

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞININ
DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Ömer ÇAM**

**Danışman
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

Doktora Tezi

**Mayıs 2019
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞININ
DENEYSEL İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Ömer ÇAM**

**Danışman
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

**Bu çalışma; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)
tarafından MAG-215M821 numaralı proje ile desteklenmiştir.**

**Mayıs 2019
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.



Ömer ÇAM

“Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.



Hazırlayan

Ömer ÇAM



Danışman

Prof. Dr. İlker YILMAZ



Sivil Havacılık ABD Başkanı

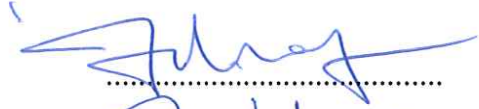
Prof. Dr. İlker YILMAZ

Prof. Dr. İlker YILMAZ danışmanlığında **Ömer ÇAM** tarafından hazırlanan “**Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Sivil Havacılık** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

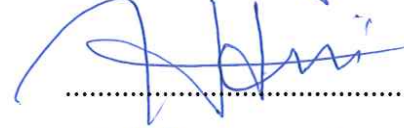
24 / 05 / 2019

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. İlker YILMAZ



Üye : Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN



Üye : Prof. Dr. Mustafa BAYRAK



Üye : Prof. Dr. Selahaddin Orhan AKANSU



Üye : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 28/05/2019 tarih ve 2019/32-07 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında değerli bilimsel katkı ve eleştirileriyle yol gösteren, sonsuz sabır ve ilgiyle beni çalışmaya teşvik eden ve bu günlere gelmemde en büyük pay sahibi hocam Sayın Prof. Dr. İlker YILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı aynı laboratuvarı paylaştığımız çalışma arkadaşım Dr. Öğr. Üyesi Harun YILMAZ'a teşekkür ederim.

1001 – Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında MAG-215M821 numaralı proje ile gerekli maddi desteği sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Ayrıca; bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi annem Beyhan ÇAM ve babam Cemal ÇAM'a, çalışmalarım süresince beni sabırla destekleyen sevgili eşim Keziban ÇAM'a ve tezimin yazım aşamasında gülüşüyle beni motive eden oğlum Yiğit Efe ÇAM'a en derin duygularla teşekkür ederim.

Ömer ÇAM

Mayıs 2019, KAYSERİ

SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Ömer ÇAM

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Mayıs 2019
Danışman: Prof. Dr. İlker YILMAZ

ÖZET

Türbülanslı ve fakir ön karışımli yakıcılar, düşük kirletici emisyonlara sahip modern gaz türbin motorlarının geliştirilmesi için büyük bir potansiyele sahip olmalarına rağmen ısı salınımı dalgalanmaları ve yakıcı akustikleri arasındaki eşleşmenin sebep olduğu yanma kararsızlıklarına karşı oldukça duyarlıdırlar. Bu nedenle, kararsızlıkların meydana geldiği şartları tahmin etmek alev davranışını anlayabilmek için son derece önemlidir.

Bu tez çalışmasında, farklı oranlarda sentetik gaz yakıtların ($H_2/CO/CO_2/CNG/CH_4$ karışımları) yanma kararsızlıkları ve basınç dalgalanmaları ile alev sönmesi ve alev geri tepmesi olayının ortaya çıkışı arasındaki ilişki ön karışımli-girdap üreteçli-laboratuvar ölçekli bir yakıcıda deneysel olarak araştırılmıştır. Yanma odasına kollarına yerleştirilen mekanik aktüatör görevi gören hoparlörler vasıtasıyla alev farklı frekanslardaki (0-300 Hz) sinüzoidal ses dalgalarıyla akustik olarak zorlanmıştır. Yapılan dinamik/statik basınç, ışık şiddeti, sıcaklık ve emisyon ölçümleri ile anlık alev görüntüleri alınarak yakıt kompozisyonu, eşdeğerlik oranı, girdap sayısı ve girdap üretici çap oranının alev davranışı üzerine etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen veriler, 3 farklı frekans değerinde (95, 175, 260 Hz) yanma odasının yüksek genlikli basınç dalgalanmaları ile rezonansa girdiğini göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda, yakıt kompozisyonu ve eşdeğerlik oranının alev kararlılığı üzerine etkisi belirgin bir şekilde gözlemlenirken, girdap sayısı ve girdap üretici çap oranının etkisi ise tekdüze bir davranış sergilememiştir.

Anahtar Kelimeler: Sentetik gazlar, Yanma kararsızlıkları, Termo-akustik zorlama, Alev geri tepmesi, Alev sönmesi, Eşdeğerlik oranı, Girdap sayısı

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMBUSTION INSTABILITY OF SYNTHETIC FUELS

Ömer ÇAM

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, May 2019

Supervisor: Prof. Dr. İlker YILMAZ

ABSTRACT

Although turbulent and lean pre-mixed burners have a great potential for development of modern gas turbine engines with low pollutant emissions, they are highly susceptible to combustion instabilities caused by coupling between heat release fluctuations and combustor acoustics. Therefore, predicting conditions in which instabilities occur is extremely important to understand flame behavior.

In this thesis study, the combustion instability of synthetic gas fuels ($H_2/CO/CO_2/CNG/CH_4$ mixtures) at various proportions and relationship between pressure fluctuations and occurrence of flame blowout and flashback were experimentally investigated in a premixed-swirl stabilized-laboratory scale burner. The flame was acoustically forced by sinusoidal sound waves at different frequencies (0-300 Hz) by means of loudspeakers acting as mechanical actuators mounted in two-side of the combustion chamber. Dynamic/static pressure, luminous intensity, temperature and emission measurements and instant flame images were taken, and the effects of fuel composition, equivalence ratio, swirl number and swirler hub to outer diameter ratio on flame behavior under thermo-acoustic forcing were investigated in detail. The obtained data showed that the combustion chamber resonated with high amplitude pressure fluctuations at 3 different frequencies (95, 175, 260 Hz). As a result of the experiments, the effect of the fuel composition and equivalence ratio on flame stability was clearly observed, whereas the swirl number and swirler hub to outer diameter ratio showed non-monotonic behavior.

Keywords: Synthetic gases, Combustion instabilities, Thermo-acoustic forcing, Flashback, Flame blowout, Equivalence ratio, Swirl number,

İÇİNDEKİLER

SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Termo-Akustik Kararsızlıklar Üzerine Çalışmalar.....	3
1.2. Zorlanmış Termo-Akustik Kararsızlıklar Üzerine Çalışmalar	17

2. BÖLÜM

YANMA KARARSIZLIKLARI

2.1. Giriş.....	24
2.1. Tarihsel Bakış	25
2.2.1. Higgins ve Rijke'nin Yaptığı Çalışmalar	25
2.2.2. Rayleigh Kararlılık Kriteri	26

2.2.3. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Alanında Yapılan Çalışmalar	29
2.3. Yanma Kararsızlıkları.....	30
2.3.1. Statik Yanma Kararsızlıkları	31
2.3.1.1. Alev Sönmesi.....	31
2.3.1.2. Alev Geri Tepmesi.....	34
2.3.2. Dinamik Yanma Kararsızlıkları.....	37
2.4. Kararsızlıkların Oluşum Mekanizması	39
2.5. Kararsızlıkların Kontrol Yöntemleri	41
2.5.1. Pasif Kontrol Yöntemleri	42
2.5.1.1. Helmholtz Rezonatörü	42
2.5.1.2. Delikli, Yarıklı veya Gözenekli Kaplamalar.....	44
2.5.1.3. Akış Bölme Elemanları.....	46
2.5.2. Aktif Kontrol Yöntemleri.....	48

3. BÖLÜM

DENEY SİSTEMİ

3.1. Giriş.....	50
3.2. Gaz Temini.....	53
3.2.1. Hava Temini	53
3.2.2. Yakıt Temini.....	55
3.3. Önkarişimlı ve Girdap Üreteçli Yakıcı	61
3.3.1. Ön Karıştırıcı	61
3.3.2. Yakıcı	63
3.3.3. Girdap Üreteçleri.....	65
3.3.4. Ateşleme ve İyonizasyon Sistemi	69
3.2. Akustik Yanma Odası.....	71
3.5. Deney Ölçüm Ekipmanları.....	77

3.5.1. Sıcaklık Ölçümü	80
3.5.1.1. Sıcaklık Ölçüm Hatalarının Düzeltilmesi	81
3.5.2. Basınç Ölçümü	83
3.5.2.1. Piezorezistif Basınç Ölçerler	84
3.5.2.2. Dinamik Basınç Sensörü	84
3.5.3. Optik Dedektörler (Fotodiyotlar)	85
3.5.4. Emisyon Ölçüm Cihazı	85
3.6. Belirsizlik Analizi	86
3.7. Deneysel Çalışma Şartları	90

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Giriş	95
4.2. Yanma-Akustik Odanın Doğal Akustik Modları	103
4.3. Termo-Akustik Zorlama Altında Alev Davranışı	108
4.3.1. Eşit H ₂ ve CO İçeriğine Sahip (H ₂ /CO:1) Sentetik Gazların Alev Davranışı	108
4.3.1.1. Eşdeğerlik Oranının Etkisi	115
4.3.1.2. Girdap Sayısının Etkisi	123
4.3.1.3. Çap Oranının (d _b /d ₀) Etkisi	140
4.3.2. Yüksek CO İçeriğine Sahip (H ₂ /CO:0.5) Sentetik Gazların Alev Davranışı	145
4.3.3. Yüksek H ₂ İçeriğine Sahip (H ₂ /CO:2) Sentetik Gazların Alev Davranışı	150
4.3.4. Hidrojence Zenginleştirilmiş (H ₂ /CO:3) Sentetik Gazların Alev Davranışı	155
4.3.5. Termo-Akustik Zorlamanın Emisyon ve Sıcaklık Dağılımına Etkisi ...	159

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar	164
5.2. Öneriler	166
KAYNAKLAR.....	168
EKLER.....	186
EK 1. Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri.....	186
EK 2. Ölçüm Ekipmanlarının Kalibrasyon Sertifikaları	187
ÖZGEÇMİŞ.....	200

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
RP-3	Kerosen türevi endotermik bir yakıt	
LES	Large eddy simulation	
PID	Proportional integral derivative	
PIV	Particle image velocimetry	
PLIF	Planar laser-induced fluorescence	
TFT	Thin Film Transistor	
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu	
IGCC	Integrated gasification combined cycle	
CNG	Compressed natural gas	
TTL	Transistor-transistor logic	
CCD	Charge coupled device	
LHV	Low heating value	J/kg
AID	Alt ısı değer	J/kg
S	Girdap sayısı	
ϕ	Eşdeğerlik oranı	
f	Frekans	Hz
dB	Desibel	
C_p	Sabit basınçta özgül ısı	J/kg.K
C_v	Sabit hacimde özgül ısı	J/kg.K
k	Gaz düzeltme faktörü	
SG	Specific gravity	
ρ	Yoğunluk	kg/m ³
α	Kanatçık açısı	Derece
γ	Isıl kapasite oranı	
t	Kanatçık kalınlığı	mm
d_h	Girdap üretici dış çapı	mm
d_o	Girdap üretici dış çapı	mm
z	Kanatçık sayısı	
G_θ	Teğetsel momentumun aksenal akısı	
G_x	Eksenel momentumun aksenal akısı	

B	Kanatçık boyu	mm
T_{tel}	Sıcaklık	
k_{Tel}	Isı iletim Katsayısı	W/m.K
σ	Stefan-Boltzman sabiti	
L	Tel uzunluğu	m
ε_{Tel}	Telin yayıcılığı	
h	Taşınım ile ısı transfer katsayısı	W/m ² .K
$A_{Yüzey}$	Telin kesit alanı	m ²
δx_i	Hata oranları	
Q	Termal Güç	W
θ_{qp}	Basınç ve ısı salınımı arasındaki faz farkı	Derece
Re	Rayleigh indeksi	
β	Zeldovich sayısı	
M	Mach sayısı	
L_i	Dalga enerjisi kayıpları	
p^t	Basınç salınımı dalgalanmaları	
q^t	Isı salınımı dalgalanmaları	
T	Dalgalanma periyodu	
u^t	Hız dalgalanmaları	
Da	Damköhler sayısı	
τ_{res}	Reaktantların reaksiyon bölgesinde kalma zamanı	
τ_{chem}	Reaksiyon için gerekli kimyasal zaman	
S_L	Laminer yanma hızı	
d	Karakteristik uzunluk ölçeği (resirkülasyon bölgesi uzunluğu)	
α	Termal difüzyon (ısı yayılma)	
U_{ref}	Hız ölçeği	
V	Boşluk hacmi	m ³
c	Ses hızı	m/s
κ	Adyabatik indeksi	
U	Eksenel hız bileşeni	
W	Teğetsel hız bileşeni	
m	Girdaplı kısmın girdapsız kısma olan oranı	
\dot{m}	Kütleli akış oranı	kg/s

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3. 1. Kütle akış kontrolcöleri için gaz düzeltme faktörleri.	59
Tablo 3. 2. İmal edilen girdap üreteçlerinin geometrik değerleri.	68
Tablo 3. 3. Emisyon analizörü ölçüm hataları ve aralıkları.	86
Tablo 3. 4. Kütle akış kontrolcöleri ölçüm hata oranları.	88
Tablo 3. 5. CNG'nin termofiziksel özellikleri.	91
Tablo 3. 6. Deneilerde kullanılan gaz karışımlarının bileşenleri.	93
Tablo 3. 7. Deneilerde kullanılan gaz karışımlarının yanma özellikleri.	94
Tablo 4. 1. Deneilerde kullanılan sentetik gazların kararlı yanma aralıkları.	96
Tablo 4. 2. H ₂ , CO ve CH ₄ gazlarının yanma davranışları.	101
Tablo 4. 3. Farklı d _h /d _o oranlarında kararlı yanma aralıkları.	103
Tablo 4. 4. SM5 yakıtının akustik zorlama altında gerçekleşen alev geri tepmesi sonucu yakıcı iç çeperlerinde oluşan basınç değerleri.....	139
Tablo 4. 5. SR1 yakıtının zorlama altında alev ve baca sıcaklıkları.	162
Tablo 4. 6. SM4 yakıtının akustik zorlama altında alev ve baca sıcaklıkları.....	163
Tablo 4. 7. SR1 yakıt karışımının zorlama altında emisyon üzerine etkisi.....	163
Tablo EK 1. 1. SR1 sentetik gaz karışımı düzeltilmiş sıcaklık değerleri.....	186
Tablo EK 1. 2. SM4 sentetik gaz karışımı düzeltilmiş sıcaklık değerleri.....	186

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Yanma kararsızlıkları sonucu yakıcıda meydana gelen hasar.	24
Şekil 2. 2. Termo-akustik yanma kararsızlıklarının karşılaştığı yakıcılar.	25
Şekil 2. 3. Higgins (sol) ve Rijke'nin (sağ) deney düzeneği.....	26
Şekil 2. 4. Basınç dalgalanmaları genliğinin faz farkı ile değişimi.	28
Şekil 2. 5. Yanma kararsızlıklarının kronolojisi.	29
Şekil 2. 6. H ₂ /CO/CH ₄ yakıt karışımları için kimyasal zaman (ms) bağımlılığı.....	32
Şekil 2. 7. H ₂ /CO/CH ₄ yakıt karışımlarının fakir alev sönmesi limitleri üzerine etkisi..	33
Şekil 2. 8. Bunsen tipi bir yakıcıda alev rejimleri.....	33
Şekil 2. 9. Farklı alev rejimleri.....	34
Şekil 2. 10. Ön karışımli metan alevinin sönmesi ve geri tepmesi.	36
Şekil 2. 11. Alevin açık (sol) ve kapalı (sağ) ortamda yayılması.	38
Şekil 2. 12. Kararsız laminer alevlerin ürettiği ses dalgalarının yayılması.....	38
Şekil 2. 13. Ses dalgalarının gelişerek doygunluğa ulaşması.....	39
Şekil 2. 14. Yanma kararsızlığının oluşması için gereken şartlar.	40
Şekil 2. 15. Yanma kararsızlıklarına sebep olan geri besleme döngüsü.	41
Şekil 2. 16. Gaz türbin motoru yanma odası Helmholtz rezonatörü.....	42
Şekil 2. 17. Helmholtz rezonatörünün ses dalgalarını sönümlemesi.	43
Şekil 2. 18. Delikli sönümleyici örnek olarak bir turboprop motoru yanma odası.....	45
Şekil 2. 19. Helmholtz rezonatörü ve farklı türevleri (çeyrek ve yarım dalga tüpleri) ..	45
Şekil 2. 20. Gözenekli malzemelerin akustik sönümleyici olarak yakıcıda kullanımı. ..	46
Şekil 2. 21. Akış bölme elemanları (katı yakıtlı roketler).....	47
Şekil 2. 22. Akış bölme elemanları (sıvı yakıtlı roketler).....	48
Şekil 2. 23. Kapalı ve açık çevrim aktif kontrol yöntemleri.	49
Şekil 3. 1. Deney sisteminin şematik gösterimi.	51
Şekil 3. 2. Deney sistemi (sol yan).....	52
Şekil 3. 3. Deney sistemi (sağ yan).	52
Şekil 3. 4. Hava kompresörü.	53
Şekil 3. 5. 1 m ³ hacme sahip ek hava tankı.	54
Şekil 3. 6. Hava regülatörü ve filtresi.	55
Şekil 3. 7. Hava hattı kütle akış kontrolcüsü.....	55

Şekil 3. 8. Tedarik edilen yakıtlar.	56
Şekil 3. 9. Çift kademeli özel gaz regülatörü.	57
Şekil 3. 10. Gaz yakıt akış kanalları.	58
Şekil 3. 11. Vakum sistem kontrolcüsü.	58
Şekil 3. 12. Yakıt kollektörü.	61
Şekil 3. 13. Ön karıştırıcının demonte katı modeli.	62
Şekil 3. 14. İmal edilen ön karıştırıcı.	62
Şekil 3. 15. Yakıcının patlatılmış görünümü.	64
Şekil 3. 16. İmal edilen yakıcı.	64
Şekil 3. 17. Girdap üreteçlerinin izometrik ve üstten görünüşü.	68
Şekil 3. 18. İmal edilen girdap üreteçleri.	69
Şekil 3. 19. Kontrol paneli iç kısmı (sol) ve kapağı (sağ).	70
Şekil 3. 20. Pilot ateşleme hattı (alt).	70
Şekil 3. 21. Pilot ateşleme hattı (üst).	71
Şekil 3. 22. Yanma odasının şematik görünümü.	72
Şekil 3. 23. Akustik yanma odası.	73
Şekil 3. 24. Kulakçığın izometrik katı modeli.	74
Şekil 3. 25. Hoparlör ve yanma odasına monte edilmiş hali.	75
Şekil 3. 26. Fonksiyon jeneratörü.	76
Şekil 3. 27. Kuvvetlendirici.	76
Şekil 3. 28. Osiloskop.	77
Şekil 3. 29. Fonksiyon jeneratörü, güç kuvvetlendiricisi ve osiloskop.	77
Şekil 3. 30. Deney düzeneği ölçüm ekipmanları.	78
Şekil 3. 31. Veri toplayıcıları ve yazılım arayüzü.	80
Şekil 3. 32. Termoçiftler.	81
Şekil 3. 33. Termoçiftin yapısı.	81
Şekil 3. 34. Sıcak noktada gerçekleşen ısı transferi dengesi.	82
Şekil 3. 35. Piezorezistif basınç ölçerler.	84
Şekil 3. 36. Dinamik basınç sensörü.	85
Şekil 3. 37. Optik dedektörler.	85
Şekil 3. 38. Emisyon ölçüm cihazı.	86
Şekil 3. 39. CNG bileşimi ve hacimce % miktarları.	91

Şekil 4. 1. Farklı H_2/CO oranlarında kararlı yanma aralıkları.	98
Şekil 4. 2. Aynı CO_2 konsantrasyonuna sahip karışımların kararlı yanma aralıkları.	99
Şekil 4. 3. Farklı d_h/d_0 oranlarında kararlı yanma aralıkları.	102
Şekil 4. 4. Hoparlörlere gönderilen sinüzoidal ses sinyalleri.	104
Şekil 4. 5. Akustik yanma odasının dinamik basınç ölçümleri.	105
Şekil 4. 6. Basınç ölçümlerinin ses seviyesi karşılıkları.	106
Şekil 4. 7. Farklı zorlayıcı frekanslarda yanma-akustik odada basınç dağılımı.	107
Şekil 4. 8. SM1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	109
Şekil 4. 9. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	110
Şekil 4. 10. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	110
Şekil 4. 11. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	111
Şekil 4. 12. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	112
Şekil 4. 13. $H_2/CO:1.0$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.	112
Şekil 4. 14. $H_2/CO:1.0$ sentetik gazlarının alev görüntüleri.	114
Şekil 4. 15. Elektromanyetik spektrum.	114
Şekil 4. 16. SM1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).	116
Şekil 4. 17. Zorlama esnasında anlık alev görüntüleri (SM1).	116
Şekil 4. 18. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).	117
Şekil 4. 19. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).	118
Şekil 4. 20. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).	119
Şekil 4. 21. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.7$).	120
Şekil 4. 22. Zorlama esnasında anlık alev görüntüleri (SM3).	120
Şekil 4. 23. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.7$).	121
Şekil 4. 24. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.7$).	122
Şekil 4. 25. SM1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.5$).	124
Şekil 4. 26. SM1 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.	124
Şekil 4. 27. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.6$).	125
Şekil 4. 28. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).	125
Şekil 4. 29. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).	126
Şekil 4. 30. SM2 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.	126
Şekil 4. 31. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).	127
Şekil 4. 32. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).	128
Şekil 4. 33. SM3 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.	128

Şekil 4. 34. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).....	129
Şekil 4. 35. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).....	129
Şekil 4. 36. SM4 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.....	130
Şekil 4. 37. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.8$).....	131
Şekil 4. 38. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=1.0$).....	132
Şekil 4. 39. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.6$).....	132
Şekil 4. 40. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.8$).....	132
Şekil 4. 41. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=1.0$).....	133
Şekil 4. 42. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).....	133
Şekil 4. 43. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.8$).....	133
Şekil 4. 44. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=1.0$).....	134
Şekil 4. 45. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=0.6$).....	134
Şekil 4. 46. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=0.8$).....	134
Şekil 4. 47. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=1.0$).....	135
Şekil 4. 48. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).....	135
Şekil 4. 49. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.8$).....	135
Şekil 4. 50. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=1.0$).....	136
Şekil 4. 51. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=0.6$).....	136
Şekil 4. 52. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=0.8$).....	136
Şekil 4. 53. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=1.0$).....	137
Şekil 4. 54. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=0.6$).....	137
Şekil 4. 55. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=0.8$).....	137
Şekil 4. 56. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=1.0$).....	138
Şekil 4. 57. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.6$ ve $\Phi=0.6$).....	138
Şekil 4. 58. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.6$ ve $\Phi=0.8$).....	138
Şekil 4. 59. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.6$ ve $\Phi=1.0$).....	139
Şekil 4. 60. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.6$).....	140
Şekil 4. 61. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).....	141
Şekil 4. 62. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=0.6$).....	142
Şekil 4. 63. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).....	142
Şekil 4. 64. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=0.6$).....	143
Şekil 4. 65. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=0.6$).....	144
Şekil 4. 66. SM5 karışımının farklı girdap sayılarında alev görüntüleri ($d_h/d_o=0.33$)..	144

Şekil 4. 67. SL1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	146
Şekil 4. 68. SL2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	147
Şekil 4. 69. SL3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	147
Şekil 4. 70. SL4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	148
Şekil 4. 71. SL5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	149
Şekil 4. 72. $H_2/CO:0.5$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.	149
Şekil 4. 73. $H_2/CO:0.5$ sentetik gazlarının alev görüntüleri.....	150
Şekil 4. 74. SH1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	151
Şekil 4. 75. SH2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	152
Şekil 4. 76. SH3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	153
Şekil 4. 77. SH4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	153
Şekil 4. 78. SH5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).	154
Şekil 4. 79. $H_2/CO:2.0$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.	154
Şekil 4. 80. $H_2/CO:2.0$ sentetik gazlarının alev görüntüleri.....	155
Şekil 4. 81. SR2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.4$).	156
Şekil 4. 82. SR3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.4$).	157
Şekil 4. 83. SR4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.4$).	158
Şekil 4. 84. $H_2/CO:3.0$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.	158
Şekil 4. 85. $H_2/CO:3.0$ sentetik gazlarının alev görüntüleri.....	159
Şekil 4. 86. Farklı zorlama frekanslarında aksenal sıcaklık dağılımları.	161
Şekil 4. 87 . Doğal akustik modlarda zorlama altında sıcaklık dağılımları.	163

GİRİŞ

Sentetik gazlar, esasen H₂ ve CO gazlarını ihtiva etmekle beraber, üretiminde kullanılan yöntem veya hammaddenin içeriğine bağlı olarak farklı gaz bileşenlerine (CO₂, N₂, H₂O, CH₄ vb.) ve geniş bir aralıkta yakıt kompozisyonuna sahip olabilmektedir. Sentetik gazların kullanımıyla birlikte kirletici emisyonlarının azaltılması ve böylece daha temiz elektrik enerjisi üretimi mümkün olabilmektedir. Günümüzde bu gazları kullanan enerji santralleri ile geleneksel kömür esaslı termik santrallere oranla CO emisyonlarında %82, NO_x emisyonlarında %24 ve SO₂ emisyonlarında %71 azalma sağlanmıştır [1].

Düşük emisyon konsantrasyonlarının karşılanması ve içindeki zararlı bileşenlerin ortadan kaldırılması veya azaltılması, sentetik gazları hem günümüz hem de geleceğimiz için önemli bir enerji kaynağı haline getirmektedir. Fakat bu faydaların yanında sentetik gazlar, konvansiyonel gaz yakıtlara kıyasla düşük ısıl değerlere ve geniş bir bileşim aralığına sahiptir.

Değişken kompozisyonlara ve düşük ısıl değere sahip sentetik gazlar yanma kinetiklerini farklılaştırarak basınç dalgalanmaları ve daimî olmayan ısı salınımı arasındaki eşleşmeden kaynaklanan termo-akustik yanma kararsızlıklarına neden olmaktadır. Bunun sonucunda yakıcılarda ciddi yapısal hasarlar oluşmakta ve yanma sisteminin optimum ömrü kısalmaktadır. Bu sebeple, sentetik gazlarda yanma kararsızlıklarının meydana geldiği şartları tahmin etmek önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, farklı yakıt kompozisyonu, girdap sayısı, eşdeğerlik oranı ve girdap üretici çap oranında sentetik gazların zorlanmış akustik şartlar altında dinamik (termo-akustik yanma kararsızlıkları, alev sönmesi ve geri tepmesi) ve statik (sıcaklık ve emisyon) alev davranışının belirlenmesidir.

Bu amaçla, laboratuvar ölçekli, n karışımlı, girdap üreteçli bir yakıcı tasarlanmış ve deney düzeneği oluşturulmuş, belirlenen sentetik gaz yakıtların kararlı yanma limitleri ve yakıcının doğal akustik modları tespit edilmiş, yakıcının her iki koluna yerleştirilen hoparlörler yardımıyla alevler akustik olarak zorlanmış ve yanma kararsızlıkları tetiklenmiş, bu şartlar altında, araştırmaya dahil edilen değişkenlerin alev davranışını üzerine etkileri incelenmiştir.

Literatürde sentetik gaz yakıtların termo-akustik yanma kararsızlıkları konu alan birçok çalışma bulunmakta olup, yapılan literatür araştırması bir sonraki bölümde kısaca özetlenmiştir.



1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Termo-Akustik Kararsızlıklar Üzerine Çalışmalar

Termo-akustik yanma kararsızlıkları; ısı salınım (ya da alev) dalgalanmalarının yakıcı veya yanma odası akustiği ile etkileşiminden kaynaklanan geribesleme sonucunda ortaya çıkar. Bu etkileşim sonucunda ortaya çıkan basınç dalgalanmaları ve ısı salınımı arasındaki eşleşmenin gücü ile akustik kayıpların karşılaştırılması sonucu bu tür kararsızlıklar belirlenebilir. Basınç dalgalanmalarının oluşturduğu farklı frekanslardaki yüksek genlikli ses dalgaları sistem elemanları üzerinde ciddi zararlara sebep olabilir [2]. Bu nedenle yanma sisteminin kararsızlıklara vereceği tepki bütün yanma sisteminin kararlı çalışma aralığının tespit edilmesi açısından önem arz etmektedir. Yanma sisteminde basınç ve ısı salınımı dalgalanmaları gözlenmiyor ise o sistem kararlı olarak adlandırılmaktadır veya sistem sonlu süreli dalgalanmalara maruz kaldıktan sonra tekrar eski haline dönüyorsa yine aynı şekilde kararlı olarak adlandırılabilir. Gerçekte her yanma sisteminde geçici süreli olan farklı şekil ve yoğunluklarda dalgalanmalar mevcuttur. Eğer sistemde var olan bu dalgalanmalar zamanla sönümlenmeyip artar ise yanma sistemi dışardan herhangi bir etki olmaksızın çevre (yanma odası) ile etkileşime girer ve kararsızlaşır [3]. Bu konu, birçok araştırmacı tarafından hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir.

Isı yayılımı ve akustik pertürbasyon arasındaki yapıcı etkileşim, akustik basınç genliklerinin büyümesinden sorumlu olup, yanma sistemlerinde yüksek genlikli yanma kararsızlıklarına neden olur. Kendinden tahrikli yanma kararsızlıklarının tanımlanmasında ısı salınımı ve akustik basınç arasındaki eşleşme aşamaları önem arz etmesine rağmen daimî olmayan bu etkileşim süreçleri hakkında yeterli bilgi bulunmamaktadır.

Bu eşleşme süreçleri, türbülanslı reaksiyon akış alanlarında var olan akustik ve konvektif dalgalanmaların zaman ve uzunluk ölçeklerinin çeşitliliğinden belirlenebilir. Bu maksatla Kim, iki farklı uyarlanabilir gaz türbin yakıcısı kullanarak kendinden tahrikli kararsızlıkları geniş bir çalışma şartı aralığında deneysel olarak incelemiştir. Basınç-ısı salınımı-hız arasındaki geribesleme eşleşme süreçlerinin bütünlük analizi ile girdap sabitlemeli bir yakıcı sisteminde basınç bozulmalarının başlangıcı, gelişimi ve olgunlaşmasını sistematik bir şekilde incelemiştir. Kendiliğinden başlayan yanma kararsızlıklarının tüm parametre alanı boyunca Rayleigh kriteri tarafından kontrol edildiğini tespit etmiştir. Ayrıca, belirli bir giriş koşulunda ($P_{yanma}=1$ Atm, giriş basıncı; $T_{giriş}=200$ °C, giriş sıcaklığı; $\Phi=0.65$, eşdeğerlik oranı; $S=0.4$, girdap sayısı ve $f=345$ Hz, frekansında) yüksek genlikli hız ve ısı salınımı dalgalanmalarının basınç-ısı salınım eşleşmesi olmadan da bir arada bulunabileceğini gözlemlemiştir. Bu durum, Rayleigh kriterinin kendinden tahrikli kararsızlıkların başlangıcıyla ilişkili olmadığını göstermemektedir. Bununla birlikte Rayleigh kriteri, lineer durumdan nonlineer duruma geçişte (sistemin çevrimi tamamlayarak kararlı hale gelmesi açısından gereklidir) önemli bir rol oynar. Ek olarak, eşdeğerlik oranındaki dalgalanmaların kararsızlık geribesleme mekanizması üzerinde büyük bir etki oluşturduğunu bulmuştur. Sonuç olarak Rayleigh kriterinin kendinden tahrikli kararsızlıkların oluşumu için zayıf bir gereklilik olduğunu tespit etmiştir [4].

Fosil yakıt tüketiminin ve karbondioksit (CO_2) emisyonlarının azaltılmasına yönelik olarak sentetik gaz kullanımındaki artış, araştırmacıları, konvansiyonel yakıtlar için optimize edilmiş yakıcılarda bu gaz yakıtları kullanmadan önce ilgili gazların yanma karakteristiklerini araştırmaya yöneltmiştir. Birçok araştırmacı, yakıt kompozisyonunun kararlı çalışma aralığı (alev geri tepmesi ve alev sönmesi) üzerine etkisini incelerken, yanma kararsızlıklarıyla ilgili diğer hususlar üzerine çok az çalışma bulunmaktadır (örneğin; yanma kararsızlığı ve alev geri tepmesi arasındaki ilişki). Garcia-Armingol ve Ballester, yapmış oldukları çalışmada sentetik gaz yakıtların kirlenici emisyonlarını, kararlı çalışma aralıklarını, yanma kararsızlıklarını ve son olarak basınç dalgalanmaları ile alev geri tepmesi olayının ortaya çıkışı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Sonuçlar, kararlı çalışma aralığını etkileyen en önemli faktörün yakıt kompozisyonu olduğunu göstermiştir. Yakıt kompozisyonunun dışında, yakıcı konfigürasyonunun da bu aralık üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Kritik Damköhler sayısının tanımlanması gibi

bazı yaklaşımların kullanılmasına rağmen sayısal simülasyonlar, belirli aralıklardaki yakıt ve yakıcı konfigürasyonlarının kararlılık aralıklarını oldukça doğru bir şekilde tahmin etmiştir. Ancak, her bir yakıt kompozisyonu verilen bir yakıcı konfigürasyonunda kullanılmadan önce detaylı olarak analiz edilmelidir. Yüksek hidrojen içeriğine sahip sentetik gaz yakıtlarda bazı şartlar altında titreşimli alev geri tepmesi ve termo-akustik kararsızlıklar arasında tetikleyici mekanizmanın var olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuç, termo-akustik kararsızlıklar metan alevlerinde sıklıkla analiz edilmesine rağmen bu tür kararsızlıkların alev geri tepmesi tarafından başlatıldığı sentetik gaz alevlerinde çok az test edildiği için pratik bir öneme sahiptir. Son olarak, yakıt kompozisyonunun kirletici emisyonlar üzerine etkisi incelenmiş, sentetik gazların aynı eşdeğerlik oranlarında metan gazına göre daha düşük nitrojen oksit türevleri (NO_x) ve karbon monoksit (CO) emisyonları oluşturduğu belirlenmiştir [5].

Bir gaz türbin yakıcısının çalışma aralığı yakıt bileşimine oldukça duyarlıdır. Özellikle, sentetik gazların ana bileşeni olan hidrojen gazının yüksek yanma oranlarından dolayı alev davranışı üzerine önemli etkileri vardır. Tuncer et al., bu etkileri incelemek için laboratuvar ölçekli ön karışımli bir deney sisteminde çalışmalar yapmıştır. Yakıt bileşimi, %100 metan gazına değişen oranlarda hidrojen ilave edilerek değiştirilmiştir. Karışım içeriğinde hidrojen miktarı artıkça etkin basınç değerinin ve alev geri tepmesi eğiliminin yükseldiği gözlenmiştir. Ayrıca, hidrojen ilavesinin baskın akustik modda ani değişikliklere neden olabileceğini belirtmişlerdir [6, 7].

Burbano et al., H_2/CO karışımlarının ve N_2 ve CO_2 gazları ile seyreltilmiş eşmolar H_2/CO karışımlarının laminer yanma hızlarına ve alev kararlılıklarına düşük basınçların etkisini hem deneysel hem de teorik olarak incelemiştir. Deney sistemi üç farklı yükseklikte (500 m - 0.947 atm, 1500 m - 0.838 atm, 2300 m - 0.767 atm) konumlandırılmış ve bütün deneyler atmosfer altı basınçlarda gerçekleştirilmiştir. Açı metodu uygulanarak Schlieren görüntülerinden laminer yanma hızları tespit edilmiştir. Sonuçlar, düşük basınç değerlerinde laminer yanma hızının eşdeğerlik oranına bağlı olduğunu, yakıt fakir karışımlarda ve çok yüksek eşdeğerlik oranlarında basıncın artması ile laminer yanma hızının azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, laminer yanma hızının en yüksek olduğu eşdeğerlik oranlarında zıt bir davranış gözlenmiştir (Basınç artıkça laminer yanma hızı artmıştır). Detaylı reaksiyon mekanizması kullanılarak yapılan sayısal çalışmalar elde edilen verileri yeniden oluşturmakta başarılı olamamış, bu nedenle sayısal ve deneysel

sonuçlar arasındaki farklılıkları değerlendirmek için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Yakıt fakir eşdeğerlik oranlarında bütün sentetik gaz karışımlarında alev kararsızlıkları gözlemlenmiştir. Ancak, düşük basınçlarda alev kararlı olduğu eşdeğerlik oranı aralığı arttığı tespit edilmiştir. Bu davranışın alev önünde hidrodinamik kararsızlığı büyük ölçüde azaltan, artan alev kalınlığından kaynaklandığı belirtilmiştir [8].

Park ve Lee, sentetik doğalgaz ve $H_2/CO/CH_4$ karışımı sentetik gazların yanma kararsızlıklarını kısmi ön karışimli, girdap üreteçli ve küçük ölçekli endüstriyel bir gaz türbin model yakıcısında deneysel olarak araştırmışlardır. Test edilen bütün karışımlara değişen oranlarda hidrojen ilavesi yapılarak, yüksek yanma hızı ve yüksek alev sıcaklığı gibi belirgin özellikleri olan hidrojenin yanma kararsızlıkları üzerine etkileri incelenmiştir. Kısmi ön karışimli alevlerin, H_2 içeren sentetik gazların hızlı yanması sonucu ortaya çıkan alev geri tepmesi olayını engellemesi beklenirken, ilginç bir şekilde çok modlu yanma kararsızlıkları (boylamasına mod olmaksızın) gelişmiştir. Bu çok modlu yanma kararsızlıklarını incelemek için laminer yanma hızı, adyabatik alev sıcaklığı ve ateşleme gecikme zamanı gibi yanma özellikleri test edilen bütün karışımlar için hesaplanmış ve bu yanma özelliklerinin kararsızlık frekanslarına ve birbirlerine olan bağılıkları hassas bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuçlar, H_2 içeriğinin (hidrojenin yüksek yanma hızı, sentetik gazların kimyasal zaman skalasını ve alev sıcaklığını CO ve CH_4 'den daha fazla etkilediğinden) yüksek dereceli kararsızlık modlarının ve modlar arasındaki geçişin nedeni olduğunu göstermiştir. Yanma özellikleri arasındaki ilişki, bu özelliklerdeki hassas değişimlerin yüksek modlu alev salınımlarından sorumlu olduğu göstermiştir. Bu nedenle laminer yanma hızı, adyabatik alev sıcaklığı ve ateşleme gecikme zamanı gaz türbin yakıcısı tasarımında önemli parametreler olarak göz önünde bulundurulmalıdır [9].

Park ve Lee, yukarıda özetlenen çalışmalarının devamında karakteristik zaman ve uzunluk skalarını kullanarak çok modlu yanma kararsızlıklarının mekanizmalarını incelemiştirlerdir. Rayleigh kriterini esas alan bir gecikme analizi kullanmışlardır. Bu analiz sırasında kimyasal reaksiyon, ateşleme gecikmesi, akustik, konveksiyon ve yeni geliştirmiş oldukları çarpıklık sürelerini dikkate almışlardır. Burada bahsedilen çarpıklık zamanı, yanma kararsızlığının daha yüksek bir harmonik bileşenin eklenmesinden kaynaklanan dalga bozulmasını yansıtan, tek modlu ve çok modlu dalgalar arasındaki aralığın analitik türevinden elde edilmektedir. Toplam gecikme süresinin çarpıklık

süresine oranı yakıt varyasyonlarına göre tam tekli mod için sıfırdan yüksek harmonik çoklu mod için %11'e kadar değiştirilmiştir. Gecikme süresi analizinde çarpıklık süresinin verimliliği, 98 farklı durumda gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile doğrulanmış ve sonuçlar çoklu mod kararsızlıklarının hassas tahmini için %88.8-99 arasında önemli ölçüde bir gelişme olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, yüksek çoklu modlar için karakteristik zaman skalalarını hesaplarken çarpıklık süresinin önemli bir parametre olarak dikkate alınması gerektiğini ve sentetik gaz beslemeli gaz türbin yakıcılarının güvenli çalışma ve optimum tasarımının geliştirilmesi için uygulanabilir bir metot olduğunu göstermiştir. [10].

Steinberg et al., CH₄/Hava karışımını 10 kW ısı güce sahip girdap üreteçli bir gaz türbin model yakıcısında (308 Hz'de kendiliğinden başlayan termo-akustik salınımlar gösteren) akış-alev etkileşimlerini (akustik olarak eşleşmiş ısı salınım oranı dalgalanmaları ile ilgili) detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Yakıcı dinamiklerini ayırt etmek için 5 kHz sürekli tekrarlama oranında yüksek hıza sahip stereoskopik parçacık görüntülemeli akış ölçüm cihazı kullanmış, OH düzlemsel lazerle uyarılmış floresan ve OH* kemilüminesans ölçümleri gerçekleştirilmişlerdir. Mekânsal-zamansal uygun ortogonal ayrıştırma metodu kullanarak akış alanının eşzamanlı periyodik hareketler (yanma odasına giren reaktantların 308 Hz'de termo-akustik dalgalanmaları, 515 Hz'de yakıcı nozulu etrafında helisel döngüsel girdap çekirdekleri ve bu termo-akustik frekansta eksenel yönde var olan daralma-genişleme hareketler içerdiğini tespit etmişlerdir. Isı salınım merkezi yakıcıyı termo-akustik ve girdap çekirdekleri frekansları arasında sınırlandırmışken, genel ısı salınım oranının termo-akustik frekansta dalgalandığını belirtmiş ve böylece ısı salınım dalgalanmalarının üç boyutlu konumunun, alev yüzeyi ile girdap çekirdeklerinin etkileşimine bağlı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, termo-akustik frekansta bütün ısı salınım dalgalanmalarını etkileyen alev yüzey alanındaki büyük dalgalanmalar gözlemlenmişlerdir [11].

Choi ve Lee, az miktarda H₂ içeren sentetik doğal gazların yanma karakteristiklerini inceleyerek kararlı sınırlar içerisinde izin verilebilir H₂ miktarını belirlemiştir. Çünkü gaz türbinli yakıcıların esas yakıtı olan doğalgaz, H₂ gazına oranla daha yavaş yanar ve sıcaklığı daha düşüktür. Bu durum da yakıt nozullarında hasara ve yanma kararsızlıklarına neden olabilir. Bu nedenle, hidrojen ve %1, %3 ve %5 H₂ içeren sentetik doğalgazların yanma kararsızlıkları, basınç dalgalanmaları ölçülerek ve salınımlı

alevlerin yüksek hızlı OH kemilüminesans görüntüleri kullanılarak ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Karışım içerisinde bulunan H₂ miktarı %0'dan %5'e yükseltildiğinde, yanma kararsızlığının iki önemli göstergesi olan basınç ve ısı salınımı dalgalanmaları hassas ve doğrusal olmayan bir şekilde yanıt vermiştir. Isı salınımı ve basınç dalgalanmaları, %1 H₂ içeren sentetik doğalgazların %3 ve daha fazla H₂ içeren sentetik doğalgazlara kıyasla alev kararsızlık karakteristiklerini değiştirmediklerini göstermiştir. Sonuç olarak; yanma kararsızlık karakteristiğinde belirgin bir değişikliğe neden olmamasından dolayı sentetik doğalgaz karışımlarında %1 H₂ ilavesi izin verilebilir sınır olarak belirlenmiştir [12].

Güç üretiminde kullanılan fakir ön karışimli modern gaz türbin yakıcıları genellikle, basınç dalgalanmaları ve alev tarafından üretilen ısı salınımları arasındaki karşılıklı etkileşimden kaynaklanan yanma kararsızlıklarından etkilenir. Yıllar boyunca, bu fenomeni modellemek ve termo-akustik kararsızlıklarının başlangıcını tahmin edebilmek için farklı birçok yaklaşım geliştirilmiştir. Geliştirilen termo-akustik modellerin hem sayısal hem de analitik doğrulanması için deneysel verilere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda Laera et al., termo-akustik kararsızlıklara yakıcı eğilimini karakterize etmek ve önerilen metodolojiyi doğrulamak için bir deney sistemi tasarlamış ve üretmişlerdir. Gaz türbin sistemlerinde güç üretiminde kullanılan Ansaldo Energia yakıcılarının termo-akustik kararsızlıklara eğilimini değerlendirmek için deneysel bir test düzeneği kurmuşlardır. Düşük Mach sayısı yaklaşımı ve akustik dalgaların lineer davranışı hipotezlerini dikkate alarak, akustik denklemlerde ısı salınım dalgalanmalarını kaynak terim olarak kullanmışlardır. Frekans alanında ise kompleks bir özdeğer problemini çözmüşlerdir. Yaptıkları çalışma ile termo-akustik kararsızlıkların frekansını ve basınç dalgalanmalarının oluşumlarını tanımlamışlardır. Yakıcı karakteristiklerinin etkisini belirleyebilmek için yakıcı transfer matrisi yaklaşımını kullanmışlardır. Yanma odası sıcaklık dağılımını dikkate alarak farklı çalışma şartlarının etkisini değerlendirmişler, sayısal ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde etmişlerdir. Özellikle rezonans frekansını ve farklı modlarda oluşan dalga şekillerini hassas bir şekilde tespit etmiş, kararsız modda bile dalga şekilleri deneysel veriler ile benzer sonuçlar vermiş, minimum basınç konumu ise hatalı tespit edilmiştir [13].

Allison et al., bir gaz türbin model yakıcısında yanma kararsızlığının akustik davranışını yakıt özellikleri, hava akış hızı ve yakıcı geometrisini değiştirerek incelemişlerdir. Meier

[14] tarafından DLR Stuttgart'da geliştirilen çift girdap üreteçli yakıcıda sentetik gaz (H_2/CO), etilen (C_2H_4), propan (C_3H_8) ve metan (CH_4) yakıtları kullanmışlardır. Çalışmalarında kararsızlık frekansının 250 Hz ile 480 Hz arasında önemli ölçüde değiştiğini tespit etmişlerdir. Plenum hacmi, egzoz borusu çap ve uzunluğu değiştirildiğinde dalgalar (frekans), Helmholtz rezonatörüne [15] benzer bir davranış göstermiştir. Yakıt tipi, alev hızı ve hava akış hızı değişimleri, kararsızlık frekansını ve genliğini büyük ölçüde değiştirmiştir. Son olarak, alkan yakıtların benzer akustik eğilim gösterdiği, etilen yakıtının metan ve propandan çok farklı davrandığı ve sentetik gazların, etilen ve sentetik yakıtların laminar yanma hızları eşleştiğinde bile çok farklı davranış sergilediğini tespit etmişlerdir [16].

Lee et al., $H_2/CO/CH_4$ bileşimine sahip sentetik gazlar alevlerinde kendiliğinden başlayan çok modlu (genellikle 3. ve 4.) yanma kararsızlıklarını girdap üreteçli ve kısmi ön karışımli bir gaz türbin model yakıcısında test etmişlerdir. Test edilen gaz karışımlarında her bir sentetik gaz bileşeninin miktarını %0 ile %100 arasında değiştirmişler, 12.5 kHz frekansta OH-PLIF ve OH^* kemilüminesans ölçümleri yapmışlardır. OH-PLIF görüntüleri yanma kararsızlıklarının oluşum mekanizmaları hakkında önemli ipuçları (H_2 'nin yüksek reaktivitesi sebebiyle resirkülasyon bölgesi dışında oluşan girdap eşleşmeleri, periyodik olarak gerçekleşen alev tutunması ya da ayrılması gibi) vermiştir. Bu sonuçlar, hava/yakıt karışma mesafesinin ve yakıtı bağlı alev uzunluğunun, yüksek kararsızlık modlarının ve mod kaymalarının gelişmesinde temel sebep olduklarını göstermiştir. Ayrıca, yakıt kompozisyonunun kararsızlıkların başlama veya sönümlenme yoğunluğunu ve konumunu etkilediği tespit edilmiştir [17].

Meier et al., girdap üreteçli bir yakıcıda fakir ön karışımli CH_4 /hava alevlerinin termo-akustik titreşim dinamiklerini ayrıntılı bir şekilde analiz etmişlerdir. Yanma odasına yerleştirilen geniş kuartz bir pencere ile üç boyutlu hız dağılımı ve OH-PLIF alev görüntüsü ölçümleri yapmışlardır. Periyodik kararsızlıkların geribesleme mekanizmasını ve alev dinamiklerini daha ayrıntılı bir şekilde tespit edebilmek için yakıcı gücünü 25 kW, eşdeğerlik oranını ise $\Phi=0.7$ olarak belirlemişlerdir. Bu şartlar altında, yaklaşık 290 Hz frekansta kendiliğinden başlayan güçlü termo-akustik titreşimlerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, kıyaslama yapılabilmesi için 30 kW termal güçte ve $\Phi=0.83$ eşdeğerlik oranında titreşimsiz (sessiz) alevleri de incelemişlerdir. Titreşimli ve sessiz alevlere ait sonuçlar karşılaştırıldığında akış alanı, alev şekli ve tepkime reaksiyonlarında

belirgin farklılıkların olduğu belirtilmişler, titreşimli alevde titreşim frekansı ile birlikte ölçülen bütün değerlerin değiştiğini gözlemlenmiştir. Son olarak, ısı salınımını temsil eden OH^* kemilüminesans yoğunluğunun salınım döngüsü üzerinde %16 ile %100 arasında değiştiğini tespit etmişlerdir [18].

Hong et al., 50 kW ısı güce sahip, fakir ön karışım ve tek basamaklı bir yakıcıda $\text{C}_3\text{H}_8/\text{H}_2$ karışımlarını yakarak eşdeğerlik oranının, yakıt kompozisyonunun ve giriş sıcaklığının yanma kararsızlıkları arasındaki mod geçişlerine etkilerini incelemişlerdir. Yakıcının, çalışma şartlarına bağlı olarak farklı akustik davranış gösterdiğini ve alev şeklinin değiştiğini tespit etmişlerdir. Basınç (p') ve ısı salınımı (q') dalgalanmalarını incelemek için eş zamanlı dinamik basınç ve alev kemilüminesans görüntüsü ölçümleri yapmışlardır. Sonuçlar, dinamik modun başlangıcında, basınç ve ısı salınımı dalgalanmalarının aynı fazda olduklarını ($\theta_{qp} \approx 0$) göstermiştir. Bu mod içinde iken çalışma şartları değiştirildiğinde, dalgalanmalar kritik bir faza kadar ($\theta_{qp} = \theta_c$) gelişmiş ve diğer bir dinamik moda geçiş olmuştur. Klasik Rayleigh kriterine göre belirtilen bu kritik değer $\theta_c = \pi/2$ olmalıyken, Hong ve arkadaşlarının deneysel verilerine göre bu kritik değer altında geçiş meydana gelmiştir. Ayrıca, lineer akustik enerji dengesine göre bu kritik fazda sistem sınırlarındaki akustik kayıpların yanma işlemi sonrası akustik alana aktarılan enerjiye eşit olduğunu tespit etmişler, sistem sınırlarından geçen akustik enerji akısını ve tipik Rayleigh kaynak terimini ($p'q'$) içeren 0 ve 1 değerleri arasında değişen genişletilmiş bir Rayleigh indeksi ($R_e = \theta_{qp}/\theta_c$) tanımlamışlardır. $R_e = 0$ iken kararsızlık moduna giren yakıcı, $R_e = 1$ iken ise başka bir moda geçiş yapmıştır. Sonuç olarak, yapılan çalışma ile alternatif yakıt kullanabilen yakıcılarda kararsızlık aralıkları niceliksel olarak ifade edilmiştir [19].

Huang ve Yang, girdap üreteçli ve ön karışım ve tek basamaklı bir yakıcıda girdaplı akışın oluşumunu ve doğalgazın yanma dinamiklerini LES (Büyük Girdap Simülasyonu) tekniğini kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar;

- Girdap sayısı belirli bir değeri geçtikten sonra yakıcı girişinde girdap bozulması kaynaklı merkezi, halka şekilli bir resirkülasyon bölgesi oluşur.
- Oluşan bu merkezi resirkülasyon bölgeleri aşırı yüksek girdap sayılarında brülör içerisine ilerler ve alev geri tepmesine sebep olur.

- Girdap sayısındaki artış türbülans yoğunluğunu ve bunun sonucunda alev hızını artırır, bu durum ise alev yüzey alanının azalmasına sebep olur.
- Enine akustik salınımlar güçlü girdaplı akışların etkisi altında oluşurken boylamasına akustik modlar ise zayıf girdaplı akışlarda görülür.
- Yanma odası geometrisi alev-akış etkileşimlerini büyük ölçüde değiştirir [20].

Zalluhoğlu ve Olgac, termo-akustik kararsızlıkları incelemek için sıkça kullanılan deney test düzeneği, Rijke tüpünü kullanmıştır. Analizlerinde yeni matematiksel bir yaklaşım olan karakteristik köklerin kümelenme davranışını kullanmışlardır. Bu yaklaşım ile Rijke tüpünün geometrik boyutları gibi parametreleri değiştirerek kararlı çalışma aralıklarının tespit edilebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca, ısıtıcı konumunu da değiştirmiş, ses basıncı, güç spektrumu ve kararlılık haritalarını oluşturmuşlardır. Sonuçlar, yapılan tahminlerin genelde deneysel veriler ile uyumlu olduğunu, ısıtıcının tüpün üst yarısındaiken elde edilen sonuçlarda bazı farklılıklar olduğunu göstermiştir [21].

Pan et al., kerosen türünde hidrokarbon yakıtların süper kritik basınç değerinde yatay bir tüp içerisinde termo-akustik kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Yanma odası AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilen, 240 mm boy ve 1.6 mm iç çapa sahip küçük bir tüptür. Deneyle, 2.5 – 4.0 MPa basınç, 800 – 1200 kg/m²s kütleli akı ve 665 – 950 kW/m² ısı akısında gerçekleştirmişler ve basınç düşüşünde bağıl standart sapma değerleri kullanarak termo-akustik kararsızlıkların yoğunluklarını değerlendirmişlerdir. Isı transfer katsayısı ve dalgalanma yoğunluğu arasındaki ilişkiyi irdelemiş, dalgalanmalar boyunca basınç düşüşü ve çıkış yığın sıcaklığındaki artışla birlikte duvar sıcaklığında bir düşüş gözlemişlerdir. Düşük kütle akışı, düşük basınç ya da yüksek ısı akısı gibi şartlar altında termo-akustik dalgalanmalar daha belirgin hale gelmiştir. Giriş yığın sıcaklığındaki artış bir eşik değeri geçince kararsızlıklar sona ermiştir. Dalgalanmanın gerçekleştiği bölgede ısı transfer katsayısı ile dalgalanma yoğunluğu pozitif bir ilişki sergilemiştir [22].

Jarmolowitz ve Abel, alev transfer fonksiyonu ile eşleştirilmiş bir boyutlu akustik ağ kullanarak termo-akustik bir sistemi modellemişlerdir. Elde edilen kararsız sistemin kontrol elemanlarının değerlendirilmesi ve çalışabilirliğinin test edilebilmesi için gerçek şartlara uygun ortam oluşturmuşlardır. Kararsız sistem, 0.001 s örnekleme sıklığına sahip bir model tahmin kontrolcüsü kullanılarak kontrol edilmiştir. Sonuçlar, gerekli kontrol

elemanları (hoparlör, basınç aktüatörleri vb.) vasıtasıyla termo-akustik kararsızlıkların kontrol edilebileceğini göstermiştir. Son olarak, bir kararsızlık frekansında kontrol modellemesinin o frekans değerine yakın değerlerde de işler olduğunu göstermişlerdir [23].

Wang et al., küçük ölçekli bir kanalda, süper kritik basınç değerinde hidrokarbon yakıtların (RP-3, kerosen türevi endotermik bir yakıt) termo-akustik kararsızlıklarını gözlemleyerek, zorlanmış konveksiyon ısı transferini araştırmışlardır. Termo-akustik kararsızlıkların meydana geldiği esnada ısı transferinin belirgin bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Isı transferi ve kararsızlıklar arasındaki ilişkiyi daha iyi anlayabilmek için ilk olarak, termo-akustik kararsızlıkların karakteristiklerini araştırmış, bu durumu karakterize etmek için basınç düşüşü dalgalanmalarını kullanılmışlardır. Termo-akustik kararsızlıkların iki önemli özelliği olan genlik ve süre aralığının kütleli yakıt akış oranına, giriş sıcaklığına ve kanal çalışma basıncına oldukça duyarlı olduğunu belirtmişlerdir. Bir dizi deney seti tasarlayarak bu üç parametrenin etkisini incelemiş, kütleli yakıt oranındaki artışın genliği artırdığını; belirli değerlerde (20 °C ve 50 °C için 1.5 g/s debide; 100 °C ve 140 °C için 1.2 g/s debide) süre aralığının en yüksek değerini aldığını ve belirli bir eşik çalışma basınç değerinin üstünde termo-akustik kararsızlıkların güçlü etkilerinin olduğunu tespit etmişlerdir. Son olarak, 3 MPa çalışma basıncında giriş sıcaklığındaki artışın, genlik ve süre aralığını ilk önce azalttığını daha sonra artırdığını belirlemişlerdir [24].

Yoon et al., $C_2H_4/O_2/CO_2/N_2$ bileşimine sahip yakıt karışımlarını ön karışımli bir yanma tüpünde kullanarak yukarı akıma doğru yayılan alevlerin birincil akustik kararsızlıklarının başlangıç mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışmada eşleşme sabitine (βM ; β : Zeldovich sayısı, M: Mach sayısı) odaklanmışlar, farklı eşleşme sabitlerine sahip karışımlar elde edebilmek için, fakir etilen alevlerini CO_2 ve N_2 ile seyreltmışlerdir. Elde edilen sonuçlar, eşleşme katsayısı ve ortalama akustik yoğunluk arasında lineer bir ilişkinin olduğunu göstermiştir. Ayrıca, alev yüzey alanının değişiminin her zaman, anlık gelişen akustik kararsızlıkların başlamasına sebep olmadığını tespit etmişlerdir. Titreşimli düz alevlerde bile kararsızlıkların oluşumu, alev yüzey alanındaki artma veya azalma ile ilişkilendirilememiştir. Son olarak, akustik kayıpların etkisi tahmin edilmiş ve deneysel sonuçlar aynı eşleşme sabitine sahip karışımlarda bile büyük akustik kayıpların, akustik kaynaklı titreşimleri durdurma eğiliminde olduğunu göstermişlerdir [25].

Aldredge ve Killingsworth, ön karışimli laminer CH_4 /hava alevlerinin yayılmasını, Taylor-Couette yakıcısında deneysel olarak test etmişlerdir. Atmosfere açık olan yakıcının üst kısmından ateşlenen ve aşağı doğru yayılan alevlerin davranışını incelemişlerdir. Alev, düzlemsel bir şekilde yayılırken yapılan ölçümler, birincil termo-akustik kararsızlıkların literatür ile uyumlu (laminer alev hızları dikkate alındığında) olduğunu göstermiştir. LDV kullanarak akış alanındaki aksel ve radyal hız dalgalanmalarını ölçmüş, birincil termo-akustik kararsızlıkların doygunluğa ulaşması ve ikincil termo-akustik kararsızlıkların başlangıcı için kritik akustik-hız genlik değerlerini belirlemişlerdir. Eşdeğerlik oranının kritik akustik-hız genlikleri üzerine etkisini incelemiş, sonuçlar teorik veriler ile iyi bir uyum göstermiştir. Son olarak, artan eşdeğerlik oranı ile Markstein sayısı da artmış, bunun sonucunda yakıt zengin karışımlarda ikincil termo-akustik kararsızlıkların gelişim oranları, benzer laminer yanma hızına sahip fakir karışımlara oranla daha düşük bulunmuştur [26].

Nagarajan et al., bir basamaklı yakıcıda, girdap üretici vasıtasıyla değiştirilen türbülans yoğunluklarının termo-akustik kararsızlıklara etkisini incelemişlerdir. Bu maksatla, farklı çalışma şartları ve türbülans yoğunluklarında basınç ve OH^* kemilüminesans görüntüsü ölçümleri yapmışlardır. Sonuçlar, girdapların yanma odası üst duvarına ulaştıkları anda kararsızlığın meydana geldiğini, girdap gelişiminin türbülanslı alev hızına ve resirkülasyon bölgesi boyutlarına bağlı olduğunu ve kararsız dalgalanmaların Rayleigh kriteri ile uyumlu hareket ettiğini göstermiştir. Son olarak, türbülansın etkisi ile değişen alev ve akış dinamiklerinin, kararsızlıkların başlangıcının tahmini için dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir [27].

Dubey et al., bir tüp içerisinde aşağı doğru yayılan alevlerin, geometrik parametrelerin etkisi altında termo-akustik kararsızlıklarını hem teorik hem de deneysel yöntemlerle incelemişlerdir. Tüp uzunluğu artıkça alevin termo-akustik kararsızlıklara karşı daha duyarlı hale geldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, türbülanslı yanmaya yol açan ikincil kararsızlıkların, birincil kararsızlıklarla karşılaştırıldığında geometrik değişimlere karşı daha duyarlı olduğu tespit etmişlerdir. Geometrik parametrelerin etkisine ilişkin mevcut deneysel gözlemlerle elde edilen veriler, basınç eşleşme mekanizmasına dayanan teorik tahminler ile uyum göstermemiştir. Bu nedenle hız eşleşme mekanizmasını dikkate alarak analitik büyüme oranlarını hesaplamış, hesaplanan büyüme oranlarının geometrik etkilerin neden olduğu termo-akustik kararsızlıkları doğru bir şekilde tahmin ettiğini

belirlemişlerdir. Son olarak, yapılan çalışmalar neticesinde alev alanındaki dalgalanmaların akustik ivmelenme hareketi ile alev-akustik eşleşmesine neden olduğunu kanıtlamışlardır [28].

Bir gaz türbin yakıcısında güçlü basınç dalgalanmaları nedeniyle oluşan yanma kararsızlıklarının belirlenmesinde alev geometrisi önemli rol oynamaktadır. Allison et al. bu amaçla, alev yüzey alanını kullanarak alev şekli ve ısı salınım oranını daha doğru bir şekilde ölçmüş, kemilüminesans görüntüleri yerine üç boyutlu yapı ve ısı salınımı dalgalanmalarının zamansal değişimini hassas bir şekilde çözümlenmiş ve kilohertz formaldehit (CH₂O) PLIF görüntülerinin bu hedeflere ulaşmak için yeni bir yol sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca kararsızlıkları anlayabilmek için hassas ölçümlerin yanında ısı salınımı verilerinin, zaman ve konum ifadelerinin fonksiyonu olarak kaydedilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Elde edilen veriler, tipik bir biçimde 302 Hz frekansta alev yüzey yoğunluğunda dalgalanmalar olduğunu ve alev hızının artması ile birlikte yanma kararsızlık frekansının da arttığını göstermiştir. Bununla birlikte V şekilli alevlerde kararsızlıklar sönümlenirken düz alevlerde güçlü basınç dalgalanmaları gözlemlenmiştir [29].

Klein, endüstriyel gaz türbin motorlarında sınırlı sayıda sensör kullanarak akustik ve ısı salınımı arasındaki eşleşme mekanizmasını tanımlamak için farklı çalışma şartlarında yanma sisteminin akustik öz frekanslarının analizine (akustik dalga denklemleri, öz fonksiyon metodu uygulanarak kütle-yay-sönümleyici denklemine dönüştürülerek) dayanan yeni ve basit bir metod geliştirmiştir. Bu metodu, çalışmakta olan bir gaz türbin yakıcısına iki farklı çalışma şartı için uygulamış ve bu iki durum için eşleşme mekanizmasının tanımlanabildiğini göstermiştir [30].

Yanez et al., kendiliğinden başlayan basınç titreşimlerinin neden olduğu akustik kararsızlıkları, fakir H₂/hava alevi kullanılan açık uçlu bir kanalda hem deneysel hem de analitik açıdan incelemişlerdir. Alev davranışını ve akustik kararsızlıkların başlangıç parametrelerini değerlendirmek için 100x100 mm kare kesite sahip 1.2 m uzunlukta duvarları quartz camdan yapılmış bir yanma odası üretmişlerdir. Sonuçlar, hacimce %14'den düşük H₂ konsantrasyonuna sahip fakir karışımlarda alev kararsızlıkları sebebiyle akustik dalgalanmaların oluştuğunu, bu değer üstünde H₂ içeren karışımlarda ise alevin akustik bozukluklara karşı dayanıklı olduğunu göstermiştir. Ayrıca Searby ve

Rochwerger analitik formülasyonu kullanarak deneysel sonuçları analiz etmiş, farklı parametrelerin etkilerini araştırmışlardır [31].

