. Kararlı bir akış durumunda varılan yeni çalışma şartları başlangıç çalışma noktasına asimptotik olarak yaklaşır. Akış durumunda zaman geçtikçe oluşabilecek tedirginlik nedeniyle kararlı bir çalışma noktasından başka bir çalışma noktası ortaya çıkıyorsa oluşan bu kararsızlıklara "statik kararsızlıklar" denir.

Statik kararsızlıklar aşağıdaki gibi sınıflandırılmaktadır:

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)

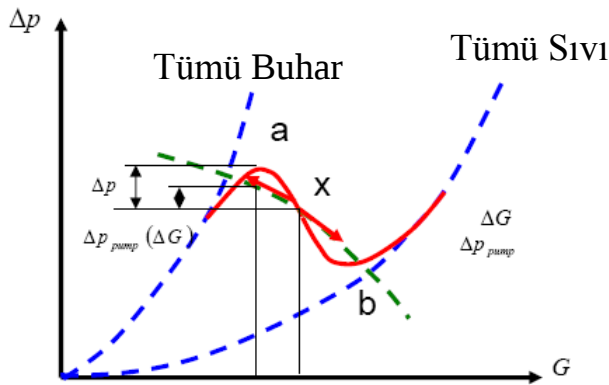
Çizelge 2.2. İki fazlı akış kararsızlıklarını etkileyen parametreler (Karagöz 2007)

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
	Kütleli debi
	Isı gücü
	Giriş aşırı soğutması
Sınır şartları	Isıl sınır şartları
	Giriş ve çıkış basınçları

2.3.1.a. Akış gezintisi (Ledinegg kararsızlığı)

Bu kararsızlık ilk olarak Ledinegg tarafından 1938'de analiz edildiğinden literatürde "Ledinegg Kararsızlığı" olarak anılmaktadır. Ledinegg, iç karakteristik eğrisinin iki pozitif eğimli kısma ilaveten bir de negatif eğimli bölgeye sahip olduğunu ve böylece akış debisinin basınç düşümü için oldukça önemli bir parametre olduğunu gözlemlemiştir. 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 düşümü 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 imkansız 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 neden olacaktır. Yeni denge noktası (a) genellikle burnout'un olduğu düşük bir akış debisine karşılık gelir. (a) noktasında çalışma yüksek buhar çıkış kurulum derecesi, yüksek cidar sıcaklıkları ve olası boru arızası ile ilişkili burnouta yol açabileceğinden sorunlu olabilir. Görüldüğü gibi düz bir dış karakteristik eğriyle iç karakteristik eğrisi üzerinde minimum noktanın sol tarafında çalışmak imkansız olmaktadır. Bunun aksine debide herhangi bir küçük artış (b) noktasına akış gezintisine neden olacaktır. Akışın çoğunlukla aşırı soğutulmuş olduğu (b) noktasında çalışan sistemde birkaç problem ortaya çıkabilir. Bu tip basınç düşümü karakteristikleri daima statik tip kararsızlık problemi oluştururlar ve sistemi yeniden dizayn ederek veya akış debisiyle orantılı ilave basınç düşümü üreten bir giriş kısıtlayıcısı ilave ederek düzeltilebilir.



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

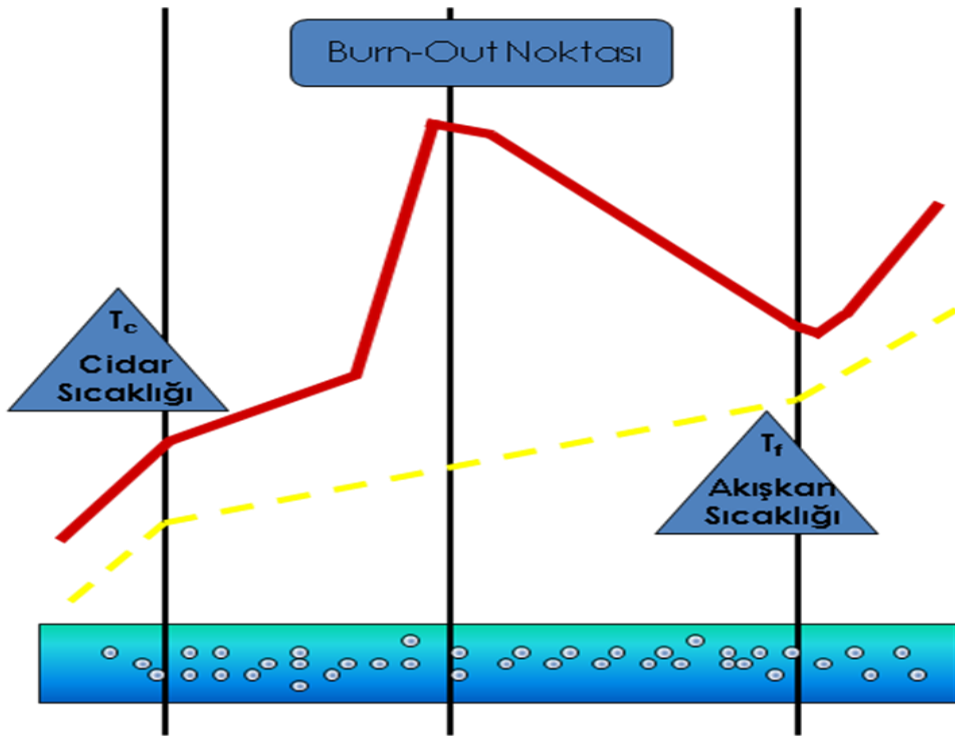
Ledinegg kararsızlığı ile ilişkili şunlar ifade edilebilir (Karagöz 2007):

1. Akış gezintisi veya Ledinegg kararsızlığı basınç düşümü-debi ilişkisi sonucu olarak ortaya çıkar.
2. Bu kararsızlıklar toplam basınç düşümünün (sürtünme+ivmelenme+yerçekimsel basınç düşümleri) debi artışıyla azaldığı durumlarda oluşur.
3. Bu kararsızlık kanal basınç düşümü-debi eğrisinin eğimi (kanalın iç karakteristiği) sistem basınç düşümü-debi eğrisinin eğiminden (kanalın dış karakteristiği) cebrik olarak daha küçük olduğu zaman meydana gelir.

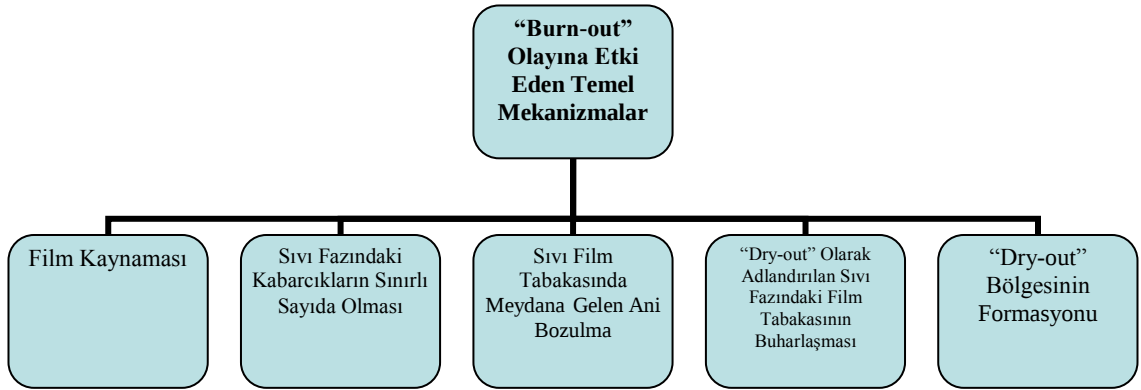
2.3.1.b. Kaynama krizi

Kaynamakta olan bir sıvı fazda bulunan bir akışkan ile temas eden bir yüzeye uygulanan ısı akısı tedricen artırıldığı zaman sıvı fazındaki akışkan ile yüzey arasında sürekli temasın kesildiği bir noktaya ulaşılmaktadır. Kaynama krizi olarak adlandırılan bu olay (burn-out) meydana geldiği zaman sıvı fazındaki akışkan ile yüzey arasında nispeten daha düşük termal kondüktiviteye sahip buhar fazındaki akışkanın girmesi sonucunda akışkana iletilen ısı transferi oldukça azalmaktadır. Bundan dolayı şayet kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı azaltılmazsa kanal yüzey sıcaklığı hızlı bir trend ile ani bir şekilde oldukça yüksek sıcaklık limitlerine ulaşacaktır. Bu olay kaynamalı ısı transfer alanında “burn-out” olarak adlandırılmaktadır. Aynı şekilde “burn-out” olayının gözlemlendiği anda ısıtıcı kanal yüzeyine uygulanan ısı akısı değerine “kritik ısı akısı (CHF)” adı verilmektedir. Zorlanmış konveksiyonlu kaynama şartlarında bu olay iki fazlı akış ortamında meydana gelmektedir. Özellikle yatay pozisyonda işletilen buhar kazanları ile boylerlerde bulunan boru demetlerinin uzun ömürlü olarak kullanılmaları, boru cidarları ile buhar-sıvı fazlarından oluşan iki fazlı karışımın sıvı fazı arasında uygun ısı transfer şartlarının korunmasına büyük oranda bağlı olmaktadır. Uygun olan bu ısı transfer şartlarının korunamaması sonucunda oluşacak olan termal gerilmeler boru kanalı cidarlarında çatlama, yırtılma ve patlama gibi deformasyonlara sebep olacaktır. Yatay bir boyler borusundan oluşan “burn-out” olayı Şekil 2.7’de verilmiştir.

Bu olay genellikle annular akış olarak adlandırılan film akış rejiminde meydana gelmektedir. Burn-out olayı şayet kanal uzunluğu kısa ve ısı akısı yeterli miktarda ise kabarcıklı akış rejiminde de meydana gelebilmektedir. Yine aynı şekilde 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 hatları ile açıklanmaya çalışılan tüm burn-out olaylarının ortaya çıkmasında esas rolü oynayan bazı temel 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” olayının ortaya çıkmasında etkin parametreler (Karslı 2000)

2.3.1.c. Akış rejimi relaxation kararsızlıkları

Farklı akış rejimlerinin basınç düşümü karakteristikleri, akış rejimi relaksasyon kararsızlıklarına sebebiyet vermektedir. Bu kararsızlıklar neticesinde akışta periyodik değişimler meydana gelir. Aynı gaz ve sıvı debilerinde slug akışlardaki basınç düşümü kabarcıklı akıştakinden daha düşük olması bu duruma örnek olarak verilebilir. Eğer bir sistem kabarcıklı akış rejiminde akış rejimi sınırının yakınında çalışıyorsa sıvı akış debisinde küçük bir negatif çalkantı slug akışa geçişe neden olabilir. Bunun sonucunda kanaldaki basınç düşümü azalır. Eğer kanal sabit basınç düşümü koşulunda çalışıyorsa daha çok sıvı sınır koşullarını sağlamak için kanala girecektir. Böylece bu durum sistemi kabarcıklı akış rejimine geri döndürecektir. Diğer bir örnek, akış koşulları kabarcıklı ve halkasal akış arasında geçişe yakın olduğu zamanki buharlaşan akışlardır. Debede 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 veya tabandan ısıtılan kapalı uçlu boruda oluşur. Isı akısı yeterli miktarda yüksek olduğunda, kaynama alt taraftan başlar. Düşük basınçlı sistemlerde, ısı akısı arttığında hidrostatik basınçta düşme nedeniyle buhar üretimi ani olarak artar ve genellikle buharın kanaldan püskürtülmesiyle sonuçlanır. Bunun ardından buharın yerine sıvı gelir ve aşırı soğutulmuş kaynamasız durum tekrar oluşur ve çevrim tekrar başlar. Temel nedeni tek fazlı akıştakinden daha küçük hidrostatik yük nedeniyle iki fazlı akış için olan toplam basınç düşümünün azalmasıdır. Yeterli buhar üretildiğinde $\Delta p < \Delta p_{siv}$ iki fazlı karışım püskürtülür ve onun yerine sıvı gelir. Geysering sadece doğada değil aynı zamanda roket yakıt deposu ve besleme sistemlerinde de gözlenir. Laboratuvar testlerinde Griffith geysering periyodlarının yaklaşık 10-1000 saniye aralığında oluştuğunu gözlemlemiştir (Karagöz 2007).

2.3.1.e. Bumping

Buhar patlaması kararsızlığı (bumping), doğal konveksiyon ile şiddetli çekirdekli kaynama arasında bir değişimdir. Bu kararsızlık, ısıtılan katı yüzeyde bulunan büyük oyuklarda buharın birikmesini engelleme eğilimi gösteren ıslatma oranı yüksek sıvılarda meydana gelir. Örnek olarak alkali sıvı metalleri ve florokarbonlar verilebilir. Her iki akışkan da mühendislik yüzeylerinde sifıra yakın temas açılmasına sahip akışkanlar sınıfına girdiklerinden bu kararsızlık bu akışkanlarda çok sıklıkla meydana gelir. Böyle iyi ıslatabilme özelliğine sahip sıvılarda, büyük boşlukların tümü sıvı ile dolabilir, taşabilir ve çekirdekleşme için yüksek aşırı ısıtmanın gerekli olduğu bir durum ortaya çıkar. Isı akısı arttığında, çekirdekleşme ve bununla ilişkili sıcaklık gezintisi gözlemlenir. Kararsızlığın karakteristik özelliği yüksek aşırı ısıtma olan bir sıvıda buhar fazının aniden ortaya çıkması ve hızlı büyümesidir. Düşük basınçtaki sıvı metal göz önüne alındığında oluşan buhar patlaması kararsızlığı olayı Çizelge 2.3’de özetlenmiştir (Karagöz 2007).

2.3.1.f. Chugging

Chugging terimi, genellikle bir akış kanalından periyodik olarak akışkanın püskürtülmesiyle karakterize edilen çevrimsel olay için kullanılır. Chugging terimi ilk olarak 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 oluşmaktadır. Chugging kararsızlığının TRIGA vb. çeşitli reaktörlerde olduğu gözlemlenmiştir. Eğer bir boşluk oluşturmak amacıyla 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 (Karagöz 2007).

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 veya kaynamalı bir kanalda üretilen buhar üretim oranına göre meydana gelen yoğunluk değişimi, basınç düşümü ve debi arasında muhtelif “feed-back” olayları söz konusu olduğunda dinamik kararsızlıklar meydana gelmektedir (Karslı 2000).

Dinamik kararsızlık mekanizmaları herhangi iki fazlı akış sistemlerinde ortaya çıkan “feed-back” olayı ile alakalı meydana gelen gecikme zamanlarındaki artışla açıklanabilir. Akışta olayında bazen dalga hızı ile orantılı olarak artan geçici türbülans olayı sistemde öteki noktalara da ulaşır. Akışkanın giriş hızındaki türbülans ancak belirli bir zaman geçtikten sonra sistem çıkışında hissedilebilir. Sistem boyunca ortaya çıkan bu gecikmeli türbülanslardan sonra oluşan yeni türbülanslı akış başlangıçtaki türbülans noktasına geri dönmeye başlar. Belirli şartlar yerine getirildiğinde bu proses kendiliğinden beslenerek süresiz devam edeceğinden sürekli akış osilasyonları ortaya çıkacaktır. Bu osilasyonların periyotları sistem boyunca tedirgin bir harekete sahip dalgaların geçiş zamanları ile karakterize edilirler (Karşlı 2000).

Dinamik kararsızlıklar 4 temel 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 osilasyonları kinematik dalga yayılım olayları ile alakalı biçimde meydana gelmektedir. İki fazlı akış sistemlerinde akış ortamındaki karışım hızında sıcaklık veya entalpi değerlerinin salınımlı hareketleri sonucunda yine karışımın kinematik dalga hızı ile beraber yoğunluk yada “void fraction” olarak bilinen boşluk oranındaki titreşimli hareketi ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden içerisinde sürekli olarak daha yüksek yada daha düşük yoğunluklara sahip karışım dalgaları akmaktadır. Buharın sıkıştırabilirliği YDO’nun ortaya çıkmasında önemli bir rol oynamaz. YDO’nun ortaya çıkmasında önemli rol oynayan iki temel faktör vardır. Bunlardan ilki farklı yoğunluklara sahip iki bileşenden meydana gelmiş 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

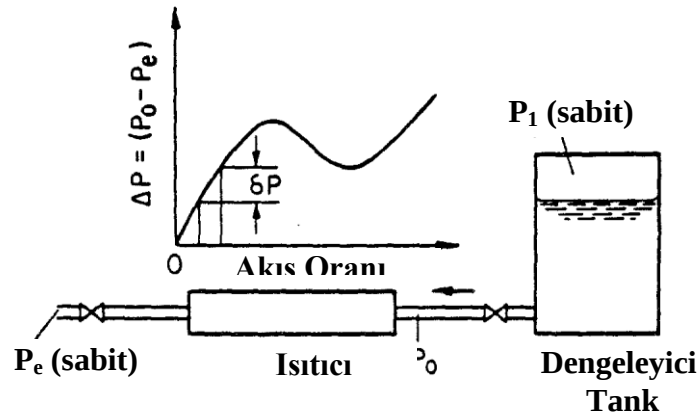
Sıralanan YDO kararsızlıklarından en önde dikkat edilmesi gereken kararsızlıklar çevrim ve paralel kanal kararsızlıklarıdır. Her bir ayrı kanalında sabit basınç şartının olduğu paralel bağlı çok sayıda kanal içeren sistemlerde “paralel-kanal” kararsızlığı meydana gelir.

YDO’nun meydana gelmesinde önemli rol oynayan yukarıda belirtilen parametrelerin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2.9’da şematik olarak gösterilen bir ısıtıcı boru analiz edilmiştir. Şekilde 2.9’da ısıtılan boruyu bir kanal ve akış kısıtlayıcısı takip etmektedir. Kabul olarak ısıtılan boruda üretilen buhar miktarının sabit olduğu ve sistemin sabit bir çıkış basıncında olduğu düşünülmüştür. Basınç düşümü-debi eğrisinin pozitif eğimli bölgesinde kısıtlayıcı boyunca olan basınç düşümü debideki değişimle doğru orantılı bir değişim gösterir, yani azalan debi değeri ile basınç düşümü miktarı da azalır. Basınç düşümü miktarının artması, yüksek yoğunluk değerine sahip olan karışımın kısıtlayıcıya erişmesi ile olur. Sistemin debisi çıkış basıncındaki sabitliğin etkisi ile azalır. Ayrıca düşük yoğunluklu karışım, buhar üretiminin sabit olması şartıyla meydana gelir. Devam eden proseste yüksek yoğunluklu karışım kısıtlayıcıdan geçtikten sonra düşük yoğunluklu karışım kısıtlayıcıya ulaşır ve düşük yoğunluklu karışım kısıtlayıcıdan geçtiği zaman kısıtlayıcı boyunca olan basınç düşümü miktarı düşerek sistemin debisinin artmasına yol açar (Liu 1993).

YDO’nun oluşma biçimi giriş debisinde ani bir azalma olması göz önüne alınarak 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 yaklaşır.

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 Osilasyonları	Yoğunluk Değişimi Osilasyonları	Termal Osilasyonlar
Isıtıcı gücünde artış	Azalır	Azalır	Azalır
Çıkış basınç düşümünde artış	Azalır	Azalır	Azalır
Giriş basınç düşümünde artış	Artar	Artar	Artar

Tablo 2.4 (devam)

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	Azalı	Azalı	Azalı
Isıtılan uzunlukta artış	Azalı	Azalı	Azalı
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 belirlemek için gerekli pompalama gücünü düzenleyen, önemli bir tasarım değişkendir. Basınç düşümü osilasyonlarının oluşmasında etkili olan temel faktör akış ortamında bir sıkıştırılabilir hacmin olmasıdır. Bu tip osilasyonlar sadece test bölümüne karşılık gelen basınç düşümü, debideki artışla azalmaya başladığı sırada meydana gelir ve meydana gelen osilasyonların periyotları sistemde mevcut 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.

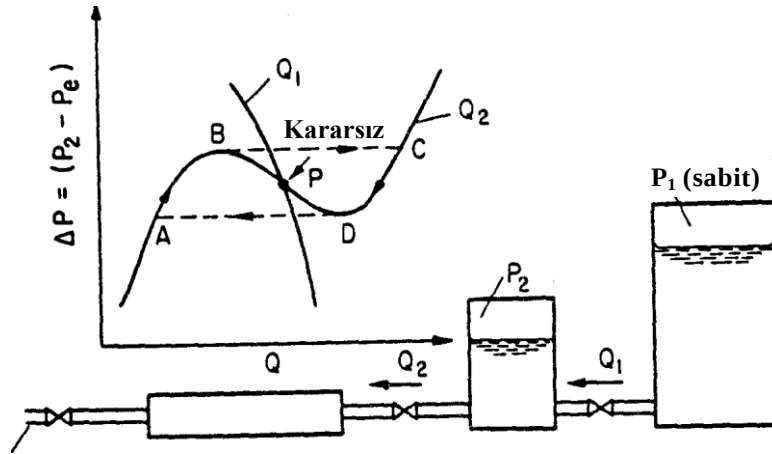
- Homojen Modeli
- Ayrık Akış Modeli
- Olgusal Modeller

Sıkıştırılabilir hacim, bir dengeleyici tank kullanılarak ısıtılan kanalın dış tarafında olabildiği gibi, uzun test bölümlerinin ($L/d > 150$) iç sıkıştırılabilirliği ile de sağlanabilir. Eğer test kısmı çok uzunsa, buradaki iç sıkıştırılabilirlik BDO tip osilasyonlarının oluşmasına yeterli olabilir. Fakat 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 ilgili bir sabit 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:

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

$$P_s - P_c = f \dot{m}_2^2 \quad (2.10)$$

Burada P_a ve P_c 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 2.7'den de görülebileceği gibi sabit P_a ve P_c 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 $d(P_s - P_c)/d\dot{m}_2 < 0$ 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 ulaşmaya 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 $ABCD$ A limit çevrimi boyunca tekrarlanır. Bu model BDO tipi osilasyonları genel olarak açıklar ve bu osilasyonların periyotlarının belirlenmesinde iyi sonuçlar verir (Karlı 2000).

2.3.2.c. Termal osilasyonlar

Bu tip osilasyonların sıvı filmindeki kararsızlıkla ilgili olarak ortaya çıktığı 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 meydana gelmektedir. YDO, termal osilasyonların ortaya çıkması için gereklidir. Bu tip osilasyonlar çok nadir olarak görülen bir akış kombinasyonuna ve termal karakteristiklere sahiptirler. Termal osilasyonlar proseste çok zararlı etkilere sebebiyet vermektedir. Basınç varyasyonları ile beraber oluşan sıcaklık varyasyonlarının da 300°C ' yi aştığı tespit edilmiştir. Yukarıda temel oluşum mekanizmaları detaylı olarak verilen iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarına etki eden temel parametreler aşağıda sıralanmıştır (Karslı 2000).

- Kanal Geometrisi
- Çalışma Şartları
- Sınır Şartları

YDO, BDO ve akustik tip osilasyonlar dinamik iki fazlı akış kararsızlıklarının en yaygın olan tipleridir. Bununla birlikte iki fazlı akış sistemleri ile ilgili daha birçok akış kararsızlıkları vardır. Bunlardan bir tanesi Stenning and Veziroğlu (1965) / Veziroğlu and Kakaç (1980) tarafından tanımlanan termal osilasyonlardır. Termal osilasyonlar bileşik dinamik kararsızlıklardır ve sıvı filminin kararsızlığı ile ilgilidir. Isıtıcı cidar sıcaklığında büyük sıcaklık dalgalanmaları oluştururlar. Belirli bir noktada akış, film kaynaması ile geçiş kaynaması arasında osilasyon yapar ve böylece büyük genlikli termal osilasyonlar meydana gelir (Ding 1993). Termal osilasyonlarını başlatmak için YDO tipi osilasyonlar gereklidir. İki fazlı akış sistemlerinde termal osilasyonlar çeşitli nedenlerle istenmezler (Karagöz 2007):

- Elemanların zorlanmış mekanik titreşimine neden olabilirler.
- Yerel ısı transfer karakteristiklerini etkileyebilirler ve kaynama krizi oluşturabilirler.
- Cidar sıcaklığının sürekli çevriminin neden olduğu ısıl yorulma oluşturabilirler.

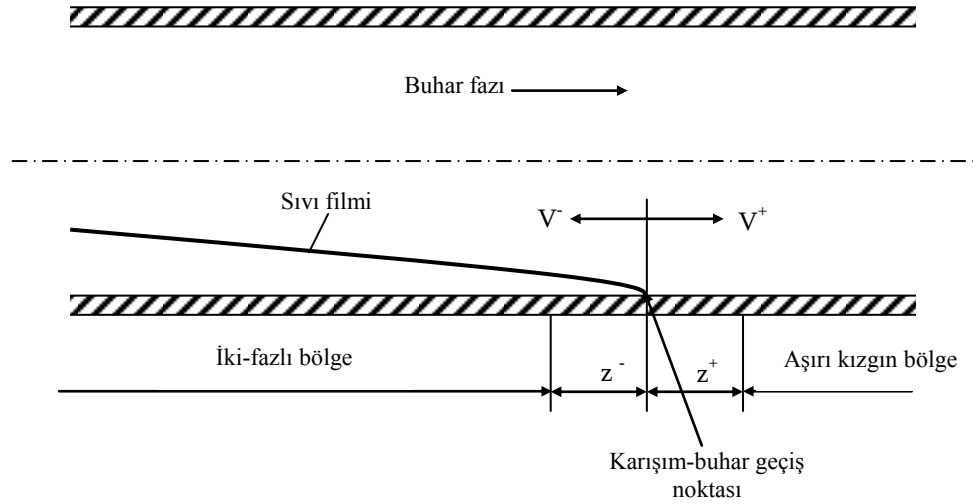
- Sistemde kontrol problemlerine ve cidar sıcaklık artışının neden olduğu boru arızasına yol açabilirler.

Bu nedenlerle termal kararsızlıkları önleme veya kontrol etme amacıyla etkin yöntemler geliştirme iki fazlı akış içeren çoğu endüstriyel sistemlerin dizaynı ve çalışması için büyük önem arz etmektedir.

Termal osilasyonlar genel olarak iki türlü tanımlanmaktadır:

1. Diğer osilasyonlar ile birlikte 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 esnasında alt cidar daima bir sıvı tabakası tarafından ıslatılmaktadır. Bu, kütleli debi alt cidar boyunca kanalın tümünün sıvı fazıyla temas etmesini sağlayacak kadar yeterli olduğundan kanalın içerisinde akışkanın tümüyle buharlaşmadığı anlamına gelir. Ancak debi çok küçük değerlere düştüğünde, 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 adlandırılır. 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 yaptığından karışım buhar geçiş noktası osilasyon yapar ve böylece büyük genlikli osilasyonlar üretir. Bu osilasyonlar kuruma ve ıslanmanın sonucudur ve sıvı filminin kararsızlığı ile ilişkilidir. Bunlar boru cidar sıcaklıklarında büyük sıcaklık çalkantılarına neden olurlar. Alt cidarda sıcaklığın büyük genliklerle osilasyon yapması ile kendini gösteren bu osilasyon tipine “termal osilasyonlar” adı verilmektedir. Alt cidarda oluşan bu termal osilasyonların nedeni, akışın belli bir noktada düzensiz olarak geçiş kaynaması ile film kaynaması arasında değişim göstermesinden ve karışım-buhar geçiş noktasının rastgele hareketinden kaynaklanmaktadır. Geçici noktanın bu düzensiz hareketi termal osilasyonların

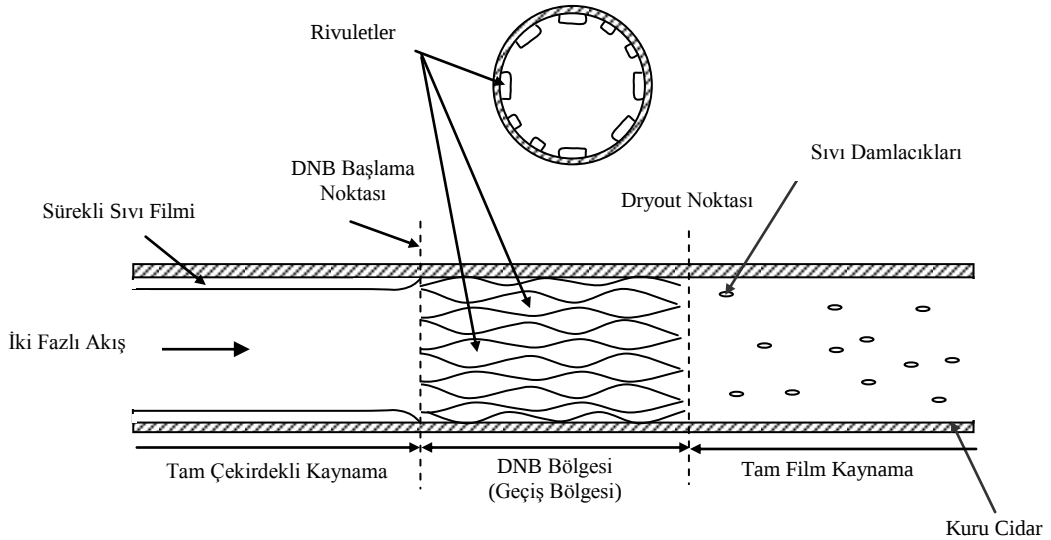
oluşmasında başlıca rolü oynamaktadır. Bunun sonucu olarak sabit ısı akıllı sistemlerde cidar sıcaklığı büyük genliklerle osilasyon yapmaktadır. Buna göre aşırı ısınmış bölgede (tam burn-out olayının gerçekleştiği bölge) ve iki-fazlı akış bölgesinde (alt cidar ıslak) termal osilasyon oluşmaz. Widmann (1993) tarafından belirtildiği gibi termal osilasyonlar 3.4-6.8 bar basınç genliğine ve 300°C kadar sıcaklık değişimine neden olabilirler. Özellikle alt cidarda büyük genlikli titreşimlerle kendini gösteren bu tip osilasyonlar burn-out olayına neden olarak boru cidarlarında termal gerilmelerin oluşmasına ve bunun sonucunda boru cidarlarında deformasyonlara sebep olmaktadır (Karagöz 2007).



Şekil 2.11. Termal osilasyonların mekanizması (Karagöz 2007)

Yatay borularda karışım-buhar geçiş noktasının osilasyon hareketi çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneysel ve/veya teorik çalışmalarda gözlemlenmiştir. Araştırmacılar bağımsız termal osilasyonları çeşitli şekillerde açıklamışlardır. Wedekind (1971) yatay buharlaşan akışta geçiş noktasının zamana bağlı hareketinin fotoğrafını kaydeden bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntem kullanılarak boruda en son sıvının buharlaştığı noktanın yeri saptanmıştır. Sürekli akış koşullarında karışım-buhar geçiş noktasının hareketinin osilasyonlu bir karaktere sahip olduğunu gözlemlemiştir. Geçiş noktasının osilasyonlarına halkasal akış rejiminde sıvı halka boyunca yayılan sıvı dalgalarının neden olduğunu ve kızgın buhar bölgesine erişen dalgaların ısıtıp, kuruttuğunu ifade etmiştir. Wedekind and Stoecker (1966) plaj yüzeyine gelen göl yüzey dalgalarının

geçiş noktası osilasyonlarıyla ilişkili dalgalara benzediğini söylemişlerdir. Chu *et al.* (1978) evaporatör boruları için DNB osilasyon sıcaklığını ve ısıl gerilmesini karakterize etmek için kullanılacak bir ıslak termal model (rivulet thermal model) önermişlerdir (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 ıslatırlar. Sıvı parçacıkları buharlaştıktan sonra cidar sıvı damlacıkları içeren buharla kaplanır. Boru cidar yüzeyleri üzerinde sıvı parçacıklarının görünmesi ve kaybolması su parçacıklarının oluşumunun yapısındaki rastgelelik nedeniyle cidar ve kuru cidar arasında osilasyonlara neden olabilir. Bu durum boru cidar sıcaklığının osilasyon yapmasına neden olur.



Şekil 2.12. Geçiş kaynama modeli (Karagöz 2007)

2.3.2.d. Akustik osilasyonlar

Akustik osilasyonlar iki fazlı karışımın sonik hızında hareket eden basınç çalkantılarıdır. Akustik osilasyonlar uygun geometrik karakteristikler ve sonik hız birleşimine sahip iki fazlı sistemlerde 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 ulaştığında akustik impedansta oluşan değişim ters kutuplu bir basınç dalgasının zıt yönde yayılmasına neden olur. Uyarım frekansı ve devrenin geometrisi uygun koşullarda akustik osilasyonları oluşturabilir. 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; fakat 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 şöyle özetlenebilir:

1. İki fazlı akışta akustik dalgalar büyür.
2. Aşırı soğutulmuş akıştaki kaynama, CHF'den daha düşük ısı akıllarında 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 Düzeneği

Bu çalışmada deneyler; Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında yaklaşık 15 yıl önce R-11 akışkanını için kurulan daha sonra akışkan olarak su kullanılabilmesi için modifiye edilen, iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarından basınç düşümü, yoğunluk değişimi ve termal osilasyonları üretebilecek bir deney düzeneğinde yapılmıştır. Bu araştırmada yatay borulardaki iki fazlı kararlı ve kararsız akış karakteristiklerine; giriş aşırı soğutmasının, ısı akısının, akış debisinin, sıkıştırılabilir hacmin ve boru kanalı içerisine yerleştirilen farklı geometrilere sahip yüzey artırma elemanlarının etkileri incelenmektedir. Materyal ve yöntem açısından deney düzeneği sistemin akışkan olarak su kullanılması için modifiye edilmesi durumundan sonra bir değişikliğe uğramamış ve Karagöz (2007) tarafından düzenlendiği gibi bu çalışmaya da uygulanmıştır.

Şekil 3.1. de görüldüğu gibi deney düzeneği;

- Akışkan besleme bölümü,
- Test bölümü
- Akışkan depolama bölümü

olmak üzere üç temel bölümden oluşmaktadır.

3.1.1. Akışkan Besleme Bölümü

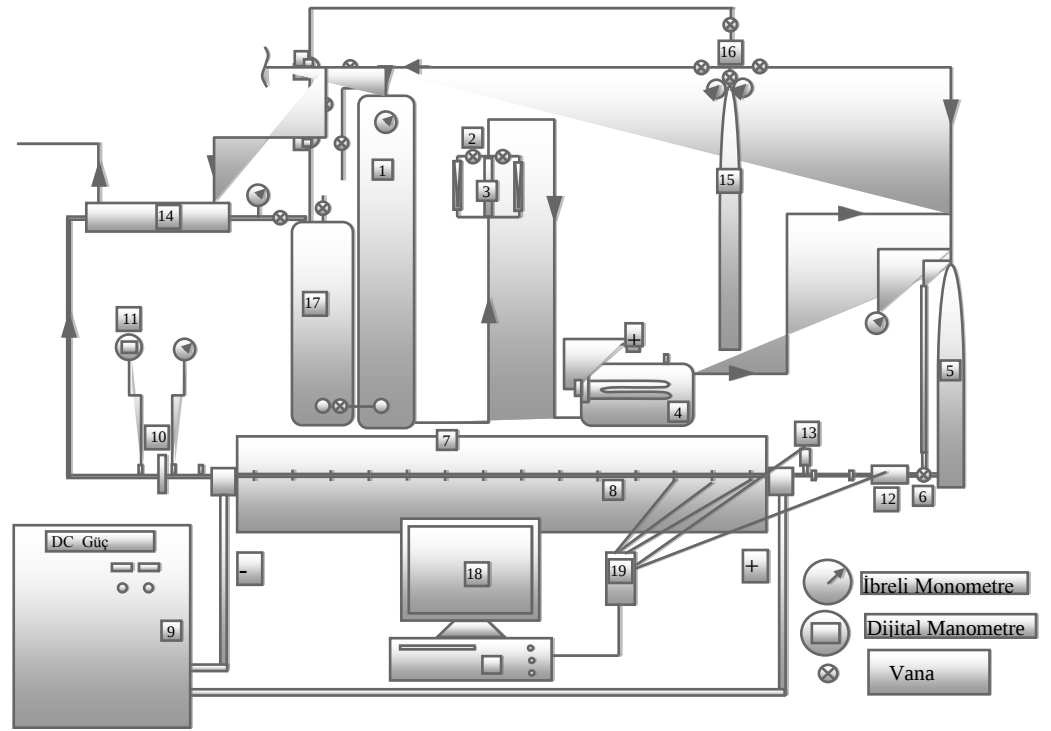
Akışkan besleme bölümü;

- Ana besleme tankı
- Debi ayar vanası
- İki adet flowmetre
- Elektrikli ısıtıcıdan

oluşmaktadır. Akışkan besleme bölümü iş yapan akışkan olan suyun test borusuna giriş koşullarına getirilmesini sağlamaktadır.

Ana Besleme Tankı: Ana besleme tankı deneyler süresince kullanılabilecek yeterli miktarda su depolamaktadır. Bu tank 3m yüksekliğinde ve 0.7 m³ hacminde dikey pozisyonda yerleştirilmiş olan silindirik bir tanktır (Şekil 3.2). Tank paslanmaz çelikten yapılmış olup 50 bar işletme basıncına mukavemet edecek şekilde imal edilmiştir.

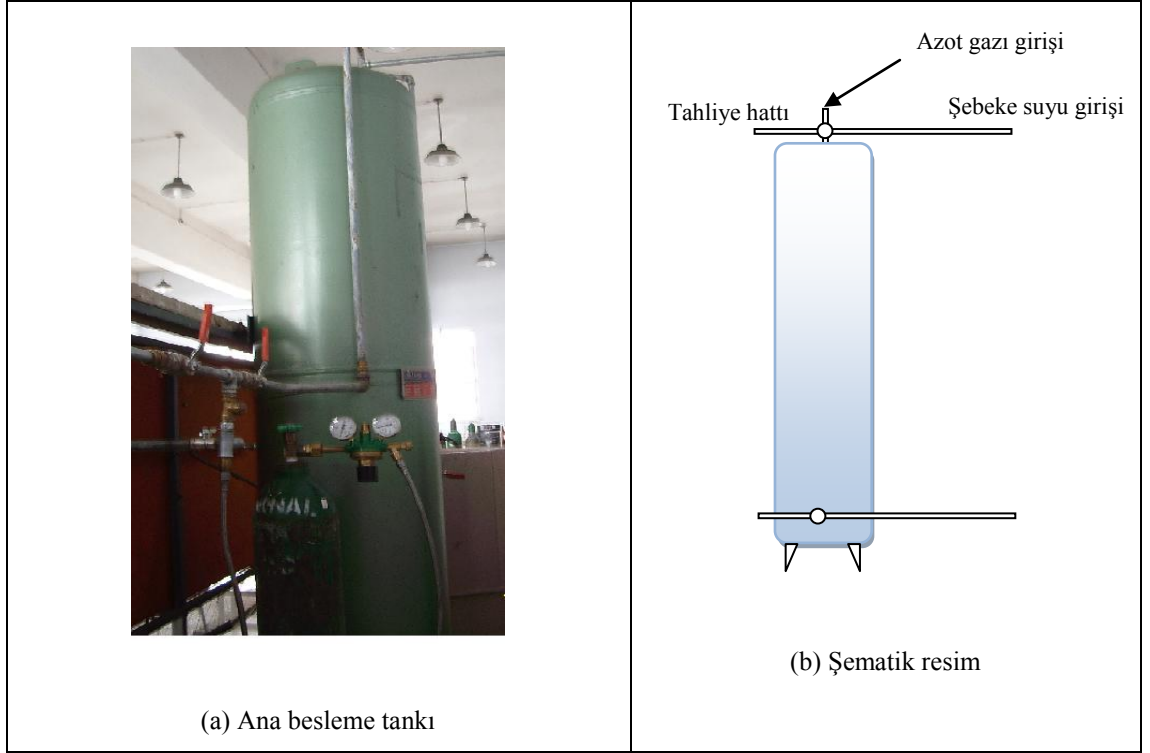
Flowmetreler: Debi ayarı üzerinde bulunan kontrol vanası yardımı ile yapılan, sistemde akışkanın debisini ölçmek ve ayarlamak için iki adet flowmetre kullanılmıştır. Ölçülen debi aralıkları iki ayrı flowmetre için birinci flowmetrenin 0-400 l/h, ikinci flowmetrenin ise 0-1000 l/h arasındadır. Birinci flowmetrenin debi aralığı diğer tipe göre daha düşük debi aralığına sahip olduğu için daha hassas ölçme gerektiren durumlarda kullanılarak ölçüm ve ayar yapılmıştır. Sistemde kullanılan her iki tip flowmetrenin maksimum çalışma basıncı 40 bar, maksimum çalışma sıcaklığı 100 °C ve çelik malzemeden yapılmışlardır.



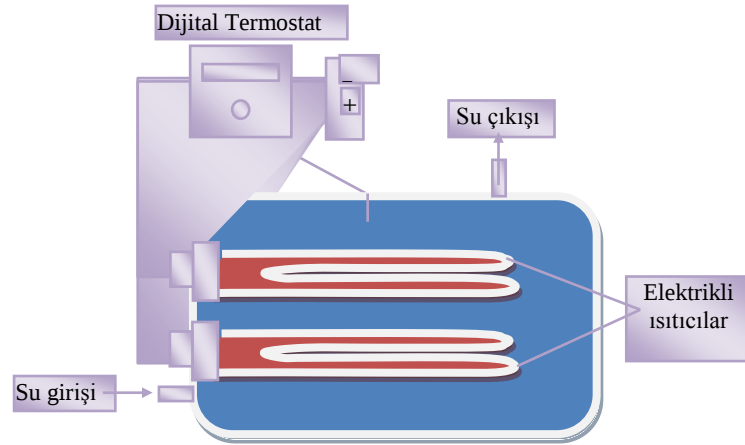
Akışkan Besleme Bölümü	Test Bölümü	Akışkan Çıkış Bölümü
1- Ana besleme tankı	5- Dengeleyici tank	14- Yoğuşturucu
2- Debi ayar vanası	6- Akışkan giriş kontrol vanası	15- Azot tankı
3- Flowmetre (iki adet)	7- Test odası	16- Regülatör
4- Isıtıcı	8- Test borusu	17- Akışkan depolama tankı
	9- DC güç kaynağı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

Şekil 3.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Karagöz 2007)

Elektrikli Isıtıcı: Giriş aşırı soğutma seviyesi iki fazlı akış deneyleri açısından oldukça önemlidir. Bu yüzden sisteme gönderilen akışkanın sıcaklığını test bölümüne istenilen sıcaklıkta gönderme işini elektrikli ısıtıcı sağlamaktadır. Dikişli siyah borudan yatay şekilde imal edilen elektrikli ısıtıcının dış gövdesi 0.35m çapına ve 0.6m uzunluğa sahiptir. Şekil 3.3.'te görüldüğü gibi dış gövde içerisinde iki adet her biri 4 kW değerinde ısıtıcı yer almaktadır. Bu ısıtıcılar akışkanın sisteme belirlenen değerde girmesi için dijital termostat ile kontrol edilmiştir.



Şekil 3.2. Ana Besleme Tankı



Şekil 3.3. Suyun test borusuna sabit sıcaklıkta girmesini sağlayan düzenek

3.1.2. Test Bölümü

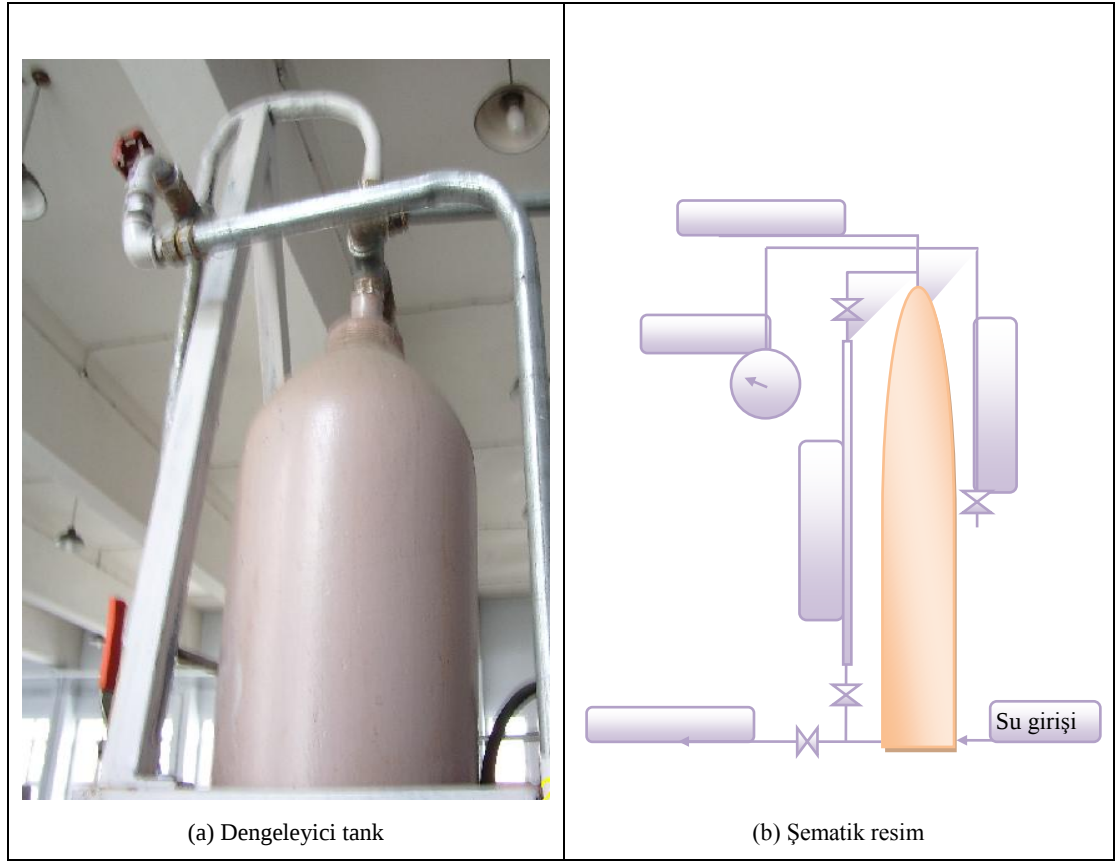
Test bölümü;

- 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 9 adet elemandan oluşmaktadır.

Dengeleyici tank: Sistemde test borusunun uzunluğu eğer yeterli uzunluğa sahip değilse sıkıştırılabilir hacim için bir dengeleyici tank kullanılır. Deney sisteminde bu görevi yapmak üzere 0.05 m^3 hacminde bir dengeleyici tank kullanılmıştır. Ayrıca Şekil 3.4.'de görüldüğü gibi dengeleyici tanka, iş yapan akışkan ve sıkıştırılabilir hacim seviyelerinde oluşacak değişimlerin gözlenebilmesi için 30 bar basınca dayanıklı ve şeffaf plastik malzemeden yapılmış seviye göstergesi eklenmiş ve dengeleyici tank basıncını gösteren bir manometre monte edilmiştir.

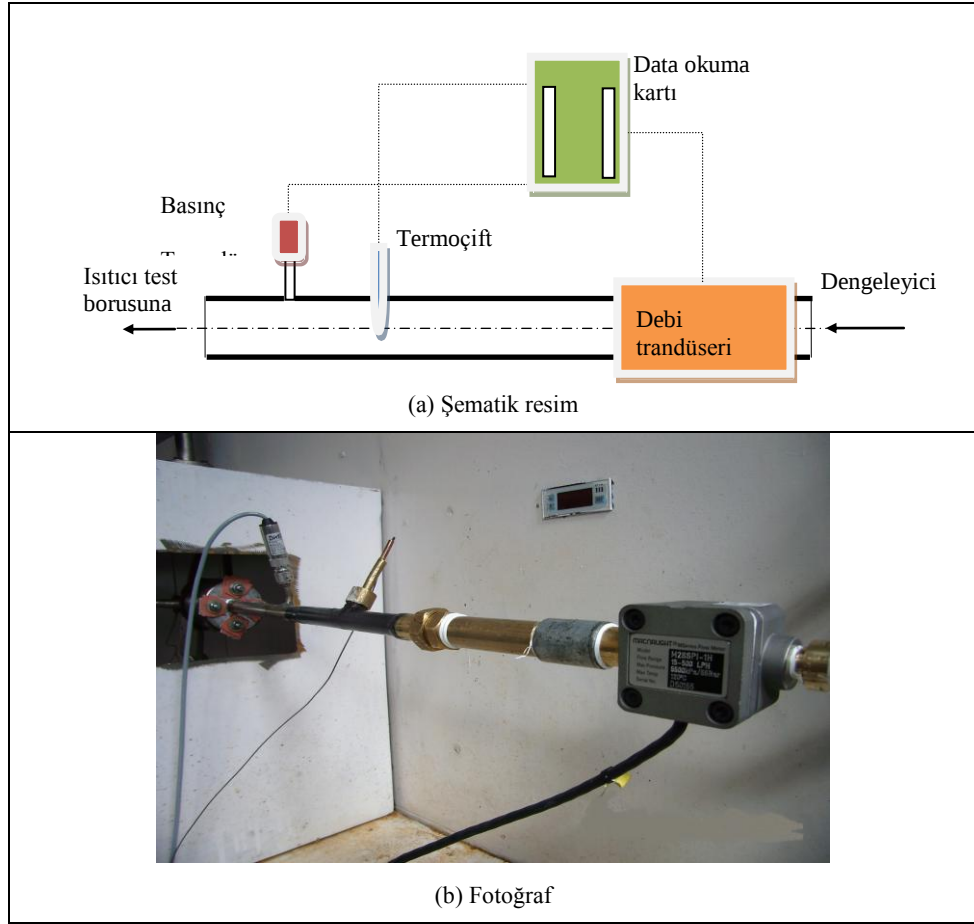
Dengeleyici Tank ile Test Borusu Arasındaki Bölüm: Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi türbin tipi debi ölçer, Bourdon tipi manometre, basınç transdüseri ve sıcaklık ölçüm elemanı dengeleyici tank ile test borusu arasına yerleştirilmiştir. Su debisinde oluşan dalgalanmaları Türbin tipi debi ölçer, test borusu girişinde ki su basıncını Bourdon tipi manometre ve test borusu giriş kısmında oluşan akışkan basınç dalgalanmalarını da basınç transdüseri ölçmüştür. İş yapan akışkanın sıcaklığı sisteme girmeden önce T tipi termoeleman ile belirlenmiş ve deneysel çalışmalarda kullanılan kütleli debi aralığı 25 – 140 g/s arasında değişmiştir.



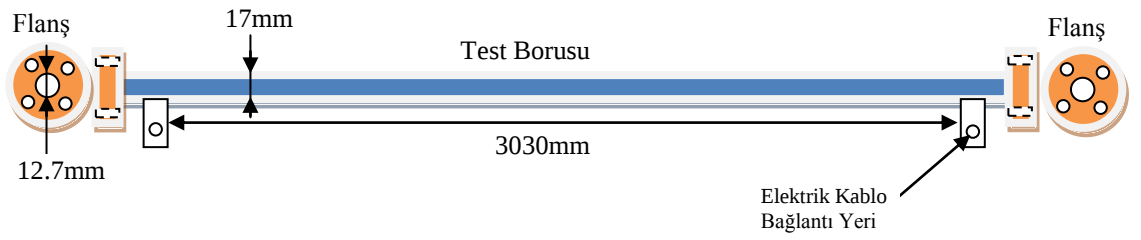
Şekil 3.4. Dengeleyici Tank

DC Güç Kaynağı: Şekil 3.9’da görüldüğü gibi sisteme verilmesi gereken ısı gücü, test borusunun her iki ucuna DC güç kaynağının pozitif (+) ve negatif (-) uçları bağlanarak sağlanmıştır. Test borusuna bağlanan bu uçlar sistemin her noktasına elektriksel olarak dağılım yapmasın diye yüksek sıcaklığa dayanıklı klindirlik conta kullanılarak vida bağlantılarına porselen halka geçirilmiştir. DC güç kaynağının üzerinde bulunan dijital volt ve akım göstergelerinden ısıtıcı test borusuna verilen ısı gücü değerleri okunmuştur. Deney sisteminde kullanılan DC güç kaynağı yaklaşık 40 kW’lık güce sahiptir.

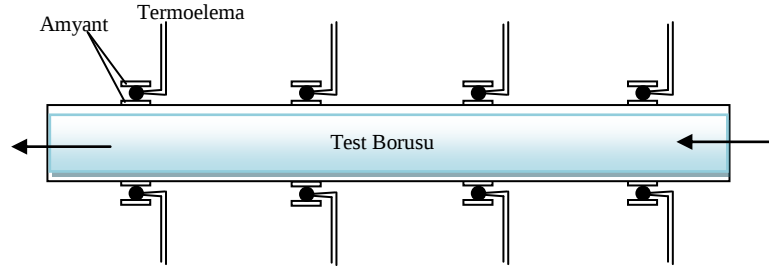
Orifis: Şekil 3.10.’da görüldüğü gibi akış osilasyonları üzerine çıkış kısıtlayıcısının etkilerini belirlemek ve istenen basınç düşümünü sağlamak amacıyla test borusu çıkışına bir orifis levhası monte edilmiştir. Orifis levhasının giriş tarafındaki basınç Bourdon-tipi manometre, çıkış tarafındaki basınç ise Bourdon-tipi dijital manometre ile ölçülmüştür.



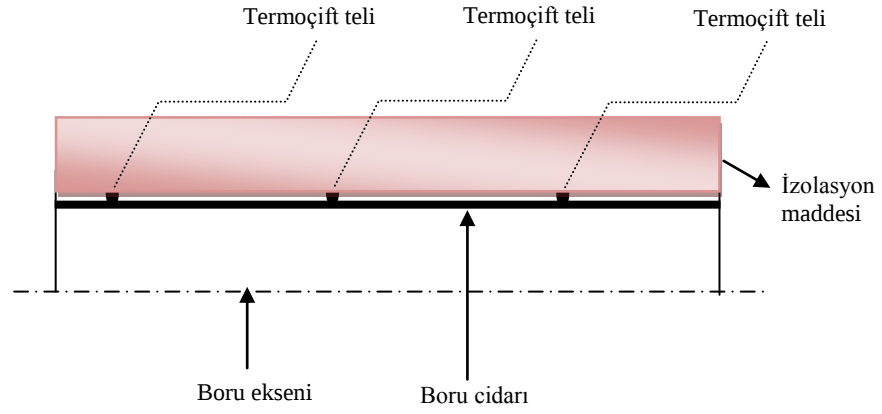
Şekil 3.5. Deney düzeneğinin dengeleyici tank ile test borusu arasındaki kısmı



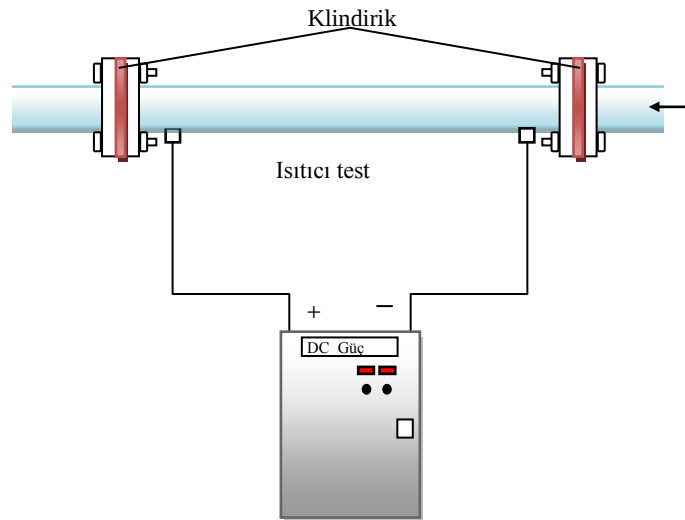
Şekil 3.6. Test Borusu ve Bağlantı Flanşları



Şekil 3.7. Termoeleman bağlantı şekilleri



Şekil 3.8. Test borusu izolasyon tabakasının ve termoeleman uçlarının şematik gösterimi



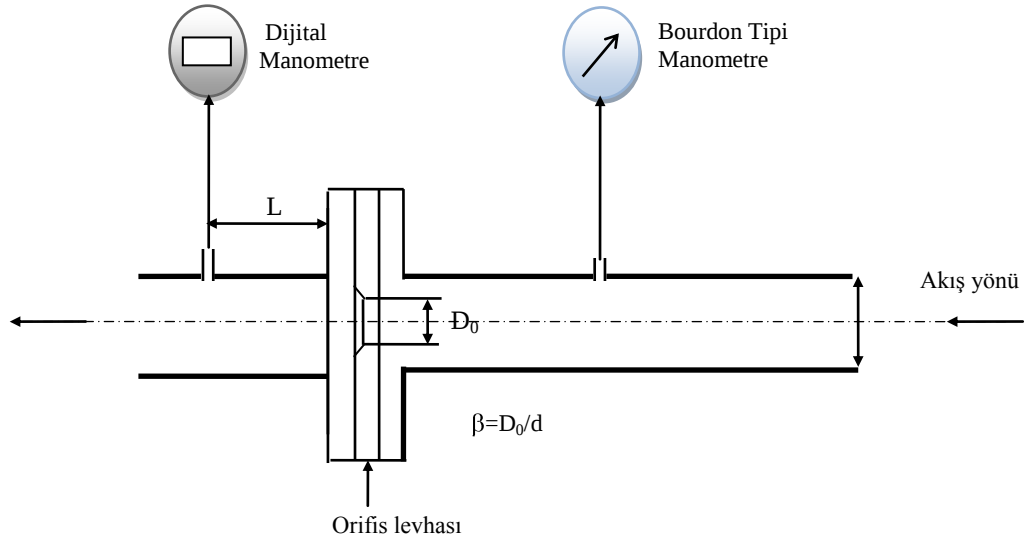
Şekil 3.9. Test borusu elektriksel bağlantısı

3.1.3. Akışkan Depolama Bölümü

Akışkan depolama bölümü;

- yoğuşturucu (14),
- azot tankı (15),
- regülatör (16)
- akışkan depolama tankı (17)

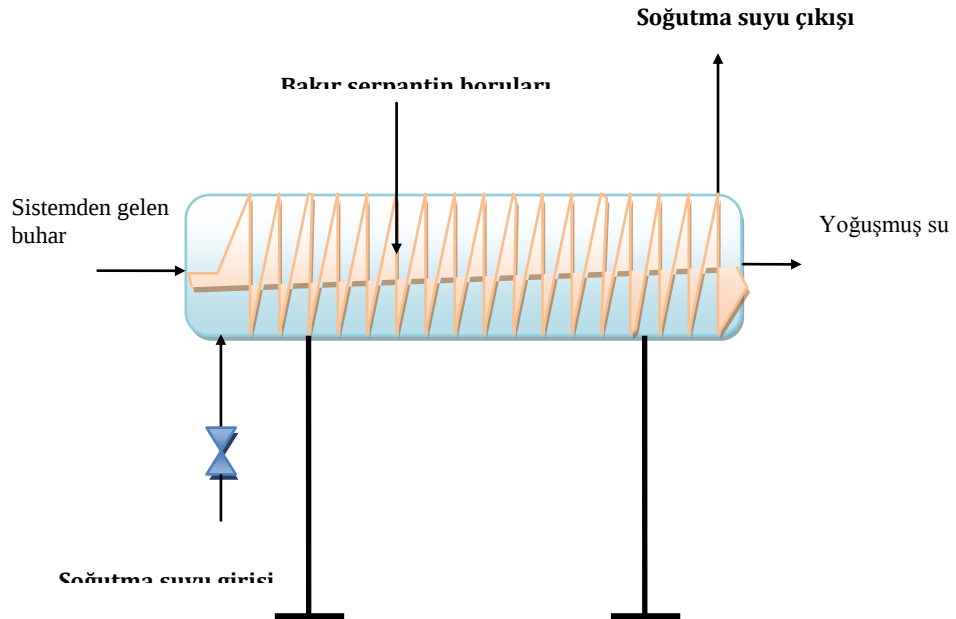
olmak üzere dört elemandan oluşmaktadır. İş yapan akışkanın test bölümünden sonra geldiği yer depolama bölümüdür. Bu bölümde, test borusundan genellikle buhar fazında çıkan su deneysel çalışma başlangıç şartlarına getirilmek amacıyla soğutulur ve depolamasını sağlar. Test bölümü çıkışında hemen hemen tamamı buhar fazında olan iş yapan akışkan su soğutmalı yoğusturucudan geçirilerek yoğusturulur. Yoğusturulan su sıvı fazda depolama tankına sevk edilir. Bu tankta depolanan su azot gazı yardımıyla tekrar basınçlandırılarak ana besleme tankına sevk edilir. Bundan sonra iş yapan akışkan olan suyun sistemdeki çevrimsel sirkülasyonu aynı şekilde tekrarlanarak devam eder.



Şekil 3.10. Çıkış kısıtlayıcısının şematik gösterimi

Yoğuşturucu: Yatay gövde-boru tipe sahip yoğuşturucu akışkanı buhar fazından sıvı fazına geçirmek için kullanılan bir ısı değıştiricidir. Dikişli siyah boru malzemesinden imal edilmiş yoğuşturucunun dış gövdesi 0.16 m çap ve 1.45 m uzunluğundadır. Şekil 3.11.'de görüldüğü gibi test bölümü çıkışında istenilen sıvı fazını sağlamak amacıyla yoğuşturucu içerisindeki 0.02m çapa sahip bakır borunun dışından soğutma suyu ve spiral olarak yerleştirilen bakır borunun içerisinde ise iş yapan akışkan geçirilmektedir.

Depolama Tankı: Depolama tankına yoğuşturucuda sıvı hale gelen akışkan gönderilir. Normal düz siyah sac malzemesinden silindirik olarak imal edilen ve dikey pozisyonda yerleştirilen depolama tankı 0.75 m çapında, 1.75 m boyunda ve 1 cm cidar kalınlığına sahiptir. Depolama tankındaki su ana besleme tankına yüksek basınçlı azot gazı yardımıyla sevk edilmektedir.



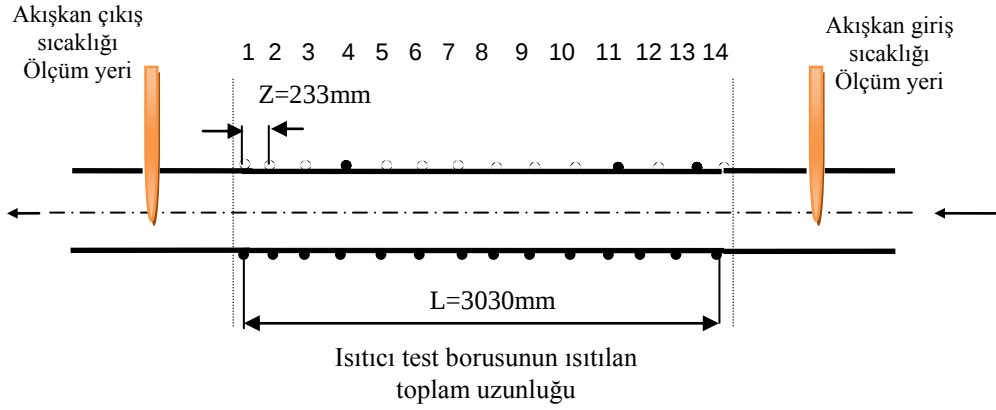
Şekil 3.11. Yoğuşturucu

3.2. Ölçümler ve Belirsizlik Analizi

3.2.1. Sıcaklık ölçümleri

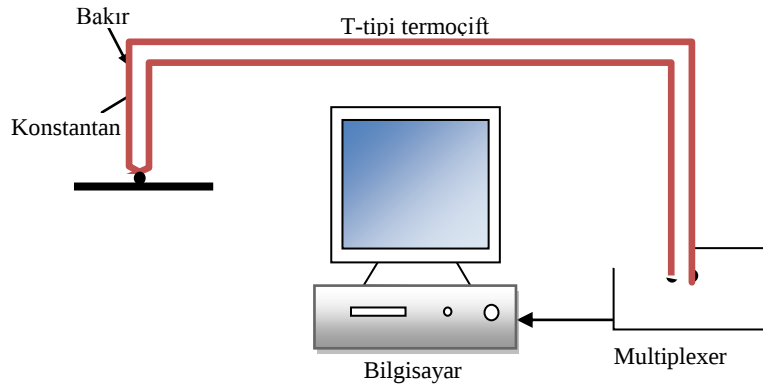
Deney düzeneğinde toplam 30 ölçüm yerinde 0.25mm çapında T tipi bakır-konstantan termocuiftleri kullanılarak sıcaklıklar ölçülmüştür. Bu termoelemanlar vasıtasıyla alınan sıcaklık okuma hatası $\pm \% 0.5^{\circ}\text{C}$ civarındadır. Akışkanın test borusuna giriş ve çıkıştaki sıcaklıklarının ölçümü için 5mm çapında bir ucu kapalı ince bakır boru içerisine yerleştirilen termoelemanlar kullanılmış ve bakır boru test borusunun giriş ve çıkışında boru içerisine daldırılarak sıcaklıklar ölçülmüştür. İki fazlı akış rejimlerini ve akış osilasyonlarını belirlemek amacıyla kullanılan termocuiftler ise termoeleman uçlarının test borusu cidarının dış yüzeyine tespit edilmesi yoluyla ölçülmüştür.

Test borusu yüzey sıcaklıkları eşit aralıklarla 14 tanesi üst cidar boyunca diğer 14 tanesi de alt cidar boyunca olmak üzere toplam 28 termoeleman çifti kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.12). Test borusu direkt olarak elektrikle ısıtıldığından elektriksel gürültü etkisini ortadan kaldırmak amacıyla termoeleman çiftlerinin uçları elektriksel olarak yalıtkan fakat termal iletkenliği iyi olan amiyant levhalar arasına yerleştirilmiştir. Termoelemanlar ve basınç/debi transdüserlerinden alınan sinyallerin okunabilmesi ve değerlendirilmesi amacıyla analog/dijital Advantec Data Okuma kartı kullanılmıştır. Şekil 3.13 termocuiftlerin data okuma kartına bağlantısını şematik olarak göstermektedir. Termoelemanların bakır ucu kartta bulunan herhangi bir kanalın pozitif ucuna, konstantan ucu ise negatif ucuna bağlanmıştır. Saniyede 100 adet örnekleme yapabilme yeteneğine 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).



$$\bar{Z} = \frac{\bar{z}}{L} = \frac{233 \text{ mm}}{3030 \text{ mm}} = 0.0769$$

Şekil 3.12. Test borusu cidar sıcaklığı ölçüm noktaları



Şekil 3.13. Termoçiftlerin data okuma kartına bağlantısının şematik gösterimi

3.2.2. Basınç ölçümleri

Deneysel sistemde ölçülen basınçlar; ana tank, dengeleyici tank, azot tankı, test borusu girişi ve orifisten önce ve orifisten sonraki basınçlardır. 0-100 bar arasındaki basınçları okuyabilen Bourdon tipi manometre yardımıyla ana tank, dengeleyici tank, azot tankı ve orifisin girişindeki basınçlar ölçülmüştür. Analog manometrelerde okunan basınç değerlerindeki toplam hata oranı $\pm\%0.1$ bar seviyesindedir. Orifisin çıkışındaki basınç

ise dijital bir manometre kullanılarak ölçülmüştür. Skala üzerinde 0.5 bar'lık basınç okunabilmektedir. Basınç transdüseri, test borusu girişinde giriş basıncını ve giriş basıncında oluşacak osilasyonları ölçmek amacıyla kullanılmıştır. Şekil 3.5.'de görüldüğü gibi 4-20 mA seviyesinde basınç transdüserinden alınan analog sinyaller data okuma kartıyla işlenmiştir. Bu alınan datalardaki toplam hata oranı $\pm\%0.1$ seviyesindedir.

3.2.3. Debi ölçümleri

Osilasyon sınırları ve kararlılık sınırlarının belirlenmesinde kullanılan kütleli debi akış rejimleri oldukça hassas bir şekilde belirlenmelidir. Debi ayarı üzerinde bulunan kontrol vanası yardımı ile yapılan, sistemde akışkanın debisini ölçmek ve ayarlamak için iki adet flowmetre kullanılmıştır. Ölçülen debi aralıkları iki ayrı flowmetre için sırasıyla birinci flowmetrede 0-400 l/h, ikinci flowmetrede 0-1000 l/h arasındadır. Bu flowmetreler kullanılarak bulunan kütleli debi değerlerindeki toplam hata oranı $\pm\%0.4$ civarındadır. Deneysel çalışmalar boyunca kullanılan maksimum ve minimum debi değerleri 25–140 g/s arasında değişmiştir. Şekil 3.5'de verilen sistemde dengeleyici tank ile test borusu arasına monte edilen ve oluşan debi osilasyonlarını ölçmek amacıyla kullanılan türbin tipi debi ölçerin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Debi ölçerden alınan veri okumalarındaki toplam hata oranı $\pm\%0.05$ '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 güç değeri DC güç kaynağının üzerinde bulunan ayar düğmesiyle yapılmış ve ısı gücü değerleri DC güç kaynağının üzerinde bulunan dijital volt ve akım göstergelerinden okunmuştur. Deney sisteminde kullanılan DC güç kaynağı yaklaşık 40 kW güç kapasitesindedir. Yapılan hata analizi sonucu elektriksel güç değerlerinin ölçülmesinde ortaya çıkan toplam hata oranının $\pm \% 0.2$ düzeyinde olduğu bulunmuştur.

3.2.5. Osilasyon periyotlarının tesbiti

Oluşan osilasyonların periyotlarının tesbiti Hızlı Fourier Dönüşümü metodu ile yapılmıştır.

Bu dönüşüm, zaman uzayında gözlenen bir olayın Fourier Dönüşümü olayın 1/zaman, yani frekans uzayında gözlemlenmesini sağlar. Bütün uzayda tanımlı bir $f(t)$ fonksiyonunun w uzayında Fourier Dönüşümü;

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

Fourier Dönüşümü matematik işlemlerin çeşitli çözümlerinde analitik olarak kullanılmaktadır. Fakat 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 gerekir. Sayısal Fourier Dönüşümü analitik dönüşümün tüm özelliklerini sağlar. Fourier Dönüşümü tanımlarından hareketle;

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

Sayısal Fourier Dönüşümü için veri sayısında bir sınırlama yoktur. Fourier Dönüşümünde dönüşüm periyodik olan $\sin\alpha$ ve $\cos\theta$ fonksiyonlarıyla da yapılıyorsa da her hangi bir veri sayısı (N) için periyodik dağılımı bulmak zordur. Eğer veri sayısı ikinin katları ise, tam, yarım ve çeyrek periyotlarda $\sin\alpha$ ve $\cos\theta$ fonksiyonlarının işaret değiştirerek aynı değerleri tekrarladığı dikkate alınırsa daha az işlemle dönüşüm yapılabileceği gerçeğinden yola çıkılarak hızlı sayısal Fourier Dönüşüm algoritmaları geliştirilmiştir. Çalışmalarımızda Matlab'da kullanılan hazır hızlı Fourier Dönüşümü fonksiyonu kullanılmıştır (Karagöz 2007)(EK1).

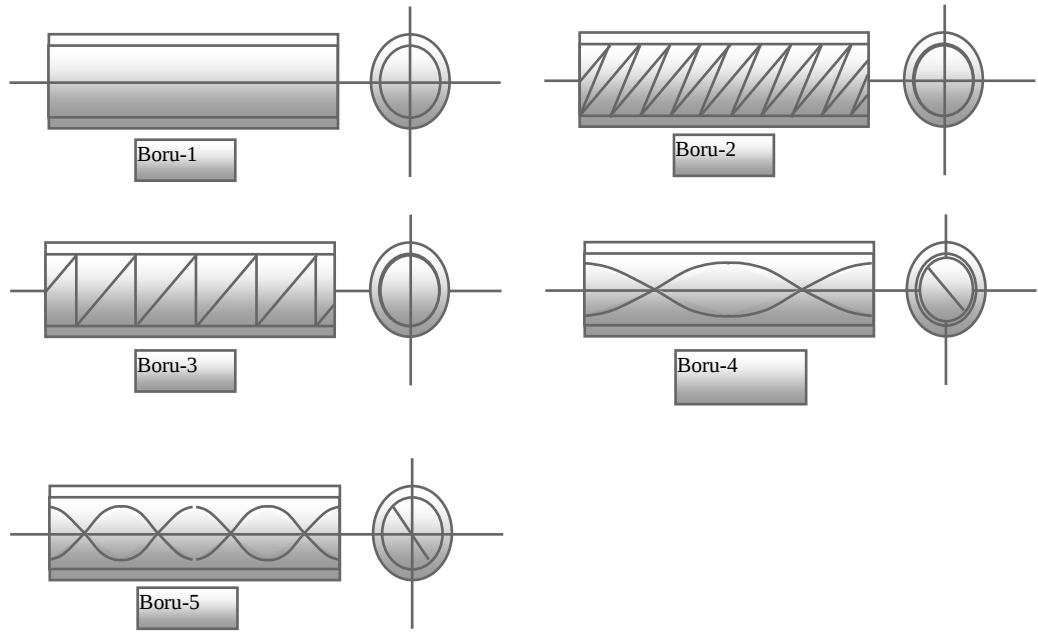
3.3. Deneysel Yöntem

Deneysel çalışmalar kararlı deneyler ve kararsız deneyler olmak üzere iki kategoride yapılmıştır. Kararlı deneylerde kararlı durum karakteristikleri belirlenmiş, kararsız deneylerde ise iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları araştırılmıştır. Sabit ısı gücü, giriş aşırı soğutmasının kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisini belirlemek amacıyla 15, 25 ve 35°C olmak üzere üç farklı akışkan giriş sıcaklığında ve 5 farklı boru tipinde, sabit çıkış orifis çapında deneyler yapılmıştır. Şekil 3.14'de bu ısı transfer yüzeyleri ve karakteristikleri verilmiştir. Şekil 3.15. ısı transfer iyileştirme elemanlarının fotoğrafını göstermektedir. Boru-1 içerisinde yüzey artırma elemanı olmayan yalın boru, Boru-2 ve Boru-3 farklı adımlara sahip yay elemanları içeren borular, Boru-4 ve Boru-5 ise içerisinde farklı adımlara sahip bükülmüş şerit içeren borulardır.

Şekil 3.14'de de gösterildiği gibi ısı transfer yüzeyleri efektif çapla karakterize edilmektedir. Efektif çap aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d_e = \sqrt{\frac{4V'}{\pi L}} \quad (3.1)$$

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



Boru İsmi	Borunun Karakteristiği	De (mm)
Boru-1	Boş boru	8,95
Boru-2	Tel çapı: 1.8 mm, yay adımı: 5 mm olan boru	7,96
Boru-3	Tel çapı: 1.8 mm, yay adımı: 10 mm olan boru	8,44
Boru-4	Bükülmüş şerit adımı: 120 mm	8,5
Boru-5	Bükülmüş şerit adımı: 60 mm	8,6

Şekil 3.14. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve karakteristikleri

Deneyler Boş Boru tipinden başlanarak yapılmıştır. Sabit çıkış orifis kısıtlamasında ısı gücü verilmeden , $p_{sist} = 7.5 \text{ bar}$ ve $T_g = 15^\circ \text{C}$ akışkan giriş sıcaklığında yapılan deneyleri daha sonra akışkan giriş sıcaklığı $T_g = 15^\circ \text{C}$, $T_g = 25^\circ \text{C}$ ve $T_g = 35^\circ \text{C}$ değerleri için deneyler $\dot{Q} = 24 \text{ kW}$ ısı gücünde yapılmıştır. Kararlı durum karakteristiklerini bulmak

için yapılan bu deneyler tamamlandıktan sonra aynı deneysel parametreler kullanılarak kararsız deneyler yapılmıştır. Boş boru (Boru-1) deneyleri bittikten sonra sırasıyla Boru-2, Boru-3, Boru-4 ve Boru-5 borularına ait deneyler yapılmıştır.



Şekil 3.15. Isı transfer iyileştirme elemanları

Her bir deney için aşağıda belirtilen 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 deneyleri kararlı durum karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Kararlı durum karakteristikleri basınç düşümünün debiyle değişimini

gösteren $\Delta p - \dot{m}$ grafikleriyle gösterilmektedir. Buradaki basınç düşümü dengeleyici tank basıncı ile orifis plakasından sonraki akışkanın basıncı arasındaki farktır. Deneylere $\dot{m} = 110 \text{ g/s}$ debisiyle başlanmıştır. Yüksek debilerde akış tek fazlı sıvı akışıdır ve karakteristik eğriyi belirlemek amacıyla debi yaklaşık 10-12 g/s aralıklarla azaltılmıştır. Tümüyle buhar akışının karakteristiğini belirlemek amacıyla debi çok düşük değerlere azaltılmalıdır. Deneylerde en düşük debi değeri 20 g/s olarak alınmıştır. Burnout olasılığı nedeniyle deneylerin tümünde daha düşük debi değerlerine erişilememiştir. Cidar sıcaklıkları ve akışkan çıkış sıcaklığı gözlenerek borunun burnout bölgesine erişip erişmediği kontrol edilmiştir.

Kararlı durum karakteristiklerini belirlemek amacıyla yapılan deneylerde sırasıyla aşağıda belirtilen deneysel çalışma adımları izlenmiştir:

- a. Ana tank azot gazı ile sistem basıncı seviyesine basınçlandırılmış ve sistem basıncı azot tüpü üzerinde bulunan basınç regülâtörü vanası vasıtasıyla ayarlanmıştır.
- b. Kararlı durum çalışmalarında kullanılmayan dengeleyici tankta sıkıştırılabilir hacmin olmaması için dengeleyici tanktaki seviye göstergesi izlenerek bu tank içerisinde bulunan azot gazı tahliye edilmiştir.
- c. Sistemin debisi kontrol vanası kullanılarak deneysel çalışmada tespit edilen en yüksek debi değerine ayarlanmıştır.
- d. Ana tanktan gelen suyun test borusuna giriş sıcaklığına gelmesi için dijital termostat vasıtasıyla belirlenen sıcaklığa ayar yapılmıştır.
- e. İş yapan akışkanın yoğunlaştırıldığı ısı değiştiricinin soğutma suyu devresi açılmıştır.
- f. Sistem çalıştırılmış ve kararlı hale gelmesi beklenmiştir.
- g. Test borusuna gerekli ısı gücünü temin eden ayarlanabilir DC güç kaynağı istenen güç değerine ayarlanarak sisteme ısı verilmiştir.
- h. Sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Test borusu yüzey sıcaklıklarında 0.5°C 'den daha fazla bir değişim gözlenmediğinde sistemin kararlı hale geldiğine karar verilmiştir.
- i. Sistem kararlı hale ulaştıktan sonra gerekli tüm ölçümler alınmış ve böylece belirlenen debi için deney tamamlanmıştır.

j. Giriş debisi 25 g/s değerine gelene kadar çeşitli debilerde yeni bir debi değeri için yukarıda anlatılan işlemler tekrar edilmiştir.

3.3.2. Kararsız Durum Karakteristiklerinin Belirlenmesi Deneyleri

Kararsız deneylerde BDO, YDO ve TO gibi iki fazlı akış dinamik kararsızlıkları araştırılmıştır. Bu deneylerin amacı belirli çalışma koşullarında ortaya çıkan kararsızlıkları, sınırlarını ve tiplerini belirlemek ve bunların oluştuğu çalışma koşullarını ve geometrik parametrelerini tespit etmektir. Kararsızlıkları elde etmek için sistemde bir hacmin olması gerekir. Deney sisteminde sıkıştırılabilir hacim test kısmından önce yerleştirilen dengeleyici tankta sağlanmıştır. Dengeleyici tanktaki akışkan seviyesi basınçlı azot gazı kullanılarak belirli seviyede tutulmuştur. Osilasyon genlik ve periyotları, kararsızlık sınırları vb. kararsızlık parametrelerini karşılaştırmak amacıyla tüm deneylerde sıkıştırılabilir hacim sabit tutulmuştur. Osilasyonlar esnasında basınç ve kütleli debi değiştiğinden sıkıştırılabilir hacmin büyüklüğünde değişmektedir.

Kararsızlık deneyleri yapılırken sırasıyla aşağıda belirtilen deneysel çalışma adımları izlenmiştir:

- a. Ana tank Azot gazı ile sistem basıncı seviyesine basınçlandırılmış ve sistem basıncı Azot tüpü üzerinde bulunan basınç regülâtörü ile ayarlanmıştır.
- b. Osilasyonların karşılaştırılabilmesi için her bir deneyde dengeleyici tanktaki sıkıştırılabilir hacim seviyesinin sabit olması gerekmektedir. Dengeleyici tank Azot gazı ile basınçlandırılmış ve tank içerisindeki sıkıştırılabilir hacim şeffaf boru seviye göstergesinden su seviyesi kontrol edilerek ayarlanmıştır.
- c. Sistemin debisi kontrol vanası kullanılarak deneysel çalışmada tespit edilen en yüksek debi değerine ayarlanmıştır.
- d. Ana tanktan gelen suyun test borusuna giriş sıcaklığına gelmesi için dijital termostat vasıtasıyla belirlenen sıcaklığa ayar yapılmıştır.
- e. İş yapan akışkanın yoğunlaştırıldığı ısı değiştiricinin soğutma suyu devresi açılmıştır.
- f. Sistem çalıştırılmış ve kararlı hale gelmesi beklenmiştir.

- g. Test borusuna gerekli ısı gücünü temin eden ayarlanabilir DC güç kaynağı istenen güç değerine ayarlanarak sisteme ısı verilmiştir.
- h. Sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Test borusu yüzey sıcaklıklarında 0.5°C'den daha fazla bir değişim gözlenmediğinde sistemin kararlı hale geldiğine karar verilmiştir.
- i. Osilasyon sınırına ulaşıncaya kadar kütleli debi değerleri azaltılmaya devam edilmiştir. Dengeleyici tankın basınç değeri ve su seviyesinde hızlı değişimler gözlenmesi osilasyonların başladığı anlamına gelmektedir.
- j. Basınç düşümü tipi osilasyonların sona erdiği noktayı bulabilmek için kütleli debi yine çok küçük miktarlarda azaltılarak osilasyonların periyotları incelenmiştir. Düşük periyotlar basınç düşümü tipi osilasyonların bittiği ve bağımsız yoğunluk değişim tipi osilasyonların başladığını göstermektedir.
- j. Azalan kütleli debi ile cidar sıcaklıkları dikkatlice gözlenmiş ve termal osilasyonların oluşumu sağlanmıştır.
- k. Burn-out olayının başladığı noktalara ulaşıldığı anlaşılır anlaşılabilir deneysel çalışmalar durdurulmuştur (Karagöz 2007).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

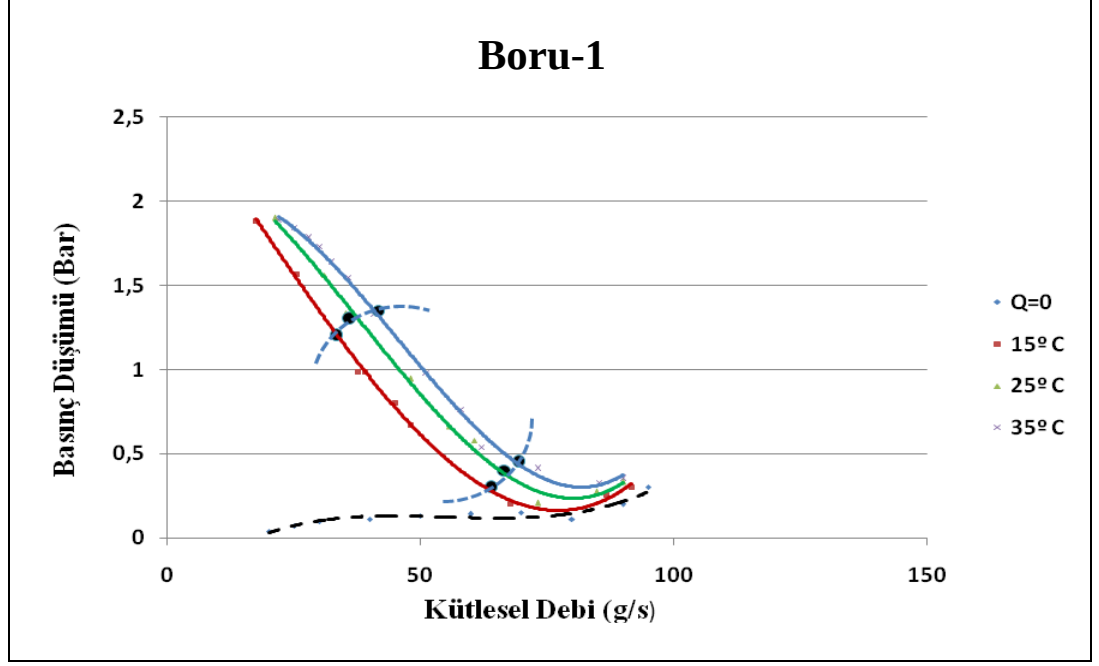
Beş farklı test borusu için deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler bu bölümde sunulup, her biri için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu bölümde; kararlı durum karakteristikleri, osilasyon sınırları, basınç düşümü tipi osilasyonları, yoğunluk değişim tipi osilasyonları ve boru yüzey konfigürasyonlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

4.1. Kararlı durum karakteristikleri

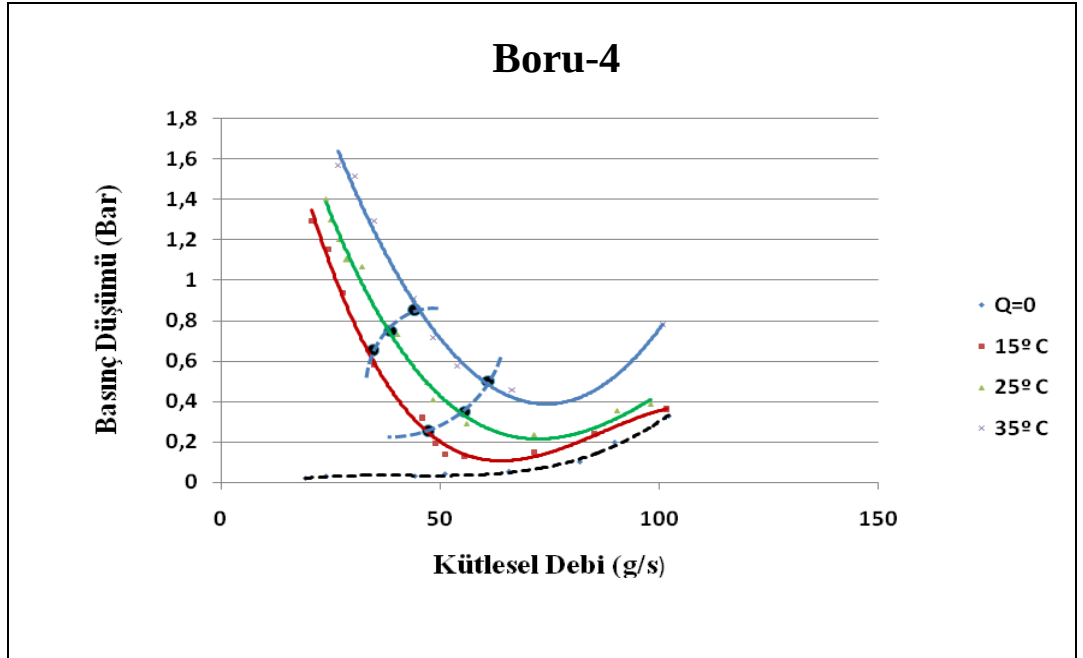
İş yapan akışkanın su olduğu deneysel sistem için iki fazlı akış sistemlerinde yaygın olarak kullanılan kararlı durum karakteristik eğrileri, $\Delta p - \dot{m}$ grafikleriyle oluşturulmuştur. Bu grafikler her test borusu için farklı kütleli debilere göre basınç düşümü değerlerini göstermektedir. Basınç düşümü değerleri hesaplanırken dengeleyici tank basıncı ile test borusu çıkış basıncı arasındaki fark kullanılmıştır. Kararlı durum karakteristiklerini belirlemede aşırı soğutma seviyesine bağlı olarak karakteristik grafikler çizilmiştir. İki fazlı akışta yaygın olarak kullanılan bu eğriler yatık “S” şeklini alırlar. Bu eğriler akış karakteristiklerinin anlaşılmasında kullanılmaktadır. Eğrilerin yüksek kütleli debi değerlerine karşılık gelen pozitif eğime sahip kısımları tek fazlı sıvı bölgesini sergiler. Azalan kütleli debi ile basınç düşümü değerlerinin de azalıp minimum noktaya geldiği ve eğrinin eğiminin negatif olduğu yerlerinde ilk kabarcıklar oluşarak iki fazlı akış bölgesinin oluştuğunu göstermektedir. Kabarcıkların sayısı arttıkça iki fazlı akışta sıvı fazı ile beraber buhar fazı birlikte akmaya başlar. Bu durum lokal olarak ortamdaki yoğunluğun sıvı fazına göre daha düşmesini dolayısı ile basınç düşümünün artmasını sağlar. Eğrilerde doygun buhar sınırına kadar olan negatif eğimli yerleri, kütleli debi değerlerinin iyice azaltılması sonucunda pozitif eğime geçer ve basınç düşümü değerleri de azalmaya başlar. Kararlı durum karakteristik eğrilerinde kesikli çizgilerle gösterilen yerlerin arasında kalan kısım yoğunluk değişim tipi osilasyonlarının basınç düşümü osilasyonları ile süperimpozed denen aynı tarzda ortaya çıktığı kararsız bölgeyi teşkil etmektedir. Bu kesikli çizgilerin sol tarafında kalan bölge ise sadece YDO’nun görüldüğü bölümdür.