Basınç dalgalanmaları ve daimî olmayan ısı salınımı arasındaki eşleşmeden kaynaklanan termo-akustik kararsızlıkların jet motoru, gaz türbinleri ve endüstriyel yakıcılarda ciddi yapısal hasarlara neden olduğu ve yanma sisteminin optimum ömrünü kısalttığı bilinmektedir. Deshmukh ve Sharma, bu termo-akustik kararsızlıkları sönmek için mikro-jetler vasıtasıyla Rijke tüpünün duvarından radyal yönde gelen hava akışının küçük bir kısmını saptırmıştır. Stokiyometrik şartlarda deneyler gerçekleştirmiş, kemilüminesans görüntüleri ve basınç ölçümlerinden Rayleigh indekslerini tahmin etmişlerdir. Sonuçlar; uygulanan kontrol tekniğinin termo-akustik kararsızlıkları tamamıyla bastırıldığını, bu esnada ısı salınımı ve basınç dalgalanmaları arasındaki faz farkının arttığını ve Rayleigh indeksinin sıfıra yaklaştığını göstermiştir. Bunlara ek olarak alev parlaklığının belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. Son olarak, önerilen kontrol tekniğinin çok verimli bir şekilde termo-akustik kararsızlıkları kontrol edebildiği vurgulanmıştır [32].

Zan et al., scramjetlerde rejeneratif soğutma teknolojisini geliştirmek için farklı şartlar altında yatay konumlandırılmış dairesel kesitli bir tüp içerisinde hidrokarbon yakıtların termo-akustik kararsızlıklarının dinamik karakteristiklerini incelemiştir. Termo-akustik kararsızlıkların gelişme (kararlı halden kararsız duruma geçiş) sürecini daha iyi anlayabilmek için çok ölçekli Shannon dalgacık entropisi metodunu uygulamışlardır. Sonuçlar, gürültü ve zayıf sinyaller sonucu termo-akustik kararsızlıkların gelişme sürecinin çok ölçekli Shannon dalgacık metodu ile çok iyi bir şekilde tespit edilebildiğini göstermiş ve kararlı/kararsız durum ile geçiş süreci arasındaki farkların tanımlanabileceğini ortaya koymuştur. Son olarak, kütleli akış oranı ve giriş basıncının termo-akustik kararsızlıkların gelişme sürecini etkilediği belirtilmiştir [33].

Yanma sistemleri (roketler, uzay araçları, gaz türbinleri vb.) normal çalışma şartlarında dahi var olan basınç dalgalanmalarına maruz kalmaktadırlar. Bu yüzden yakıcıların tasarımında ilk ve en önemli şartlardan biri, kararlı çalışma esnasında, ciddi yapısal hasarlara neden olabilecek büyük genlikli basınç dalgalanmalarını sönmektir. Zhao ve Li, yaptıkları araştırmada bu basınç dalgalanmalarını kontrol etmek için kullanılan sönmeyici elemanları incelemiş, var olan yanma sistemleri üzerinde kullanım

durumlarını, karşılaşılan zorlukları ve uygulama süreçlerini geniş bir çerçevede araştırmışlardır. Ayrıca, sönümleme etkisini ve çeşitli sönümleyici elemanları (Helmholtz rezonatörü, delikli kaplamalar, akış bölme komponentleri ve yarım/çeyrek dalga tüpleri) ayrıntılı olarak açıklamışlardır. Bu sönümleyici elemanların düşük bakım maliyeti ve yüksek dayanıklılığa sahip olduklarını ve konvansiyonel yakıcılarda sıkça kullanıldıklarını belirtmişlerdir. Son olarak, yanma sistemlerini kararlı hale getirmek için bir ayarlanabilir akustik sönümleyici tasarlamış ve test etmişlerdir. Ayarlanabilirlik özelliği ile farklı çalışma şartlarında geleneksel sönümleyicilere göre avantaj elde edilmiştir [34].

Lieuwen ve Zinn, düşük NO_x emisyonlarına sahip gaz türbinlerinde yanma kararsızlıklarına neden olan mekanizmaları teorik olarak incelemişlerdir. Geliştirdikleri yeni model ile eşdeğerlik oranındaki periyodik değişimler ve basınç dalgalanmaları arasındaki etkileşimi göstermiş ve yeni modeli kararsız çalışmaya neden olan karakteristik zaman ve sistem tasarım parametrelerinin aralıklarını belirlemede kullanmışlardır. Sonuçlar, düşük NO_x emisyonlarına sahip gaz türbin tasarımlarında kararsızlıkların başlangıcının reaksiyona giren maddelerin yakıcı içerisinde yayılma süreleri ve dalgalanma periyotlarının birbirlerine oranından tespit edileceğini göstermiştir [35].

Lieuwen et al., ön karışımli sentetik gaz karışımlarının daimî akışlı yanma sistemlerinde meydana gelen alev sönmesi, alev geri tepmesi, dinamik kararlılık ve kendiliğinden ateşlemenin alev kararsızlıkları üzerine etkisini incelemişlerdir. Alev sönmesi konusunda yakıt içeriğindeki H_2 miktarının en önemli parametre (alev direnci ile ilgili) olduğunu, alev geri tepmesi konusunda ise girdaplı akışlarda birden fazla mekanizmanın var olduğunu ve sentetik gaz karışımlarının alev geri tepmesi eğilimini etkileyen esas termofiziksel özelliğin hangi mekanizmanın dikkate alındığına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, yanma kararsızlıklarını incelemiş, kararsızlıkların meydana geldiği şartlar altında en önemli parametrenin alevin konumsal dağılımı olduğunu belirtmişler, yakıt kompozisyonunun alev hızını değiştirerek yanma dinamiklerini etkilediğini tespit etmişlerdir. Son olarak, yapılan deneysel çalışmalar ışığında, H_2/CO yakıt bileşenleri için geliştirilen detaylı kinetik mekanizmalarının ateşleme gecikme zamanını aşırı yüksek tahmin ettiğini göstermiş, yüksek basınç ve düşük sıcaklık şartları için kinetik çalışmaların yapılması gerektiğini belirtmişlerdir [36].

Girdaplı akışlar, endüstriyel yakıcılarda ve gaz türbin motorlarında alev kararlılığını artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, birkaç araştırmada bu tür alevlerin sönme durumuna yakın şartlar altında kompleks alev dinamikleri (bölgesel alev sönmesi, girdap yıkımlı alev yapısında değişim gibi) gösterdiği rapor edilmiştir. Zhang et al., H_2/CH_4 alevlerini alev sönmesine yakın şartlarda detaylı uzamsal ölçümler yaparak ve detaylı kinetik hesaplamalar kullanarak dinamik davranışları bakımından incelemiştir. Sonuçlar, belirli bir sabit gerilme oranında alevin kararsızlaştığını ve klasik Damköhler sayısının alev sönmesi ile ilişkili olduğunu göstermiştir [37].

Fakir ön karışımli modda çalışan gaz türbin yakıcılarının yanma kararsızlıkları sonucu oluşan performans düşüşleri, yakıcı ömrünün kısılması ve sistem parçalarında meydana gelen yapısal hasarlar gibi dezavantajlarının elimine edilmesi için Lieuwen et al., bu kararsızlıkların oluşum mekanizmalarını ve verimli kontrol yaklaşımlarını incelemiştir. Sonuçlar, bu tür kararsızlıkların yakıcı basınç dalgalanmalarıyla reaksiyona giren maddelerin akış oranları (giriş kanalında eşdeğerlik oranı düzensizlikleri oluşturur) arasındaki etkileşimlerden kaynaklanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, konvektif zaman ve dalgalanmaların periyodunun birbirine eşit olduğu anda kararsızlıkların meydana geldiğini belirtmişlerdir. Son olarak, pasif kontrol teknolojileri dışında aktif kontrol stratejilerinin de oluşturulmasının kararsızlıkların kontrol edilmesi açısından önemli olduğunu belirtmişlerdir [38].

Yuan et al., ön karışımli düşük NO_x emisyonlarına sahip yanma sistemlerinde kendiliğinden başlayan dalgalanmaların kontrolü üzerine bir kinematik ısı salınım modeli oluşturmuşlar, tamamen ve kısmen karışımli ön karışım durumlarını hesaplamış ve kıyaslamışlardır. Ayrıca basit bir akustik model geliştirmiş, oluşturulan bu akustik model ile ısı salınımını eşleştirilmiş ve yapılan çalışma ile sınır döngü davranışı hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Eşdeğerlik oranındaki dalgalanmalar sonucu oluşan ısı salınım genliğinin hız dalgalanmalarından daha yüksek olduğu görülmüştür. Son olarak, eşleşme modelinin kararsız dalgalanmaların sönümlenmesi için aktif kontrol yapısının oluşturulması aşamasında yardımcı görev üstlenebileceği belirtilmiştir [39].

1.2. Zorlanmış Termo-Akustik Kararsızlıklar Üzerine Çalışmalar

Fernandez et al., akustik bir yanma odasında %50 N_2 -%50 CH_4 /hava alevlerinin yakıt karışım kesri ölçümlerini yapmışlar ve yakıt karışım kesrinde meydana gelen

dalgalanmaların alev davranışı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Farklı frekans değerlerinde alevi akustik olarak zorlamışlar, OH/NO PLIF tekniği ile alev görüntülerini incelemişlerdir. Bir prob vasıtasıyla kızılötesi lazer ışın absorpsiyonu tekniğini kullanarak yakıt/hava karışım kesirlerinin hızlı ve yüksek çözünürlükte ölçülmesini sağlamışlardır. Ayrıca hem soğuk akış hem de yanma esnasında ölçümler yaparak kıyaslamalarda bulunmuşlardır. Sonuçlar, akustik yanma odası ile alev arasındaki eşleşmenin ana mekanizmasının karışım kesir alanındaki değişimler ile ilişki olduğunu, zorlama altında yakıt/hava karışımının güçlü periyodik dalgalanmalara maruz kaldığını ve karışım kesrinde meydana gelen dalgalanmaların alev dalgalanmalarının büyüklüğünü belirlediğini göstermiştir [40].

Kang et al., %50CH₄-%50N₂ karışımının akustik eşleşme davranışlarını farklı akustik frekanslarda (22, 27, 32, 37 ve 55 Hz) gözlemlemişlerdir. Yanma dinamiklerinin tespiti için aerodinamik açıdan kararlı bir ön karışimsız yakıcıda deneysel çalışmalar yapmış ve PLIF görüntülerini kullanarak karışım bileşenlerinin homojenliğini analiz etmişlerdir. Yapılan kıyaslamalar sonucunda yakıt-hava karışımında meydana gelen yerel dalgalanmaların alev dalgalanması ile ilgili olduğunu belirlemişlerdir. Her bir zorlama frekansında karışım kesri ilgili frekans değerinde dalgalanmış (yakıcı basınç/alev yoğunluğundan çok az bir faz farkı ile) ve bu durum; yakıt karışım kesri dalgalanmalarının bu tür alevlerin ve yakıcı geometrisinin dalgalı davranışlarının temel sebebi olduğunu göstermiştir [41].

Kypraiou et al., sönmeye yakın-ön karışimsız-girdaplı CH₄/hava alevlerine akustik zorlamanın etkilerini laboratuvar ölçekli bir yakıcıda incelemişlerdir. İki farklı yakıt enjeksiyon geometrisini (radyal ve aksenal yakıt enjeksiyonunu) dikkate almışlar, 5 kHz OH* kemilüminesans ve OH PLIF görüntülerini ölçerek alev davranışını incelemişlerdir. Her iki enjeksiyon sisteminde de akustik zorlama genliğinin artmasıyla alev kararlılığında azalma gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, sönmeye limitlerine yakın çalışma şartlarında akış alanına uygulanan akustik zorlama sonucu oluşan dalgalanmaların daha iyi kavranabilmesini ve dinamik alev davranışının sayısal modellerle tahmin edilebilmesini sağlamıştır [42].

Fakir ön karışımli yakıcılar, ısı salınımı dalgalanmaları ve yakıcı akustikleri arasındaki eşleşmenin sebep olduğu yanma kararsızlıklarına oldukça duyarlıdırlar. Bu nedenle,

kararsızlıkların meydana geldiği şartları tahmin etmek ve akustik uyarımların genlikten bağımsız alev davranışını anlayabilmek son derece önemlidir. Thumuluru ve Lieuwen, kontrol esnasında gerçekleşen fiziksel süreçleri tanımlamak için akustik olarak zorlanmış girdaplı akışlarda OH PLIF görüntü analizlerini yapmışlar ve bu analiz ile aşağıdaki süreçlerin süperspozisyon (toplamsallık) edilerek kontrol edilebildiğini göstermişlerdir:

- Dairesel jet dalgalanmaları,
- Salınımlı ve türbülanslı alev izi (brush) gelişimi,
- Alev stabilizasyonu,
- Jet sütunu, girdap, kesme tabakası vb. akışkanın mekanik kararsızlıkları.

Sonuçlar, alev tepkisinin tek bir fiziksel süreç tarafından kontrol edilmediğini, aksine zorlama frekansına, uyarılma genliğine ve alev stabilizasyon dinamiklerine bağlı birkaç eş zamanlı süreç tarafından kontrol edildiğini göstermiştir [43].

Emadi et al., akustik zorlama altında 3.81 cm çapa sahip girdaplı bir yakıcıda farklı yakıt karışımlarının termo-akustik kararsızlıklarını incelemişler ve elde ettikleri sonuçları 2.54 cm çapa sahip farklı bir yakıcıya ait veriler ile kıyaslamışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda üç farklı eşleşme modunu (ana mod eşleşmesi, kesme tabakasının eşleşmesi ve geçişli eşleşme modu) tespit etmişlerdir. 3.81 cm çapa sahip yakıcıda, diğer yakıcıya kıyasla daha yüksek doğal akustik mod frekanslarını elde etmişler fakat kritik akustik basınç genliklerinin benzer olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu yakıcı boyutundan ziyade kesme tabakası davranışı ile ilişkilendirmişlerdir. Ayrıca, yakıt karışımına eklenen H₂ miktarındaki artışın faz uyumunun daha az olmasına neden olduğunu belirtmişler ve bu durumun ise alev hızının artması ve ateşleme sınırının düşmesi ile ilişkilendirmişlerdir. Son olarak, H₂ ilavesinin yanma kararsızlıklarını inhibe ederek negatif etkileri yok ettiğini belirtmişlerdir [44].

Fosil yakıt kaynaklarının hızla azalması ve katı emisyon düzenlemeleri, araştırmacıları alternatif ve yenilebilir yakıtlarla çalışan, çevreci teknolojiler arayışına sevk etmiştir. Düşük girdap sayılarında yanma ve reaktif yakıtların yakıt karışımına ilavesi, bu problemlerin üstesinden gelmek için yaygın olarak kullanılan iki farklı yöntemdir. Emadi et al.; yanma odası basıncı, yakıt karışımına H₂ ilavesi, eşdeğerlik oranı ve yığın hız gibi birçok parametrenin değişik varyasyonları ile fakir-ön karışımli-düşük girdap sayılı bir yakıcının termo-akustik davranışını incelemişlerdir. Sonuçlar, yanma odası doğal mod

frekanslarının eşdeğerlik oranı ile arttığını, doğal modlarda yanma odasına ek ısının aktarıldığını ve test edilen bütün karışımlarda akustik modların artması ile yanma odası basıncının arttığını göstermiştir [45].

Türbülanslı ve fakir ön karışimli yakıcılar, düşük NO_x emisyonlarına sahip modern gaz türbin motorlarının geliştirilmesi için büyük bir potansiyele sahip olmalarına rağmen yanma kararsızlıklarına karşı oldukça duyarlıdırlar. Türbülanslı ve ön karışimli alevlerin akustik zorlamalara karşı verdiği lineer olmayan tepkiler, yanma kararsızlıklarının gelişiminde baskın rol oynamaktadır. Bu durumdan etkilenerek Han et al., yaptıkları sayısal çalışmayla C_2H_4 /hava alevlerini iki farklı frekans değerinde (160 Hz ve 320 Hz) zorlamışlar ve yanma sisteminin nonlineer tepkilerini incelemiştir. Sonuçlar, ikinci zorlama frekansında belirgin ısı salınımları olduğunu, zorlama genliğinin azalması ile ısı salınımının azaldığını ve fiziksel mekanizmaların vorteks akış yapısıyla oldukça ilişkili olduğunu göstermiştir. Son olarak, uygulanan yöntemin ısı salınımı ve alev dinamiklerinin yanma kararsızlıklarına verdiği tepkileri yüksek bir doğruluk ile tespit edilebileceğini belirtmişlerdir [46].

Wark et al., akustik olarak zorlanmış iki fazlı jet alev yapılarını deneysel olarak incelemiş, jet alevi yakınında oluşan büyük ölçekli girdap yapılarının oluşumunu ve gelişimini kontrol edebilmek için akustik olarak zorlamışlardır. Faz-kilitli veri toplama, faz Doppler interferometrisi ve düzlemsel görüntüleme tekniklerini kullanarak damlacık istatistiklerini ve dinamiklerini ilişkilendirmişler, spreya ateşlemeli yakıcılarda yanma performansı ve kararsızlıkları geliştirmek için kontrol stratejilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, damlacıkların ve büyük ölçekli girdap yapılarının uniform olmayan bir damlacık dağılımına neden olduğunu göstermiş ve damlacıkların buharlaşmasının kümelenmeye neden olduğunu belirtmişlerdir [47].

Gaz türbinli motorlarda sıklıkla yanma kararsızlıklarıyla karşılaşmaktadır. Karşılaşılan yanma kararsızlıklarının ana fiziksel mekanizması, yanma işleminin bir parçası olarak yayılan enerjinin yakıcı akustik alanına aktarılması ve sonrasında bu ısı salınımının pozitif geri beslemesi sonucu termo-akustik eşleşmenin meydana gelmesidir. Huang ve Ratner, yapmış oldukları deneysel çalışmada bu eşleşmeyi düşük girdap sayısına sahip fakir ön karışimli CH_4 /hava alevlerinde incelemiştir. Hidroksil radikallerinin PLIF görüntüleme ölçümlerini yaparak akustik zorlama altında alev davranışını belirlemişler

ve termo-akustik eşleşmenin göstergesi olan Rayleigh indeksini hesaplamışlardır. Sonuçlar, eşleşmenin Reynolds ve Strouhal sayılarına bağlı olarak belirli frekans aralıklarında meydana geldiğini, akustik zorlamaya benzer şekilde periyodik alev kırışmasına neden olan kesme tabakasındaki girdapların eşleşmeye neden olabileceğini ve yerel alev yüzey yoğunluğundaki değişimler yüzünden Rayleigh indeks alanındaki yoğun halkasal yapıların arttığını göstermiştir [48].

Yılmaz et al., yanma kararsızlıklarını değerlendirmek için fakir ön karışimli bir yakıcıda CH_4/H_2 alevlerini deneysel olarak test etmişlerdir. Sabit genlikte (mutlak yanma odası basıncının %0.05) ve yanma odasının farklı akustik modlarında (85 Hz, 125 Hz, 222 Hz ve 399 Hz) CH_4 yakıtına H_2 ilavesinin (%7, %20 ve %30) yanma kararsızlıklarına olan etkilerini araştırmışlardır. OH PLIF tekniğini uygulayarak OH konsantrasyonlarını incelemiş ve termo-akustik eşleşmenin derecesini belirlemek için Rayleigh indekslerini hesaplamışlardır. Elde edilen veriler; yanma karakteristiklerinin yakıt karışımı içerisindeki H_2 miktarına aşırı derecede duyarlı olduğunu, H_2 konsantrasyonunun artmasıyla alevin daha kompakt bir hale geldiğini ve eşleşmenin arttığını göstermiştir. Son olarak, H_2 ilavesinin alevin salınım yapmadığı frekans değerlerinde alev tepkisini arttırdığı, salınım yaptığı frekans değerlerinde ise eşleşme yoğunluğunu azalttığı belirtilmiştir [49].

Daimî olmayan ön karışimli alevlerde karşılaşılan zorluklardan dolayı dinamik yanma davranışının ölçümü için açık bir yöntem geliştirilememiştir. Yanma dinamiklerini ölçmek ve tanımlamak için kullanılan ana parametreler, alev tepki fonksiyonları ve genel/yerel Rayleigh dağılımlarıdır. Alev tepki fonksiyonu yanma sisteminin bozukluklara karşı verdiği tepkinin bir ölçümüyken, Rayleigh indeksi termo-akustik eşleşmenin derecesini göstermektedir. Kang et al., bu alandaki eksiklikleri gidermek amacıyla yaygın olarak kullanılan düşük girdap sayısına sahip bir yakıcıda yanma dinamiklerini inceleyerek bu dinamikleri değerlendirebilmek için araç ve yöntemler geliştirmeyi hedeflemişlerdir. OH PLIF ölçümleri yaparak alev ısı salınım davranışını farklı akustik zorlama frekanslarında (22-400 Hz) araştırmışlardır. Sonuçlar, termo-akustik eşleşmenin genel olarak kesme karışma bölgesinde bir halkasal Rayleigh indeks dağılımı deseni oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca, uygulanan akustik zorlama sonucu oluşan faz farkının alev sınırında Kelvin-Helmholtz kararsızlıkları dolayısıyla üretilen girdaplar ile hemen hemen eşleşmiş olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun da değişen

halkasal yapıları uyardığını gözlemlemişlerdir. Son olarak, alev tepki fonksiyonunun tepe değeri ile Rayleigh indeksinin mutlak tepe değerinin çakıştığını belirlemişlerdir [50].

Emadi et al., H₂ ile zenginleştirilmiş ön karışimli CH₄/hava alevlerinin dinamik davranışlarını basınçlandırılmış bir yanma odasında incelemişlerdir. Sonuçlar, H₂ ilavesinin alev sönme limitlerini artırdığını (%20 H₂ ilavesi limitleri %7; %40 H₂ ilavesi ise limitleri %35 artırmıştır), yerel alev yüzeyinin eğri yarıçapını azalttığını göstermiş ve H₂ ilavesi ile basınçlandırmanın aşırı artması durumunda da bu değerlerin daha fazla değiştiğini açığa çıkarmıştır [51].

Bellows ve Lieuwen, fakir ön karışimli bir yakıcıda uygulanan akustik dalgalanmalarına alev tepkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmayla gaz türbin yakıcılarında yanma karsızlığı genliklerinin tahmin kapasitelerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Farklı zorlama genliklerinde ve frekanslarında eş zamanlı basınç, hız ve CH^{*}/OH^{*} kemilüminesans ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan ölçümlerde akustik zorlama sonucunda alev tepkisinin basınç dalgalanmalarında $p'/p_0=0.02$; hız dalgalanmalarında ise $u'/u_0=0.3$ olduğunu tespit etmişlerdir. Artan zorlama genliği ile ortaya çıkan frekans eğrileri genlikte doygunluğa ulaşmış ve daha düşük frekanslara doğru azalmıştır. Son olarak, genlik bozulmalarının gerçekleştiği yer ile ısı salınım tepkisinin doygunluğa ulaştığı yer tam olarak örtüşmüştür [52].

Preetham ve Lieuwen, laminar ve türbülanslı akışlarda ön karışimli alevlerin harmonik zorlamalara karşı verdiği tepkileri kıyaslamışlardır. Yapılan çalışmanın esas amacı, akustik bozuklukların artmasına neden olan süreçlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamak, özellikle alevin laminardan türbülansa geçişi sırasında verdiği tepkiyi belirlemektir. Bu bağlamda, lineer olmayan G-denkleminin dolaylı çözümünü yaparak zorlanmış harmonik bozuklukların alev üzerine etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, alevlerin nicel farklılıklarının olmasına rağmen niteliksel dinamiklerinin aynı kaldığını göstermiştir. Bu durumu aşağı akıma yayılan alevlerde harmonik zorlamanın ürettiği sinüzoidal kırışmalar ile ilişkilendirmişlerdir. Bu alev kırışıklıklarının genliği aşağı akım mesafesiyle birlikte azalmıştır [53].

Ratner et al., kısmi ön karışimli jet alevlerinde akustik zorlamanın (22-55 Hz frekansları arasında) NO oluşumuna etkilerini incelemişlerdir. Oluşturdukları deney düzeneğiyle

çeyrek dalga modu üreterek akustik hızın neredeyse sıfır olduğu bir bölgede alevleri incelemişlerdir. NO PLIF ölçümlerini, böylece konum ve faz eşleşmesi analizlerini yapmışlardır. NO'nun üretimi ve taşınımını önceden raporlanan OH PLIF görüntüleri ile kıyaslamışlar, daha güçlü akustik eşleşmenin gerçekleştiği frekanslarda NO seviyelerinde artış gözlemlemişlerdir. Bu durumun NO'nun sıcaklık duyarlılığının bir sonucu olabileceğini belirtmişlerdir [54].

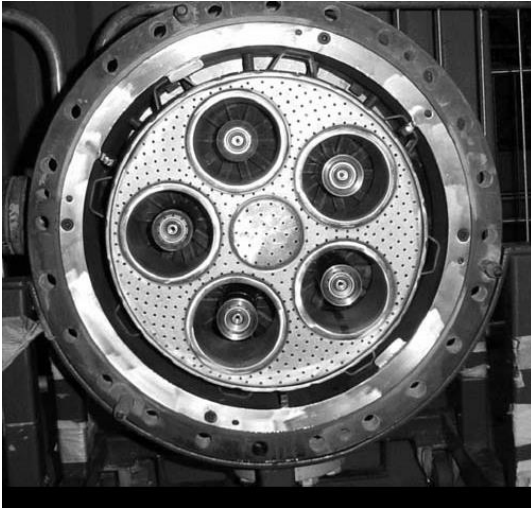


2. BÖLÜM

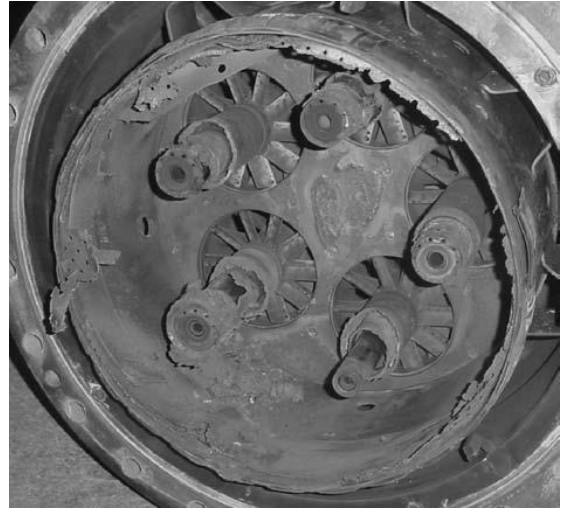
YANMA KARARSIZLIKLARI

2.1. Giriş

Yanma kararsızlıkları, yakıcının bir veya daha fazla doğal akustik modunun geniş genlikli salınımları ile karakterize edilir [55]. Bir başka ifadeyle yanma kararsızlıkları, ısı salınım oranı değişimlerinden kaynaklanan zararlı basınç dalgalanmaları olarak ifade edilir [36]. Yanma kararsızlıkları sonucu oluşan basınç dalgalanmaları yanma sistemi bileşenlerinde aşınma ve hasarlara neden olmakta, daha ağır şartlarda ise yakıcıdan kopan parçalar aşağı akımdaki yanma odası bileşenlerine zarar verebilmektedir. Şekil 2.1’de yanma kararsızlıkları sonucu oluşan yüksek genlikli basınç dalgalanmalarının yakıcı üzerinde oluşturduğu hasara bir örnek gösterilmiştir [56, 57]. Altı ay boyunca yapılan dinamik veri ölçümleri, yakıcı içerisinde oluşan yüksek frekanslı radyal kararsızlıkların yakıcı nozullarında hasara sebebiyet verdiğini göstermiş, oluşan hasar sonucu yanma verimi düşmüş ve NO_x emisyonlarında artış gözlenmiştir.



(a) Kullanılmamış yakıcı



(b) Zarar görmüş yakıcı

Şekil 2. 1. Yanma kararsızlıkları sonucu yakıcıda meydana gelen hasar.

Yanma kararsızlıklarına itki sistemlerinin (roketler, jet motorları, art yakıcılar vb.), güç üretim santrallerinin (gaz türbinli motorlar vb.), ısınma sistemlerinin (kombiler, radyant ısıtıcılar vb.), kazanların ve endüstriyel fırınların geliştirilmesi ve çalıştırılması esnasında karşılaşılmıştır (Şekil 2.2). Bahsi geçen kararsızlıklar, genellikle yakıcının doğal akustik modlarının biri (veya birkaçı) ve salınımlı yanma işlemi arasındaki geribesleme döngüsü ile kendiliğinden uyarılmaktadır.



(a) Sabit Gaz Türbin Yakıcıları



(b) Uçak motorları



(c) Sıvı Yakıtlı Roketler



(d) Kazanlar ve Endüstriyel Fırınlar



(e) Art Yakıcılar



(f) Katı Yakıtlı Roketler

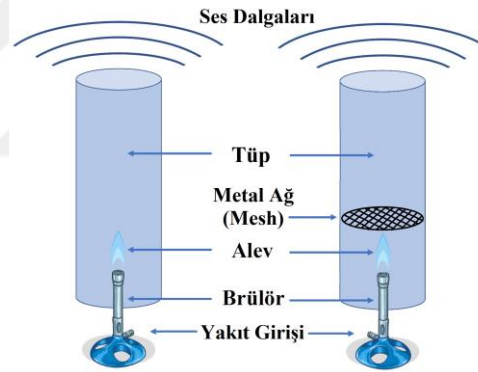
Şekil 2. 2. Termo-akustik yanma kararsızlıklarının karşılaşıldığı yakıcılar.

2.1. Tarihsel Bakış

2.2.1. Higgins ve Rijke'nin Yaptığı Çalışmalar

Higgins, 1777 yılında “şarkı söyleyen alev (singing flame)” olarak adlandırılan yanma dalgalanmalarını ilk gözlemleyen araştırmacıdır [58]. Yaptığı çalışmada her iki tarafı açık bir boruda yanma sonu gazlarının yaydığı ısının ses çıkardığını tespit etmiştir. Bu çalışma birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve bu konu üzerine ayrıntılı çalışmalar yapılmıştır. Yerleştirilen borunun çapının uygun ayarlanabilmesi ile çok güçlü ses dalgalarının oluşturulabileceği belirtilmiştir [59, 60]. Daha geniş çapa sahip bir boruda ve küçük çaplı bir brülör ile gaz alevi kullanılarak da dikkate değer genliklerde ses üretiminin sağlanabileceği Faraday, Chladni, Rayleigh ve Tyndall gibi birçok bilim adamı tarafından gösterilmiştir [60, 61]. Ayrıca yapılan gözlemler istenilen şartların sağlanması halinde

yakıcı-alev etkileşimi sonucu akustik dalgalanmaların meydana gelebileceğini göstermiştir. Hollanda’da Leiden Üniversitesinde Profesör olan Petrus Leonardus Rijke, 1859 yılında iki ucu açık cam bir tüp (boyu 0.8 m, üst çapı 37 mm ve alt çapı 30 mm) içerisine yerleştirmiş olduğu 0.2 mm kalınlığındaki demir tellerden oluşan daire şeklinde bir yapıdan (81 ağ/cm^2) ses dalgaları oluşturmuştur [62]. Isıtıldığı bu tel yapı belli bir süre sonra yüksek gürültülü ve kısa süreli ses dalgaları üretmeye başlamıştır. Bu tel yapılardan tüp içerisinde farklı noktalara birden fazla koyarak sesin süresini uzatmıştır. Tüpün üst kısmını kapattığı an ise sesin direk kesildiğini gözlemlemiştir. Yapılan çalışmada tüpün uzunluğunu da değiştiren Rijke, 0.2 m uzunluğun altında ses üretiminin oluşmadığını tespit etmiştir. Ayrıca, en yüksek yoğunluklu ses dalgalarının tel yapının tüpün alttan $\frac{1}{4}$ mesafede konumlandırılmış halde oluştuğunu belirtmiştir. Kullanılan tel malzemesinin ısı sığası ve ısı yayılım katsayısının ses süresini etkilediğini tespit etmiştir. Şekil 2.3’te Higgins ve Rijke’nin deney düzenekleri, ayrıntılı bir şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2. 3. Higgins (sol) ve Rijke'nin (sağ) deney düzenekleri.

2.2.2. Rayleigh Kararlılık Kriteri

John William Strut Rayleigh, kendi adıyla özdeşleşmiş bir kriter (Rayleigh Kriteri) ile ısı salınımı ve basınç dalgalanmaları arasındaki pozitif eşleşmeyi fenomenolojik ve deneysel temellere göre tanımlayan ve kararsızlıkların başlangıcı hipotezini öne süren ilk bilim adamıdır [63]. Rayleigh kriteri, periyodik çevrimlerin gelişmesine neden olan ısı salınımı ve akustik basınç dalgalanmalarının yapıcı etkileşimini ifade etmektedir [64]. Isı salınımları ile basınç dalgalanmaları aynı fazda (aynı zaman ve mekânda) olursa, alev akustik alana enerji aktarır ve böylece termo-akustik kararsızlıklar ortaya çıkar. Bu kararsızlıklar basınç, hız ve ısı salınım bozuklukları üreterek alevin şeklini, konumunu ve

yapısını değiştirirler [65]. Isı salınımı ve basınç dalgalanmaları arasındaki eşleşmenin derecesine bağlı olarak akustik enerji kazancı; kaybindan fazla olursa Rayleigh kriteri sağlanmış olur. Rayleigh kriteri, bir yanma sisteminin kararlılığının tanımlanması açısından en önemli koşullardandır ve bu nedenle yanma dinamiklerini tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [4, 16, 19, 66-68]. Daha önce de ifade edildiği gibi aynı fazda oluşan ısı salınımı ve basınç dalgalanmaları, yanma kararsızlıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu da Rayleigh kriterinin, kararsızlıkların başlangıcının belirlenmesi açısından ne kadar önem arz ettiğini göstermektedir. Tam tersine, ısı salınımı ve basınç dalgaları arasındaki faz farkı artıkça kararsızlıkların oluşma ihtimali azalmakta, ısı salınımı ve basınç dalgalanmaları birbirini sönümlenmektedir.

Putnam ve Denis tarafından, 1954 yılında oluşturulan Rayleigh kriterinin matematiksel ifadesi denklem 2.1'de gösterilmektedir [69].

$$\int_{\text{Çevrim}} p^l(x, t) q^l(x, t) dt \geq 0 \quad (2.1)$$

Ayrıca, Rayleigh kriterinin enerji kayıpları dahil edilmiş hali denklem 2.2'de gösterilmektedir [70]:

$$\int_V \int_T p^l(x, t) q^l(x, t) dt dV \geq \int_V \int_T \sum_i L_i(x, t) dt dV \quad (2.2)$$

p^l ve q^l sırasıyla basınç ve ısı salınımı dalgalanmalarını; T , dalgalanma periyodunu; V , yanma odası hacmini; L_i , dalga enerjisi kayıplarını ifade etmektedir. Bu denklemden anlaşılacağı üzere daimî olmayan ısı dalgalanmaları tarafından akustik alana aktarılan enerji, akustik dalganın enerji kaybindan daha fazla olursa termo-akustik kararsızlıklar oluşur. Bu kararsızlıklar, bütün sistemde aşırı yüksek seviyede gürültü, titreşim, periyodik mekanik yüklere bağlı yorulma, iyileştirilmiş ısı transfer karakteristiği ve yüksek yanma oranları yüzünden artan ısıl gerilmeler, kirletici emisyonlarda artış, statik kararsızlıklar (alev sönmesi veya geri tepmesi) ve çıkış gücünde dalgalanmalara sebebiyet verebilir.

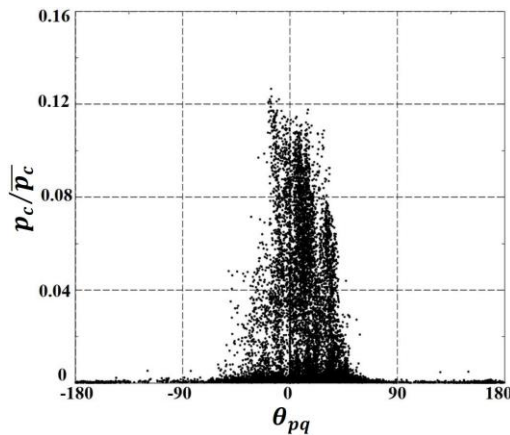
Ancak Rayleigh kriteri, kararsızlıkların gelişimini tespit etmek için yeterli değildir. Isı salınımı ve basınç arasındaki etkileşimin ölçüsünü gösteren Rayleigh kriteri deneysel veya sayısal çalışmalarda yanma kararsızlıklarının tahmini için kullanılan standart bir yöntemdir. Bununla birlikte Rayleigh kriteri sadece akustik enerji denklemini dikkate almaktadır. Yapılan çalışmalarda sıkıştırılabilir akışlı yanma reaksiyonlarında enerji

dalgalanmalarının tanımlanmasının çoklu tahminlerinde zorluklara neden olmuştur [71]. Çünkü; Rayleigh kriteri akustik enerji kayıplarını, entropi kaynaklı ısı salınım dalgalanmalarını ve kararsızlık oluşturan bazı mekanizmaların etkisini içermez. Yapılan araştırmalar göstermektedir ki; alev dinamikleri konvektif dalgaların varlığından etkilenmektedir. Sonuç olarak; dinamik, akustik ve konvektif bozukluklar dikkate alınmazsa verilen bir sistemin kararlılığını belirlemek zorlaşabilir [72].

İzentropik akışlarda entropinin değişmediği/sabit kaldığı ($s' = 0$) varsayılmaktadır. Bu durumda değişkenler; hız (u') ve basınç (p') dalgalanmaları olmaktadır. Fakat reaksiyonun olduğu akışlarda entropi değişmektedir. Bu yüzden daha doğru tahminlerin yapılabilmesi için bütün terimler dikkate alınmak zorundadır. Sonuç olarak genişletilmiş Rayleigh kriteri denklem 2.3'te gösterilmiştir [71].

$$\frac{\gamma-1}{\gamma P_0} \iiint q' p' dV \geq \iint p' u' dS \quad (2.3)$$

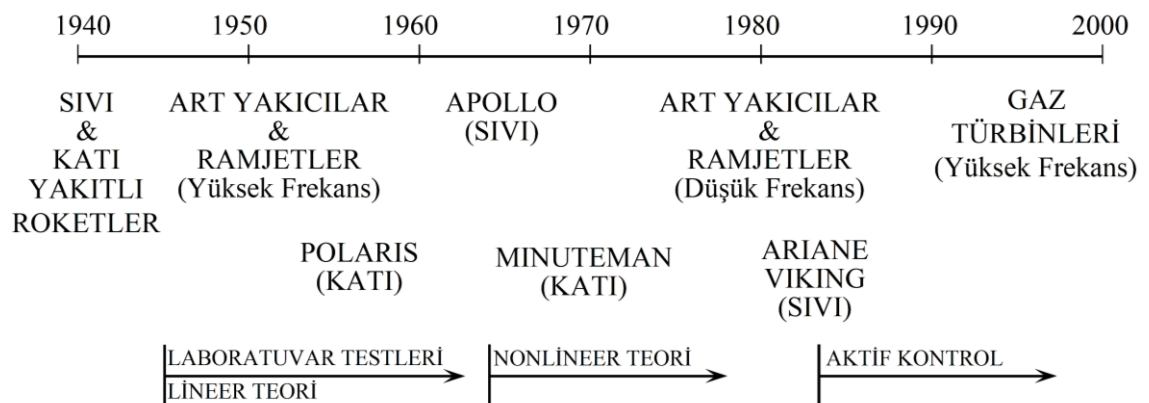
Denklemden γ ısı kapasite oranını (C_p/C_v) ifade etmektedir. Isı salınımları ile basınç arasındaki faz farkı $0^\circ \leq \theta_{pq} \leq 90^\circ$ arasında olursa yanma kararsızlıkları meydana gelmektedir. Bu durumun aksine faz farkının $90^\circ \leq \theta_{pq} \leq 180^\circ$ olması haline kendinden başlayan yanma kararsızlıkları oluşmamaktadır. Kim ve Santavicca yapmış oldukları çalışmada bu durumu yanma sonucu oluşan basınç genliklerinin ölçümü ile göstermiştir (Şekil 2.4) [4, 73].) Bu şekilde de açıkça görüldüğü gibi ısı salınımı ve basınç dalgalanmaları arasındaki faz farkının azalması ile basınç genliklerinde artış meydana gelmektedir.



Şekil 2. 4. Basınç dalgalanmaları genliğinin faz farkı ile değişimi.

2.2.3. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Alanında Yapılan Çalışmalar

Geçmişte, geleneksel gaz türbin motorlarında yakıt ve hava yanma odasına farklı girişlerden sağlanmakta ve reaktantların akış oranları kontrol edilerek kararlı alevler elde edilmekteydi. Ayrıca, ikincil ve üçüncül hava akımları ile karıştırma sonucunda gaz sıcaklığı arzu edilen türbin giriş sıcaklığına düşürülmekte ve difüzyon tip olarak adlandırılan bu tip yakıcılarda yakıt ve havanın yanma odası içinde karışması sonucunda alev geri tepmesi olayı önlenmekteydi. Türbin tasarımcıları difüzyon tip yakıcıların bu avantajını birkaç on yıl boyunca kullandı. Fakat, günümüzde katı emisyon standartlarından dolayı bu tip yakıcıların yerini fakir ön karışimli yakıcılar almıştır. Bu sayede yanma sıcaklıkları ve termal NO_x emisyonları azalmıştır [74]. Diğer taraftan fakir ön karışimli yakıcılar, düşük NO_x emisyonlarına sahip modern gaz türbin motorların geliştirilmesinde önem arz etmelerine rağmen yanma kararsızlıklarına karşı oldukça duyarlıdırlar. Alev dinamikleri olarak da adlandırılmakta olan yanma kararsızlıkları, yanma konusu üzerine çalışmalar yapan birçok araştırmacı için önemli konulardan biridir. Çünkü; yanma kararsızlıkları üzerine çalışma yapacak araştırmacılar; akışkanlar mekaniği, termodinamik, kinetik, akustik, hidrodinamik, kontrol teorisi ve dinamik sistemler hakkında yeterli bilgi birikimine sahip olmalıdır. Yanma kararsızlıkları, 1940'li yıllardaki katı ve sıvı yakıtlı roket motorlarından başlayarak günümüz gaz türbin motorlarına, endüstriyel fırınlara ve hatta ev tipi ısıtıcılara kadar birçok yanma programının kaçınılan ve göz ardı edilen konusudur [75]. Yanma kararsızlıklarının kronolojisi Şekil 2.5'te gösterilmiştir [76, 77].



Şekil 2. 5. Yanma kararsızlıklarının kronolojisi.

1940'lı yıllarda yanma kararsızlıklarını anlayabilmek ve tanımlayabilmek için tam ölçekli laboratuvar sistemleri oluşturulmuş fakat basınç ölçüm ekipmanlarının daimî olmayan alev davranışının dinamik tepkilerini ölçebilecek hassasiyet ve doğruluğa sahip olmaması nedeniyle yeterli ilerleme kat edilememiştir. 1940'lı yılların sonlarına doğru araştırmacılar, yanma sonucu ortaya çıkan gaz ürünlerin yanma kararsızlıklarına neden olduğu hakkında ortak fikir birliğine varmışlardır. 1950'li yıllarda ise ölçüm ekipmanlarının gelişmesi sonucu akustik titreşimler, zayıf şok dalgaları gibi kararsızlık karakteristikleri belirlenebilmiştir. Bu dönemdeki ilerlemeleri kısıtlayan temel etkenler alev ve akış alanı görüntülemelerinin yeterli olmaması ve oluşturulan tam ölçekli yanma sistemlerinin yüksek maliyete sahip olmasıydı. 1980'li yıllarda yeni itki sistemleri üzerine çalışmalar yapılmaya başlanmış ve yanma kararsızlıkları oldukça faydalı yaklaşımlar ile ayrıntılı olarak incelenebilmiştir. 1990'lı yıllarda Ariane 5 roketlerinde yapılan yanma kararsızlığı çalışmaları düşük frekanslı dalgalanmaları incelemeyi hedeflemiştir. 1990'lı yılların sonlarına doğru yapılan çalışmalar sonucunda yanma kararsızlığı konusunun bütün yönleri, temel kimyadan motorların iç dinamiklerine kadar araştırılmıştır [77].

2.3. Yanma Kararsızlıkları

Geleneksel yakıcılar, düşük emisyon standartlarını sağlayabilmek için çok dar bir eşdeğerlik oranı aralığında ve yakıt kompozisyonundaki değişimin çok az olduğu geleneksel fosil yakıtlarla çalışmaktadır. Fakat değişken kompozisyonlara ve düşük ısı değere sahip sentetik gazlar yanma kinetiklerini değiştirerek daimi (emisyon, alev yapısı vb.) ve dinamik (termo-akustik yanma kararsızlıkları, alev sönmesi ve geri tepmesi) yakıcı davranışını belirgin bir biçimde değiştirir [78, 79].

Isı salınımı ile yanma odası geometrisinin etkileşimi sonucu oluşan termo-akustik dalgalanmalar bir geri besleme döngüsü oluşturur. Bu durum, kararsızlıkların ortaya çıkmasına neden olur ve bunun sonucunda yüksek genlikli basınç ve hız salınımları, kontrol sistemi çalışmasını engelleyen şiddetli titreşimler, yanma sistem komponentlerinde düşük ya da yüksek çevrimli yorulmaya neden olan titreşimli mekanik yükler meydana gelebilir. Yanma odası duvarlarına daha fazla ısı transferi olur ve termal gerilmeler artar. Bu durumda alev iki farklı davranış sergiler; söner (blow out) ya da geri teper (flashback) [55].

2.3.1. Statik Yanma Kararsızlıkları

Statik yanma kararsızlıkları yanma sistemine dışardan herhangi bir müdahalede bulunmadan, ısı salınımı sonucu ortaya çıkabilen akustik salınımlarla (dinamik kararsızlıklarla) alev sönmesi ve geri tepmesi olayını birbirinden ayırmak için kullanılmaktadır [80-82]. Alev sönmesi ve geri tepmesi dar çalışma aralıklarına sahip fakir ön karışımli gaz türbin yakıcılarında sıkça görülmektedir. Yakıt fakir şartlar altında yanma süreci, özellikle yük değişiklikleri esnasında yakıt kompozisyonu, hava sıcaklığı ve nemin değişimindeki küçük bozukluklara karşı hassastır. Bu tür durumlarda yanma sistemi, alev stabilizasyon yöntemlerinin yeterli kalmaması nedeniyle alevin sönmesine veya geri tepmesine neden olabilir.

2.3.1.1. Alev Sönmesi

Genellikle yakıcının statik kararlılığı ile ilişkilendirilen bu durum, alev çekirdeğinin bulunması gereken yerden ayrılması olayıdır. Alev sönmesi reaksiyon ve yüksek hızdaki yayılma oranı arasındaki etkileşimleri kapsamaktadır. Alev sönmesi olayı karşılaşılan yakıcılarda pahalı olan kapatma, tahliye ve yeniden başlatma sistemleri gerektirmektedir [36]. Geçmişte yapılan çalışmalarda farklı teori ve fiziksel değerlendirmeler kullanılmıştır. Alev sönmesinin resirkülasyon bölgesine giren reaktantların miktarının ya da reaktantların kimyasal reaksiyonu sonucu ısı salınımı ve sıcak resirkülasyon akışı arasındaki enerjinin dengelenemediği şartlar altında meydana geldiği belirtilmiştir [83-85]. 20. yüzyılın sonlarına doğru, sıcak kayma tabakası ile yanıcı gaz karışımı arasındaki temas süresinin kimyasal ateşleme süresinden az olduğu durumlarda alev sönmesi olayının gerçekleştiği gösterilmiştir [86]. Son olarak, Alman kimyager Gerhard Damköhler'den adını alan yaklaşım ile alev sönmesi limitleri başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir [87]. Noble et al. Damköhler sayısını denklemler 2.4-2.8'de görüldüğü şekli ile tanımlamışlardır.

$$Da = \frac{\text{Reaksiyon oranı}}{\text{Yayılma oranı}} = \frac{\text{Yayılma zamanı}}{\text{Reaksiyon zamanı}} \quad (2.4)$$

$$Da = \frac{\tau_{res}}{\tau_{chem}} = \frac{\text{Reaktantların reaksiyon bölgesinde kalma zamanı}}{\text{Reaksiyon için gerekli kimyasal zaman}} \quad (2.5)$$

$$\tau_{res} = \frac{d}{U_{ref}} \quad (2.6)$$

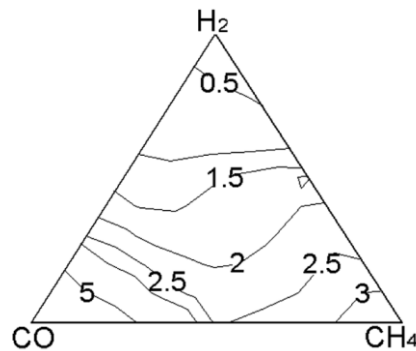
$$\tau_{chem} = \frac{\alpha}{S_L^2} \quad (2.7)$$

$$Da = \frac{\tau_{res}}{\tau_{chem}} = \frac{S_L^2 \cdot d}{\alpha \cdot U_{ref}} \quad (2.8)$$

Denklemlerde S_L ; laminer yanma hızı, d ; karakteristik uzunluk ölçeği (resirkülasyon bölgesi uzunluğu), α ; termal difüzyon (ısı yayılma) ve U_{ref} ; hız ölçeğini ifade etmektedir.

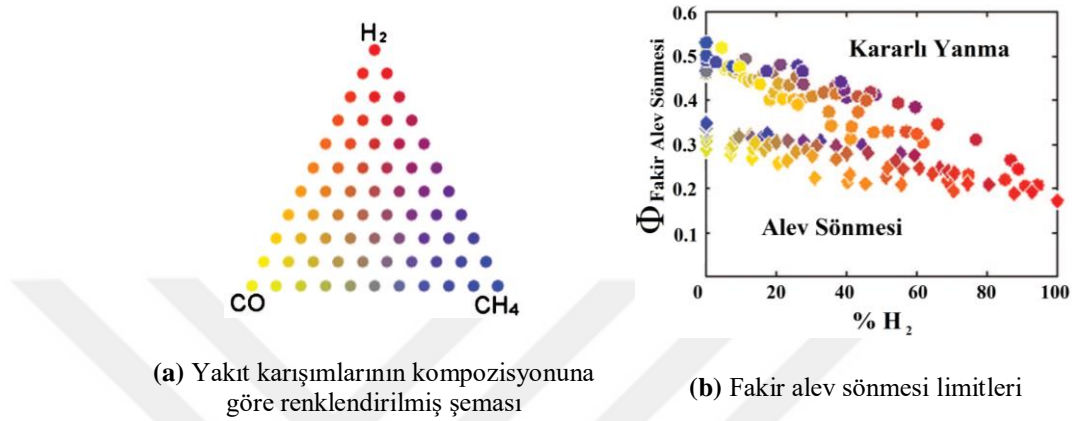
Damköhler sayısı reaktantların reaksiyon bölgesinde kalma süresinin kimyasal reaksiyon için gerekli zamana oranıyla ifade edilmektedir. Eğer reaktantların reaksiyon bölgesinde kalma zamanı kimyasal kinetik zamandan daha az olursa alev sönmesi olayı gerçekleşir. Alev sönmeye yakın kararsızlaşır ve aşağı akıma doğru hareket eder. Kimyasal reaksiyonun çok hızlı gerçekleştiği durumlarda Damköhler sayısının yüksek olduğu ($Da \gg 1$), Damköhler sayısının düşük olduğu durumlarda ($Da < 1$) ise reaktantların akış hızının kimyasal reaksiyon zamanına göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır [88].

Alev sönmesi limitlerini etkileyen parametrelerden en önemlisi Damköhler sayısının kesrinde yer alan reaksiyon için gerekli kimyasal zaman (τ_{chem}) terimidir. Şekil 2.6'da Lieuwen ve arkadaşlarının $H_2/CO/CH_4$ yakıt karışımları üzerine sabit adyabatik alev sıcaklığı 1500 K, 1.7 atm basıncında ve reaktantların giriş sıcaklığı 300 K iken GRI 3.0 (The Gas Research Institute) kinetik mekanizması kullanarak yapmış oldukları kimyasal zaman (ms) hesaplamaları sunulmuştur [36, 89, 90]. Kimyasal kinetik zamanı düşük olan yakıtlar daha hızlı yanmakta ve böylece alev sönmesi limitleri daha düşük olmaktadır. Örneğin; karışım içerisinde H_2 konsantrasyonu yüksek olan karışımlar daha düşük eşdeğerlik oranlarında yanmakta, CO konsantrasyonu yüksek olan yakıtlar daha H_2 gazına oranla daha yüksek eşdeğerlik oranlarında yanmaktadır.



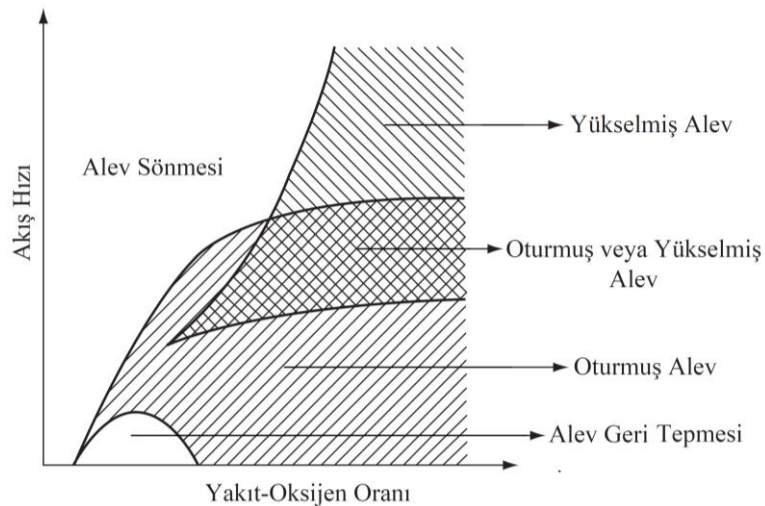
Şekil 2. 6. $H_2/CO/CH_4$ yakıt karışımları için kimyasal zaman (ms) bağımlılığı.

$H_2/CO/CH_4$ yakıt karışımlarının fakir alev sönmesi limitleri üzerine etkisi Şekil 2.7'de sunulmuştur [79, 90]. Şekilden de görüldüğü gibi kimyasal reaksiyon zamanları düşük olan yakıtların daha hızlı yandığı ve bunun sonucunda fakir alev sönmesi limitlerinin daha düşük olduğu görülmektedir.



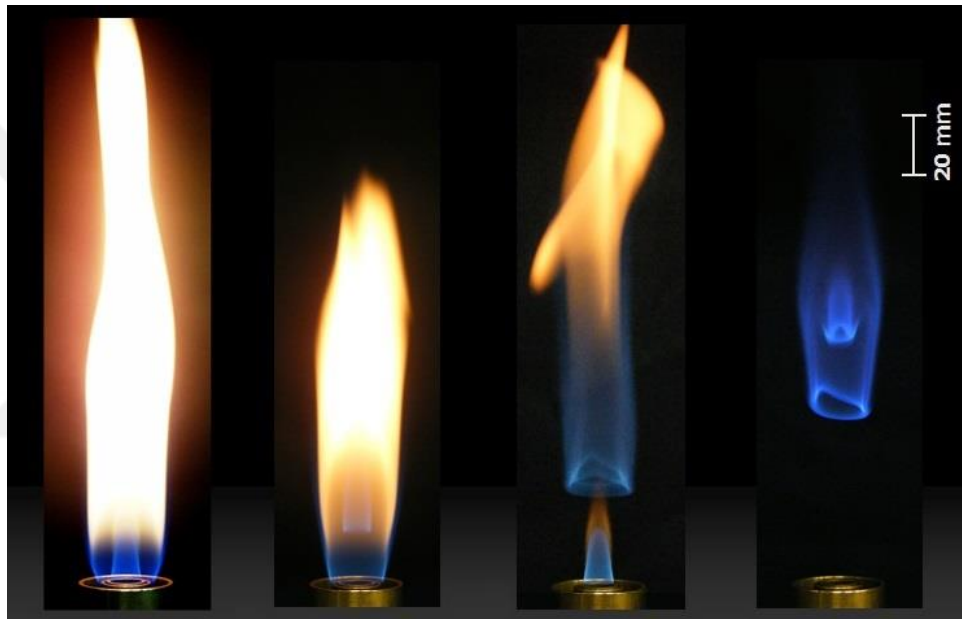
Şekil 2. 7. $H_2/CO/CH_4$ yakıt karışımlarının fakir alev sönmesi limitleri üzerine etkisi.

Damköhler sayısının üst kesrinde yer alan reaktantların reaksiyon bölgesinde kalma zamanı (τ_{res}) terimi akış hızı ile alakalıdır. Yakıt-hava karışımının yanma odasına girdiği yakıcı nozul çapı vb. geometrik parametreler, reaksiyonun gerçekleşmesi için gerekli kimyasal zaman (τ_{chem}) ve çalışma şartları (eşdeğerlik oranı, basınç vb.) dikkate alınarak hesaplanmalıdır. Şekil 2.8'de akış hızı ile yakıt- O_2 oranı arasındaki ilişki Bunsen tipi bir yakıcıda gösterilmiştir [91].



Şekil 2. 8. Bunsen tipi bir yakıcıda alev rejimleri.

Akış hızının yüksek olması alevin sönmesine veya alevin yakıt nozulundan ayrılmasına neden olabilir. Bu durumda alev farklı rejimler gösterebilir. Şekil 2.9’da bu rejimlere örnekler verilmiştir [92]. Yamamoto et al., oluşturdukları deney düzeneğinde üç girişli bir yakıcı tasarlamışlar ve yükselmiş alev yapısını incelemişlerdir. İç ve dış girişlerden hava, orta girişten de metan gazı göndererek yanma karakteristiklerini incelemişler ve NO_x emisyonları ile is oluşumu ölçümleri yaparak farklı alev rejimlerini karşılaştırmışlardır. Alevin yükselmesi ile parlaklığın ve is oluşumunun azaldığını tespit etmişlerdir [92].



(a) Oturmuş

(b) Kısmi yükselmiş

(c) Yükselmiş

Şekil 2. 9. Farklı alev rejimleri.

2.3.1.2. Alev Geri Tepmesi

Geri tepme olayı, alevin, brülör ucundan geriye doğru hareket ederek bağlantı hortumlarına girmesi ile başlar, genellikle gürültülü veya ışığa benzer tiz bir ses çıkarır. Alev geri tepmesi homojen olmayan girdaplı akışlarda türbülanslı alev hızı yayılması ile ilgilidir. Ön karışımli nozulların iyi bir şekilde soğutulmaması durumunda alev geri tepmesi ciddi güvenlik riskleri ortaya çıkarmaktadır. Alev geri tepmesi gerçekleştiğinde, malzeme sıcaklığında ani artışlara neden olarak sisteme kalıcı hasarlar vermektedir. Alev geri tepmesi, türbülanslı alev hızı yakıt hava karışımının yanma odasına giriş hızından daha fazla olduğunda gerçekleşir ve alevin ön karışım bölgesinde aşağı akıma doğru

yayılması ile devam eder. Alev geri tepme mekanizması yoğun incelenmiş klasik bir konu olmakla birlikte, geri tepmenin karmaşıklığı önemini korumaktadır [36].

Deneysel olarak yapılan araştırmalarda çalışma şartlarına ve yanma odası tasarımına bağlı olarak alevin ön karışım bölgesine yayılmasına sebep olan dört farklı geri tepme mekanizması tespit edilmiştir. Bunlar; çekirdek akışta türbülanslı alev yayılması, yanma kararsızlıklarından kaynaklanan alev geri tepmesi, sınır tabakada alev geri tepmesi ve vorteks yıkımı dinamikleri değişiminden kaynaklanan çekirdek akıştaki alev geri tepmesidir [93-96]. İlk üç mekanizma girdaplı ve girdapsız ön karışımli yakıcılarda görülebilirken sonuncu mekanizma karışım bölgesi içerisinde girdaplı bir akış gerektirir. Her bir mekanizma üzerine yakıt kompozisyonunun etkisi farklılık gösterebilmektedir [89].

Ön karışımli yakıcılar doğaları gereği alev geri tepme eğilimine sahiptirler. Alev geri tepmesi alevin yanma odasından yakıcının ön karıştırıcı kısmına yani yukarı akıma doğru hareketi olarak da adlandırılabilir [97]. Alev geri tepmesi olayının en sık gerçekleştiği mekanizma akışta meydana gelen ters yönlü akışlardır. Akışın ters dönmesi, yanma kararsızlıkları sonucu meydana gelebilirken, akış dönmesi yokken de alev hızının akış hızından fazla olduğu durumlarda da alev geri tepmesi gerçekleşebilir. Fakir yanma alev hızını azaltırken yüksek sıcaklık, basınç ve türbülans alev hızını artırabilir. Bu nedenle yanma sürecinde oluşabilecek bozuklukları önlemek için ön karıştırıcı kısmındaki akış hızını yeterli miktarda artırmak gereklidir. 1.5 cm çapa sahip kuartz bir yakıcıda metan alevinin sönmesi ve geri tepmesi olayı Şekil 2.10'da gösterilmiştir [98].

Alev Sönmesi Kararlı Alev Alev Geri Tepmesi



(a) Kararlı yanma hali



(b) Alev yanma hızları değişti.



(c) Yanma bozuklukları başladı.



(d) Alev rejimleri bozuldu.



(e) Alev sönmesi ve geri tepmesi olayları gerçekleşti.

Şekil 2. 10. Ön karışımli metan alevinin sönmesi ve geri tepmesi.

Çekirdek akıştaki türbülanslı alev yayılmasına bağlı alev geri tepmesi; alev, yanma hızından daha düşük akış hızlarına sahip her yere yayılmaya çalışır. Çok iyi bir şekilde tasarlanmış yakıcılarda alevin yakıcı içerisine yayılmaması için yüksek hızlı aksenel akış sağlayacak şekilde yakıcı nozulları tasarlanmaktadır. Bu şartların oluşturulmadığı yakıcılarda alev yayılmasına bağlı geri tepme olayı gerçekleşir. Örneğin; H_2 gibi yüksek yayılma hızlarına sahip yakıt içeren karışımlarda alev geri tepmesi olayı doğalgaza oranla daha yüksektir. Ayrıca yüksek girdaplı akışlar yanma karışımlarının daha homojen bir yapıya sahip olmasına, bunun sonucunda daha kısa alevlere ve alev geri tepmesine neden

olabilir. Sonuç olarak; çekirdek akıştaki türbülanslı alev yayılması nedeniyle oluşabilecek alev geri tepmesi olayını önleyebilmek için yakıcı geometrisi çok büyük önem arz etmektedir.

Yanma kararsızlıklarına bağlı alev geri tepmesi; bu durum genellikle yanma kararsızlıkları sonucu ortaya çıkan hız dalgalanmaları ile alakalıdır. Hız dalgalanmaları sonucu akış hızında düşüşler ve büyük ölçekli girdaplar oluşmakta, bu durum da alev geri tepmesi olayına neden olmaktadır. Bu mekanizma yakıt kompozisyonundan tamamen bağımsızdır. Yanma odası akustiği sonucu oluşabilecek titreşimlerin engellenmesi ve akustik sönümleyicilerin kullanılması, yakıcıda meydana gelebilecek büyük hasarları önlemek için gereklidir.

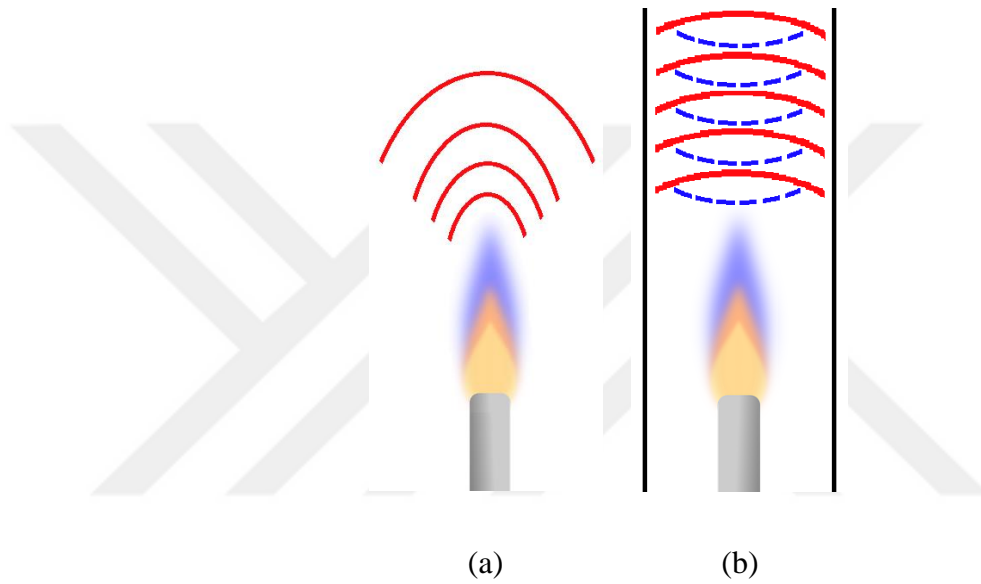
Sınır tabakaya bağlı alev geri tepmesi; aerodinamiğin kaymama koşuluna bağlı olarak yakıcının katı yüzeyleri ile doğrudan temasta olan gazların hızları sıfırdır. Viskoz etkilerden dolayı sınır tabakaya yakın gazların hızları düşüktür. Bu durumda alev düşük hızın olduğu bölgelere doğru hızlıca yayılır. Bu sorunu çözmek için sınır tabaka kalınlıklarını oldukça ince tutmak gerekmektedir. Ayrıca yakıcı içerisinde yerel ayrılma ve duvar sınır tabakaların artmasına neden olan difüzör bölgelerinden kaçınmak gerekmektedir.

Vorteks yıkımı dinamikleri değişiminden kaynaklanan çekirdek akıştaki alev geri tepmesi; girdaplı akışlar ile ısı salınımı arasındaki etkileşim sonucunda gerçekleşir. Düşük girdap sayılarında girdap kopmaları gerçekleşmez. Yüksek girdap sayılarında ise alevin girdap kopmalarına neden olduğu sonlu genlik bozulmaları akışta ani geçişlere (düşük veya negatif akış hızlarına) neden olur. Kopan girdaplı akış, baloncuklar şeklinde yukarı akıma doğru hareket eder ve geri tepme gerçekleşir.

2.3.2. Dinamik Yanma Kararsızlıkları

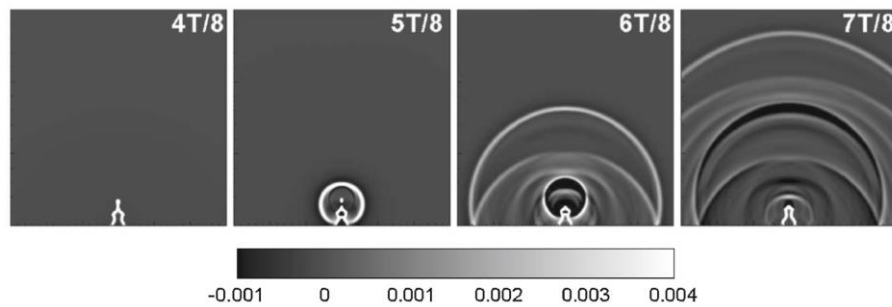
Yanma sistemleri sonucu üretilen ses dalgaları son 60 yıl içinde önemli bir araştırma konusu olmuştur. Uçak motorları, endüstriyel yakıcılar ve dizel motorlar gibi yanma sistemlerinden kaynaklanan gürültüyü azaltmak, birçok araştırmacıyı farklı türdeki yanma akışları ile ilgili gürültü oluşumunu [99, 100] araştırmaya motive etmiştir. Yanma kaynaklı ses dalgalarının alev ile etkileşimi, termo-akustik kararsızlıklara neden olabileceğinden dolayı ayrı bir öneme sahiptir [101]. Roket ve gaz türbin motorları ise

yanma kararsızlıklarının en sık karşılaşıldığı alanlara örnek olarak verilebilir [70, 102-104]. Yanma esnasında daimî olmayan davranış gösteren alev, yeni ses dalgaları üretir ve bu ses dalgaları radyal yönde yayılmaya başlar. Açık ortamda gerçekleşen yanma olayında ses dalgaları herhangi bir engel ile karşılaşmadıkları (diğer bir ifade ile yansımadağı) için dış ortam tarafından sönümlenmektedir (Şekil 2.11a). Fakat, günümüz yanma sistemlerinde yanma odaları (kapalı ortam) kompleks yapılardan meydana gelmektedir (Şekil 2.11b).



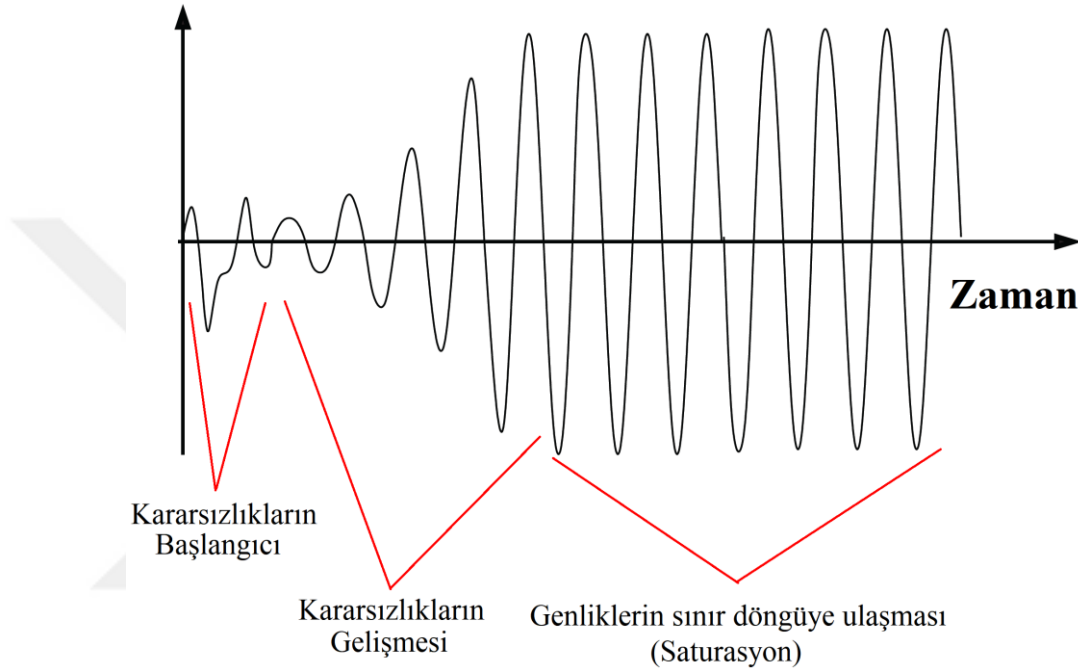
Şekil 2. 11. Alevin açık (sol) ve kapalı (sağ) ortamda yayılması.

Alevin yaymış olduğı daimî olmayan ısı salınımları yanma odası geometrisi ile etkileşime girerek yüksek genlikli basınç dalgalanmalarına sebep olabilmektedir. Talei et al., yaptıkları sayısal çalışmada laminer alev akışlarında güçlü ses dalgalarının gözlemlenebileceğini göstermişlerdir [101] (Şekil 2.12).



Şekil 2. 12. Kararsız laminer alevlerin ürettiğı ses dalgalarının yayılması.

Oluşan ses dalgaları, ısı salınımı ve yakıt/hava karışımında meydana gelen bozukluklar bir geri besleme döngüsü oluşturarak yanma kararsızlıklarına neden olabilir. Ses dalgaları yanma odası duvarlarından yansıyor ve sönümlenmez ise ses dalgaları belirli bir genliğe kadar gelişir ve doyuma ulaşır. Şekil 2.13'te ses dalgalarının gelişmesi ayrıntılı olarak gösterilmiştir [105].



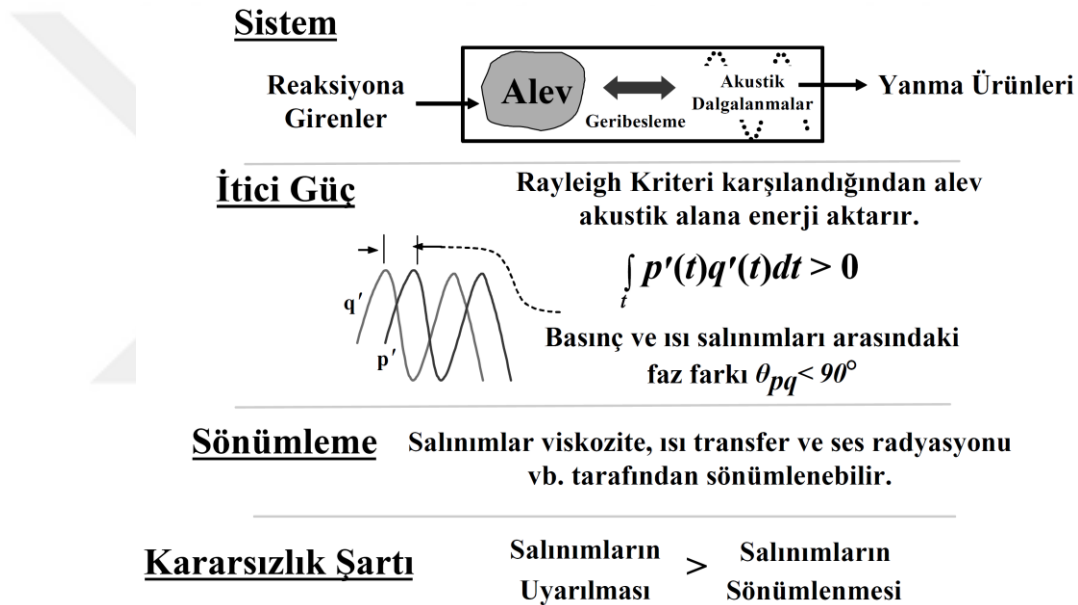
Şekil 2. 13. Ses dalgalarının gelişerek doygunluğa ulaşması.

2.4. Kararsızlıkların Oluşum Mekanizması

Genel olarak kararsızlıkların ortaya çıkışı yüksek genlikli basınç ve hız salınımları oluşturdukları için (gaz türbinlerde itici güç dalgalanmalarına neden olur, şiddetli titreşimler sistemin kontrolünü zorlaştırır, ısı transferi iyileşir ve yakıcı duvarlarındaki termal gerilmeler artar, salınımlı mekanik yükler sistem komponentlerinde metal yorgunluğuna neden olur, alev sönmesi ve geri tepmesi görülebilir) problemlidir. Bu kararsızlıkların uyarılma mekanizmaları ve önlenmeleri üzerine bu zamana kadar birçok çalışma yapılmıştır.

Şekil 2.14'te yanma kararsızlıklarının kendiliğinden oluştuğu şartlar özetlenmiştir [55]. Sistem kararsız bir yakıcıyı ifade etmektedir. Reaktantların tepkimeye girmesiyle birlikte yanma ürünleri ortaya çıkar, eğer basınç ve ısı salınımları arasındaki faz farkı 90

derecenin altında olursa akustik alana enerji aktarılır. Isı salınımlarının yanma odası akustiği ile etkileşimi sonucu oluşan dalgalanmaların pozitif geribeslemesi sonucu, diğer bir ifade ile Rayleigh kriteri sağlandığında yanma kararsızlıkları ortaya çıkmaktadır. Kararsızlıkların sönmülenebilmesi için yanma odası enerji kayıplarının (viskoz enerji yitimi, ısı transferi, akustik enerjinin ışınım ve taşınım ile yakıcı dışına aktarılması vb.) akustik alana aktarılan enerjiden fazla olması gerekmektedir. Sönümlemeyen salınımlar belli bir doygunluğa (sınır döngü genliğine) erişene kadar eksponansiyel oranda artar. Doygunluğa ulaşan salınımların akustik alana aktardıkları enerji ile akustik alan sınırlarından kaybedilen enerji birbirine eşittir [55].



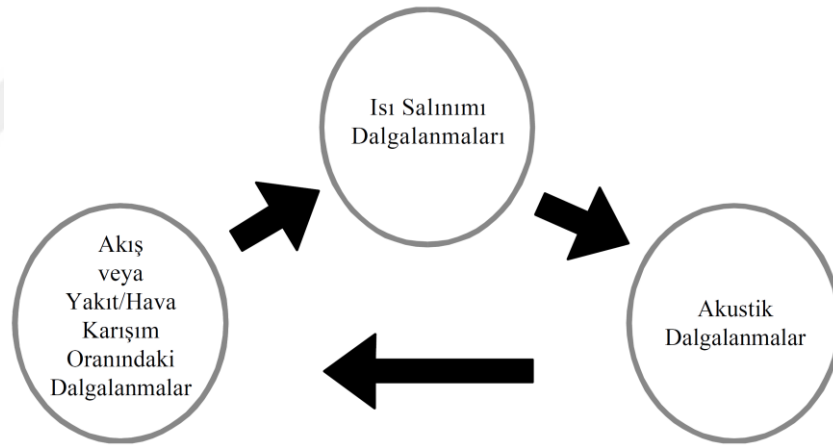
Şekil 2. 14. Yanma kararsızlığının oluşması için gereken şartlar.

Yanma kararsızlığı oluşturacak şartların belirlenmesinde akustik sönümleme önemli bir rol oynar. Kararsız bir moddan enerji üç yolla kaldırılabilir. Bunlar: viskoz veya ısı transferi vasıtasıyla akustik enerjinin girdabımsı veya entropi çalkantılarına transfer edilmesi (1), taşınım ve/veya radyasyon yoluyla akustik enerjinin yakıcı dışına transfer edilmesi (2), akustik modlar arasında enerji transferi (3) [55].

Genel olarak kararsızlıklar yakıcının doğal akustik modları ile ilişkili frekans aralıklarında gerçekleşir. Daha önce de belirtildiği gibi yanma kararsızlıkları sistem karakteristiklerine ve işletme şartlarına bağlı olan akustik salınımlar ve yanma işlemi arasındaki geri besleme tarafından harekete geçirilir. Şekil 2.15'te yanma kararsızlığına

sebeplerden biri geri besleme döngüsü görülmektedir [55, 106]. Akış hızı veya diğer termodinamik durum değişkenlerindeki dalgalanmalar ısı salınım oranının dalgalanmasına neden olur. Isı salınımındaki dalgalanmalar da akustik salınımları indükler ve akustik salınımlar hız ve termodinamik durum değişkenlerinin dalgalanmasına neden olur. Böylece geri besleme döngüsü kapanır. Akustik salınımlardan eklenen veya çıkarılan enerjinin görece büyüklüğüne bağlı olarak; salınımların genliği azalabilir, sabit kalabilir veya her çevrim boyunca artabilir [55].

Alevin girdap, sınır tabaka ve yüzey kırışması etkileşimleri ısı salınım dalgalanmalarına neden olurken; eşdeğerlik oranındaki dengesizlikler de yanma işleminde daimî olmayan bozukluklara neden olmaktadır. Hangi bozukluğun veya bozuklukların yanma kararsızlıklarına neden olduğunun tespiti yanma kararsızlıklarını sönmüleyebilecek sistemlerin doğru bir şekilde oluşturulabilmesi için önemlidir [107].



Şekil 2. 15. Yanma kararsızlıklarına sebep olan geri besleme döngüsü.

2.5. Kararsızlıkların Kontrol Yöntemleri

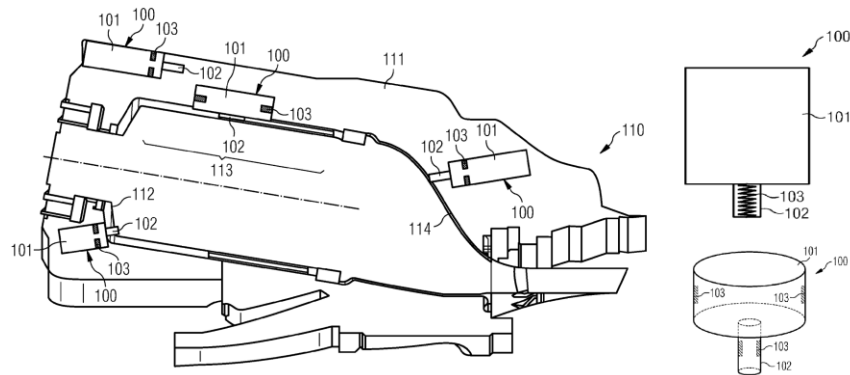
Sürekli yanma sistemlerinde (özellikle yakıt fakir şartlarda çalışmak için dizayn edilmiş ön karışimli yanma sistemleri) termo-akustik kararsızlıklar; ısı salınım dinamikleri ve akustik salınımlar (basınç dalgalanmaları) arasındaki iki yönlü etkileşimden kaynaklanır. Bazı şartlar altında kararsızlıkların baskılanması veya sönmülenmesi mümkündür. Pasif kontrol yaklaşımları; sistemin işletme şartlarının veya termo-akustik karakteristiklerinin değiştirilmesini, alevin bir engel veya akustik sönmüleyicilerle kontrol altına alınmasını, alev stabilizasyon metodunun veya pozisyonunun değiştirilmesini içerir. Bu yaklaşımlar

değişen işletme şartlarına uyum sağlayamadığından kullanımları kısıtlıdır. Pasif sönümleyici elemanların düşük bakım maliyetine ve yüksek dayanıklılığa sahip oldukları için konvansiyonel yakıcılarda sıkça kullanılmalarına rağmen, pasif kontrol yöntemleri (Helmholtz rezonatörü, delikli kaplamalar, akış bölme komponentleri ve yarım/çeyrek dalga tüpleri) yüksek frekanslı kararsızlıkları baskılamada etkiliyken düşük frekanslı kararsızlıkları sönümlemede yeterli değildir. Bu nedenle aktif kontrol yöntemleri geniş bir çalışma şartı aralığında araştırılmıştır. Aktif kontrol stratejileri yanma dinamiklerini kontrol eden mekanizmaların doğru bir şekilde modellenmesini, akustik ve yanma dinamikleri arasındaki belirgin olmayan ilişkinin iyi bir şekilde anlaşılmasını gerektirir [108, 109].

2.5.1. Pasif Kontrol Yöntemleri

2.5.1.1. Helmholtz Rezonatörü

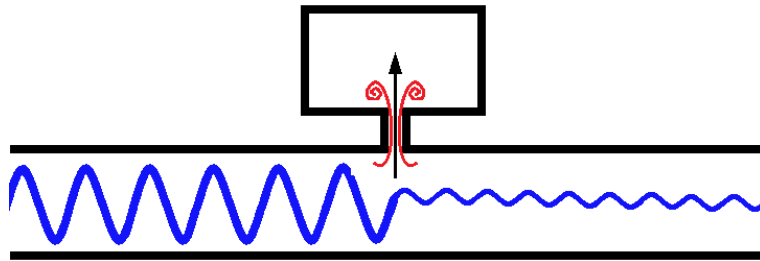
Güç üretimi, tahrik ve ısıtma sistemleri fakir ön karışımli sürekli yanma şartlarında çalışırlar ve bu tür sistemler daha önce belirtildiği gibi termo-akustik kararsızlıklara son derece duyarlıdırlar. Bu kararsızlıkları sönümlemek veya baskılamak için kullanılan pasif kontrol yöntemlerinden birisi de Helmholtz rezonatörüdür. Şekil 2.16'da akustik sönümleyicilere örnek olarak Helmholtz rezonatörü, bir gaz türbin yanma odası üzerinde gösterilmiştir [110].



Şekil 2. 16. Gaz türbin motoru yanma odası Helmholtz rezonatörü.

100-Ayarlanabilir rezonatör	103-Deforme olabilen eleman	112-Yakıt enjektörüne yakın olan kısım
101-Boşluk	110-Gaz türbin motoru	113-Alev bölgesi
102-Boyun kısmı	111-Kaplama	114-Egzoz kısmı

Helmholtz rezonatörü, yüksek genliklerde ses dalgalarının sönümlenmesini (ses yutumunu) gerçekleştiren sistemlerdir. Rezonatör; küçük ve açık boyun kısmı, boşluk ve deforme olabilen spiral bir yapıdan oluşmaktadır. Yanma odasının çalışma sıcaklığına bağlı olarak boşluğun hacmi, boyun kısmının uzunluğu ve deforme olabilen spiral yapının çapı değişkenlik göstermektedir. Gaz türbin motorunun çalışması esnasında ürettiği yanma dinamikleri ve ses dalgaları yanma odası etrafına özenli ve ölçülü bir şekilde yerleştirilen rezonatörler tarafından absorbe edilmekte ve böylece yanma odasında yapısal hasarlara neden olabilecek termo-akustik kararsızlıkları sönümlemektedir. Şekil 2.17’de Helmholtz rezonatörünün akustik dalgaları sönümlenmesi basit bir kanal içerisinde gösterilmektedir. Özellikle gaz türbinli motorlarda kullanımı sonucu kritik frekansları sönümlemede çok faydalı olduğu tespit edilmiştir. Genellikle yanma odasında oluşan dalgalanmaların %50-75’ini sönümleyebilecek şekilde tasarlanmaktadır. Gaz türbin motorunun farklı yükler altında çalışması sırasında yanma odası sıcaklığı değişkenlik gösterir ve Helmholtz rezonatörü kritik frekans değerlerinde sönümlemede yetersiz kalır. Bu sebepten ötürü, yanma odası etrafında fazladan Helmholtz rezonatörleri yerleştirilerek farklı frekans değerlerindeki yanma dinamikleri sönümlenir. Fazladan rezonatörlerin yerleştirilmesinin bazı yanma odalarında uygulanabilirliği yeterli değildir. Ayrıca çok sayıda parçanın dar bir alanda yerleştirilmesi hem mümkün değil hem de maliyetlidir.



Şekil 2. 17. Helmholtz rezonatörünün ses dalgalarını sönümlemesi.

Helmholtz rezonatörünün rezonans frekansı, geometrik özelliklerine bağlı olarak değişir. Denklem 2.9’da rezonans frekansının matematiksel ifadesi gösterilmektedir.

$$\text{Rezonans Frekansı: } f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l \cdot V}} \quad (2.9)$$

S, Rezonatörün kesit alanı; V, boşluk hacmi; l, boyun uzunluğu; c, ses hızını ifade etmektedir. Akustik dalgalanmaların frekansına göre rezonatörün geometrik boyutları

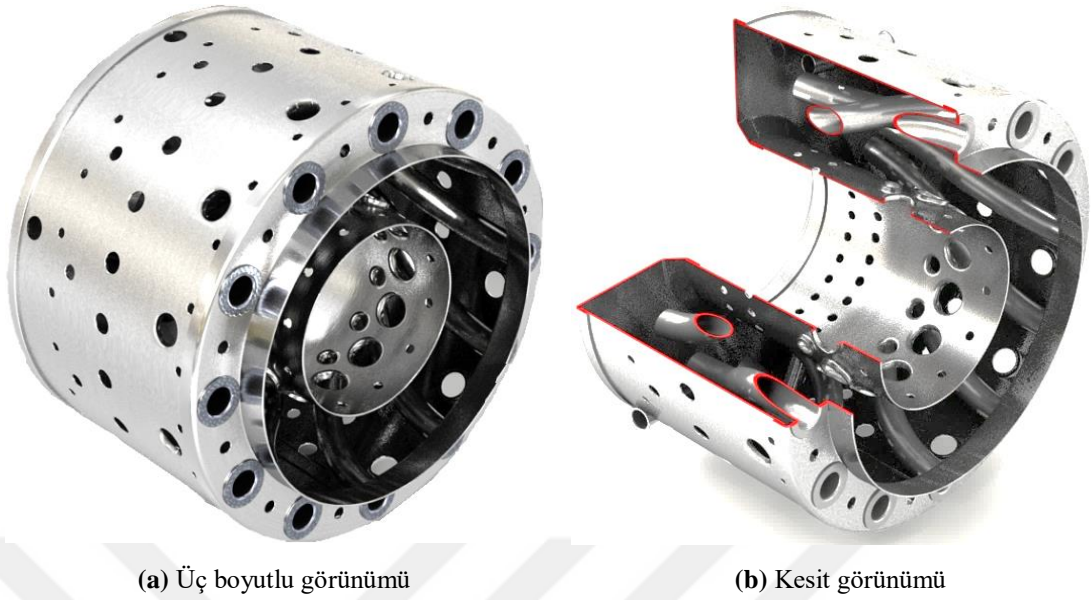
uygun şekilde ayarlanabilir. Fakat dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, ses hızının sıcaklığa bağlı olarak değişmesidir. Denklem 2.10'da ses hızının sıcaklığa bağlı formülasyonu gösterilmektedir.

$$\text{Ses hızı: } c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}} \quad (2.10)$$

κ , Adyabatik indeksi; R, molar gaz sabiti; T, yanma odası gas sıcaklığı; M, mol ağırlığını ifade etmektedir. Denklemlerden açıkça görüldüğü gibi gaz sıcaklığı frekans değerlerinin değişmesinde en önemli etkidir. Gaz sıcaklığının değiştiği şartlarda Helmholtz rezonatörünün sönümlenme frekansı değişir ve termo-akustik dalgaların kritik frekans aralıklarını kapsamayabilir. Bu durumda rezonatörler görevini yerine getiremez. Böyle durumlar ile karşılaşmamak için yanma odası gaz sıcaklığına bağlı olarak farklı frekans aralıklarını kapsayacak şekilde yanma odası duvarlarına farklı boyutlarda rezonatörler yerleştirilir. Ayrıca çoklu rezonatörlerin kullanılmasının oluşturduğu kompleks sistemler yerine aktüatörler ile boşluk hacminin ayarlanabilir ve hareketli olduğu mekanizmalar üretilmiştir.

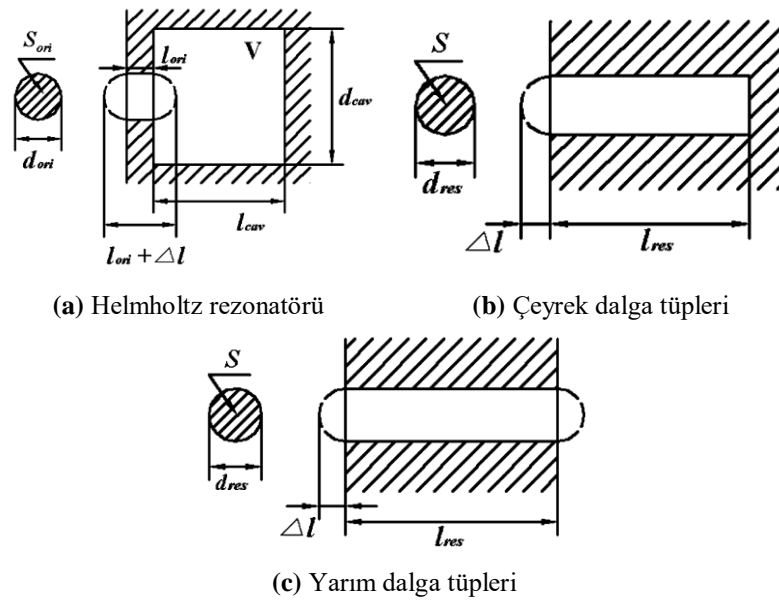
2.5.1.2. Delikli, Yarıklı veya Gözenekli Kaplamalar

Diğer bir akustik sönümleyici ise delikli, yarıklı veya gözenekli kaplamalardır. Yanma sistemlerinin kararlı hale getirilmesi için sıkça kullanılmaktadır [111-114]. Aslında bu yapılar Helmholtz rezonatörünün farklı bir türüdür. Helmholtz rezonatörüne benzer şekilde rezonans frekansına yakın değerlerde en yüksek sönümlenme görevi görmektedirler. Şekil 2.18'de delikli sönümleyicilere örnek olarak Wren 54 marka bir turboprop motorunun yanma odası gösterilmektedir. Pratik uygulamalarda delikli kaplamalardan geçirilen soğutma havasıyla da yüksek sıcaklığın malzeme üzerinde hasar oluşturması önlenmiş olmaktadır. Kullanım yerlerine bağlı olarak malzeme özellikleri değişkenlik göstermektedir. Seramik matrisli kompozit malzemelerin kullanımı ile birlikte karmaşık ve hafif akustik sönümleyici tasarımları da yapılmaktadır [115].



Şekil 2. 18. Delikli sönümleyici örnek olarak bir turboprop motoru yanma odası.

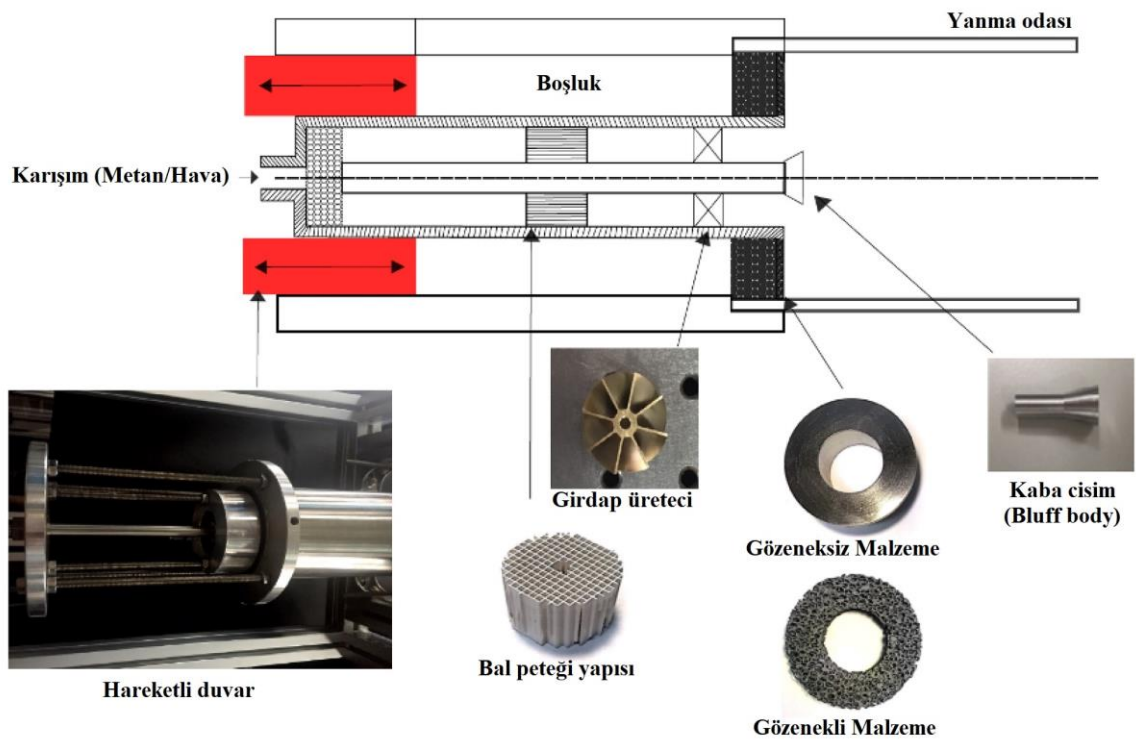
Ayrıca çeyrek/yarım dalga tüpleri de kullanılarak rezonans frekansında sönümlenme yapılabilmektedir [116-118]. Şekil 2.19’da çeyrek ve yarım dalga tüplerinin kesit görüntüleri verilmiştir. Helmholtz rezonatöründe var olan akustik boşluk, çeyrek dalga tüplerinde yokken yarım dalga tüplerinde ise dış ortam, akustik boşluk olarak görev görmektedir [118].



Şekil 2. 19. Helmholtz rezonatörü ve farklı türevleri (çeyrek ve yarım dalga tüpleri).

Ayrıca delikli kaplamalar yerine yarıklı veya gözenekli kaplamalar da benzer şekilde basınç genliklerini sönümlemeye veya engellemeye kullanılmaktadır. Yanma sisteminde

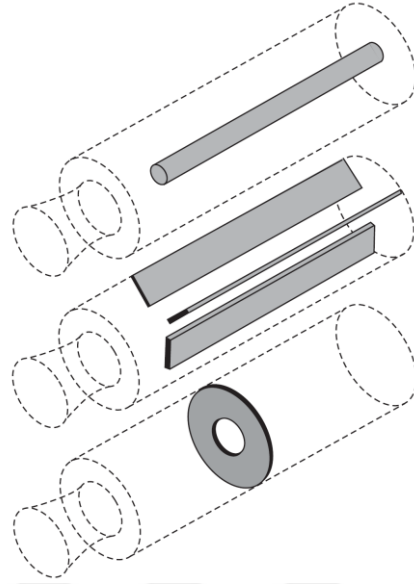
rezonans frekansını sağlayabilmek için sönümleyicilerin geometrik ölçüsüne, biçimine, akustik kaynağa ve yerleştirildiği yere göre farkı matematiksel eşitlikler kullanılarak tasarımlar yapılmaktadır. Örneğin; yarık genişliği, yarık uzaklığı, düzeltme faktörü, delik açıklığı, delik veya yarık sayısı, akustik dalgaların geliş açısı, ses basıncı vb. birçok parametre sönümleyicinin performansını direk etkilemektedir. Kim et al. yapmış oldukları deneysel çalışmada silikon karbit gözenekli malzemeler kullanarak basınç dalgalanmalarının sönümlendiğini göstermişlerdir. Kullandıkları laboratuvar ölçekli gaz türbin yakıcısı Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Alev kararsızlıklarının sönümlenmesinde sünger benzeri gözenekli ortam ile akustik boşluğun etkisini incelemişlerdir [119].



Şekil 2. 20. Gözenekli malzemelerin akustik sönümleyici olarak yakıcıda kullanımı.

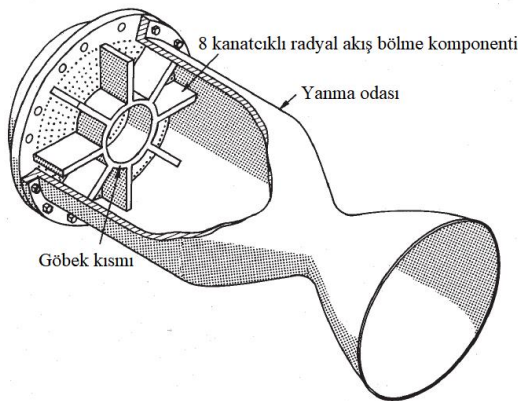
2.5.1.3. Akış Bölme Elemanları

Yanma odasına yerleştirilen akış bölme elemanları ile istenmeyen genlikteki basınç dalgalanmaları azaltılabilmektedir. Tam bir şekli olmamakla beraber sönümlenecek yanma kararsızlıklarına göre şekillendirilir. Şekil 2.21’de katı yakıtlı roketlerde kullanılan akış bölme elemanları örnekler verilmiştir [2, 120].

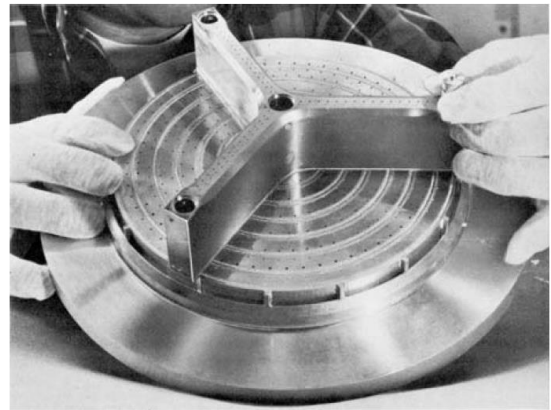


Şekil 2. 21. Akış bölme elemanları (katı yakıtlı roketler).

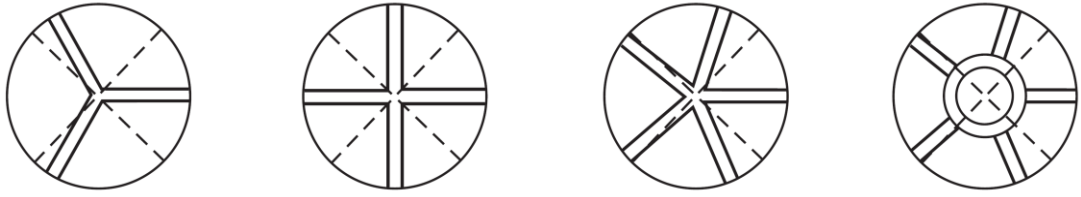
Akış bölme elemanları, Apollo uzay aracı F1 motorunda başarıyla uygulanmış, rokette oluşan basınç dalgalanmalarını önlediği yapılan ölçümlerle ortaya konulmuştur. Akış bölme komponentlerinin geometrik yapıları (şekli, genişliği ve uzunluğu) alev kararsızlıklarının önlenmesi bakımından önemli bir rol oynamaktadır. Yanma odasındaki basınç dağılımları dikkate alınarak akış bölme komponentlerinin formuna karar verilmektedir [121]. Şekil 2.22’de sıvı yakıtlı roket motorlarında enjektöre eklenen akış bölme komponentleri ve onların farklı formlardaki tasarımları gösterilmiştir [122].



(a) Perspektif görünüşü



(b) 3 kanatçıklı formuna örnek



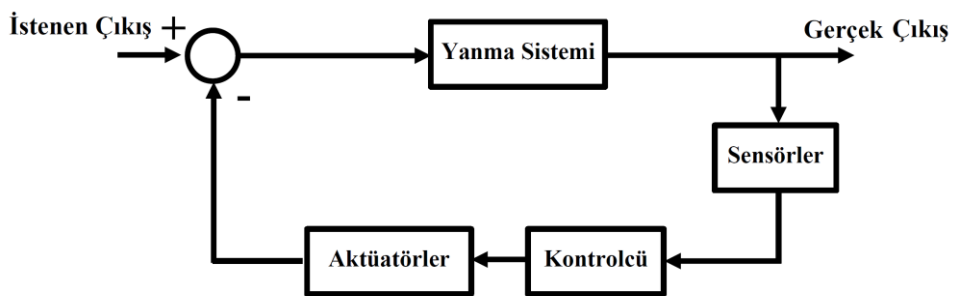
(c) Akış bölme elemanlarının farklı kanatçıklı ve göbekli formları

Şekil 2. 22. Akış bölme elemanları (sıvı yakıtlı roketler).

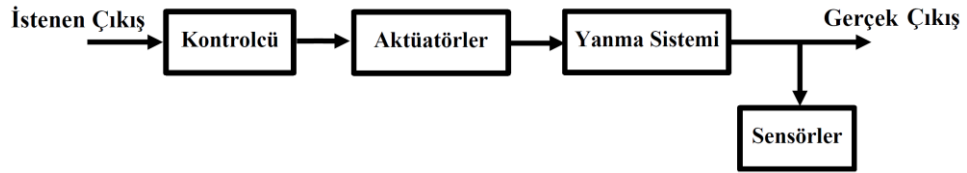
2.5.2. Aktif Kontrol Yöntemleri

Yanma sistemlerinin kararlı hale getirilmesi için kullanılan pasif kontrol yöntemleri geniş çalışma aralıklarına sahip yakıcılarda yeterli sönümlenme görevi görmemektedir. Bu durumda gelişmiş ve dinamik kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Aktüatörler (hoparlörler, yakıt valfleri vb.) yardımıyla ya enerji salınımları kontrol altına alınmakta ya da sınır tabakadan ısı kayıpları artırılmaktadır.

Aktif kontrol yöntemleri açık veya kapalı çevrim konfigürasyonlarında uygulanabilir. Şekil 2.23'de kapalı ve açık çevrim kontrol diyagramları gösterilmektedir. Açık çevrimlerde istenilen çıkışı sağlamak için kontrolcü elemanlara girilen referans kontrol işaretleri kullanılmaktadır. Açık çevrim kontrol sistemlerinin yanma davranışının çok iyi bilindiği yakıcılarda kullanımı uygundur. Kapalı çevrimlerde ise gerçek çıkış değerleri sensörlerle (mikrofon, basınç sensörleri, fotodiyot, fotomultipler vb.) ölçülerek istenilen çıkışla karşılaştırılıp aradaki farkı azaltacak kontrolcü sinyalleri aktüatörlere iletilir. Kapalı çevrim sistemleri maliyetli olmasına rağmen yanma davranışının iyi bilinmediği alev kararsızlıklarının sönümlenmesinde oldukça başarılıdır. Uygulanan aktif kontrol yöntemleri ile basınç dalgalanmalarında belirgin düşüşler elde edilmiştir [123].



(a) Kapalı çevrim kontrol diyagramı



(b) Açık çevrim kontrol diyagramı

Şekil 2. 23. Kapalı ve açık çevrim aktif kontrol yöntemleri.

Yanma sistemlerinin modellenmesinde en büyük zorluklar, daimî olmayan ısı salınımı dinamiklerinin ve kararsızlığa neden olan mekanizmaların karakterize edilmesidir. Uygun basitleştirmeler yapılarak bu zorluklar anlaşılabilir ve modellenebilir duruma gelmektedir. Diğer bir engel ise alev-girdap etkileşimlerinin belirgin bir şekilde var olduğu türbülanslı şartlar altında alev dinamiklerinin incelenmesidir. Son yıllarda uygulanan aktif kontrol stratejileri önem kazanmakta ve yakıcılarda sıkça kullanılmaktadır. Kullanılan kontrol stratejilerinde esas amaç, basınç ve ısı salınımı dalgalanmaları arasındaki faz farkını artırmaktır. Faz farkının artırılması için de zaman geciktirici sistemlerin geliştirilmesine devam edilmektedir.

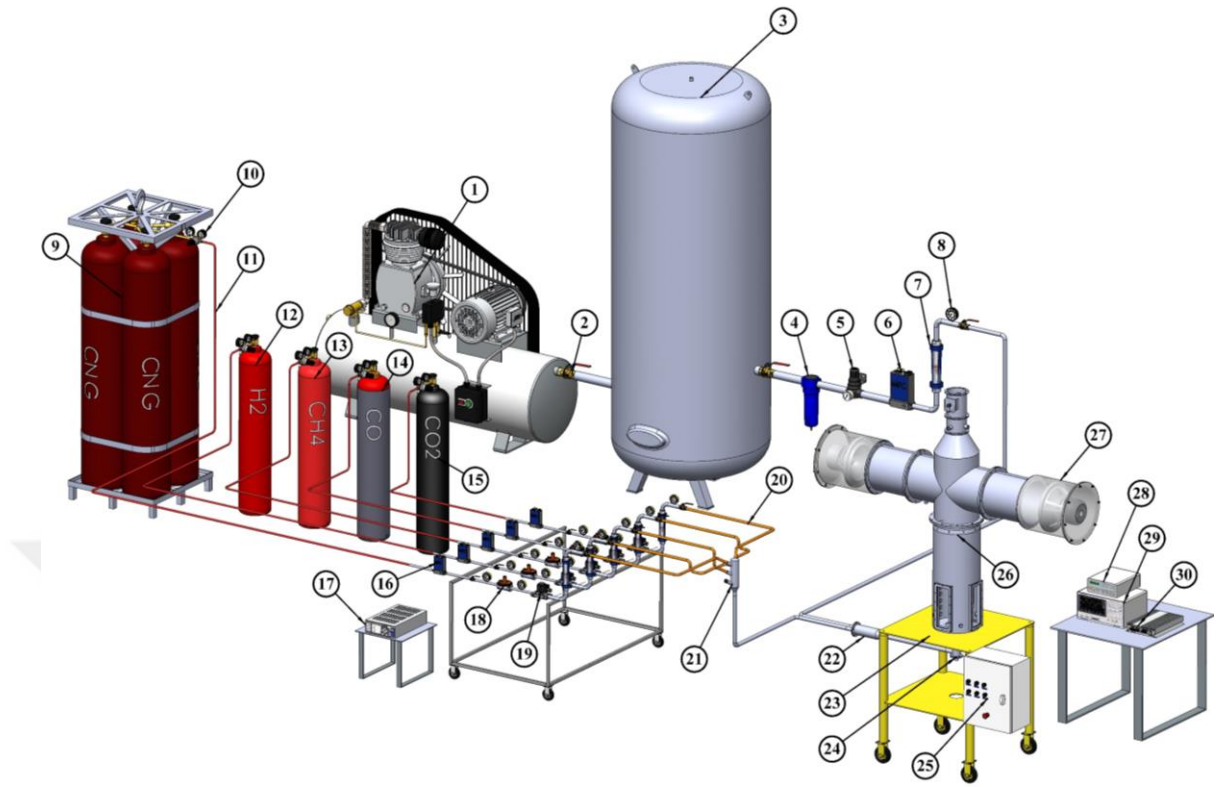
Aktif kontrol yöntemlerinin esas amacı yanma kararsızlıklarını sönmektir. Yanma kararsızlıklarının sönmeleriyle birlikte karşılaşılan diğer hususlar; tam yanmayı sağlamak, NO_x kirlenici emisyon oluşumunu azaltmak, alevlenebilirlik limitlerini genişletmek ve hacimsel ısı salınımı oranını artırmaktır. Bu çoklu performans kriterlerini gerçekleştirmek için bütün sistemin analiz ve sentezi yapılmalı ve yanma odasının çeşitli noktalarında bulunan değişken tip ve sayıda aktüatör doğru kullanılmalıdır [124]

3. BÖLÜM

DENEY SİSTEMİ

3.1. Giriş

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerin tamamı Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Yanma Laboratuvarında kurulu deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney sistemi; gaz besleme hattı, ön karışimli yakıcı, akustik yanma odası, ölçüm ekipmanları, belirsizlik analizi ve çalışma şartları konu başlıkları altında ayrıntılı olarak bu bölümde sunulmaya çalışılmıştır. Şekil 3.1.'de deney sisteminin 3 boyutlu şematığı gösterilmektedir. Şekil 3.2-3'de ise deney sisteminin sol-sağ yandan çekilmiş görüntüleri verilmiştir. Şekillerde gösterilen deney sistemi farklı gaz yakıtların istenilen kompozisyonlarda ve eşdeğerlik oranlarında karıştırılmasını sağlayacak şekilde bir gaz besleme hattına, ön karışimli ve girdap üreteçli bir yakıcıya, akustik zorlamanın etkilerinin incelenebileceği bir yanma odasına ve yanma kararsızlıklarının ölçülmesi için gerekli deney ekipmanlarına sahiptir.



Şekil 3. 1. Deney sisteminin şematik gösterimi.

Şekil 3.1'deki deney sisteminin elemanları:

- | | |
|---|--|
| 1. Hava kompresörü (5.5 Hp ve 500 lt) | 16. Yakıt hattı kütle akış kontrolcüsü (0-30 slpm) |
| 2. Küresel gaz vanası | 17. Vakum sistem kontrolcüsü (6 kanallı) |
| 3. Hava tankı (1 m ³) | 18. Emniyet kapatmalı, filtreli gaz regülatörü |
| 4. Hava hat filtresi | 19. Selenoid valf |
| 5. Hava regülatörü (0-1 MPa) | 20. Örgülü, esnek, metal gaz hortumu |
| 6. Hava hattı kütle akış kontrolcüsü (0-300 slpm) | 21. Yakıt kolektörü |
| 7. Şamandıralı debimetre | 22. Ön karıştırıcı (premixer) |
| 8. Manometre | 23. Taşıyıcı grup |
| 9. Sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) manifoldu (150 m ³) | 24. Ön karışimli yakıcı |
| 10. Çift kademeli özel gaz regülatörü (0-1.5 Bar) | 25. Kontrol paneli |
| 11. PVC gaz hortumu (8 mm ve 10 Bar) | 26. Akustik yanma odası |
| 12. Hidrojen (H ₂) tüpü | 27. Hoparlör |
| 13. Metan (CH ₄) tüpü | 28. Sinyal (fonksiyon) jeneratörü |
| 14. Karbon monoksit (CO) tüpü | 29. Osiloskop |
| 15. Karbon dioksit (CO ₂) tüpü | 30. Ses gücü amplifikatörü (yükseltici) |



Şekil 3. 2. Denev sistemi (sol yan).



Şekil 3. 3. Denev sistemi (sağ yan).

3.2. Gaz Temini

3.2.1. Hava Temini

Besleme hattına basınçlı hava tedariki kompresör yardımıyla sağlanmaktadır (Şekil 3.4). Kompresör, tek silindirli olup tahrikini üç fazlı elektrik motorundan almaktadır. 5.5 Hp (4 kW) güce sahip olan kompresör 650 lt/dk emiş kapasitesine sahiptir. Yanma sisteminde ihtiyaç duyulan hava debisi hesaplanarak kompresör gücü ve emiş kapasitesi belirlenmiştir. Kompresör 39 m³/saat hacimsel debide basınçlı havayı besleme hattına gönderebilecek kapasitededir.



Şekil 3. 4. Hava kompresörü.

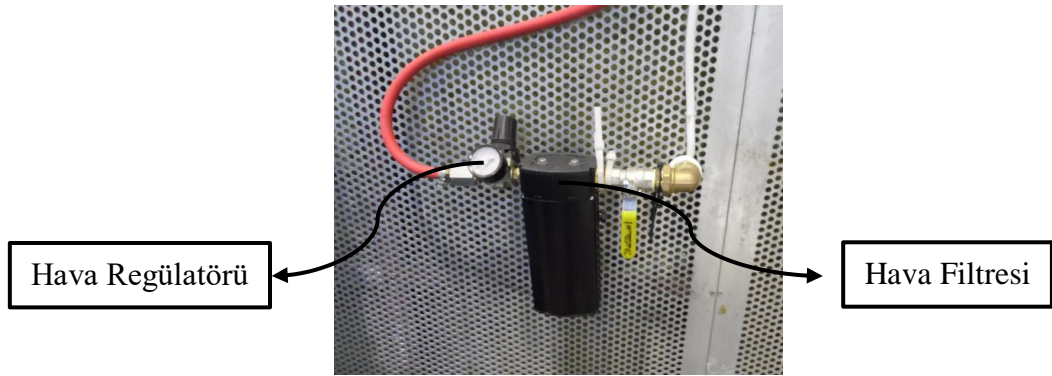
Kompresörün sesli çalışmasından dolayı ses yalıtımlı bir kompresör ünitesi yanma laboratuvarı dışarısına kurulmuştur. Ayrıca kompresörün sürekli çalışmamasını ve hava hattındaki basınç değişimlerinin sınırlı olmasını sağlamak için 500 lt dahili kompresör tankının yanında 1000 lt (1 m³) hacimde ek hava tankı kompresör ünitesine yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Böylece toplamda hava hattı depolama hacmi 1500 lt'ye (1.5 m³) çıkarılmıştır.



Şekil 3. 5. 1 m³ hacme sahip ek hava tankı.

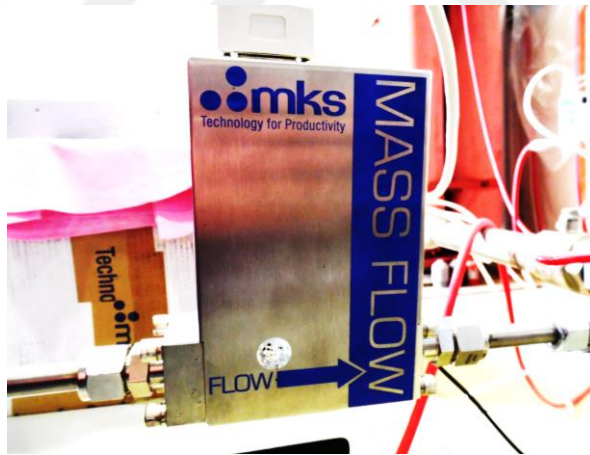
Kompresör ünitesinin güvenli çalışabileceği en yüksek basınç değeri 15 bar'dır. Hem kompresörün dahili tankına hem de ek hava tankına basınç göstergeleri ve emniyet ventilleri (tahliye) yerleştirilmiştir. Kompresör basınç şalteri 5 bar ile 10 bar basınç değerleri arasında çalışacak biçimde ayarlanmıştır. 10 bar basınçta depolanan hava miktarı, havanın ideal gaz olduğu varsayımı yapılırsa; $10 \times 1.5 = 15 \text{ m}^3$ olarak yaklaşık hesaplanabilir. Kompresörün çalışma basınç aralıkları arasında kullanılacak hava miktarı ise 7.5 m^3 'tür. Bu değer, yanma odasının ortalama şartlar altında kompresörün 1 saat süre çalışmadan deney sisteminin hava ihtiyacını karşılaması için yeterlidir.

Hava hattında bulunan kütle akış kontrolcüsünün kalibrasyonunun bozulmasını ve verimsiz çalışmasını önlemek amacıyla harici hava tankından sonra hat filtreleri veya hava kurutucuları kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan deney sisteminde dış ortamın hava kalitesi ile alakalı olarak istenmeyen bileşenlere (nem, kir, yağ) karşı basınçlı hava filtresi kullanılmıştır. Hava hattında kullanılan kütle akış kontrolcüsü (MKS 1579) istenilen akış debisini ön karıştırıcıya yüksek hassasiyette gönderebilmek için basınç farkını (40-49 psi) kullanmaktadır. Bu sebeple, hava filtresinden sonra 0-1 MPa aralığında çalışan bir hava regülatörü de hatta eklenmiş ve çalışma basıncı 3 Bar olarak ayarlanmıştır. Şekil 3.6'da hava filtresi ve regülatörü gösterilmektedir.



Şekil 3. 6. Hava regülatörü ve filtresi.

Hava hattında kullanılan kütle akış kontrolcüsü 300 slpm'e (standart litre/dakika) kadar akış sağlayabilen genel amaçlı bir debi kontrolcüsüdür. Kontrolcü 1 saniyeden kısa sürede istenilen debide akışı sağlamakta ayrıca akışkan sıcaklığına göre düzeltmeler yaparak herhangi bir kompanzasyon gerektirmemektedir. Kontrol aralığı tam kapasitesinin %2-100 (6-300 slpm) aralığında olup doğruluğu genel olarak $\pm\%1$ 'in altındadır. Şekil 3.7'de hava hattında kullanılan kütle akış kontrolcüsü gösterilmektedir.



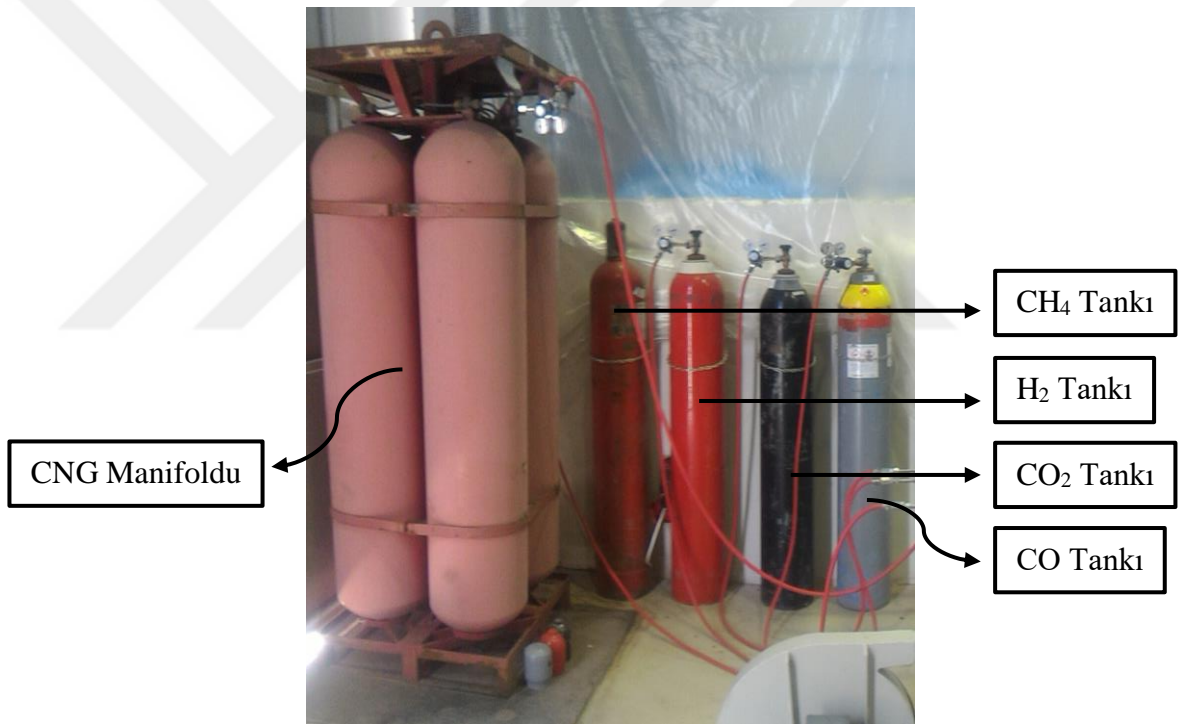
Şekil 3. 7. Hava hattı kütle akış kontrolcüsü.

Hava hattının son elemanı olan kütle akış kontrolcüsünde istenilen basınç ve debideki hava, yakıcının ön karıştırıcı kısmına esnek metal hortum yardımıyla aktarılmaktadır.

3.2.2. Yakıt Temini

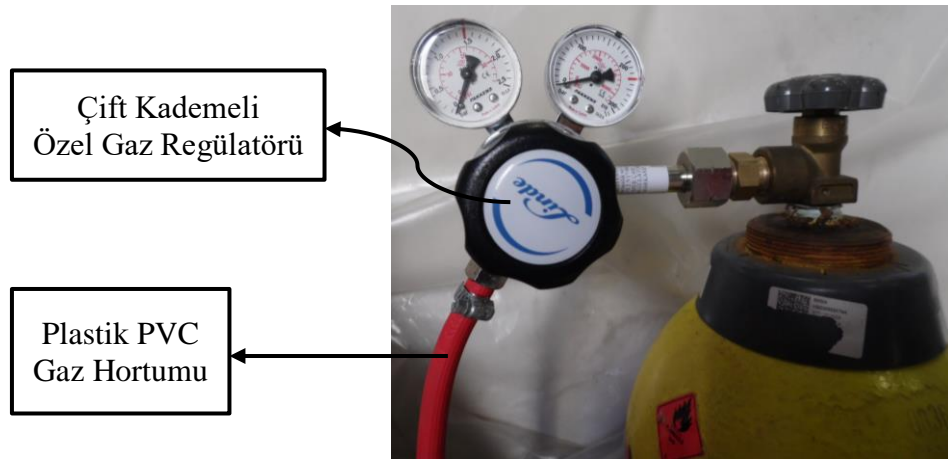
Deneyleerde kullanılacak farklı sentetik gaz yakıt karışımlarının yakıcıya gönderilmesi için iki farklı yol bulunmaktadır. Bunlardan ilki; farklı kompozisyonlardaki yakıt

karışımlarını ihtiva eden basınçlı tankların sipariş edilmesi yoluyla tedariki, diğeri ise; kullanılacak her bir yakıt bileşeninin yüksek saflıkta basınçlı tanklarda satın alınıp debi kontrolcöleri vasıtasıyla istenilen kompozisyonlarda yakıt karışımlarının oluşturulmasıdır. Her iki yöntemin zaman ve maliyet ilişkisi dikkate alınmış, ikinci yönteme uygun şekilde deney sisteminin oluşturulmasına karar verilmiştir. Bu amaçla; yüksek saflıkta H₂, CO, CO₂, CH₄ gazları basınçlı tanklarda tedarik edilmiştir. Ayrıca saf CH₄ gazının maliyetinin yüksek olması sebebiyle yapılan deneylerin büyük bir kısmında %90'dan fazla CH₄ içeriğine sahip sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) gazı 4 tüplü manifold (200 Bar, 150 m³) halinde kullanılmıştır. Şekil 3.8'de tedarik edilen yakıt tankları gösterilmektedir.



Şekil 3. 8. Tedarik edilen yakıtlar.

Yakıt tanklarındaki yüksek basınçlı (yaklaşık 200 bar) gazlar kütle akış kontrolcölerinin çalışabileceği basınç aralığına (10-40 psi) çift kademeli özel gaz regölatörler (0-1.5 bar) yardımıyla düşürülmüş ve yaklaşık 0.7 bar basınca düşürülen gaz yakıtlar plastik PVC basınca dayanıklı (maksimum 10 bar) gaz hortumları ile kütle akış kontrolcölerine aktarılmıştır. Şekil 3.9'da çift kademeli özel gaz regölatörü ve basınca dayanıklı gaz hortumu gösterilmektedir.

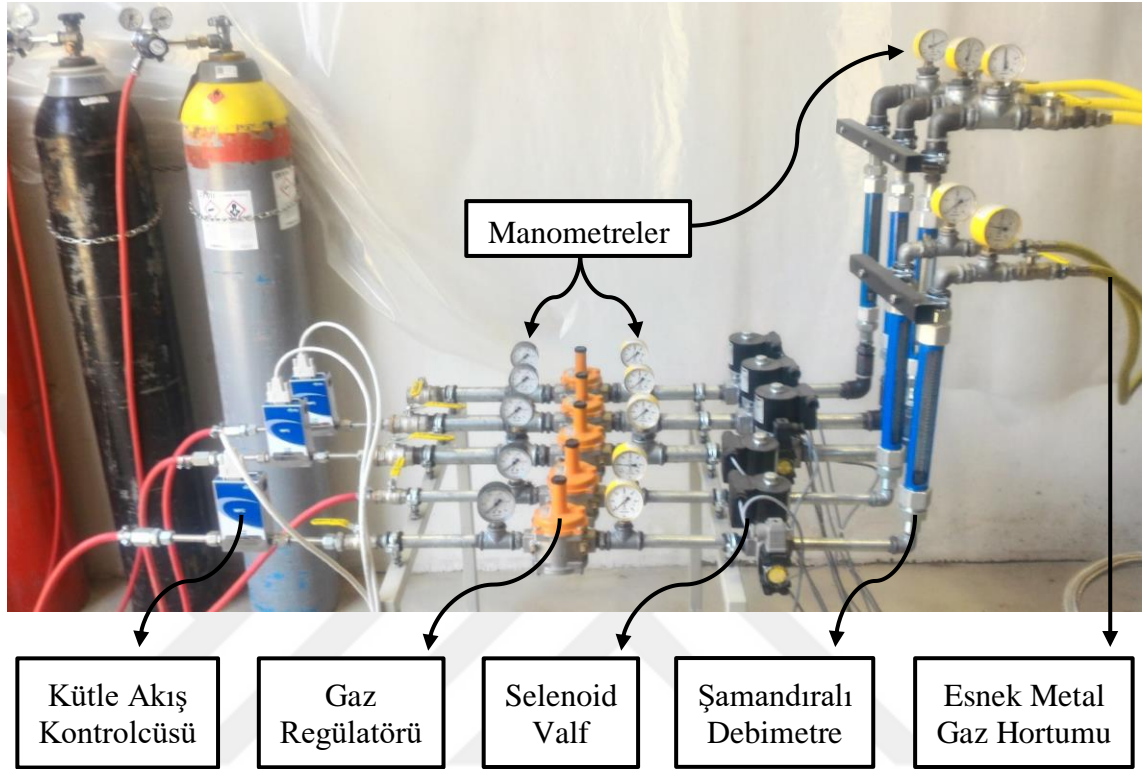


Şekil 3. 9. Çift kademeli özel gaz regülatörü.

Yakıt kanallarında kullanılan kütle akış kontrolcülerini, 600-30000 sccm (standart $\text{cm}^3/\text{dakika}$) veya diğeri bir ifade ile 0.6-30 slpm aralıklarında çalışmaktadır. Deney sisteminin yakıt hattı, 4 adet yakıt kütle akış kontrolcüsü ve 5 adet gaz yakıt kanalından oluşmaktadır. İleriki çalışmalarda (örneğin; N_2 seyreltmesi) kullanılmak üzere bir adet gaz yakıt kanalı fazladan ilave edilmiştir. Her bir gaz yakıt kanalında kütle akış kontrolcüsünde sonra ve yakıt kollektöründen önce vanalar (güvenlik amaçlı manuel olarak akış yönetimi için), emniyet kapatmalı ve filtreli gaz regülatörü (maksimum 1 bar giriş basıncını istenilen çıkış basıncına düşürmek ve çıkış basıncında meydana gelebilecek artışlarda akışı otomatik olarak keserek yanma sistemi güvenliği sağlamak için), bu gaz regülatörünün giriş ve çıkışlarında manometreler (gaz yakıtların basıncını gözle takip maksadıyla), Selenoid valf (iyonizasyon elektrotundan aldığı sinyal ile birlikte kontrol paneli tarafından elektromekanik olarak gaz akışını kontrol etmek amacıyla), şamandıralı debimetre (gaz akış debisinin takibi amacıyla) ve örgülü esnek metal gaz hortumu bulunmaktadır. Şekil 3.10'da yukarıda bahsedilen gaz akış kanallarında bulunan bileşenler gösterilmektedir.