Beş farklı test borusu için üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan karakteristik durum eğrileri daha sonra $T_g = 25^\circ C$ akışkan giriş sıcaklık değeri için mukayese edilmiştir. Deneyler $Q=24$ Kw sabit ısıtıcı güçte yapılmış olup, şekillerde kesikli çizgilerle gösterilen eğriler ise sisteme güç vermeden ($Q=0$) yapılan ölçümleri göstermektedir. Şekil 4.1’de yüzey artırım elemanı kullanılmayan boş boru yani Boru-1, Şekil 4.2’de yüzey artırım elemanı olarak 12 cm adımlı kıvrılmış levhaya sahip boru yani Boru-4, Şekil 4.3’de yüzey artırım elemanı olarak 6 cm adımlı kıvrılmış levhaya sahip boru yani Boru-5, Şekil 4.4’de yüzey artırım elemanı olarak 10 mm adıma sahip yay içeren boru yani Boru-3 ve Şekil 4.5’de yüzey artırım elemanı olarak 5 mm adıma sahip yay içeren boru yani Boru-2 için karakteristik durum eğrileri verilmiştir. Beş farklı test borusu için verilen grafiklere bakıldığında giriş aşırı soğutma değerindeki artışla eğrilerin maksimum ve minimum noktalarındaki basınç farkının büyüyerek, kaynamanın başladığı noktaların daha düşük kütleli debilere doğru kaydığı anlaşılmaktadır. Ayrıca aşırı soğutma değerindeki artış, iki fazlı akış bölgesinin eğimini artırmış ve azalan kütleli debi değerleri ile basınç düşümü değerlerini de azaltmıştır. Beş ayrı test borusu için verilen karakteristik durum eğrilerinde basınç düşümü değerlerinde farklılıklar görülmektedir. Yüzey artırım elemanı bulunan Boru-2’ de elde edilen basınç düşümü değeri en büyük, boş boruda yani Boru-1’de elde edilen basınç düşümü değeri ise en küçüktür. Şekil 4.6’ da verilen grafikte basınç düşümü değerlerine bakılırsa, basınç düşümü değeri büyükten küçüğe doğru Boru-2 > Boru-3> Boru-5> Boru-4> Boru-1, şeklinde sıralanmaktadır. Azalan kütleli debi değerlerine karşılık basınç düşümü değerlerinde artış miktarının boş boru’dan daha fazla olmasını; yüzey artırma elemanı kullanılan borularda akışta meydana gelen katmanlaşmanın etkisi ile borularda sürtünmeli basınç düşümüne ek olarak buhar fazının neden olduğu ilave basınç düşümüne bağlayabiliriz. Kararlı durum eğrilerinin negatif eğim açısı dikleştikçe sistemin daha kararsız hale geldiğini söyleyebiliriz. Şekil 4.6’ya bakıldığında boş boru’nun diğer yüzey artırma elemanı kullanılmış borulardan daha az negatif bölge eğimine sahip olduğunu dolayısıyla daha kararlı bir yapıya sahip olduğunu görebiliriz. Bu durum daha önceki iki fazlı akış dinamik kararsızlıklarına giriş aşırı soğutmasının etkisini araştıran diğer araştırmacıların sonuçları ile aynı paralelliğe sahiptir. Ding *et al.*

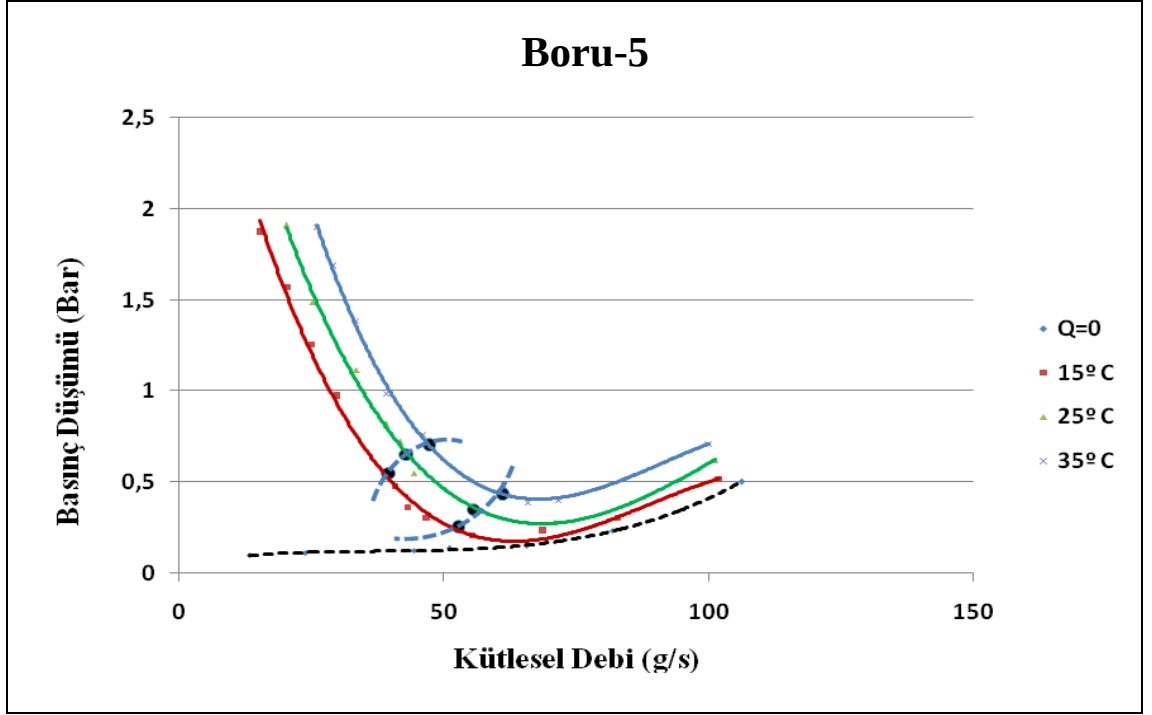
(1993); Widmann *et al.* (1995); Kakaç and Cao (1999); Çomaklı *et al.* (2001, 2007, 2008); Karşlı *et al.* (2002); Karagöz (2007)



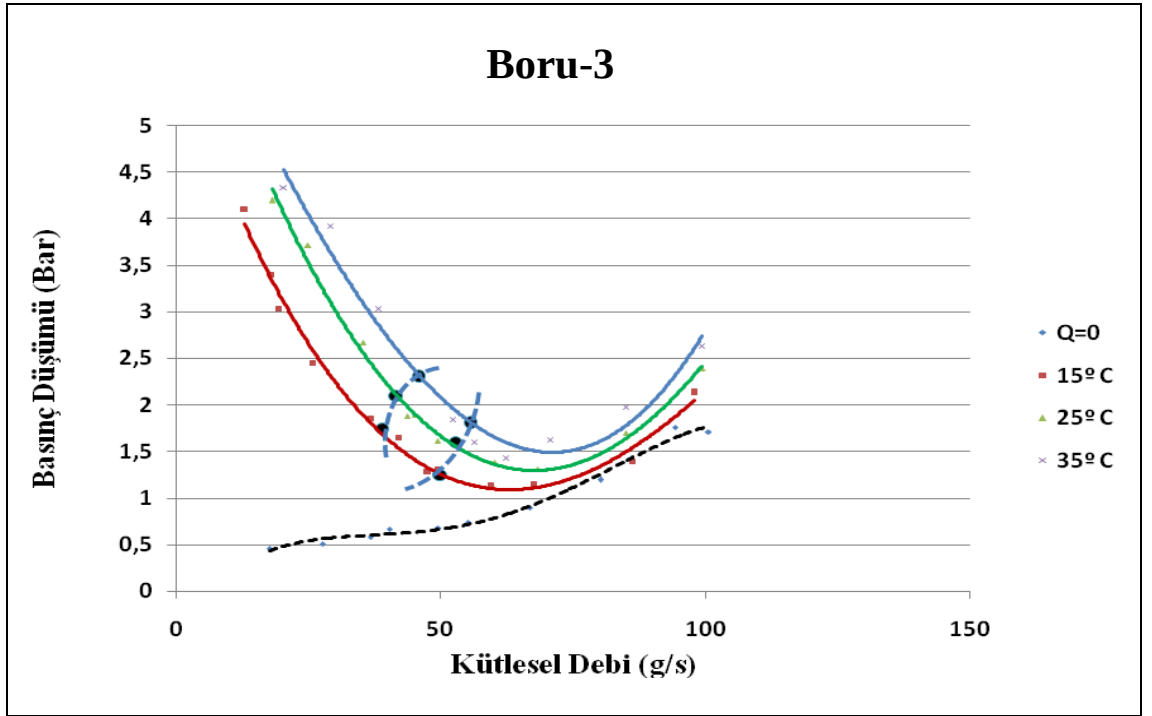
Şekil 4.1. Boru-1 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri



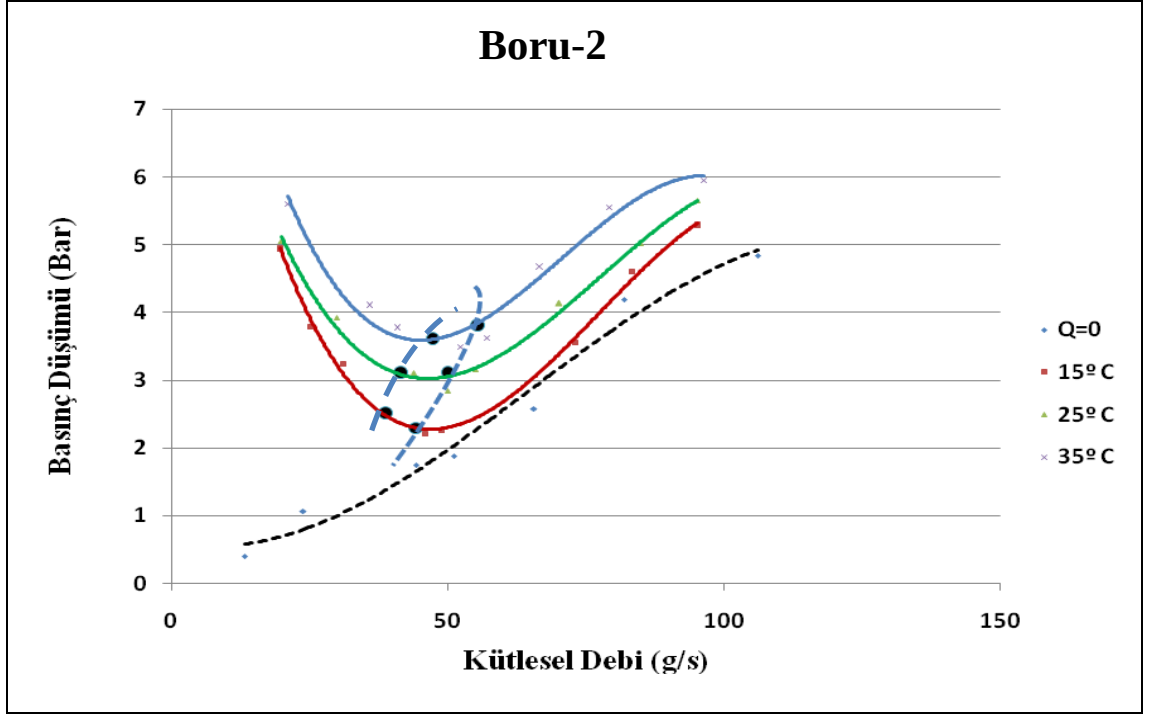
Şekil 4.2. Boru-4 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri



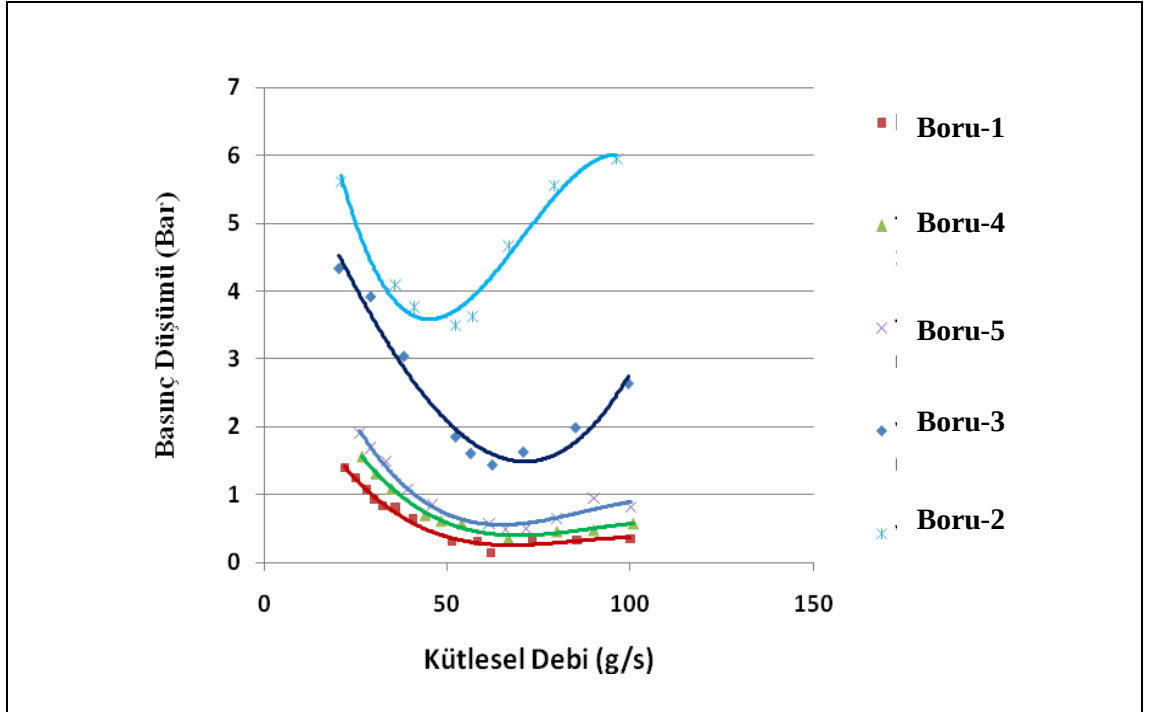
Şekil 4.3. Boru-5 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri



Şekil 4.4. Boru-3 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri



Şekil 4.5. Boru-2 için aşırı soğutmaya bağlı kararlı durum karakteristikleri



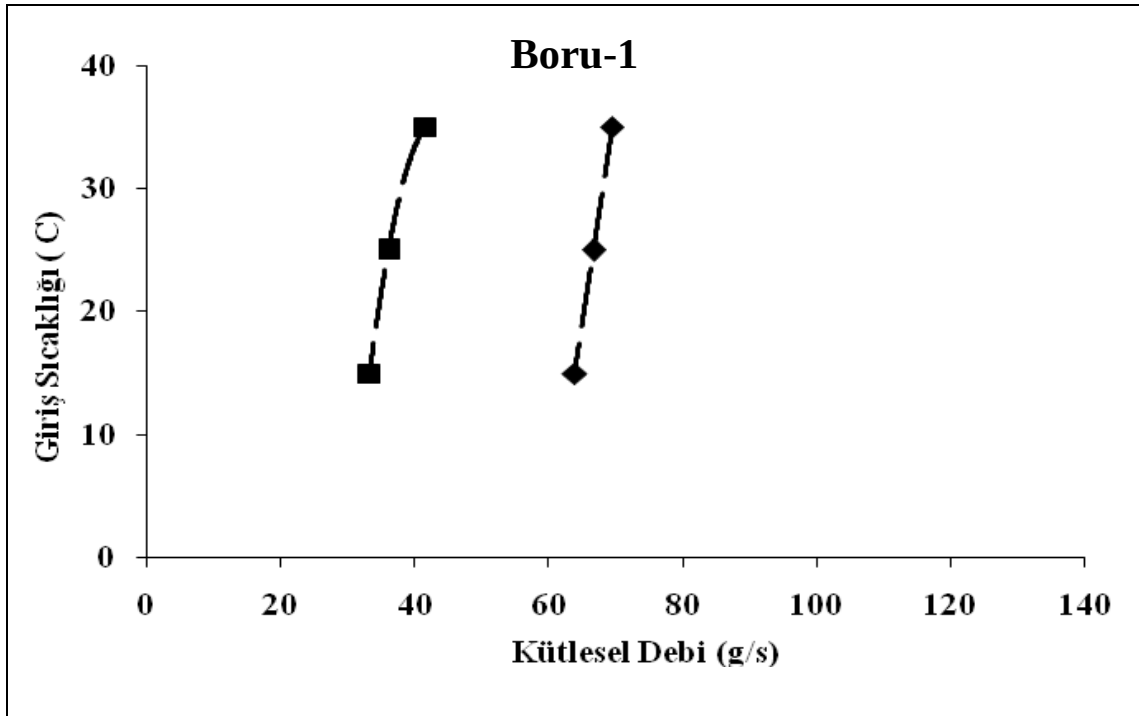
Şekil 4.6. Beş farklı test borusu için kararlı durum karakteristikleri

$$P_g = 7.5 \text{ bar}, Q = 24 \text{ kW}, T_g = 35^\circ \text{C}, \beta = 0.45$$

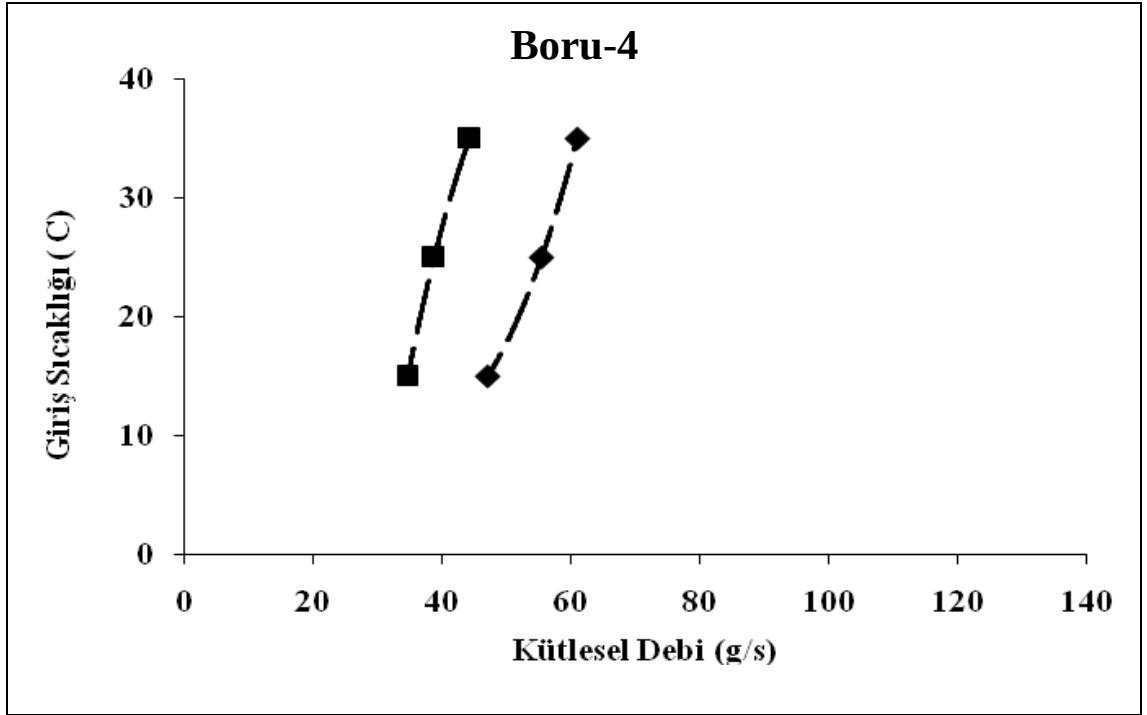
4.2. Osilasyon Sınırları

Deneysel çalışmalarda kullanılan beş farklı test borusu için sabit ısı gücü, sistem basıncı, çıkış kısıtlayıcısı ve sıkıştırılabilir hacim gibi parametrelere göre değişen kütleli debi değerine bağlı osilasyonlar incelenmiştir. Gözlemlenen bu osilasyonlar TO, BDO ve YDO' lardır. İki fazlı akış sistemlerinde kararsız akış şartlarında ortaya çıkan bu tip osilasyonlar bu akış biçimini ihtiva eden proseslere zarar verdiğinden akış ortamında kontrol edilemeleri zor olduğundan dikkatle incelenmiştir. Şekil 4.7. , Şekil 4.8. , Şekil 4.9. , Şekil 4.10. ve Şekil 4.11' de beş farklı test borusu için kütleli debi ve giriş aşırı soğutma değerlerine bağlı olarak basınç düşümü tipi osilasyonlarının sınırlarını gösteren grafikler verilmiştir. Şekil 4.12'de tüm test borularının osilasyon sınırları birlikte verilmiştir. Burada verilen sınır değerleri, basınç düşümü değerlerine karşılık kütleli debi verileri ile oluşturulan kararlı durum karakteristik eğrilerini göstermektedir. Osilasyon sınırlarını gösteren bu grafikler incelendiğinde kesikli çizgilerin sağ tarafında kalan bölge yüksek kütleli debilere sahip tek fazlı kararlı bölgeyi, kesikli çizgilerin arasında kalan bölge YDO ve BDO'larının ortaya çıktığı kararsız bölgeyi ve kesikli çizgilerin sol tarafında kalan bölge ise yalnızca YDO'larının görüldüğü bölgeyi göstermektedir. Kararlı durum eğrilerinde yüksek kütleli debi değerlerine karşılık gelen pozitif eğime sahip kısımları olan bu tek fazlı sıvı bölgesinde herhangi bir osilasyon türü gözlenmemiştir. Pozitif eğim bölgesinden sonra gelen ve azalan kütleli debi ile basınç düşümü değerlerinin de azalıp minimum noktaya geldiği ve eğrinin negatif eğime sahip olduğu bölgede ilk kabarcıkların oluşmasına müteakip osilasyonlar gözlemlenmiştir. Bu ortaya çıkan osilasyonlar basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi osilasyonlarıdır. Kararlı durum karakteristik eğrilerinden görüldüğü gibi aşırı soğutma miktarı arttıkça BDO'nun başlangıç ve bitiş noktaları düşük debilere doğru kaymıştır. Giriş sıcaklığının azalmasıyla boru içerisindeki tek fazlı sıvı bölgesi artmakta ve böylece sistem daha kararlı olmaktadır. Sistemin daha kararlı olmasının nedeni osilasyonların daha düşük debi değerlerinde başlamasıdır. Şekiller incelendiğinde yüzeyi artırılmış borularda meydana gelen BDO'ların başlangıç sınır değerleri boş boru dan daha düşük kütleli debi değerlerinde başlamış ve daha yüksek kütleli debi değerlerinde sona ermiştir. Buna neden olarak yüzey artırılmış boruların

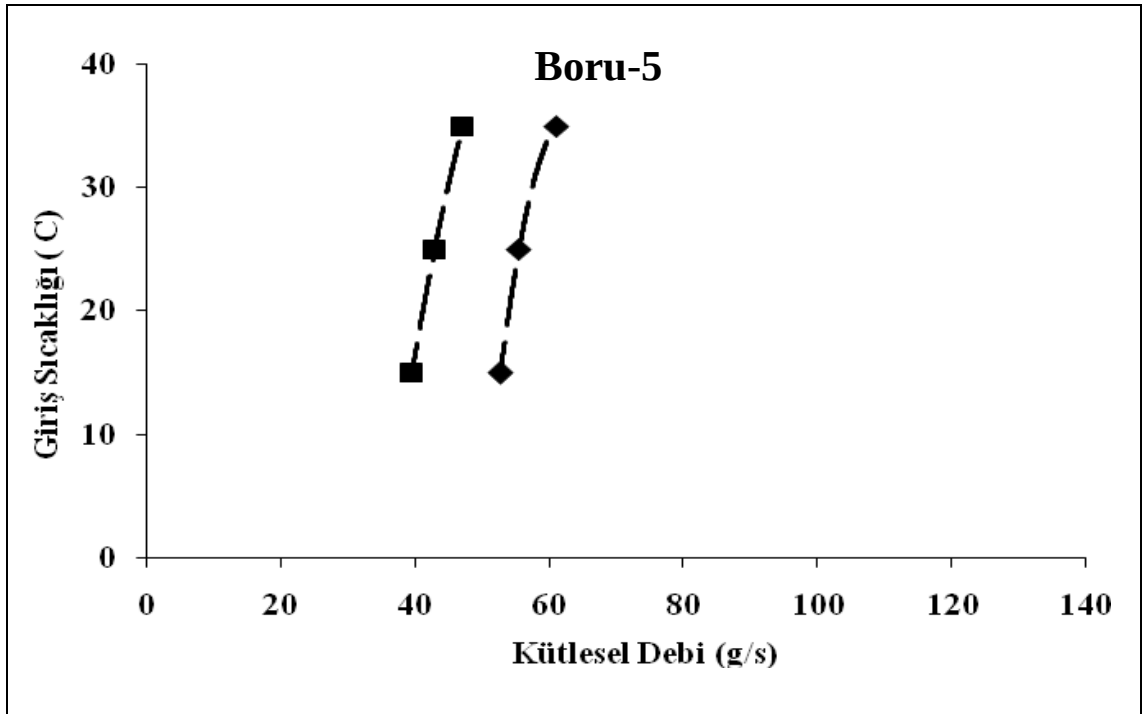
akış ortamında oluşturdıkları türbülans ve neticesinde sıvı-buhar fazlarının karışması şeklinde açıklanabilir. Yerçekimi etkisi ile faz ayrışması olan yatay borulu sistemlerde kullanılan yüzey artırım elemanları üst cidarda yoğunluk farkından dolayı buhar fazını dağıtır ve üst cidarda sıvı damlacıklarının bulunmasını sağlar. Şekil 4.12’de tüm test boruları için verilen osilasyon sınırlarına bakıldığında akışkan giriş sıcaklığı azaldıkça BDO’nun başlama noktası daha düşük kütleli debilere doğru gerilemiştir. Bu durum, giriş aşırı soğutma miktarını artırmanın tüm borular için akışı daha kararlı hale getirdiğini göstermektedir. Kararlılık sınır değerleri tüm test boruları için benzer karakteristik yapıdadır. Sınır değerleri arasındaki uzaklık arttıkça akışın kararsız bölgesi artmakta yani BDO ve YDO osilasyonlarının görüldüğü bu bölge büyümektedir.



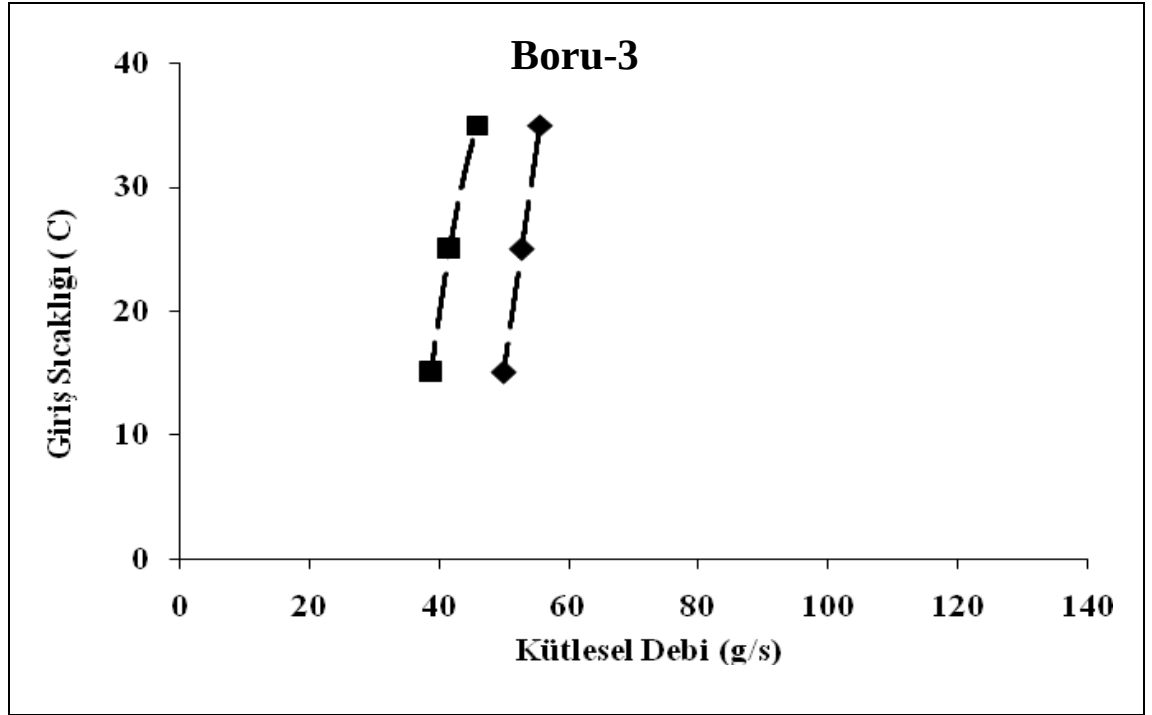
Şekil 4.7. Boru-1 için osilasyon sınırları



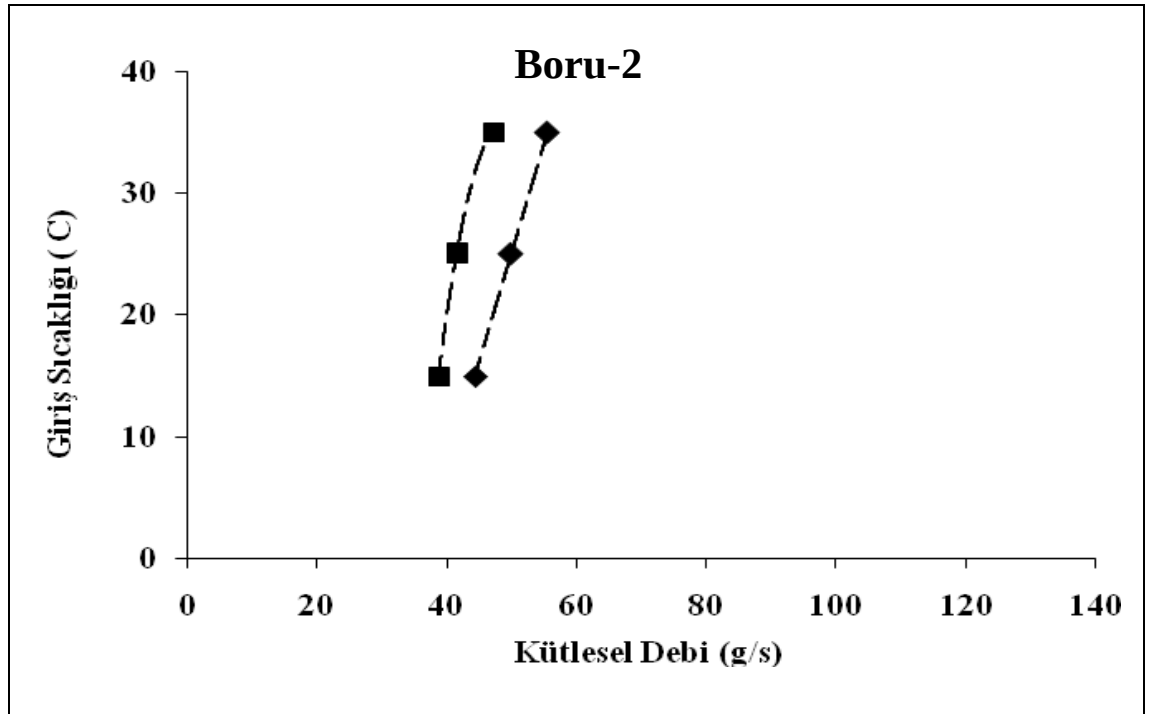
Şekil 4.8. Boru-4 için osilasyon sınırları



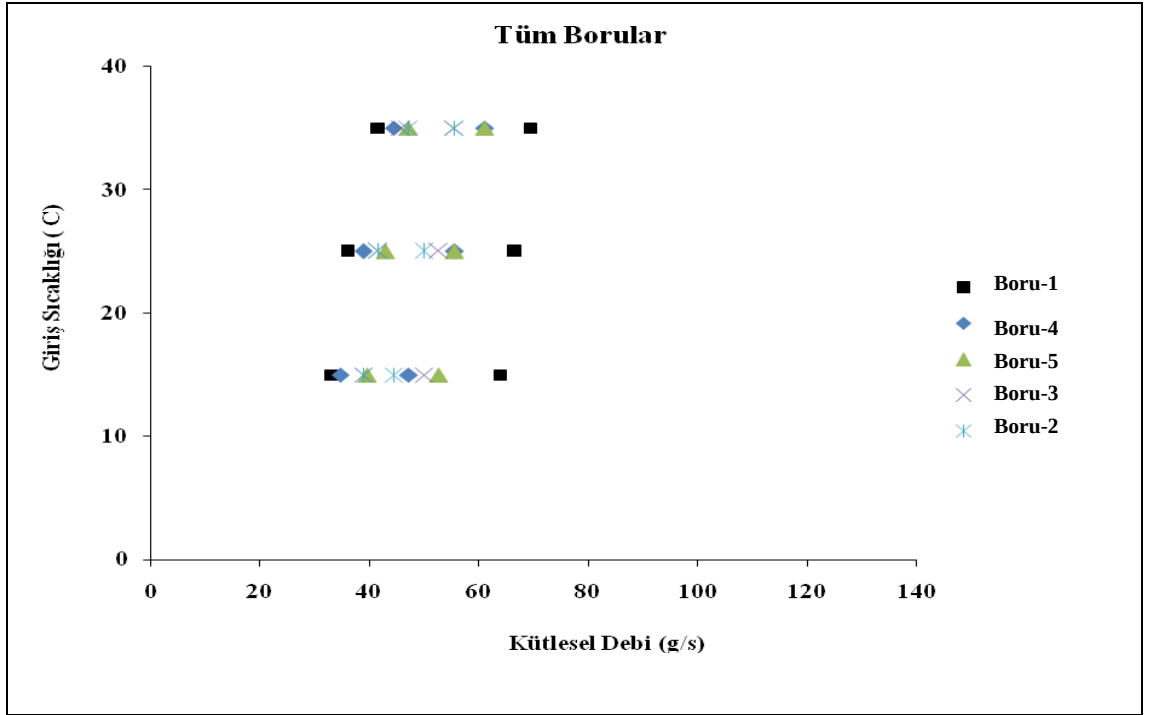
Şekil 4.9. Boru-5 için osilasyon sınırları



Şekil 4.10. Boru-3 için osilasyon sınırları



Şekil 4.11. Boru-2 için osilasyon sınırları

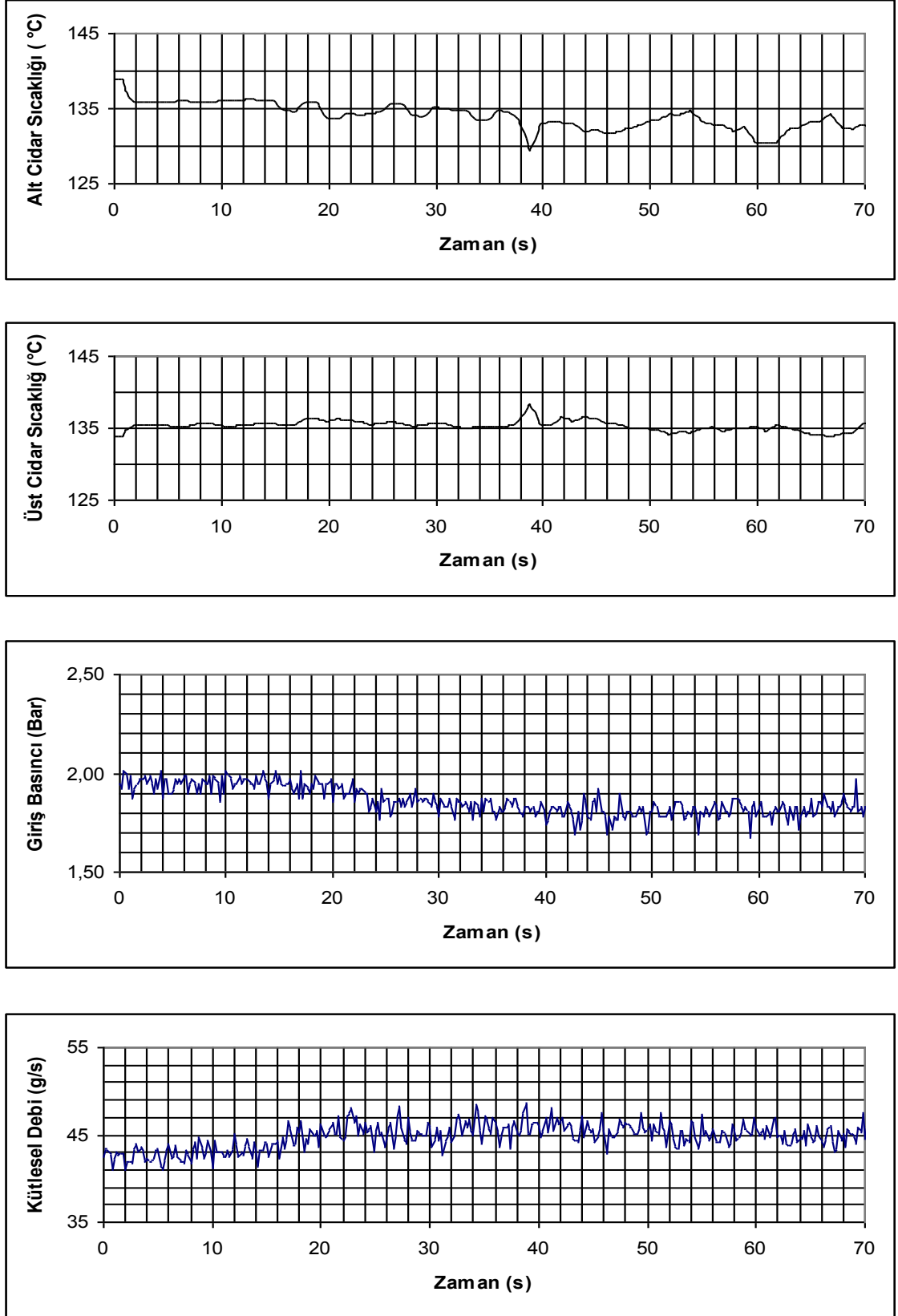


Şekil 4.12. Tüm borular için osilasyon sınırlarının karşılaştırılması

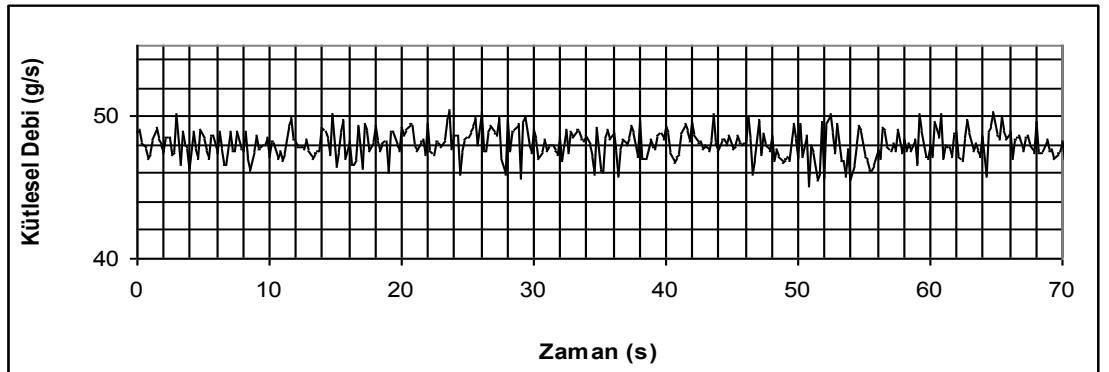
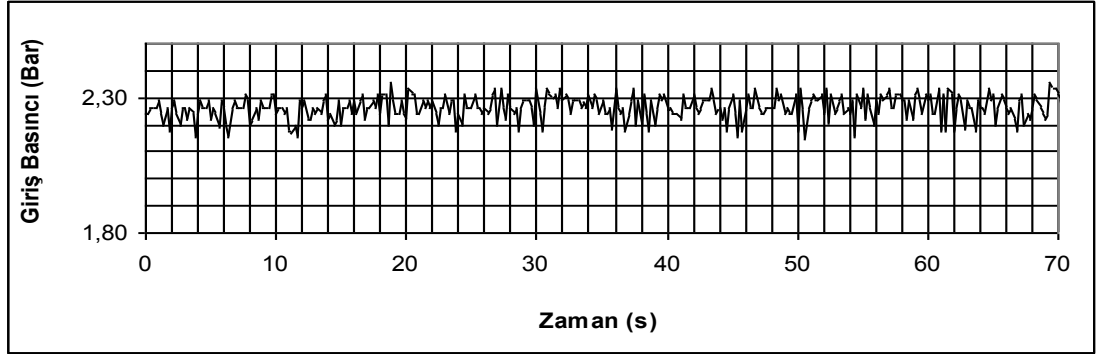
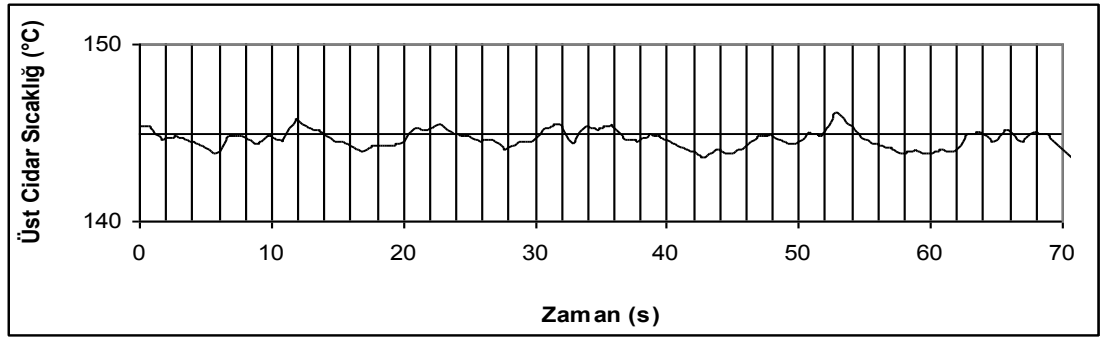
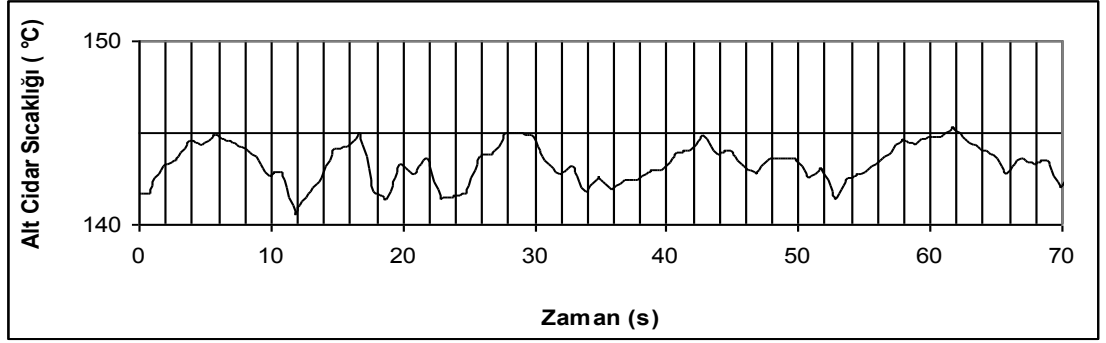
Şekil 4.12’de görüldüğü gibi kütleli debi bölgesinde osilasyon sınırları açısından en çok yer alan boru tipi boş boru yani Boru-1’ dir. Bu durum boş borunun en kararsız boru tipi olduğunu gösterir. En kararlı boru tipi ise içerisinde adım aralığı 5mm olan yay elemanlı Boru-2’dir. Boru-3 ise Boru-2’den biraz daha fazla alanı kapladığından daha kararsız bir yapıya sahiptir. İçerisinde farklı adımlara sahip bükülmüş şerit kullanılan borular kendi aralarında karşılaştırıldığında ise adımı küçük olan Boru-5 borusunun Boru-4 borusundan daha kararlı olduğu görülür. Burada dikkat edildiğinde adım miktarının artması aynı sınıfa sahip elemanlı borularda sıralama için bir ölçüt olmaktadır. Adım miktarının artması sistemi daha kararsız hale getirmiştir. Bu ise akış oryantasyonuna türbülans kazandırıp fazlar arası birleştirmeyi sağlayarak ve geçiş zamanının azalması ile açıklanabilir. Borular kararlılık açısından en yüksek kararlılığa sahip olandan en düşük kararlılığa sahip olana doğru sıralandığında Boru-2, Boru-3, Boru-5, Boru-4 ve Boru-1 sıralaması elde edilir. Bu sıralamaya dikkat edildiğinde efektif çap bakımından küçükten büyüğe doğru aynı sıralamanın olduğu görülür. Yani efektif çap arttıkça osilasyon sınırları arasında ki mesafe artmış ve sistem kararsızlaşmaya başlamıştır.

4.3. Basınç düşümü tipi osilasyonlar

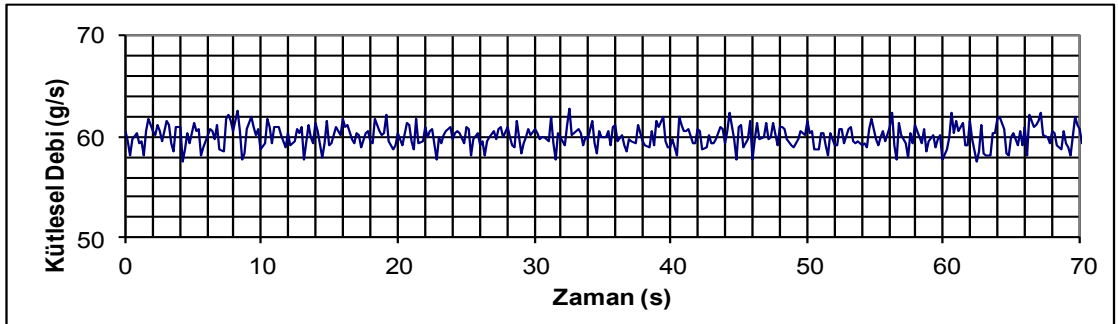
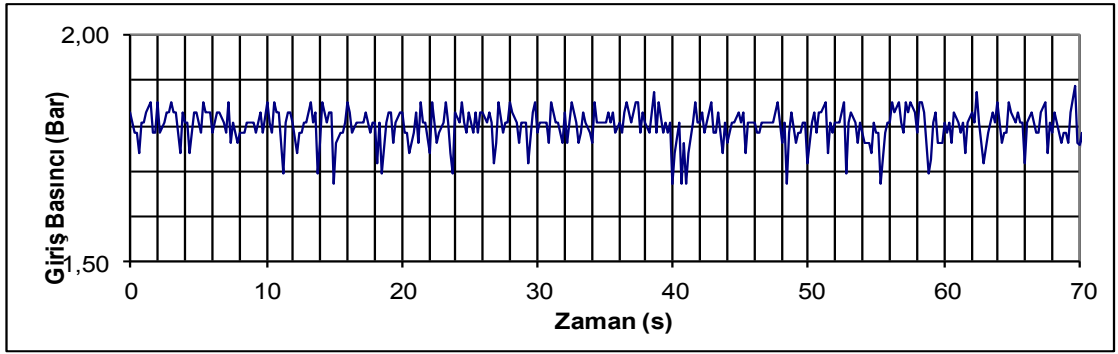
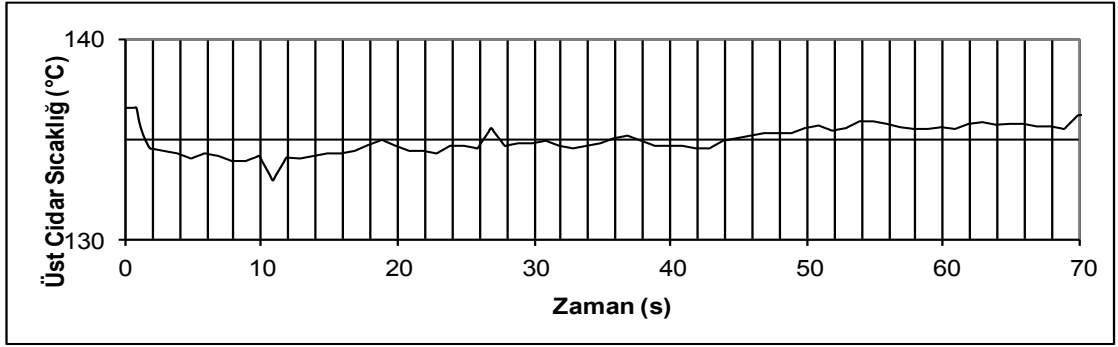
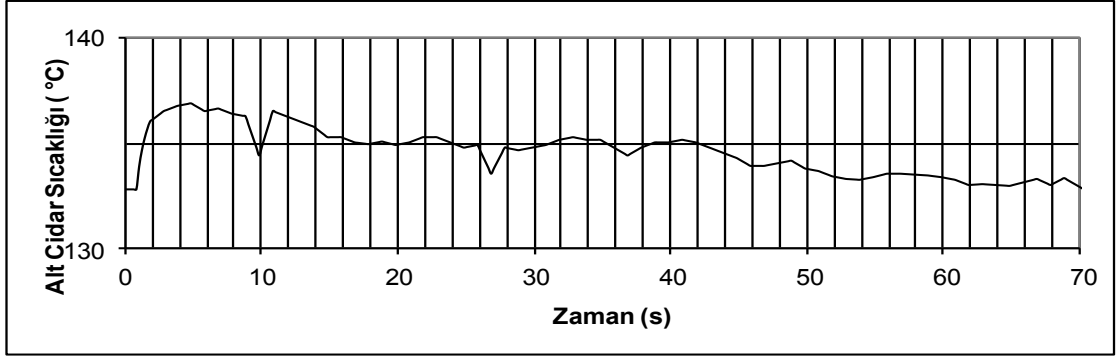
Basınç düşümü tipi osilasyonlarının kararsız akış ortamında oluşan dinamik kararsızlıklardandır. Bu kısımda beş farklı test borusu için aşırı soğutma seviyesi ve kütleli debi parametrelerine göre incelemeler yapılmıştır. Basınç düşümü osilasyonların meydana gelmesinde temel etken sıkıştırılabilir bir hacmin olmasıdır. Eğer test kısmı çok uzunsa, buradaki iç sıkıştırılabilirlik, basınç düşümü tip osilasyonlarının meydana gelmesinde yeterlidir. Eğer test kısmı uzunluğu yeteri kadar uzun değil ise sıkıştırılabilir hacim test kısmının önüne yerleştirilen bir dengeleyici tank ile sağlanır. Endüstride iki fazlı akış içeren sistemler için BDO tip osilasyonlar, daima büyük osilasyon periyodu ve yüksek osilasyon genliğine sahip karakter arz ederler. Aşırı cidar-sıcaklık yükselmesini tetikleyen osilasyon biçimleri olduklarından istenmeyen bir akış ortamına sebep olurlar. Buda sistem ömrünü olumsuz yönde etkiler ve akış kontrolünün sağlanmasını güçleştirir. Bu bakımdan BDO osilasyonlarının belirlenmesi ve kontrol altına alınması sistemlerin güvenliği açısından oldukça önemlidir. Deney sisteminde sıkıştırılabilir hacim N_2 gazı tankı vasıtası gerçekleştirilmiştir. Basınç düşümü tipi osilasyonlar kararlı durum eğrisinin negatif eğime sahip bölgesinde YDO ile beraber süperimpozed biçimde oluşmaktadır. Boş boru yani Boru-1 için BDO'lar üç farklı giriş sıcaklığı için Şekil 4.13. , Şekil 4.14. ve Şekil 4.15' de verilmiştir. Grafikler zamana bağlı üst-alt cidar sıcaklıkları, giriş basıncı ve kütleli debi değerleri için çizilmiştir. Boş boruda yani Boru-1'de üst cidar sıcaklık değerleri alt cidardan fazla olmuş ancak belirgin bir ayrılma görülmemiştir. Boru çapının çok küçük olması nedeniyle oluşan kabarcıkların alt ve üst cidarı kaplaması cidarlar arasında aşırı sıcaklık farklarının olmasını engellemiştir. Düşük ısı transfer katsayısına sahip gaz kabarcıkları ve alt cidarda seyreden yüksek ısı transfer katsayısına sahip sıvı filminin cidarla arasına girmiştir. Buda burn-out yada kaynama krizi denilen aşırı sıcaklık yükselmesi olayının oluşmasını engellemiştir. Ayrıca üst cidar sıcaklıklarının genliklerinin alt sıcaklık genliklerinden düşük olduğu BDO'ların sıcaklık profilleri, kütleli debi ve basınç değerlerinde ne kadar çok çalkantıya sahip oldukları şekillerden görülmektedir.