Kütle akış kontrolcülerini, 6 kanallı bir vakum sistem kontrolcüsü tarafından yönetilmektedir. Kütle akış kontrolcülerinde istenilen debi miktarları eş zamanlı ve yüksek hassasiyetli olarak bu kontrol birimi ile ayarlanmaktadır. Vakum sistem kontrolcüsü (MKS 946), 320x240 TFT ekranı ve kullanışlı bir arayüze sahip olan bu kontrol birimiyle birlikte 6 adet gaz akışının anlık debileri takip edilebilmekte; ölçüm birimi, kalibre fonksiyonları, kullanıcı kalibrasyonu, PID (Oransal-integral-türevsel)

kontrol durumları ve ayar noktaları görüntülenebilmektedir. Şekil 3.11’de vakum sistem kontrolcüsü gösterilmektedir.



Şekil 3. 10. Gaz yakıt akış kanalları.



Şekil 3. 11. Vakum sistem kontrolcüsü.

Vakum sistem kontrolcüsünün kütle akış kontrolcülerini doğru bir şekilde kontrol edebilmesi için her bir gaz bileşenine uygun gaz düzeltme faktörlerinin bu kontrolcüye tanıtılması gerekmektedir. Tablo 3.1’de kullanılan gaz bileşenlerinin düzeltme katsayıları verilmiştir.

Tablo 3. 1. Kütle akış kontrolcülerini için gaz düzeltme faktörleri.

Gaz	Sembol	Özgül ısı (Cp, cal/g°C)	Yoğunluk (0°C, g/l)	Düzeltilme faktörü (k)
Hava	O ₂ + 3.76 N ₂	0.240	1.293	1.00
Hidrojen	H ₂	3.419	0.0899	1.01
Karbon Monoksit	CO	0.2488	1.250	1.00
Karbon Dioksit	CO ₂	0.2016	1.964	0.70
Metan	CH ₄	0.5328	0.715	0.72

Standart basınç: 760 torr (mmHg), Standart sıcaklık: 0°C

Gaz düzeltme faktörü (k), bir kütle akış kontrolcüsünden verilen bir çıkış voltajı için farklı gazların akış hızlarının oranını belirtmek için kullanılmaktadır. Üretici firma tarafından çalışma akışkanını azot (N₂) olarak kabul edilmiş ve gaz düzeltme faktörü $k_{N_2}=1.00$ olarak alınmıştır. Farklı bir gaz için kalibrasyonu yapılmış bir kütle akış kontrolcüsünün debisi, kullanılan gazın düzeltme faktörünün kütle akış kontrolcüsünün kalibre edildiği gazın düzeltme faktörüne bölünmesiyle elde edilen oranın vakum sistem kontrolcüsünde ölçülen akış debisi ile çarpımından hesaplanır. Örneğin; H₂ ($k_{H_2}=1.01$) gazı için kalibre edilmiş bir kütle akış kontrolcüsünde CO₂ gazı ($k_{CO_2}=0.70$) kullanıldığı ve vakum sistem kontrolcüsünde 1000 sccm debinin ölçüldüğü varsayalım. Bu durumda kütle akış kontrolcüsünden geçen gerçek CO₂ gazının debisi:

$$= \frac{k_{CO_2}}{k_{H_2}} \times 1000 \text{ sccm} = \frac{0.70}{1.01} \times 1000 \text{ sccm} = 693.069 \text{ sccm} \text{ olacaktır.}$$

Eğer CO₂ gazı yerine argon ($k_{Ar}=1.39$) gazı kullanılmış olsaydı, bu durumda kütle akış kontrolcüsünden geçen gerçek Ar gazının debisi:

$$= \frac{k_{Ar}}{k_{H_2}} \times 1000 \text{ sccm} = \frac{1.39}{1.01} \times 1000 \text{ sccm} = 1376.237 \text{ sccm} \text{ olacaktır.}$$

Deney sisteminde kullanılan şamandıralı debimetreler ise hava debimetreleridir ve değişken alan prensibine göre akış ölçümleri tüp üzerindeki skaladan yapılmaktadır. Gaz akışkan debimetrenin alt kısmından girmekte üst kısmında çıkmakta ve böylece şamandırayı derecelendirilmiş tüpün bir seviyesinde tutmaktadır. Doğalgaz veya sentetik gazlar gibi içeriğindeki bileşenlerin % miktarı değişen ve bu sebepten dolayı yoğunluğu değişen yakıtların uygun gaz düzeltmeleri yapılmalıdır. Aksi takdirde debimetreden direk olarak ölçülen akış miktarları ve ısıl güç hesaplamalarında hata oluşmaktadır. Bu sebepten aşağıda verilen gaz düzeltme faktörü denklemleri [125-127] kullanılarak hesaplamalar yapılmalıdır.

$$\text{Özgül Ağırlık (Specific Gravity, SG)} = \frac{\rho_{\text{Çalışma akışkanı}}}{\rho_{\text{Kalibrasyon akışkanı}}} \quad (3.1)$$

Eğer çalışma akışkanı farklı gaz bileşenlerinin karışımından oluşuyorsa;

$$SG = \frac{\%A \times \rho_A + \%B \times \rho_B + \%C \times \rho_C \dots}{\rho_{\text{Kalibrasyon akışkanı}}} \quad (3.2)$$

denklemleri ile hesaplanır.

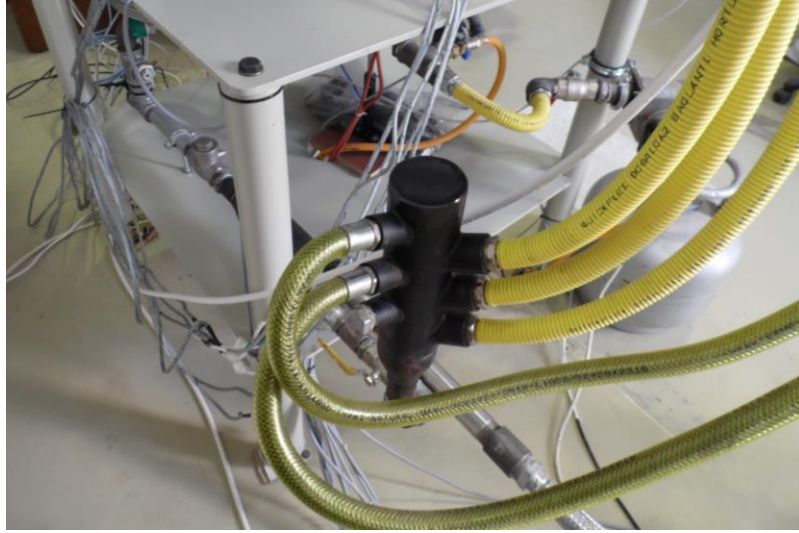
$$Q_{\text{Çalışma akışkanı}} = k \times Q_{\text{Kalibrasyon akışkanı}} \quad (3.3)$$

Denklemler 3.3'te Q ifadesi debiyi göstermektedir. k , gaz düzeltme faktörü:

$$k = \sqrt{\frac{1}{SG}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{Kalibrasyon akışkanı}}}{\rho_{\text{Çalışma akışkanı}}}} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir.

Yakıt kütle akış kontrolcülere vasıtasıyla gaz akışları kontrol edilen sentetik gaz bileşenleri, istenilen debi ve basınçta gaz kanallarından yakıt kollektörüne gönderilir. Yakıt kollektörü yakıt temin hattının son elemanıdır (Şekil 3.12) ve burada elde edilen sentetik gaz, hava ile karışarak homojen bir karışım elde etmek üzere ön karıştırıcıya gönderilir.



Şekil 3. 12. Yakıt kollektörü.

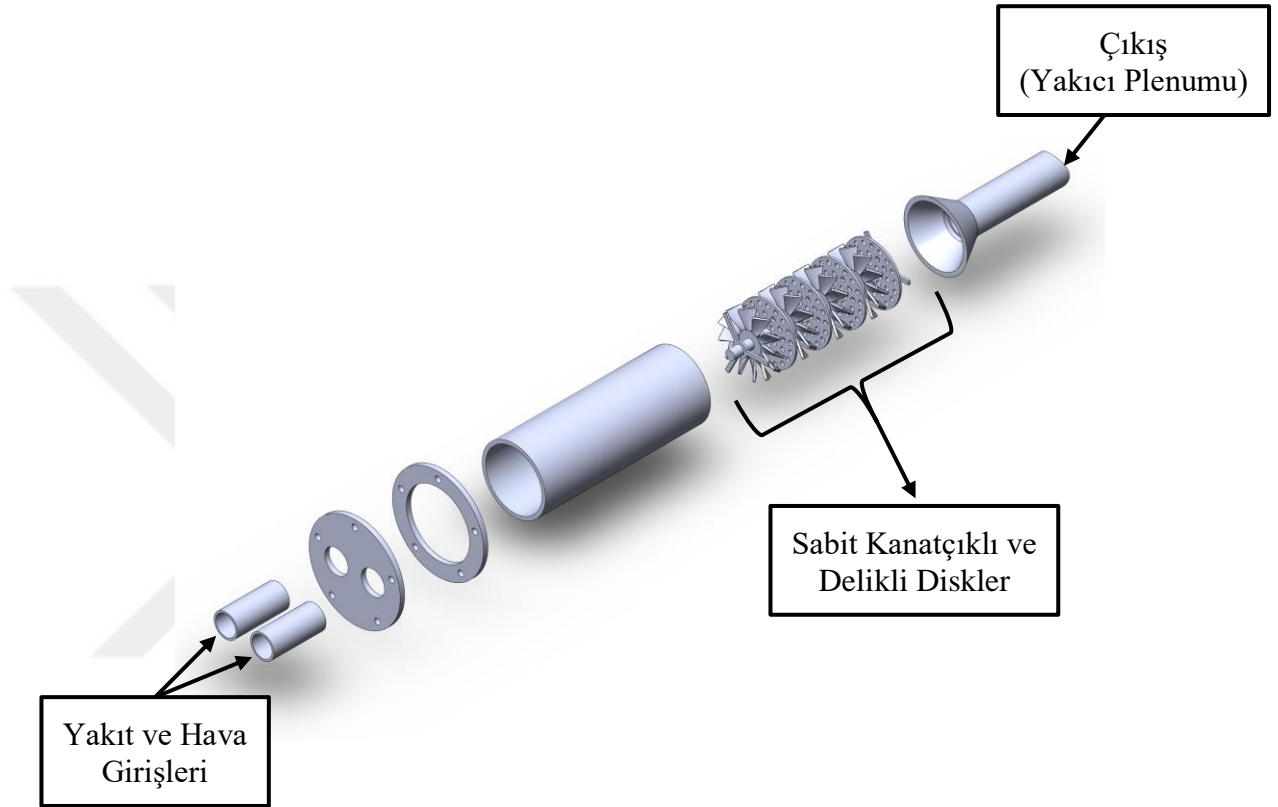
3.3. Önkarişımılı ve Girdap Üreteçli Yakıcı

3.3.1. Ön Karıştırıcı

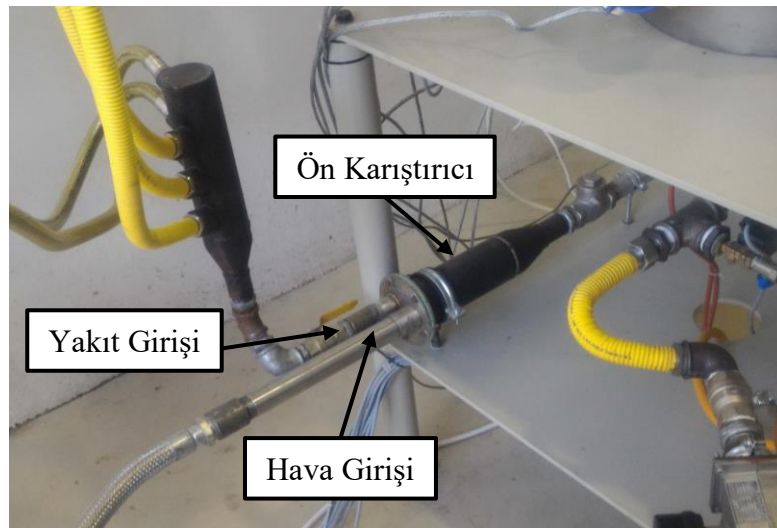
Yakıt/hava karışımının homojenliğini artırmak NO_x emisyonlarının azalmasına, yanma verimliliğinin artmasına, yakıcı boyutlarının küçülmesine, yanma kararsızlıklarının elimine edilmesine ve yakıcı komponentlerinin ömrünün uzamasına katkı sağlayabilir [128]. Bu amaçla birçok araştırmacı yakıt hava karışımının moleküler seviyede homojenliğe sahip olması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [128-132]. Bu yöntemler pasif ve aktif yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif yöntemler küçük veya büyük ölçekte girdap ve türbülans üreten, akış alanına yerleştirilen yapılardan oluşmaktayken aktif yöntemlerde yakıt hava akışı aktif olarak kontrol edilerek daha iyi bir karışım elde edilmektedir. Pasif yöntemler daha basit sistemlerdir ve sistem normal koşullarda çalışırken etkindir ancak hızlı geçici ve tasarım dışı durumlarda düşük performans sağlamaktadır. Aktif yöntemler ise tasarım dışı çalışma koşullarında da kararlı yanma performansını sağlamakta, ancak daha maliyetli ve sistem bileşenleri oldukça karmaşıktır.

Kurulan deney düzeneğinde kullanılan ön karıştırıcı pasif yöntemler ile oluşturulmuş ve yakıcı öncesi akış alanına yerleştirilmiştir. Yakıt ve hava ön karıştırıcıya iki farklı kanaldan girmekte ve ön karıştırıcının içindeki sabit kanatçıklı ve delikli disklerden geçerek yakıcının plenum odasına yatay olarak dolmaktadır. Şekil 3.13'de ön

karıştırıcının 3 boyutlu modeli demonte halde gösterilmektedir. Ön karıştırıcı, Yılmaz et al. tarafından termo-akustik eşleşmelerin tespiti için yapılan çalışmalarda kullanılan deney sisteminden yararlanılarak tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir [49]. Şekil 3.14'de imal edilen ön karıştırıcı gösterilmektedir.



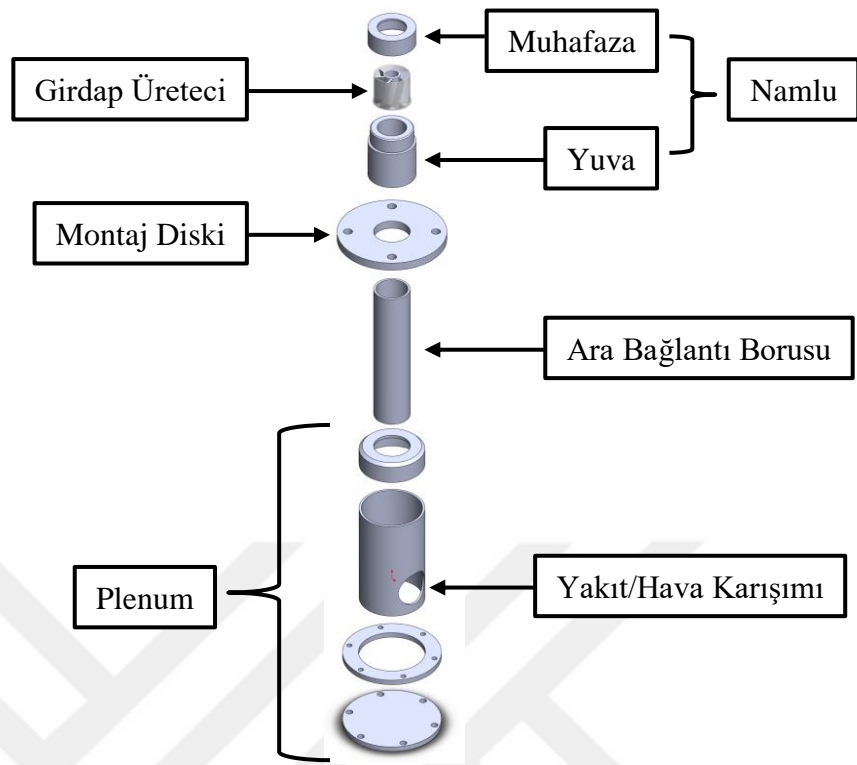
Şekil 3. 13. Ön karıştırıcının demonte katı modeli.



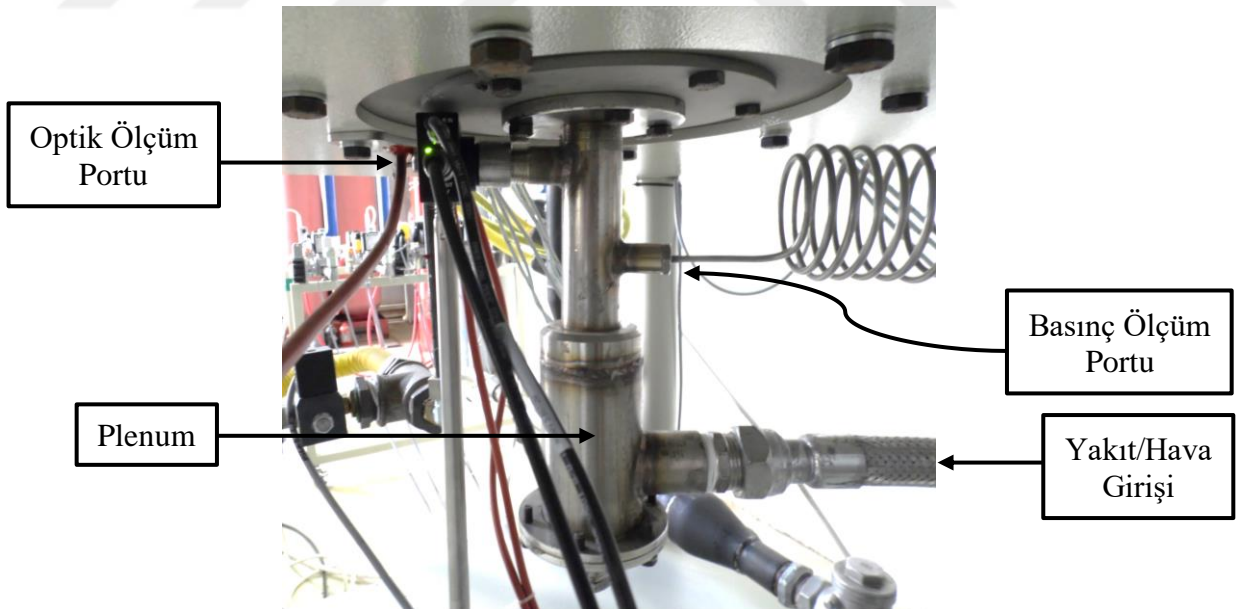
Şekil 3. 14. İmal edilen ön karıştırıcı.

3.3.2. Yakıcı

Yakıcı, yakıt ile havanın en uygun oranda karışmasını sağlayarak tam yakılmasını sağlayan elemandır. Bilinen gaz yakıcıları, içeriğinin büyük bir bölümü CH₄ gazından oluşan doğalgazı yakabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sentez veya sentetik gaz olarak bilinen gaz yakıtları ise ağırlıklı olarak H₂, CO ve CO₂ gazlarını içermektedir. Sentetik gazlar doğalgaza kıyasla farklı ısı değere, yoğunluğa ve alev davranışına sahiptir. Sentetik gaz yakıtları yakabilecek yakıcının yakıt/hava kesitleri ve diğer parametreleri günümüz mevcut yakıcılarında olduğu şekli ile kullanılamamaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmada sentetik gazları ön karışimli olarak yakabilecek şekilde yeni bir yakıcının tasarlanması gerekmektedir. Bu amaçla, yakıcı tasarımında hava/yakıt kesitlerinin belirlenmesi, girdap üreticinin kanat ve açılarının ayarlanması ve homojen bir karışım elde edebilmek için bir ön karıştırıcı kısmının ilave edilmesi ile yanma ve emisyon performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen yakıcı girdap üreteçli ve ön karışimli bir yakıcıdır. Yakıcı 10 kW'a kadar ısı gücü altında çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. Fakat bu tez kapsamında yapılan deneylerde yakıcı gücü 3 kW olarak sabit tutulmuş, yakıcı gücünün etkisi incelenmemiştir. Şekil 3.15'de yakıcının katı modeli patlatılmış görünümde gösterilmektedir. Yakıcının bütün parçaları kolay bir şekilde sökülebilir ve demonte edilebilir yapıda tasarlanmıştır. Yakıcının üst kısmında girdap üretici için yuva ve bu yuvanın muhafazası sağlayacak yapı (namlu) mevcuttur. Ayrıca gerekli ölçümlerin yapılabilmesi için yakıcı gövdesinde birer adet optik ve basınç ölçüm yuvaları konulmuştur. Şekil 3.16'da imal edilen yakıcı gösterilmektedir.



Şekil 3. 15. Yakıcının patlatılmış görünümü.



Şekil 3. 16. İmal edilen yakıcı.

3.3.3. Girdap Üreteçleri

CO gibi kirletici gazları düşük seviyede tutarak NO_x emisyonlarını azaltmaya çalışmak beraberinde zorlukları getirmektedir. Gaz türbinlerinde kullanılan fakir eşdeğerlik oranlarında reaktantların yanma odasında ön karışımli bir şekilde gönderilmesi bu sorunu çözmek için kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Ön karışımli yanmada birçok avantaj elde edilmesine rağmen yanma dinamiklerinde problemler ortaya çıkmaktadır. Çünkü fakir ön karışımli yanma sistemlerinde akış yanma bozukluklarına karşı çok hassastır. Özellikle alev sönmesi limitlerinde akış dalgalanmaları, alev geri tepmesi ve sönmesi gözlemlenebilir [133].

Birçok ön karışımli yakıcıda alevin kararlı hale getirilmesi için girdap üreteçleri kullanılmaktadır. Girdap üreteçlerinin kullanılmasında ana hedef yakıt hava karışımını iyileştirmek ve böylece daha kararlı bir alev elde etmektir. Girdaplı akışların derecesini karakterize etmek için sık olarak kullanılan yöntem “girdap sayısı” terimidir.

Girdap sayısı terimini ilk olarak Beer ve Chigier [134, 135] tarafından denklem 3.5-3.7’de gösterilen bağıntılar ile öne sürmüştür [136].

$$\text{Girdap Sayısı } (S) = \frac{\sigma R}{2B} \left[1 - \left(\frac{R_h}{R} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

$$\sigma = \frac{\tan(\alpha)}{(1-\psi)[1+\tan(\alpha)\tan(\pi/z)]} \quad (3.6)$$

$$\psi = \frac{zt}{2\pi R_1 \cos(\alpha)} \quad (3.7)$$

Denklemlerde gösterilen z , kanatçık sayısını; t , kanatçık kalınlığını; B , kanatçık boyunu; R_1 , yakıcı eksenini ile kanatçık arası mesafeyi; R , boru dış çapını; R_h , boru iç çapını ve α , kanatçıkların açısını ifade etmektedir.

Sheen et al., 1996 yılında girdap sayıları üzerinde yaptıkları çalışmada bu bağıntıda düzenlemeler yaparak basitleştirmişler [137]. Boyutsuz bir sayı olan girdap sayısı teğetsel momentumun aksenal akışının (G_θ), aksenal momentumun aksenal akışına (G_x) oranı ile ifade edilmiştir (Denklem 3.8).

$$S = \frac{G_\theta}{RG_x} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de R, yakıcı yarıçapını ifade etmektedir.

$$G_{\theta} = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr \quad (3.9)$$

$$G_x = \int_0^R U^2 \rho 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr \quad (3.10)$$

Denklem 3.9-10'da U , W , p ve r sırasıyla aksel ve teğetsel hız bileşenlerini, statik basıncı ve radyal koordinatı ifade etmektedir. Statik basınç terimi teğetsel hız bileşeni tarafından yaklaşık olarak ifade edilirse;

$$G_x = 2\pi \int_0^R \rho r \left(U^2 - \frac{1}{2} W^2 \right) dr \quad (3.11)$$

elde edilir.

Denklem 3.9 ve 3.11, denklem 3.8'de yerine yazılırsa:

$$S = \frac{\int_0^R r^2 U W dr}{R \int_0^R r [U^2 - (1/2)W^2] dr} \quad (3.12)$$

elde edilir. Statik basıncın girdap üretici geometrisine aşırı derecede bağlı olmasından dolayı denklem 3.10'daki basınç integrali ihmal edilerek girdap sayısı ifadesi basitleştirilmiş olur. Basitleştirilmiş girdap sayısı ifadesi;

$$S = \frac{\int_0^R U W r^2 dr}{R \int_0^R U^2 r dr} \quad (3.13)$$

elde edilir.

Denklem 3.14'de Feyz et al. tarafından kullanılan bir diğer basitleştirilmiş girdap sayısı ifadesi gösterilmektedir [138].

$$S = \frac{2}{3} \cdot \tan(\alpha) \frac{1-R^3}{1-R^2 + \left[m^2 \left(\frac{1}{R^2} - 1 \right) \right] R^2} \quad (3.14)$$

Denklem 3.14'de R, girdap üretcinin iç halka çapının dış halka çapına oranını (d_h/d_o) ve m, girdaplı kısmın girdapsız kısma olan oranını ifade etmektedir. Bir diğer basitleştirilmiş ve sık olarak kullanılan girdap sayısı ifadesi ise denklem 3.15'de gösterilmektedir [139].

$$S = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{d_h}{d_o}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_h}{d_o}\right)^2} \right] \cdot \tan(\alpha) \quad (3.15)$$

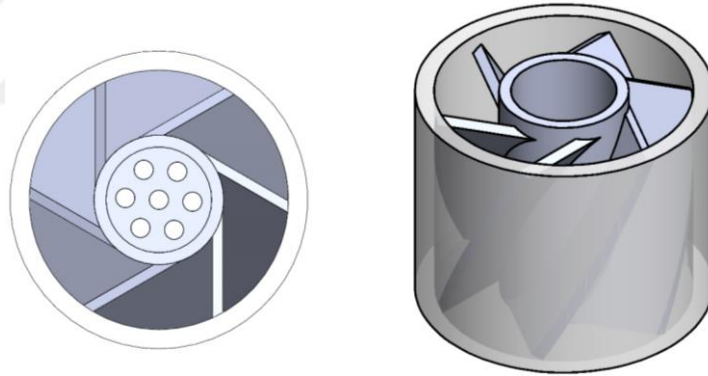
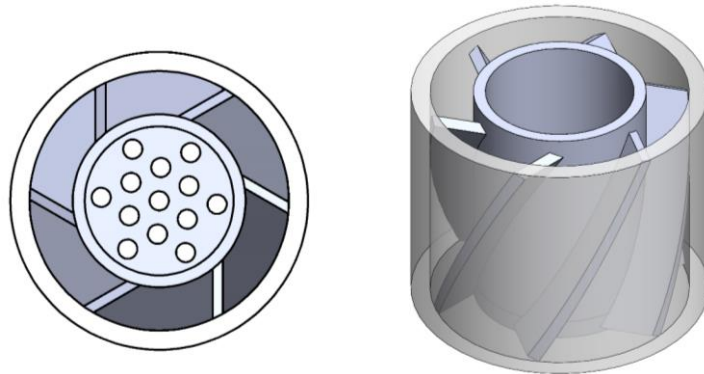
Burada d_h , aksenal akışın olduğu iç halkanın çapını; d_o , girdap üreticinin dış çapını ve α ise kanatçıkların açısını ifade etmektedir [140]. Ayrıca bu pratik ifade başka araştırmacılar tarafından da sıkça tercih edilmiştir [141-144].

Beer ve Chigier [135], akışları zayıf ($S < 0.6$) ve güçlü ($S > 0.6$) girdaplı akış olmak üzere iki kategoriye ayırmıştır [145]. Zayıf girdaplı akışta aksenal basınç gradyanları iç resirkülasyon bölgeleri oluşturmak için yeterli değildir. Bu akış tiplerinde girdaplar, karıştırma oranının artmasına ve jet hızının azalmasına neden olur. Güçlü girdaplı akışlarda ise jet eksenini boyunca oluşan ters basınç gradyanları akış alanında bir resirkülasyon bölgesi oluşturur.

Bu çalışmada kullanılan deney sistemi iki farklı çap oranında ($d_h/d_o = 0.33$ ve 0.50) girdap üreticileri imal edilmiştir. İmal edilen girdap üreticilerinin çap ölçüleri ve oranları, kanatçık açısı (α), kanatçık sayısı (z), kanatçık kalınlığı (t) ve kanatçık boyu (B) bilgileri tablo 3.2'de gösterilmektedir. $d_h/d_o = 0.50$ çap oranına sahip girdap üreticileri $S=0.2$ ile $S=1.6$ arasında 0.2 aralıklar ile toplamda 8 adet üretilmiştir. $d_h/d_o = 0.33$ çap oranına sahip girdap üreticileri ise $S=0.4$ ile $S=1.4$ arasında 0.2 aralıklar ile toplamda 6 adet üretilmiştir. Girdap üreticilerinin dış çapı sabit tutulmuştur. Kanatçık sayısı (z) her bir girdap üretici için 6 adettir. Kanatçık kalınlıkları (t) ise 1.2 mm'dir. Şekil 3.17'de Girdap üreticilerinden $S=0.4$ 'ün farklı d_h/d_o oranlarında katı modelleri gösterilmektedir. Şekil 3.18'de ise imal edilen girdap üreticilerinin bazıları gösterilmiştir.

Tablo 3. 2. İmal edilen girdap üreteçlerinin geometrik değerleri.

Girdap sayısı (S)	Çap oranı (d_h/d_o)	İç çap mm, (d_h)	Dış çap mm, (d_o)	Kanatçık açısı (α)
0.2	0.50	13.5	27	14.42°
0.4	0.50	13.5	27	27.21°
0.6	0.50	13.5	27	37.64°
0.8	0.50	13.5	27	45.80°
1.0	0.50	13.5	27	52.12°
1.2	0.50	13.5	27	57.05°
1.4	0.50	13.5	27	60.94°
1.6	0.50	13.5	27	64.07°
0.4	0.33	18	27	25.34°
0.6	0.33	18	27	35.39°
0.8	0.33	18	27	43.45°
1.0	0.33	18	27	49.82°
1.2	0.33	18	27	54.86°
1.4	0.33	18	27	58.90°

S=0.4, $d_h/d_o=0.33$ S=0.4, $d_h/d_o=0.50$

Şekil 3. 17. Girdap üreteçlerinin izometrik ve üstten görünüşü.



Şekil 3. 18. İmal edilen girdap üreteçleri.

3.3.4. Ateşleme ve İyonizasyon Sistemi

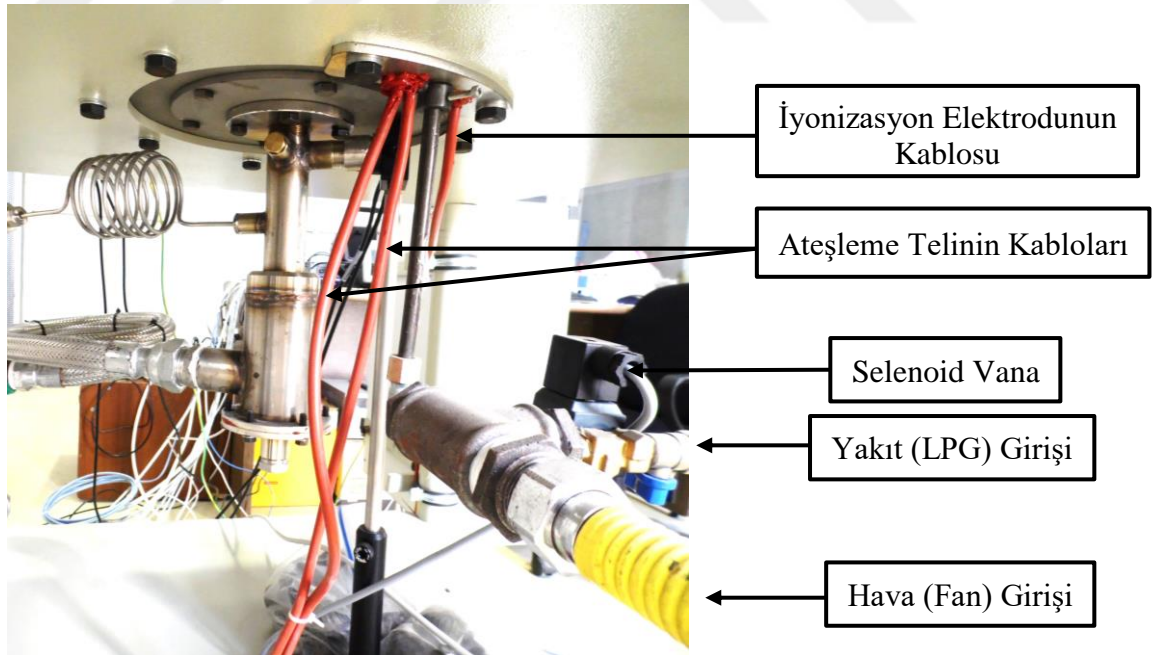
Ateşleme ve iyonizasyon sistemi yakıcıda meydana gelen yanmayı ve alevi kontrol etmek için tasarlanmıştır. Kontrol paneline yerleştirilen Siemens marka yakıcı kontrolcüsü (LME41-054C2 modeli) iyonizasyon çubuğunu kontrol ederek yakıcının devreye alınmasını ve denetlenmesini üstlenir. Şekil 3.19'da kontrol paneli gösterilmektedir. Yakıcı kontrolcüsüyle birlikte Selenoid valfler kontrol edilmekte yanma sisteminin güvenliği sağlanmaktadır. Ayrıca kontrol panelinin kapağına yerleştirilen şalterler ile pilot ateşleme hattı kontrol edilmektedir. Kontrol panelinin alt kısmına yerleştirilen şalterler gaz akışlarını kontrol etmek için yerleştirilmiştir. Bu şalterlerin üst kısmında bulunan şalterlerde yanma sistemini başlatmak, ateşleme sistemini devreye almak ve herhangi bir arıza durumunda kontrolcü beynini sıfırlamak için kullanılmaktadır. Kontrol panelinin en üst kısmında bulunan kırmızı renkli uyarı sinyalleri ise hangi hatta arızanın meydana geldiğini göstermek amaçlı kullanılmıştır.

Pilot ateşleme için yakıt 12 kg'lık LPG tüpüyle, hava ise BDRAS 85-40 alüminyum gövdeli salyangoz tip fanla hava beslemesi yapılmıştır. Ayrıca LPG tüpü akış hattına

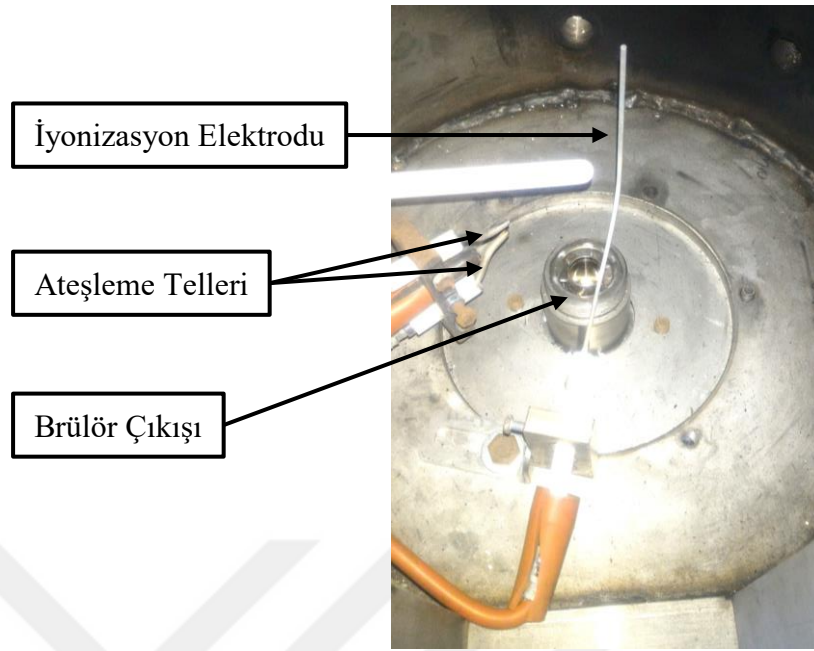
konulan TORK marka selenoid vanayla akış kontrol edilmiştir. Şekil 3.20-21’de pilot ateşleme hattı ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 3. 19. Kontrol paneli iç kısmı (sol) ve kapağı (sağ).



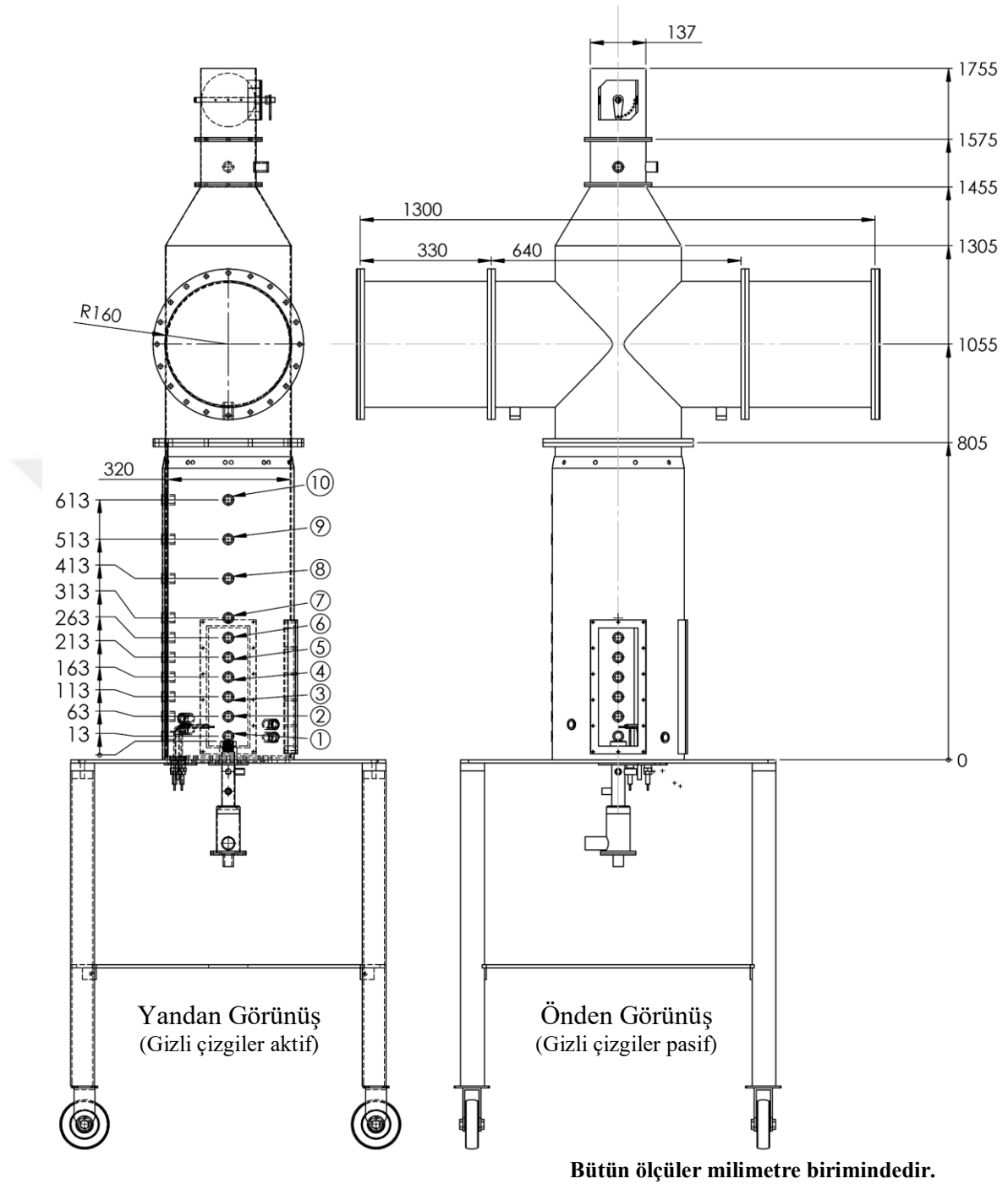
Şekil 3. 20. Pilot ateşleme hattı (alt).



Şekil 3. 21. Pilot ateşleme hattı (üst).

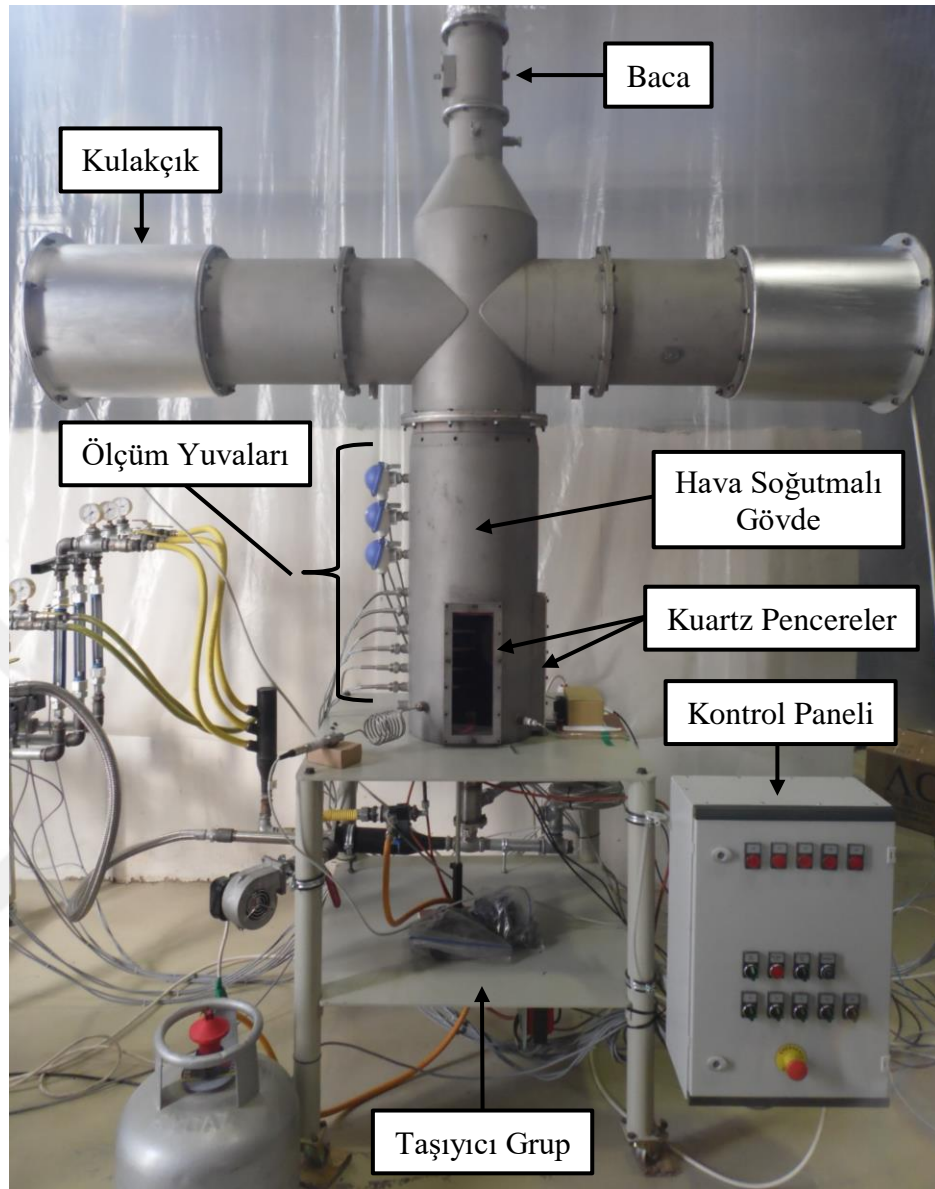
3.2. Akustik Yanma Odası

Akustik yanma odası bütün bileşenleri paslanmaz çelikten imal edilmiş ve 1755 mm yüksekliğe, 320 mm iç çapa ve kulakçıklarla birlikte 2100 mm kol genişliğe sahiptir. Şekil 3.22'de akustik yanma odasının şematik görünümü verilmiştir. Somun cıvata bağlantılarına sahip olan yanma odası çok parçalı bir gövdeye sahiptir. Böylece gelecekte yapılması muhtemel modifikasyonlar daha az sürede ve uygun maliyetle uygulanabilir bir hale gelmiştir. Gövde parçaları silindirik kesit alanına sahiptir ve yanmanın görsel takibi için akustik yanma odasının iki cephesinde 300 mm boyunda 100 mm genişliğinde kuartz pencereler yerleştirilmiştir. Ayrıca kuartz pencereler sayesinde yakıcı ve yanma odası bileşenlerine kolaylıkla müdahale edilebilmektedir. Yanma odası gövdesinin aşırı ısınmasını önlemek amacıyla yanma odasının ilk 805 mm'lik kısmı 330 mm çapında ikinci bir silindirik gövde ile kaplanmış, bu iki gövde arasına salyangoz tipi bir fan ile hava gönderilerek soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Akustik yanma odası, 1090 mm yüksekliğe ve 800x800 mm kare kesite sahip bir tekerlekli taşıyıcı grup üstüne monte edilmiş ve hareket esnekliği kazandırılmıştır.



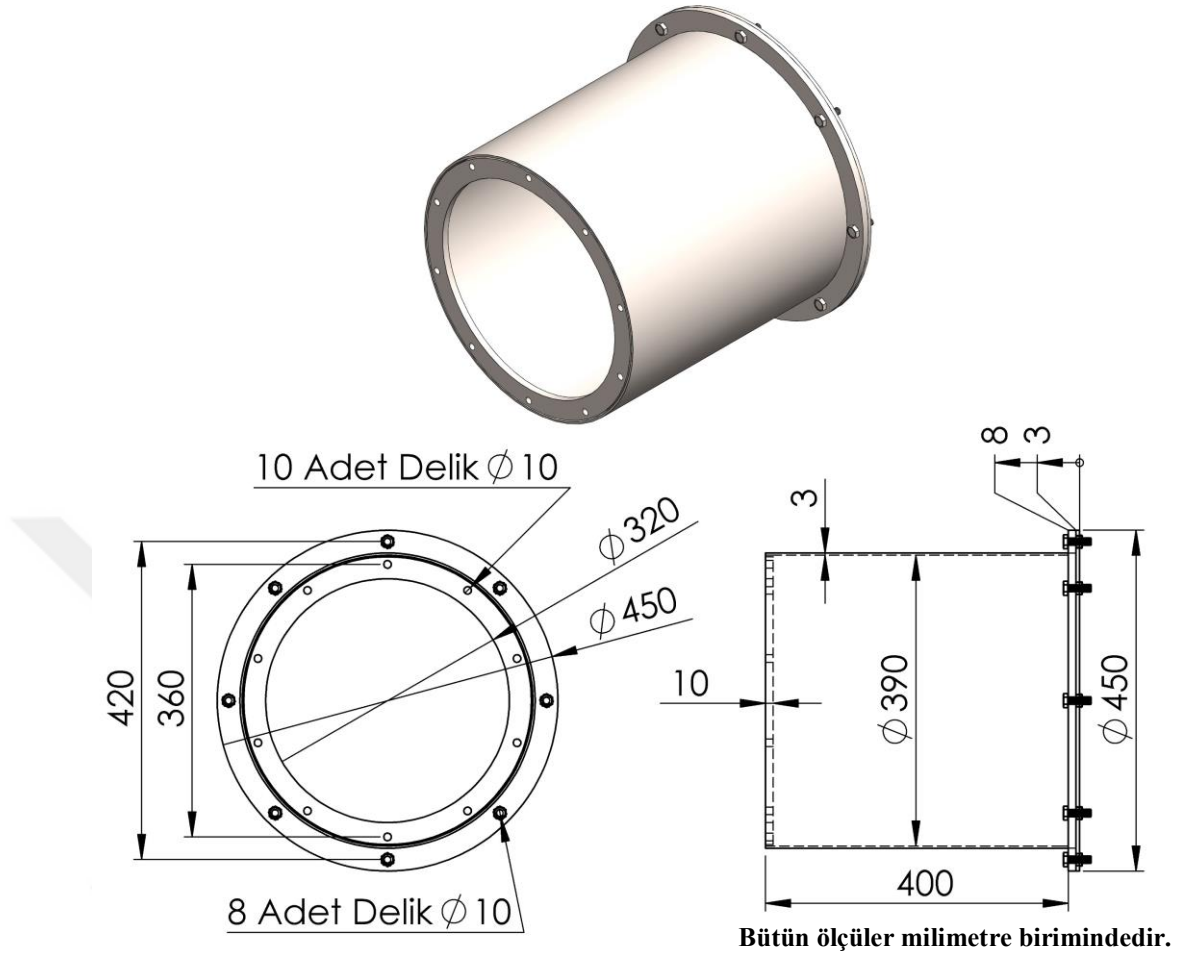
Şekil 3. 22. Yanma odasının şematik görünümü.

Yanma odasının diğer iki cephesinde ise sıcaklık, emisyon ve basınç ölçümlerini gerçekleştirmek için ½ inç çapında ölçüm yuvaları oluşturulmuştur. Her cephede 10'ar adet ölçüm yuvası belirli mesafe aralıklar ile yerleştirilmiştir. Şekil 3.22'de yandan görünüşte emisyon ve sıcaklık ölçüm portları ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Şekil 3.23'de ise imal edilmiş akustik yanma odası gösterilmektedir.



Şekil 3. 23. Akustik yanma odası.

Yanma odası kolları akustik zorlamada kullanılacak hoparlörlerin yerleştirilmesi için tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yanma odası kollarına hem hoparlörlerin montajını kolaylaştırmak hem de yanma esnasında hoparlörlerin aşırı sıcaktan zarar görmesini önlemek amacıyla kulakçıklar yerleştirilmiştir. Şekil 3.24'de kulakçıkların teknik resimleri ve katı modeli gösterilmektedir. Kulakçıkların dış kapaklarına hoparlörler pullu ve somunlu saplama vidalar ile sabitlenmiştir. Dış kapak üzerinde açılan deliklerden ise hoparlör kablolarının bağlantısı sağlanmıştır.



Şekil 3. 24. Kulakçığın izometrik katı modeli.

Hoparlörler elektrik sinyallerini ses (basınç) dalgalarına dönüştüren aygıtlardır. Ayrıca hoparlörler akustik aktüatörler olarak da kullanılmaktadır. Akustik yanma odasında alevi farklı frekanslarda zorlayarak termo-akustik salınımları oluşturmak için 1400 W maksimum çıkış gücüne sahip, nominal gücü 400 W (her bobin için 200 W) olan 2 adet hoparlör (Pioneer marka TS-W311D4 serisi) yanma odası kulakçıklarına monte edilmiştir. Hoparlörler 12.875 inç (30.48 cm) çapa, 6.625 inç (169 mm) genişliğe, 4 ohm empedansa (bağlantı şekline göre 2 veya 8 ohm olabilmektedir.), 95 dB hassasiyete (kendisine aktarılan enerjinin ne oranda ses dalgalarına dönüştüğünü gösterir.) ve iki adet alüminyum bobine sahiptir. Hoparlörlerin efektif çalışma aralığı 20-125 Hz'leri arasındadır. Şekil 3.25'de hoparlörler ve kulakçık kapağına saplama vidalar ile sabitlenmiş halleri gösterilmektedir.



(a) Önden görünüşü



(b) Arkadan görünüşü



(c) Kapağa sabitlenmiş hali



(d) Monte edilmiş hali

Şekil 3. 25. Hoparlör ve yanma odasına monte edilmiş hali.

Hoparlörler vasıtasıyla akustik yanma odasına sabit güçte ve farklı frekanslar sinüzoidal ses dalgaları gönderilerek termo-akustik yanma kararsızlıkları tetiklenmiş, sentetik gaz alevlerinin bu kararsızlıklara karşı tepkisi incelenmiştir. Sinüzoidal sinyaller fonksiyon (sinyal) jeneratörü (UNI-T, UTD9005C serisi) vasıtasıyla üretilmiştir. Çalışmada kullanılan sinyal jeneratörü 0.5 Hz ile 5 MHz arası sinyal çıkışı verebilecek özelliktedir. Sinüs, kare, üçgen, rampa, darbe ve TTL (transistor-transistor logic) sinyalleri üretilebilmektedir. Tepeden tepeye maksimum çıkış voltajı 20 V'dur. Tez çalışmasında, fonksiyon jeneratörüyle sabit 5 V genlikte ve farklı frekanslarda sinüzoidal dalgalar oluşturularak termo-akustik zorlama deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.26'da fonksiyon jeneratörü gösterilmektedir.



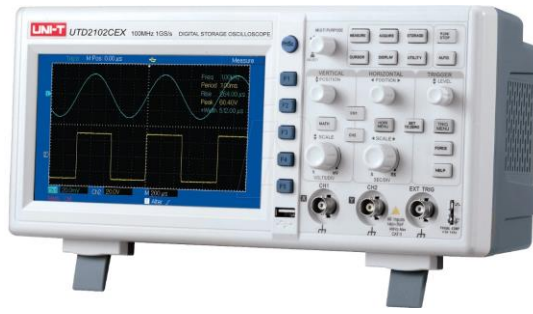
Şekil 3. 26. Fonksiyon jeneratörü.

Fonksiyon jeneratöründen alınan sinüs sinyallerinin hoparlörlerden istenilen güçte ses çıkışı verebilmesi için kuvvetlendirici (amplifikatör) yardımıyla yükseltilmesi gerekmektedir. Kuvvetlendiriciler girişte uygulanan sinyallerin (akım/voltaj/güç) yükseltilmesinde kullanılan elektronik cihazlardır. Deney sisteminde kullanılan kuvvetlendirici (Behringer Europower, EP4000 serisi) 2 kanallı bir güç amplifikatörüdür. Bağlantı yapısına bağlı olarak 4000 W çıkış gücü verebilen kuvvetlendirici 20 Hz ile 20 kHz frekans aralığında çalışmaktadır. Şekil 3.27’de kullanılan kuvvetlendirici verilmiştir.



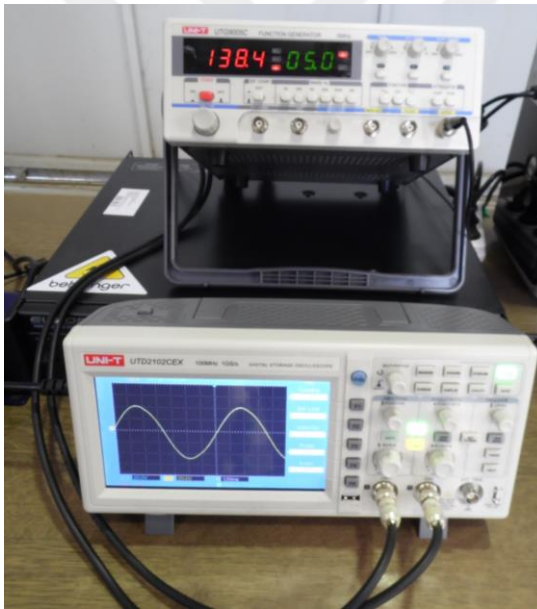
Şekil 3. 27. Kuvvetlendirici.

Hoparlörlere gönderilen sinüzoidal ses sinyallerinde faz farkı olması durumunda oluşacak basınç dalgalanmaları homojen olmayacaktır. Bu sebeple kuvvetlendirici çıkışlarındaki ses sinyalleri dijital bir osiloskop (UNI-T, UTD2102CEX serisi) yardımıyla incelenmiş ve her bir hoparlöre giden ses sinyalleri arasındaki faz farkları takip edilmiştir. Ayrıca yanma odasına yerleştirilen dinamik basınç ölçüm sensörü ile hoparlör çıkışları takip edilmiştir. Şekil 3.28’de deneylerde kullanılan osiloskop verilmiştir.



Şekil 3. 28. Osiloskop.

Sinüzoidal ses sinyallerinin üretilmesi ve güçlendirilmesinde kullanılan fonksiyon jeneratörü, güç amplifikatörü ve osiloskobun deney düzeneğinde bağlantısı yapılmış halinin ön ve arka kısmından görüntüleri Şekil 3.29’da gösterilmektedir.



(a) Önden kısmı



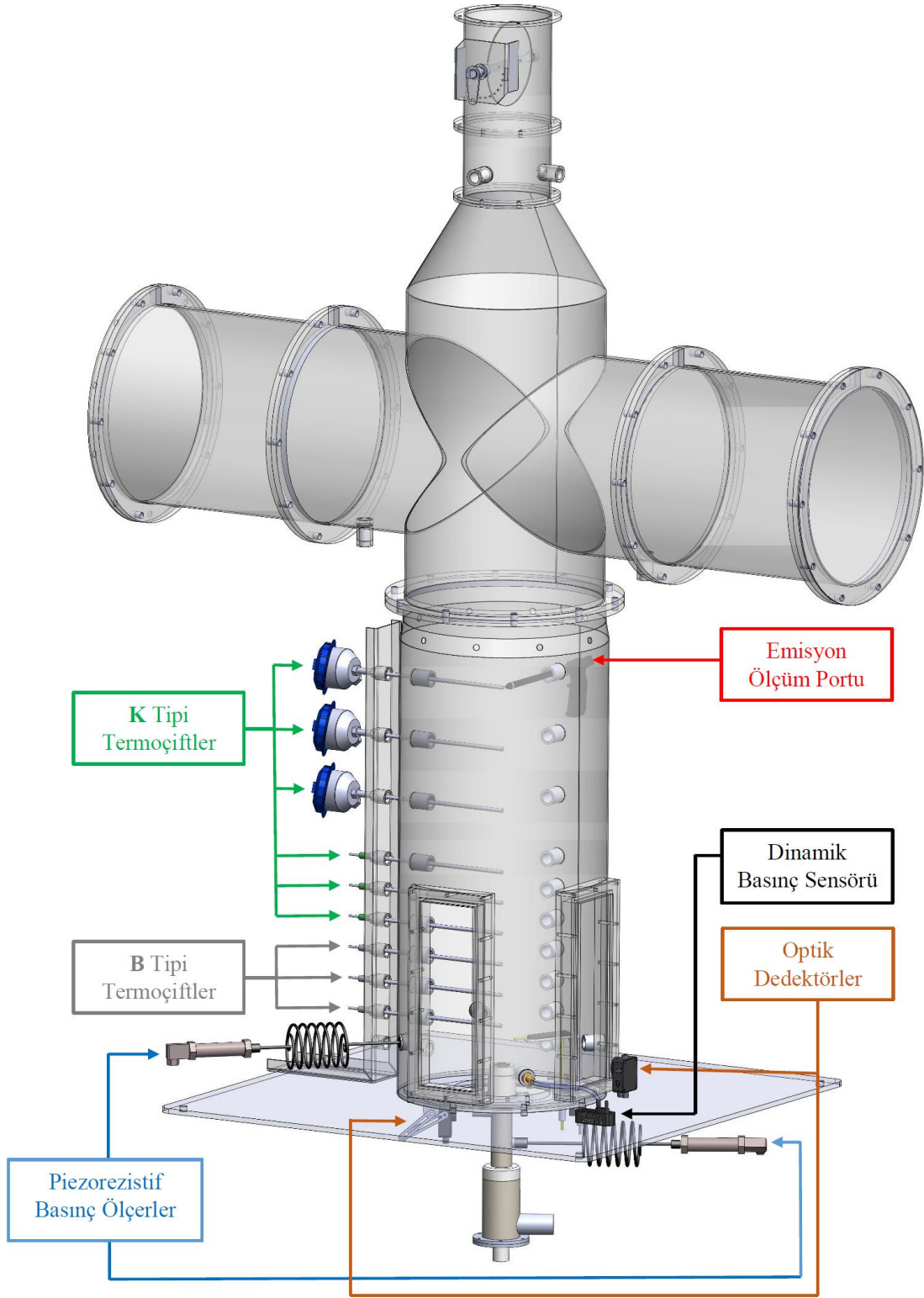
(b) Arka kısmı

Şekil 3. 29. Fonksiyon jeneratörü, güç kuvvetlendiricisi ve osiloskop.

3.5. Deney Ölçüm Ekipmanları

Deney sistemi ölçüm ekipmanları Şekil 3.30’da gösterilmektedir. Deney sisteminde sıcaklık, basınç, ışık şiddeti ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler veri toplayıcıları (Expert Key, EK200L serisi) sayesinde bilgisayara aktarılmış ve elde edilen ölçüm değerleri ise veri toplayıcısı üreticisi tarafından ücretsiz sunulan yazılımlar

(ProfiSignal Go ve Data Service Configurator) ile işlenerek anlamlı görsellere dönüştürülmüştür.



Şekil 3. 30. Deneş düzeneği ölçüm ekipmanları.

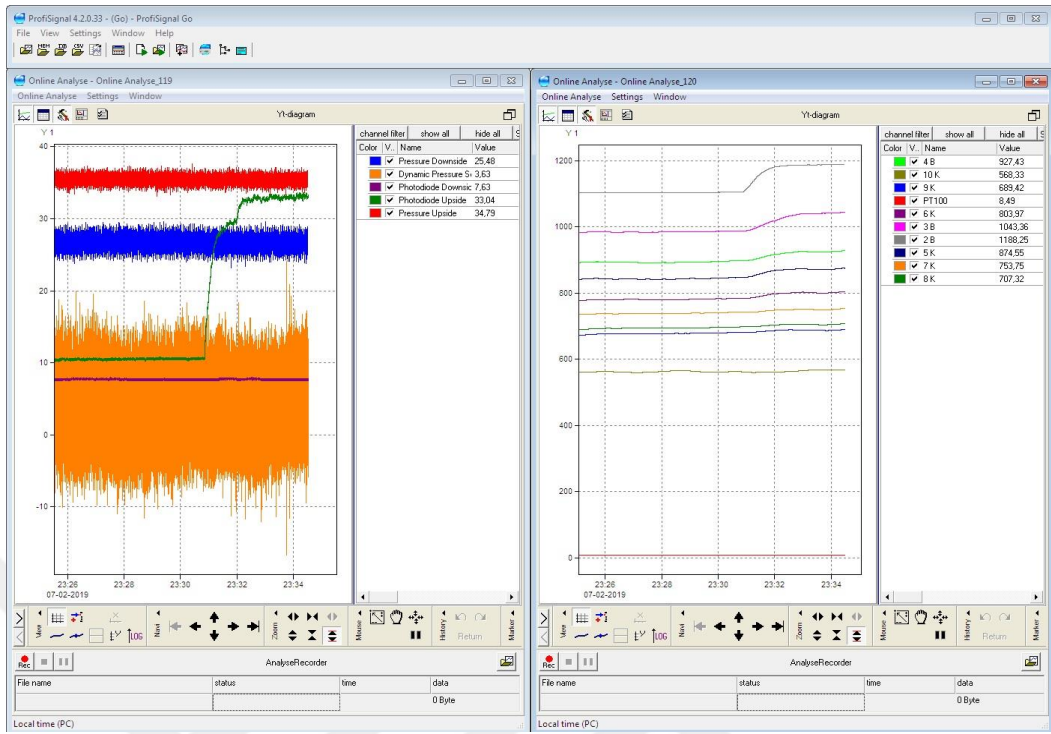
Veri toplayıcılarının her biri 29 adet giriş (28 adet analog ve 1 adet dijital) ve 3 adet çıkış (2 adet analog ve 1 adet dijital) olmak üzere toplamda 32 izoleli kanala sahiptir. Ayrıca veri toplayıcıları sıcaklık kompanzasyonlu, yüksek hassasiyetli (18 bit çözünürlük) ve cihazların maksimum örnekleme hızı 100 kHz'dir. Veri toplayıcılarına yapılan her bir ölçüm ekipmanı bağlantısı örnekleme sıklığını azaltmaktadır. Bu sebeple sıcaklık ölçümleri bir veri toplayıcısına, ışık şiddeti ve basınç ölçümleri ise diğer veri toplayıcısına bağlanmış, örnekleme sıklığı yüksek ölçümler yapılmıştır. Ölçüm ekipmanlarının seçiminde de örnekleme sıklıkları dikkatlice araştırılmış ve böylece analizlerde elde edilen grafikler daha hassas bir şekilde oluşturulmuştur. Şekil 3.31'de veri toplayıcıları ve kullanılan yazılımın arayüzü gösterilmektedir.



(a) Sıcaklık verileri için



(b) Işık şiddeti ve basınç verileri için



(c) Yazılımın kullanıcı arayüzü

Şekil 3. 31. Veri toplayıcıları ve yazılım arayüzü.

3.5.1. Sıcaklık Ölçümü

Sıcaklık ölçümlerinden iki çeşit termočift tedarik kullanılmıştır. Alev bölgesindeki sıcaklık ölçümleri için yüksek sıcaklık aralığında ölçüm yapan 3 adet B tipi termočift (0-1800 °C, Pt%18Rh-Pt) Şekil 3.22’de gösterilen 2, 3 ve 4 numaralı ölçüm yuvalarında kullanılmıştır. Alev bölgesinden uzaktaki ölçüm yuvalarına ise B tipi termočiftlere göre daha düşük sıcaklıklarda ve ölçüm yapan 6 adet K tipi termočift (-200-1200 °C, NiCr-Ni) Şekil 3.22’de gösterilen 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 numaralı ölçüm yuvalarında kullanılmıştır. Termočiftler özel olarak üretilmiş; 20 cm boya, seramik kılıfa ve B tipi için 0.8 mm K tipi için ise 0.7 mm tel çaplarına sahiptir. Şekil 3.32’de deneylerde kullanılan termočiftler gösterilmiştir.



(a) K tipi termočift

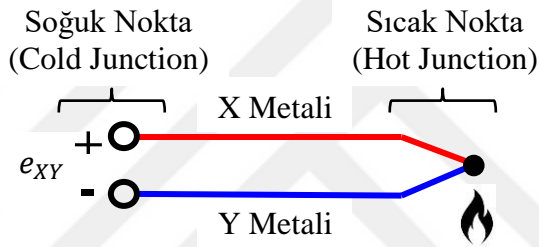


(b) B tipi termoçift

Şekil 3. 32. Termoçiftler.

3.5.1.1. Sıcaklık Ölçüm Hatalarının Düzeltilmesi

Termoçift, iki farklı metalin uçlarının birleştirilmesi sonucu oluşturulan bir termometredir. Metallerin birleştirilen kısmına sıcak nokta (hot junction), açık uçlarına ise referans/soğuk nokta (reference/cold junction) ismi verilmektedir (şekil 3.33).



Şekil 3. 33. Termoçiftin yapısı.

Sıcak noktanın ölçümü yapılacak akışkan ile teması sonucunda sıcaklık değişimiyle birlikte uçlar arasında bir gerilim (mV mertebesinde) meydana gelir. Ölçümü yapılacak sıcaklık ile bu gerilim değeri orantılıdır. Termoçiftler, kabul edilebilir aralıklarda hassasiyete ve uygun maliyete sahip olmalarından dolayı sanayi uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır [146]. Fakat gaz akışı içine yerleştirilen termometrelerde radyasyon kayıplarından kaynaklı ölçüm hataları oluşmaktadır. Radyasyon kayıplarının dışında ölçüm probundan duvara doğru ısı iletimi kayıpları da bulunmaktadır. Gerçek gaz sıcaklığının ölçülmesi için iki farklı yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden ilki gerçek gaz sıcaklığını ölçen termometrelerin tasarımı, diğeri ise hatalı sıcaklık ölçümlerinde hata miktarının tespit edilmesidir [147]. Bu tez çalışmasında ikinci yöntem kullanılmıştır. Termoçiftin sıcak noktası, kontrol hacmi olarak dikkate alınır, ısıl denge denklem 3.16'daki haliyle basitçe ifade edilebilir.

$$\dot{Q}_{Taşınım} + \dot{Q}_{İletim} + \dot{Q}_{Işınım} = 0 \quad (3.16)$$

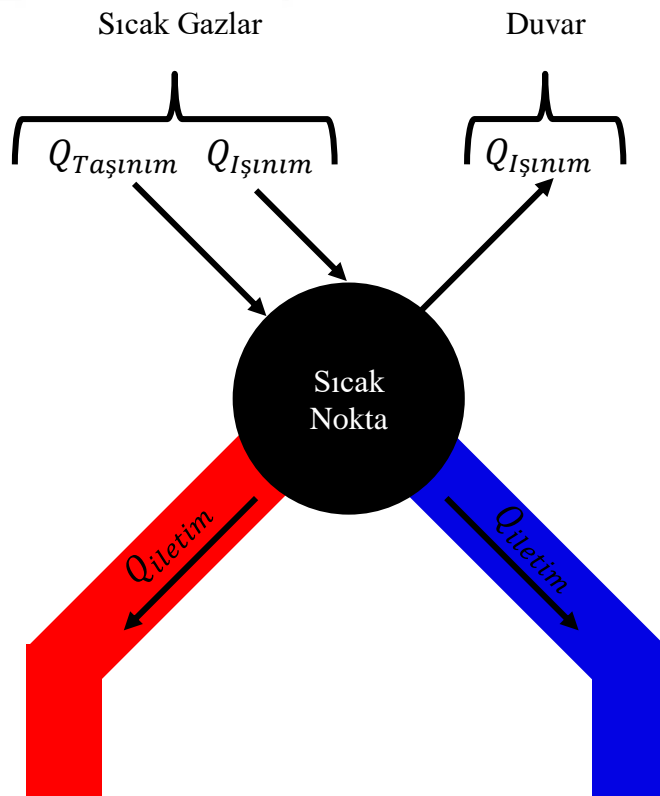
Termoçiftin sıcak gazlar tarafından taşınım yolu ile ısındığı kabul edilir. Ayrıca termoçift, iletimle (metal teller yoluyla) ve ışınlama (çevresine) ısı transferi sonucu ısı kaybedebilir. Bir termoçiftin sıcak noktasında gerçekleşen ısı transferi şekil 3.34’de gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği gibi sıcak gazlardan hem ışınlama hem de taşınım yoluyla ısı transferi olmaktadır. Telden iki farklı ısı kaybı gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi duvara ışınlama yoluyla, ikincisi ise telden iletim yoluyla gerçekleşen ısı kaybıdır. Böylece ısı denge denklem 3.17’de olduğu şekliyle ifade edilmektedir.

$$[\dot{Q}_{Taşınım} + \dot{Q}_{Işınım (Sıcak Gaz)}]_{girenler} = [\dot{Q}_{İletim} + \dot{Q}_{Işınım (Duvar)}]_{çıkanlar} \quad (3.17)$$

Sıcak gazın yayıcılığı çok düşük olduğu için $\dot{Q}_{Işınım (Sıcak Gaz)}$ ihmal edilebilir [126] ve ısı denge bu durumda denklem 3.18-19’da olduğu şekliyle ifade edilir [148, 149].

$$[\dot{Q}_{Taşınım}]_{girenler} = [\dot{Q}_{İletim} + \dot{Q}_{Işınım (Duvar)}]_{çıkanlar} \quad (3.18)$$

$$h(T_{Gaz} - T_{Tel}) = \left(\frac{k_{Tel} A_{Kesit}}{L A_{Yüzey}} \right) \Delta T - \sigma \varepsilon_{Tel} (T_{Tel}^4 - T_{Duvar}^4) \quad (3.19)$$



Şekil 3. 34. Sıcak noktada gerçekleşen ısı transferi dengesi.

Denklemden T_{Gaz} sıcaklığı çekilirse denklem 3.20 elde edilir.

$$T_{Gaz} = T_{Tel} + \frac{\left(\frac{k_{Tel} A_{Kesit}}{L A_{Yüzey}}\right) \Delta T - \sigma \varepsilon_{Tel} (T_{Tel}^4 - T_{Duvar}^4)}{h} \quad (3.20)$$

T_{Gaz} , ölçülmek istenen gerçek gaz sıcaklığını (K); T_{Tel} , termočift tarafından ölçülen sıcaklığını (K); k_{Tel} , ısı iletim katsayısını $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$; A_{Kesit} , telin kesit alanını (m^2); L , tel uzunluğunu (m); $A_{Yüzey}$, ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanını (m^2); ΔT , sıcaklık farkını (K); σ , Stefan-Boltzman sabitini $\left(5.67 \cdot 10^8 \frac{W}{m^2 K^4}\right)$; ε_{Tel} , telin yayıcılığını; T_{Duvar} , duvar sıcaklığını (K) ve h , taşınım ile ısı transfer katsayısını $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$ ifade etmektedir.

\dot{Q}_{iletim} 'in ihmal edilebilmesi için tel uzunluğunun tel çapına oranı 1000'den fazla olması gerektiği çalışmalarda belirtilmiştir [126, 150]. Bu tez çalışmasında kullanılan termočiftlerin uzunluğu 20 cm, çapları ise 0.8 mm ve 0.7 mm'dir. Bu sebeple tez çalışmasında yapılan sıcaklık düzeltmelerinde iletim ile ısı kayıpları ihmal edilmemesi gerekmektedir. Fakat termočiftlerin gaz akışına dikey pozisyonda konumlandırılması iletim etkilerini azaltmaktadır. Bu sebeple, yapılan hesaplamalarda iletim etkileri ihmal edilmiş, gerçek gaz sıcaklığı denklem 3.21'de gösterilen haline sadeleştirilmiştir [151].

$$T_{Gaz} = T_{Tel} + \frac{\sigma \varepsilon_{Tel} (T_{Tel}^4 - T_{Duvar}^4)}{h} \quad (3.21)$$

Telin yayıcılığı ve taşınım ile ısı transfer katsayısını hesaplayabilmek için iteratif yöntemler ve formüller kullanılmaktadır. Denklem 3.21'e göre yapılan sıcaklık düzeltmeleri EK-1'de sunulmuştur.

3.5.2. Basınç Ölçümü

Yanma kararsızlıkları sonucunda akustik yanma odasında gözlemlenen değişikliklerden birisi de basınç dalgalanmalarıdır. Kararsızlıkların başlaması, gelişmesi ve sınır döngüye ulaşması esnasında ses dalgalarının yanma odası ve alev ile etkileşimi sonucu oluşan basınç dalgalanmalarının tespitinde basınç ölçüm cihazları kullanılmıştır. Ayrıca bu kararsızlıkların alev statiklerinde (alev sönmesi veya geri tepmesi) değişiklik meydana getirmesi sırasında yanma odası duvarlarında meydana gelen basıncın ölçümü önem arz etmektedir. Bu amaçla 2 adet 0-10 bar arası ölçüm yapabilen piezorezistif basınç ölçer

(yanma odası ve yakıcı duvarına) ile 1 adet ± 2.5 inç H_2O ($\pm 622.72 Pa$) ölçüm aralığına sahip dinamik basınç sensörü (yanma odasına) yerleştirilmiştir.

3.5.2.1. Piezorezistif Basınç Ölçerler

Akustik yanma odası ve yakıcı içerisinde olmak üzere iki adet basınç ölçer (Keller marka, PR23 serisi) yerleştirilmiştir. Ölçüm aralığı 0-10 bar olan basınç ölçer ile hem yanma basıncı hem de alev geri tepmesi veya sönmesi durumunda oluşacak basınç ölçülmüştür. Şekil 3.35'de piezorezistif basınç sensörünün yanma odası ve yakıcıya yerleştirilmiş halleri gösterilmiştir. Basınç sensörü ile ölçüm yuvası arasında kullanılan spiral borunun amacı yüksek sıcaklığın sensöre zarar vermesini önlemektir. Ayrıca, ölçüm aralığı yüksek olan basınç sensörlerinin ölçüm hassasiyetleri düşüktür. Bu amaçla yanma odasındaki basınç dalgalanmaları ölçmek için hassas basınç ölçerler kullanılmalıdır.



(a) Yanma odasına yerleştirilmiş sensör

(b) Yakıcıya yerleştirilmiş sensör

Şekil 3. 35. Piezorezistif basınç ölçerler.

3.5.2.2. Dinamik Basınç Sensörü

Günümüz yanma odaları kapalı ve kompleks bileşenlerden oluşmaktadır. Bu nedenle yanma sonucu ortaya çıkan ses dalgalarının alev ile etkileşimi sonucu yanma kararsızlıkları oluşabilmektedir. Bilhassa yanma kararsızlıklarının başlangıcını ve gelişimini takip edebilmek için hassas basınç ölçüm cihazlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışmasında akustik zorlama altında basınç dalgalanmalarının takibi için ± 2.5 inç H_2O ($\pm 622.72 Pa$) basınç aralığında ölçüm yapabilen bir dinamik basınç ölçüm cihazı (Honeywell markası, 163PC01D75 serisi) kullanılmıştır (Şekil 3.36).

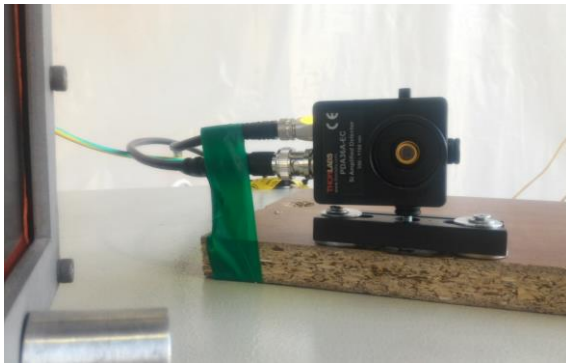


(a) Ölçüm yuvaları (Ön) (b) Elektriksel bağlantıları (Arka)

Şekil 3. 36. Dinamik basınç sensörü.

3.5.3. Optik Dedektörler (Fotodiyotlar)

Hem alevin ışık şiddetini ölçmek hem de alev geri tepmesi durumunda alevin yakıcının alt kısmına hareketinin tespiti için 2 adet optik dedektör (Thorlabs marka, PDA36A-EC serisi) kullanılmıştır (Şekil 3.37). Bu optik dedektörler, 350 ila 1100 nm dalga boyu aralığında ışık sinyallerinin tespiti için tasarlanmış, kuvvetlendirilmiş ve ayarlanabilir kazançlı bir silikon detektördür.



(a) Alevin ışık şiddetinin ölçümü için yanma odasına yerleştirilen optik dedektör



(b) Alev geri tepmesi tespiti için yakıcıya yerleştirilen optik dedektör

Şekil 3. 37. Optik dedektörler.

3.5.4. Emisyon Ölçüm Cihazı

Emisyon ölçümleri için portatif emisyon analizörü (MRU Instruments, NOVA Plus RCU) kullanılmıştır (Şekil 3.38). Gaz analizörü, O₂, CO, CO₂, NO_x (NO ve NO₂) ve SO₂ emisyonlarını eş zamanlı olarak yüksek doğrulukla ölçebilmektedir. Tablo 3.3'te emisyon analizörü ölçüm hata ve aralıkları verilmiştir.

Tablo 3. 3. Emisyon analizörü ölçüm hataları ve aralıkları.

	Ölçüm Hataları	Ölçüm Aralığı
O ₂	±0.2%	-
CO	±5% ya da ±10ppm* ±10.0%	0-4000 ppm >4000 ppm
NO	±5% ya da ±5ppm* ±10.0%	0-1000 ppm >1000 ppm
NO ₂	±5% ya da ±5ppm* ±10.0%	0-200 ppm >200 ppm
SO ₂	±5% ya da ±5ppm* ±10.0%	0-2000 ppm >2000 ppm
CO ₂	±0.3%	-

*hangisi daha yüksek ise



Şekil 3. 38. Emisyon ölçüm cihazı.

3.6. Belirsizlik Analizi

Bir ölçümdeki hata gerçek değer ile ölçülen değer arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu tanım açık olmasına rağmen faydalı değildir. Çünkü gerçek değer ile ölçülen değeri bildiğimizi iddia ettiğimiz gerçek durumlar sadece temel veriler veya temel verilere karşı kalibre edilen durumlarda geçerlidir. Çoğu durumda bir ölçümdeki hatanın ne olduğu hakkında kesin bir ifade kullanılamaz, bunun yerine olası hataların ne olabileceği ve sınırları hakkında fikir yürütülebilir [152].

Literatürde, geliştirilen yöntemler ile hata oranlarının sınırlarını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemlerden akılcı yaklaşım ve belirsizlik analizi sık kullanılan yöntemlerdir. Belirsizlik bir hatanın sahip olabileceği olası bir değeri ifade etmektedir. Halen de kabul gören bu terim Kline ve McClintock tarafından ortaya atılmış [153], Kline ve McClintock ise bu terimi Airy'nin [154] yaptığı çalışmalara dayandırarak ortaya koymuştur [152]. Belirsizlik analizinde x_i hata oranları (δx_i) bilinen bir değişken olarak kabul edersek değişkenin alabileceği değerleri denklem 3.22'de olduğu gibi ifade edebiliriz.

$$x_i = x_i(\text{ölçülen}) \pm \delta x_i \quad (3.22)$$

Bu durum altında en iyi tahmin $x_i(\text{ölçülen})$ 'i olacaktır.

Deney düzeneğinde hesaplanması gereken n adet değişkenden oluşan büyüklüğü; R , değişkenlerini ise x_1, x_2, \dots, x_n olarak ifade edersek:

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.23)$$

elde edilir. w_1, w_2, \dots, w_n olarak ifade edilen terimler ise hata oranlarını ifade etmektedir (denklem 3.24).

$$w = w(w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (3.24)$$

Bu durumda bütün sistemin toplam hata oranı denklem 3.25-26'da olduğu şekli ile ifade edilebilir.

$$w_R = \left[\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} w_i \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.25)$$

$$w_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2} \quad (3.26)$$

Örneğin %67.5H₂–%22.5CO–%5CO₂–%15CH₄ karışımı için termal güçteki belirsizliği hesaplayalım. Yapılan çalışmada termal güç (Q) bütün deneylerde 3 kW olarak sabit tutulmuştur. Eşdeğerlik oranı ise $\Phi=0.4$ olarak belirlenmiştir. Kütle akış kontrolcülerinin ölçüm hata oranları yakıt (H₂, CO, CO₂ ve CH₄) ve hava hatları için tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3. 4. Kütle akış kontrolcülerini ölçüm hata oranları.

Kütle Akış Kontrolcüsü	Ölçüm Hata Oranları (%)	Kalibrasyon Aralığı (sccm)
H ₂	+%0.100 ile -%0.045	3000 – 30000
CO	+%0.060 ile -%0.255	3000 – 30000
CO ₂	+%0.134 ile -%0.110	5000 – 30000
CH ₄	+%0.000 ile -%0.117	5000 – 30000
Hava	+%0.070 ile -%0.150	210 – 300000

Kalibrasyon gazı, ortam sıcaklığı ve basıncı sırasıyla; N₂, 23 °C ve 1 atm'dir.

Termal güç, denklem 3.27'de ifade edilmiştir.

$$Q (W) = AID \left(LHV, \frac{j}{kg} \right) \cdot \dot{m} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (3.27)$$

Denklem 3.27'de Q , termal gücü; AID , alt ısıl değeri; \dot{m} , kütleli akış oranını ifade etmektedir. Debiyi oluşturan 4 farklı gaz yakıt mevcuttur. Bu durumda termal güç:

$$Q = AID \cdot (\dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{CH_4}) \quad (3.28)$$

olarak ifade edilir. Kütle akış kontrolcülerindeki ölçülen debi ve hata oranları:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_i(\text{ölçülen}) \pm \delta m_i \quad (3.28)$$

Kütle akış kontrolcülerinin her bir yakıt hattı için ifade edelim:

$$\dot{m}_{H_2} = 7474.71 \text{ sccm} \pm 0.100\% = 2.23806045 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s} \pm 0.100\%$$

$$\dot{m}_{CO} = 2491.57 \text{ sccm} \pm 0.255\% = 1.12246279 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s} \pm 0.255\%$$

$$\dot{m}_{CO_2} = 622.89 \text{ sccm} \pm 0.134\% = 2.05701791 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s} \pm 0.134\%$$

$$\dot{m}_{CH_4} = 1868.68 \text{ sccm} \pm 0.117\% = 5.20237205 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s} \pm 0.117\%$$

Toplamda olması gereken yakıt debisi:

$$\dot{m}_{toplam} = \dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{CO} + \dot{m}_{CO_2} + \dot{m}_{CH_4} = 12457.85 \text{ sccm} = 1.0619914 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s}$$

Hata oranlarının debi karşılıklarını her bir yakıt hattı için ifade edelim:

$$w_{H_2} = 7.4747 \text{ sccm} = 2.238 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}$$

$$w_{CO} = 6.3535 \text{ sccm} = 2.862 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}$$

$$w_{CO_2} = 0.8346 \text{ sccm} = 2.756 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}$$

$$w_{CH_4} = 2.1683 \text{ sccm} = 6.086 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}$$

Gerçekte olması gereken termal güç:

$$Q = 28248815.79 \frac{J}{kg} \cdot \left(1.0619914 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{s}\right) = 2999.9999 \text{ W} \cong 3000 \text{ W}$$

Bu durumda, %67.5H₂-%22.5CO-%5CO₂-%15CH₄ karışımı için termal güçteki belirsizlik;

$$w_Q = \sqrt{(AID \cdot w_{H_2})^2 + (AID \cdot w_{CO})^2 + (AID \cdot w_{CO_2})^2 + (AID \cdot w_{CH_4})^2}$$

$$w_Q = [AID^2 \cdot (w_{H_2}^2 + w_{CO}^2 + w_{CO_2}^2 + w_{CH_4}^2)]^{\frac{1}{2}}$$

elde edilir. Değerler yerine yazılırsa belirsizlik:

$$w_Q = \left[\left(28248815.79 \frac{J}{kg}\right)^2 \cdot \left(\left(2.238 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}\right)^2 + \left(2.862 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}\right)^2 + \left(2.756 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}\right)^2 + \left(6.086 \cdot 10^{-8} \frac{kg}{s}\right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \pm 2.14823 \text{ W}$$

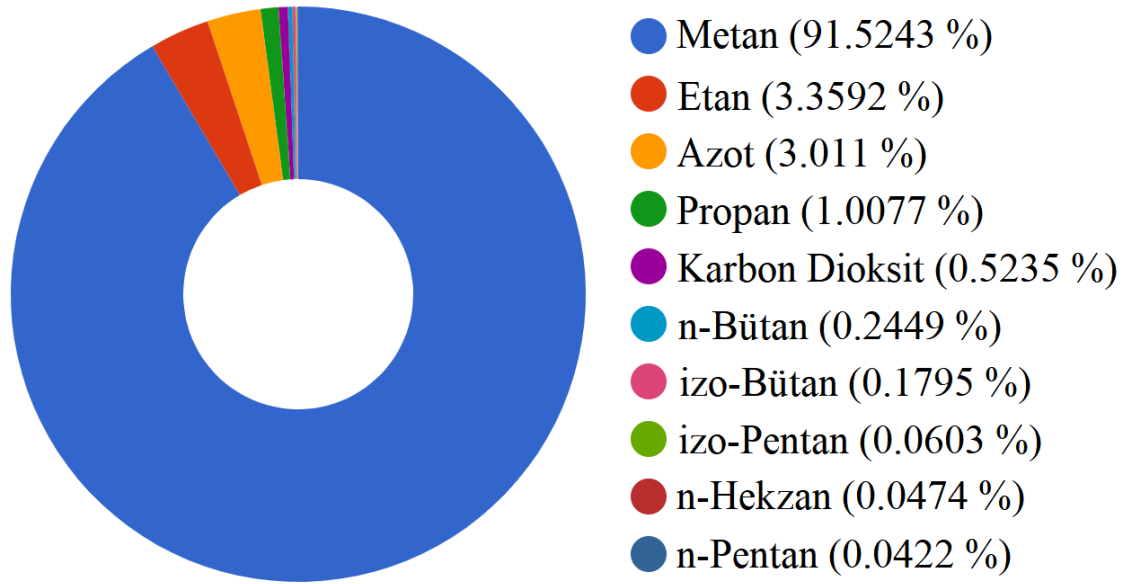
olarak elde edilmiş olur. İlgili karışımda 3kW termal güçteki belirsizlik $\pm\%0.0716$ değerine karşılık gelmektedir.

3.7. Deneysel Çalışma Şartları

Günümüzde birçok araştırmacı, kirletici emisyon standartlarını sağlayan ve yakıt esnekliğine sahip yakıcıların (gaz türbinleri, içten yanmalı motorlar, sanayi tipi yakıcılar, jet motorları vb.) geliştirilmesi, modifiye edilmesi veya baştan tasarlanması üzerine yoğun bir emek harcamaktadır [155]. Yanma sistemlerinde fakir ön karışimli yanma stratejilerinin kullanılması tek haneli NO_x emisyon değerleri elde etmeyi mümkün hale getirmiş fakat ön karışimli yanma sistemlerinin yakıt kompozisyonuna ve ortam şartlarına olan hassasiyeti yapılan araştırmaların maliyetlerini artırmıştır [156].

Sentetik gazlarda, üretiminde farklı üretim yöntemlerinin kullanılması veya üretimi esnasında kullanılan hammaddenin içeriğine bağlı olarak geniş bir aralıkta yakıt kompozisyonuna sahiptir. Sentetik gazların farklı enerji tesislerinde kullanılan yakıt kompozisyonları incelenmiş ve $\%22.3-55.4 \text{ CO}$, $\%8.6-61.9 \text{ H}_2$, $\%1.6-30 \text{ CO}_2$, $\%0-8.2 \text{ CH}_4$, $\%0.1-39.8 \text{ H}_2\text{O}$, $\%0.2-49.3 \text{ N}_2+\text{Ar}$ ve eser miktar hidrojen sülfür (H_2S) veya karbonil sülfür (COS) gazları içerdiği tespit edilmiştir [156-158].

Çok farklı yakıt bileşimine sahip olan bu gazları sınıflandırmak için sentetik gaz içerisindeki H_2 miktarının CO miktarına olan oranları kullanılmaktadır. Bu oran $\text{H}_2/\text{CO}=0.33-2.36$ arasında değişmektedir. $\text{H}_2/\text{CO}=0.33$ oranına yakın sentetik gazlar düşük; $\text{H}_2/\text{CO}=2.36$ oranına yakın sentetik gazlar ise yüksek H_2/CO oranına sahip sentetik gazlar olarak adlandırılmaktadır. Bu iki değer arasındaki H_2/CO oranlarına sahip sentetik gazlar ise orta H_2/CO oranına sahip sentetik gazlar olarak isimlendirilmektedir. Yapılan deneylerde bu üç oranda ($\text{H}_2/\text{CO}_{\text{düşük}}=0.5$, $\text{H}_2/\text{CO}_{\text{orta}}=1.0$ ve $\text{H}_2/\text{CO}_{\text{yüksek}}=2$) sentetik yakıt karışımları ile H_2 'ce zenginleştirilmiş sentetik gazlar ($\text{H}_2/\text{CO}_{\text{zenginleştirilmiş}}=3$) kullanılmıştır.



Şekil 3. 39. CNG bileşimi ve hacimce % miktarları.

Ayrıca düşük, orta ve yüksek sentetik gaz karışımlarının hepsinde, sentetik gazlarda önemli bir oranda bulunan CO₂ gazının etkilerini inceleyebilmek için CO₂ gazının karışım içerisindeki miktarı hacimce %0-20 arasında %5'er aralıklar ile artırılarak incelenmiştir. CNG'nin karışım içerisindeki miktarı (hacimce %20) ise test edilen karışım için sabit tutulmuştur. CNG'nin bileşenleri ve hacimce % miktarları şekil 3.39'da, termofiziksel özellikleri ise tablo 3.5'te gösterilmektedir. H₂'ce zenginleştirilmiş sentetik gaz karışımlarında CH₄ gazının etkilerini inceleyebilmek için karışım içerisindeki miktarı hacimce %5-20 arasında %5'er aralıklarla incelenmiştir. H₂'ce zenginleştirilmiş sentetik gaz karışımlarındaki CO₂ miktarı (hacimce %5) ise sabit tutulmuştur.

Tablo 3. 5. CNG'nin termofiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
Yoğunluk (kg/m ³)	0.786
Molar yoğunluk (kmol/m ³)	0.04473
Molar kütle (kg/kmol)	17.5731
Alt ısı değer (MJ/kg)	46.7815
Alt ısı değer (MJ/m ³)	36.7702

Sıcaklık ve basınç sırasıyla; 0 °C ve 1 atm'dir

Laboratuvar ölçekli kurulan yanma akustik oda yapılacak deney sayısının artırılması ve maliyetlerin azaltılması maksadıyla termal güç 3 kW olarak belirlenmiştir. Girdap sayısı $S=0.2-1.6$ değerleri arasında 0.2 aralıklarla değiştirilerek testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca girdap üreteçleri farklı çap oranlarında imal edilerek çap oranının ($d_h/d_o=0.33-0.50$) yanma kararsızlıklarına karşı alev davranışı incelenmiştir. Bununla birlikte eşdeğerlik oranının (Φ) etkisi sentetik gaz karışımların yanma limitleri içerisinde farklı değerlerde seçilerek belirlenmiştir. Deneyleerde kullanılan gaz karışımlarının bileşenleri tablo 3.6'da, özellikleri ise tablo 3.7'de gösterilmektedir.



Tablo 3. 6. Deneyleerde kullanılan gaz karışımlarının bileşenleri.

H₂/CO	İsimlendirme	H₂	CO	CO₂	CNG	CH₄
0.5	SL1	26.70	53.30	-	20	-
	SL2	25.00	50.00	5	20	-
	SL3	23.40	46.60	10	20	-
	SL4	21.70	43.30	15	20	-
	SL5	20.00	40.00	20	20	-
1.0	SM1	40.00	40.00	-	20	-
	SM2	37.50	37.50	5	20	-
	SM3	35.00	35.00	10	20	-
	SM4	32.50	32.50	15	20	-
	SM5	30.00	30.00	20	20	-
2.0	SH1	53.30	26.70	-	20	-
	SH2	50.00	25.00	5	20	-
	SH3	46.60	23.40	10	20	-
	SH4	43.30	21.70	15	20	-
	SH5	40.00	20.00	20	20	-
3.0	SR1	67.50	22.50	5	-	5
	SR2	63.75	21.25	5	-	10
	SR3	60.00	20.00	5	-	15
	SR4	56.25	18.75	5	-	20

Tablo 3. 7. Deneylerde kullanılan gaz karışımlarının yanma özellikleri.

Yakıt Karışımı Kodu	Yoğunluk (kg/m³)	Alt ısı değeri (MJ/kg)	Wobbe İndeksi (MJ/Nm³)	Yakıt Debisi (slpm)
SL1	0.8351	20.144	21.78	10.699
SL2	0.8908	18.211	20.35	11.094
SL3	0.9455	16.524	19.04	11.520
SL4	1.0013	15.004	17.81	11.980
SL5	1.0571	13.645	16.66	12.478
SM1	0.6809	24.367	24.17	10.847
SM2	0.7460	21.457	22.28	11.244
SM3	0.8111	19.013	20.60	11.671
SM4	0.8762	16.932	19.07	12.132
SM5	0.9413	15.138	17.68	12.631
SH1	0.5265	31.077	27.53	11.000
SH2	0.6009	26.277	24.87	11.399
SH3	0.6764	22.498	22.59	11.826
SH4	0.7509	19.506	20.63	12.288
SH5	0.8253	17.053	18.91	12.788
SR1	0.4778	25.072	21.45	15.022
SR2	0.4946	26.714	23.20	13.620
SR3	0.5114	28.248	24.90	12.457
SR4	0.5282	29.685	26.55	11.478

Sıcaklık ve basınç sırasıyla; 0 °C ve 1 atm'dir

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Giriş

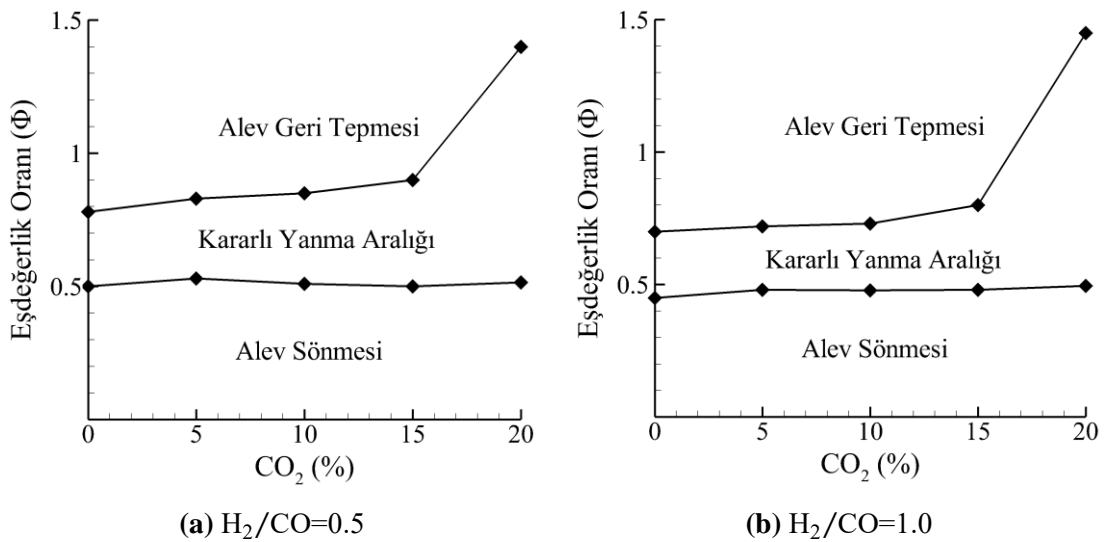
Ülkemiz, artan elektrik ihtiyacını karşılamak için enerji üretim santrali sayılarını artırmakta ve enerji ithalatının azaltılmasına yönelik olarak yerli linyit kömürünün (ısı değeri düşük, barındırdığı kül ve nem miktarı fazla) kullanımını teşvik etmektedir. Ülkemizde kömürden üretilen elektrik enerjisinin payı Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) verilerine göre 2017 yılında %33 seviyelerindedir [159] (Dünya elektrik üretiminde kömürün payı ise %40 seviyelerinde bulunmaktadır [160]). Kömür kullanımı hava kalitesinin azalmasında, su kaynaklarının ve doğal yaşam alanlarının bozulmasında ve küresel ısınmada baş rol oynamaktadır. Dünya atmosferine gelen güneş ışınların yaklaşık %29-31'i (Albedo etkisi) yansıyarak uzaya geri gönderilmektedir [161, 162]. Sera gazları (CO₂, CH₄, N₂O vb.) ve kirletici emisyonların salınımının artması, dünya atmosferine gelen güneş ışınlarının uzaya yayılan miktarının azalmasına, atmosfer sıcaklığın yükselmesine, çevre ve iklim değişikliği konuları hakkında endişelerin artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple yapılan sözleşmeler çerçevesinde, kirletici emisyon standartları oluşturulmuştur. Bu durum, enerji tedarikçi ve tüketicilerini standartları sağlamak için çevreye olan etkisi sınırlı ve uygun fiyatlı enerji kaynakları arayışına yöneltmiştir [1]. Örneğin; Avrupa ülkeleri 2050 yılında CO₂ emisyon azaltma hedefini 1990 yılındaki emisyon seviyelerine göre %80 olarak belirlemiştir [163]. Bu hedef 2050 yılında, elektrik üretimin hemen hemen tamamen sürdürülebilir hale gelmesi anlamını taşımaktadır [164]. Sentetik gazların kullanımıyla birlikte karbon dioksit emisyonlarının azaltılması ve böylece daha temiz elektrik enerjisi üretimi mümkün olabilmektedir. Ayrıca gazlaştırma prosesi ile içerisinde bulunan hidrojen sülfür (H₂S), karbonil sülfür (COS) ve cıva (Hg) gibi zararlı bileşenler ayrıştırılabilmektedir.

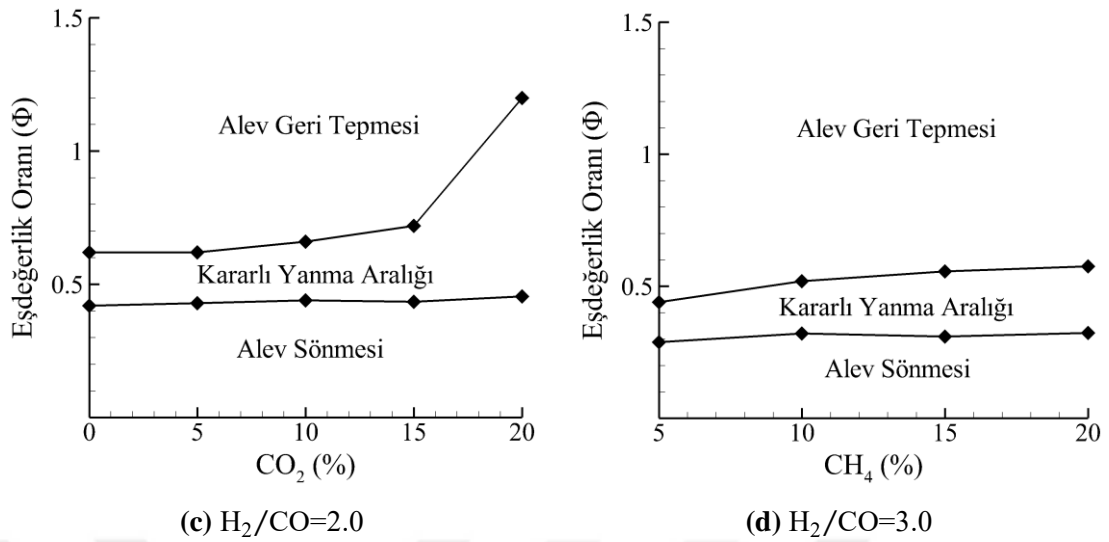
Günümüzde bu gazları kullanan entegre gazlaştırma kombine çevrim (IGCC) enerji santralleri ile geleneksel kömür esaslı termik santrallere oranla CO emisyonlarında %82 ve NO_x emisyonlarında %24 azalma sağlanmıştır [1]. Düşük emisyon konsantrasyonlarının karşılanması ve içindeki zararlı bileşenlerin ortadan kaldırılması veya azaltılması, sentetik gazların bugün ve gelecek için enerji kaynağı olarak tercih edilmesini sağlayabilir. Fakat bu faydaların yanında sentetik gazlar, geniş bir bileşim aralığına ve konvansiyonel gaz yakıtlara kıyasla düşük ısıl değerlere (2-15 MJ/m³ [165]) sahiptir. Bu durum, sentetik gazların kararlı yanma aralıklarında ve alev davranışında farklılık göstermesine neden olur [126]. Bu amaçla, tez çalışmasında ilk olarak deneylerde kullanılacak sentetik gazların kararlı yanma aralıkları tespit edilmiştir (Tablo 4.1). Deneylerde kullanılan sentetik yakıtların kararlı yanma aralıkları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Deneylerde kullanılan sentetik gazların kararlı yanma aralıkları.

H ₂ /CO Oranı	Yakıt Karışımı	Alev Sönmesi (Φ)	Alev Geri Tepmesi (Φ)	Alev Sönmesi ($m_{hava}/m_{yakıt}$)	Alev Geri Tepmesi ($m_{hava}/m_{yakıt}$)
0.5	SL1	0.500	0.780	11.77	7.54
	SL2	0.530	0.830	10.08	6.44
	SL3	0.510	0.850	9.56	5.73
	SL4	0.500	0.900	8.90	4.94
	SL5	0.515	1.400	7.90	2.90
1.0	SM1	0.450	0.700	16.05	10.32
	SM2	0.480	0.720	13.31	8.87
	SM3	0.478	0.730	11.90	7.79
	SM4	0.480	0.800	10.60	6.36
	SM5	0.495	1.450	9.24	3.15
2.0	SH1	0.420	0.620	22.26	15.08
	SH2	0.429	0.620	18.50	12.80
	SH3	0.440	0.660	15.51	10.34
	SH4	0.435	0.720	13.66	8.25
	SH5	0.455	1.200	11.47	4.35
3.0	SR1	0.289	0.440	24.53	16.11
	SR2	0.321	0.520	24.24	14.96
	SR3	0.310	0.557	27.19	15.13
	SR4	0.323	0.576	27.97	15.68

Kararlı yanma aralığı, belirli sıcaklık ve basınçta ateşleme kaynağı kaldırıldıktan sonra yakıt ile havanın kendi kendine yanabileceği karışım konsantrasyonlarını ifade etmektedir [166]. Karışım içerisindeki yanıcı maddenin en fazla olduğu yanma sınırı üst yanma limiti (veya zengin yanma limiti), aksi durum ise alt yanma limiti (veya fakir yanma limiti) olarak adlandırılmaktadır. Üst yanma sınırının aşılması durumunda alev yakıcı içerisine yayılarak alev geri tepmesine, alt yanma limitinin aşılması durumunda ise alev aşağı akıma doğru yayılarak alevin sönmesine neden olur. Yanma sınırlarını belirleyen ana faktör, ısı üretim oranı (reaksiyon ısısı ve reaksiyon oranı ile kontrol edilir) ile alevin ısı kayıp oranı arasındaki dengeyle ilişkilidir. Yanıcı gazların yanma limitleri literatürde birçok kaynakta bulunmaktadır [167-173]. Fakat yanma aralıklarının ifade şekilleri (eşdeğerlik oranı, yakıt/hava veya hava/yakıt oranının kütleli ya da molar ifadesi vb.) farklılık göstermektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan sentetik gazların kararlı yanma aralıkları hem eşdeğerlik oranı hem de hava/yakıt oranının kütleli ifadesi cinsinden sunulmuştur (Tablo 4.1). Yakıt kütle akış kontrolcülerinin yeter süre ve aralıklarda (yaklaşık 0.1-0.5 slpm arasında) kademeli olarak azaltılması ya da artırılması ile alt ve üst yanma limitleri tespit edilmiştir. Ayrıca Tablo 4.1’de verilen kararlı yanma aralıklarının farklı H_2/CO oranlarında eşdeğerlik oranı cinsinden ifadeleri Şekil 4.1’deki grafiklerde sunulmuştur. Kararlı yanma aralıklarının belirlenmesi esnasında yakıt/hava oranı dışındaki bütün değişkenler (girdap sayısı:0.2, girdap üretici d_h/d_o oranları: 0.50, ısıl güç: 3kW ve giriş sıcaklıkları) sabit tutulmuştur.





Şekil 4. 1. Farklı H_2/CO oranlarında kararlı yanma aralıkları.

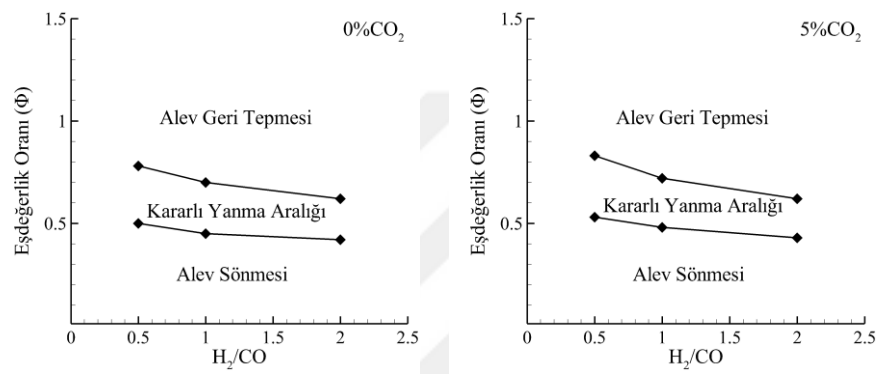
Sentetik gaz karışımı içerisindeki CO_2 konsantrasyonunun artması ile kararlı yanma aralıkları bütün H_2/CO oranlarında belirgin bir şekilde genişlemektedir. %20 CO_2 konsantrasyonuna sahip sentetik gaz karışımlarında ise bu artış çok belirgindir. Alt yanma limitlerindeki değişim bileşimindeki CO_2 miktarına bağlı olmaksızın düşük miktarlarda değişim sergilemiş ve tekdüze bir davranış göstermemiştir (Şekil 4.1a-c) [126]. Aynı durum CH_4 ilavesinde de gözlemlenmiştir (Şekil 4.1d).

H_2/CO oranının artması kararlı yanma aralığının daralmasına neden olmuştur. Bu durum, Şekil 4.2’de aynı CO_2 konsantrasyonuna sahip sentetik gazların kararlı yanma aralıklarında daha net görülmektedir. Kararlı yanma aralığının daralmasının yanında H_2/CO oranının artması diğer bir ifade ile yakıt içerisindeki H_2 miktarının artması daha fakir yakıt şartlarında (daha düşük eşdeğerlik oranlarında) kararlı alev elde edilmesini mümkün kılmıştır. Elde edilen bu durum literatürde birçok çalışmada da gözlemlenmiştir [174-178].

H, O ve OH gibi serbest radikaller eşleşmemiş elektronların varlığından dolayı son derece aktiftir ve yanma sırasında kısa ömürlüdürler [179]. Serbest radikallerin başlattığı zincir dallanması ve zincir yayılma reaksiyonları kimyasal reaksiyonlarda en önemli rolü oynar. Wang et al., yapmış oldukları deneysel çalışmada yakıtı ilave edilen H_2 ile H, O ve OH radikallerinin miktarının arttığını gözlemlenmişlerdir [178]. Law, $\text{H}_2\text{-CO}$ karışımlarının oksidasyonunda gerçekleşen $\text{H}_2\text{-O}_2$ zincir reaksiyonları aşağıdaki şekliyle ifade etmiştir [179]:

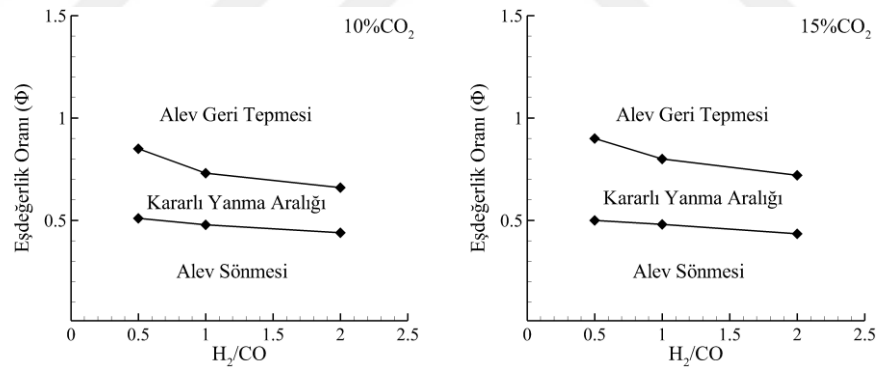


Yakıt karışımı içerisindeki H_2 miktarının artması R2 ve R3 reaksiyonlarının reaksiyon oranlarını artırır ve daha fazla H radikalinin oluşmasını sağlar. Böylece R1 reaksiyonunun tepkime hızı dolaylı olarak artmış olur. Bu sebepten, fazla oranda H_2 içeren sentetik gaz karışımlarda alev yayılma hızları yüksek ve alt yanma limitleri ise daha düşüktür.



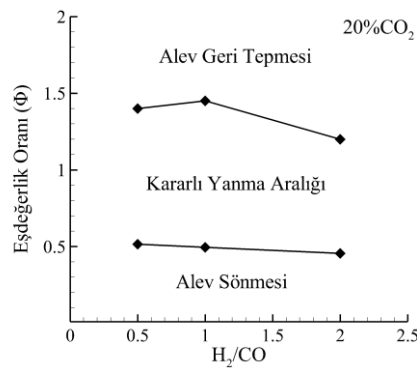
(a) SL1, SM1 ve SH1

(b) SL2, SM2 ve SH2



(c) SL3, SM3 ve SH3

(d) SL4, SM4 ve SH4



(e) SL5, SM5 ve SH5

Şekil 4. 2. Aynı CO₂ konsantrasyonuna sahip karışımların kararlı yanma aralıkları.

Diğer taraftan CO oksidasyonu ise CO ve O₂ arasında gerçekleşen direk reaksiyondan dolayı daha zordur.



R4 reaksiyonunun yüksek aktivasyon enerjisi (47.69 kcal/mol) gereksinimden dolayı reaksiyon yüksek sıcaklıklarda bile çok yavaş gerçekleşir. Ayrıca R4 reaksiyonu sonucu üretilen O atomunun herhangi bir hızlı gerçekleşen zincir reaksiyon oluşturmadığı literatürde verilmiştir [179]. CO içeren yakıt karışımları içerisinde bulunan küçük miktardaki H₂ bile OH radikallerinin oluşmasına (örneğin R1-R3 reaksiyonları) ve böylece CO₃ reaksiyonunun gerçekleşmesine neden olmaktadır.



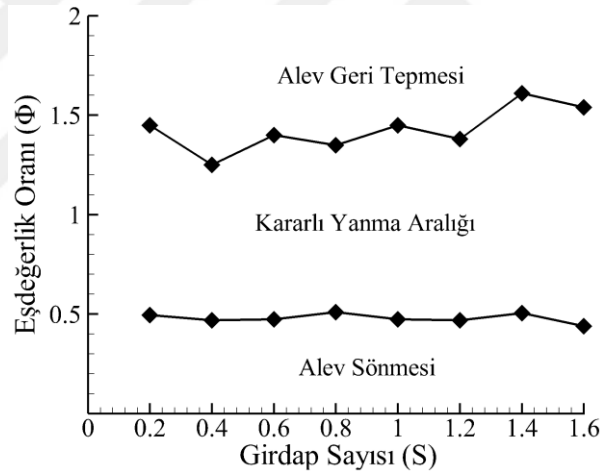
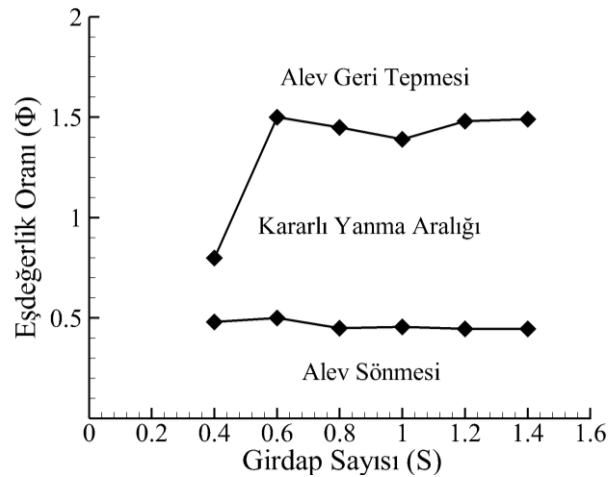
Böylece R5 reaksiyonu CO oksidasyonu için baskın bir reaksiyon yolu haline gelir. Ayrıca R5 reaksiyonu sonucu ortaya çıkan H radikalleri H₂-O₂ oksidasyon reaksiyonlarını (R1-R3) besler.

Hidrokarbon oksidasyonunun detaylı reaksiyon mekanizmalarını anlamada yeterli ilerleme kat edilmiştir. Genel olarak bir yanma sürecindeki en önemli reaksiyonlar yukarıda bahsedilen H₂ oksidasyonunda R1 reaksiyonu, CO oksidasyonunda R5 reaksiyonudur. R5 reaksiyonu neredeyse sadece CO'nun CO₂'ye dönüşmesinden sorumludur. Ayrıca R1 reaksiyonu için gerekli H radikallerinin üretimini sağlamış olur. Tez çalışmasında kullanılan CH₄ en hafif ve anlaşılması daha basit bir hidrokarbondur. Ayrıca unutulmamalıdır ki, her bir yanma işleminin gerçekleşebileceği çeşitli koşullar bulunmaktadır. Bu nedenle bir yanma işleminde gerçekleşen baskın reaksiyon mekanizmalar yanma işleminin termodinamik durumlarına bağlı olarak büyük ölçüde değişiklikler gösterebilir. Örneğin R1 reaksiyonu büyük bir aktivasyon enerjisine (16.44 kcal/mol) sahipken R6 reaksiyonu için herhangi bir aktivasyon enerjisi gerekli değildir.



Bu nedenle R1 reaksiyonu yüksek sıcaklıklarda baskın zincir dallanma basamağı olurken düşük veya orta sıcaklık rejimlerinde R6 reaksiyonu sonucu üretilen HO₂ radikalleri baskın olur. Metan oksidasyonu içinde bu durum R7 reaksiyonu ile gerçekleşir.

Türbülansın kararlı yanma limitlerine etkisini inceleyen çalışmalar sınırlıdır ve genelde bu konu göz ardı edilmiştir. Literatürde genellikle saf ve homojen yakıtlar için araştırmalar yapılmıştır ve elde edilen veriler kısıtlıdır. Sonuçlar: yüksek türbülanslı akışlarda yanma limitlerinin daraldığını (üst yanma limitinde düşüş, alt yanma limitinde artış) göstermiş, düşük ve orta türbülanslı akışlarda ise belirgin farklılıkların oluşmadığını gözlemlenmiştir [186, 187]. Bu tez çalışmasında girdap üreteçleri iki farklı çap oranında imal edilmiş ve SM5 yakıt karışımı için farklı girdap sayılarında kararlı yanma limitleri tespit edilmiştir (Tablo 4.3 ve Şekil 4.3) [126]. Elde edilen sonuçlar literatür ile uyumlu olmakla beraber elde edilen üst yanma limit değerleri girdap sayısının değişimi ile birlikte tekdüze bir davranış sergilememiştir [188-190]. Alt yanma limitlerinde ise belirgin değişiklikler görülmemiştir. Ayrıca çap oranının değişimi $S=0.4$ değeri dışında benzer trende sahiptir.

(b) $d_h/d_o = 0.50$ (a) $d_h/d_o = 0.33$ Şekil 4. 3. Farklı d_h/d_o oranlarında kararlı yanma aralıkları.

Tablo 4. 3. Farklı d_h/d_o oranlarında kararlı yanma aralıkları.

Girdap sayısı (S)	Çap oranı (d_h/d_o)	Alev Sönmesi (Φ)	Alev Geri Tepmesi (Φ)
0.2	0.50	0.495	1.45
0.4	0.50	0.470	1.25
	0.33	0.480	0.80
0.6	0.50	0.475	1.40
	0.33	0.500	1.50
0.8	0.50	0.510	1.35
	0.33	0.450	1.45
1.0	0.50	0.475	1.45
	0.33	0.456	1.39
1.2	0.50	0.470	1.38
	0.33	0.446	1.48
1.4	0.50	0.505	1.61
	0.33	0.447	1.49
1.6	0.50	0.440	1.54

4.2. Yanma-Akustik Odanın Doğal Akustik Modları

Yanma kararsızlıkları sırasında genellikle yanma odasının doğal akustik modlarının bir veya birkaçı uyarılır [191]. Bu sebeple akustik yanma odasının farklı frekans değerlerinde (sinüzoidal ses dalgaları ile) zorlanarak doğal akustik modlarının belirlenmesi gerekmektedir. Yapılan deneylerin tamamında hoparlör çıkış gücü sabit tutulmuştur. Hoparlörlerin her birine aynı fazda ve genlikte ses sinyalleri gönderilmiştir. Şekil 4.4'te hoparlörlere gönderilen ses sinyallerinin osiloskop ölçümleri yapılarak faz ve genlikleri kontrol edilmiştir. Hoparlörlere gönderilen sinüzoidal ses sinyallerinin gerçek gücü:

$$V_{\text{Genlik}} = \frac{V_{\text{Tepeden tepeye}}}{2} = \frac{\sim 90 \text{ V}}{2} = 45 \text{ Volt}$$

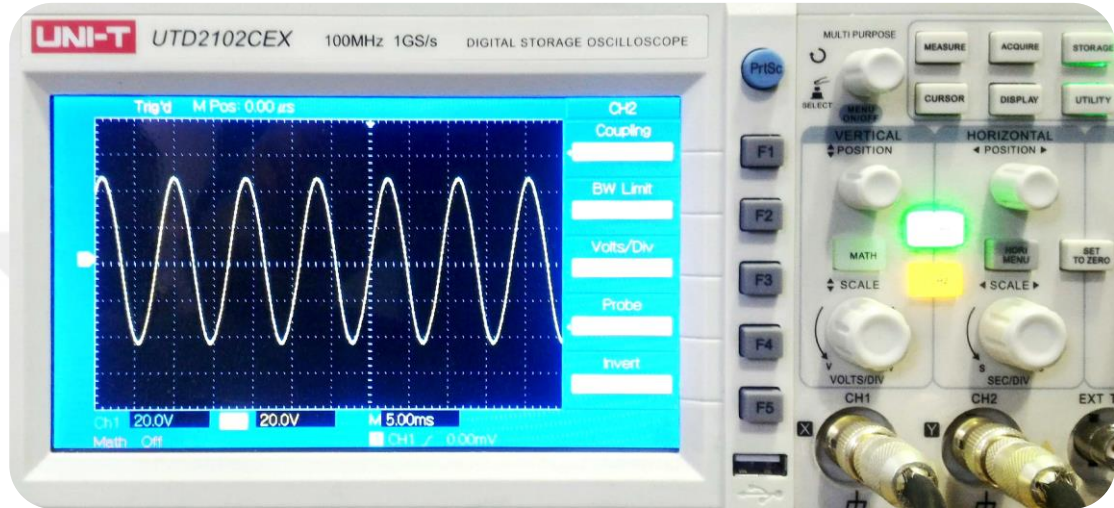
$$V_{\text{Etkif (RMS) değer}} = \frac{V_{\text{Genlik (Peak)}}}{\sqrt{2}} = \frac{45}{\sqrt{2}} = 31.819 \text{ Volt}$$

$$Z_{\text{Nominal}} = 8 \Omega$$

$$P_{\text{Hoparlör}} = \frac{V^2_{\text{Efektif (RMS) değer}}}{Z_{\text{Nominal}}} = \frac{31.819^2}{8} = 126.556 \text{ Watt}$$

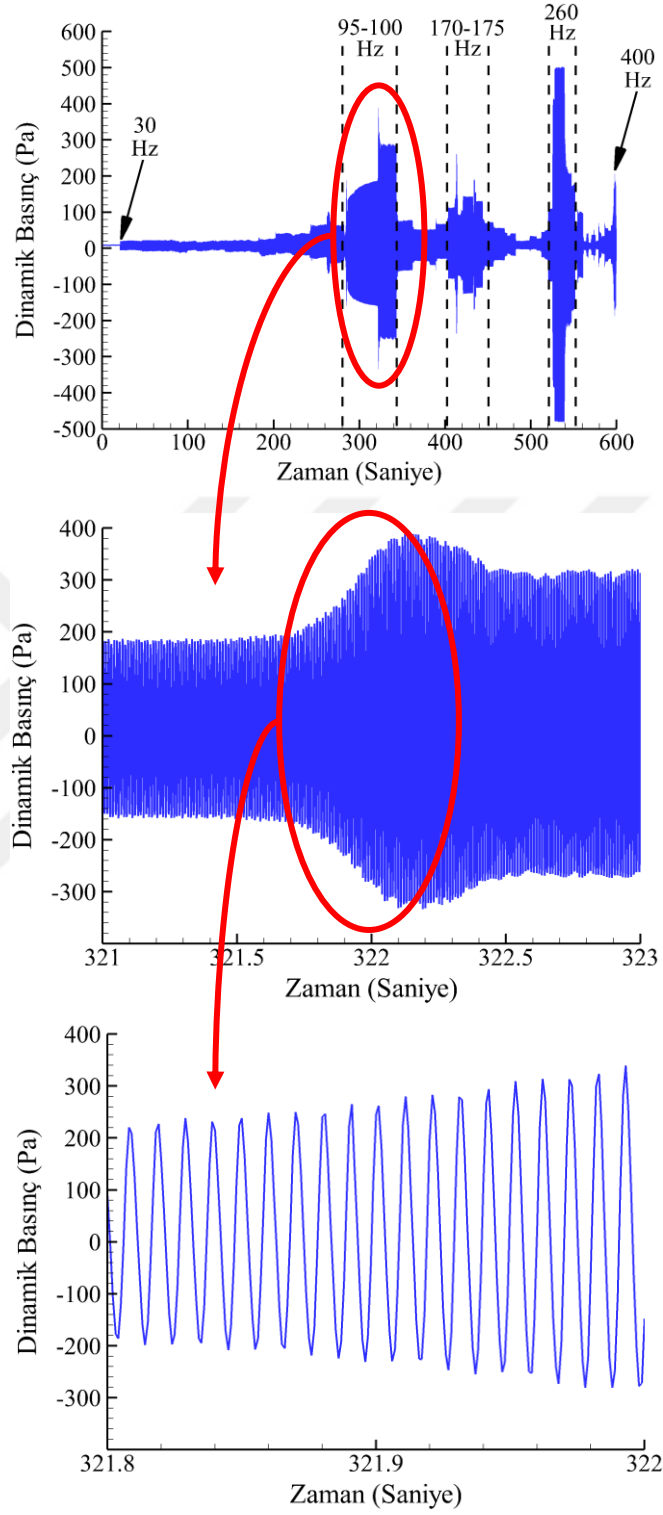
$$P_{\text{Toplam}} = 2 \cdot P_{\text{Hoparlör}} = 253.112 \text{ Watt}$$

olarak hesaplanmıştır.

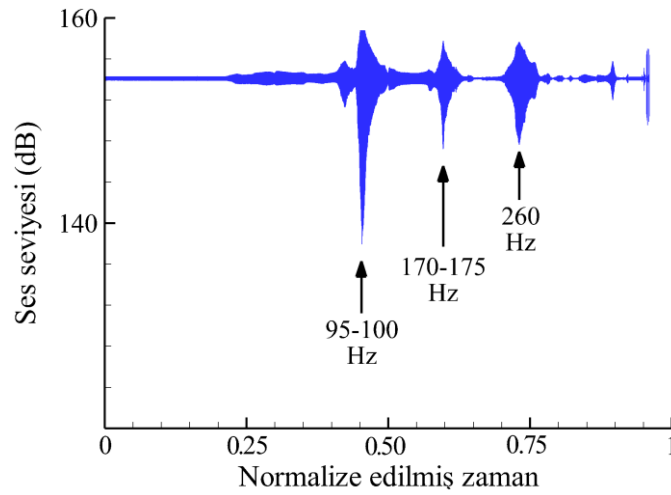


Şekil 4. 4. Hoparlörlere gönderilen sinüzoidal ses sinyalleri.

Şekil 4.5'te yanma odası dinamik basınç ölçümleri gösterilmektedir. Sabit genlikte ve farklı frekans değerlerinde gönderilen ses dalgaları yanma odası ile etkileşime girmiş, 30-400 Hz frekansları arasında 3 farklı frekans değerinde yüksek genlikte salınımlara neden olmuştur. Bu sayede yanma odasının doğal akustik modları; 95-100 Hz, 170-175 Hz ve 260 Hz olarak belirlenmiştir. Ayrıca bu durum Şekil 4.6'da dinamik basınç ölçümlerinin ses seviyesi (dB) cinsinden ifadesinde görülmektedir. Hoparlörlerin zarar görmesini önlemek ve kuvvetlendiricilerin frekans tepkisi aralığının dışına çıkmamak için düşük frekanstaki ses dalgalarını filtreleyen yüksek geçiren filtre (30 Hz'e ayarlı) kullanılmış, bu sebepten ötürü 30 Hz frekans değerinin altında çalışmalar yapılamamıştır.

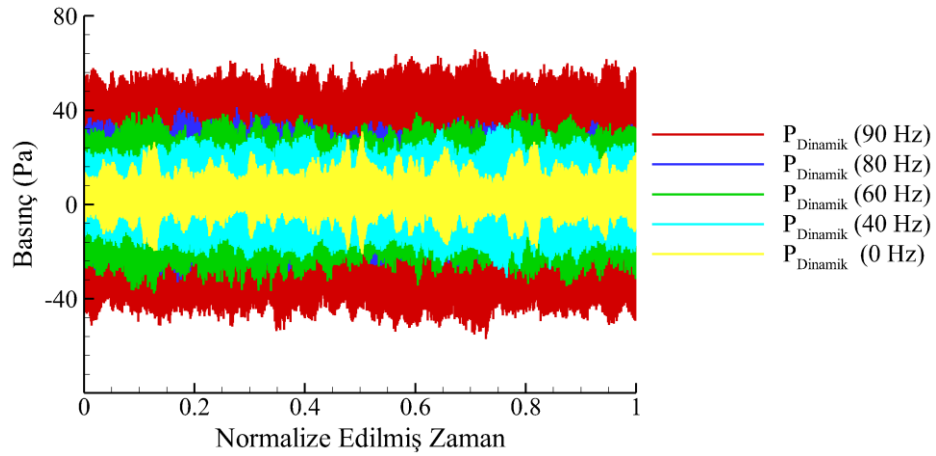


Şekil 4. 5. Akustik yanma odasının dinamik basınç ölçümleri.