Şekil 4.13. Boru-1 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 45 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)

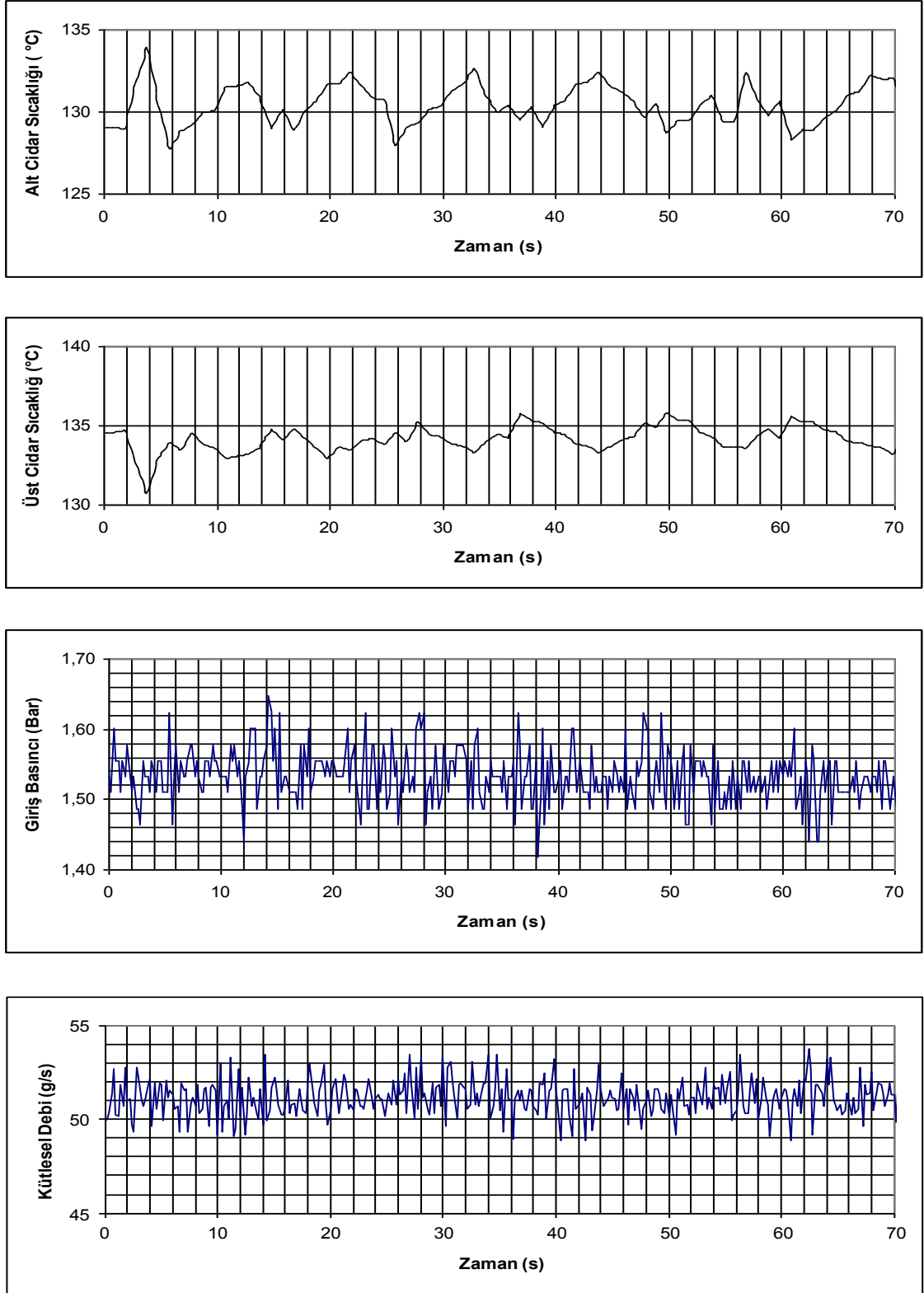


Şekil 4.14. Boru-1 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 48 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)

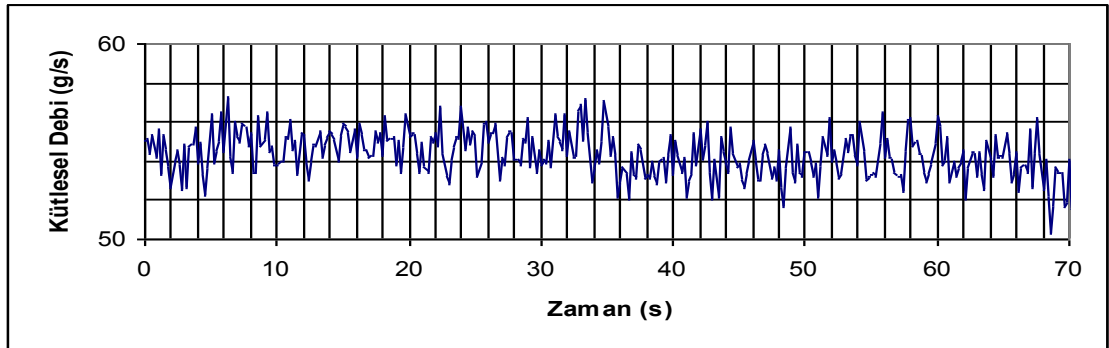
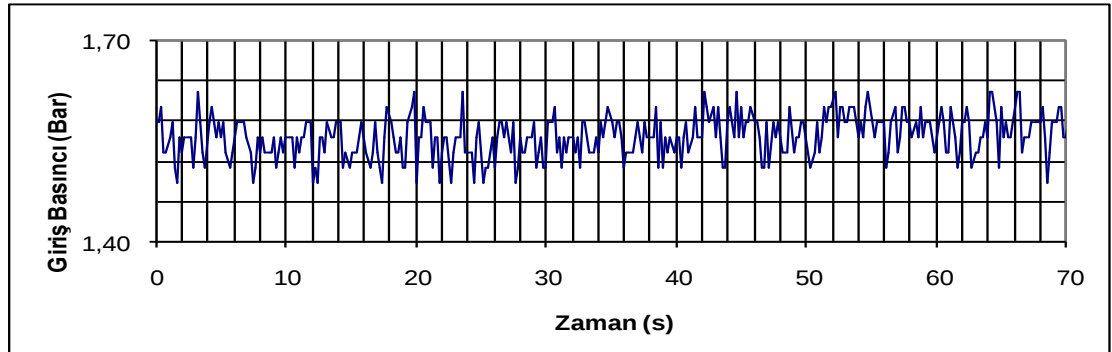
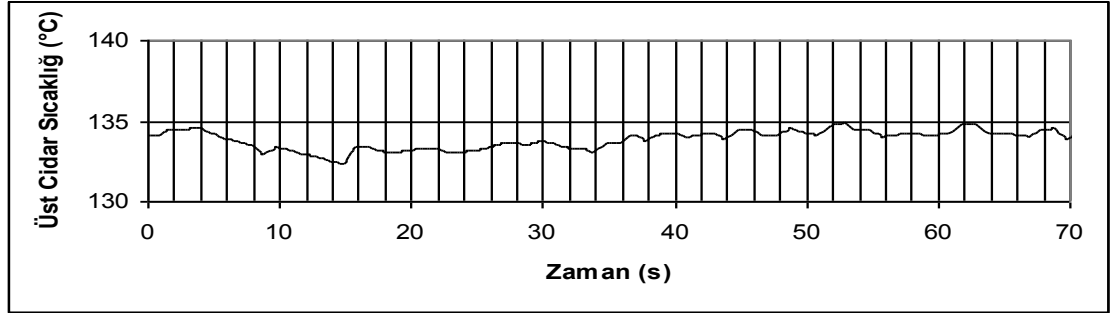
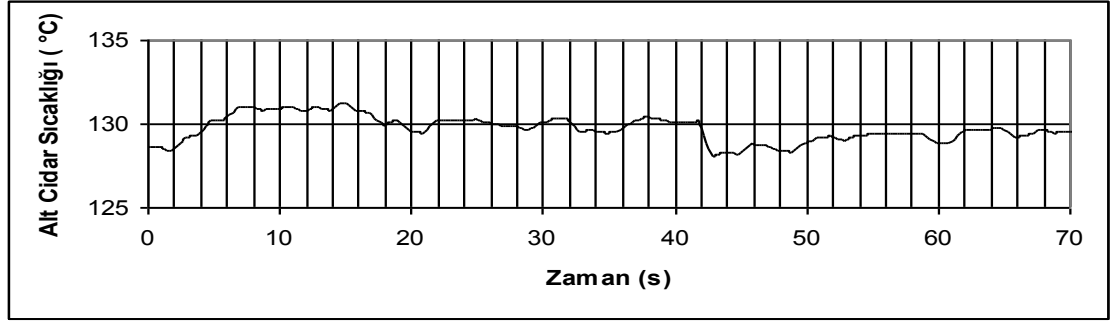


Şekil 4.15. Boru-1 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 60 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)

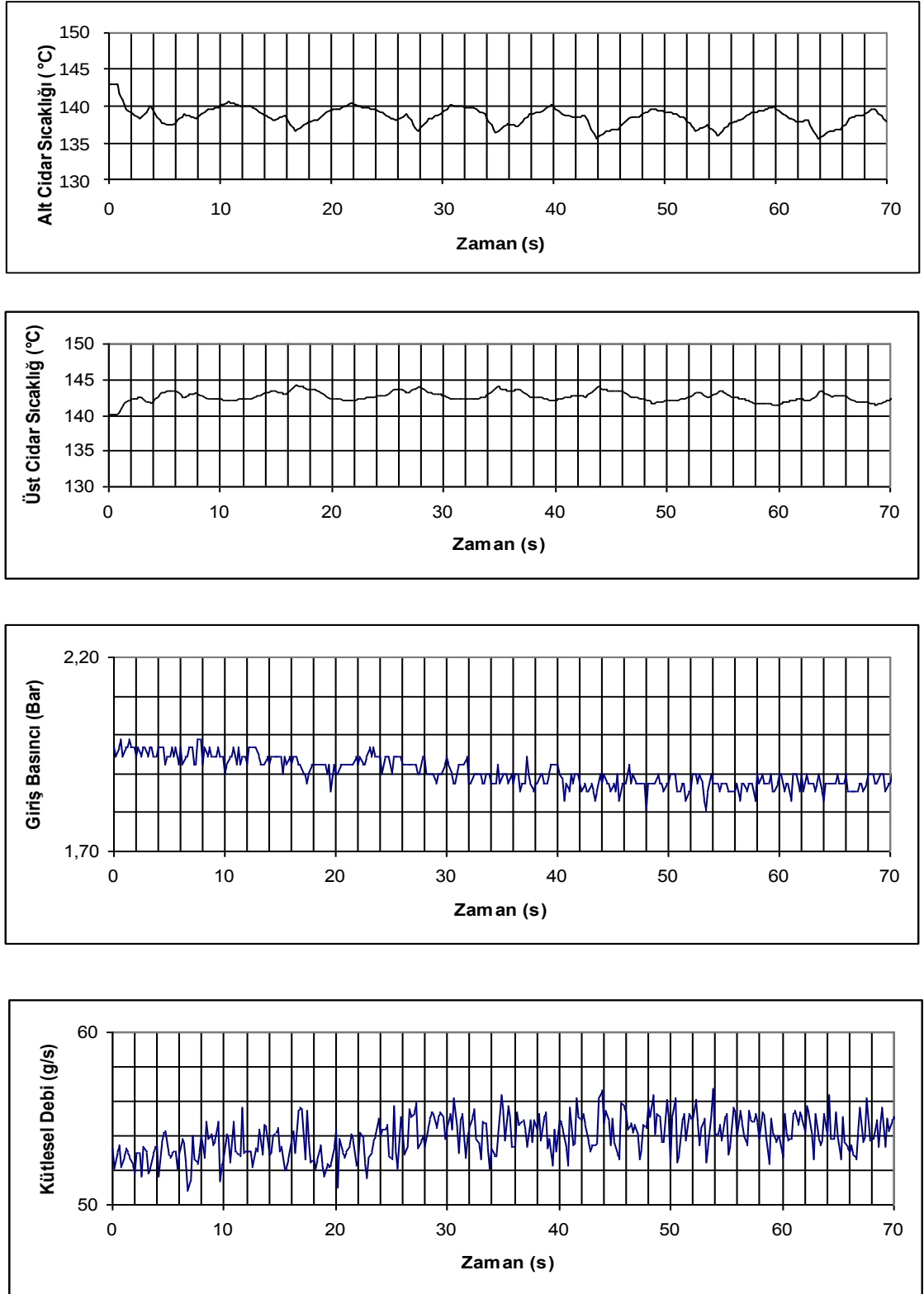
Yüzey artırımı dört farklı test borusu için BDO'ları farklı giriş sıcaklıkları ve kütleli debiler için verilmiştir. Şekil 4.16. , 4.17. ve 4.18'de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-4 borusuna ait örnek basınç düşümü osilasyonları, Şekil 4.19. , 4.20. ve 4.21'de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-5 borusuna ait örnek basınç düşümü osilasyonları, Şekil 4.22. , 4.23. ve 4.24'de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-3 borusuna ait örnek basınç düşümü osilasyonları ve Şekil 4.25. , 4.26. ve 4.27'de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-2 borusuna ait örnek basınç düşümü osilasyonları gösterilmiştir. Her dört boruda da BDO tip osilasyonlar oluşmuş ve bu osilasyonlar giriş basıncı, alt ve üst cidar sıcaklığı ile kütleli debide büyük genlikli çalkantılara neden olmuşlardır. BDO osilasyonları her dört boru için de kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmuştur. Her dört boruda da giriş basıncında gözlemlenen osilasyonlarla beraber kütleli debide de osilasyonlar gözlemlenmiştir. Ayrıca her dört boru için de üst cidar sıcaklıklarının genlikleri alt cidar sıcaklık genliklerinden daha büyük olduğu tespit edilmiştir.



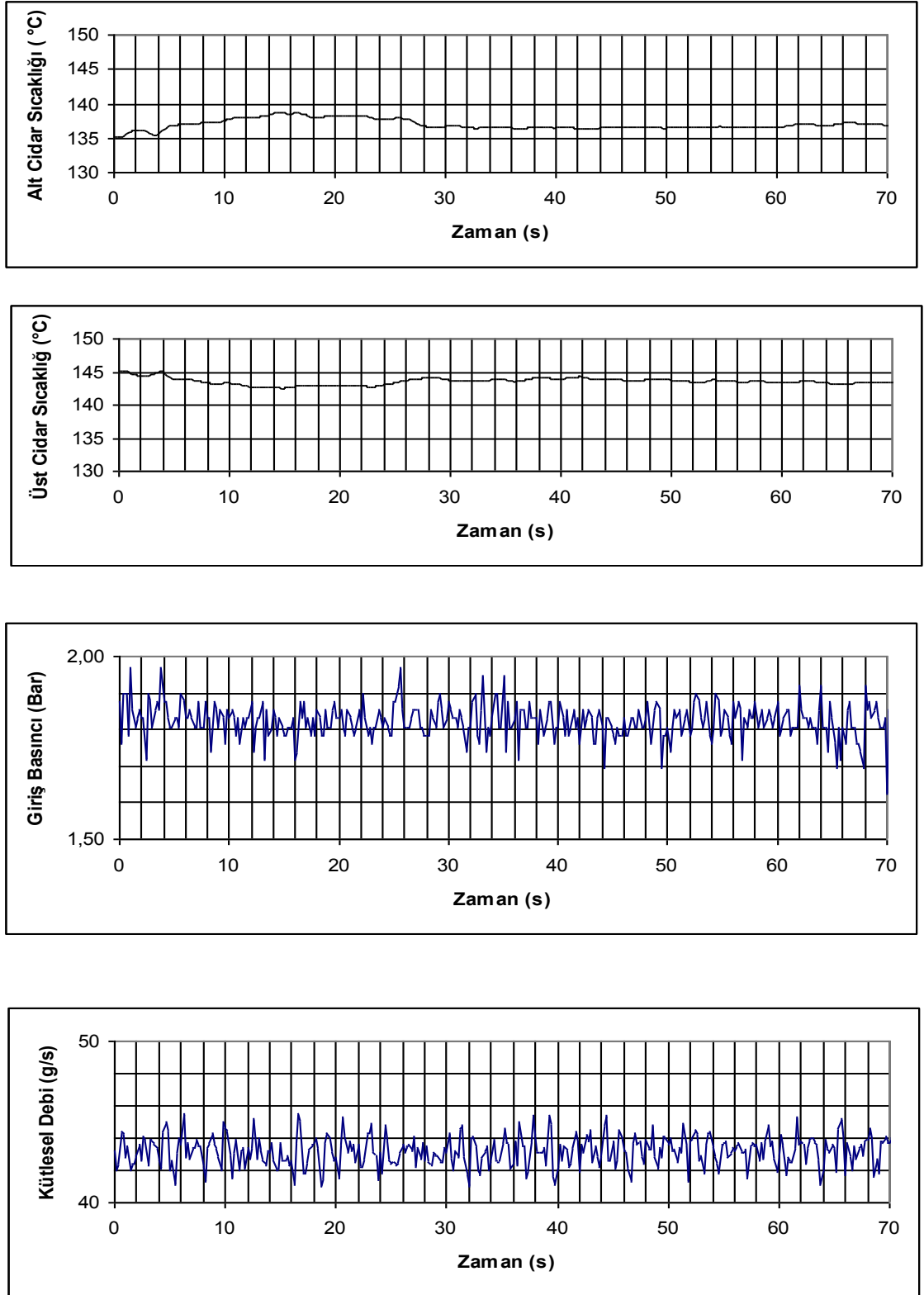
Şekil 4.16. Boru-4 için basınç düşümü osilasyonları ($\dot{m} = 51 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 15^\circ\text{C}$)



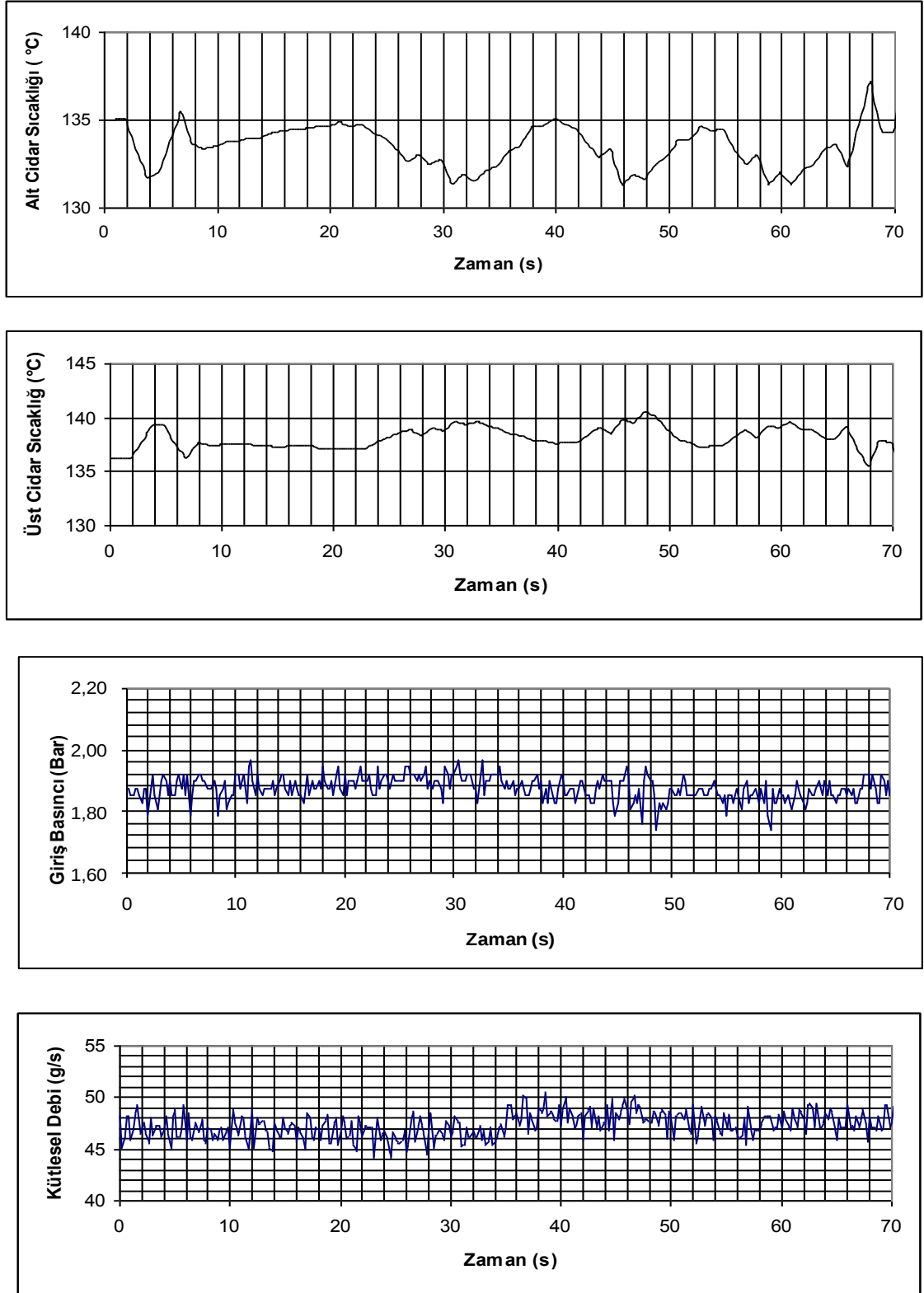
Şekil 4.17. Boru-4 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 51 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ\text{C}$)



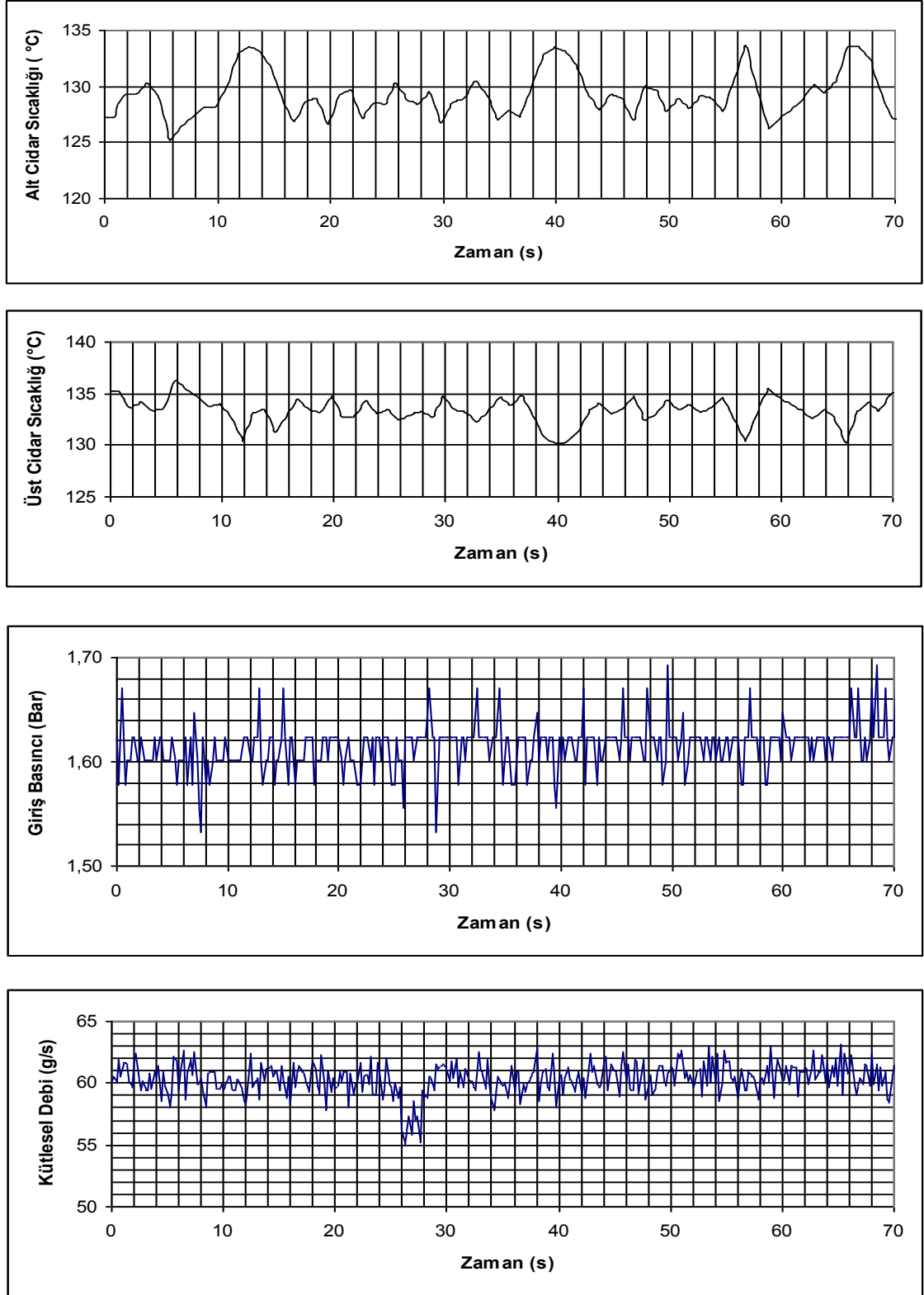
Şekil 4.18. Boru-4 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 54 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 35^\circ\text{C}$)



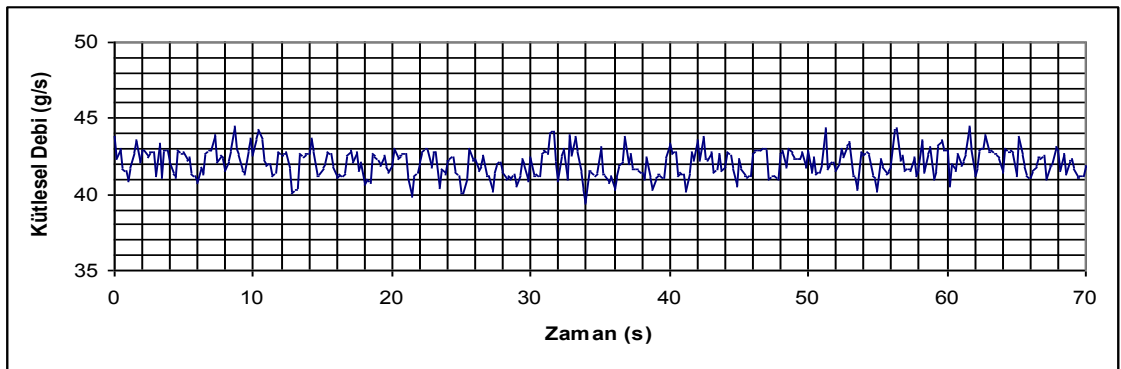
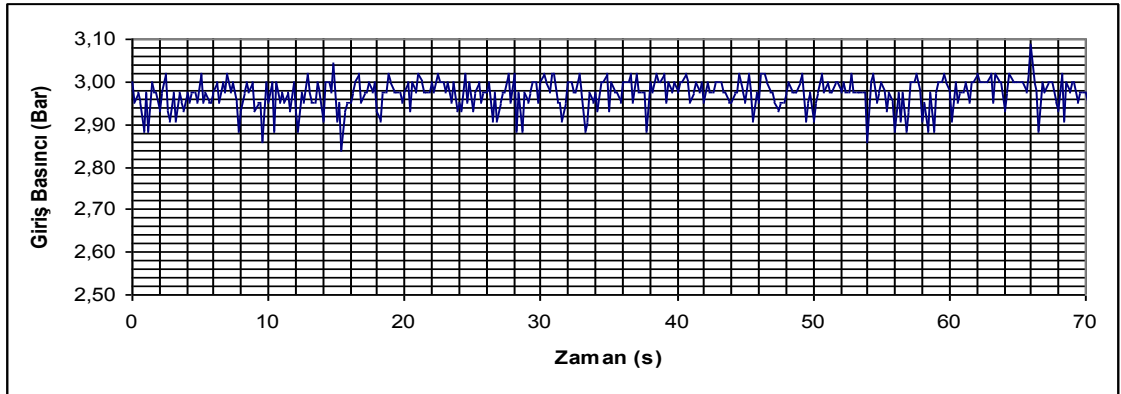
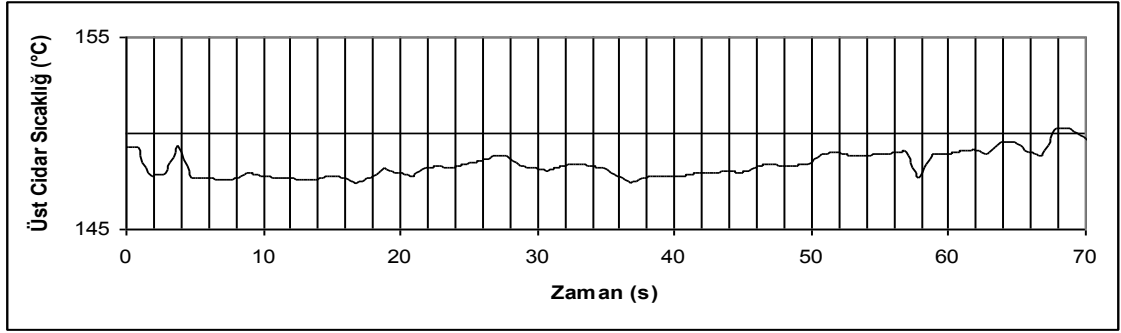
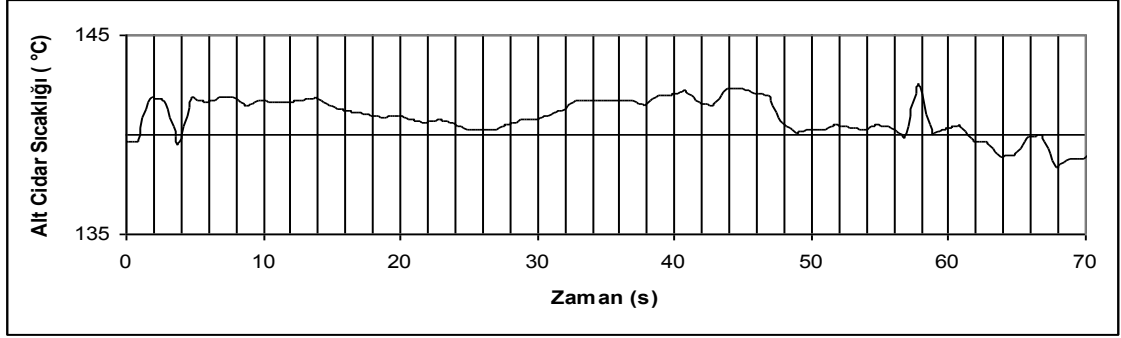
Şekil 4.19. Boru-5 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 43 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 15^\circ\text{C}$)



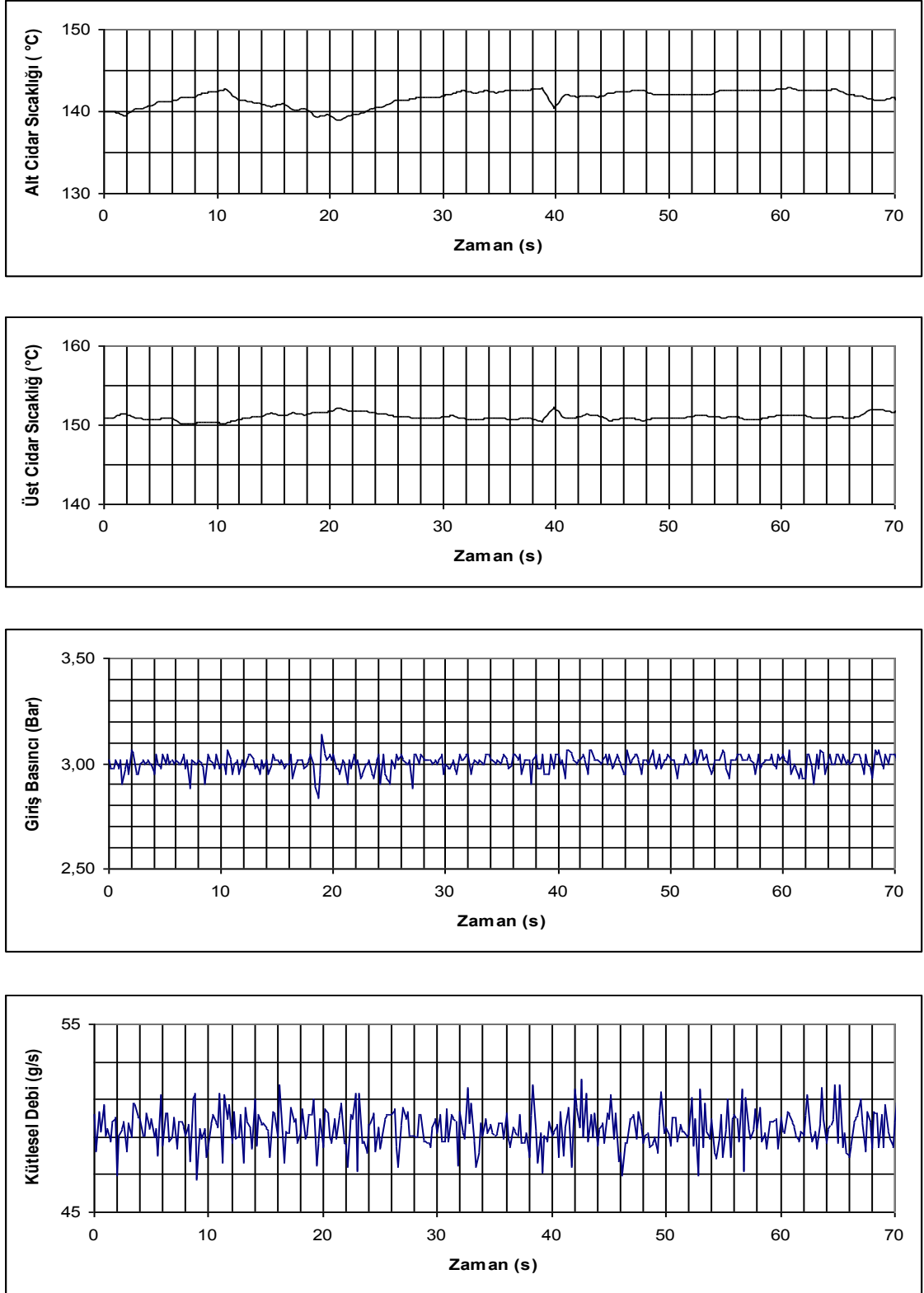
Şekil 4.20. Boru-5 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 47 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ\text{C}$)



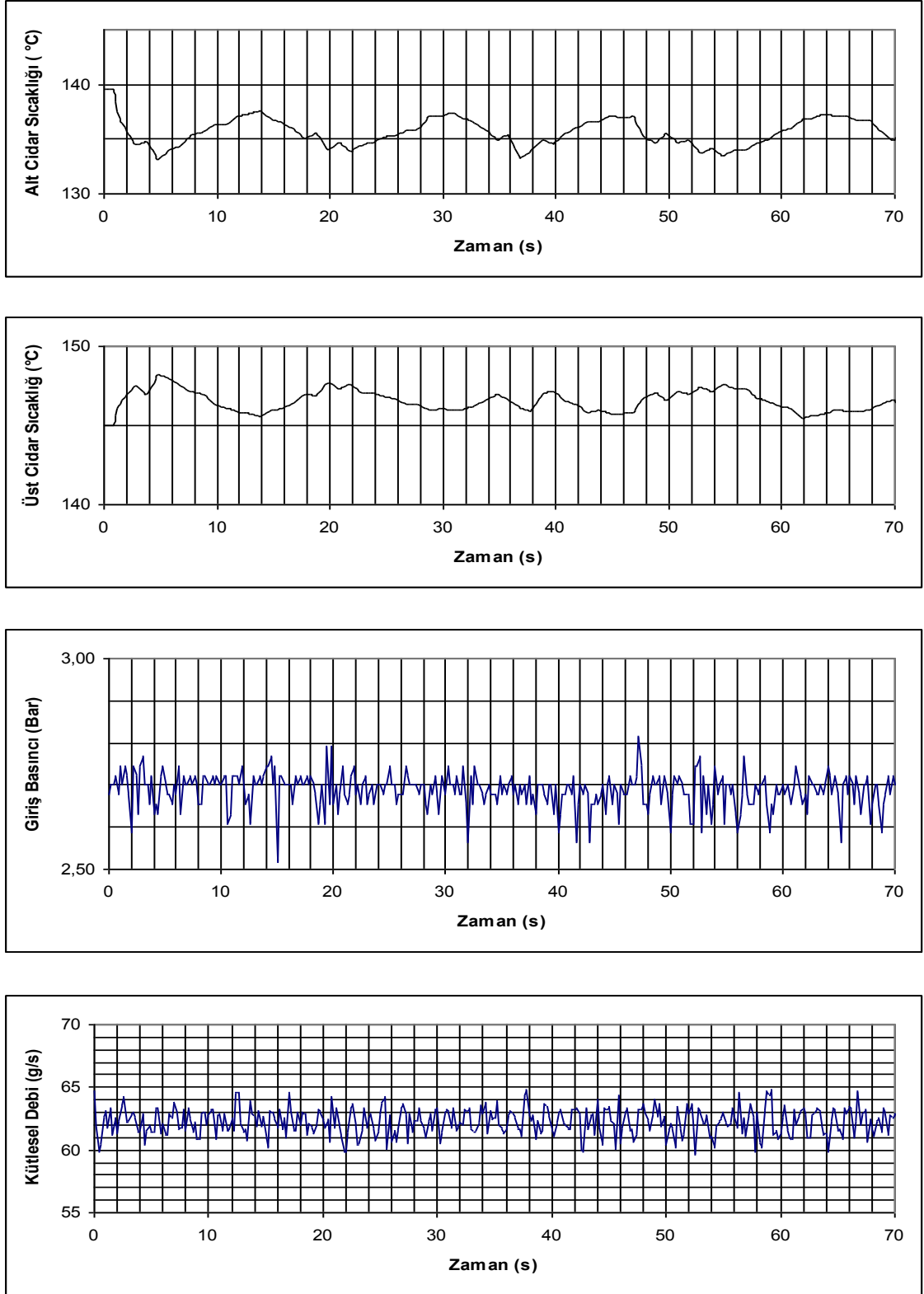
Şekil 4.21. Boru-5 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 60 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 35^\circ\text{C}$)



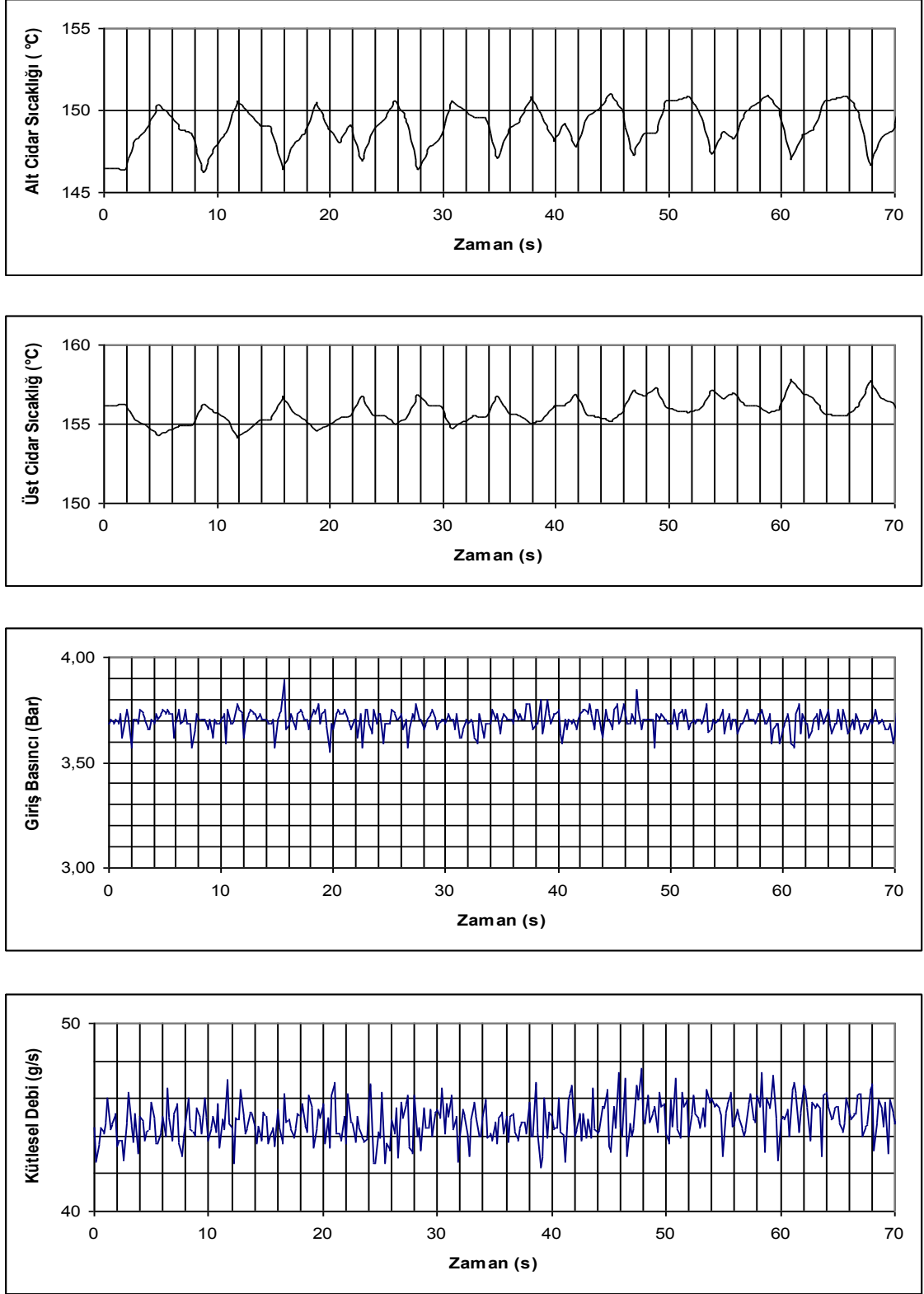
Şekil 4.22. Boru-3 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 42 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 15^\circ\text{C}$)