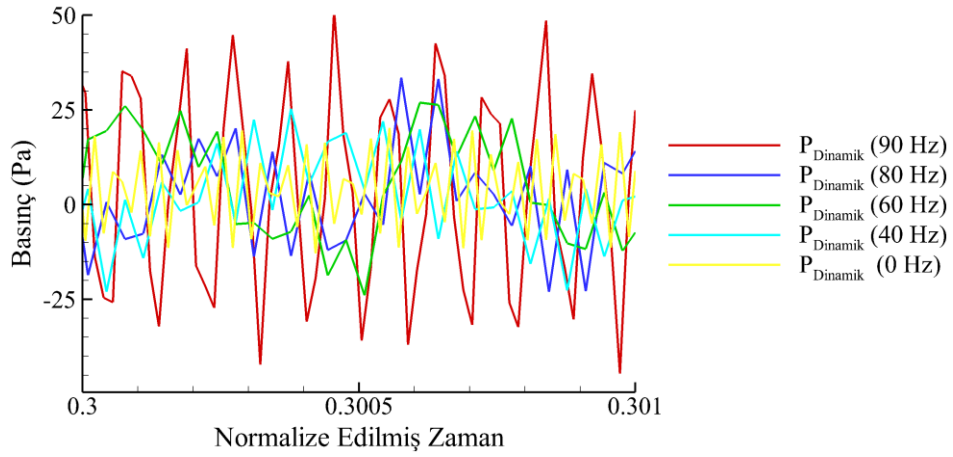


Şekil 4. 6. Basınç ölçümlerinin ses seviyesi karşılıkları.

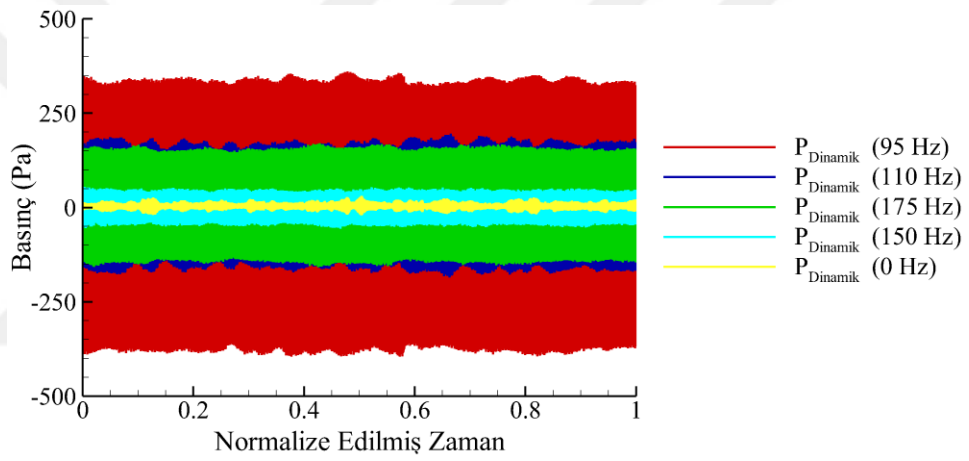
Şekil 4.7’de yanma odasının farklı frekans değerlerinde verdiği dinamik basınç tepkisi görülmektedir. 0 Hz değerinde yapılan ölçümler ise yanma şartlarında (SR1 yakıt karışımı, $S=0.2$ ve $\Phi=0.4$) herhangi bir akustik zorlama olmadan ölçülen dinamik basınç ölçümlerini kapsamaktadır. 0 Hz’de -21.06 ile 30.96 Pa; 40 Hz’de -31.18 ile 34.83 Pa, 60 Hz’de -37.79 ile 40.97 Pa, 80 Hz’de -32.98 ile 41.24 Pa, 90 Hz’de -57.09 ile 65.70 Pa, 95 Hz’de -395.98 ile 360.54 Pa, 110 Hz’de -186.09 ile 196.14 Pa, 150 Hz’de -56.40 ile 54.98 Pa ve 175 Hz’de -158.43 ile 170.65 Pa arasında dinamik basınç değişimi gözlemlenmiştir. Yanma odasının doğal akustik modlarında hoparlörler yardımıyla gönderilen ses dalgaları ile yanma odası rezonansa girmekte ve yüksek genlikli basınç dalgaları oluşmaktadır.



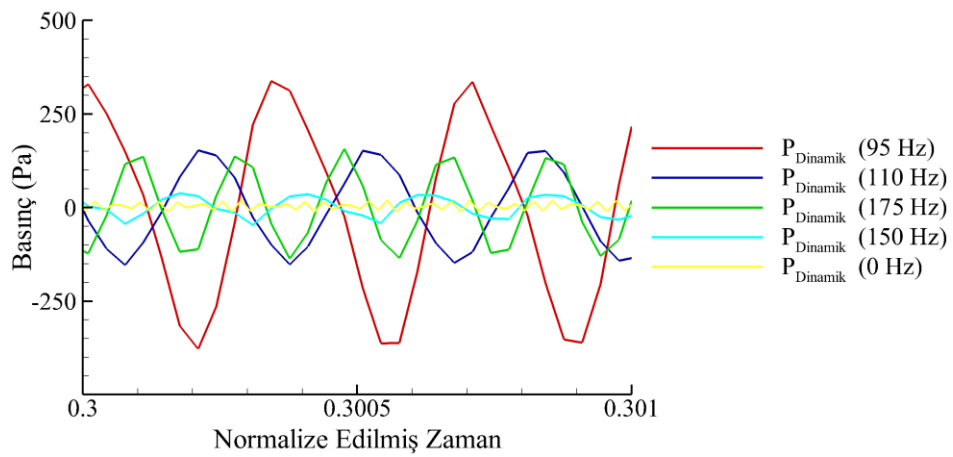
(a) 0-90 Hz



(b) 0-90 Hz (yakınlaştırılmış)



(c) 95-175 Hz



(d) 95-175 Hz (yakınlaştırılmış)

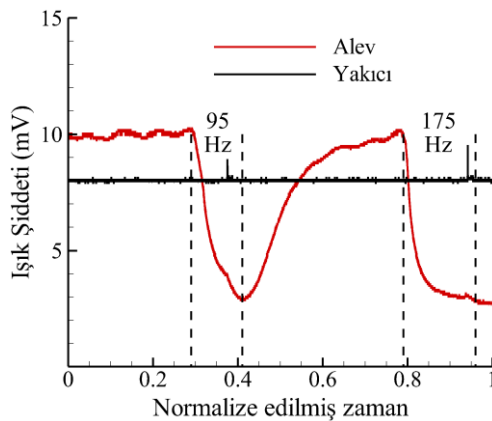
Şekil 4. 7. Farklı zorlayıcı frekanslarda yanma-akustik odada basınç dağılımı.

4.3. Termo-Akustik Zorlama Altında Alev Davranışı

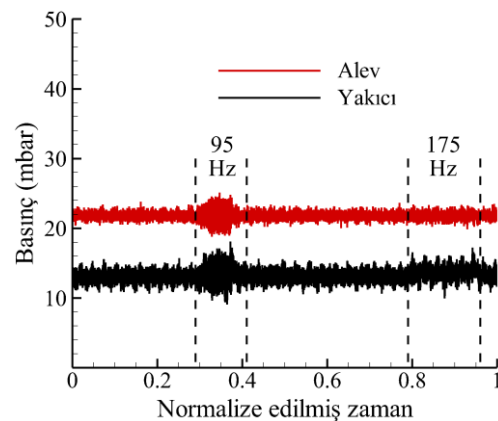
Yanma odasının doğal akustik modları tespit edildikten sonra belirlenen sentetik gaz karışımları yakılarak termal denge şartlarına gelinceye kadar beklenmiş ve denge haline gelen sentetik gaz alevlerine hoparlörler yardımıyla aşağı akımdan farklı frekanslarda sinüzoidal ses dalgaları gönderilerek yanma kararsızlıkları tahrik edilmiştir. Yapılan dinamik/statik basınç ve ışık şiddeti ölçümleri ile anlık alev görüntüleri alınarak termo-akustik zorlama altında alev davranışı incelenmiştir. Ayrıca termo-akustik zorlamanın emisyon ve sıcaklık dağılımı üzerine etkisi bir sentetik gaz yakıt karışımı için sunulmuştur.

4.3.1. Eşit H₂ ve CO İçeriğine Sahip (H₂/CO:1) Sentetik Gazların Alev Davranışı

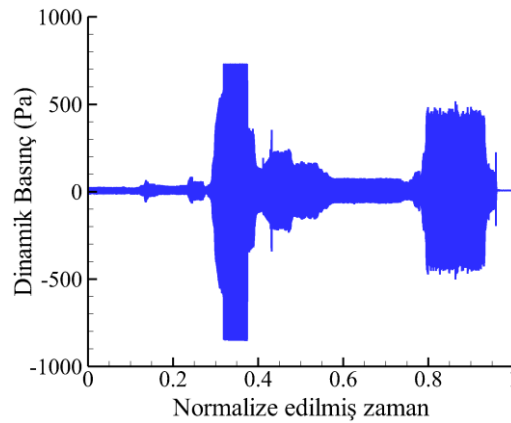
Şekil 4.8-12’de molar olarak eşit bileşime sahip sentetik gaz alevlerinin sabit girdap sayısı ($S=0.2$) ve eşdeğerlik oranında ($\Phi=0.6$) farklı frekanslardaki termo-akustik zorlamalar altında alev davranışlarının ışık şiddeti ve dinamik/statik basınç profilleri sunulmuştur. Grafiklerin x eksenini olarak bilinen yatay eksenine “Normalize edilmiş zaman” ismi verilmiştir. Normalize edilmiş zaman ifadesi; termo-akustik zorlama altında geçen sürenin aralarındaki oran değişmeden sabit bir katsayı ile çarpılıp, 0 ile 1 aralığına alınmasıdır. SM1 yakıt karışımı akustik zorlama altında yakıcının ilk doğal akustik modda (95 Hz) kararsızlaşmış ve salınımlı bir şekilde yanmaya devam etmiştir. İkinci doğal akustik modda (175 Hz) ise yaklaşık 400 Pa genlikteki basınç dalgalanmalarında sönmüştür. Şekil 4.8a ışık şiddeti profillerinde görüldüğü üzere her iki akustik modda alev yukarı akıma doğru; diğer bir ifade ile yakıcı içerisine ilerlemiş, fakat alev geri tepmesi olayı gözlemlenmemiştir.



(a) Işık şiddetinin değişimi



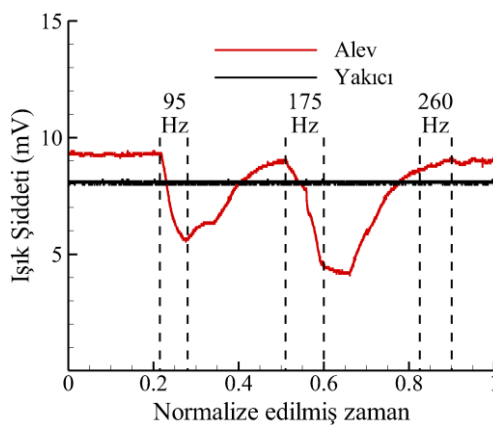
(b) Basıncın değişimi



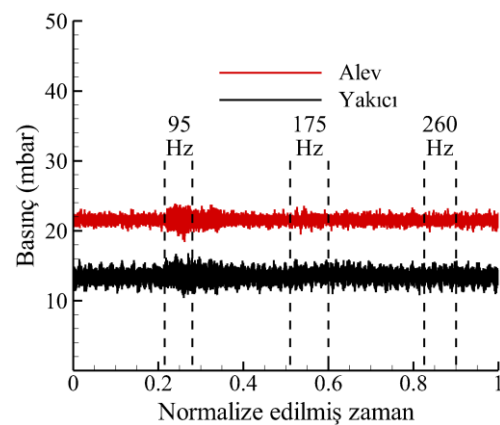
(c) Dinamik basıncın değışimi

Şekil 4. 8. SM1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

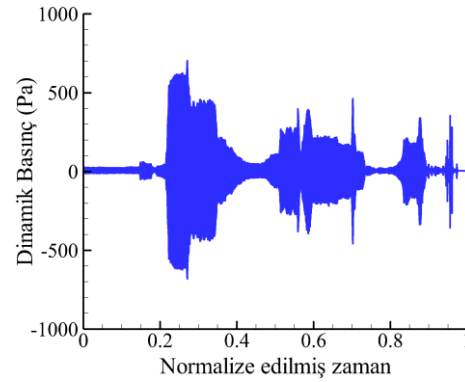
Şekil 4.9'da SM2 yakıt karışımı termo-akustik zorlama altında alev davranışı görülmektedir. Bu yakıt karışımında alev tüm zorlama frekanslarında kararlı bir şekilde yanmaya devam etmiştir. Alev ilk iki doğal akustik modda salınımlı yanmaya başlamış ve alev parlaklıkları azalmıştır. Yakıcının üçüncü doğal akustik modunda ise yaklaşık 200 Pa genlikteki basınç dalgalanmaları alev parlaklığında dahi değışikliğe neden olmamıştır (Şekil 4.9a). SM1 ile SM2 yakıt karışımlarındaki değışkenler; hacimce %5 miktarda CO_2 gazının yakıt karışımına ilave edilmesi, H_2 ve CO gazlarının konsantrasyonlarının ise hacimce %2.5'er azalmasıdır. Bu durum CO_2 gazı ilavesinin alevi boylamasında gelişen termo-akustik kararsızlıklara karşı daha dirençli hale getirdiğini göstermiştir.



(a) Işık şiddetinin değışimi



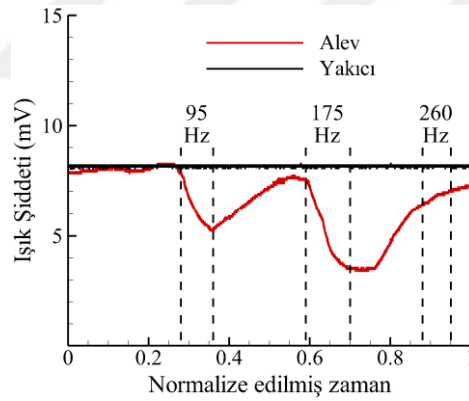
(b) Basıncın değışimi



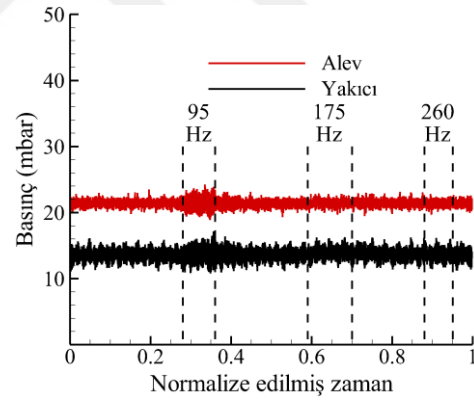
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 9. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

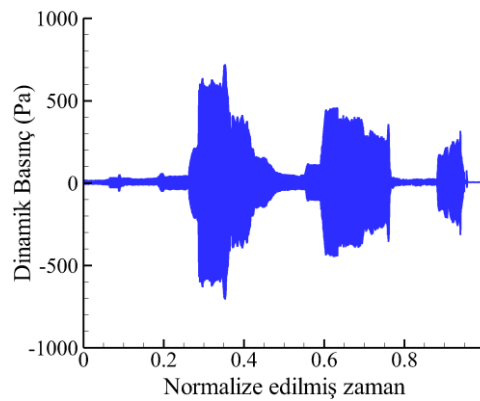
Benzer şekilde SM3, SM4 ve SM5 yakıt karışımlarının termo-akustik zorlama altında alev davranışları Şekil 4.10-12’de sunulmuştur. Alevler bütün akustik zorlamalar altında salınımlar yapmasına veya alev parlaklıklarının değişmesine rağmen, yakıt kompozisyonunda artan CO_2 bileşimi alevlerin kararsızlıklara karşı daha kararlı hale gelmesine neden olmuştur.



(a) Işık şiddetinin değişimi

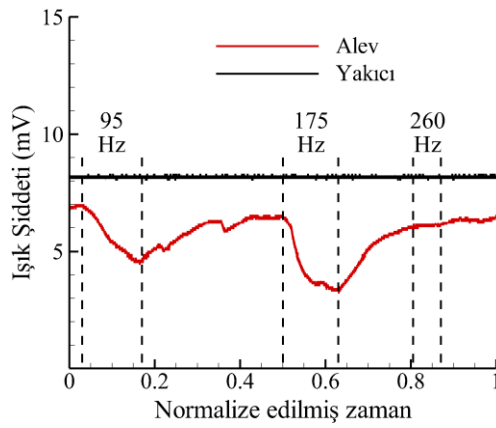


(b) Basıncın değişimi

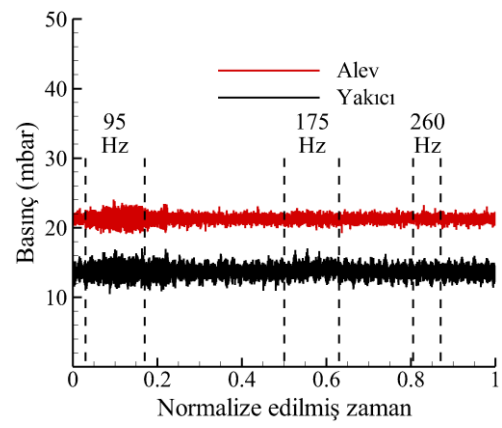


(c) Dinamik basınçın değişimi

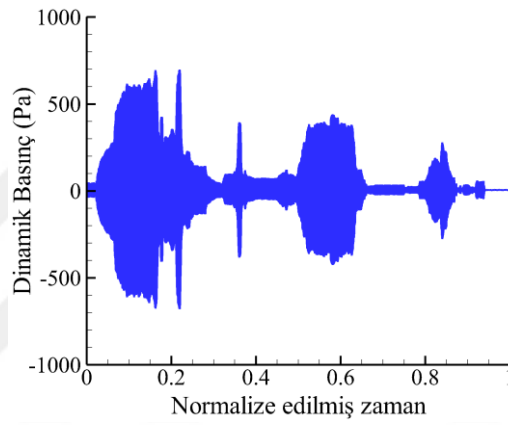
Şekil 4. 10. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).



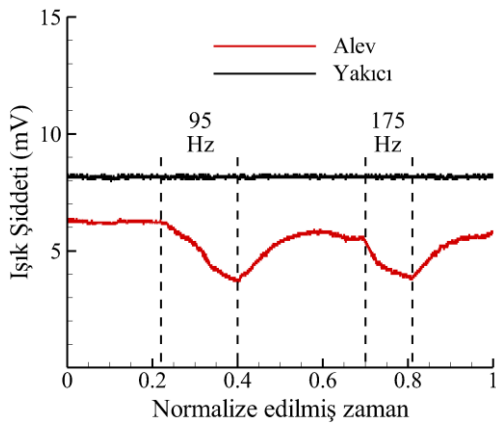
(a) Işık şiddetinin değişimi



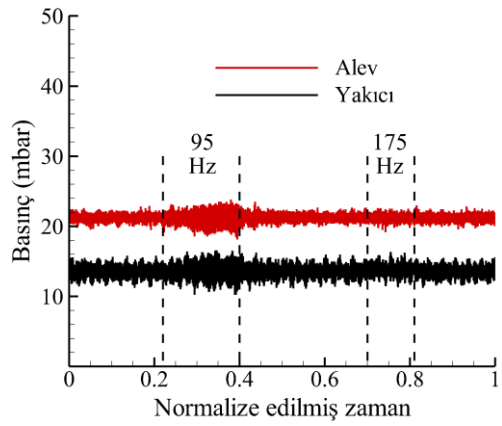
(b) Basıncın değişimi



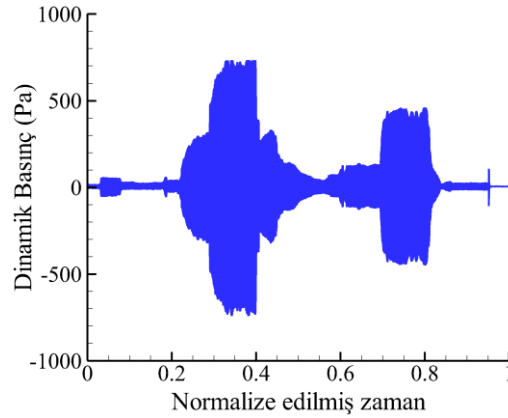
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 11. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi



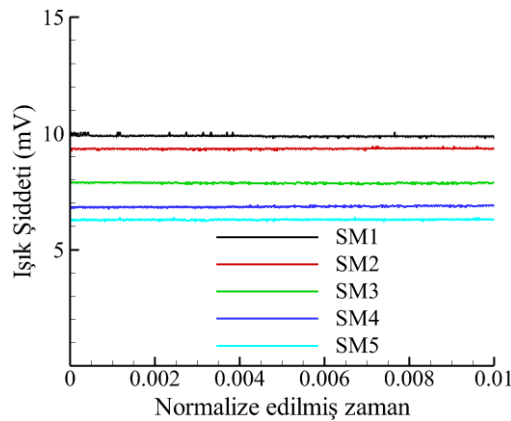
(b) Basıncın değişimi



(c) Dinamik basıncın değışimi

Şekil 4. 12. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

Şekil 4.13’de zorlama altında alev davranışı verilen $H_2/CO:1.0$ sentetik gaz yakıt karışımlarının ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$) alev parlaklıkları gösterilmektedir. Yapılan ölçümlerde kullanılan optik detektörler 200 ile 1100 nm bant genişliğinde ışık parlaklıklarını ölçebilmektedir. Deneilerin düşük eşdeğerlik oranlarından dolayı alev parlaklıkları düşük ölçülmüştür. Elde edilen veriler, yüksek alev parlaklığına sahip yakıt karışımlarının H_2 ve CO gazlarınca zengin sentetik gaz yakıt karışımları olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 13. $H_2/CO:1.0$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.

Şekil 4.14’te ise $H_2/CO:1.0$ sentetik gaz yakıt karışımlarının anlık alev görüntüleri yanma odasının her iki köşesine yerleştirilen kuartz pencerelerden fotoğraf makinesi yardımıyla (aynı pozlama süresi ve odak mesafesinde) elde edilmiştir. Anlık alev görüntülerinin alınmasında $1/2.3''$ ($\sim 6.16 \times 4.62$ mm) CCD algılayıcıya sahip Samsung WB100 marka bir fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Kullanılan fotoğraf makinesi 300 ile 1100 nm bant

genişliğine sahip olmakla beraber bu aralık insanoğlunda 400 ile 700 nm bant genişliğindedir (Şekil 4.15) [192]. Bütün alevler mavimsi renkte elde edilmiştir. Literatürde bu durum C ve H atomlarını ihtiva eden yakıtların fakir ($\Phi=0.5-0.7$) şartlar altında yeterince oksijen ile yanarak (yanmamış ürün kalmaz ve is/kurum oluşumu gözlemlenmez) oluştuğunu göstermektedir [143]. Yeterli oksijen varlığında uyarılmış karbojen (CH^*) oluşumu gerçekleşir ve bu reaksiyon sonucu yaklaşık 431 nm’de dar bir bant aralığında ışınım gerçekleşir. Karbojen oluşum reaksiyonları aşağıda gösterilmektedir [193].



Ayrıca yakıt karışımı içerisindeki CO_2 içeriği arttıkça (diğer bir ifade ile H_2 miktarı azaldıkça) alev boyu uzamıştır. Yakıt karışımı içerisinde azalan H_2 gazı miktarı yanma reaksiyonunun içerisinde oluşan aktif H, O ve OH radikallerinin azalmasına neden olur ve tepkimelerin gerçekleşme süresi artar. CO_2 içeriği ise yakıt karışımının termal ve taşınım özelliklerini baskılar ve CO_2 oluşumunu inhibe eder. Böylece H radikallerinin oluşumu engellenir ve ısı salınımı azalır [181].



(a) SM1



(b) SM2



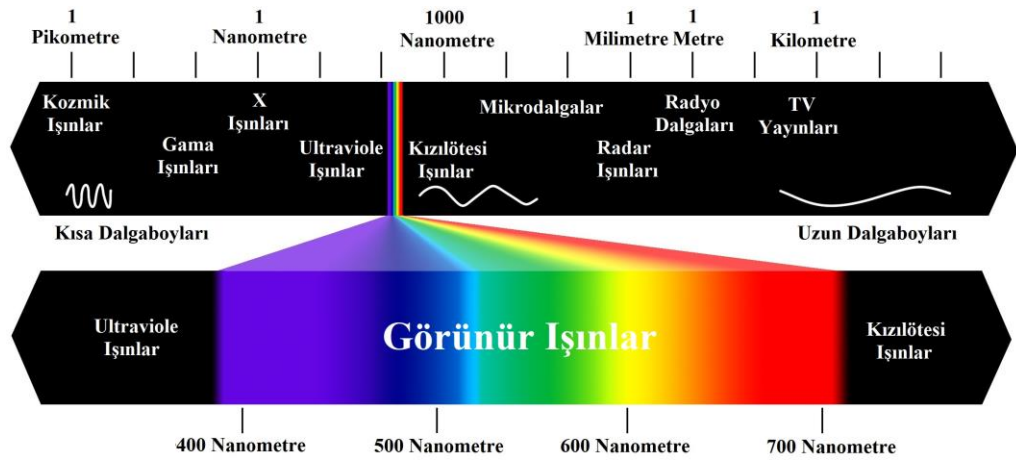
(c) SM3



(d) SM4



(e) SM5

Şekil 4. 14. $H_2/CO:1.0$ sentetik gazlarının alev görüntüleri.

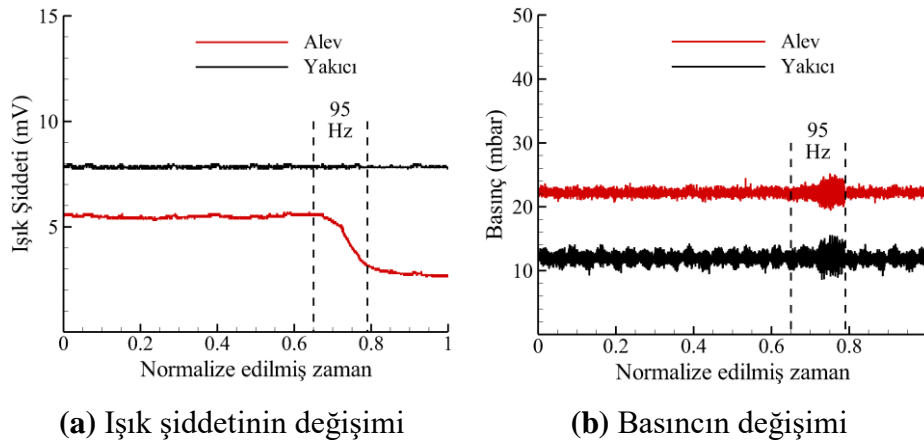
Şekil 4. 15. Elektromanyetik spektrum.

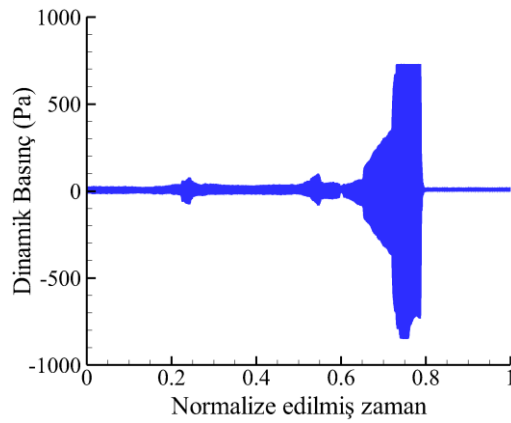
4.3.1.1. Eşdeğerlik Oranının Etkisi

Eşdeğerlik oranı yakıt hava karışımının zengin, fakir veya stokiometrik (tam yanma) olup olmadığını nicel olarak ifade etmek için kullanılmaktadır. Denklem 4.1’de eşdeğerlik oranı tanımlanmıştır [194].

$$\phi = \frac{\left[\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \right]_{teorik}}{\left[\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \right]_{gerçek}} = \frac{\left[\frac{m_{yakıt}}{m_{hava}} \right]_{teorik}}{\left[\frac{m_{yakıt}}{m_{hava}} \right]_{gerçek}} \quad (4.1)$$

Fakir veya zengin yanma limitlerine yakın eşdeğerlik oranında gerçekleşebilecek en ufak bir değişim alev sıcaklığı, alev hızı ve kimyasal zaman gibi birçok parametrede büyük değişimlere neden olabilmektedir. Zukoski’nin elde ettiği deneysel veriler eşdeğerlik oranının azalmasıyla kimyasal zamanın arttığını göstermiştir [195]. Çünkü karakteristik kimyasal zaman reaksiyon oranı ile ters orantılıdır [196]. Bu sebepten ötürü, fakir ön karışimli yanma sistemlerinde en maliyetli teknik zorluklardan biri yanma kararsızlıklarıdır [197]. Yanma sisteminden istenilen en uygun sıcaklık dağılımının ve emisyon değerlerinin elde edildiği çalışma şartlarının yanında termo-akustik dalgalanmaların oluşabileceği çalışma şartlarının da dikkate alınması gerekmektedir. Bu kısımda, $H_2/CO=1$ sentetik gaz alevleri üç farklı eşdeğerlik oranında ($\Phi=0.5, 0.6$ ve 0.7) farklı frekanslardaki ses dalgaları ile zorlanarak termo-akustik yanma kararsızlıkları tahrik edilmiş ve alevin bu yanma kararsızlıklarına verdiği tepki gözlemlenmiştir. Şekil 4.8-12’de eşit H_2 ve CO içeriğine sahip sentetik yakıt karışımlarının $S=0.2$ ve $\Phi=0.6$ ’da vermiş olduğu alev davranışları sunulmuştur. Diğer eşdeğerlik oranlarındaki alev davranışı ise aşağıda ayrıntılı olarak sunulmaktadır. SM1 alevi, $\Phi=0.5$ ’de birinci akustik zorlama frekansında kararsızlaşmış ve sönmüştür (Şekil 4.16).

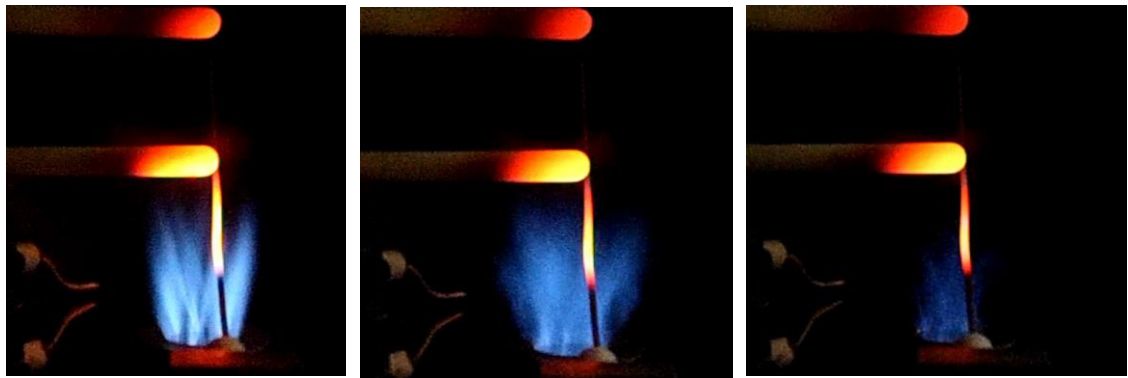




(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 16. SM1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).

Şekil 4.17’de SM1 alevinin zorlama ve sönmeye yakın anlık alev görüntüleri verilmiştir. Alev 95 Hz’de salınımlı yanmaya başlamış ve boylamasında gelen akustik ses dalgaları karşısında kararlılığını kaybederek sönmüştür. $\Phi=0.7$ ’de ise hem SM1 hem de SM2 yakıt karışımları düşük CO_2 (yüksek ısı değer ve yüksek alev hızı) içeriğine sahip olmasından dolayı alev geri tepmesine sebebiyet vermiş ve kararlı bir alev elde edilemediğinden bu eşdeğerlik oranında ilgili karışımlar için termo-akustik zorlama deneyleri yürütülememiştir.

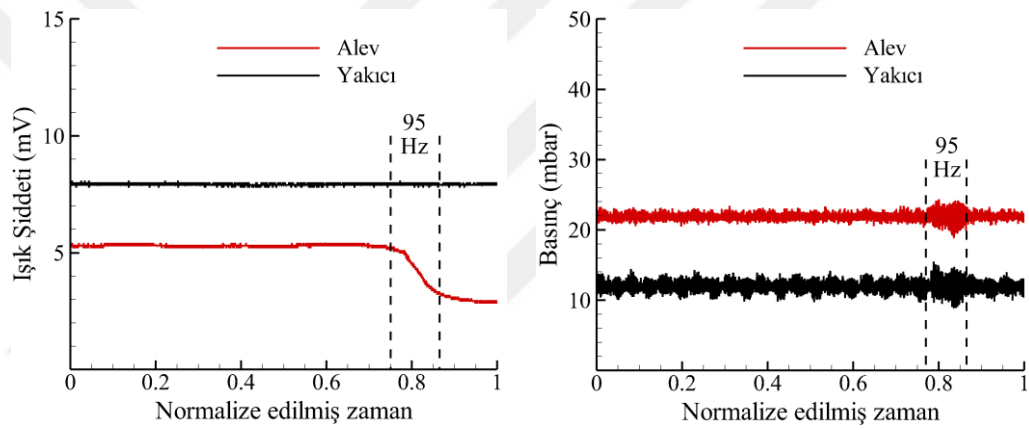
(a) Zorlama yokken
(0 Hz)(b) Zorlama altında
(95 Hz)(c) Alev sönmekten
önce (95 Hz)

Şekil 4. 17. Zorlama esnasında anlık alev görüntüleri (SM1).

Şekil 4.18-20’de SM2, SM3 ve SM4 yakıt karışımları içinde $\Phi=0.5$ ’de termo-akustik zorlama deneylerinde elde edilen ışık şiddeti ve basınç profilleri gösterilmektedir. Deneyler sonucu, bu çalışma şartlarında bütün alev 95 Hz’de sönmüştür. Bu durum, Lieuwen tarafından fakir önkarişimli gaz türbinlerde yanma kararsızlıkları

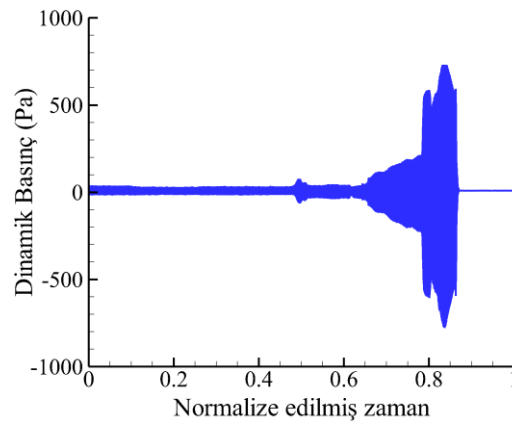
mekanizmalarının tespiti için yapılan çalışmada fakir yanma limitlerindeki alevlerin yanma kararsızlıklarına karşı aşırı duyarlı olduğu, gerçekleştirilecek akustik dalgalanmaların eşdeğerlik oranında oluşturacağı en ufak değişimin alev karakteristiklerini (alev hızı, kimyasal zaman ve adyabatik alev sıcaklığı vb.) değiştirebileceği ifade edilmiştir [35].

SM5 yakıt karışımında ise yüksek CO₂ içeriğinden (düşük ısıl değer) dolayı kararlı bir alev edilememiştir. SM1 yakıt karışımı 24.367 MJ/kg alt ısıl değere sahipken SM5 yakıt karışımının da bu değer 15.138 MJ/kg'dür. Ayrıca $\Phi=0.5$ 'de SM5 yakıt karışımının brülör giriş hızı artmakta fakir yanma limitlerine çok yakıt değerlerde çalışılmaktadır.



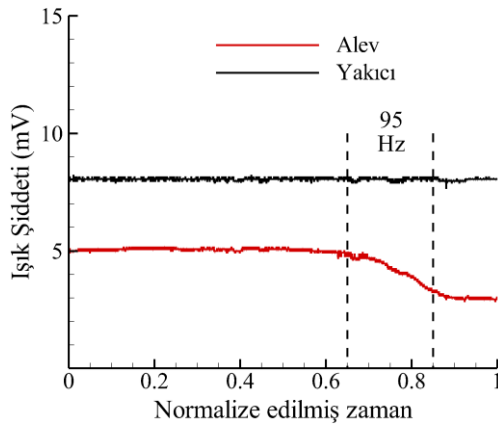
(a) Işık şiddetinin değişimi

(b) Basıncın değişimi

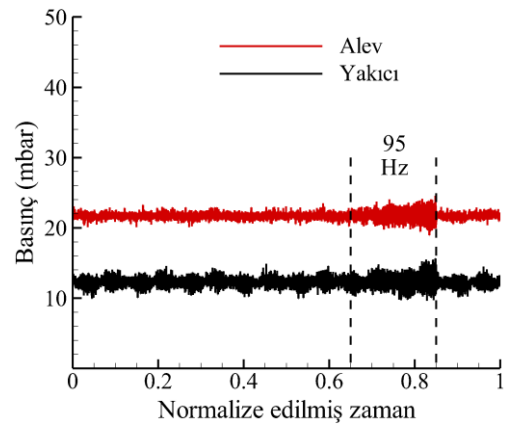


(c) Dinamik basıncın değişimi

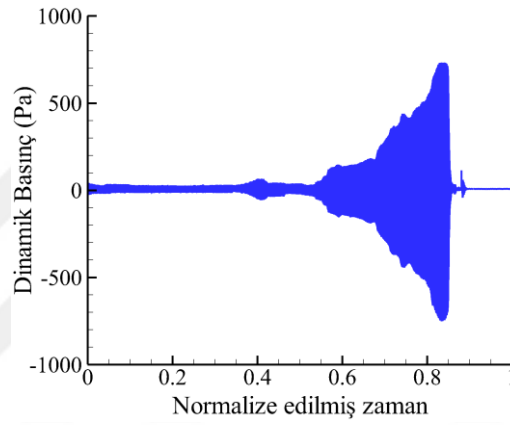
Şekil 4. 18. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).



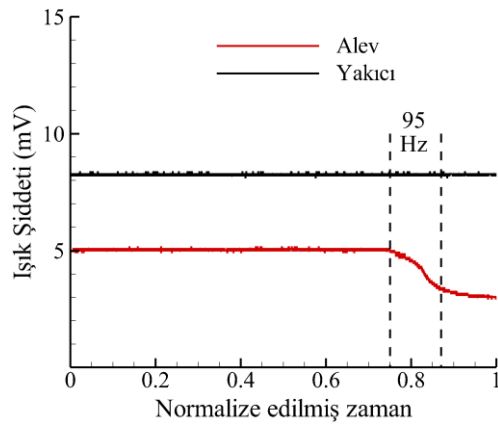
(a) Işık şiddetinin değişimi



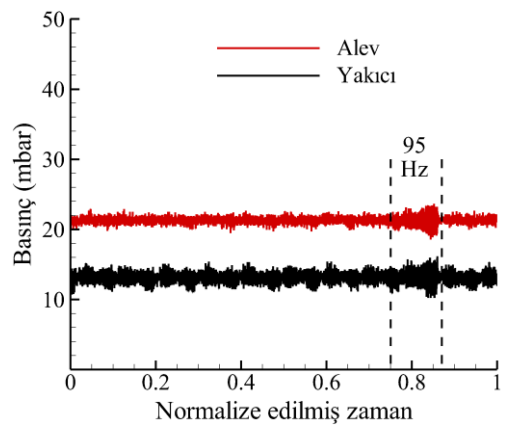
(b) Basıncın değişimi



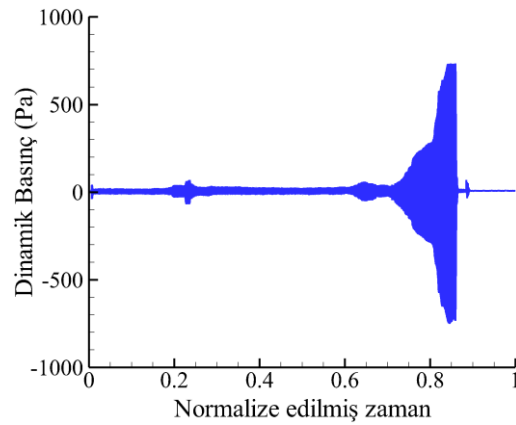
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 19. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).

(a) Işık şiddetinin değişimi



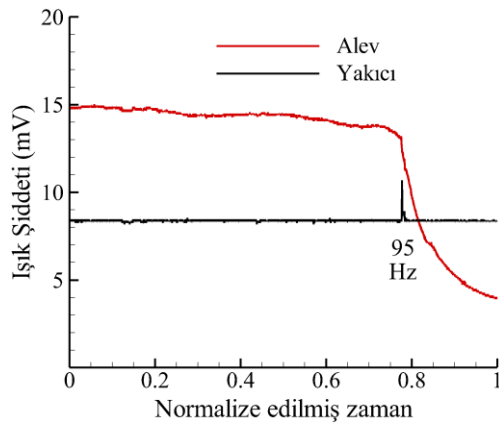
(b) Basıncın değişimi



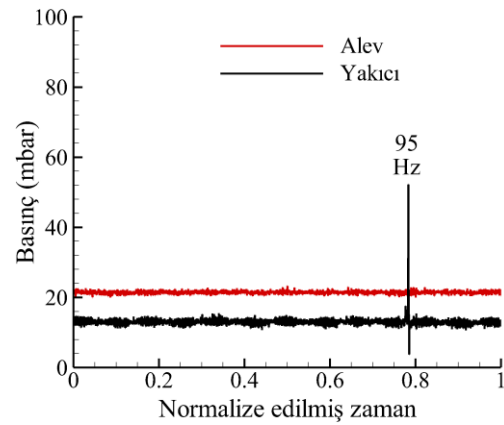
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 20. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.5$).

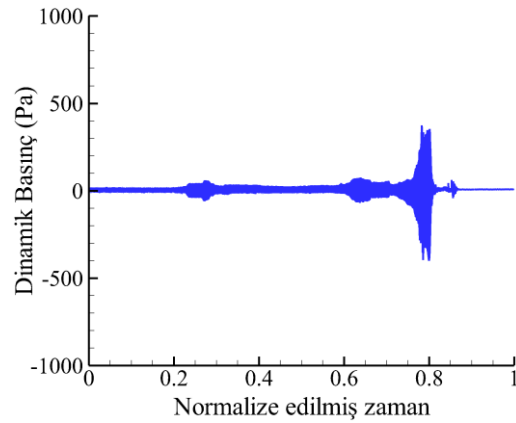
Şekil 4.21’de SM3 sentetik gaz yakıt karışımının $\Phi=0.7$ ’de termo-akustik zorlama altında alev davranışı verilmiştir. SM3 alevi zorlama altında birinci doğal akustik modda salınımlı yanmaya başlamış ve basınç dalgalanmaları dahi doyuma ulaşmadan alev geri tepmesi gerçekleşmiştir. Alev geri tepmesi sonucu SM3 alevinin yakıcı iç çeperlerine yapmış olduğu basınç 52.18 mbar olarak ölçülmüştür. Şekil 4.22’de ise SM3 alevinin zorlama ve geri tepmeden hemen önce anlık alev görüntüleri sunulmuştur.



(a) Işık şiddetinin değişimi

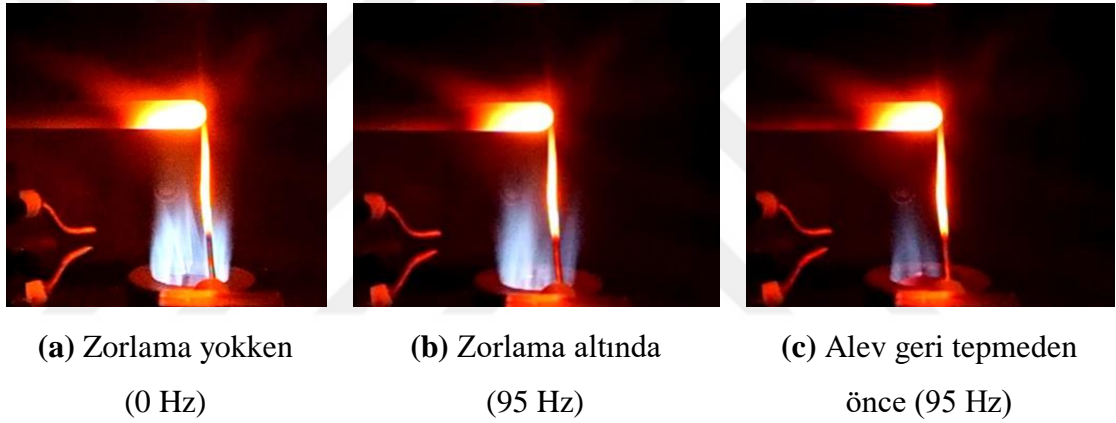


(b) Basıncın değişimi



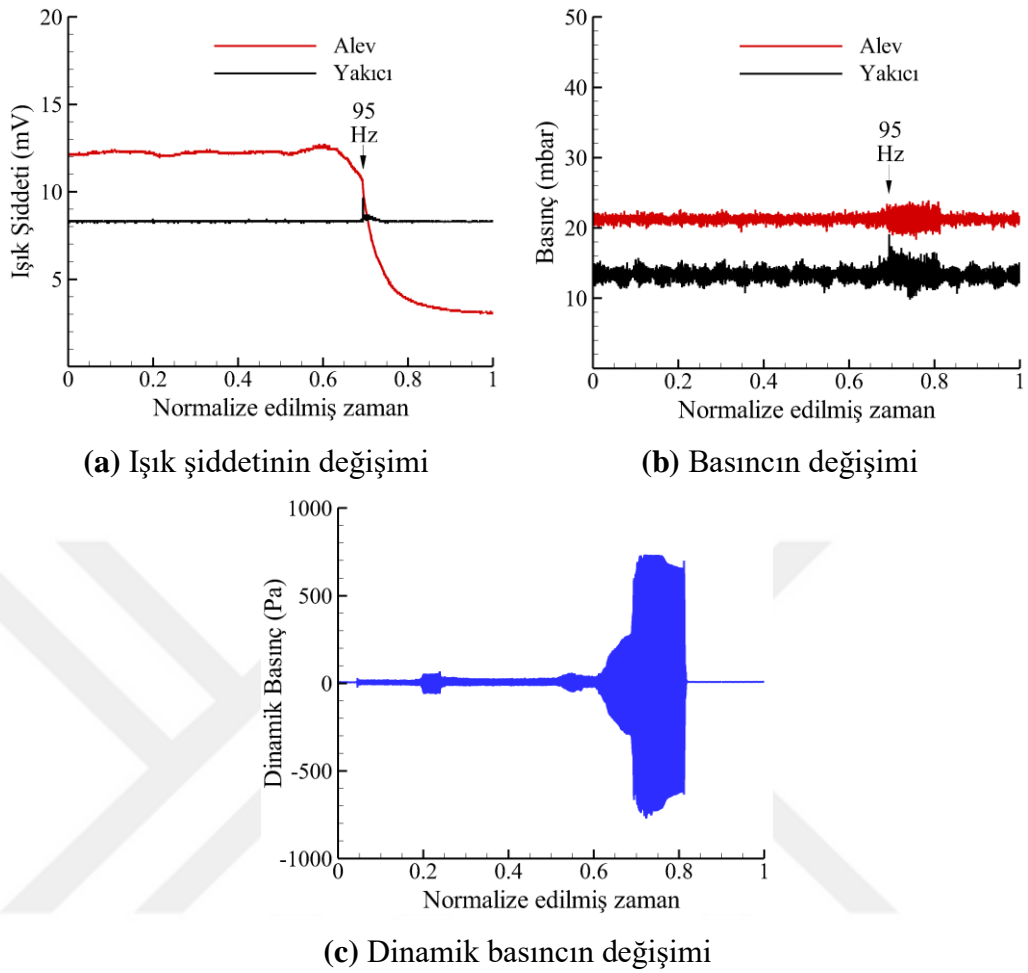
(c) Dinamik basıncın değışimi

Şekil 4. 21. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.7$).



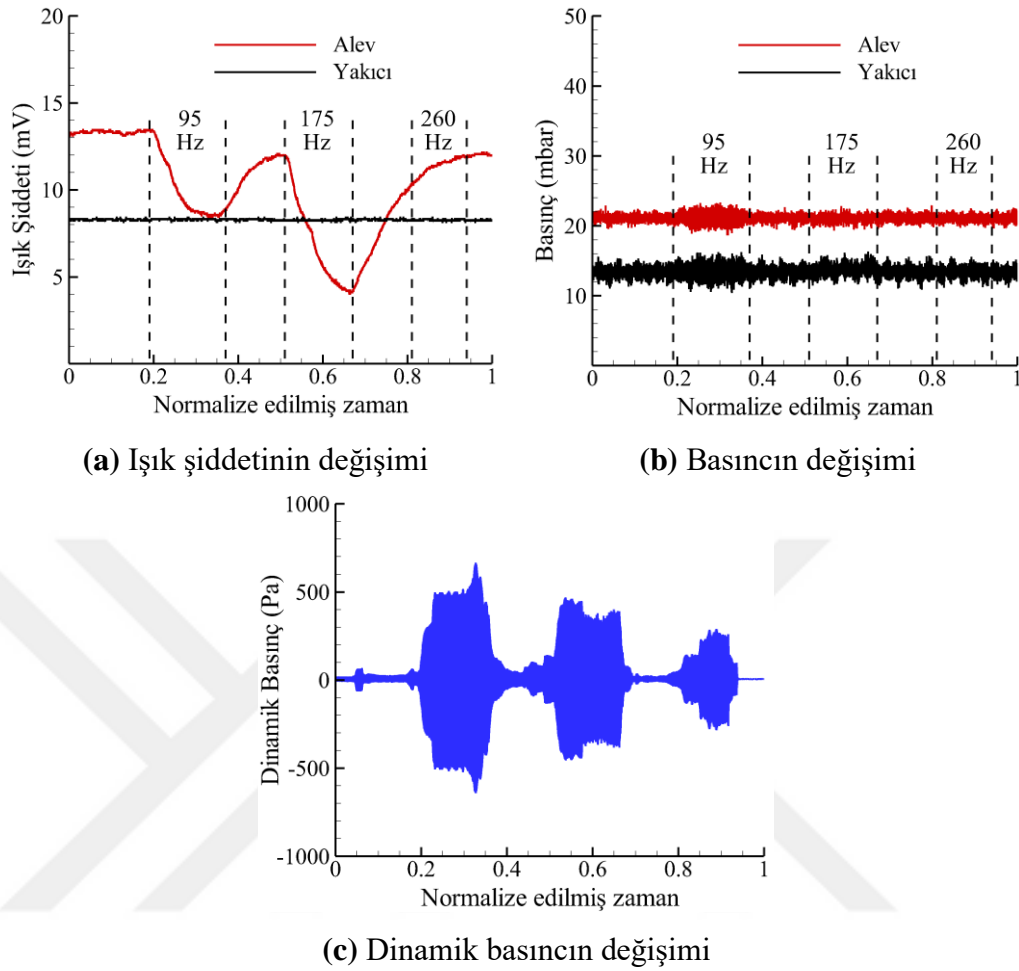
Şekil 4. 22. Zorlama esnasında anlık alev görüntüleri (SM3).

SM4 alevi SM3 aleviyle benzer davranış sergilemiş ve geri tepmiştir (Şekil 4.23). Fakat SM3 alevine kıyasla iki farklı durum oluşmuştur. Bunlardan birincisi; alev geri tepmesi sonucu yakıcı iç çeperlerinde oluşan basınç değerinin daha düşük ölçülmesi (19.07 mbar), ikincisi ise basınç salınımlarının saturasyona ulaştıktan sonra alevin geri tepmesidir. Sentetik yakıt karışımı içerisinde artan CO_2 miktarı alevin termo-akustik zorlamalara karşı daha dirençli olmasını sağlamıştır.



Şekil 4. 23. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.7$).

Şekil 4.24'de SM5 yakıt karışımının akustik zorlama altında alev davranışı gösterilmektedir. Artan CO_2 miktarı ile SM5 alevi kullanılan tüm zorlama frekanslarında kararlı bir şekilde yanmaya devam etmiştir. Alev ilk iki doğal akustik modda salınım yapmaya başlamış ve alev parlaklıkları azalmıştır. Yakıcının üçüncü doğal akustik modunda ise akustik ses dalgalanmalarının alev parlaklığı üzerine etkileri ilk iki moda kıyasla çok azdır.



Şekil 4. 24. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.7$).

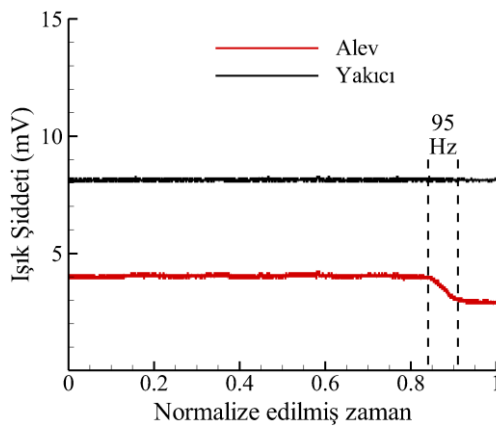
Sonuç olarak; eşdeğerlik oranının artması veya azalması alevin termo-akustik zorlamalara karşı davranışını tek yönlü etkilememektedir. Her bir yakıt karışımının kararlı yanma limitlerinde alt ve üst sınırlara yaklaşıldıkça oluşabilecek yanma kararsızlıkları alevin sönmesine veya alevin geri tepmesine neden olmaktadır. Bu sebepten ötürü; önkarişimli yanma sistemlerinde çalışma şartlarının çok dar bir eşdeğerlik oranı aralığında tutulması ve yanma kararsızlıklarının meydana geldiği şartların önceden belirlenmesi gerekmektedir. Aksi durumda basınç dalgalanmaları ve daimî olmayan ısı salınımı arasındaki eşleşmeden kaynaklanan termo-akustik yanma kararsızlıkları yakıcılarda ciddi yapısal hasarlara neden olabilir veya yakıcının optimum ömrünü kısaltabilir. Ayrıca eşdeğerlik oranının artmasıyla alev parlaklıkları bütün yakıt karışımlarında artmıştır. En yüksek alev parlaklığı SM3 alevinde $\Phi=0.7$ 'de elde edilmiştir.

4.3.1.2. Girdap Sayısının Etkisi

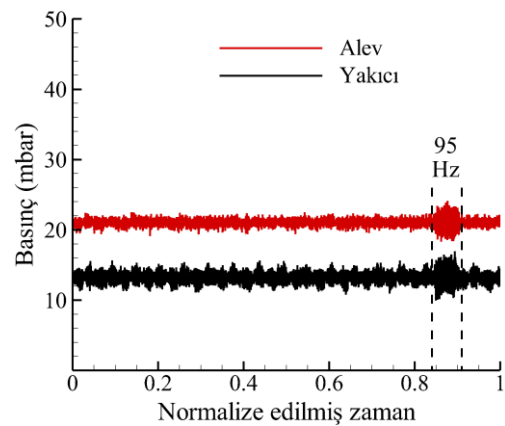
Girdap üreticinin kanatçıklarına çarpan akış sonucu oluşan teğetsel hız bileşeni akışı spiralli bir harekete zorlar. Oluşan döngüsel akış yakıt/hava karışımının daha homojen ve hızlı bir şekilde karışmasını sağlar ve genellikle birçok yanma sisteminde kararlı çalışma aralıklarını genişletir [198]. Ayrıca yapılan çalışmalar girdaplı akışların alev şekli, boyutu, kararlılığı, yanma yoğunluğu, akış alanı vb. önemli parametrelerde geniş ölçekli etkilerinin olduğunu göstermektedir [199].

Girdaplı akışlar gaz türbinli yakıcılarda sıkça kullanılmasına rağmen, girdap üreticilerinin yanma kararsızlıkları üzerine etkisini incelemek için yapılan çalışmalar çok kısıtlıdır. Çünkü; bu karmaşık yapıya sahip yakıcı elemanlarının türbülanslı akışlardaki geniş ölçekli dinamiklerini gözlemleyebilmek için yüksek maliyetli deney sistem ve ekipmanlarına ihtiyaç duyulmaktadır [200]. Ayrıca bu sistemlerin sayısal olarak modellenmesinde akışkanlar fiziğinin temel denklemlerinin yanma şartlarına uygun şekilde özelleştirilerek doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

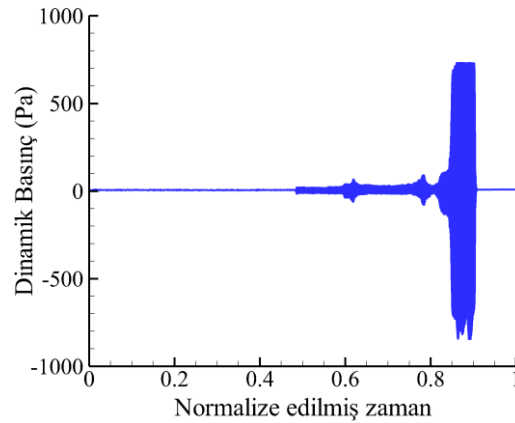
Tez çalışmasının bu kısmında ise sentetik gaz yakıt karışımlarının girdap sayısının $S=0.2-1.6$ aralığında 0.2 'şer aralıklarla artırarak termo-akustik zorlamalara karşı alev davranışı incelenmiştir. Şekil 4.25'de SM1 alevinin $S=0.6$ ve $\Phi=0.5$ 'te zorlama altında alev davranışı gösterilmektedir. Aynı karışım $S=0.2$ 'de olduğu gibi yakıcının birinci doğal akustik modunda sönmüştür (Şekil 4.16). Şekil 4.26'da ise SM1 karışımının anlık alev görüntüleri verilmiştir. Girdap sayısının artmasıyla birlikte alev sıcaklığı, boyu ve parlaklığı azalmış, alev radyal yönde genişlemiştir. Fakat değişen bu yanma karakteristikleri alevin akustik zorlama altındaki davranışını iyileştirmemiştir.



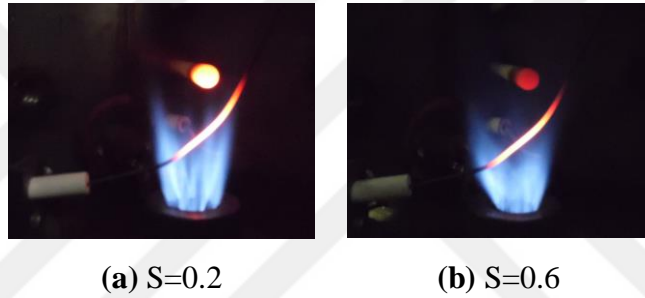
(a) Işık şiddetinin değişimi



(b) Basıncın değişimi

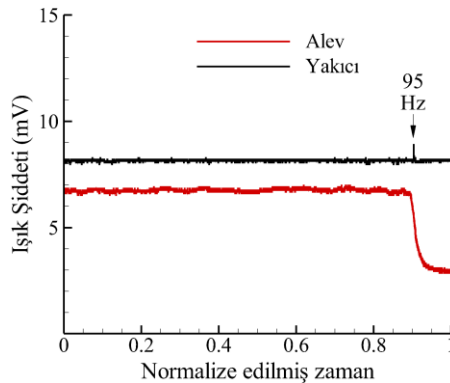


(c) Dinamik basınçın değişimi

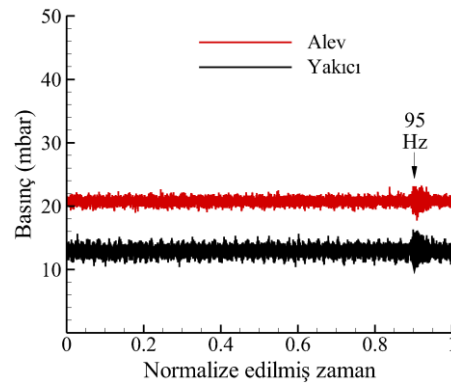
Şekil 4. 25. SM1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.5$).(a) $S=0.2$ (b) $S=0.6$

Şekil 4. 26. SM1 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.

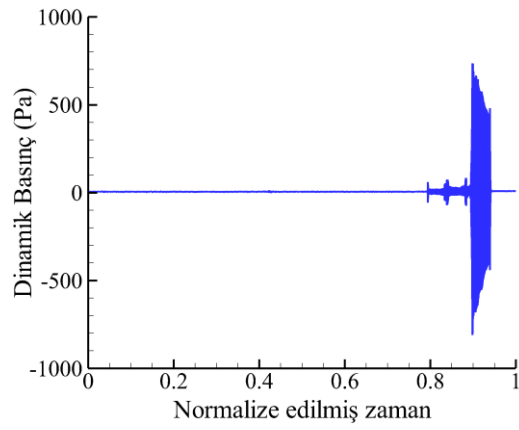
Şekil 4.27-29'da ise SM2 yakıt karışımının $\Phi=0.6$ 'da ve üç farklı girdap sayısında ($S=0.4$, 0.6 ve 1.0) zorlama altında alev davranışı gösterilmektedir. $S=0.2$ 'de ise aynı karışım termo-akustik zorlama altında birinci akustik modda sönmüştü (Şekil 4.18). Girdap sayısının artmasıyla birlikte üç girdap sayısında da alev birinci akustik modda yakıcı içerisine ilerlemiş fakat alev geri tepmesi olayı gözlemlenmiştir. Fakat yakıcı iç çeperlerinde yüksek basınç artışları gözlemlenmemiştir.



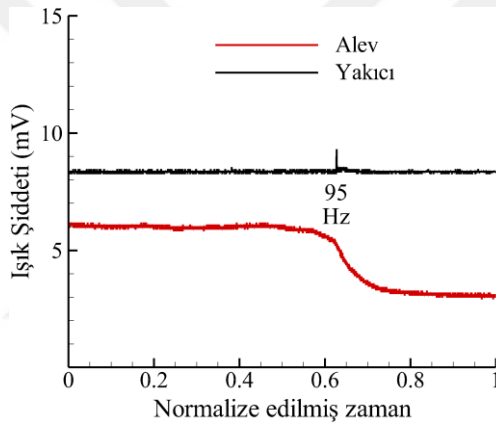
(a) Işık şiddetinin değişimi



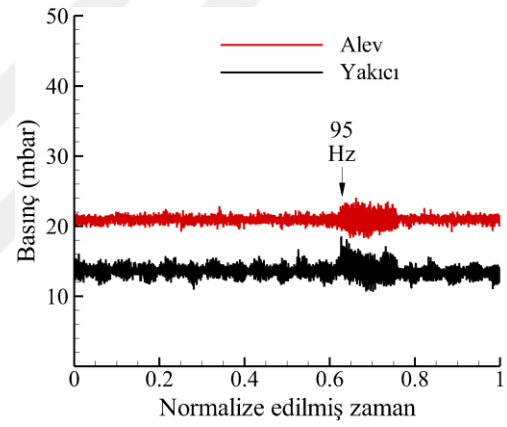
(b) Basıncın değişimi



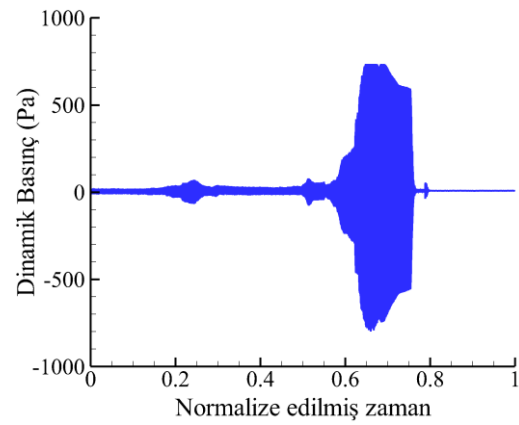
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 27. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

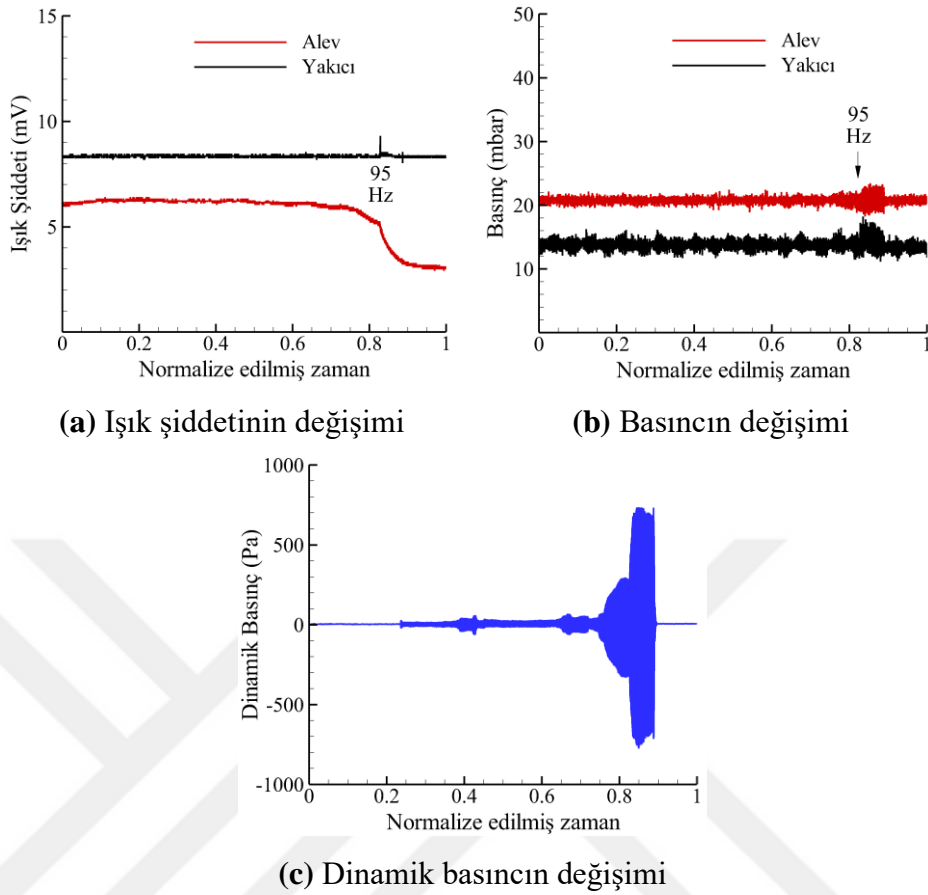


(b) Basıncın değişimi



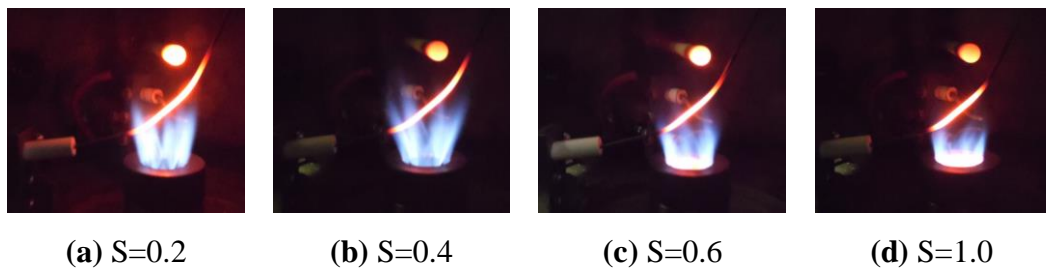
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 28. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).



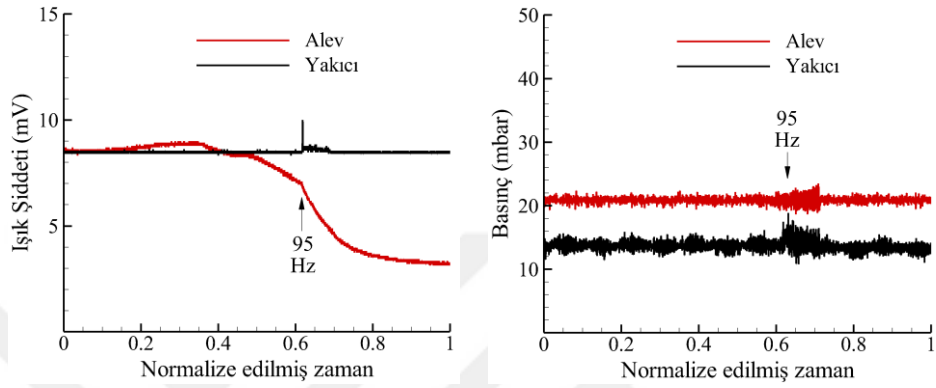
Şekil 4. 29. SM2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).

Ayrıca SM2 karışımının anlık alev görüntüleri Şekil 4.30'da verilmiştir. Girdap sayısının $S=0.2$ 'den $S=0.4$ 'e yükseltilmesiyle alev radyal yönde genişlemiştir. Yüksek girdap sayılarında ise ($S=0.6$ ve 1.0) alev boyu küçülmüş alev girdap üretici içinde yanmaya başlamıştır. Literatürde, girdap sayısının belirli bir kritik değeri geçtikten sonra (yüksek girdap sayılarında, $S>0.4$) brülör girişinde girdap bozulması kaynaklı merkezi, halka şekilli resirkülasyon bölgeleri oluşturduğu ve bu resirkülasyon bölgelerinin yakıcı içerisine ilerleyerek alev geri tepmesine neden olduğu bilinmektedir [20].



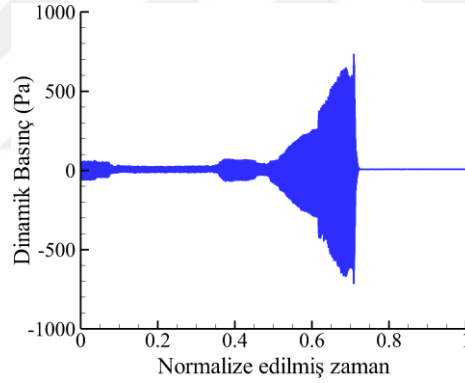
Şekil 4. 30. SM2 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.

SM3 yakıt karışımının $S=0.6$ ve $S=1.0$ 'daki zorlama altında alev SM2 yakıt karışımında olduğu gibi benzer davranış sergilemiş ve alev geri tepmesi gözlemlenmiştir (Şekil 4.31-32). Ayrıca alev geri tepmesi esnasında yakıcı içerisinde oluşan basınçlar sırasıyla 18.46 ve 18.84 mbar ölçülmüştür. Girdap sayısının artmasıyla alev yakıcı içerisinde yanmaya başlamıştır (Şekil 4.33).



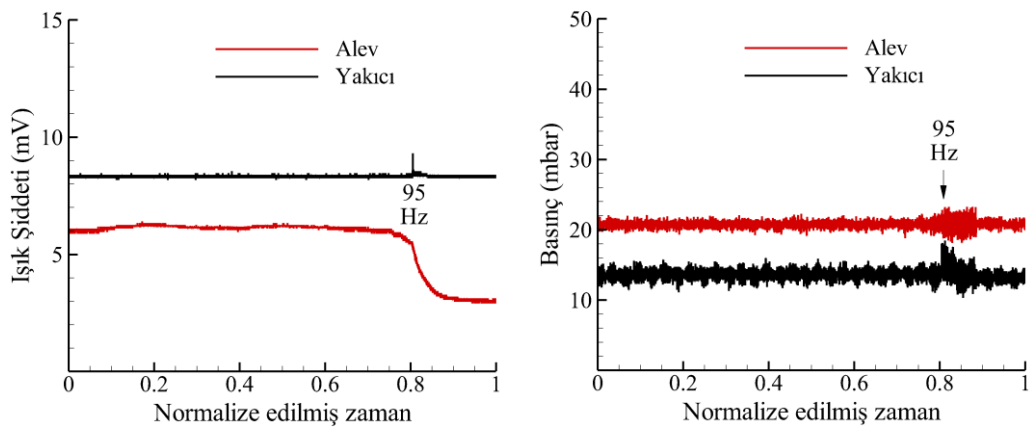
(a) Işık şiddetinin değişimi

(b) Basıncın değişimi



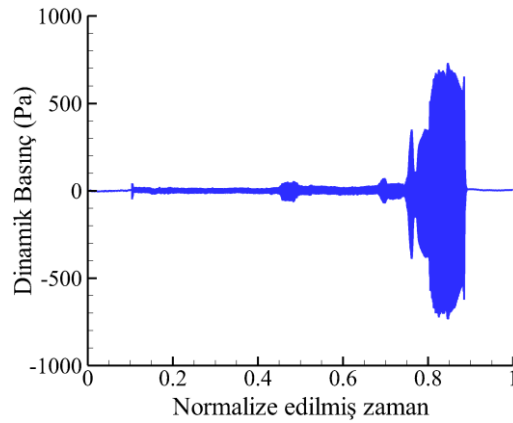
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 31. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).



(a) Işık şiddetinin değişimi

(b) Basıncın değişimi

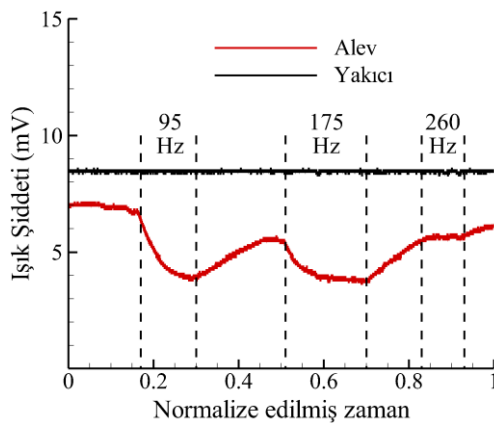


(c) Dinamik basıncın değışimi

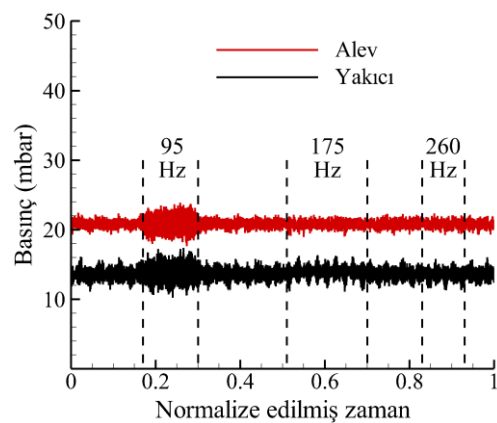
Şekil 4. 32. SM3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).(a) $S=0.2$ (b) $S=0.6$ (c) $S=1.0$

Şekil 4. 33. SM3 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.

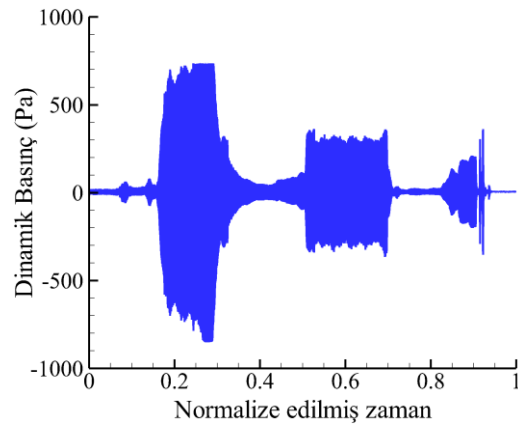
SM4 yakıt karışımı ise farklı girdap sayılarında ($S=0.4$ ve $S=1.0$) akustik zorlama altında ilk üç yakıt karışımından farklı olarak kararlı bir davranış sergilemiştir. Alevler bütün zorlama frekanslarında harici olarak oluşturulan yanma kararsızlıklarına karşı kararlı yanmaya devam etmiştir (Şekil 4.34-35). 0-300 Hz zorlama frekans aralığında ilk üç doğal akustik modda da dirençli alev elde edilmiştir. Şekil 4.36'da alevlerin zorlama yokken ve farklı zorlama frekanslarındaki anlık alev görüntüleri verilmiştir.



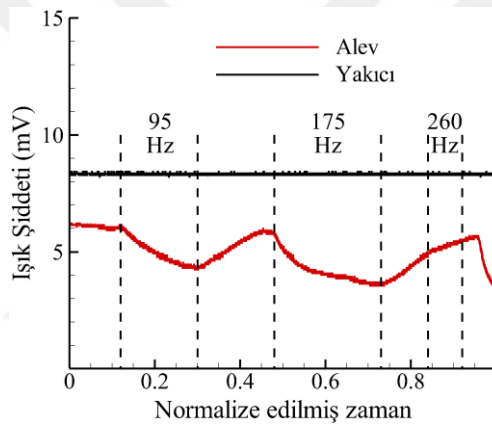
(a) Işık şiddetinin değışimi



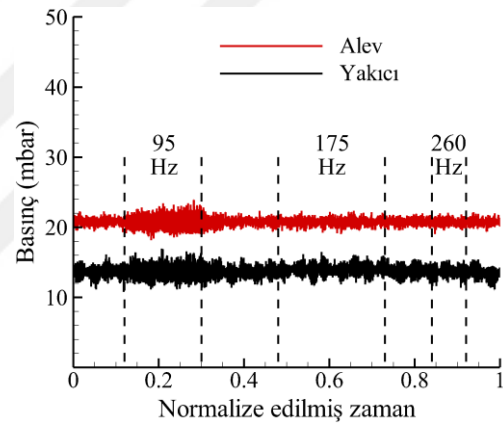
(b) Basıncın değışimi



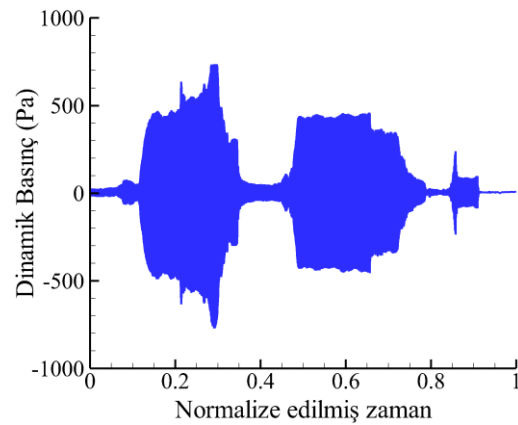
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 34. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

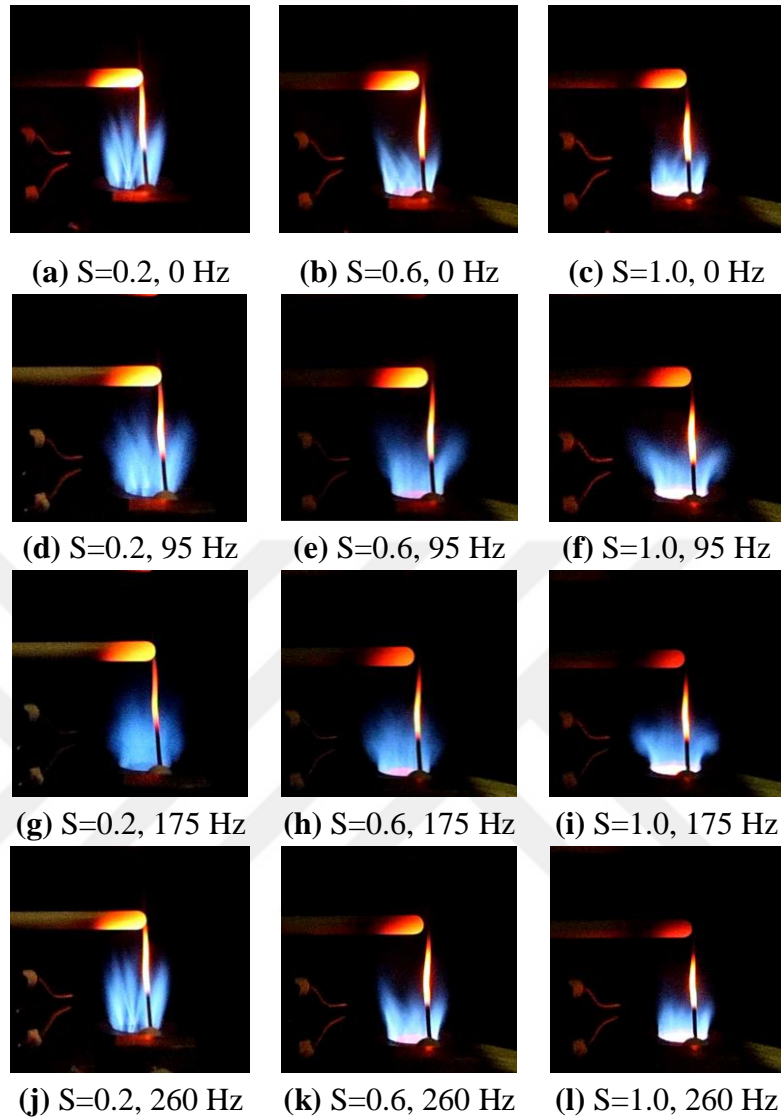


(b) Basıncın değişimi



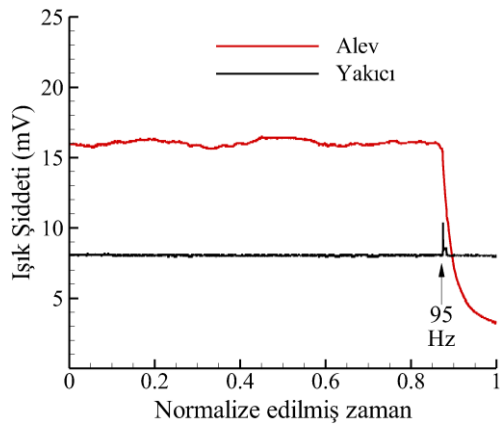
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 35. SM4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).

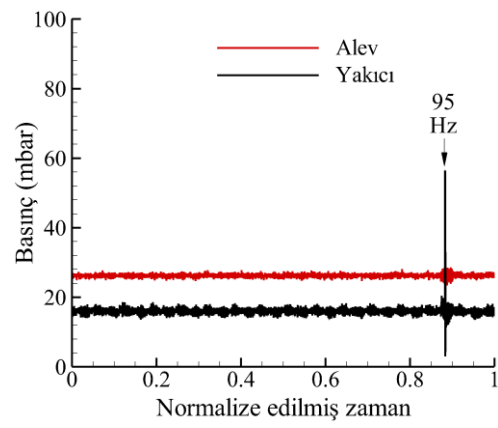


Şekil 4. 36. SM4 karışımının farklı girdap sayılarında anlık alev görüntüleri.

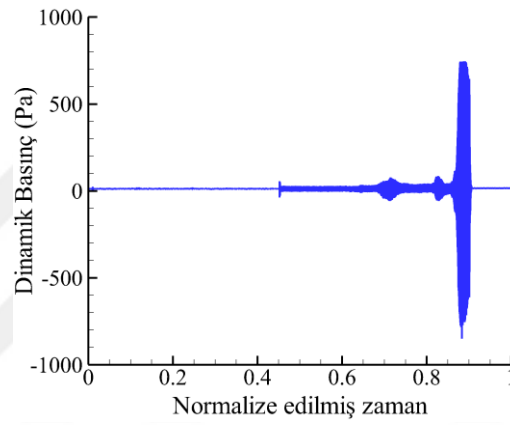
SM5 yakıt karışımı ise bütün girdap sayılarında ($S=0.2-1.6$) ve üç farklı eşdeğerlik oranında ($\Phi=0.6, 0.8$ ve 1.0) termo-akustik zorlamalara maruz bırakılmıştır. Benzer sonuçların elde edilmesinden dolayı sadece $S=0.2$ 'de elde edilen sonuçların tamamı, diğer girdap sayılarında ise sadece ışık şiddeti ve basınç profilleri sunulmuş, dinamik basınç ölçümleri sunulmamıştır. $S=0.2$ ve $\Phi=0.6$ 'da yapılan akustik zorlama sonuçları Şekil 4.12'de sunulmuştu. $\Phi=0.8$ ve $\Phi=1.0$ 'de elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.37-38'de gösterilmiştir. Alevler, bütün girdap sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında benzer davranışlar sergilemiş, $\Phi=0.6$ 'da bütün akustik zorlamalara karşı kararlı yanmaya devam eden alev, $\Phi=0.8$ ve $\Phi=1.0$ 'da yakıcı içerisine ilerleyerek alev geri tepmesine neden olmuştur (Şekil 4.39-59). Yapılan ölçümlerde tespit edilen tek değişiklik alev geri tepmesi esnasında yakıcı çeperlerinde oluşan basınçtır.



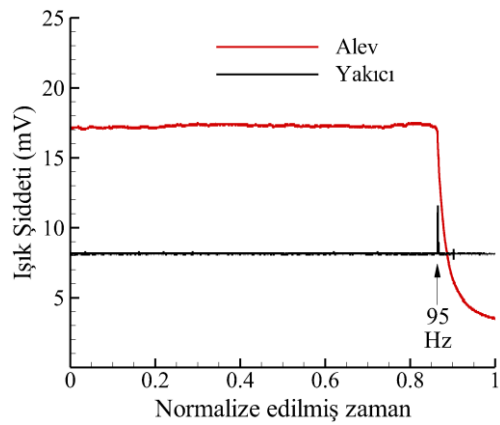
(a) Işık şiddetinin değişimi



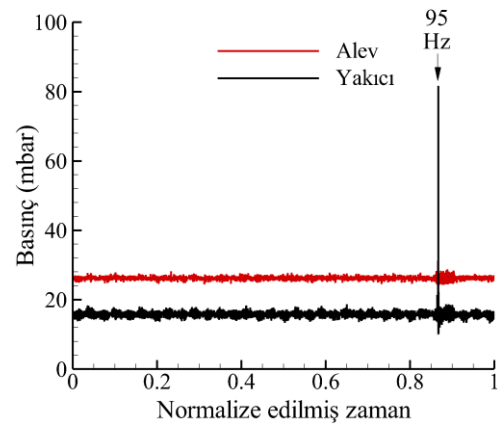
(b) Basıncın değişimi



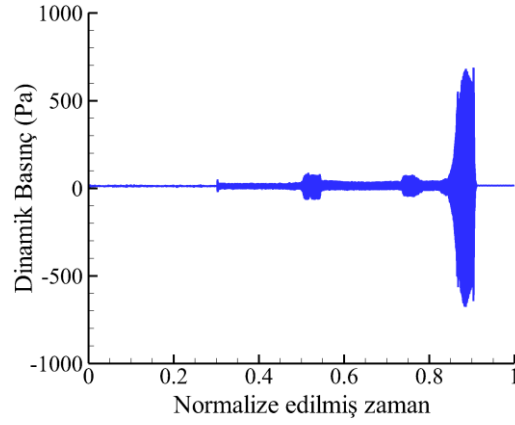
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 37. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.8$).

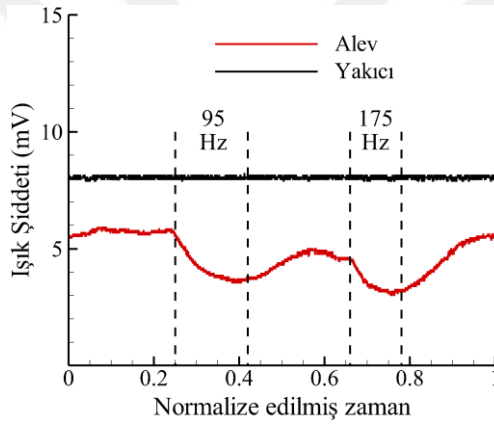
(a) Işık şiddetinin değişimi



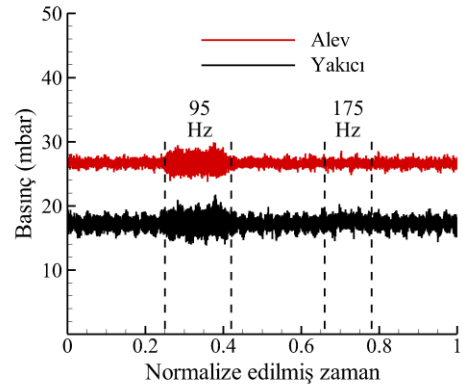
(b) Basıncın değişimi



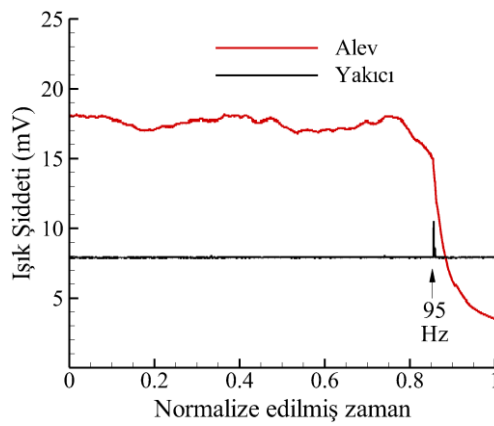
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 38. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=1.0$).

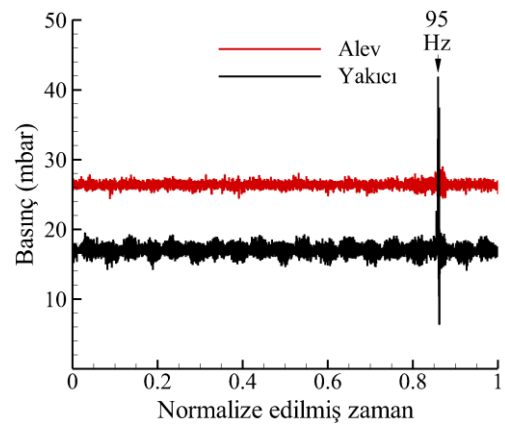
(a) Işık şiddetinin değişimi



(b) Basıncın değişimi

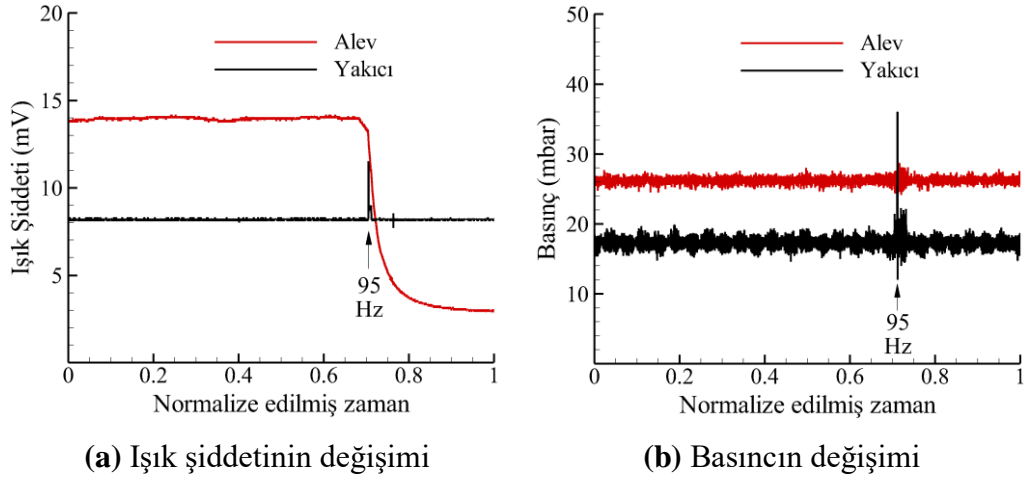
Şekil 4. 39. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

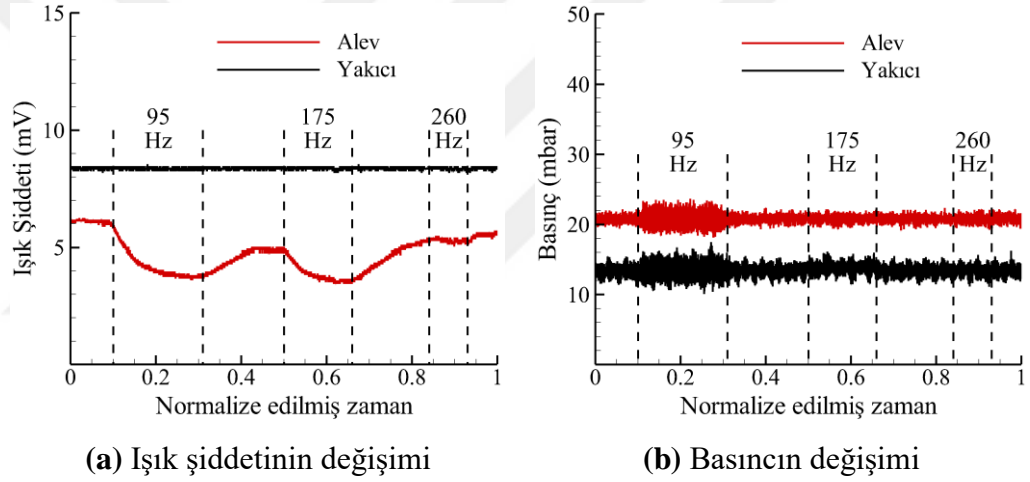


(b) Basıncın değişimi

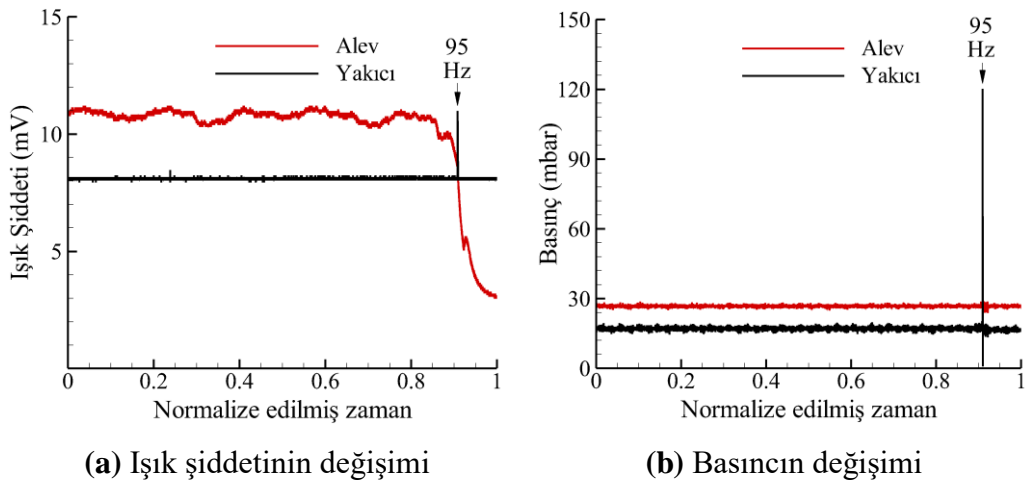
Şekil 4. 40. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.8$).



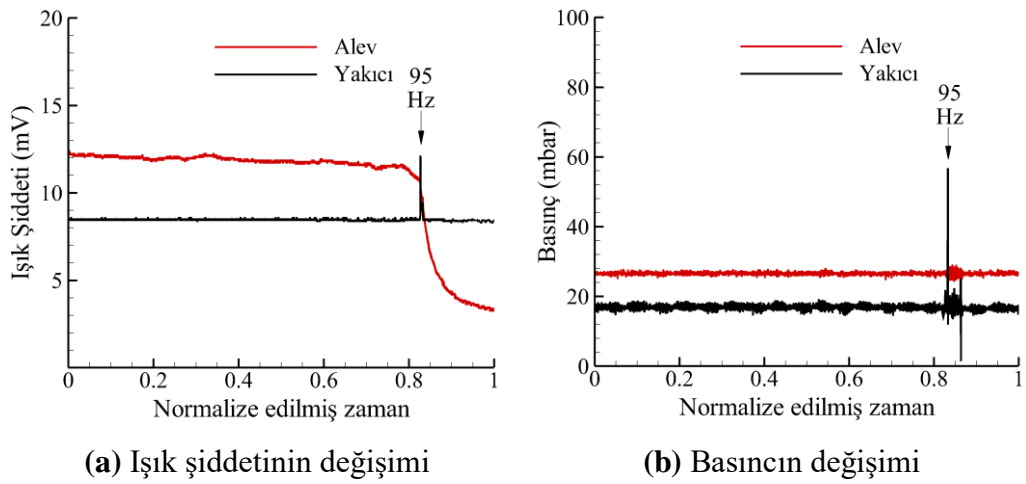
Şekil 4. 41. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=1.0$).



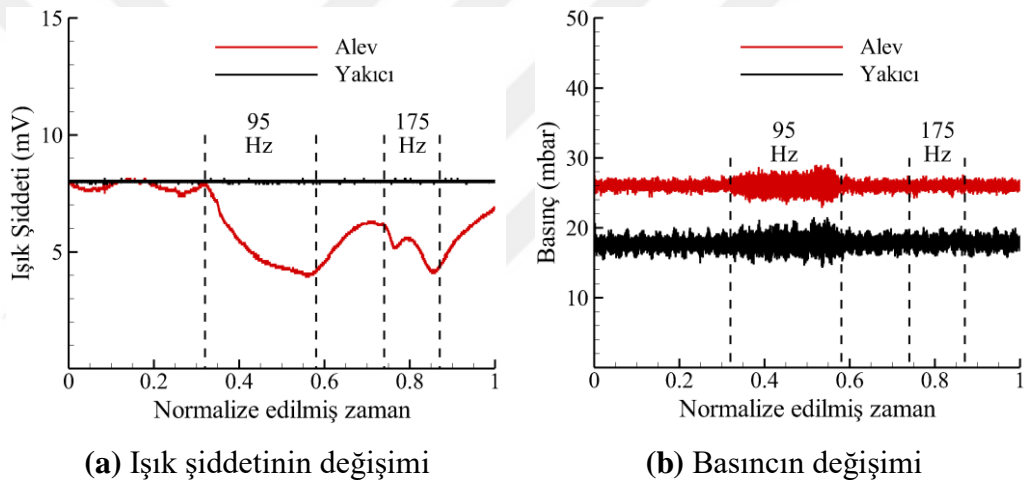
Şekil 4. 42. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).



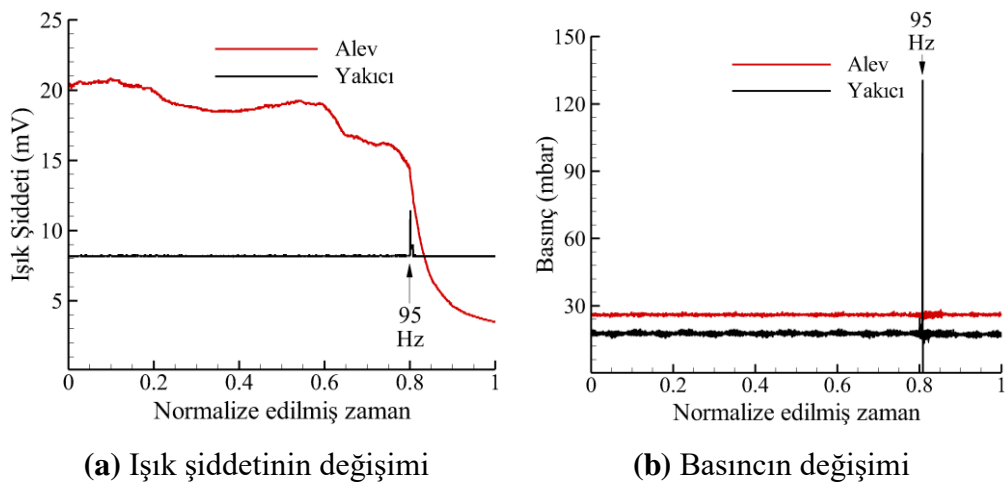
Şekil 4. 43. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.8$).



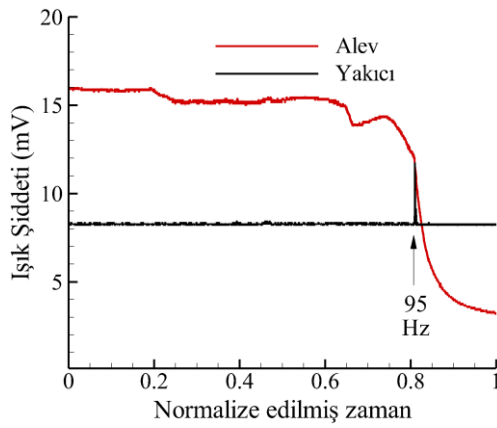
Şekil 4. 44. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=1.0$).



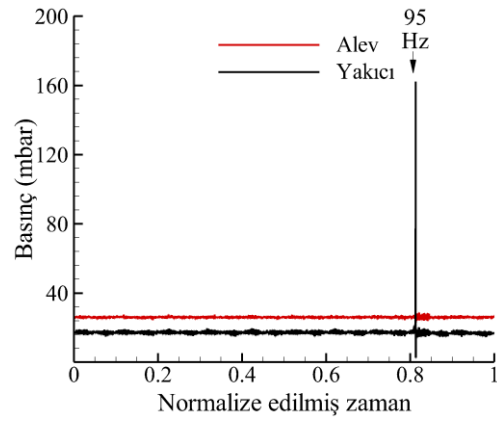
Şekil 4. 45. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=0.6$).



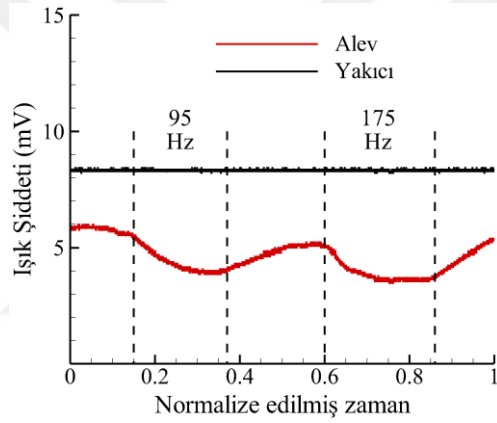
Şekil 4. 46. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=0.8$).



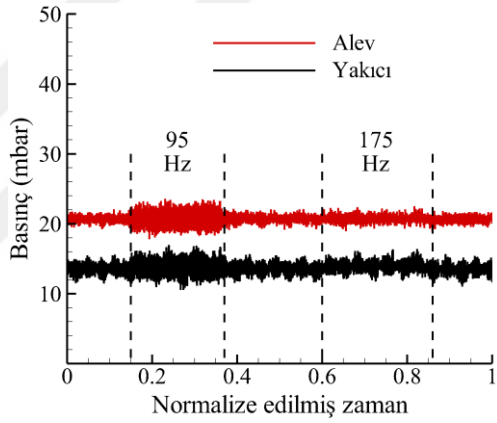
(a) Işık şiddetinin değişimi



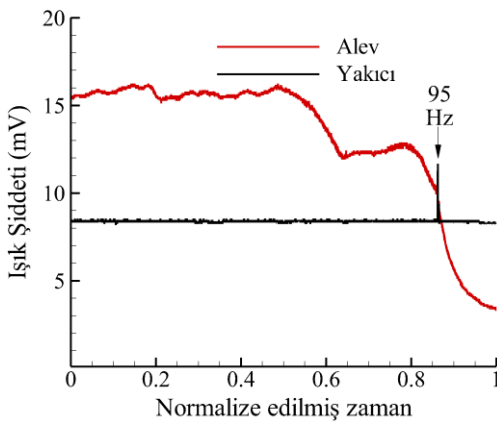
(b) Basıncın değişimi

Şekil 4. 47. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=1.0$).

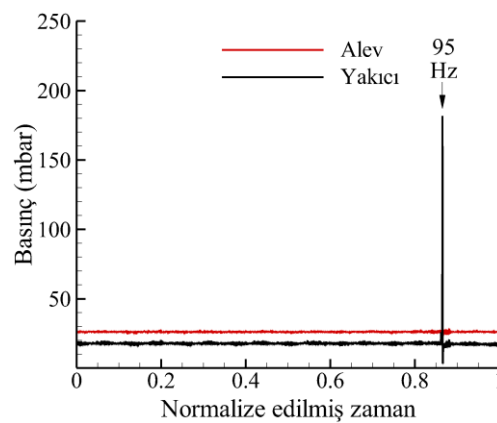
(a) Işık şiddetinin değişimi



(b) Basıncın değişimi

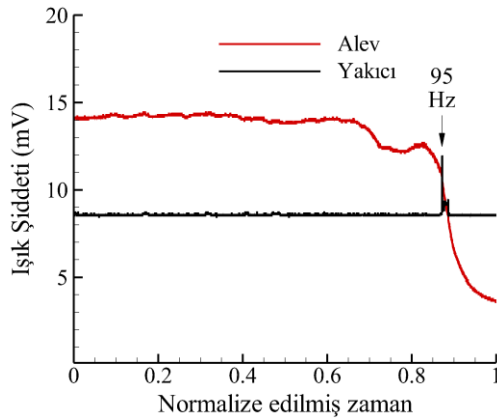
Şekil 4. 48. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

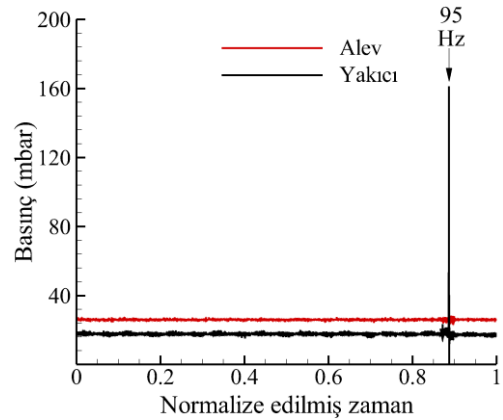


(b) Basıncın değişimi

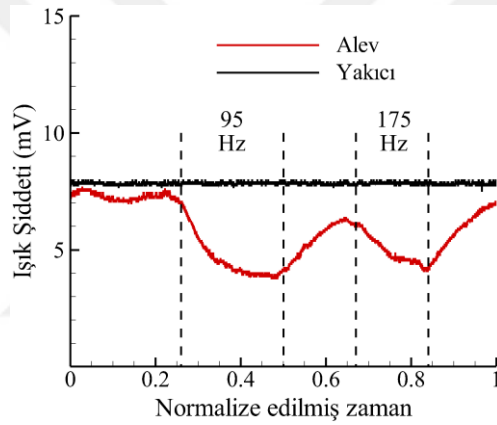
Şekil 4. 49. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.8$).



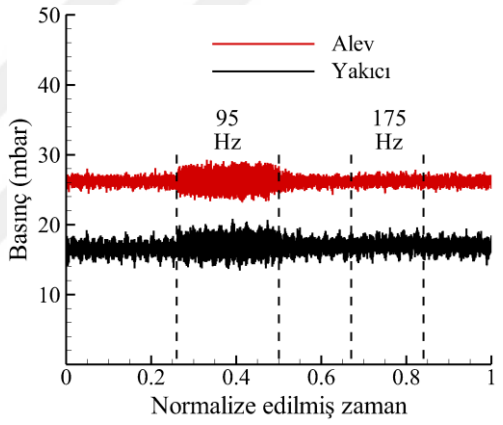
(a) Işık şiddetinin değişimi



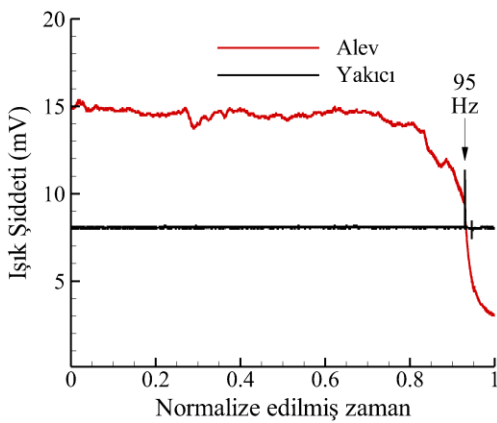
(b) Basıncın değişimi

Şekil 4. 50. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=1.0$).

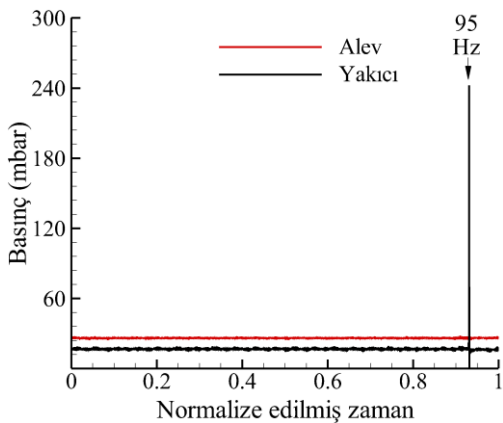
(a) Işık şiddetinin değişimi



(b) Basıncın değişimi

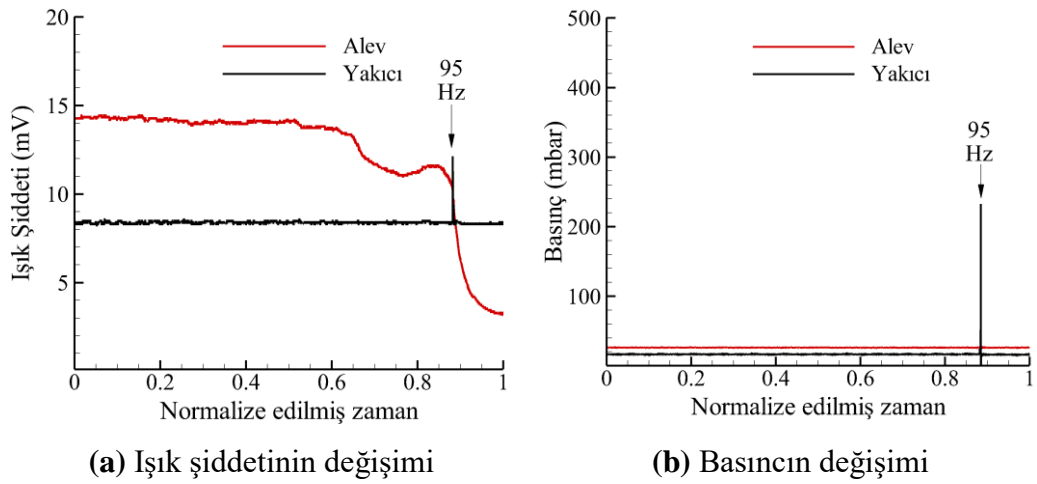
Şekil 4. 51. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

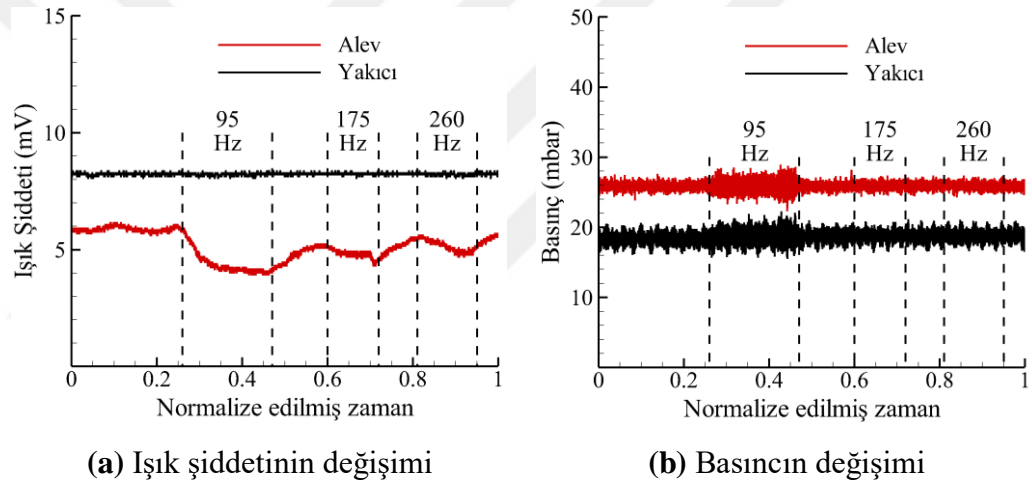


(b) Basıncın değişimi

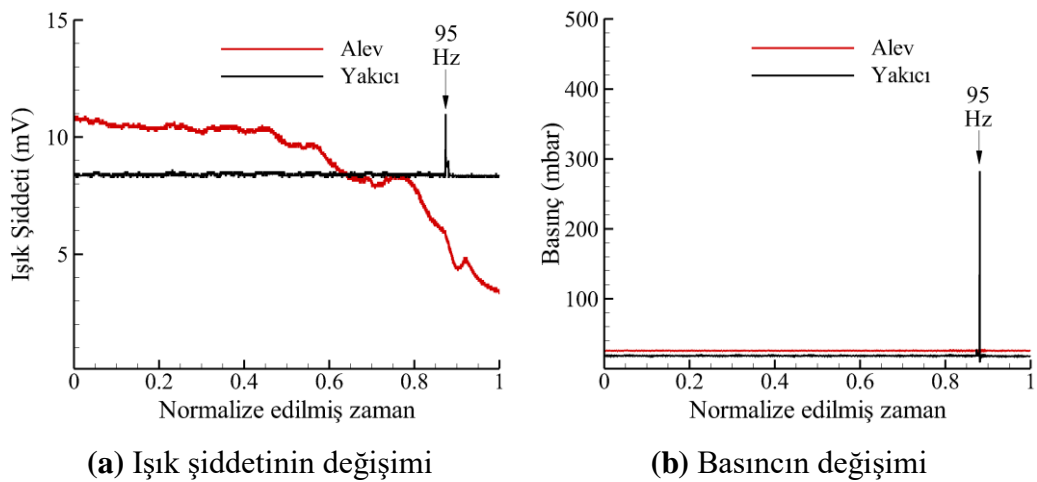
Şekil 4. 52. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=0.8$).



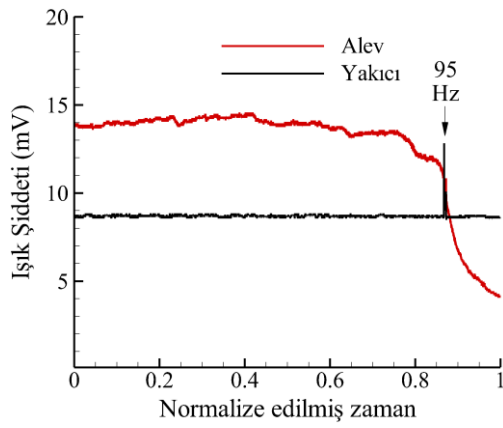
Şekil 4. 53. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=1.0$).



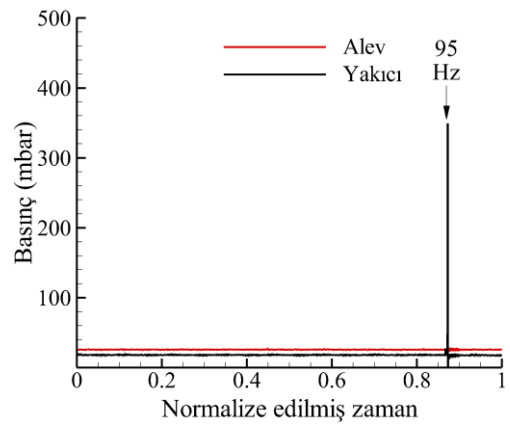
Şekil 4. 54. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=0.6$).



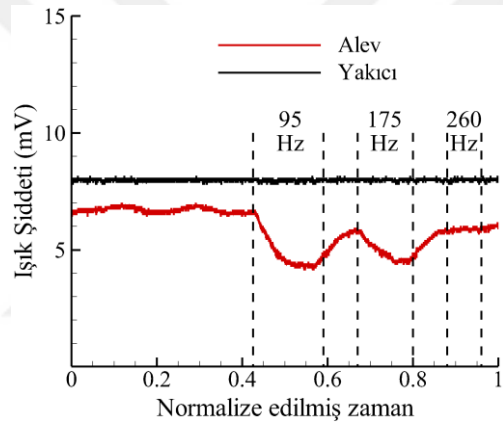
Şekil 4. 55. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=0.8$).



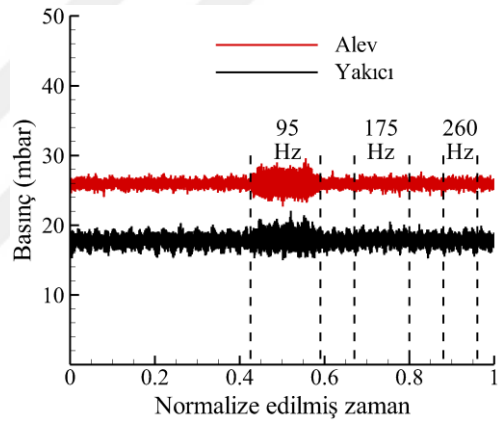
(a) Işık şiddetinin değişimi



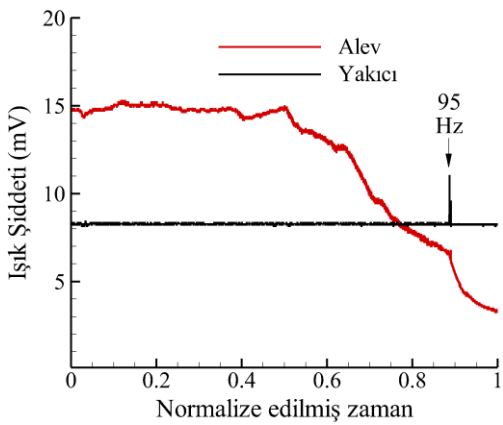
(b) Basıncın değişimi

Şekil 4. 56. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=1.0$).

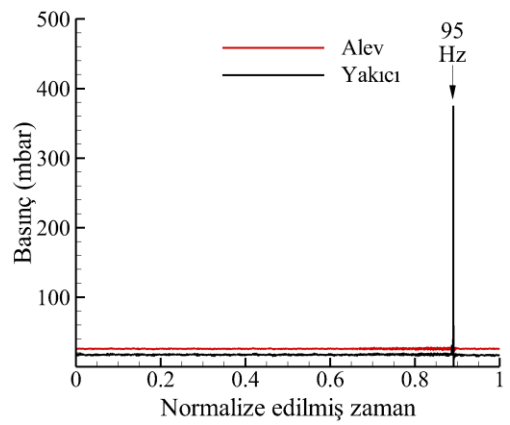
(a) Işık şiddetinin değişimi



(b) Basıncın değişimi

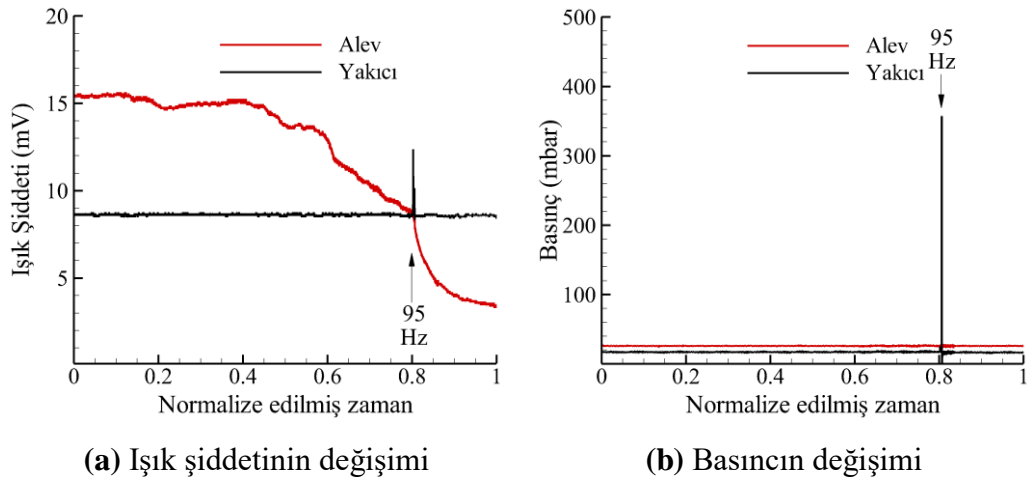
Şekil 4. 57. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.6$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi



(b) Basıncın değişimi

Şekil 4. 58. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.6$ ve $\Phi=0.8$).



Şekil 4. 59. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.6$ ve $\Phi=1.0$).

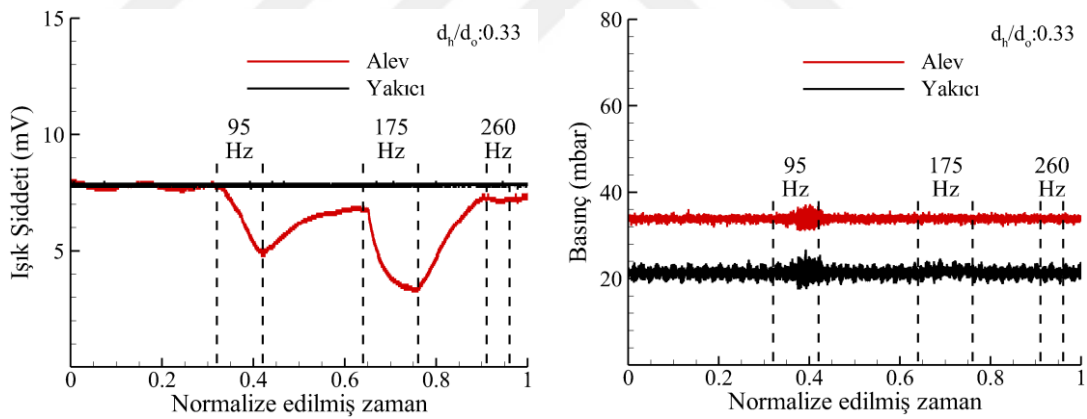
Tablo 4.4’de SM5 sentetik gaz yakıt karışımının farklı girdap sayısı ve eşdeğerlik oranlarında, termo-akustik zorlama sonucu alevin yakıcı içerisine ilerleyerek geri tepmesi sonucu yakıcı iç çeperlerinde gerçekleşen basınç değerleri gösterilmektedir. Sonuçlar; yüksek girdap sayılarında oluşan basınç değerlerinin daha yüksek ölçüldüğünü göstermiştir. En düşük basınç değerleri $S=0.4$ ’de stokiyometrik şartlarda ölçülmüştür.

Tablo 4. 4. SM5 yakıtının akustik zorlama altında gerçekleşen alev geri tepmesi sonucu yakıcı iç çeperlerinde oluşan basınç değerleri.

	Basınç değerleri (mbar)	
	$\Phi=0.8$	$\Phi=1.0$
S=0.2	56.38	81.63
S=0.4	41.88	36.01
S=0.6	120.23	56.76
S=0.8	130.61	162.2
S=1.0	181.65	162.28
S=1.2	242.38	232.39
S=1.4	282.67	349.04
S=1.6	375.36	357.21

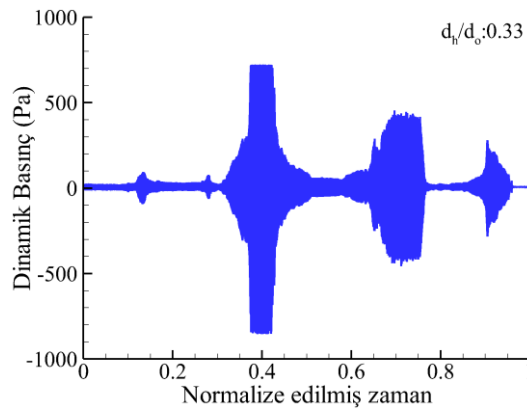
4.3.1.3. Çap Oranının (d_h/d_o) Etkisi

Literatürde kullanılan girdap üreteçlerinin çap oranları birçok çalışmada $d_h/d_o=0.5$ olarak seçilmiştir [126, 188, 201, 202]. Ayrıca bazı çalışmalarda $d_h/d_o=0.3$ 'e yakın değerlerde girdap üreteçleri de kullanılmaktadır [203-205]. Çap oranının azalmasıyla birlikte yakıt/hava karışımı girdap üretecinin kanatçıkların daha fazla geçmekte, aksel akış için ayrılan iç halkanın kesit alanının azalmasına neden olmaktadır. Böylece daha yüksek türbülans yoğunluğuna sahip akışlar elde edilebilmektedir. Bu bölümde, $d_h/d_o=0.33$ 'te üretilen girdap üreteçleri SM5 yakıtı için sabit eşdeğerlik oranında ($\Phi=0.6$), farklı girdap sayılarında ($S=0.4-1.4$) termo-akustik zorlamaya maruz bırakılmış, yanma kararsızlıkları tetiklenerek alev davranışı incelenmiştir. Bütün alevler akustik zorlama altında bütün zorlama frekanslarında kararlı yanmaya devam etmiş herhangi bir alev sönmesi veya geri tepmesi gerçekleşmemiştir. Yapılan deneyler sonucu elde edilen ışık şiddeti ve basınç profilleri Şekil 4.60-65'te, anlık alev görüntüleri ise Şekil 4.66'da sunulmuştur. Artan girdap sayısı ile alev boyu kısalmış alev yakıcı içinde yanmaya başlamıştır.



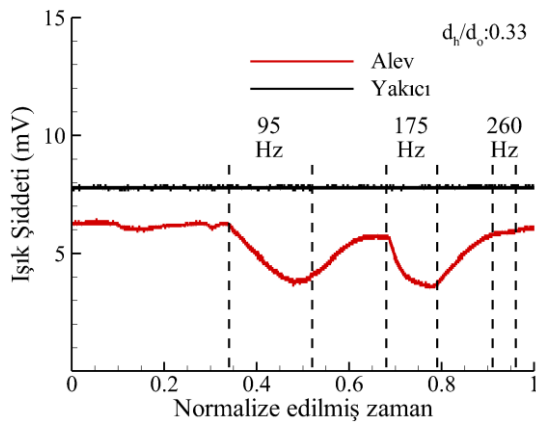
(a) Işık şiddetinin değişimi

(b) Basıncın değişimi

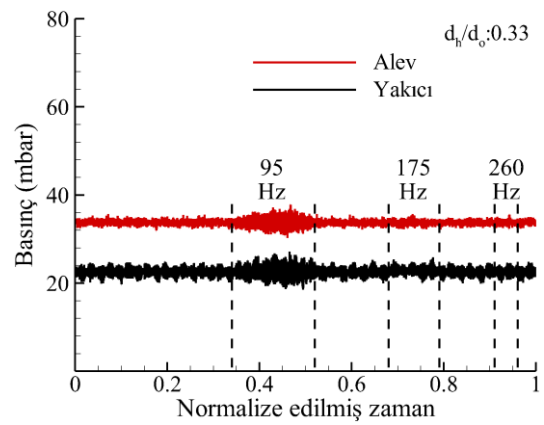


(c) Dinamik basıncın değişimi

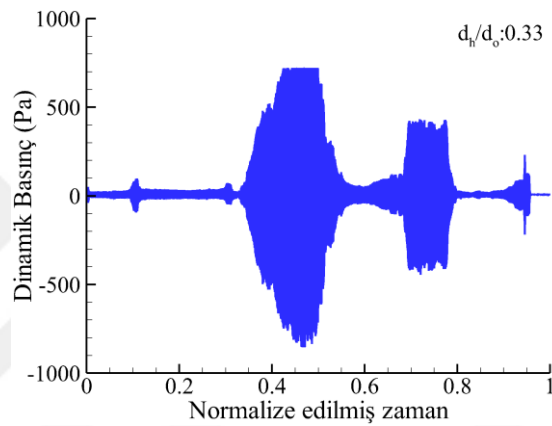
Şekil 4. 60. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.4$ ve $\Phi=0.6$).