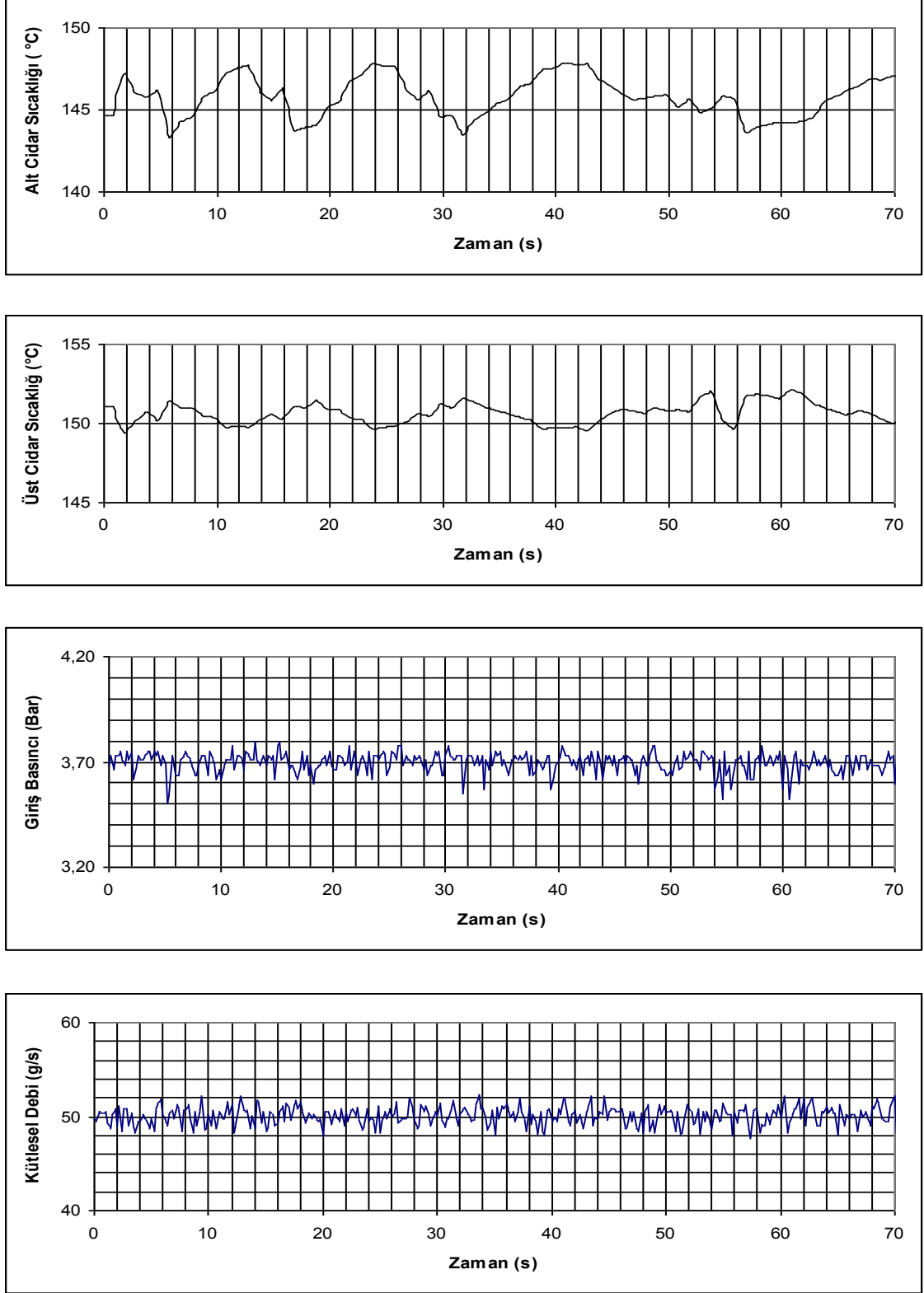
Şekil 4.23. Boru-3 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 49 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ\text{C}$)



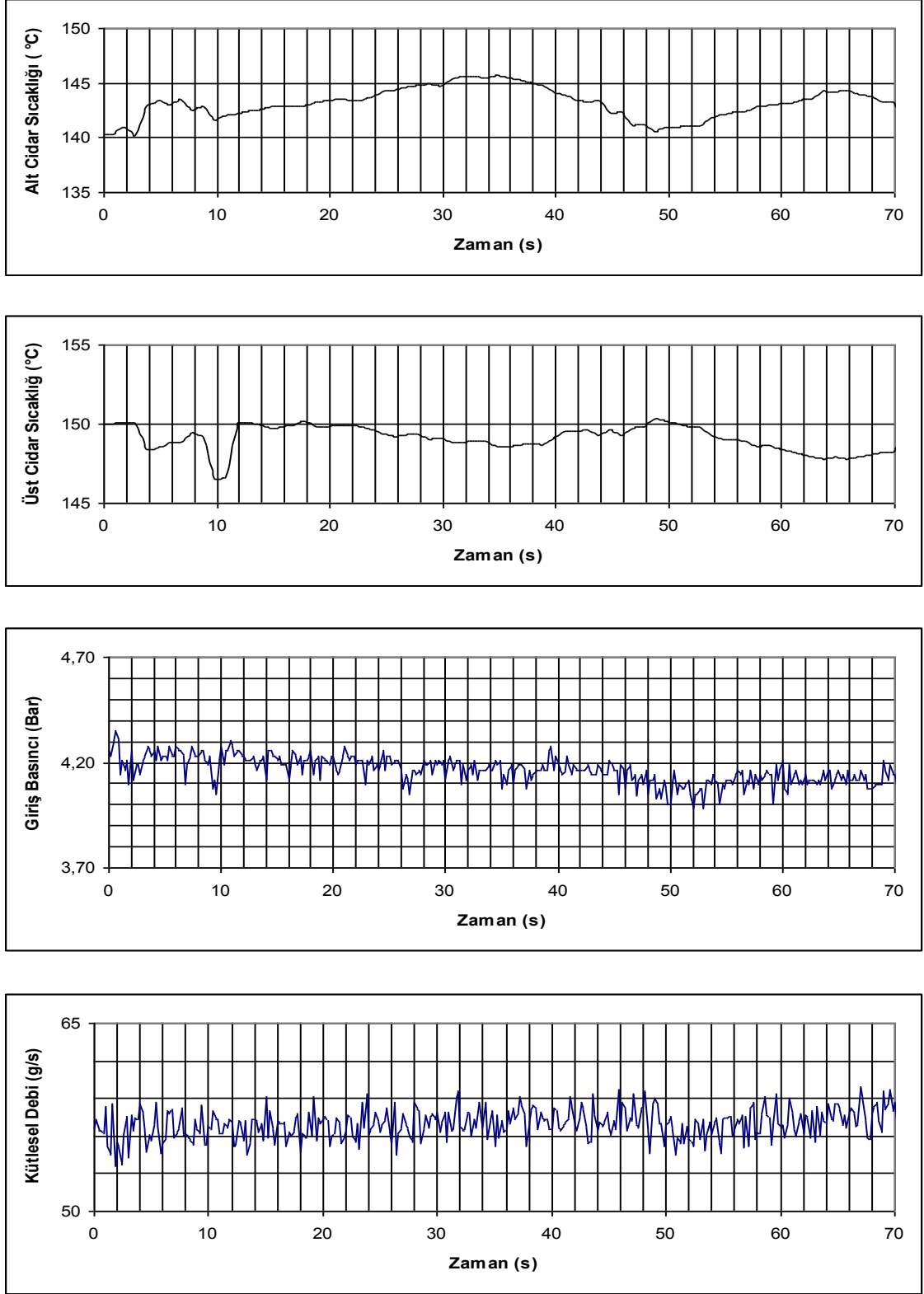
Şekil 4.24. Boru-3 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 62 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 35^\circ\text{C}$)



Şekil 4.25. Boru-2 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 45 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 15^\circ\text{C}$)



Şekil 4.26. Boru-2 için basınç düşümü osilasyonları
($\dot{m} = 50 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 25^\circ\text{C}$)



Şekil 4.27. Boru-2 için basınç düşümü osilasyonları
 ($\dot{m} = 57 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 35^\circ\text{C}$)

Beş farklı test borusundan biri olan boş boru yani Boru-1 için Şekil 4.28, 4.29’da basınç düşümü tipi osilasyonlarına giriş aşırı soğutma miktarının etkilerini görmek amacıyla değişen kütleli debi değerlerine karşılık giriş basıncının genliklerinde ve periyotlarında meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Şekil 4.30. , 4.31’de ise akışkanın kütleli debilerine bağlı olarak farklı giriş aşırı soğutma sıcaklıkları için elde edilen BDO periyot ve genlikleri görülmektedir. Şekiller, kütleli debideki azalma ile osilasyonların genlik ve periyotlarının azaldığını göstermektedir. Ayrıca diğer yüzey artırım elemanı kullanılmış dört test borusu içinde;

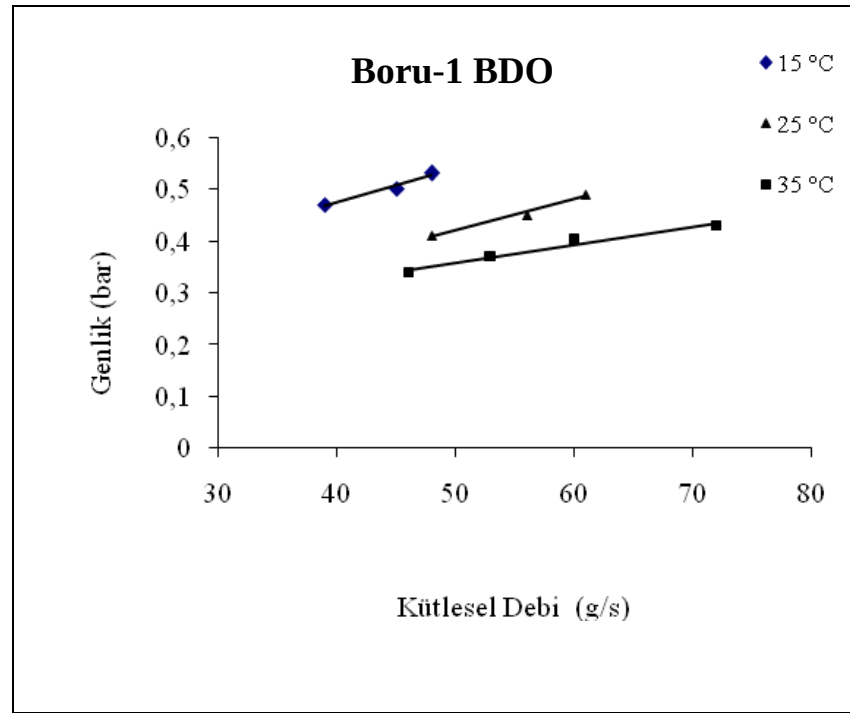
- Şekil 4.32. , 4.33. , 4.34. ve 4.35’de Boru-4 borusu için,
- Şekil 4.36. , 4.37. , 4.38. ve 4.39’de Boru-5 borusu için,
- Şekil 4.40. , 4.41. , 4.42. ve 4.43’de Boru-3 borusu için,
- Şekil 4.44. , 4.45. , 4.46. ve 4.47’de Boru-2 borusu için

kütleli debi değerlerine bağlı olarak giriş basıncının genliklerinde meydana gelen değişimler ve BDO periyotlarına kütleli debinin etkileri görülmektedir.

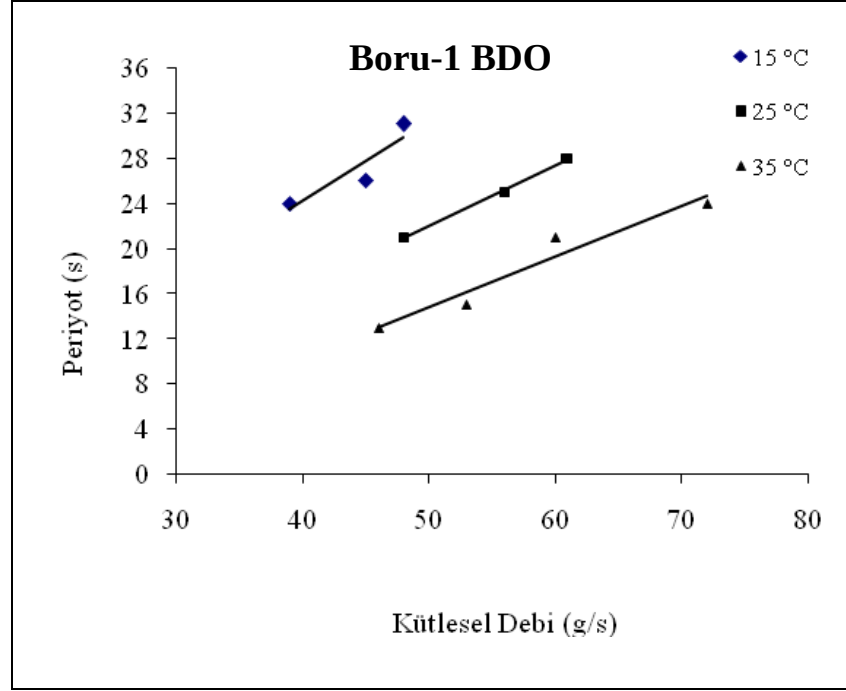
Her bir test borusu için grafiklere bakıldığında azalan giriş sıcaklığı ile beraber genliklerin arttığı tespit edilmiştir. Boş boruda genlik artışları yüzey artırımı borularda olandan daha fazladır. Bunun nedeni karakteristik durum eğrilerinde tüm test boruları için minimum ve maksimum noktalar arası farkların boş borudan daha büyük olmasıdır. Yani maksimum ve minimum noktaları arasındaki fark büyüdükçe akış ortamında meydana gelen osilasyonların genlikleri de büyümektedir. Azalan kütleli debi ile genlik ve periyotların azalması debideki azalmayla üretilen buhar hacminin artması ve bunun sonucunda boru içerisindeki basınç artmakta ve dengeleyici tank içerisindeki sıkıştırılabilir hacmin azalmasına olduğu sebep olmaktadır. Sistemin bu durumda sıkıştırılabilirliği azalmakta ve sonuçta osilasyon genlik ve periyotlarında da bir azalmaya yol açmaktadır.

Giriş sıcaklığı azaldıkça genlik ve periyotların arttığı görülmektedir. Farklı giriş sıcaklıkları için çizilen karakteristik eğriler incelendiğinde Şekil 4.1.’deki farklı giriş

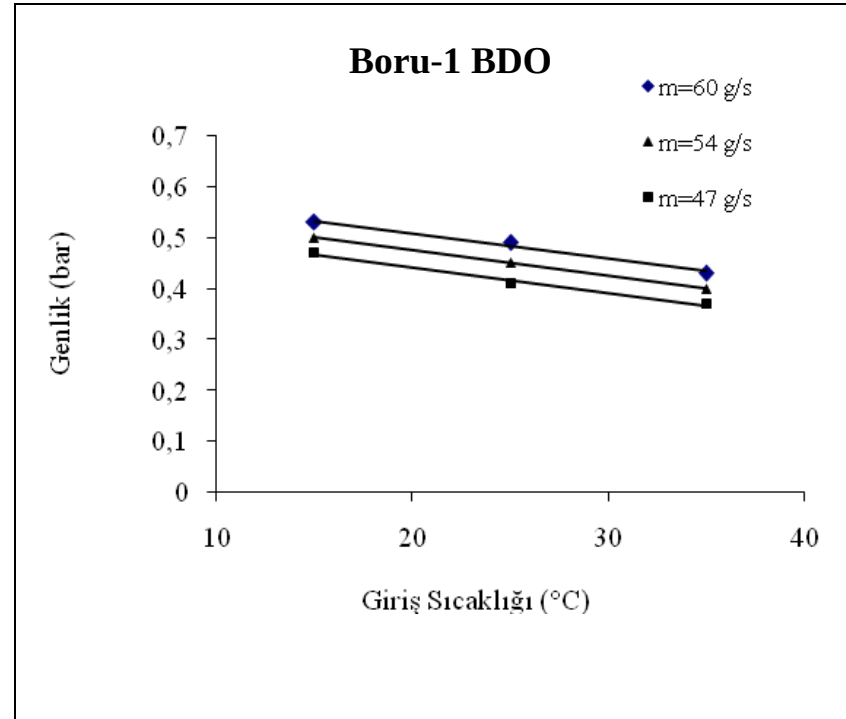
sıcaklıkları için elde edilen maksimum noktaların birbirlerine çok yakın olduğu, halbuki minimum noktaların ise birbirlerinden daha uzak olduğu ve en düşük sıcaklığa karşılık gelen eğrinin minimum düzeyinde görülmektedir. Bu ise maksimum ve minimum basınçlar arasındaki farkın giriş sıcaklığı düştükçe arttığını göstermektedir. Bu nedenlerle limit çevrime dikkat edilirse BDO düşük giriş sıcaklıklarında büyük genlikli osilasyonlar üretilmekte ve sonuçta periyotlar büyük olmaktadır (Karagöz 2007).



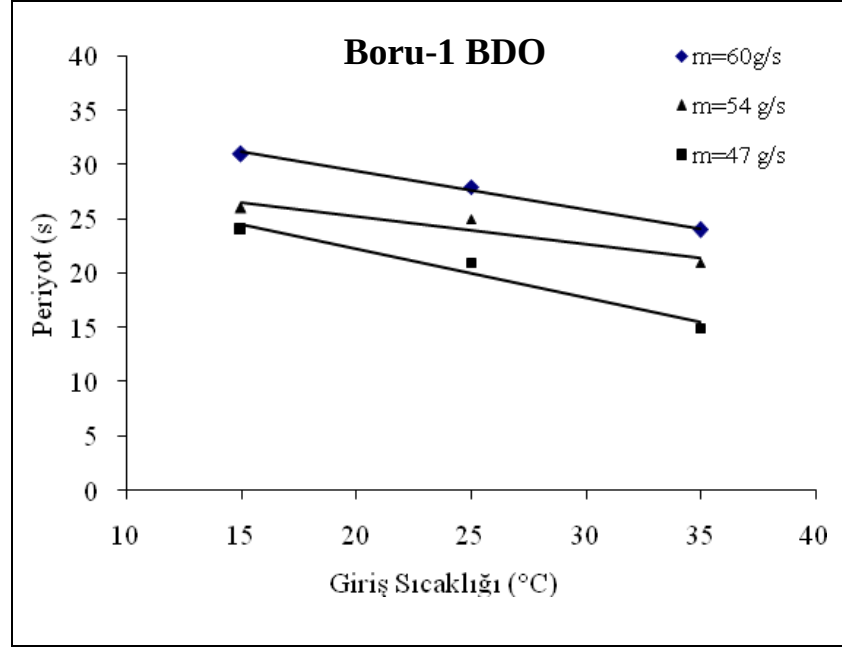
Şekil 4.28. Boru-1 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi



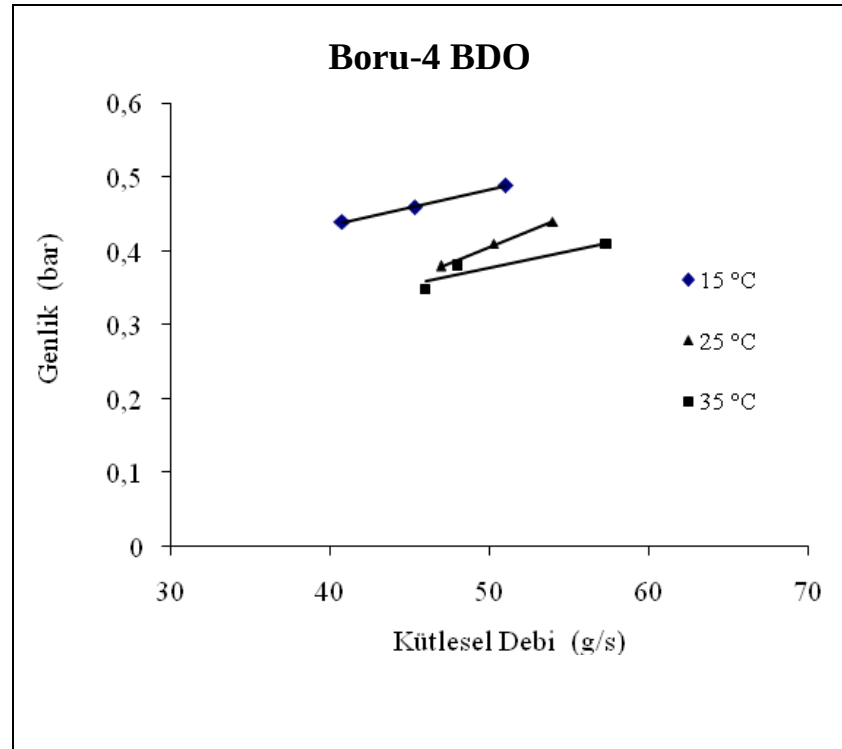
Şekil 4.29. Boru-1 için giriş basınç periyotlarına kütlesel debi ve aşırı soğutmanın etkisi



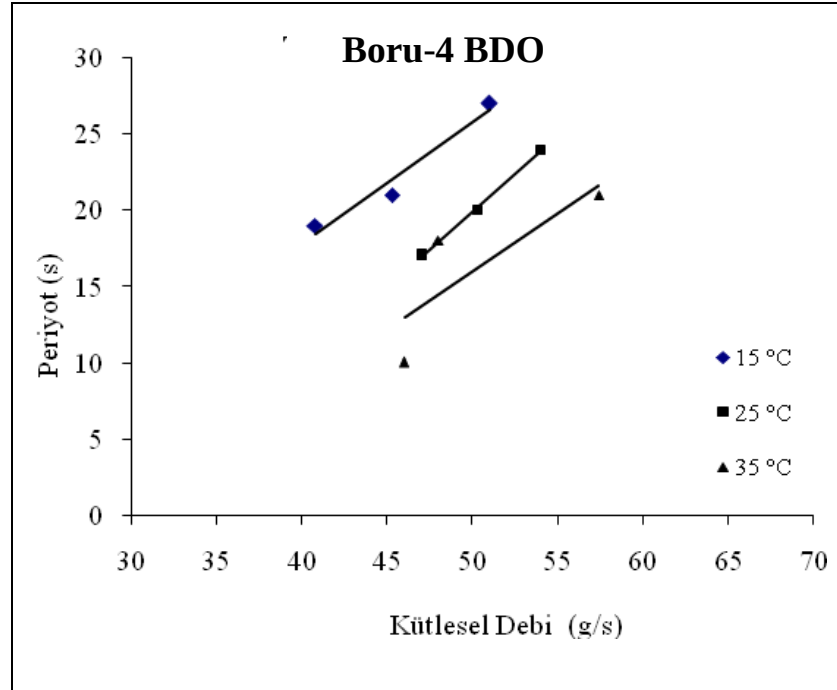
Şekil 4.30. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



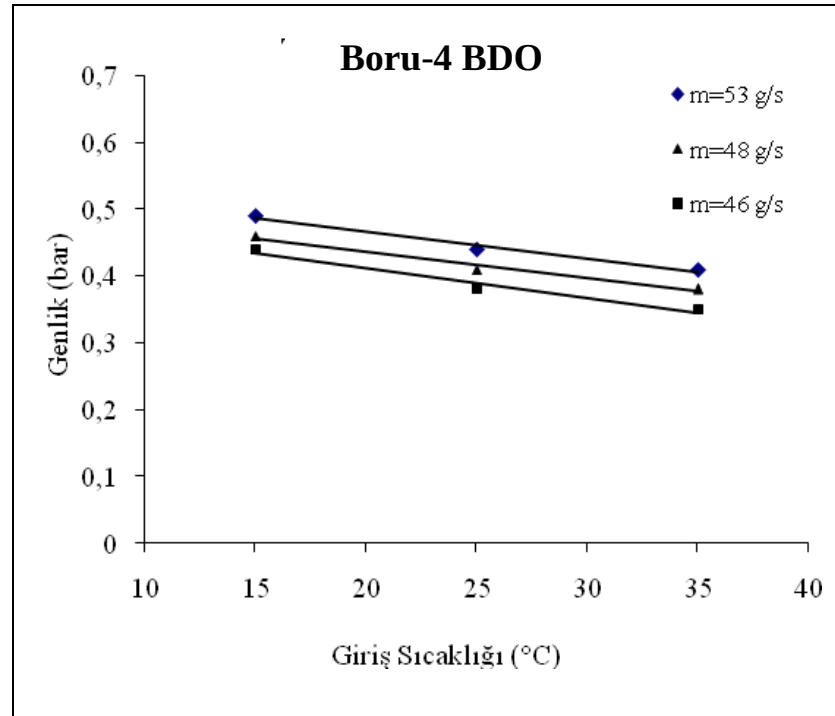
Şekil 4.31. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



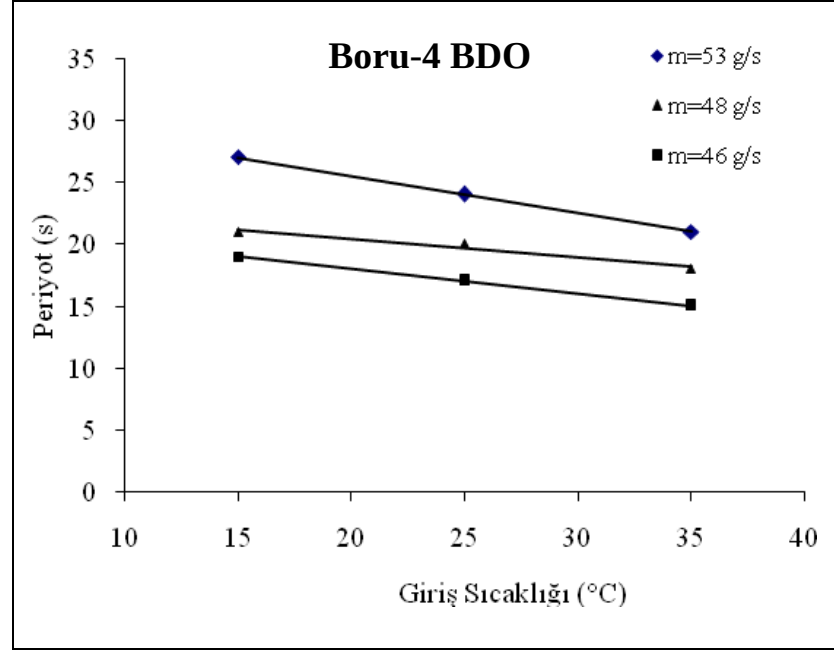
Şekil 4.32. Boru-4 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi



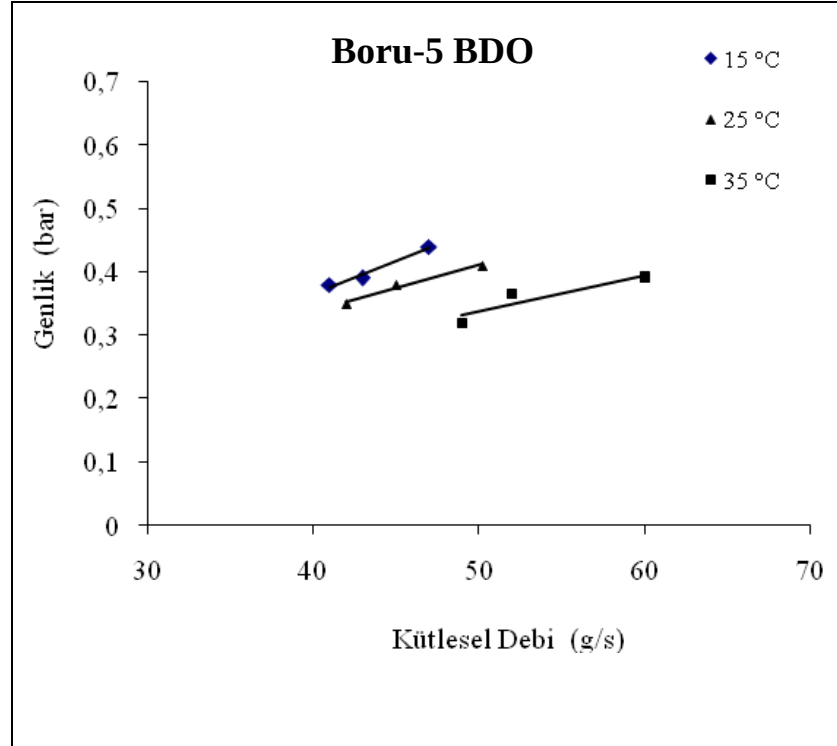
Şekil 4.33. Boru-4 için giriş basınç periyotlarına kütlesel debi ve aşırı soğutmanın etkisi



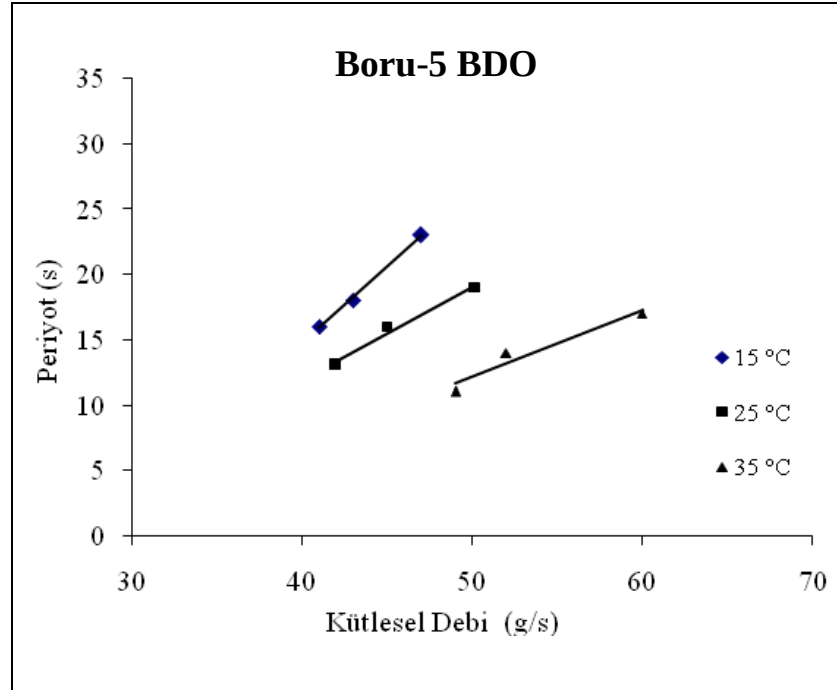
Şekil 4.34. Boru-4 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



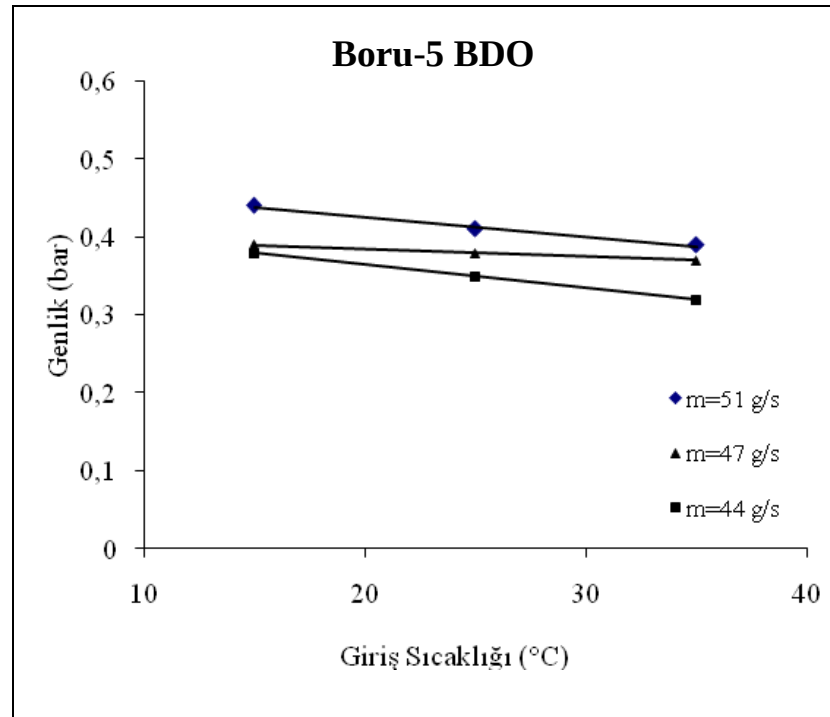
Şekil 4.35. Boru-4 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



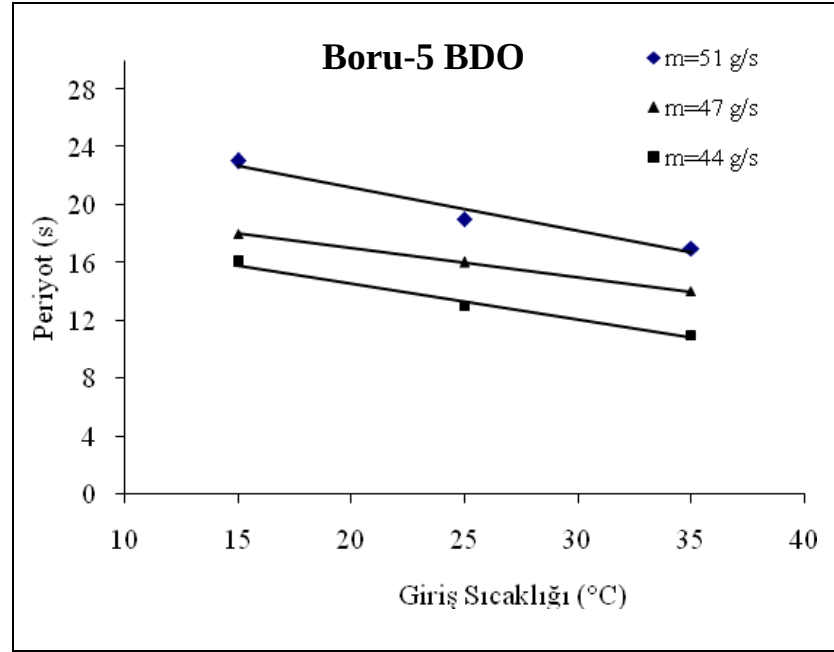
Şekil 4.36. Boru-5 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi



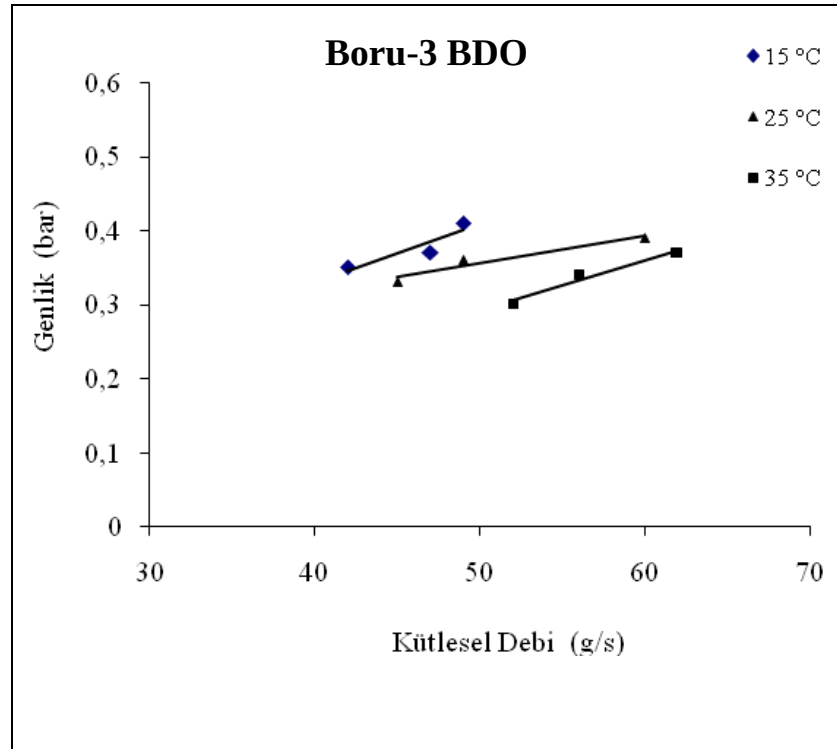
Şekil 4.37. Boru-5 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi



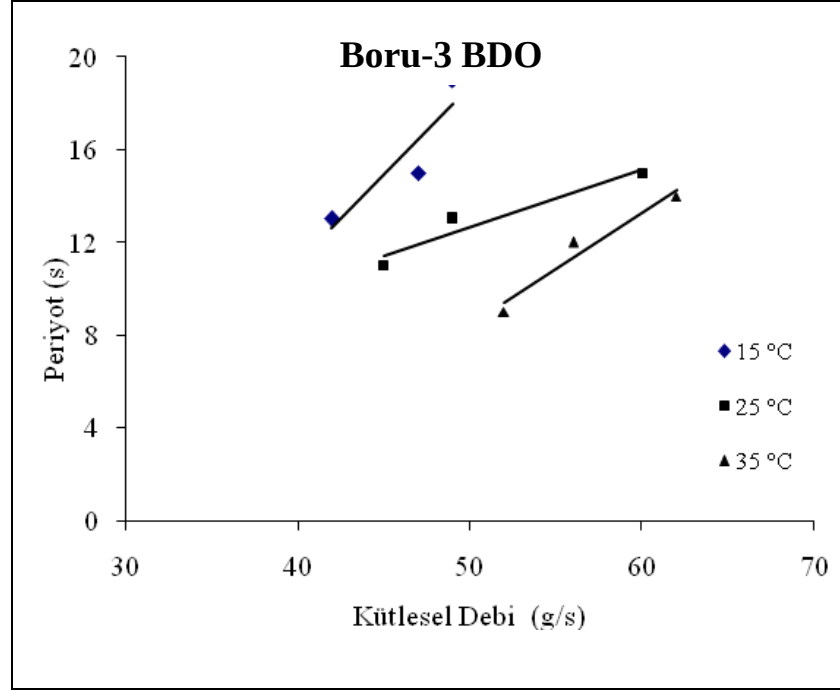
Şekil 4.38. Boru-5 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



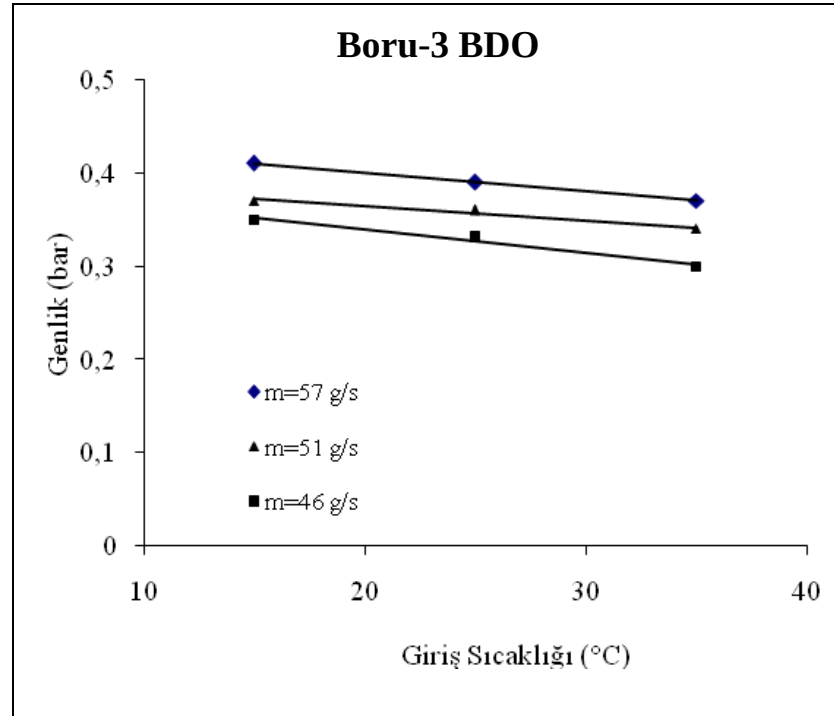
Şekil 4.39. Boru-5 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



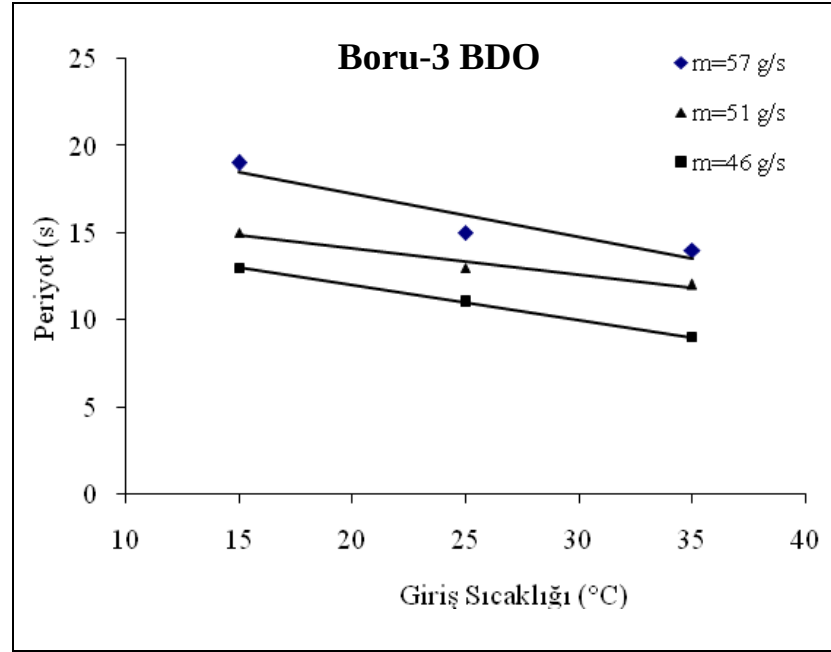
Şekil 4.40. Boru-3 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi



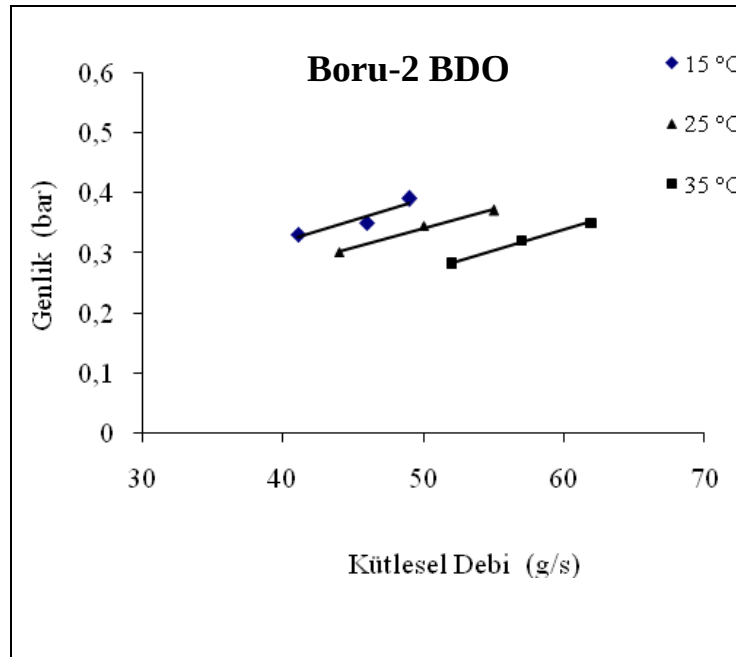
Şekil 4.41. Boru-3 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi



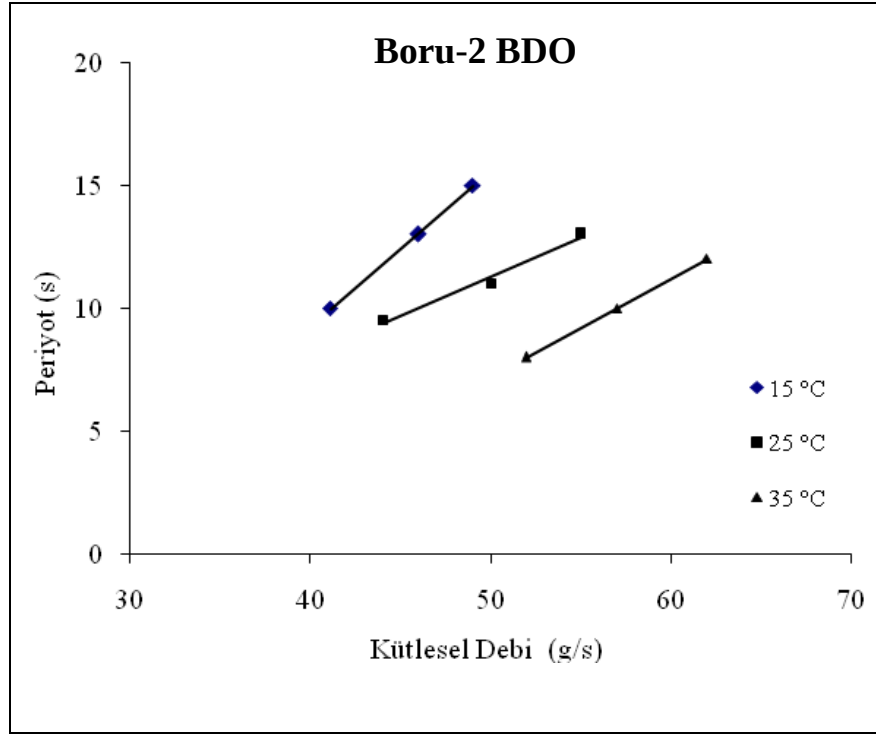
Şekil 4.42. Boru-3 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



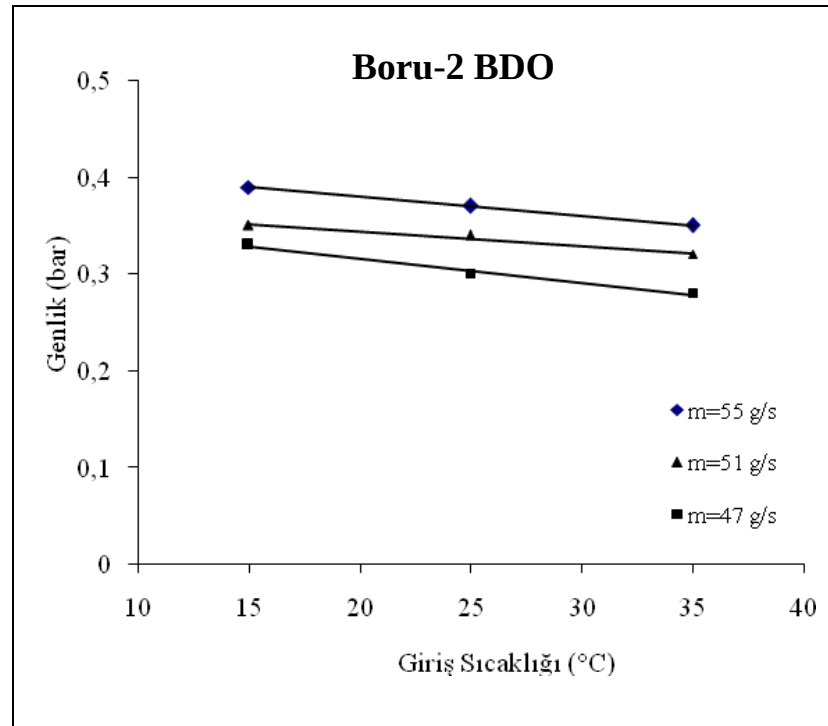
Şekil 4.43. Boru-3 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



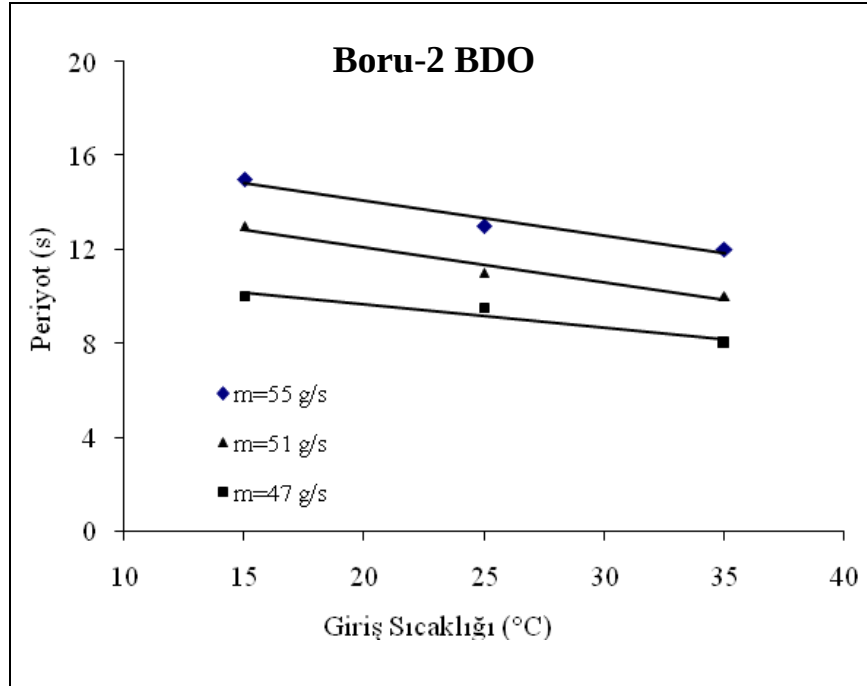
Şekil 4.44. Boru-2 için giriş basınç genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi



Şekil 4.45. Boru-2 için giriş basınç periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkisi

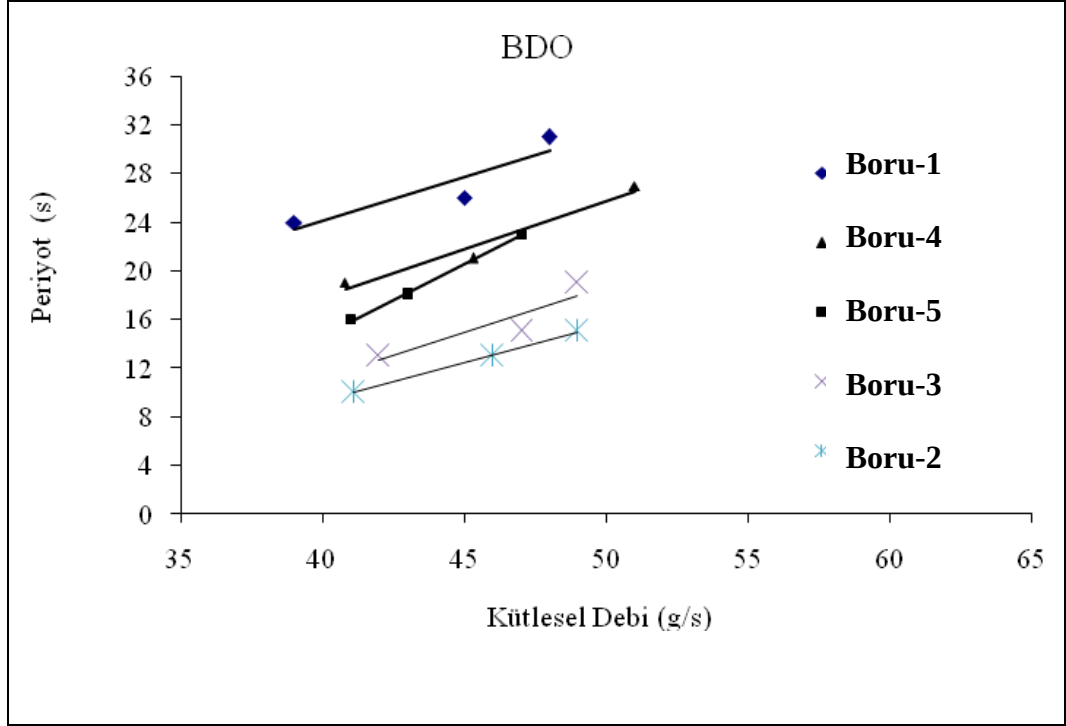


Şekil 4.46. Boru-2 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi

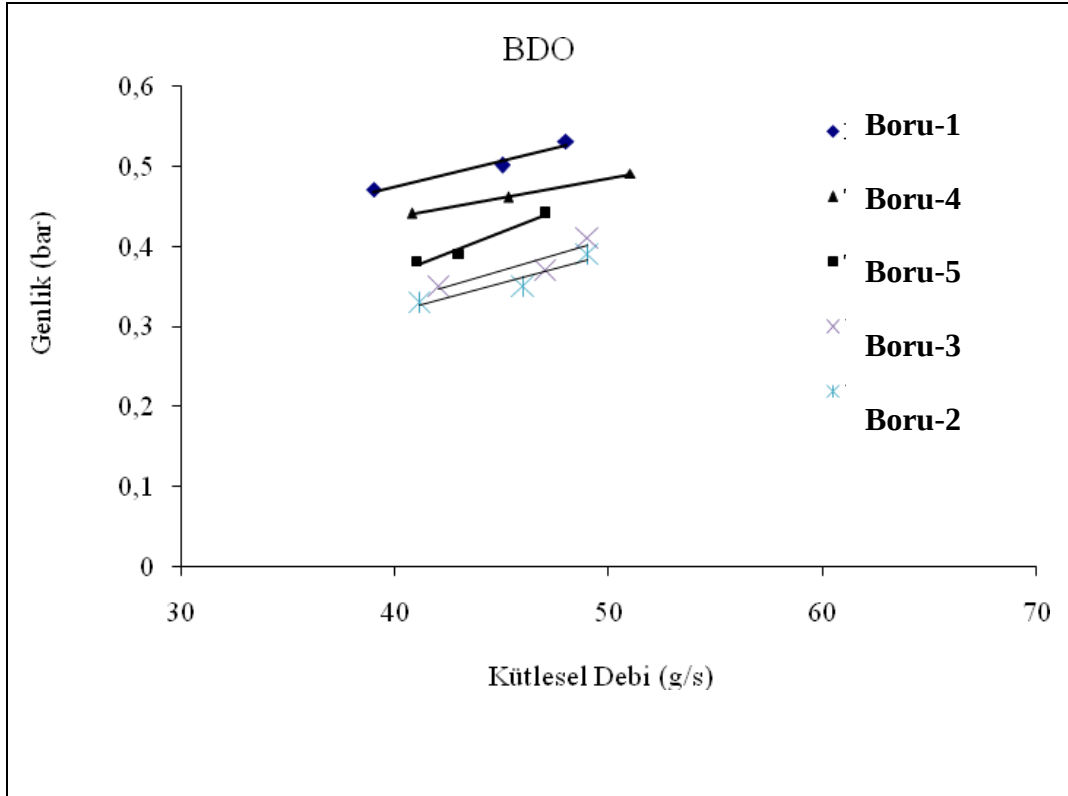


Şekil 4.47. Boru-2 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi

Şekil 4.48. ve Şekil 4.49'da beş adet test borusu için $T_g=15^\circ\text{C}$ 'da sırasıyla giriş basınç periyotlarına ve genliklerine; kütleli debinin etkileri incelenmiştir. Bütün test boruları için artan kütleli debi miktarı ile giriş basınçlarına ait periyot ve genliklerin arttığı görülmektedir. Genlik ve periyotların büyüklükleri açısından bir sıralama yapılırsa boş boru tipinde genlik ve periyot miktarı büyüklüğü diğer yüzey artırımı borulara oranla daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.48. ve 4.49'da verilen grafikte genlik ve periyot değerlerine bakılırsa büyükten küçüğe doğru, Boru-1 > Boru-4 > Boru-5 > Boru-3 > Boru-2, şeklinde sıralanmaktadır. Bu sıralamaya göre efektif çapı büyük olan boş boru, en büyük genlik ve periyot değerine; efektif çapı en küçük olan Boru-2 borusu ise en küçük genlik ve periyot değerine sahiptir. Yani efektif çap arttıkça periyot ve genliklerin arttığını söyleyebiliriz. Ayrıca aynı şekle sahip yüzey artırım elemanları için adım büyüklüğü arttıkça genlik ve periyotlarında arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.48. Tüm borular için giriş basınç periyotlarına kütleli debinin etkisi



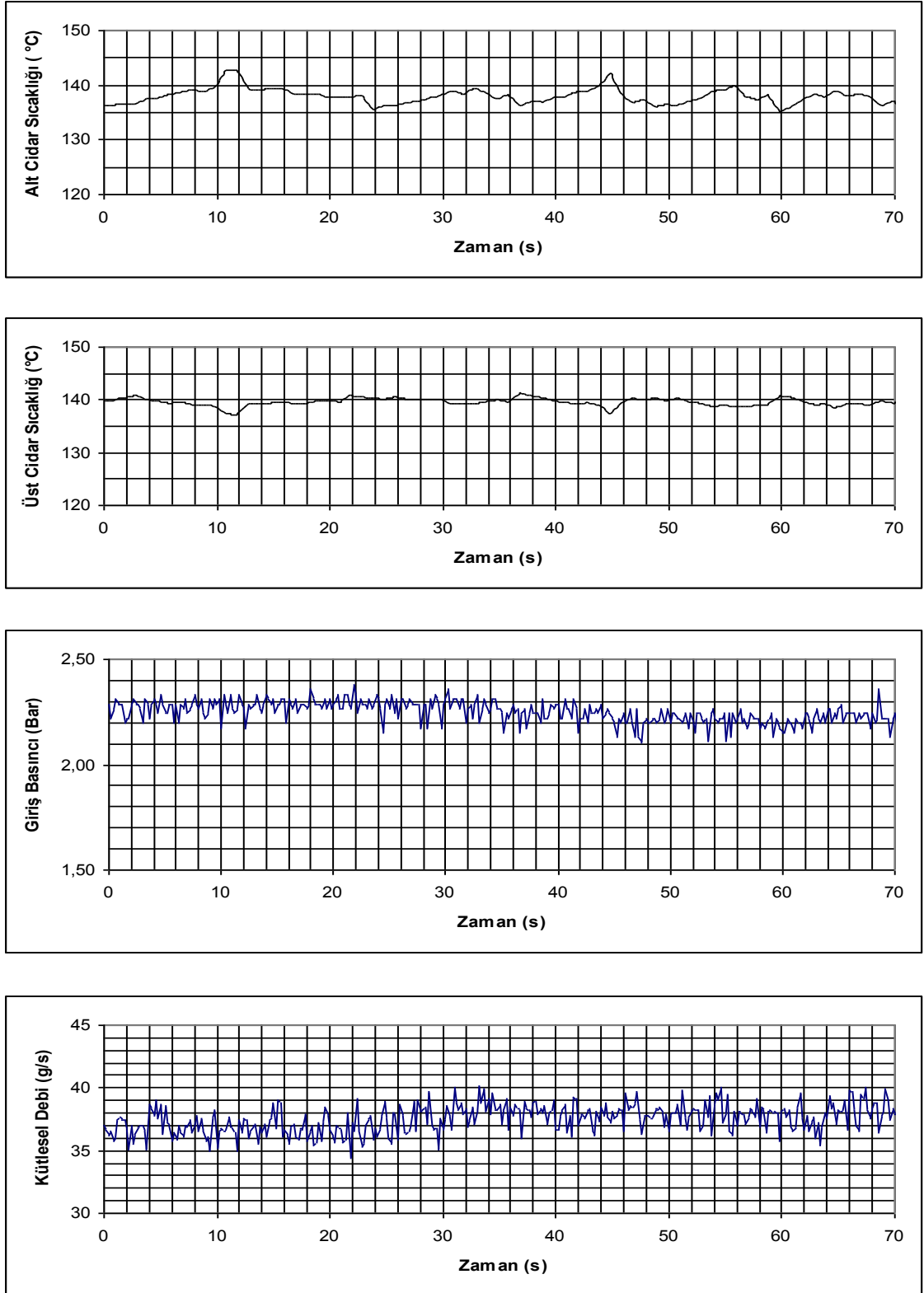
Şekil 4.49. Tüm borular için basınç genliklerine kütleli debinin etkisi

4.4. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar

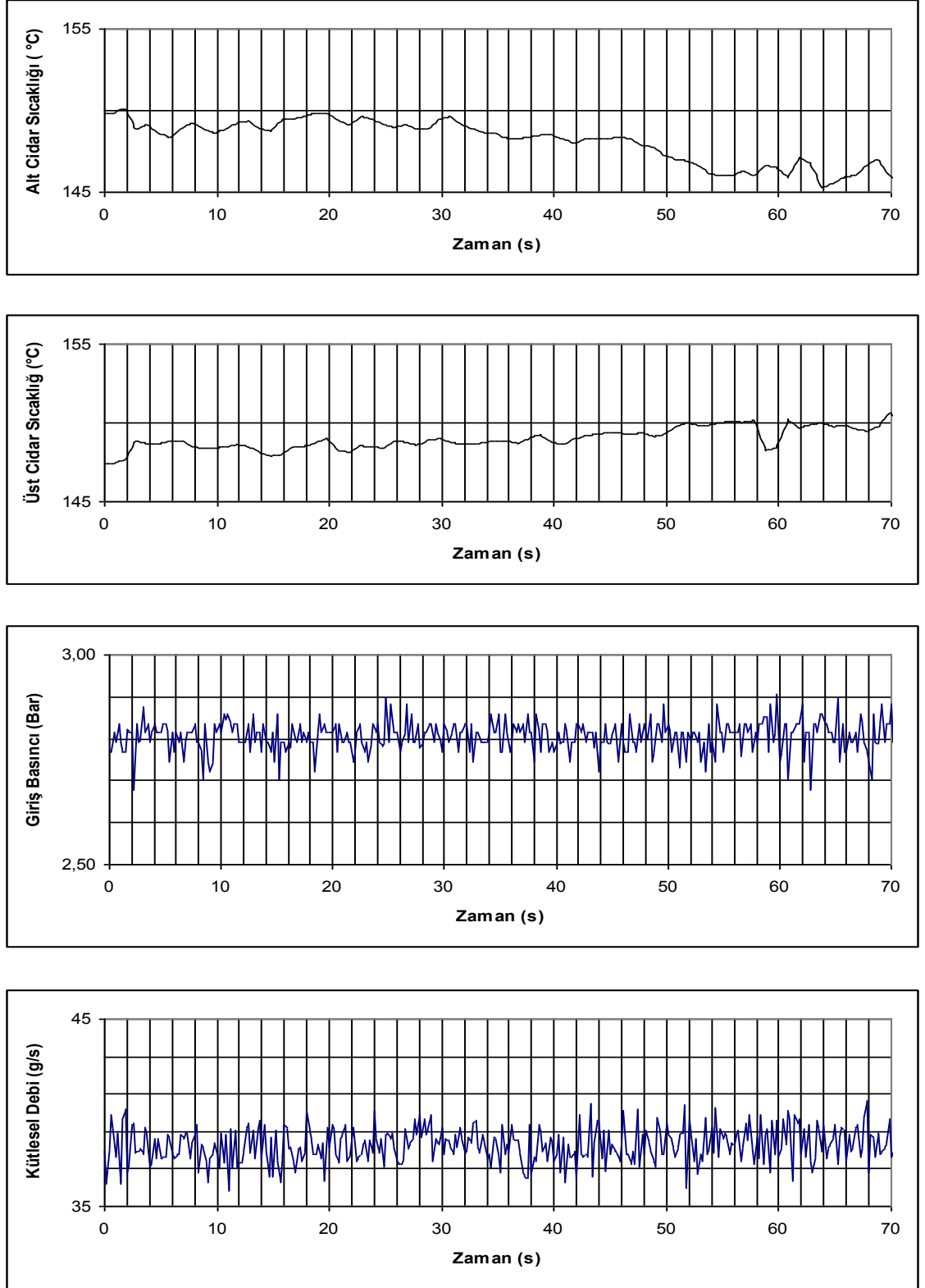
Basınç düşümü osilasyonlarla süperimpozed biçimde ortaya çıkan yoğunluk değişim tipi osilasyonlar, kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde meydana gelmektedir. Yoğunluk değişim tipi osilasyonlar akış ortamında tam kaynama durumunda ve akış biçiminin hidrodinamik davranışları sonucu ortaya çıkmaktadır. Negatif eğimli bölgede BDO tipi osilasyonlarla süperimpozed biçimde ortaya çıkan YDO tipi osilasyonlar, kütsel debi değeri azalıp negatif eğimli bölgenin üst noktalarına ilerlendikçe yani kararsız bölgeye doğru geçtikten sonra saf YDO tipi osilasyonların ortaya çıktığı görülmektedir. Saf YDO'nun genlik ve periyot değerleri BDO'ya kıyasla daha düşüktür. Ayrıca saf YDO'lar boş boru tipinde yüzey artırımı borulara kıyasla daha büyük kütsel debilerde ortaya çıkmaktadırlar. BDO'ların oluşması için en önemli şart sıkıştırılabilir hacmin bulunması iken YDO'larda ise void fraction olarak adlandırılan uygun bir boşluk oranının akış ortamında oluşmasıdır. İki fazlı akışta boş boruda yoğunluk farkından ötürü katmanlaşma olayı net biçimde gerçekleşirken içerisinde yüzey artırım elemanı kullanılmış diğer test borularında bu katmanlaşma olayı boş boru tipine nazaran olmamaktadır. Bunun nedeni fazların karışması ve karışım şeklinde akmasıdır. YDO oluşumunda iki ayrı faza sahip akışkanın farklı yoğunluklara sahip olduğu bilinmektedir. Bu durumda beş test borusu için YDO oluşumlarının oluşması için yeterli boşluk oranının oluşması şartı boş boru tipine nazaran yüzey artırım elemanlı boru tiplerinde çapraz kesit alanında yeterli oranda buhar fazının yer almasıyla elde edilebilir. Akış ortamını kesmeyen ve fazlara karışım etkisi olmayan boş boru tipinde yoğunluk farklarından ötürü katmanlaşmaya uğramış akış için uygun boşluk oranı diğer elemanlı tiplere göre daha azdır.

Boş boru tipi ve yüzey artırımı dört farklı test borusu için saf YDO'ları farklı giriş sıcaklıkları ve kütsel debiler için verilmiştir. Şekil 4.50. , 4.51. ve 4.52'de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boş boru yani Boru-1 için örnek yoğunluk değişim tipi osilasyonlar, Şekil 4.53. , 4.54. ve 4.55'de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-4 borusuna ait saf yoğunluk değişim tipi osilasyonlar, Şekil 4.56. , 4.57. ve

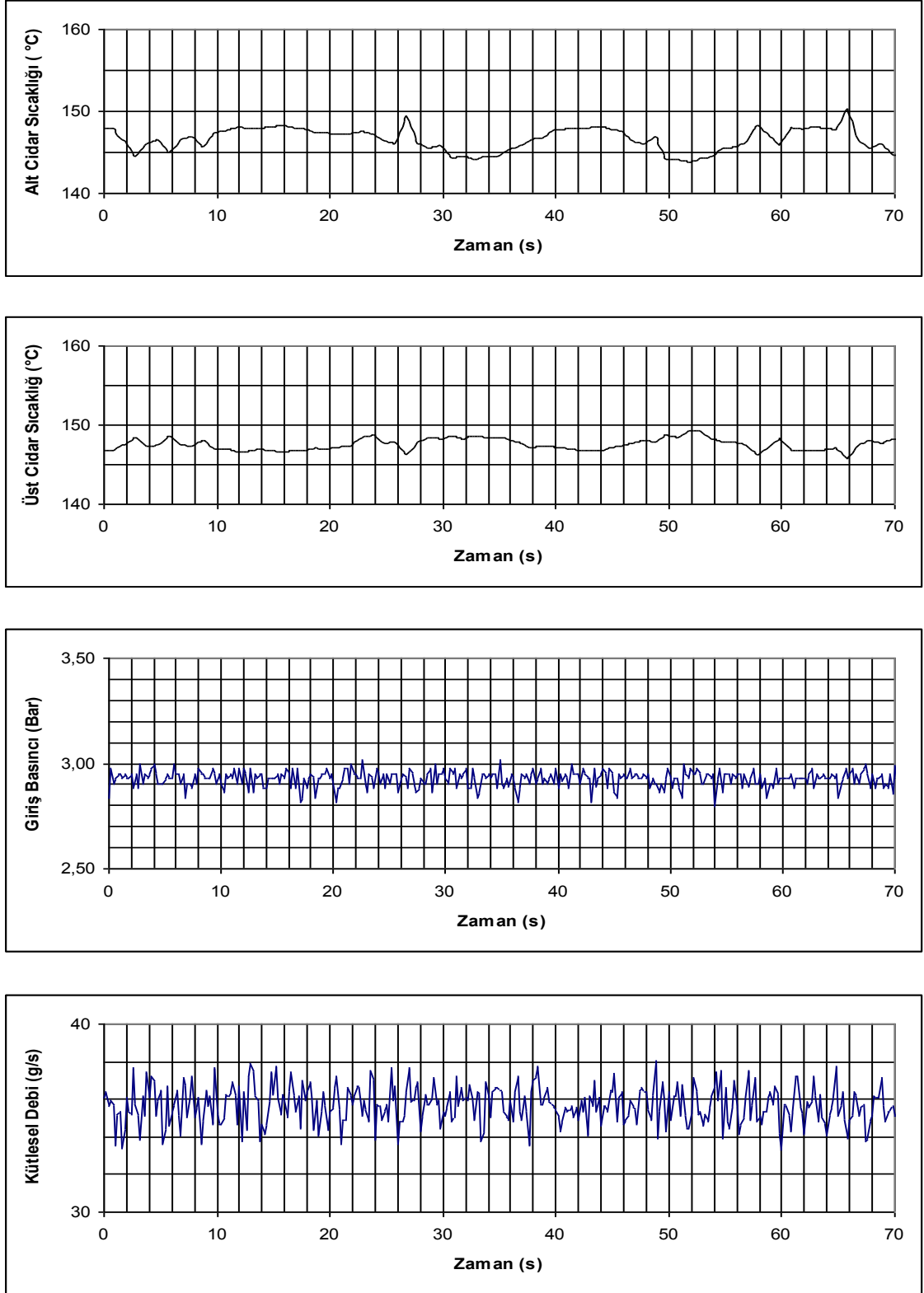
4.58’da sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-5 borusuna ait saf yoğunluk değişim tipi osilasyonlar, Şekil 4.59, 4.60 ve 4.61’de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-3 borusuna ait saf yoğunluk değişim tipi osilasyonlar ve Şekil 4.62. , 4.63. ve 4.64’de sırasıyla üç farklı giriş sıcaklığında ($T_g = 15^\circ C$, $T_g = 25^\circ C$, $T_g = 35^\circ C$) oluşturulan Boru-2 borusuna ait saf yoğunluk değişim tipi osilasyonlar gösterilmiştir.



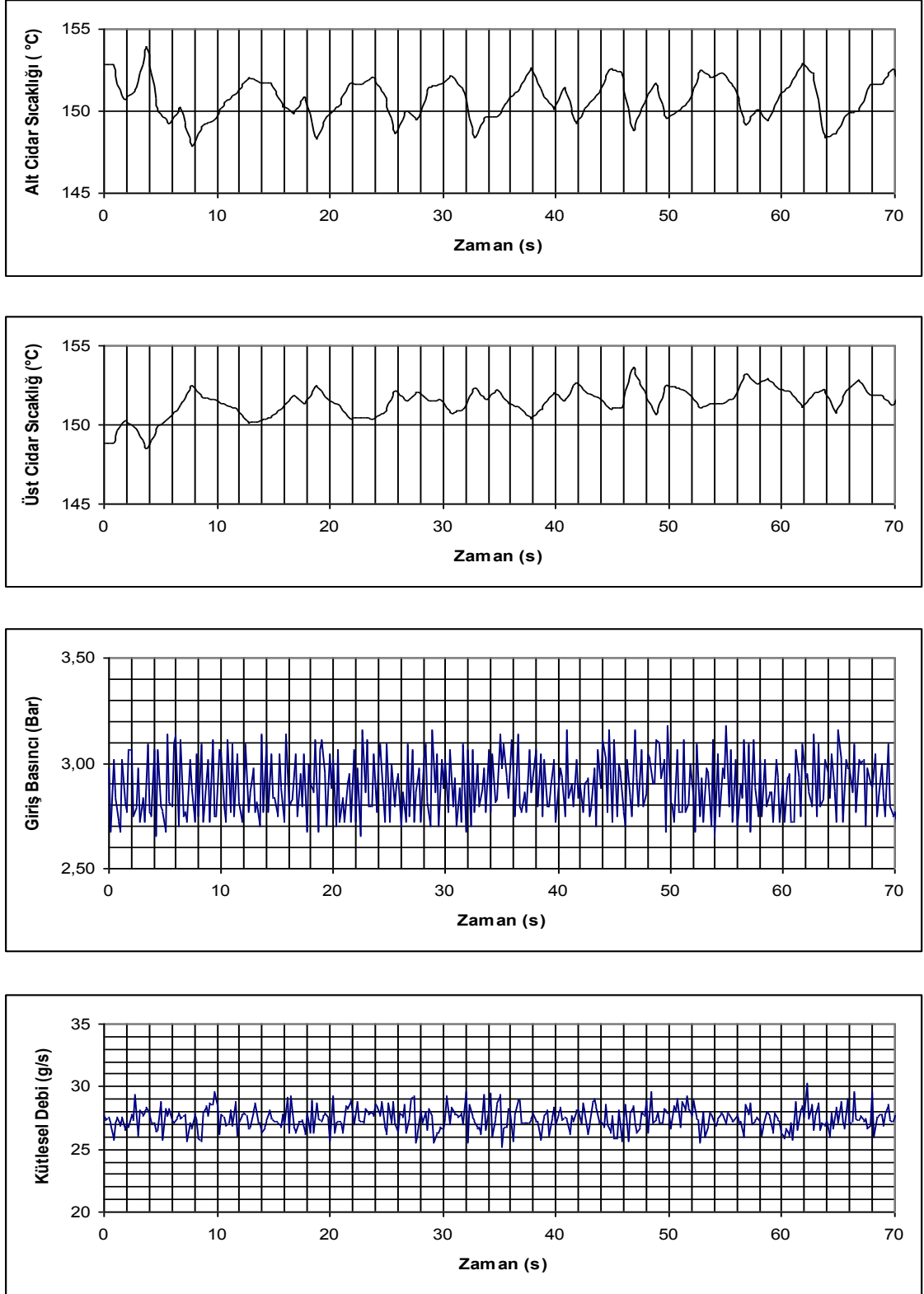
Şekil 4.50. Boru-1 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 37 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



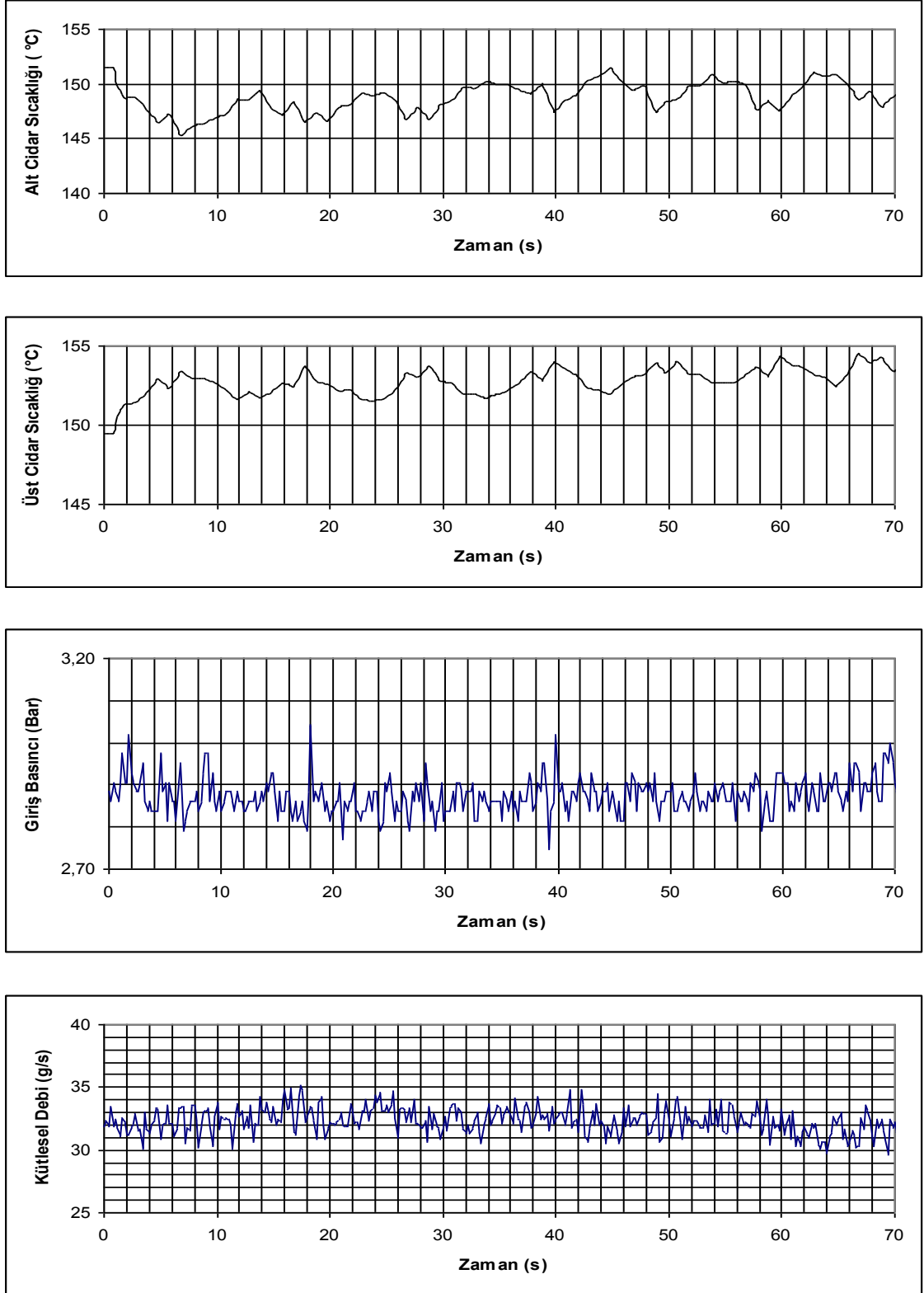
Şekil 4.51. Boru-1 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 38 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)



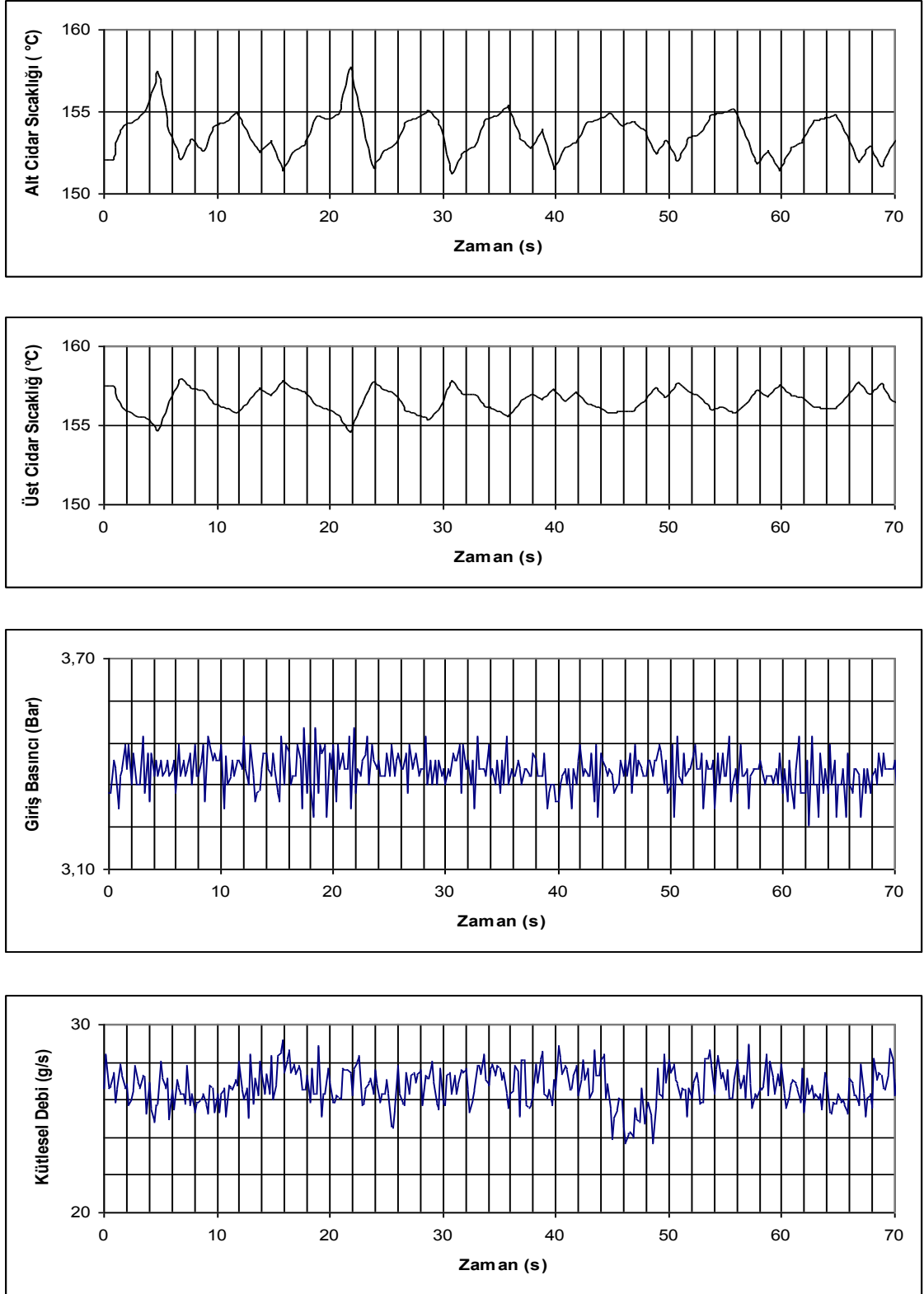
Şekil 4.52. Boru-1 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 37 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)



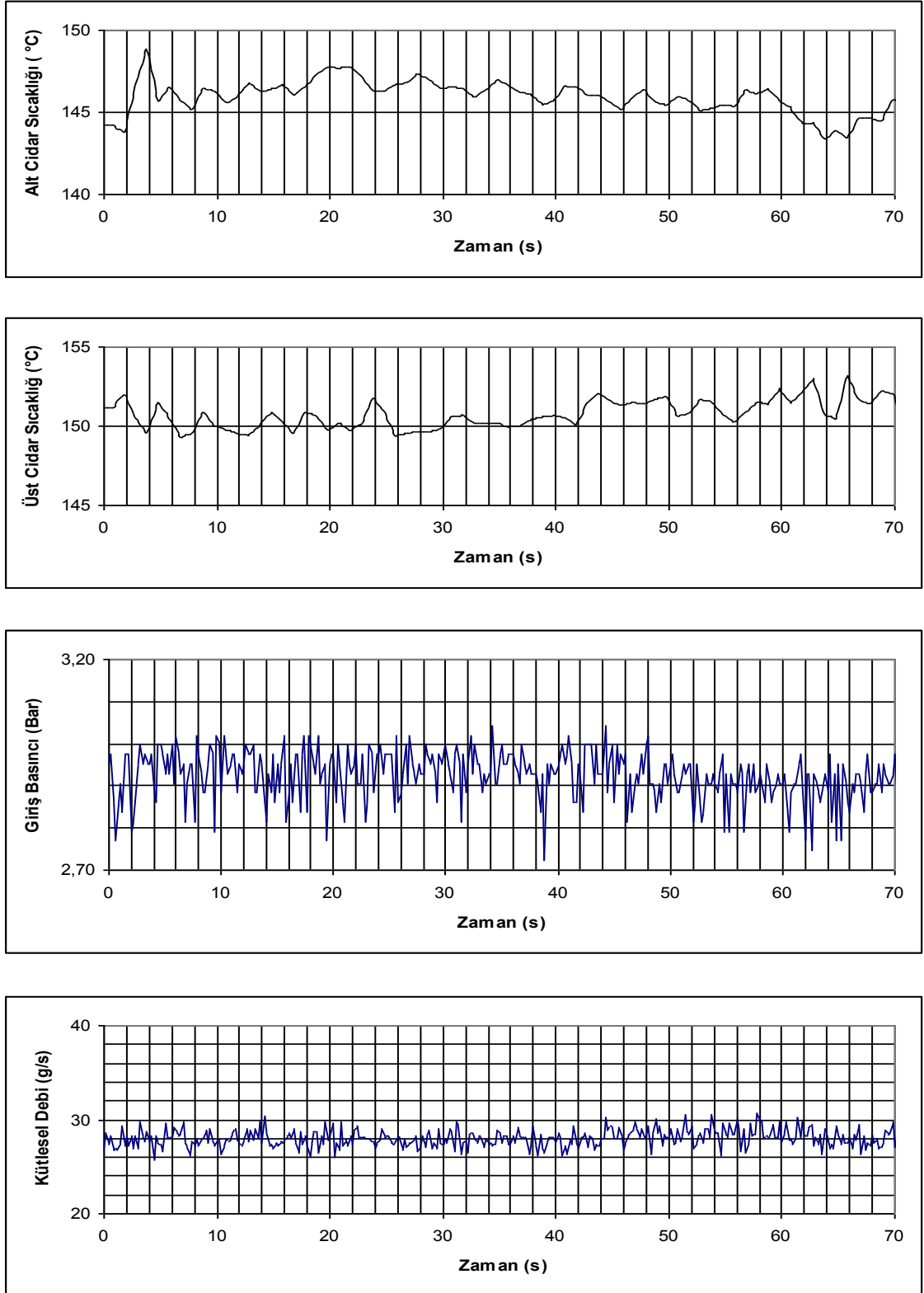
Şekil 4.53. Boru-4 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 27 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



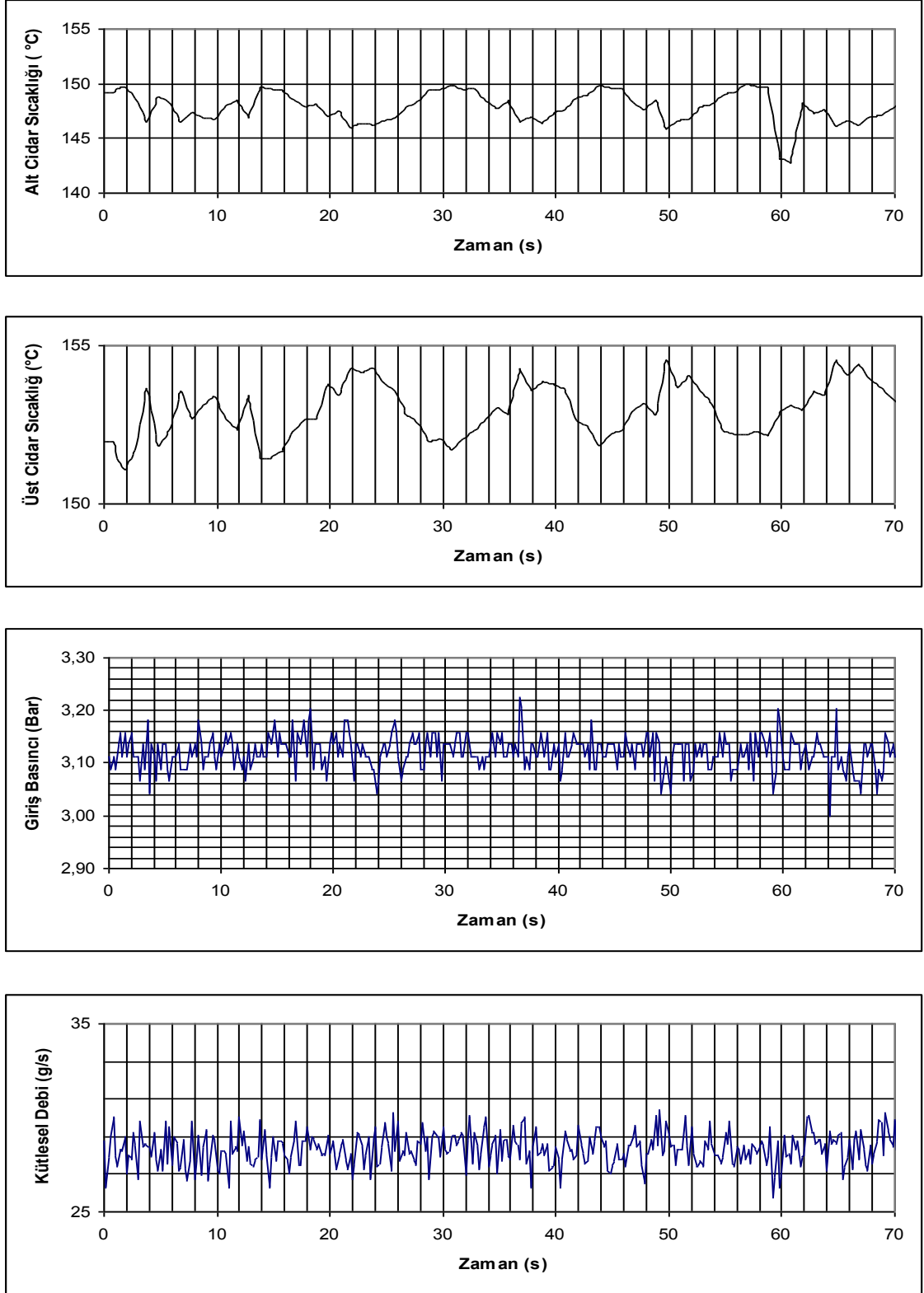
Şekil 4.54. Boru-4 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 32 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)



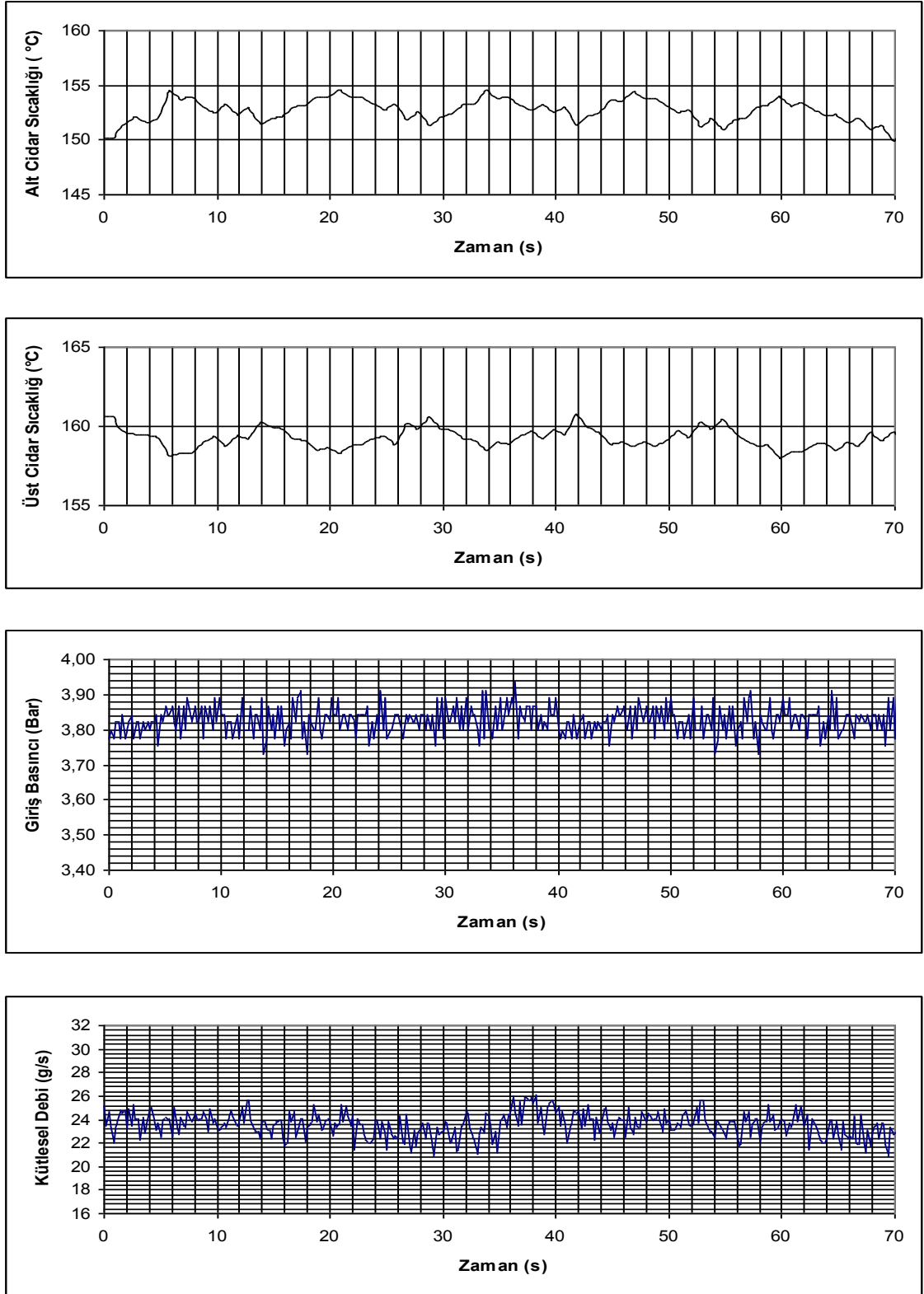
Şekil 4.55. Boru-4 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 27 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)



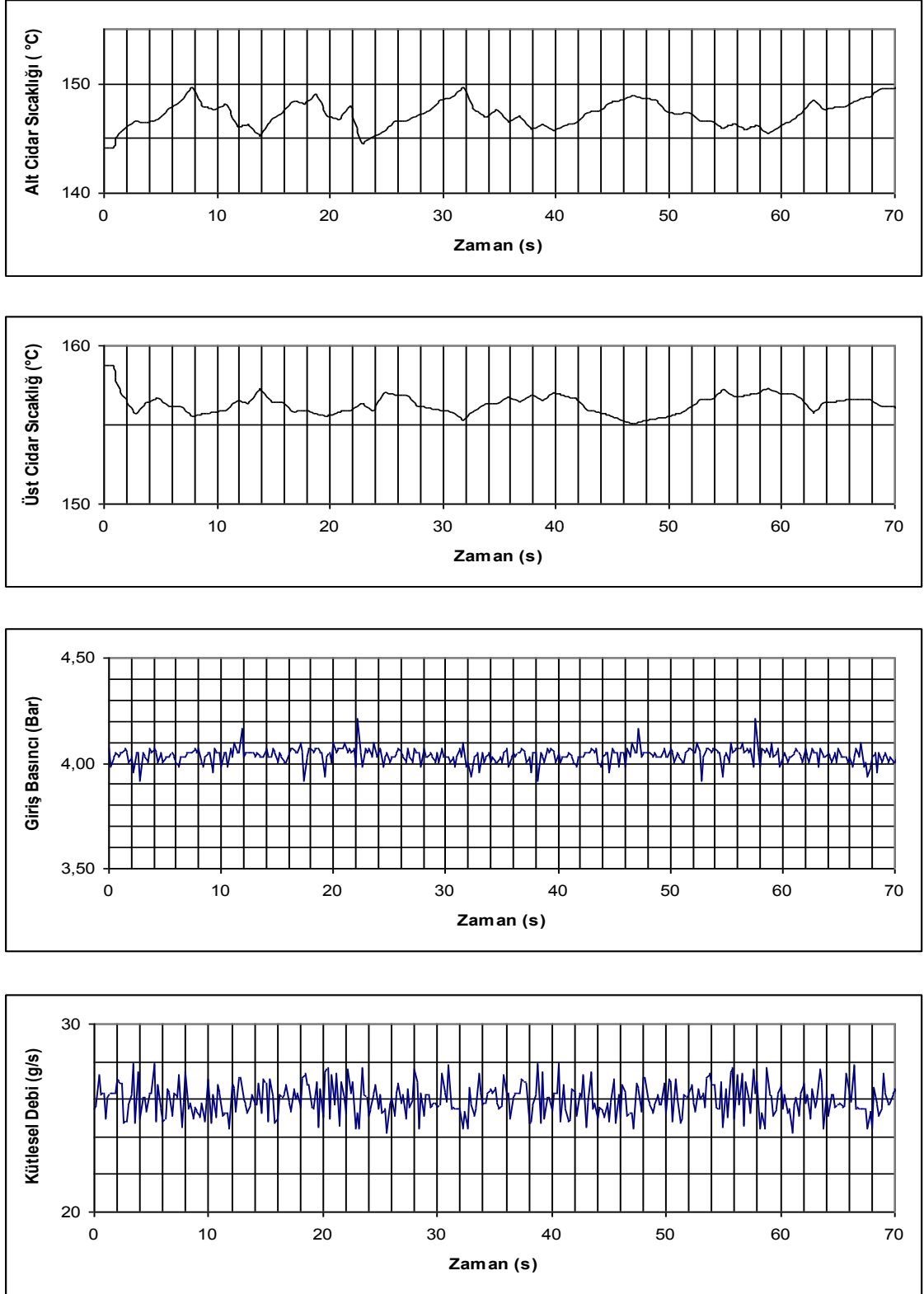
Şekil 4.56. Boru-5 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 28 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



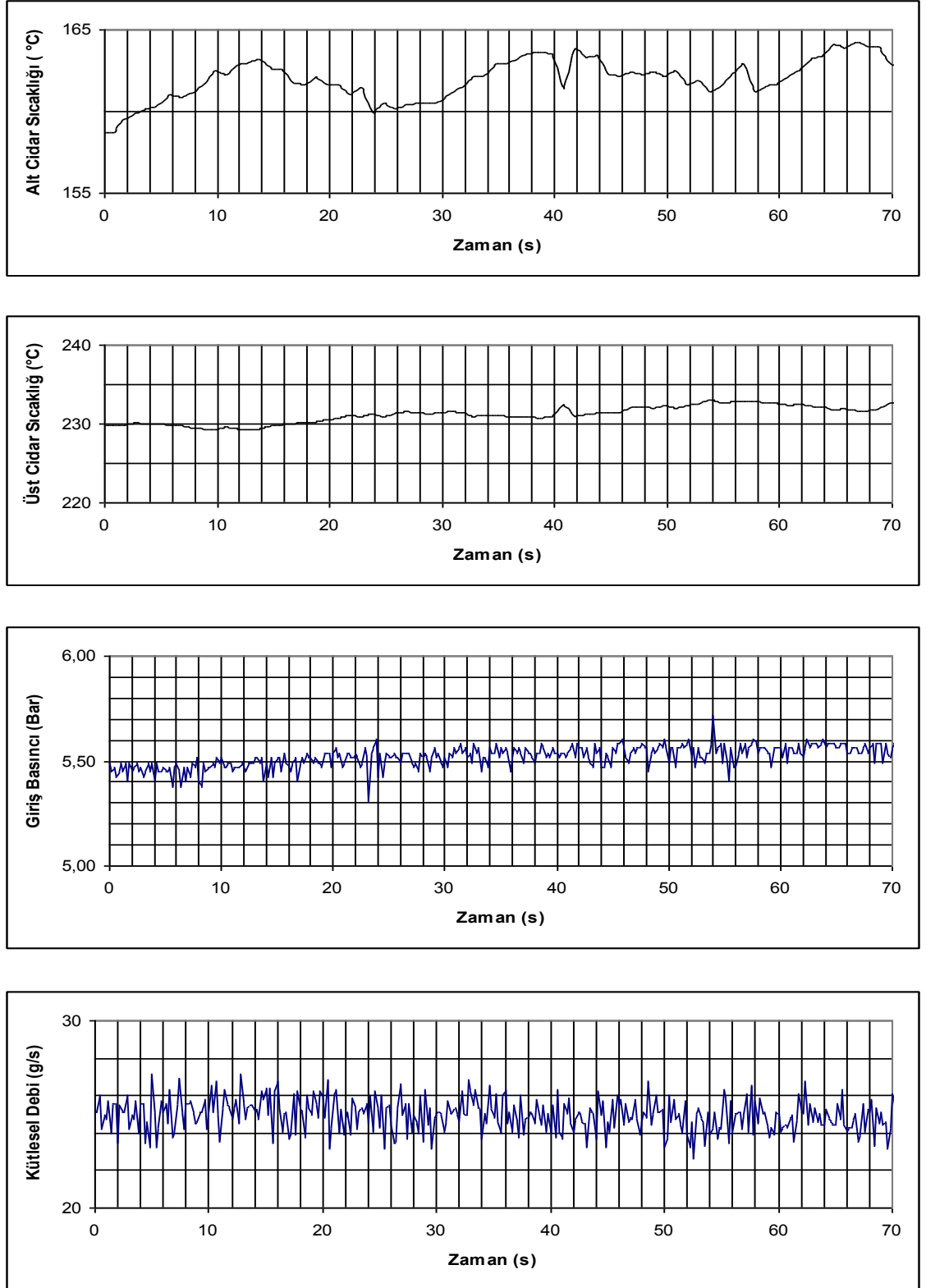
Şekil 4.57. Boru-5 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 28 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)



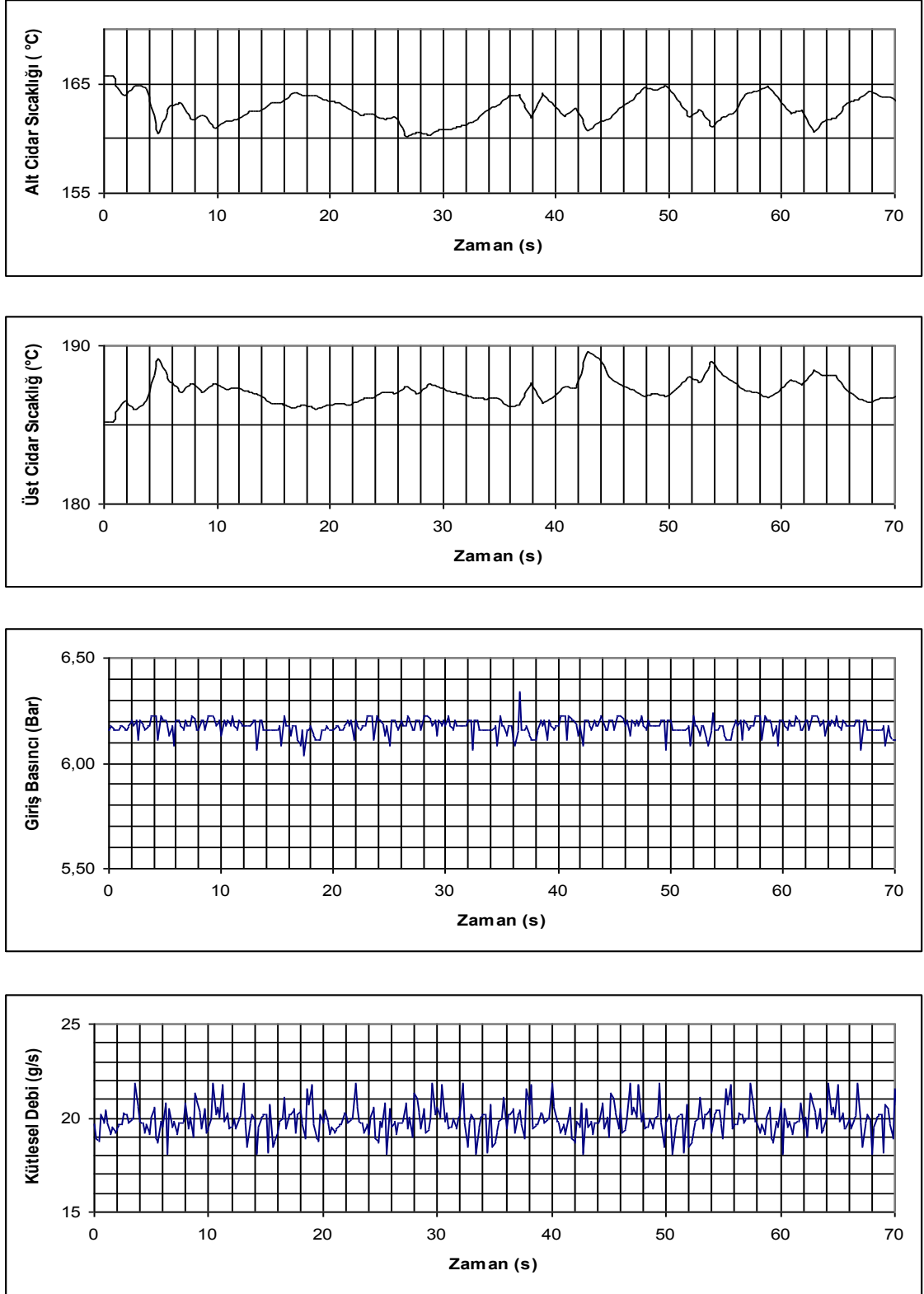
Şekil 4.58. Boru-5 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 24 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)



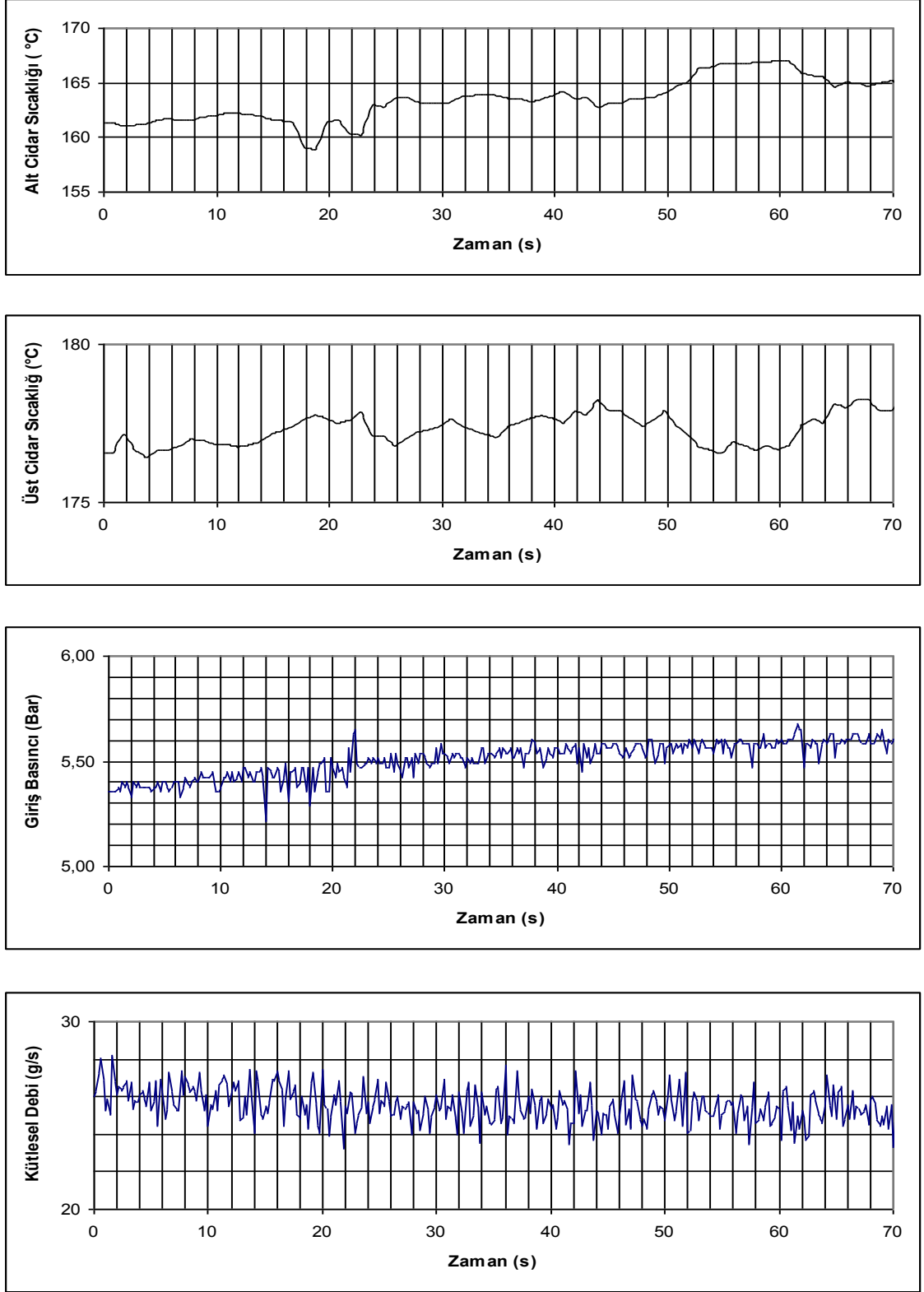
Şekil 4.59. Boru-3 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 26 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=15^\circ\text{C}$)



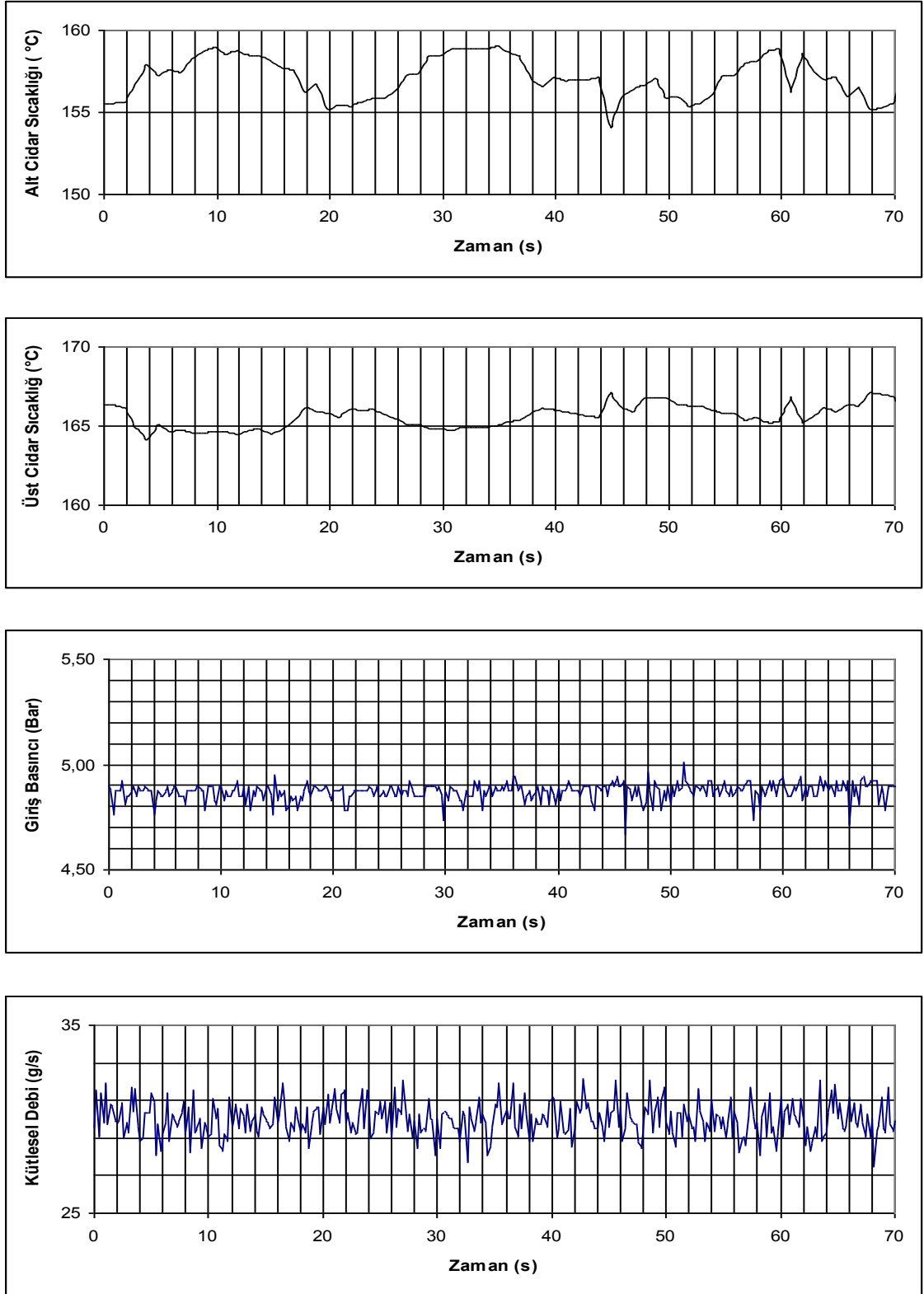
Şekil 4.60. Boru-3 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 25 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)



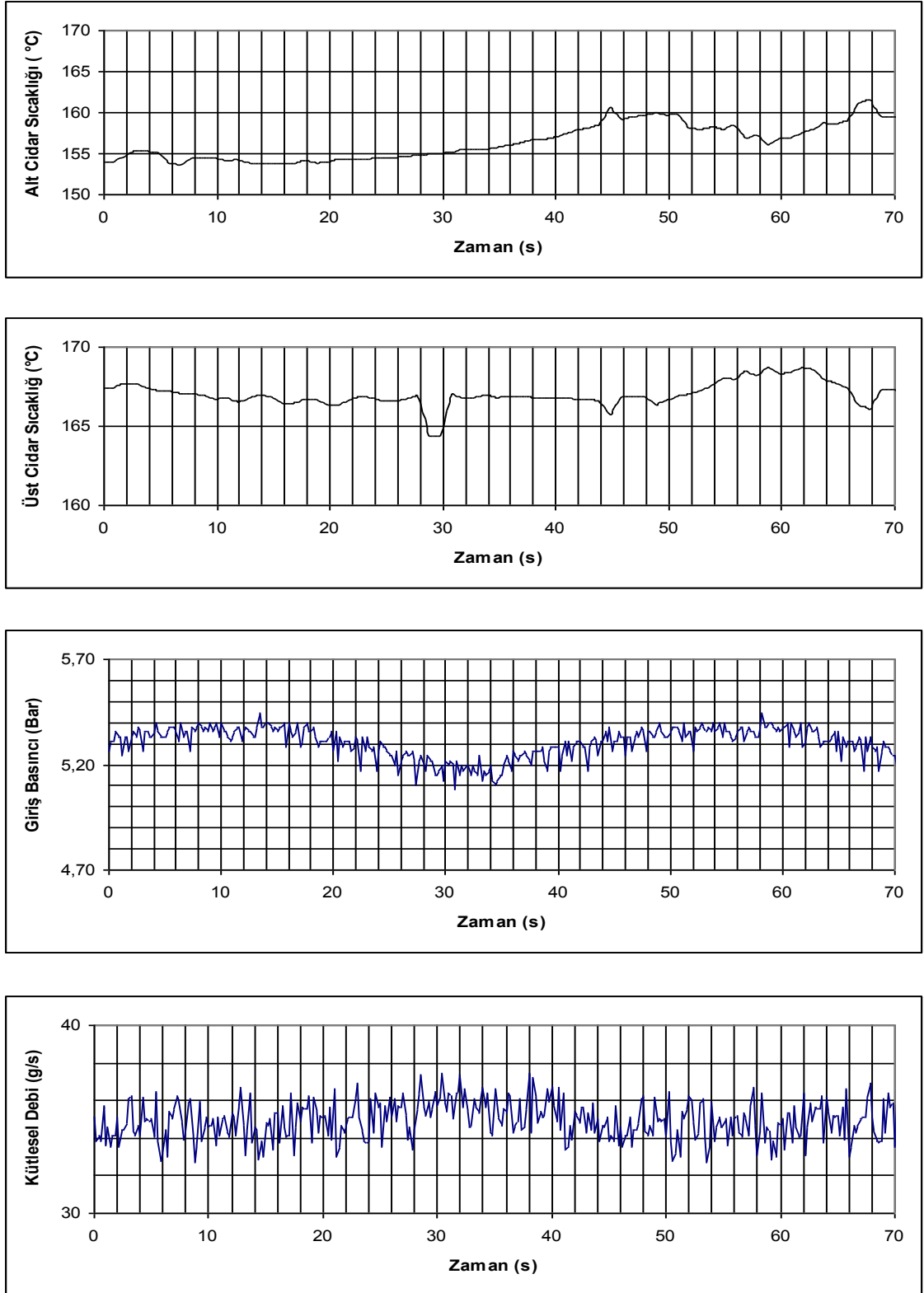
Şekil 4.61. Boru-3 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 20 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=35^\circ\text{C}$)



Şekil 4.62. Boru-2 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 26 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 15^\circ\text{C}$)



Şekil 4.63. Boru-2 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 30 \text{ g/s}$, $Q=24 \text{ kW}$, $T_g=25^\circ\text{C}$)



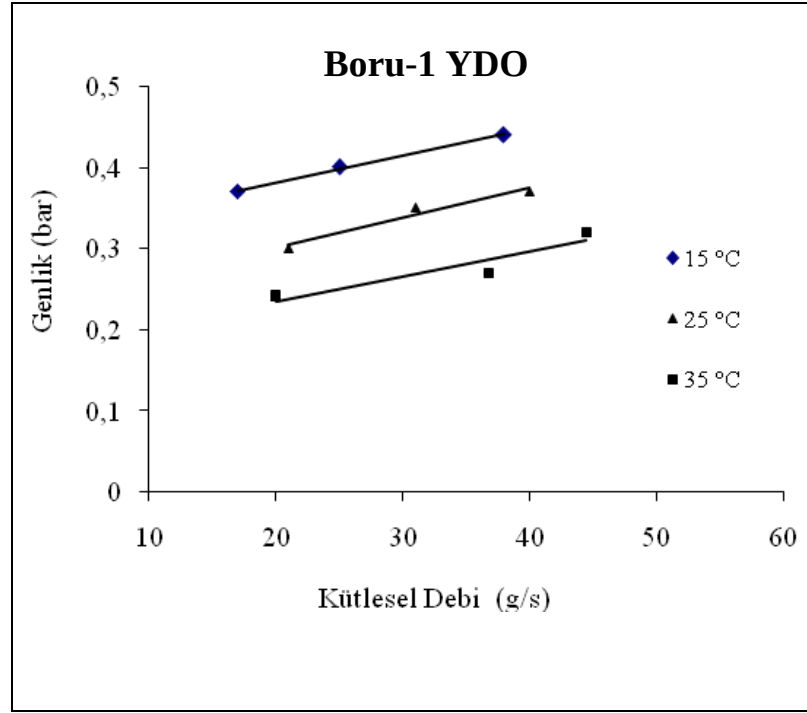
Şekil 4.64. Boru-2 için saf yoğunluk değişim tipi osilasyonları ($\dot{m} = 36 \text{ g/s}$, $Q = 24 \text{ kW}$, $T_g = 35^\circ\text{C}$)

Beş farklı test borusundan biri olan boş boru yani Boru-1 için Şekil 4.65. , 4.66'da saf yoğunluk değişim tipi osilasyonlarına giriş aşırı soğutma miktarının etkilerini görmek amacıyla giriş kütleli debi değerlerine karşılık gelen giriş basıncı genlik ve periyotlarında meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Şekil 4.67. , 4.68'de ise giriş kütleli debilerine karşılık farklı giriş aşırı soğutma sıcaklıkları için saf YDO periyot ve genlikleri görülmektedir. Şekiller, kütleli debideki azalmanın osilasyon genlik ve periyotlarını azalttığını göstermektedir. Tüm test boruları için saf YDO genlik ve periyot değerleri, BDO'lara göre daha düşük değerlerde elde edilmiştir. Ayrıca diğer yüzey artırım elemanı kullanılmış dört test borusu içinde;

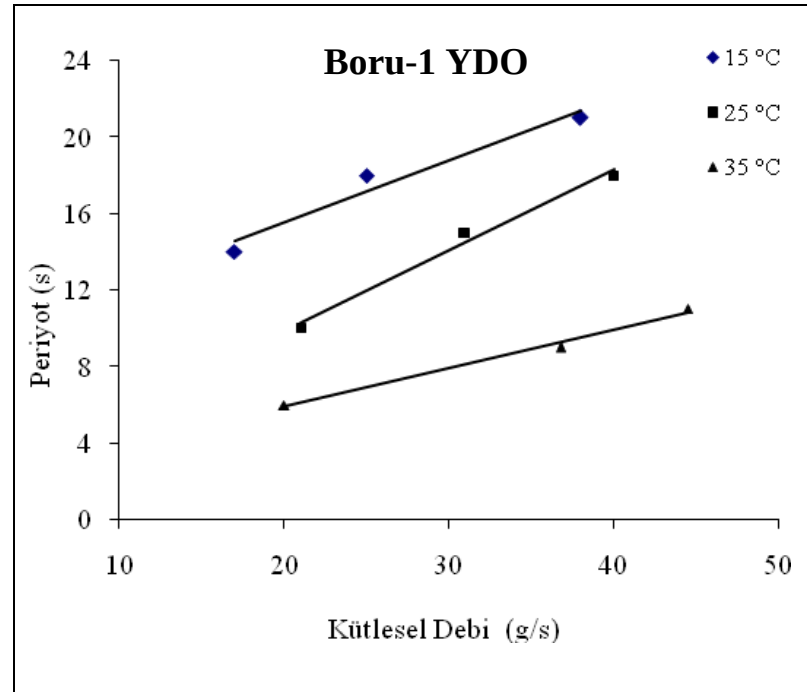
- Şekil 4.69. , 4.70. , 4.71. ve 4.72'de Boru-4 borusu için,
- Şekil 4.73. , 4.74. , 4.75. ve 4.76'de Boru-5 borusu için,
- Şekil 4.77. , 4.78. , 4.79. ve 4.80'de Boru-3 borusu için,
- Şekil 4.81. , 4.82. , 4.83. ve 4.84'de Boru-2 borusu için

kütleli debi değerlerine bağlı olarak giriş basıncının genliklerinde meydana gelen değişimler ile saf YDO periyotlarına kütleli debinin etkileri gösterilmiştir.

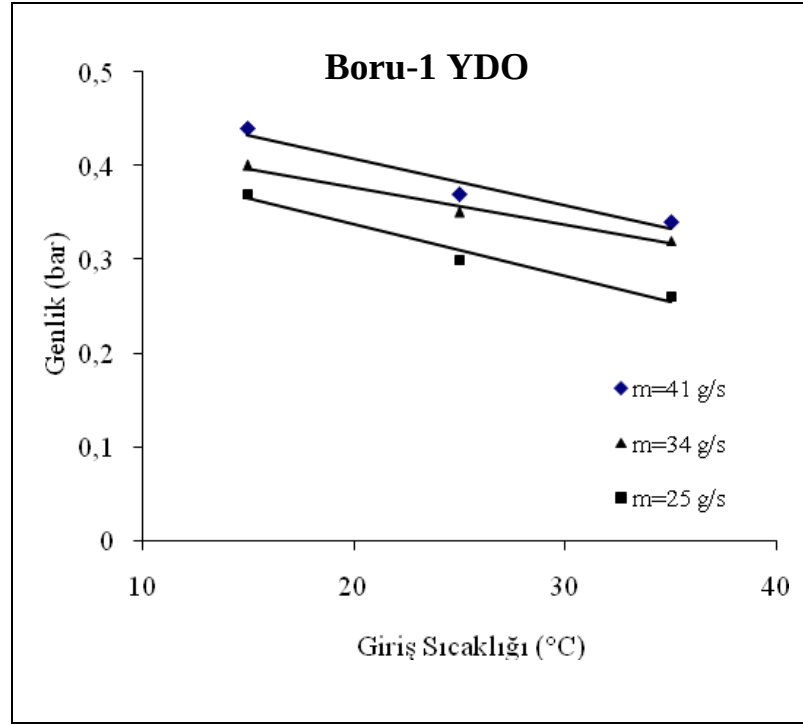
Her bir test borusu için grafiklere bakıldığında azalan giriş sıcaklığı ile beraber genlikler artmıştır. Boş boruda genlik artışları yüzey artırımı borulara göre daha fazladır. Genliklerin artmasına, kütleli debi arttığında farklı yoğunluğa ve entalpi değerlerine sahip dalgalar arasındaki yoğunluk farkının sebep olduğu söylenebilir. Saf YDO oluşum mekanizmalarından biriside yüksek ve düşük yoğunluğa sahip entalpi dalgalarının sistem boyunca akmasıdır. Bu nedenle osilasyon genlikleri yüksek ve düşük yoğunluk dalgaları arasındaki farka bağlı olmaktadır. Kütleli debi arttıkça akış ortamındaki sıvı fazı oranı artacağından yoğunluk farkı da artacaktır. Yüksek yoğunluklu dalga oluşunca sisteme giren çok miktardaki sıvı fazı nedeniyle akış ortamındaki sıvı miktarı artacaktır. Böylece osilasyon genlikleri de artmış olacaktır. Oysaki düşük kütleli debilerde sıvı miktarı sınırlı olacaktır. Yüksek yoğunluklu dalga oluşunca bunun yoğunluğu yüksek debili duruma göre düşük olacak ve sonuçta osilasyon genliğinin küçük olmasına yol açacaktır (Karagöz 2007).



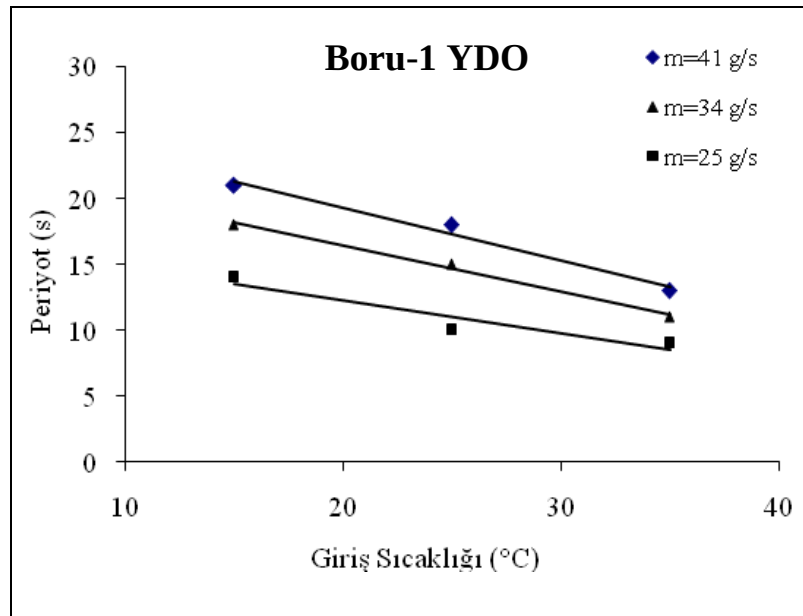
Şekil 4.65. Boru-1 için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



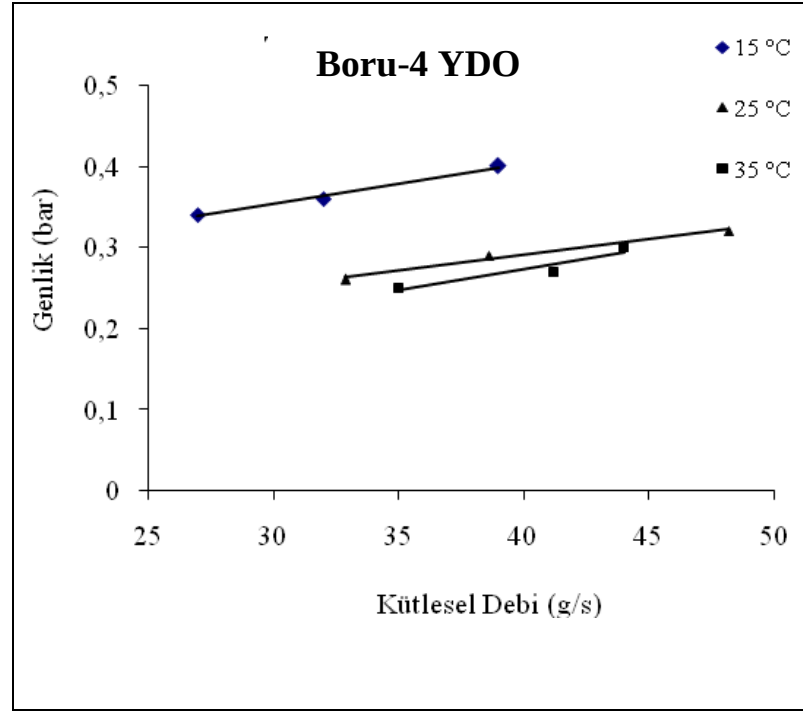
Şekil 4.66. Boru-1 için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



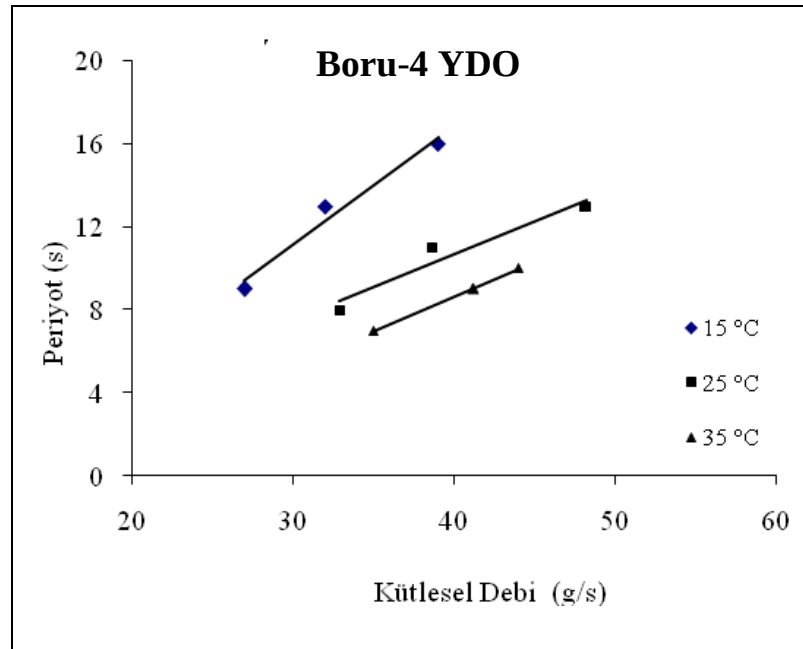
Şekil 4.67. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



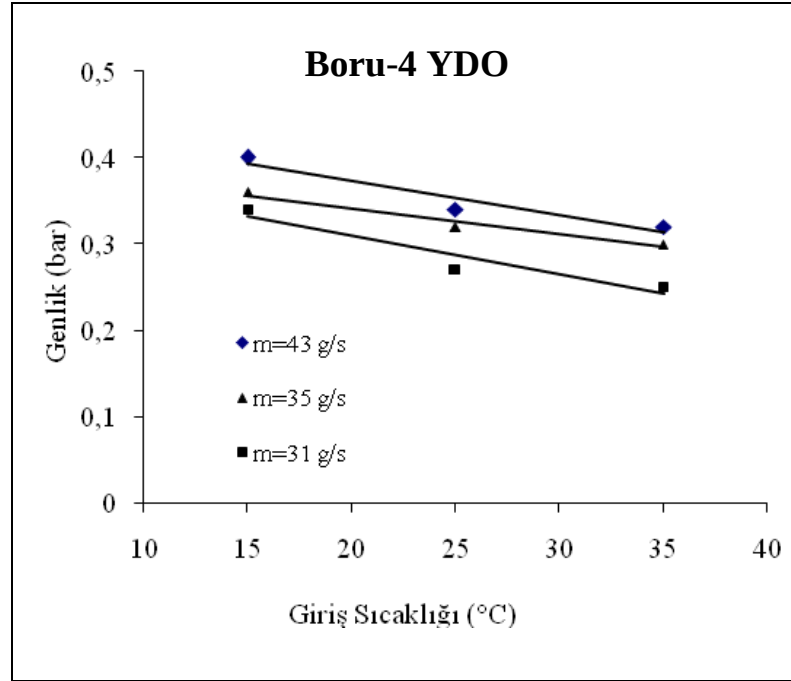
Şekil 4.68. Boru-1 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



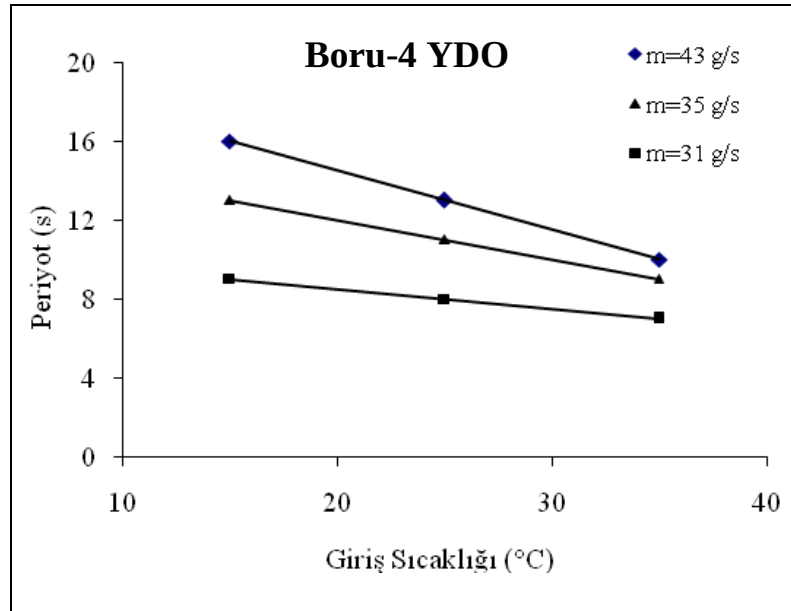
Şekil 4.69. Boru-4 için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



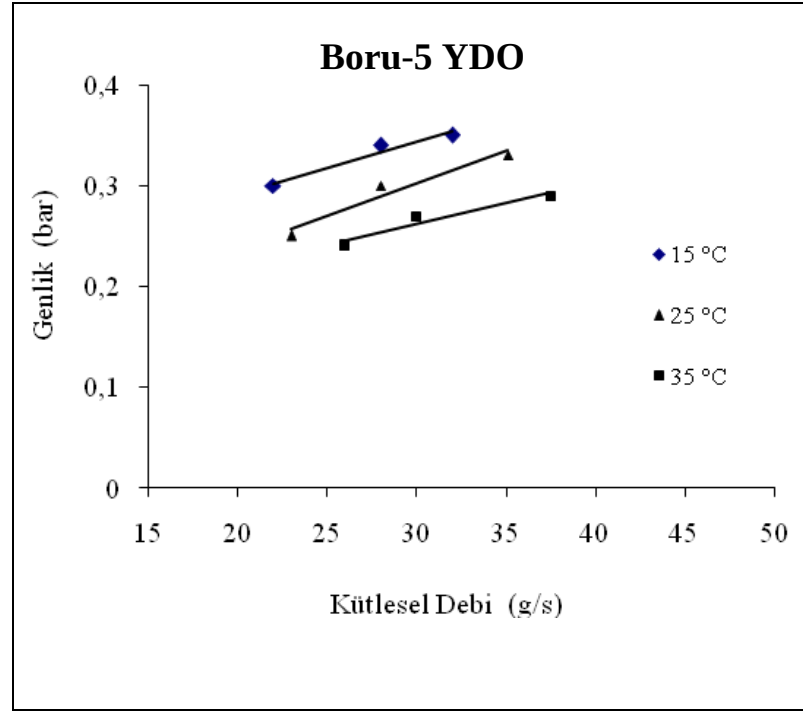
Şekil 4.70. Boru-4 için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



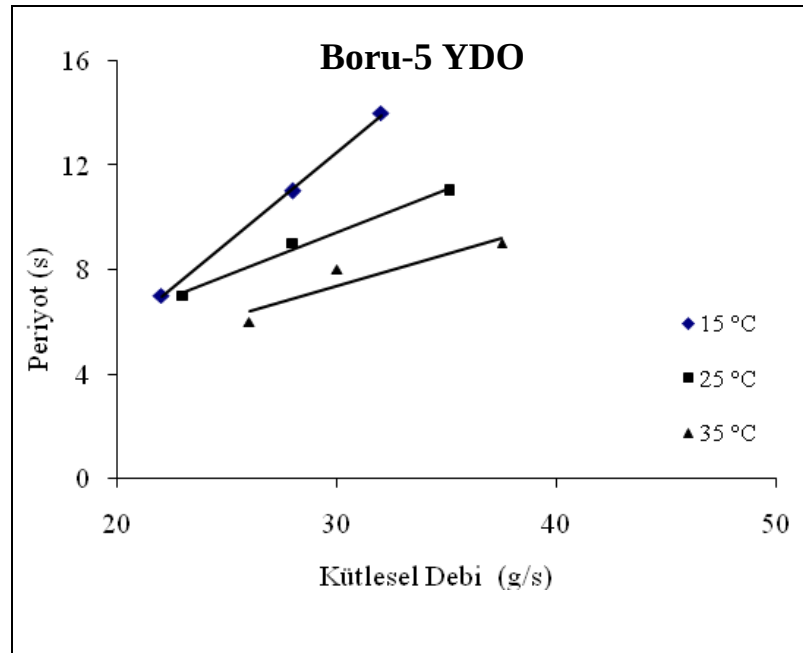
Şekil 4.71. Boru-4 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



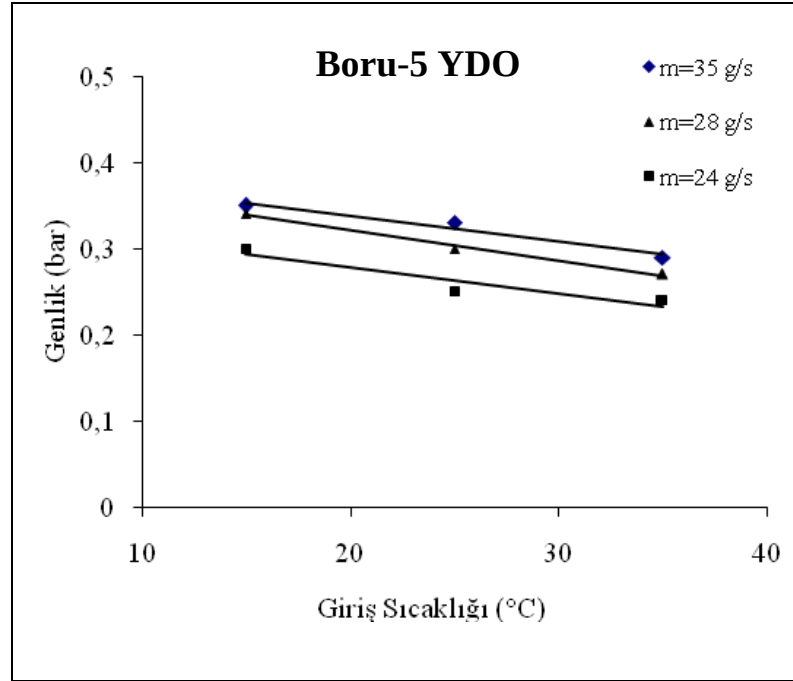
Şekil 4.72. Boru-4 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



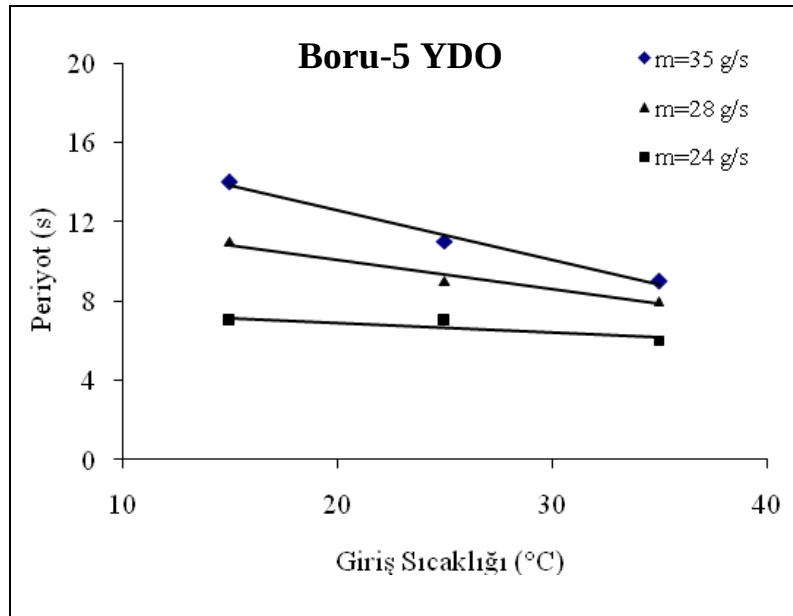
Şekil 4.73. Boru-5 için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



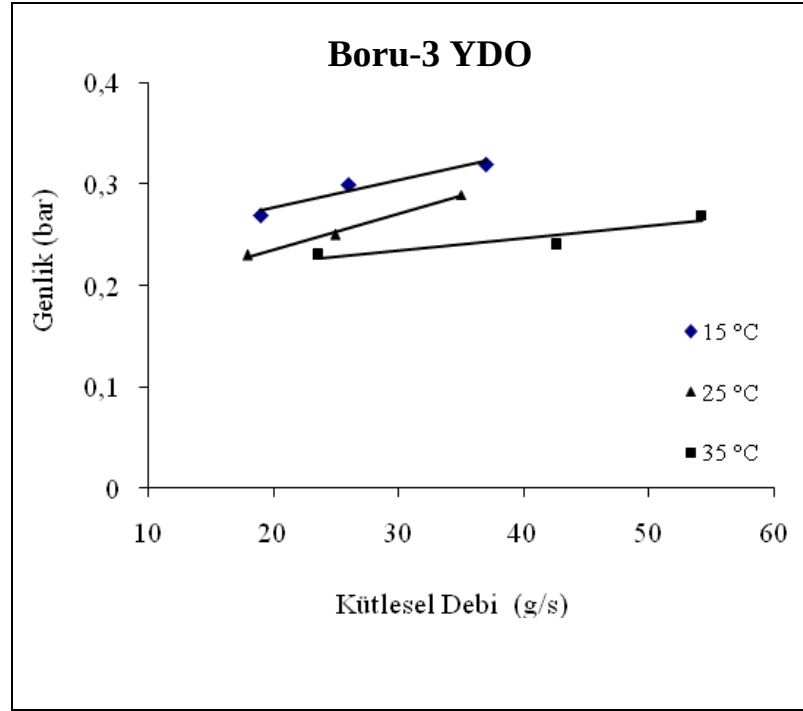
Şekil 4.74. Boru-5 için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



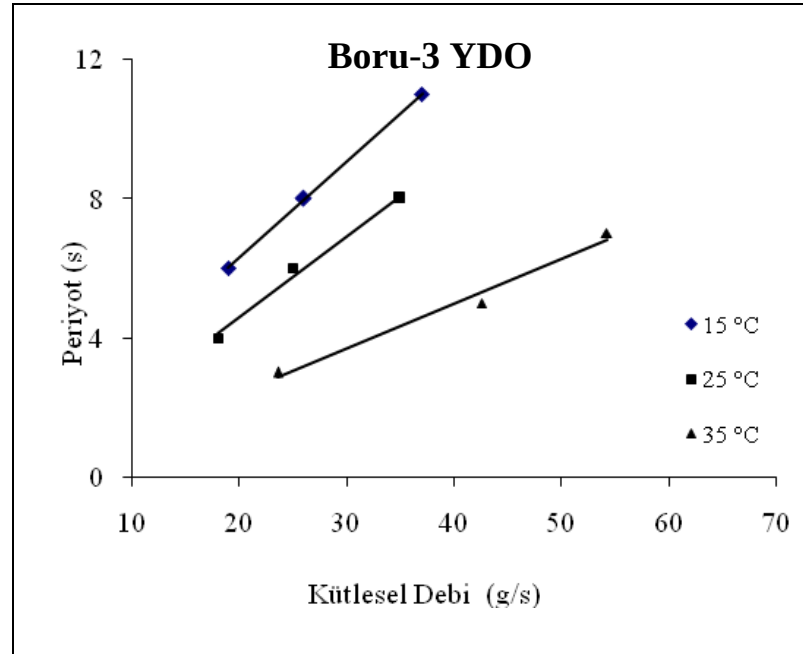
Şekil 4.75. Boru-5 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



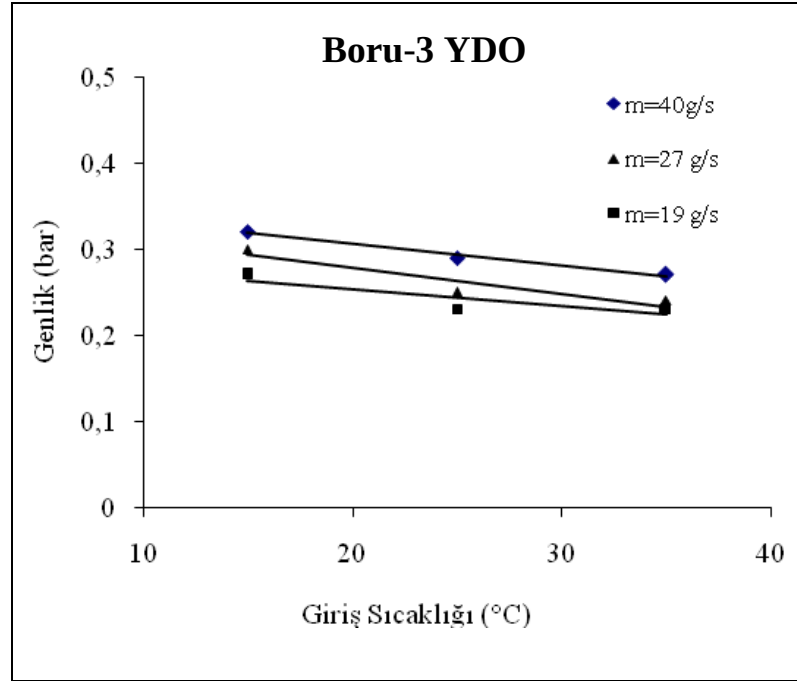
Şekil 4.76. Boru-5 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



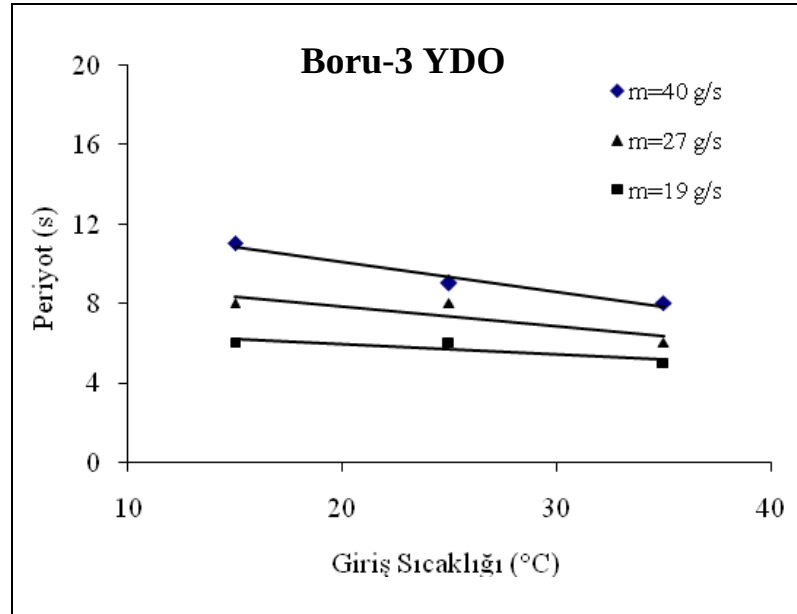
Şekil 4.77. Boru-3 için YDO genliklerine kütlesel debi ve aşırı soğutmanın etkileri



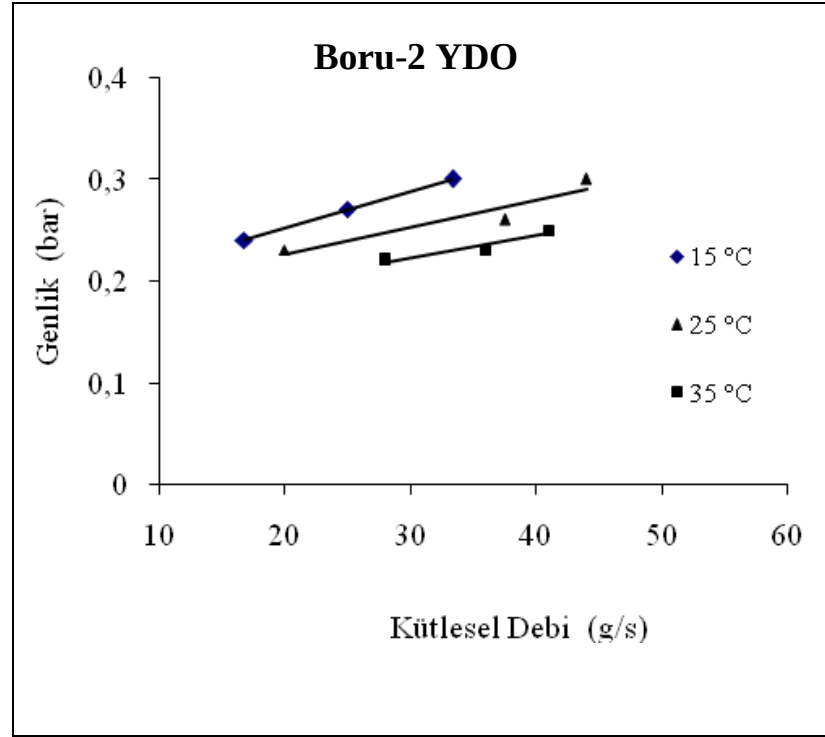
Şekil 4.78. Boru-3 için YDO periyotlarına kütlesel debi ve aşırı soğutmanın etkileri



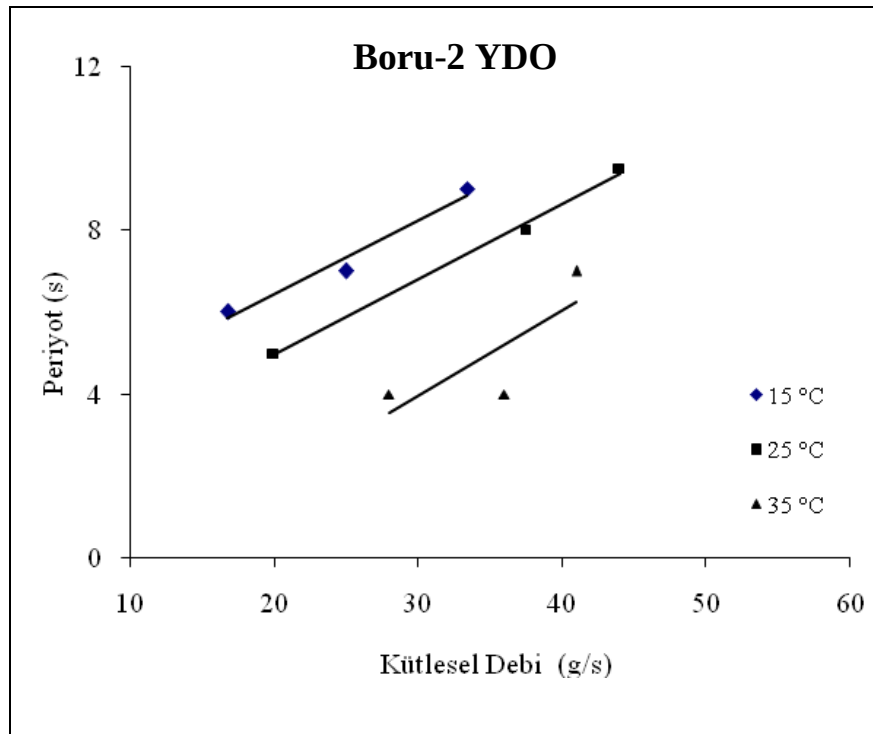
Şekil 4.79. Boru-3 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



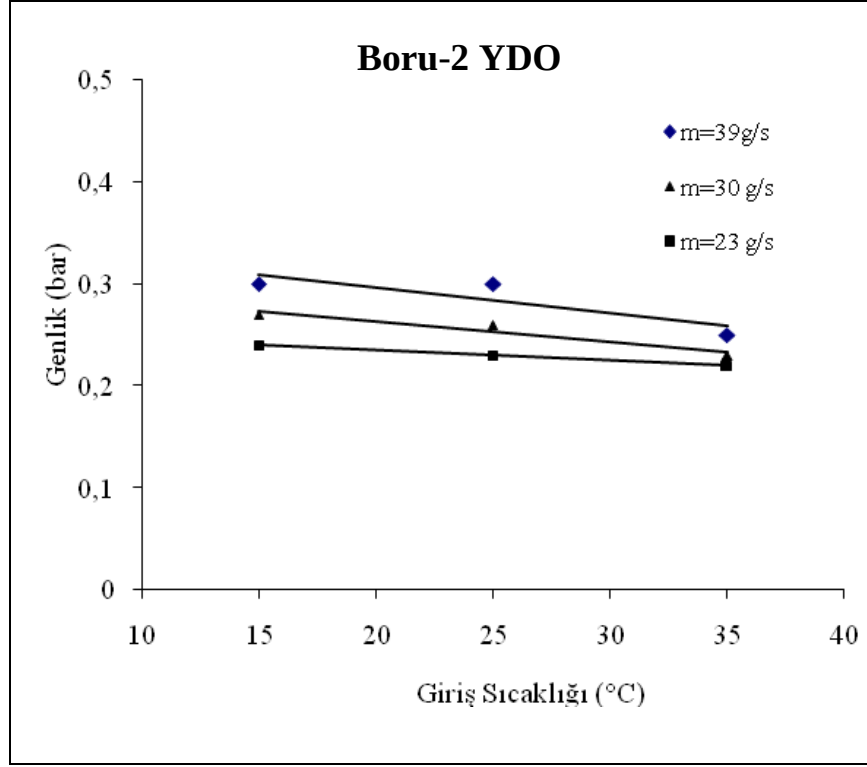
Şekil 4.80. Boru-3 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi



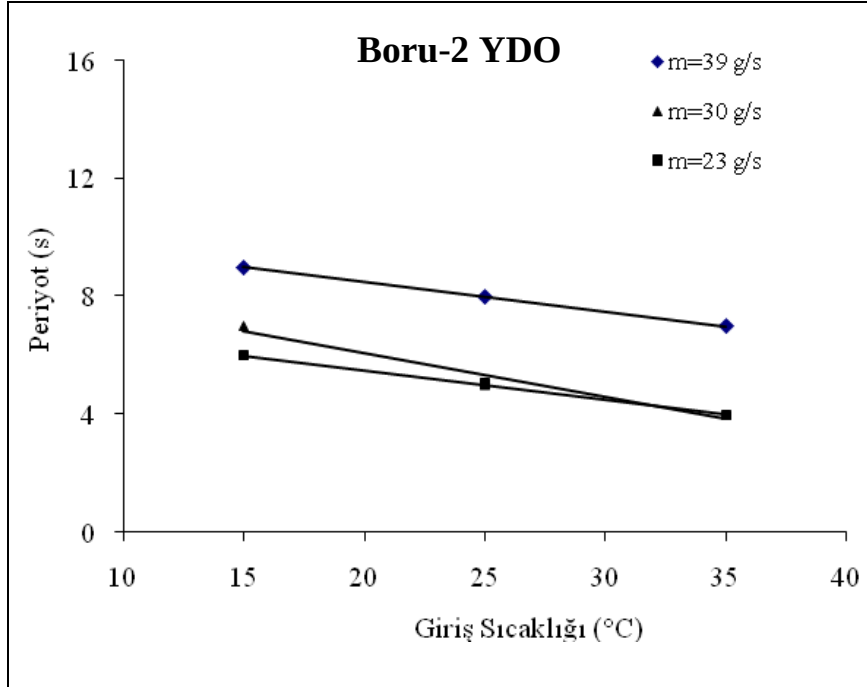
Şekil 4.81. Boru-2 için YDO genliklerine kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri



Şekil 4.82. Boru-2 için YDO periyotlarına kütleli debi ve aşırı soğutmanın etkileri

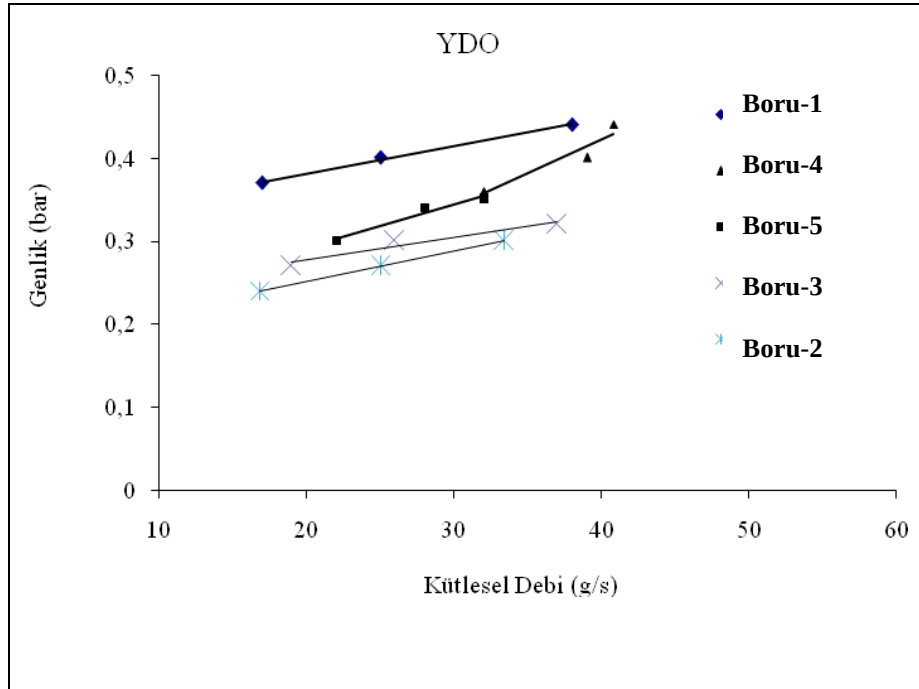


Şekil 4.83. Boru-2 için giriş aşırı soğutmanın genliklere etkisi



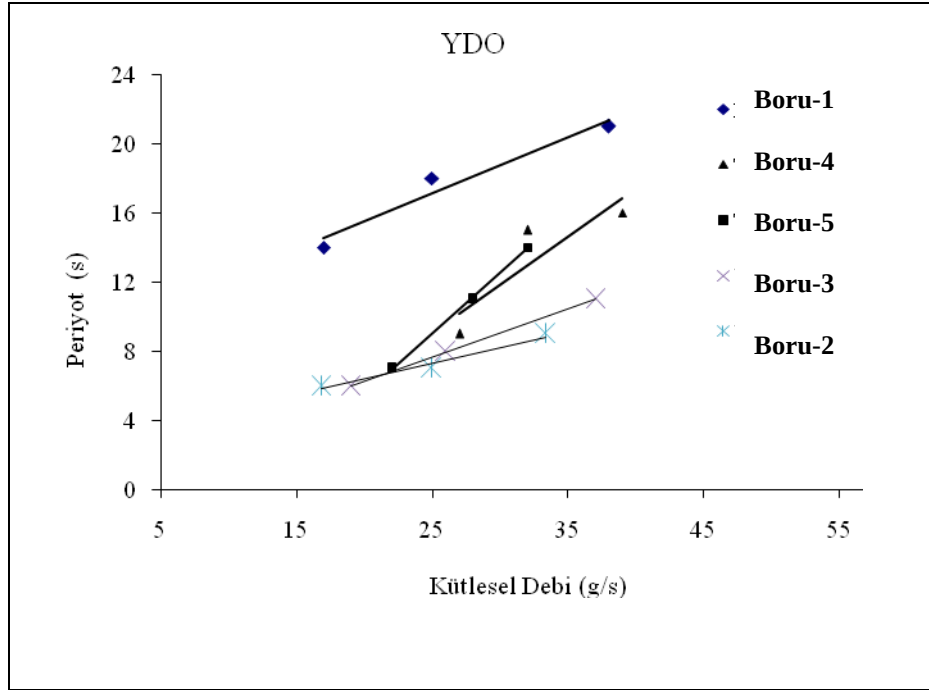
Şekil 4.84. Boru-2 için giriş aşırı soğutmanın periyotlara etkisi

Şekil 4.85’de beş test borusu için değişen kütleli debilere karşılık giriş basıncında oluşan değişimler verilmiştir. Bütün test boruları için artan kütleli debi miktarı ile giriş basınçlarının arttığı görülmektedir. Genliklerin büyüklükleri açısından bir sıralama yapılırsa boş boru tipinde genlik miktarı büyüklüğü diğer yüzey artırımı borulara oranla daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.85’de verilen grafikte genlik değerlerine bakıldığında genlik değeri büyükten küçüğe doğru, Boru-1 > Boru-4 > Boru-5 > Boru-3 > Boru-2, şeklinde sıralanmaktadır



Şekil 4.85. Tüm borular için giriş basınç genliklerine kütleli debinin etkisi

Şekil 4.85’e benzer olarak tüm test boruları için değişen kütleli debi değerlerine karşılık osilasyon periyotlarında oluşan değişimler Şekil 4.86’da verilmiştir. Genliklerde olduğu gibi değişen kütleli debi değerleriyle lineer değişim arz eden durum periyotlar içinde geçerli olmaktadır. Artan kütleli debi değerine karşılık periyotların arttığı tespit edilmiştir. Periyotların tüm test boruları için büyüklüklerinde yüzey artırımı elemanlara göre boş boru için en büyük olmuştur. Şekil 4.86’da verilen grafikte periyot değerlerine bakılırsa periyot değerleri büyükten küçüğe doğru, Boru-1 > Boru-4 > Boru-5 > Boru-3 > Boru-2, şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 4.86. Tüm borular için giriş basınç periyotlarına kütleli debinin etkisi

Saf YDO'lar için yapılan sıralamaya göre efektif çapı büyük olan boş boru yani Boru-1, en büyük genlik ve periyot değerine; efektif çapı en küçük olan boru Boru-2 ise en küçük genlik ve periyot değerine sahiptir. Yani efektif çap arttıkça periyot ve genliklerin arttığını söyleyebiliriz. Ayrıca aynı şekle sahip yüzey artırım elemanları için adım büyüklüğü arttıkça genlik ve periyotlarda artmıştır.

BDO ve YDO'lar için deneysel sonuçlarla elde edilen kütleli debi ile orantılı olarak değişen periyot ve genlik değerleri; aşırı soğutma seviyesi ile ters orantılı olarak değişen periyot ve genlik değerleri; BDO'larının periyot ve genlik değerlerinin YDO'larından daha fazla değerlerde olması gibi bulunan sonuçlara benzer bulgular önceki araştırmacılar tarafından da bulunmuştur (Padki *et al.* (1991); Xu and Chen. (1993); Menteş *et al.* (1993); Widmann *et al.* (1995); Kakaç and Cao., (1999), Çomaklı *et al.* (2001, 2007, 2008); Karşı *et al.* (2002); Karagöz *et al.* (2008); Kakaç *et al.* (2009); Liang *et al.* (2010)).

4.5. Tüm test boruları için kararlılık ve osilasyonlarının karşılaştırılması

Çizelge 4.1’de boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması yapılmıştır. En kararlı borunun Boru-2, en kararsız borunun ise Boru-1 olduğu görülmektedir. Bu yaklaşıma göre efektif çapın azalmasıyla kararlılığın arttığı söylenebilir. Bu bakımdan ısı transfer iyileştirme elemanlarının kullanıldığı borularda efektif çap azaldıkça kararlılığın arttığı söylenebilir.

Bu çalışmada osilasyonların genlik ve periyotlarının aralığı Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Boş borudaki yani Boru-1’de BDO’nun genliği 0,37 - 0,53 bar aralığında değişirken yüzey artırım elemanlarının kullanıldığı Boru-4, Boru-5, Boru-3 ve Boru-2 borularında sırasıyla 0,35 – 0,490, 32 – 0,44, 0,3 – 0,41, 0,28 – 0,39 bar aralığında değişmiştir. Boru-12’deki YDO’nun genliği 0,27 – 0,44 bar aralığında değişirken iyileştirme elemanlarının kullanıldığı Boru-4, Boru-5, Boru-3 ve Boru-2 borularında sırasıyla 0,25 – 0,4, 0,24 – 0,35, 0,23 – 0,32, 0,22 – 0,3 bar aralığında değişmektedir. BDO genliklerinin saf YDO genliklerinden daha fazla olduğu görülmektedir. BDO ve saf YDO’lar için en fazla genlik Boru-1’de, en az genlik değeri ise Boru-2’de görülmüştür. Genlik değerleri bakımından büyükten küçüğe doğru sıralama yapılırsa; Boru-1 > Boru-4 > Boru-5 > Boru-3 > Boru-2, şeklinde bir sıralama söz konusudur. Görüldüğü gibi aynı şekle sahip yüzey artırım elemanları için adımının artmasıyla osilasyon genliklerinin arttığı belirlenmiştir.

Periyotlar karşılaştırıldığında yüzey artırım elemanlarının kullanıldığı borulardaki BDO ve saf YDO periyotlarının boş boru tipine nazaran daha düşük olduğu görülmektedir. BDO için maksimum periyot değeri Boru-1’de 31 saniye, minimum periyot değeri Boru-2 için 8 saniye olmuştur. BDO periyotları açısından maksimumdan minimuma doğru sıralama, Boru-1 > Boru-4 > Boru-5 > Boru-3 > Boru-2, şeklindedir. YDO için maksimum periyot değeri Boru-1 için 24 saniye, minimum periyot değeri Boru-2 için 4 saniye olmuştur. YDO periyotları açısından maksimumdan minimuma doğru sıralama, Boru-1 > Boru-4 > Boru-5 > Boru-3 > Boru-2 şeklindedir. Görüldüğü gibi aynı şekle

sahip yüzey artırım elemanları için adımının artmasıyla osilasyonların periyotlarının arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Boru yüzey konfigürasyonlarının kararlılık açısından karşılaştırılması

	Boru-1	Boru-2	Boru-3	Boru-5	Boru-4
Eşdeğer çap (d_e) ^a	*****	*	**	***	*****
Tek fazlı basınç düşümü ^b	*	*****	*****	***	**
Stabilite sınırları ^c	*****	***	*****	*	**
BDO periyodu ^d	*****	**	***	*****	*****
BDO genliği ^d	*****	**	***	*****	*****
YDO periyodu ^d	*****	*	**	***	*****
YDO 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

	BDO		YDO	
	Periyot (s)	Genlik (bar)	Periyot (s)	Genlik (bar)
Boru-1	15 - 31	0,37 - 0,53	9 - 21	0,27 – 0,44
Boru-4	10 - 27	0,35 – 0,49	7- 16	0,25 – 0,4
Boru-5	11 - 23	0,32 – 0,44	6 – 14	0,24 – 0,35
Boru-3	9 - 19	0,3 – 0,41	5 – 11	0,23 – 0,32
Boru-2	8 - 15	0,28 – 0,39	4 - 9	0,22 – 0,3

Karagöz (2007) yaptığı doktora çalışmasında deneylerini, 25-140 g/s debi aralığında on farklı debide yapmıştır. Isıl gücün kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisini belirlemek amacıyla deneylerini 0, 15, 21, 24 ve 28 kW olmak üzere 5 farklı ısıl güçte, giriş aşırı soğutmasının kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisini belirlemek amacıyla 15, 25 ve 35°C olmak üzere üç farklı akışkan giriş sıcaklığında yapmıştır. Çıkış kısıtlamasının kararlı ve kararsız durum karakteristiklerine etkisini belirlemek amacıyla ise 0.25 ve 0.45 olmak üzere iki farklı çıkış orifis çapı oranı kullanmıştır. Isı transfer iyileştirmesinin etkisini belirlemek amacıyla 4 farklı ısı transfer yüzey konfigürasyonu kullanmış ve kullandığı test borusunun boş efektif çapını 12,57 mm olarak belirlemiştir. Test borusunun içerisine yerleştirdiği çeşitli yüzey artırma elemanlarından sonra boru tiplerine göre efektif çap değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir. Bu çalışmada ise sabit ısıl güçte (24 kW); 15, 25 ve 35°C olmak üzere üç farklı akışkan giriş sıcaklığında; sabit çıkış kısıtlayıcısında (0,45) ve boş boru efektif çapı 8,95 mm olan sistem şartlarında deneyler yapılmıştır. Görüldüğü üzere iki araştırmacı tarafından kullanılan test borusu efektif çapları farklıdır. Efektif çap azalmasının iki fazlı akış kararsızlıkları ve tek fazlı kararlı bölge üzerine etkilerini görmek için karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 4.3. Isı transfer yüzey konfigürasyonları ve efektif çap değerleri (Karagöz 2007)

Boru İsmi	Borunun Karakteristiği	De (mm)
Boru A	Boş boru	12,7
Boru B	Tel çapı: 1.8 mm, yay adımı: 3.6 mm olan boru	9,56
Boru C	Tel çapı: 1.8 mm, yay adımı: 11 mm olan boru	12,46
Boru D	Bükülmüş şerit adımı: 140 mm	12,53

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile Karagöz (2007) de yapılan doktora tezindeki sonuçlar, osilasyonların başlama ve bitme aralıkları, tek fazlı basınç düşümü bölgesinin bittiği debi değerleri, basınç düşümü ve yoğunluk değişim tipi osilasyonları, periyot ve genliklerin kütesel debi ile değişim değerleri açısından Çizelge 4.4’de kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.4. Farklı kıyas parametreleri kullanılarak Karagöz (2007) doktora tezi verileri ile bu çalışma verilerinin karşılaştırılması

Kıyas parametreleri	Bu çalışmanın veri ve sonuçları	Karagöz (2007) veri ve sonuçları	Karşılaştırma yorumları
Tek fazlı basınç düşüm bölgesinin boş boru çaplarına göre bittiği kütleli debi değerleri (g/s)	8,95 mm→ 80-90 g/s	12,7 mm→ 95-100 g/s	Boru efektif çapı küçülmesi tek fazlı akış bölgesini büyütür ve kararlılığı artırır
Stabilite sınır değerlerinin başlama ve bitme debi aralığı (g/s)	8,95 mm→ 80-35 g/s osilasyon debi uzunluğu 45 g/s	12,7 mm→ 95-45 g/s osilasyon debi uzunluğu 50 g/s	Boru efektif çapı küçülmesi osilasyon bölgesini küçültür ve kararlılığı artırır
Tüm borular için basınç düşümü osilasyonları periyot ve genlikleri	31-8 (s) periyot aralığı 0,16-0,11 (bar) genlik aralığı	14-4,1 (s) periyot aralığı 0,06-0,021 (bar) genlik aralığı	Boru efektif çapı küçülmesi BDO genlik ve periyotlarını artırır
Tüm borular için yoğunluk değişim tipi osilasyonları periyot ve genlikler	21-4 (s) periyot aralığı 0,17-0,08 (bar) genlik aralığı	8-3,1 (s) periyot aralığı 0,068-0,012 (bar) genlik aralığı	Boru efektif çapı küçülmesi YDO genlik ve periyotlarını artırır
Basınç düşümü (bar) değerlerinin boru efektif çapına göre aldığı maksimum büyüklükler	8,95-7,96mm efektif çap aralığı için ≈2-6,5 bar	12,7-9,56mm efektif çap aralığı için ≈1,5-3 bar	Boru efektif çapı küçülmesi basınç düşümünü artırır

5. SONUÇ

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada zorlanmış konveksiyonlu kaynamalı yatay borularda meydana gelen iki fazlı kararlı ve kararsız akış olayları ile ilgili deneysel bir çalışma yapılmıştır. İş yapan akışkan olarak su kullanılan kaynamalı yatay bir boru sisteminde deneyler yapılmış ve biri boş boru olmak üzere beş farklı ısı transfer yüzey konfigürasyonu kullanılmıştır. Deneylerde sabit ısı gücü, üç farklı giriş aşırı soğutması ve tek çıkış orifis çapı kullanılarak ısıl gücün, giriş aşırı soğutmasının iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisi araştırılmıştır. Karakteristik durum eğrileri elde edilmiş ve ısı transfer iyileştirmesinin kararlı/kararsız durum karakteristiklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

A. Sıcaklık Profilleri

1. Boru efektif çapının küçük olması boş boru tipinde dahi alt-üst cidar sıcaklıkları arasında büyük bir ayrılmayı doğurmamıştır. Düşük ısı transfer katsayısına sahip gaz kabarcıkları yüksek ısı transfer katsayısına sahip alt cidarda seyreden sıvı filminin cidarla arasına girmiştir. Buda burn-out yada kaynama krizi denilen aşırı sıcaklık yükselmesi olayının görülmesinin önüne geçmiştir. Oluşan kabarcıkların alt cidar ve üst cidarları kapladığı ve bunun sonucunda gerek katmanlaşma gerekse alt ve üst cidar sıcaklıkları arası ayrışma daha büyük efektif çapa sahip borularla yapılan benzer çalışmalardan daha az olmuştur.

B. İki fazlı Akış Kararsızlıkları

1. Beş farklı test borusu için deneysel çalışmalarda sabit ısı gücü, üç farklı giriş aşırı soğutması ve tek orifis çapı yani sabit çıkış şartları altında karakteristik eğriler elde edilmiştir. Eğriler yatık S şeklinde bulunmuştur.
2. Giriş aşırı soğutma değerindeki artışla eğrilerin maksimum ve minimum noktalarındaki basınç farkı büyüyerek, kaynamanın başladığı noktaların daha düşük kütleli debilere doğru kaydığı görülmüştür.
3. Giriş aşırı soğutma değerindeki artış, iki fazlı akış bölgesinin eğimini artırmış ve azalan kütleli debi değerleri ile basınç düşümü değerlerini azaltmıştır.
4. Beş ayrı test borusu için verilen karakteristik eğrilerde basınç düşümü değerleri birbirlerinden farklılıklar göstermiştir. Yüzey artırma elemanı kullanılmış test borularındaki basınç düşümü değerleri, boş boruda elde edilen basınç düşümü değerinden yüksek olduğu bulunmuştur.
5. Kararlı durum eğrilerinin negatif eğim açısı arttıkça sistemin daha kararsız hale geldiği görülmüştür. Boş boru tipinin diğer yüzey artırma elemanı kullanılmış borulardan daha az negatif bölge eğimine sahip olduğu ve dolayısıyla daha kararlı bir yapıda olduğu anlaşılmıştır.
6. Deneysel çalışmalarda kullanılan beş farklı test borusu sabit ısı gücü, sistem basıncı, çıkış kısıtlayıcısı ve sıkıştırılabilir hacim gibi faktörlerle değişen kütleli debi değerine bağlı osilasyonlar görülmüştür. Bu osilasyonlar, BDO, saf YDO ve TO'lardır.
7. Beş ayrı test borusu için verilen karakteristik eğrilerde osilasyonların sınırları elde edilmiştir. Karakteristik eğrilerde yüksek kütleli debilere sahip bölgenin tek fazlı

kararlı bölgeyi, kesikli çizgilerin arasında kalan bölge YDO ve BDO'larının süperimpozed olarak ortaya çıktığı kararsız bölgeyi ve kesikli çizgilerin sol tarafında kalan bölge ise yalnızca saf YDO'larının görüldüğü bölgeyi göstermektedir.

8. Kararlı durum eğrilerinde yüksek kütleli debi değerlerine karşılık gelen pozitif eğimli tek fazlı sıvı bölgesinde herhangi bir osilasyon türü gözlenmemiştir.

9. Giriş aşırı soğutma miktarı arttıkça BDO'nun başlangıç ve bitiş noktaları düşük debilere kaymıştır.

10. Yüzey artırımı borularda meydana gelen BDO'ların başlangıç sınır değerleri boş borudan daha düşük kütleli debi değerlerinde başlamış ve daha yüksek kütleli debi değerlerinde tamamlanmıştır.

11. Giriş aşırı soğutma miktarını artırmanın tüm borular için akışı daha kararlı hale getirdiği görülmüştür.

12. Kararlılık sınır değerleri arasındaki uzaklık arttıkça akışın kararsız bölgesinin arttığı yani BDO ve YDO osilasyonlarının görüldüğü bölgenin büyüdüğü gözlemlenmiştir.

13. Kararlılık sınır değerleri arasındaki mesafeye bağlı olarak boş borunun yani Boru-1'in en kararsız boru tipi olduğu, en kararlı boru tipi ise içerisinde 5mm'lik adıma sahip ve en az alanı kaplayan Boru-2'nin olduğu bulunmuştur. Borular kararlılık açısından en yüksek kararlılığa sahip olandan en düşük kararlılığa sahip olana doğru sıralandığında Boru-2, Boru-3, Boru-5, Boru-4 ve Boru-1 sıralaması elde edilmiştir.

14. Aynı sınıfa sahip yüzey artırımı borularda adım miktarının büyümesi osilasyon sınırları açısından sistemin daha kararsız hale gelmesini sağlamıştır.

15. Her beş test borusunda da BDO tip osilasyonlar oluşmuş ve bu osilasyonlar giriş basıncı, alt ve üst cidar sıcaklığı ile kütleli debide büyük genlikli çalkantılara neden olmuşlardır. BDO osilasyonları tüm test boruları için kararlı durum karakteristik eğrisinin negatif eğimli bölgesinde oluşmuştur. Tüm test borularında giriş basıncında gözlemlenen osilasyonlarla beraber kütleli debide de osilasyonlar gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm test boruları için üst cidar sıcaklıklarının genlikleri alt cidar sıcaklık genliklerinden daha büyük olmuştur.

16. BDO ve YDO'ların yüzey artırımı borularda genlik artışları boş boru da olandan daha düşük olmuştur.

17. BDO ve YDO'lar için kütleli debi miktarı azaldıkça genlik ve periyotların azaldığı, giriş aşırı soğutma miktarı arttıkça genliklerin ve periyotların arttığı görülmüştür.

18. Bütün test borularında BDO ve YDO'lar için artan kütleli debi miktarı ile giriş basınçlarının periyot ve genliklerinin arttığı görülmüştür. Genlik ve periyotların büyüklükleri açısından bir sıralama yapıldığında boş boru tipinde genlik ve periyot miktarı büyüklüğü diğer yüzey artırımı borulara oranla daha fazla olmuştur. Genlik ve periyot değerlerine göre büyükten küçüğe doğru; Boru-1 > Boru-4 > Boru-5 > Boru-3 > Boru-2, şeklinde sıralanmaktadır. Bu durum efektif çapı büyük olan borudan küçük olan boruya doğru yapılan sıralama ile aynıdır. Bu bakımdan efektif çapın kararlılık açısından bir parametre olduğu söylenebilir. Yani efektif çap küçüldükçe sistem daha kararlı bir yapıya yönelmiştir.

19. YDO'nun genlik ve periyot değerleri BDO'ya kıyasla daha düşüktür. Ayrıca YDO'lar boş boru tipinde yüzey artırımı borulara kıyasla daha büyük kütleli debilerde ortaya çıkmıştır.

5.2. Öneriler

Bu tez iş yapan akışkanı su olan kaynamalı yatay bir boru sisteminde iki fazlı akış karasızlıkları ve bu karasızlıklara ısı transfer iyileştirmesinin etkisini inceleyen bir çalışmadır. Bu çalışma neticesinde aşağıda sıralanan öneriler bundan sonraki benzer araştırmacılar için fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

1. Bu çalışmada iş yapan akışkan olarak su kullanılan maksimum efektif çapı 8,95 mm olan boruda akış rejimlerini belirlemek için boru alt ve üst yüzey sıcaklıklarından yararlanılarak deneyler yapılmış ancak aynı sistemde iş yapan akışkan olarak R-11'in kullanıldığı duruma göre tüm akış rejimleri net olarak belirlenememiştir. Ayrıca yine aynı sistemde efektif çapı daha büyük boruda yapılan deneysel çalışmaya oranla aynı akış rejimlerini net olarak belirleyememe durumu ortaya çıkmıştır. Bu yüzden akış rejimlerinin belirlenmesi için ileri düzey akış ölçüm sistemlerine (yüksek hızlı video kameralar, mikro-termo elemanlar gibi) ihtiyaç vardır.
2. Termal osilasyonların net olarak belirlenebilmesi için yani alt cidar ve üst cidar arasında sıcaklık farkının görülebilmesi için daha yüksek çaplı borularda araştırma yapılmalıdır. Çünkü boru çapı küçüldükçe kaynama sırasında oluşan kabarcıklar alt ve üst cidar arasındaki tüm yüzeyi kaplamıştır. Ayrıca sistem basıncının artırılması uygulamada var olan nükleer reaktörlerdeki problemlerin belirlenebilmesi için gereklidir.
3. Çalışma içerik olarak tamamen deneysel yönetime sahiptir. Yapılan deneylerin sayısal yöntemler kullanılarak karşılaştırma yapılarak hata analizi incelenebilir.
4. Yatay sistemde akış yönüne dik etkiyen yerçekimi kuvvetinin etkisi neticesinde görülen sonuçları, aynı efektif çapa sahip boru kullanılarak dikey sistemler için elde edilecek sonuçlar karşılaştırılmalı olarak incelenebilir.

5. Yüzey artırım elemanlarının geometrisi ve yapısının çeşitlendirilmesi iki fazlı akış kararsızlıklarına etkisini görmek açısından faydalı olacaktır.
6. Yatay sistemde yapılan bu çalışma, dikey veya eğik sistemlerde aynı veya farklı yüzey artırım elemanına sahip borular için de yapılabilir.
7. Doğal sıkıştırılabilir hacme sahip daha uzun borular ve farklı çaptaki borular içinde araştırmalar yapılabilir.
8. Yapılan deneylerde sisteme verilen ısı enerjisi elektrik bağlantı kabloları yardımıyla gerçekleşmiştir. Ancak verilen enerji boruya homojen bir bağlantı şeklinde değil borunun giriş ve çıkış yerlerine yakın kısımlarına bağlanarak yapılmıştır. Bu ise cidar sıcaklık ölçümlerinde belirsizliklere yol açmıştır. Bu bakımdan test borusuna verilecek enerjinin daha homojen bir yöntem kullanılarak uygulanması gerekmektedir.
9. Sistemde test borusuna akış rejimlerinin belirlenebilmesi ve daha net akış geçişlerin izlenebilmesi için şeffaf bir ara bağlantı elemanı olan gözetleme elemanının yerleştirilmesi, ölçümlerin, gözlemlerin ve veri okuma sistemlerinin doğruluğunu artırmak için hassas veri okuma, görüntüleme ve ışıklandırma gibi günümüz teknolojinde var olan sistemlerin deney düzeneğine entegre edilmesi gerekmektedir.

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.
- 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., 1982. Instabilities in parallel channel of forced convection boiling upflow system (V). *J. of Nuclear Science and Technology*, 20 (4), p 286-301.
- Aritromi, 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.
- Bao, Z.Y., Fletcher, D.F., Haynes B.S., 1999. An experimental study of gas-liquid flow in a narrow conduit. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, p 2313-2324.
- Bergles, A. E., 1977. Review of instabilities in two phase systems. *Two Phase Flows and Heat Transfer*, Kakaç, S. and Mayinger, F. (ed.), 1, p 383- 385.
- 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., Delhay, 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.
- Coleman, J. W. and Garimella, S., 2002. Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a. *International Journal of Refrigeration*, 26, p 117–128.
- Cumo, M., Palazzi, G. and Rinaldi, L., 1981. An experimental study on two phase flow instability in parallel channels with different heat flux profile. *Comitato nazionale energia Nucleare, CNEN- RT/ ING (81) 1*, p 1- 15.
- 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 Transfer 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 Hasegawa, S., 1979. Analysis on Two-Phase Flow Instability in Paralel Multichannels. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 16(3), 190-199.
- 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, 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., Akyüz, 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. *Warme 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., Karşlı, 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.
- Karşlı S., 2000, Zorlanmış Konveksiyonlu Kaynamalı Yatay Bir Boru Sisteminde İki Fazlı Akış Kararsızlıklarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora tezi, Atatürk Ün. Mühendislik Fakültesi, Erzurum.
- Karşlı S., Yılmaz M., ve Çomaklı Ö., 2001. Isı transferi iyileştirmesinin iki fazlı akış katmanlaştırmasına etkisi. *Termodinamik*, 102, 68-78, 2001.
- Karsli, S., Yilmaz, M., Çomakli, 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.
- Mauro, A.W., Quibe'n, J.M., Mastrullo, R., Thome, J.R., 2007. Comparison of experimental pressure drop data for two phase flows to prediction methods using a general model. *International Journal of Refrigeration*, 30 (2007), p 1358-1367.
- Menteş, A., Yıldırım, O. T., Kakaç, S. and Veziroğlu, T. N., 1984. Two-phase flow instabilities in a single channel upflow system. *Proceedings of The Japan-U.S. seminar on two-phase flow Dynamics*, Lake Placid, NY, USA, p 5-8.
- 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.
- 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.
- Tadrist, L., 2006. Review on two-phase flow instabilities in narrow spaces. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28, p 54–62.
- 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 parallel channel upflow system. AEC- Oak Ridge National Laboratory Subcontract No: 2975, Final Report.
- 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., Groeneveld, D. C. and Cheng, S. C., 1989. Chf prediction for horizontal tubes. International Journal of Multiphase Flow, 16, p 123-128.
- Xiao, M., Chen, X. J., Zhang, M. Y., Veziroğlu, T. N. and Kakaç, S., 1993. A multivariable linear investigation of two phase flow instabilities in parallel boiling channels under high pressure. Int. J. Multiphase Flow, 19, p 65-77.
- 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.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Karagöz, Ş., Bedir, Ö., 2007. İki Fazlı Akışlarda Isı Transfer İyileştirmesi-1 Termodinamik, 176, 76-86.
- Yılmaz, M., Çomaklı, Ö., Karagöz, Ş., Bedir, Ö., 2007. İki Fazlı Akışlarda Isı Transfer İyileştirmesi-2 Termodinamik, 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

1982 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 1999 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Bölümü’nden 2003 yılında mezun oldu. 2004 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalından 2007 yılında mezun oldu. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora’ya başladı. 2004-2008 yılları arasında özel sektörde mekanik tesisat, sıhhi tesisat ve doğalgaz tesisatı gibi alanlarda proje çalışmaları ve kontrolörlük yaptı. 2009-2011 yılları arasında Ankara Ulaştırma Bakanlığı’nda Makine Mühendisi olarak görev yaptı. 2011 yılı Kasım ayında Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Halen bu görevini sürdürmektedir.