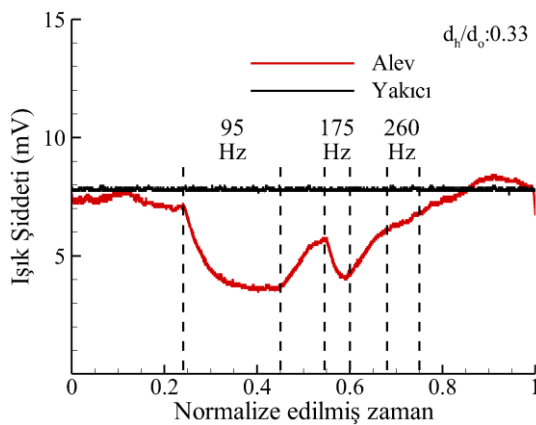
(a) Işık şiddetinin değişimi



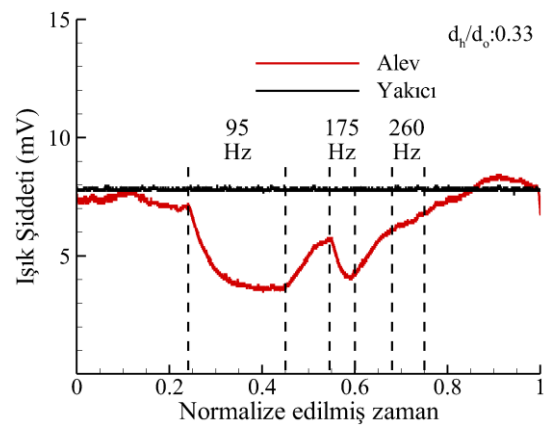
(b) Basıncın değişimi



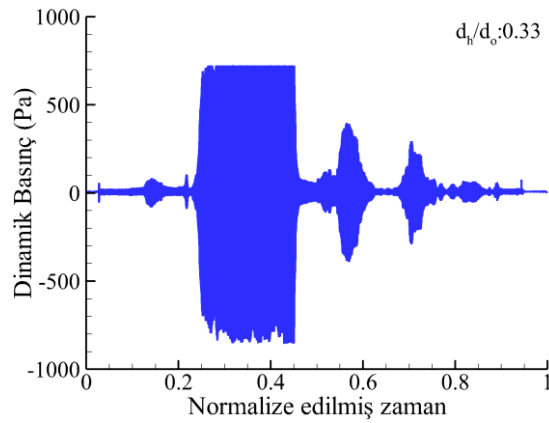
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 61. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.6$ ve $\Phi=0.6$).

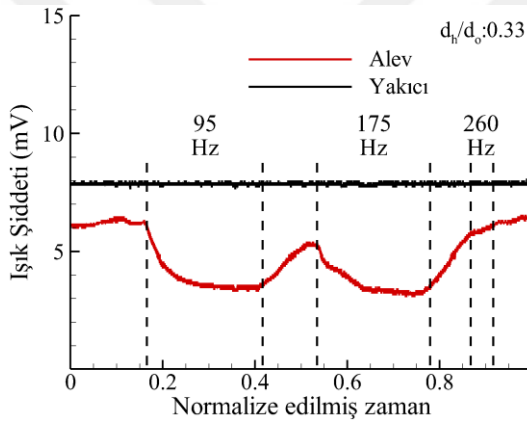
(a) Işık şiddetinin değişimi



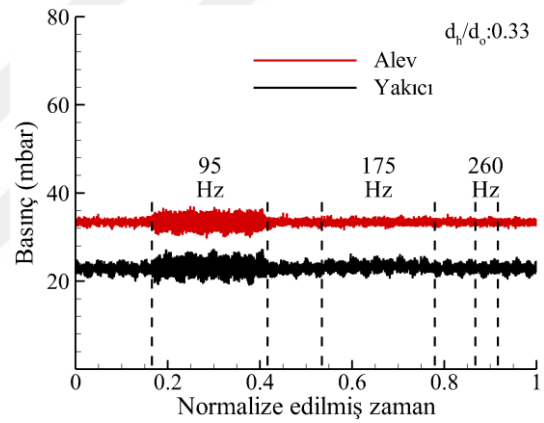
(b) Basıncın değişimi



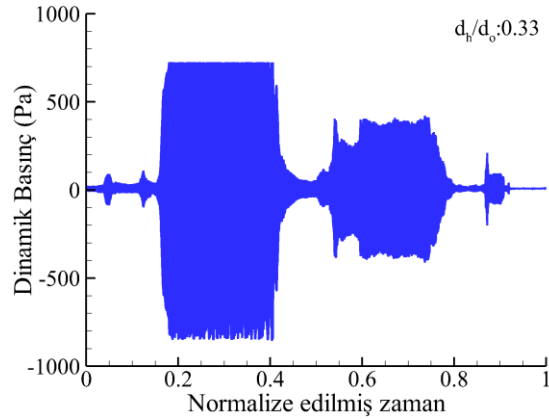
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 62. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.8$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

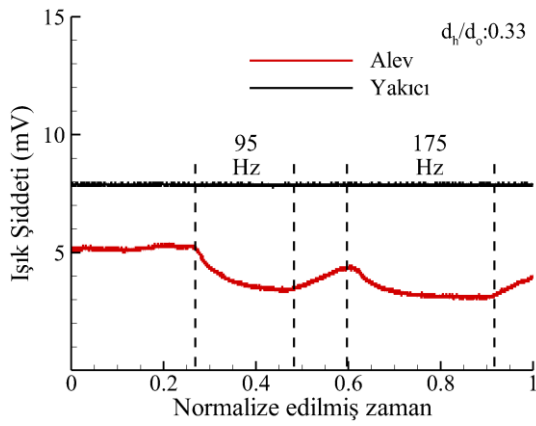


(b) Basıncın değişimi

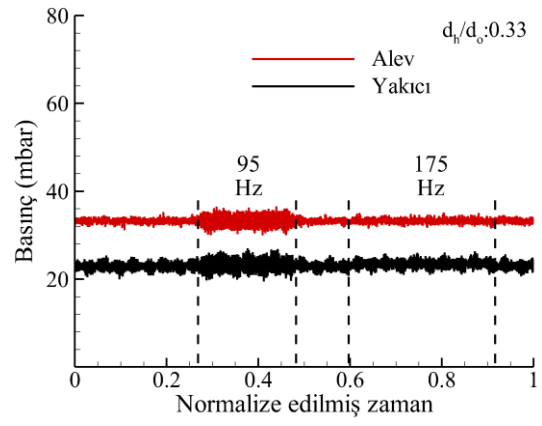


(c) Dinamik basınçın değişimi

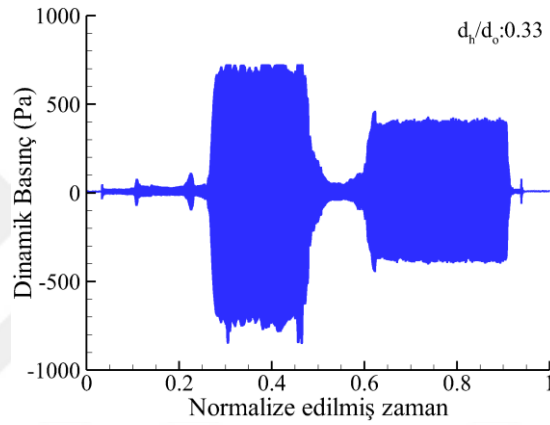
Şekil 4. 63. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.0$ ve $\Phi=0.6$).



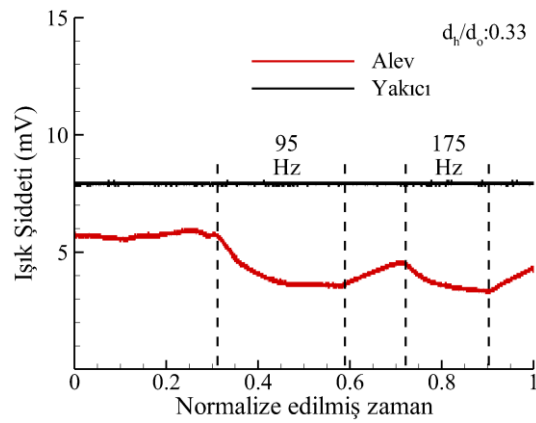
(a) Işık şiddetinin değişimi



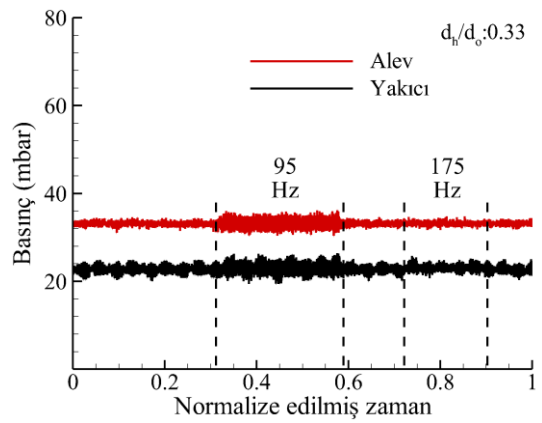
(b) Basıncın değişimi



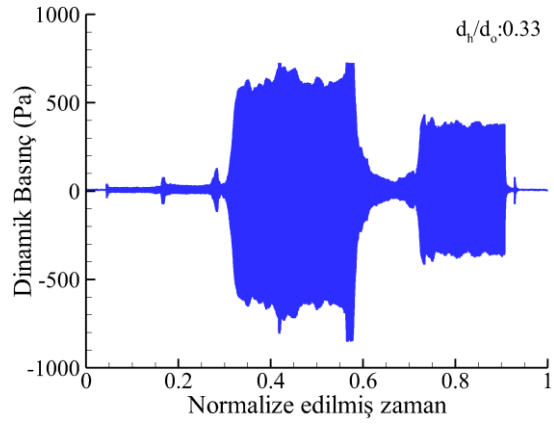
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 64. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.2$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi



(b) Basıncın değişimi



(c) Dinamik basıncın değışimi

Şekil 4. 65. SM5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=1.4$ ve $\Phi=0.6$).

(a) $S=0.4$ (b) $S=0.6$ (c) $S=0.8$ (d) $S=1.0$ (e) $S=1.2$ (f) $S=1.4$

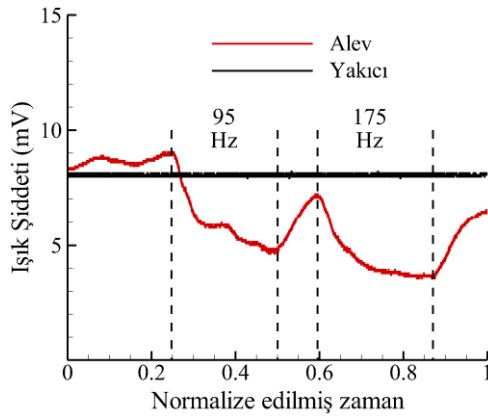
Şekil 4. 66. SM5 karışımının farklı girdap sayılarında alev görüntüleri ($d_h/d_o=0.33$).

4.3.2. Yüksek CO İçeriğine Sahip ($H_2/CO:0.5$) Sentetik Gazların Alev Davranışı

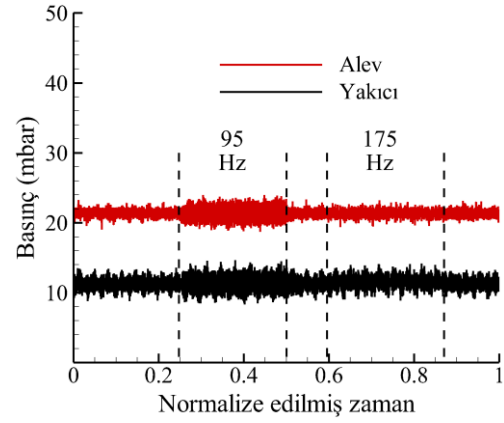
Sentetik gazın üretim (gazlaştırma) teknikleri veya kullanılan hammaddeye göre yapısında bulunan $H_2/CO/CO_2/CH_4$ bileşimleri değişkenlikler göstermektedir. Genellikle doğalgazdan üretilen sentetik gazlarda H_2 içeriği yüksek olmakta, biokütleden üretilen sentetik gazlarda ise CO içeriği yüksektir [206, 207]. Ayrıca gazlaştırma işleminin basınçlı veya atmosferik şartlarda gerçekleşmesi, hava veya oksijen kullanımı, yatak sıcaklığı ve diğer parametrelerde sentetik gazların kompozisyonlarını önemli derecede etkilemektedir [208].

CO, sentetik gazlar içerisinde H_2 'den sonra bulunan ikinci önemli yakıt bileşenidir ve yanma kinetikleri H_2 'e göre oldukça farklıdır. CO reaksiyonları yüksek aktivasyon enerjisine sahip olmasından dolayı yüksek sıcaklıklarda bile yavaş gerçekleşmektedir. Fakat yakıt içerisinde bulunan H_2 yanma reaksiyonunun aktif radikallerini (özellikle OH radikalini) oluşturarak CO'nin CO_2 'e dönüşümünü hızlandırmakta ve bu reaksiyon üzerinden tamamlanan yanma reaksiyonlarında ısı salınımının önemli bir miktarı bu yolla gerçekleşmektedir [209]. Fakat yeterli H_2 gazının bulunmadığı durumlarda bu reaksiyon mekanizmasının gerçekleşme oranı azalır ve çok yavaş gerçekleşen bir yanma reaksiyonu olan $CO-O_2$ ile direk reaksiyona girer [91]. Bu sebepten yüksek CO içeren yakıt karışımlarının alt yanma limitleri daha yüksektir.

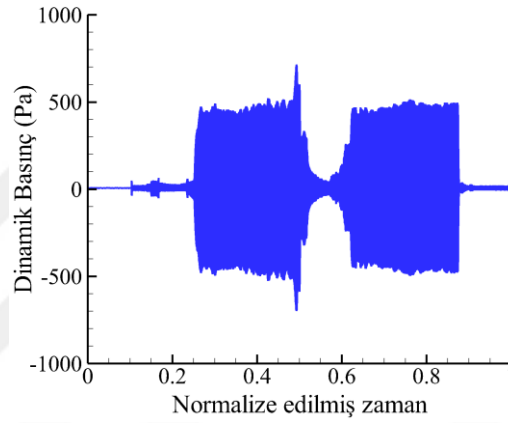
Tez çalışmasının bu kısmında düşük H_2/CO oranına sahip sentetik gaz yakıtların termoakustik zorlama altında alev davranışları incelenmiştir (Şekil 4.67-71). $S=0.2$ ve $\Phi=0.6$ 'da gerçekleştirilen deneylerde bütün yakıt karışımları bütün zorlama frekanslarında kararlı yanmaya devam etmiş, alev geri tepmesi veya sönmesi gerçekleşmemiştir. Şekil 4.72-73'de alev parlaklıkları ve anlık alev görüntüleri de sunulmuştur. Yakıt karışımı içerisindeki CO_2 miktarının artmasıyla alev boyu uzamış ve parlaklığı artmıştır. $H_2/CO=1$ sentetik gaz yakıtlarına kıyasla sonuçlar SM1 ve SL1 yakıtları hariç benzerdir. SL1 alevi akustik zorlamalar altında sönmezken SM1 alevi ikinci doğal akustik modda sönmüştür. Bu bakımdan, deneylerin yapıldığı şartlarda ($S=0.2$, $\Phi=0.6$, $d_h/d_o=0.5$ ve $Q=3kW$) yakıt kompozisyonunun içindeki CO miktarının artması alevi boylamasına oluşabilecek yanma kararsızlıklarına karşı kararlı hale getirdiğini göstermiştir.



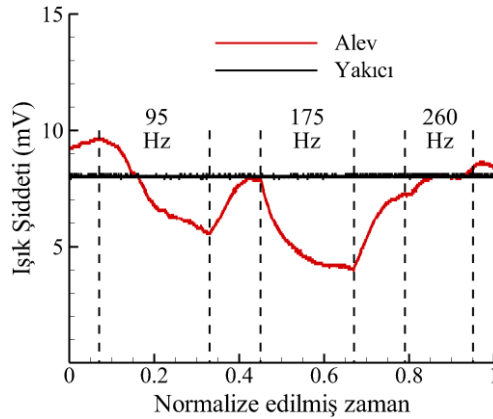
(a) Işık şiddetinin değişimi



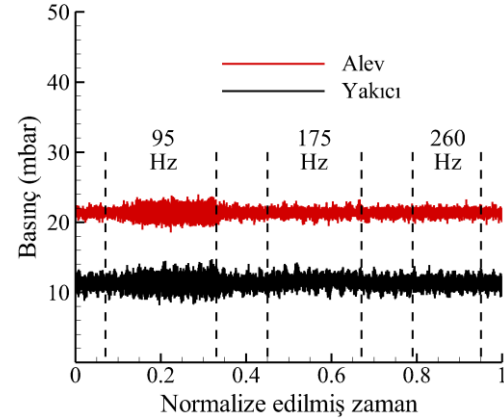
(b) Basıncın değişimi



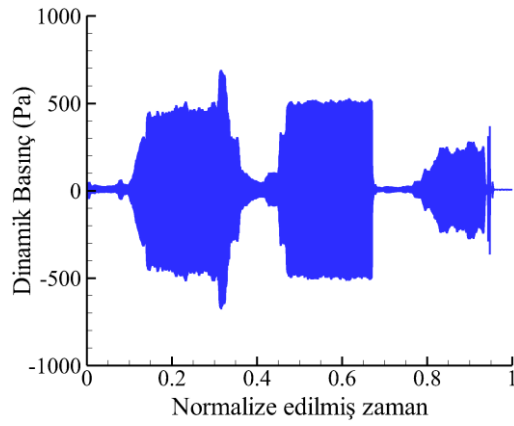
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 67. SL1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

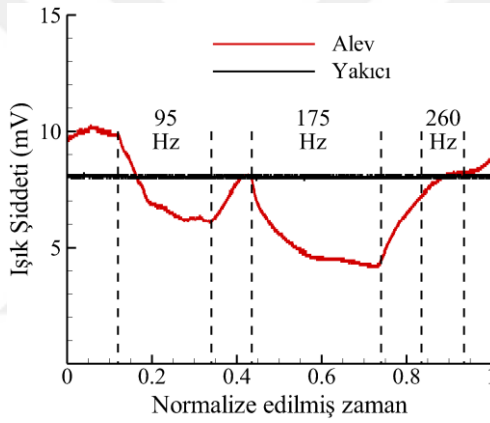
(a) Işık şiddetinin değişimi



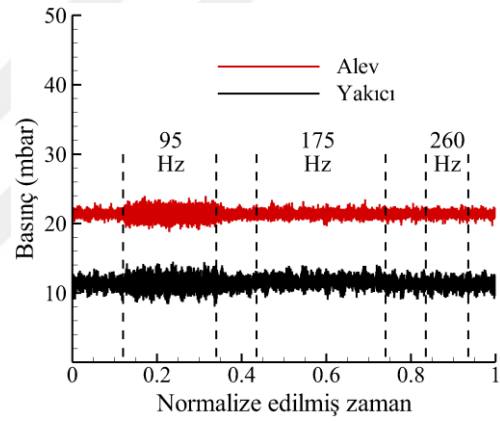
(b) Basıncın değişimi



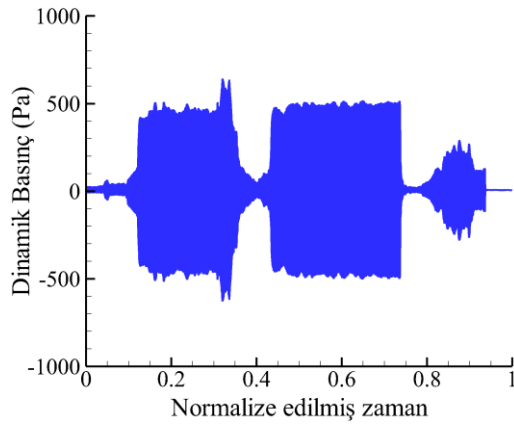
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 68. SL2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

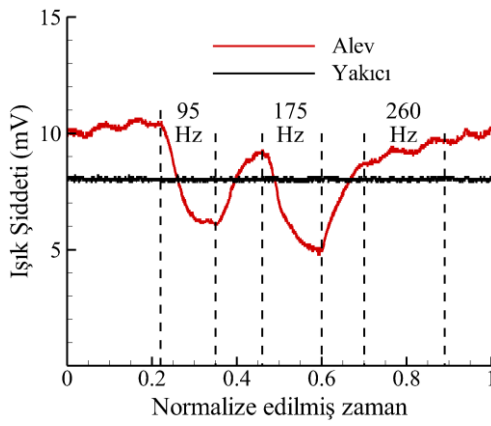


(b) Basıncın değişimi

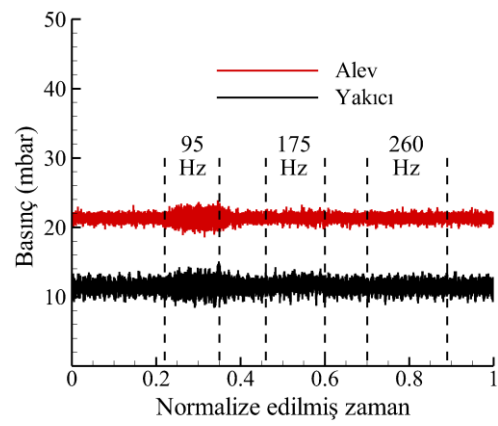


(c) Dinamik basınçın değişimi

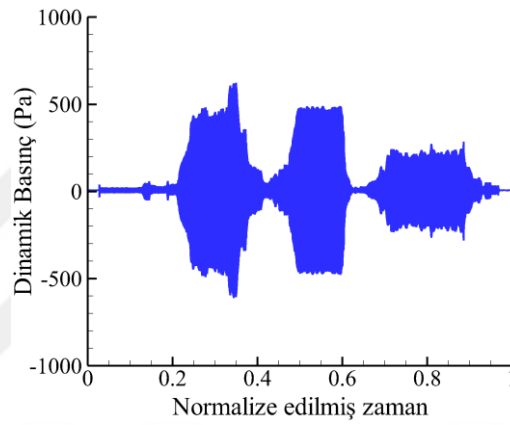
Şekil 4. 69. SL3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).



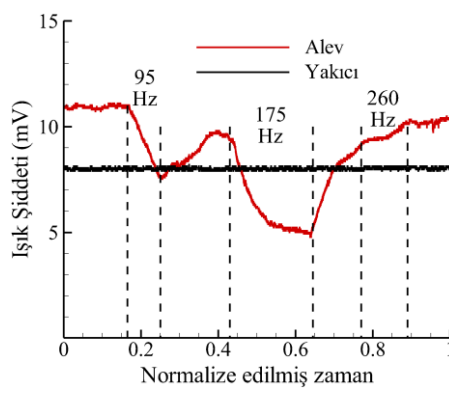
(a) Işık şiddetinin değişimi



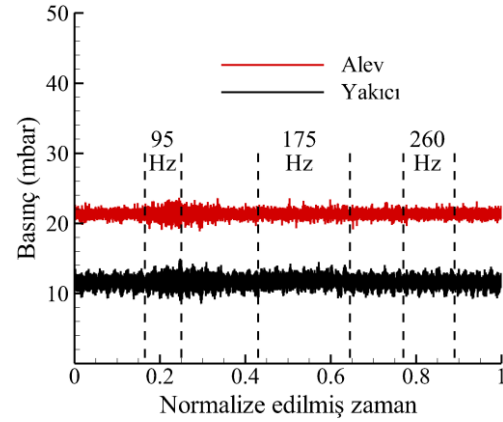
(b) Basıncın değişimi



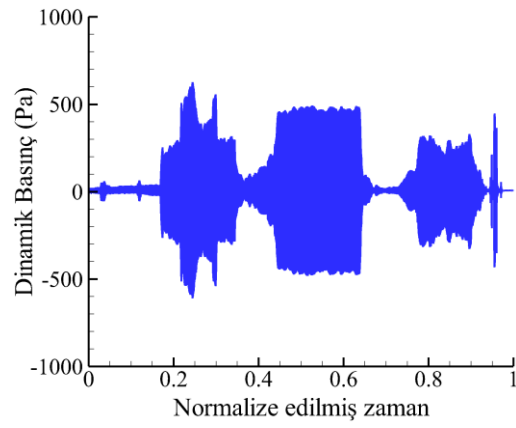
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 70. SL4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

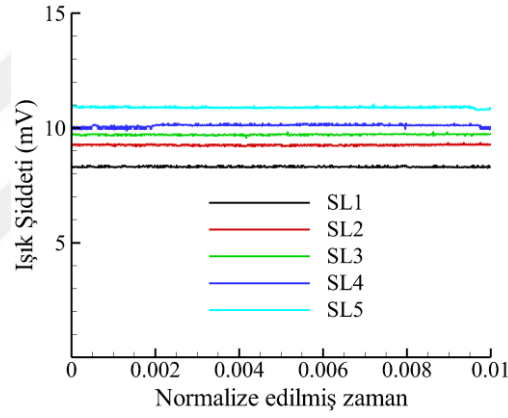


(b) Basıncın değişimi

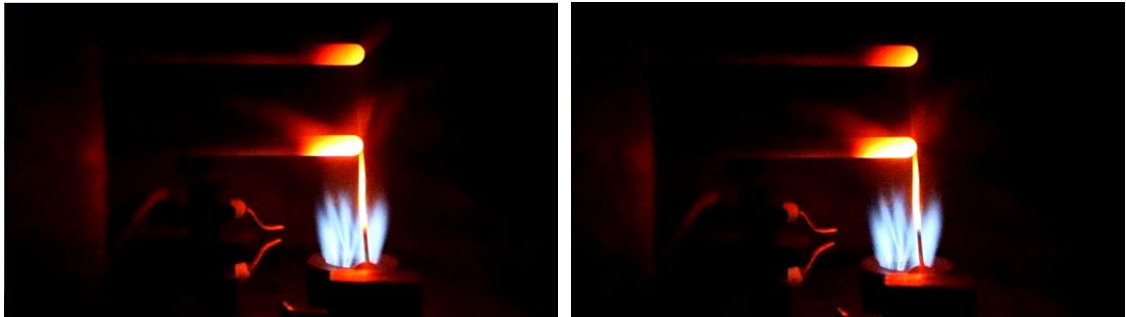


(c) Dinamik basıncın değışimi

Şekil 4. 71. SL5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

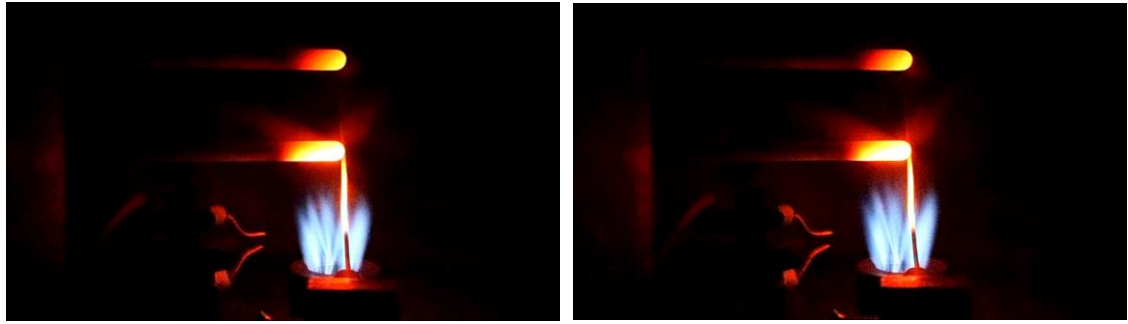


Şekil 4. 72. $H_2/CO:0.5$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.



(a) SL1

(b) SL2



(c) SL3

(d) SL4



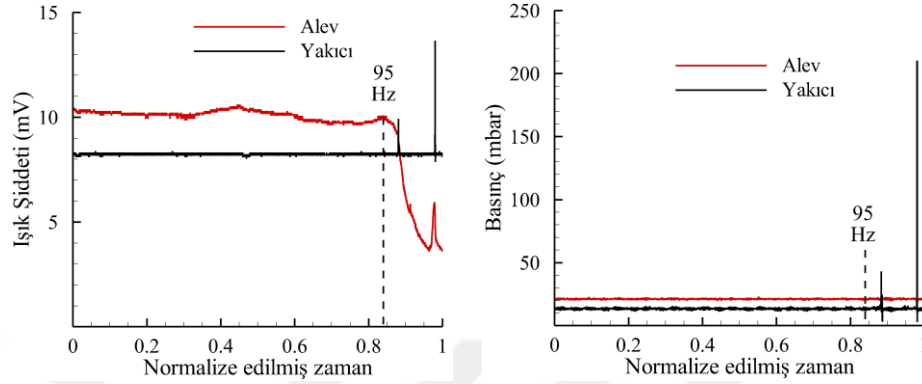
(e) SL5

Şekil 4. 73. H₂/CO:0.5 sentetik gazlarının alev görüntüleri.

4.3.3. Yüksek H₂ İçeriğine Sahip (H₂/CO:2) Sentetik Gazların Alev Davranışı

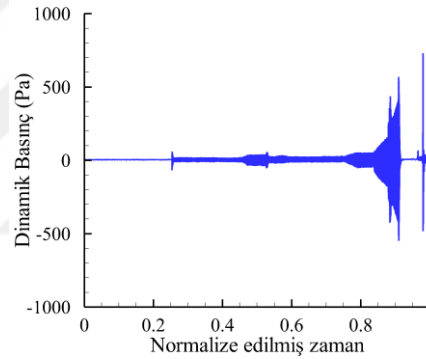
Günümüzde güç üretim tesislerinde fosil yakıtlar yerine H₂ içeren alternatif yakıtlar kullanılmaktadır. Çünkü H₂ gazı çevre dostu ve birçok kaynak yardımıyla üretilmektedir [210]. Birim kütle başına enerjisi diğer yakıtlara kıyasla daha yüksektir. Ayrıca yüksek alev kararlılığı ve düşük ateşleme gecikmesi hidrojeni, hidrokarbon yakıtlardan daha üstün duruma getirmektedir. Fakat hidrokarbon yakıtlarda alev geri tepmesi problemi nadiren karşılaşılrken, hidrojen içeren yakıtlarda sınır tabakada ve akış çekirdeğinde alev yayılmasından kaynaklı alev geri tepmesi sıkça gözlemlenmektedir. Çünkü H₂'in alev hızı hidrokarbon yakıtlara kıyasla çok yüksektir [211]. Ayrıca akış çekirdeğinde türbülanslı alev yayılması da alev geri tepmesine neden olabilir. Yanma kararsızlıkları sistem dinamiklerini belirgin bir şekilde etkiler ve lineer olmayan basınç dalgalanması etkileşimleri alev geri tepmesine sebep olabilir. Son olarak; vorteks yıkımı dinamikleri değişiminden kaynaklanan çekirdek akıştaki; girdaplı akışlar ile ısı salınımı arasındaki etkileşim sonucunda alev geri tepmesi gerçekleşebilir. Çalışmanın bu kısmında yüksek H₂ içeriğine sahip sentetik gazların zorlama altında alev davranışları incelenmiştir. İlk olarak, SH1 yakıtı sabit genlikli ses dalgaları ile zorlanmış,

zorlamalar sonucu alev davranışı Şekil 4.74’de sunulmuştur. SH1 alevi birinci akustik zorlama modunda kararsızlaşmış ve basınç salınımları doyuma ulaşmadan alev geri tepmesi gerçekleşmiştir.



(a) Işık şiddetinin değişimi

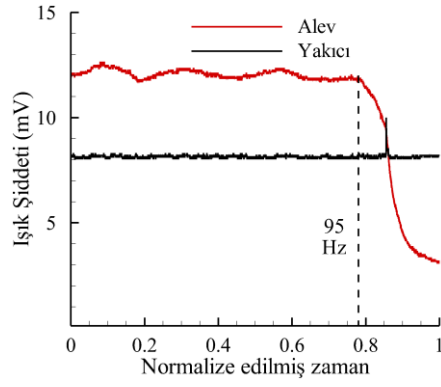
(b) Basıncın değişimi



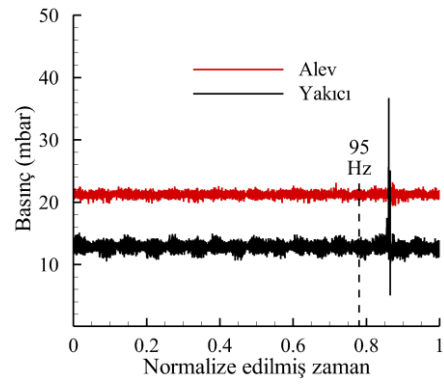
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 74. SH1 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

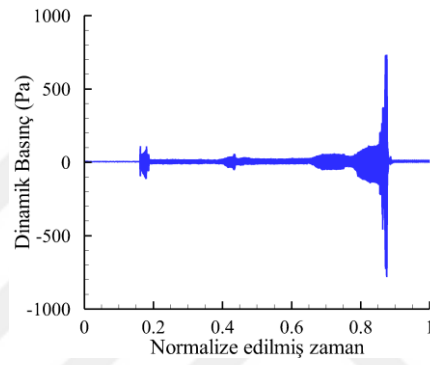
SH1 alevinde olduğu gibi SH2 alevinde de akustik zorlamalar sonucu alev geri tepmesi gözlemlenmiştir (Şekil 4.75). Yakıcı içerisindeki basınç değeri 40 mbar ölçülmüştür. CO_2 miktarının artmasıyla basınç miktarındaki artış düşmüş, %10 CO_2 içeren SH3 sentetik gaz karışımında ise bu artış daha da azalmıştır (Şekil 4.76). %15 ve üstü miktarlarda CO_2 içeriğine sahip karışımlarda (SH4 ve SH5) ise alev geri tepmesi olayı görülmemiş, bütün zorlama frekanslarında kararlı alevler oluşmuştur (4.77-78). En yüksek alev parlaklığı SH2 yakıt karışımında ölçülmüştür (Şekil 4.79). Yüksek H_2 içeriğine sahip sentetik gazlarda alev yakıcı içerisinde yanarken, CO_2 miktarının artmasıyla birlikte reaksiyonların gerçekleşme hızları azalmış ve alev boyları artmıştır (Şekil 4.80).



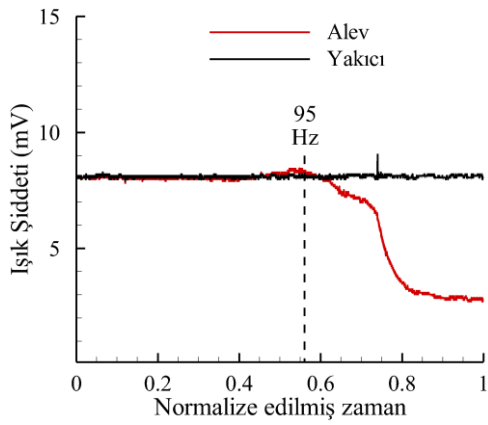
(a) Işık şiddetinin değişimi



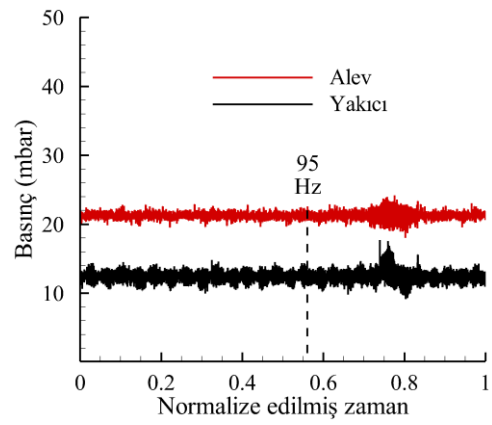
(b) Basıncın değişimi



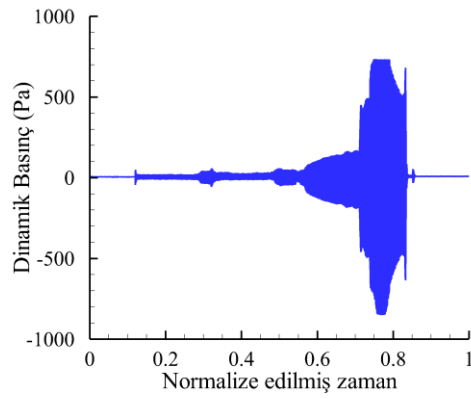
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 75. SH2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

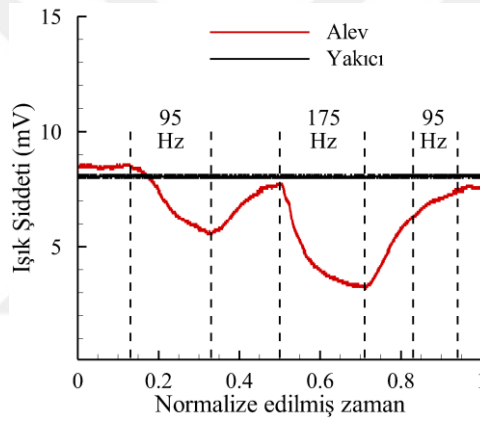
(a) Işık şiddetinin değişimi



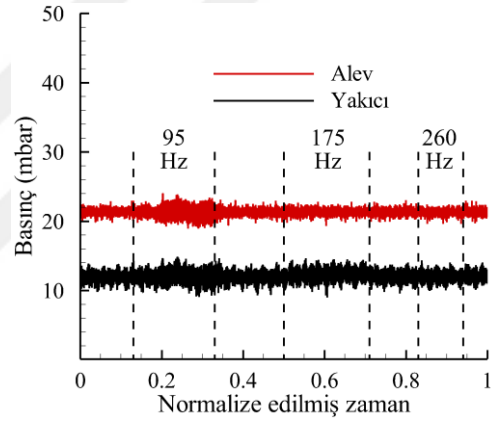
(b) Basıncın değişimi



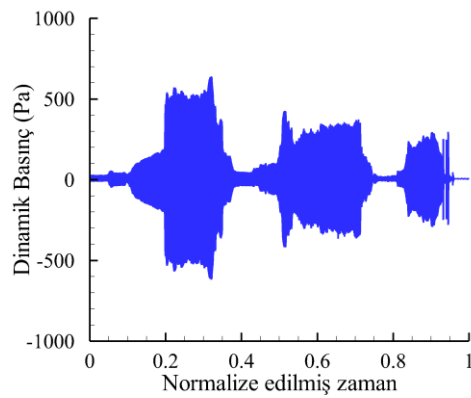
(c) Dinamik basınçın değişimi

Şekil 4. 76. SH3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

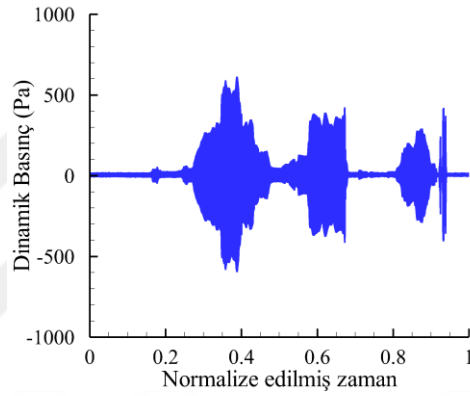
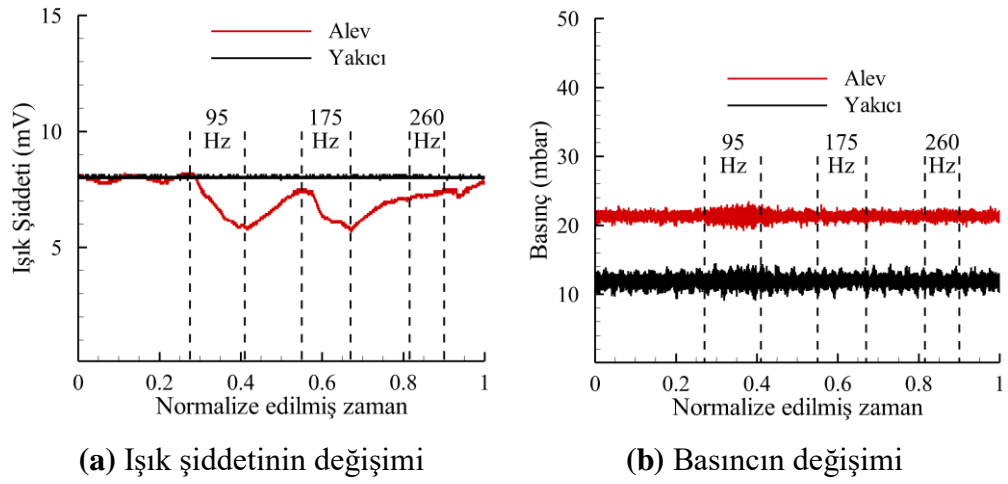


(b) Basınçın değişimi

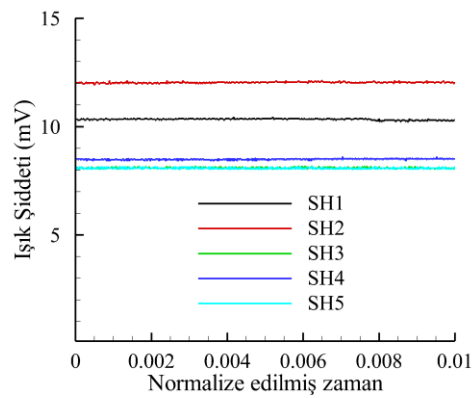


(c) Dinamik basınçın değişimi

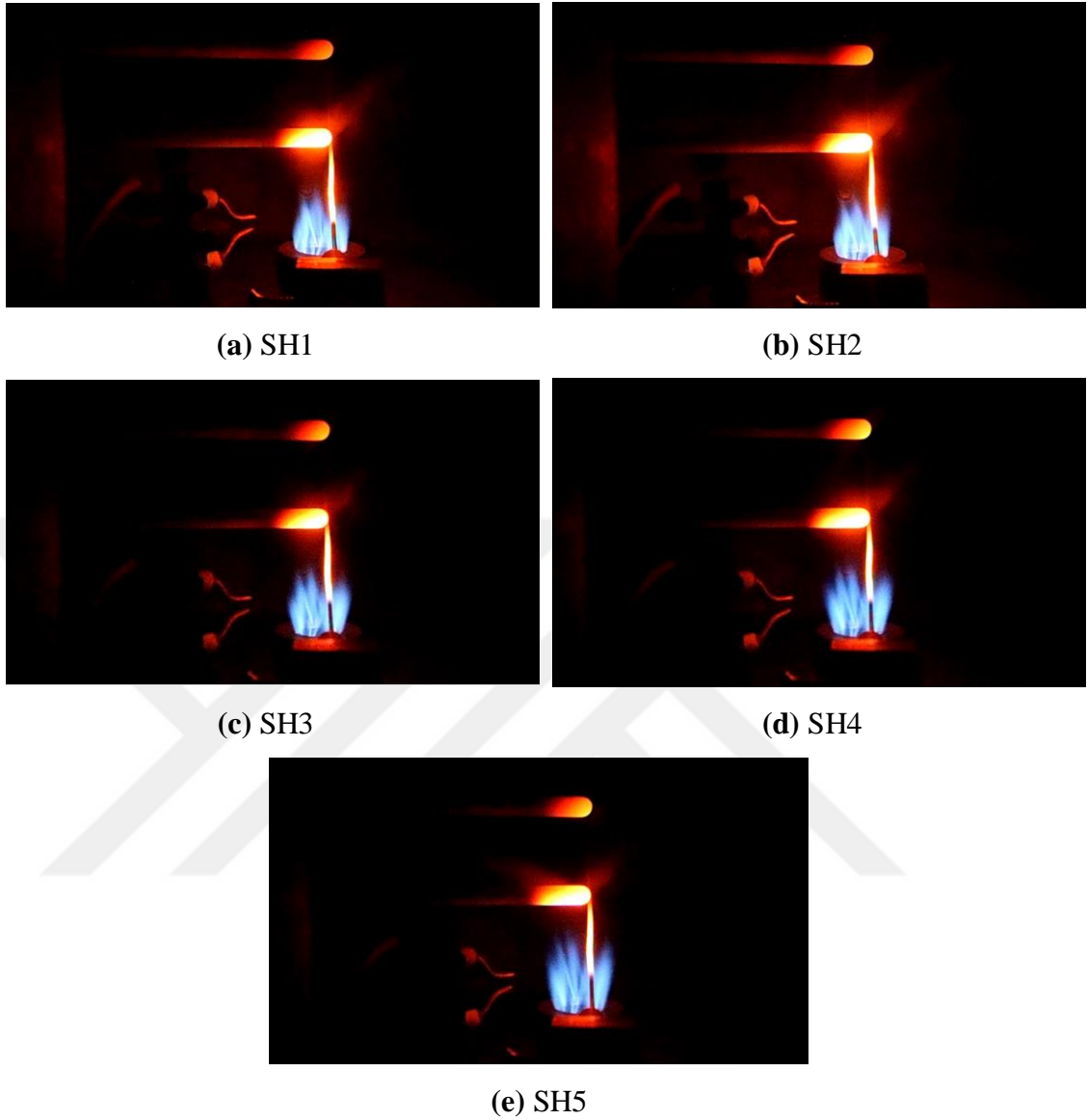
Şekil 4. 77. SH4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).



Şekil 4. 78. SH5 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.6$).



Şekil 4. 79. $H_2/CO:2.0$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.

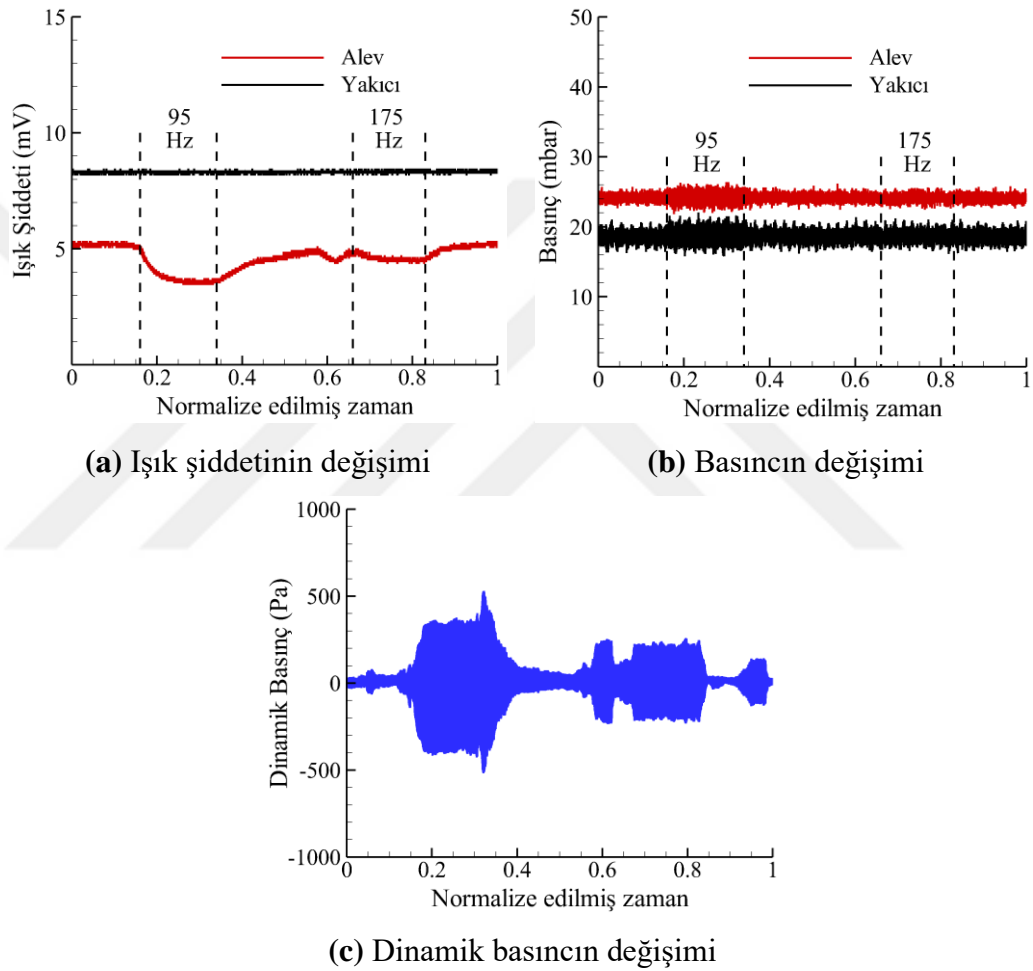


Şekil 4. 80. H₂/CO:2.0 sentetik gazlarının alev görüntüleri.

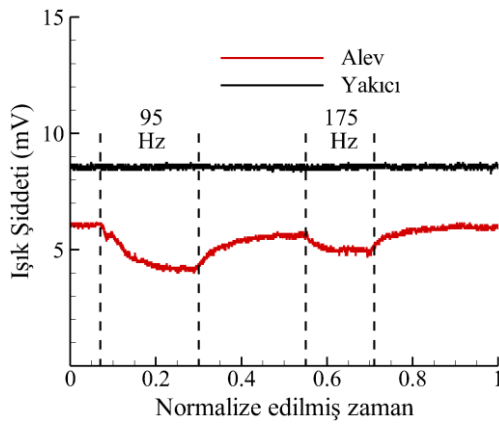
4.3.4. Hidrojence Zenginleştirilmiş (H₂/CO:3) Sentetik Gazların Alev Davranışı

Literatürde, sentetik gazların içerisinde bulunan CO'nun NO_x emisyonlarını artırdığı, yakıt karışımının hidrojenle zenginleştirilmesi sonucu kirletici emisyonlarda azalmalar sağlandığı raporlanmıştır. Ayrıca hidrojenle zenginleştirilmiş yakıtlarda, hidrojen moleküllerinin yüksek yayıcılık ve alev hızlarından dolayı daha düşük eşdeğerlik oranlarında kararlı alevler elde edilebilmektedir [143]. Yapılan çalışmada %5 CO₂ içeren ve %5-20 CH₄ (%5 aralıklar ile) içeren hidrojenle zengin sentetik gaz yakıtların zorlama altında alev davranışları incelenmiştir.

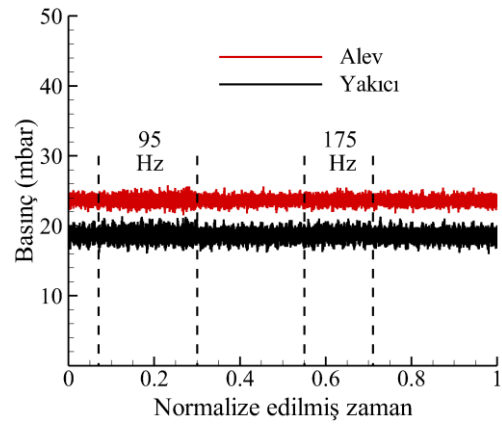
Bütün yakıt karışımları akustik zorlamalar altında kararlı davranış sergilemiş, alev geri tepmesi veya sönmesi gözlemlenmemiştir. Şekil 4.7’de SR1 yakıt karışımının farklı zorlama frekanslarında alev davranışı verilmiştir. SR2, SR3 ve SR4 alevlerinin zorlama altında alev davranışı ise şekil 4.81-83’de verilmiştir. Alev parlaklıkları ve anlık alev görüntüleri ise şekil 4.84-85’de sunulmuştur. Yakıt karışımları içerisinde artan CH_4 içeriğiyle birlikte alev parlaklıkları ve boyu artmıştır.



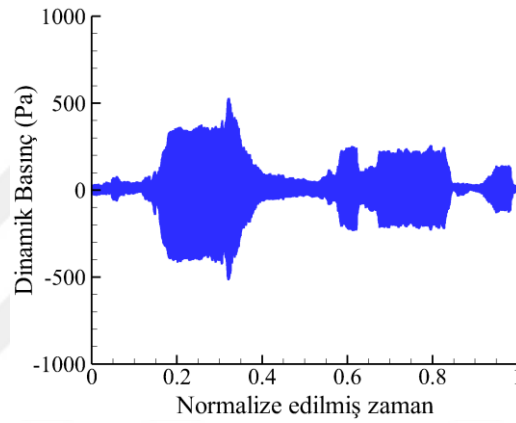
Şekil 4. 81. SR2 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.4$).



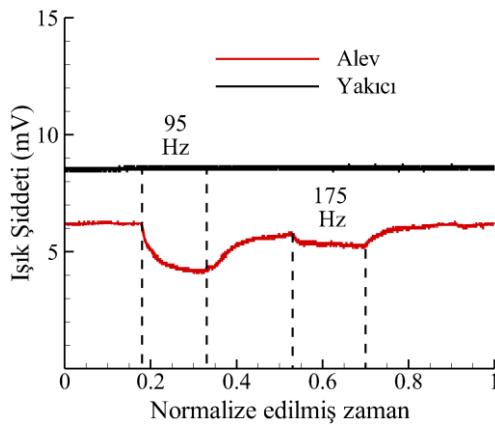
(a) Işık şiddetinin değişimi



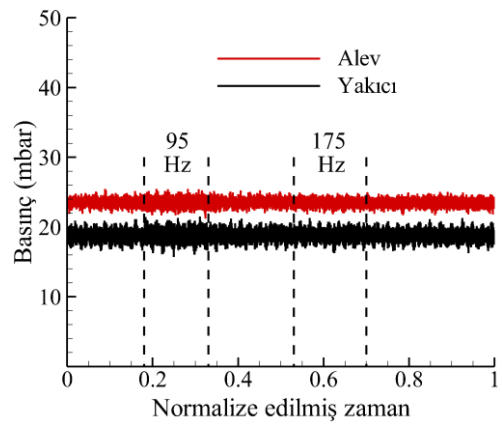
(b) Basıncın değişimi



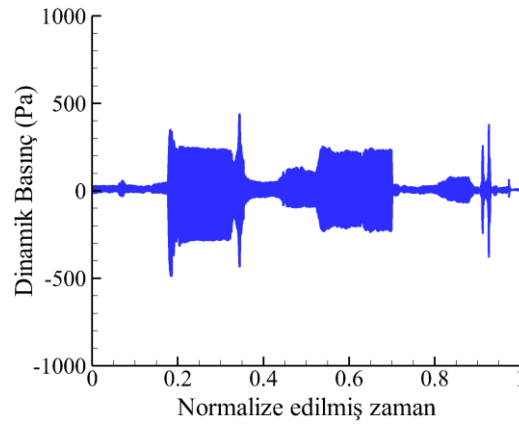
(c) Dinamik basıncın değişimi

Şekil 4. 82. SR3 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.4$).

(a) Işık şiddetinin değişimi

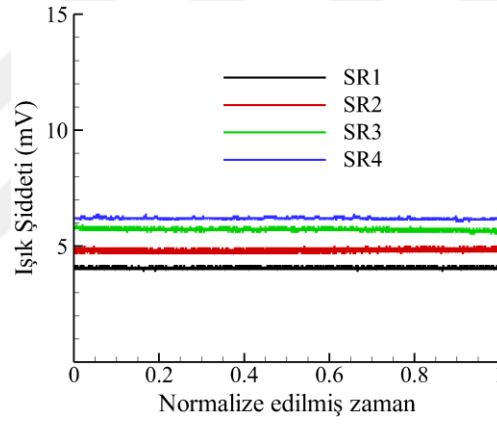


(b) Basıncın değişimi



(c) Dinamik basıncın değışimi

Şekil 4. 83. SR4 karışımının termo-akustik alev davranışı ($S=0.2$ ve $\Phi=0.4$).

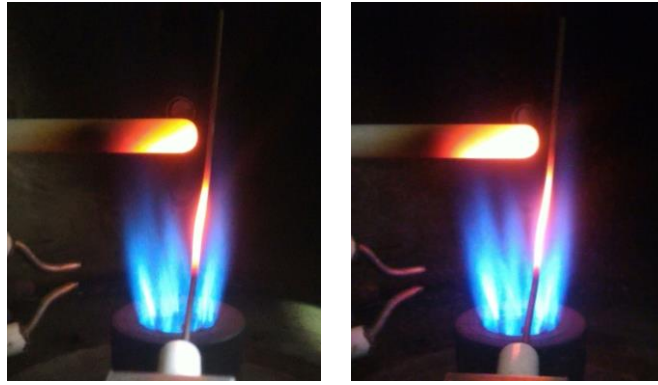


Şekil 4. 84. $H_2/CO:3.0$ sentetik gazlarının alev parlaklıklarının kıyaslanması.



(a) SR1

(b) SR2



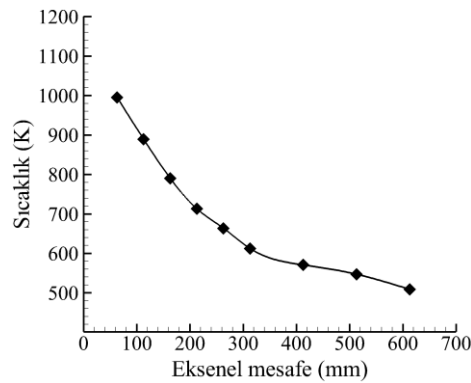
(c) SR3

(d) SR4

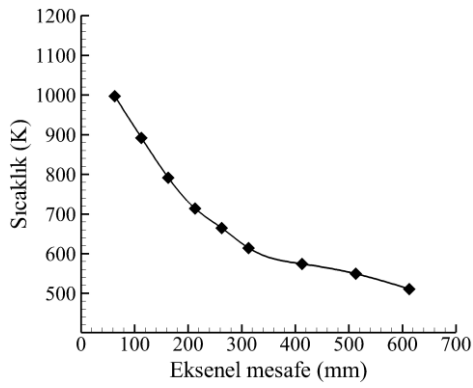
Şekil 4. 85. H₂/CO:3.0 sentetik gazlarının alev görüntüleri.

4.3.5. Termo-Akustik Zorlamanın Emisyon ve Sıcaklık Dağılımına Etkisi

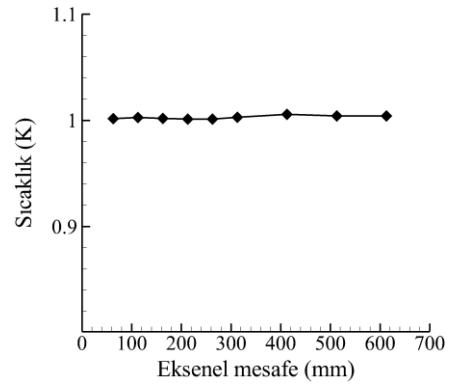
Bütün yanma sistemlerinde göz ardı edilebilecek seviyede basınç salınımları mevcuttur. Bu salınımların bir kısmı yanma davranışını olumlu yönde etkileyerek daha iyi bir sıcaklık dağılımının elde edilmesine ve düşük emisyon değerlerine neden olabilir. Bu amaçla, farklı zorlayıcı frekanslarında alevler zorlanarak sıcaklık ve emisyon ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.86'da SR1 sentetik gaz karışımının $S=0.2$ ve $\Phi=0.4$ 'te zorlama yokken ve 8 farklı zorlayıcı frekansında (40, 60, 80, 90, 95, 110, 150 ve 175) aksenal sıcaklık profilleri verilmiştir. Elde edilen aksenal sıcaklık dağılımları trend olarak benzer elde edilmesine rağmen, 95, 110 ve 175 Hz frekanslarında alev sıcaklıkları düşük ölçülmüştür. Baca sıcaklıkları ise bütün zorlama frekanslarında artmıştır (Tablo 4.5).



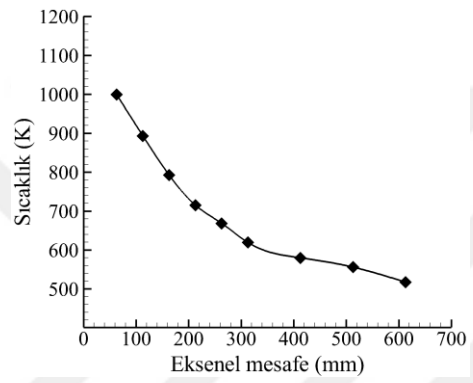
(a) 0 Hz (zorlama yokken)



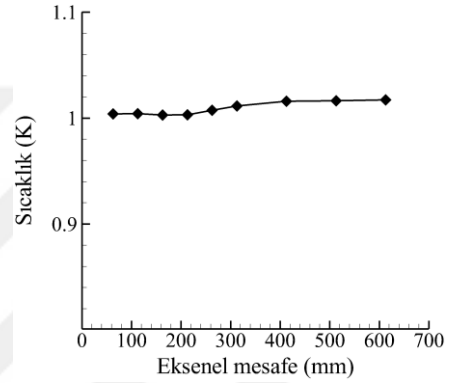
(b) 40 Hz



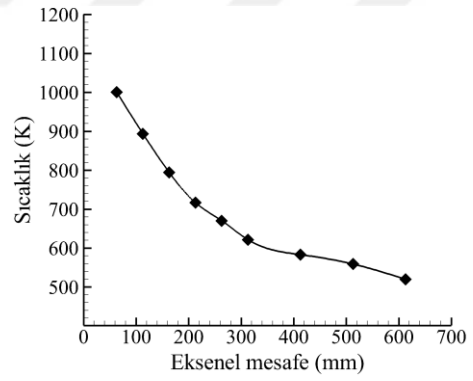
(c) 40 Hz / 0 Hz



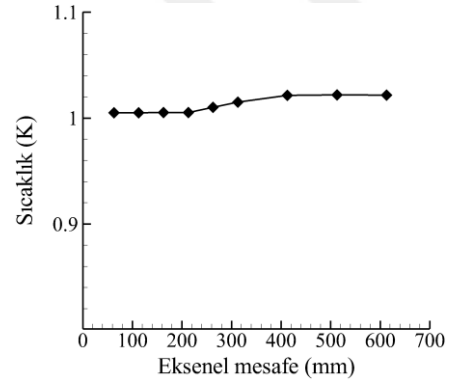
(d) 60 Hz



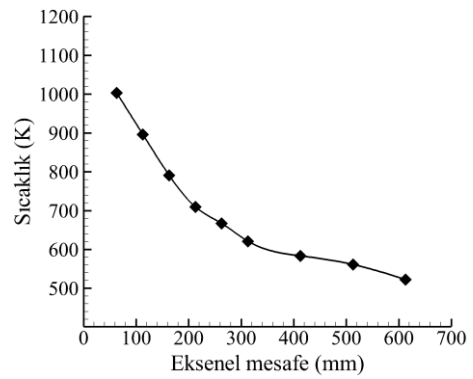
(e) 60 Hz / 0 Hz



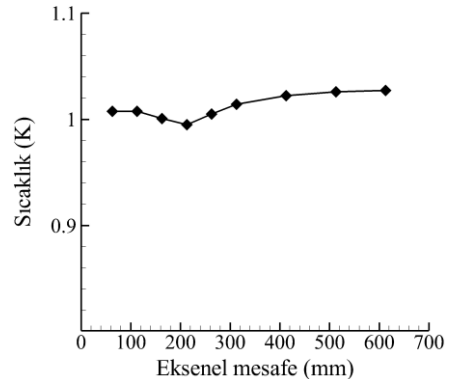
(f) 80 Hz



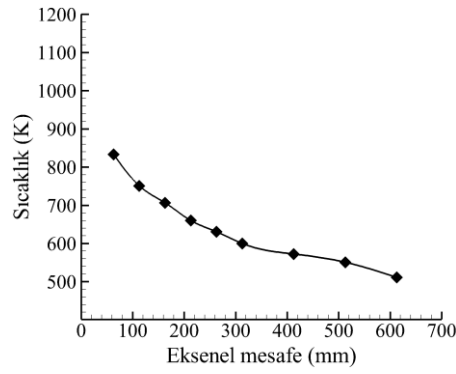
(g) 80 Hz / 0 Hz



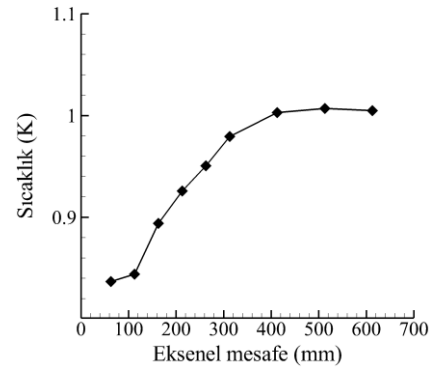
(h) 90 Hz



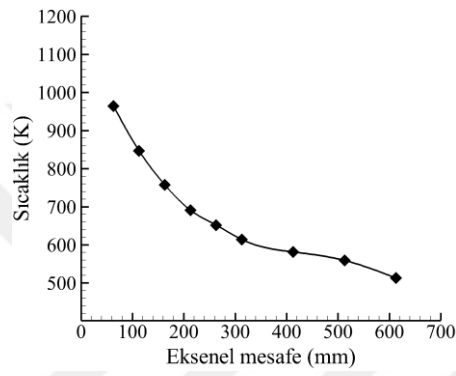
(i) 90 Hz / 0 Hz



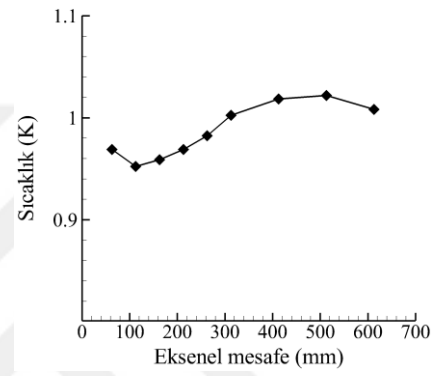
(j) 95 Hz



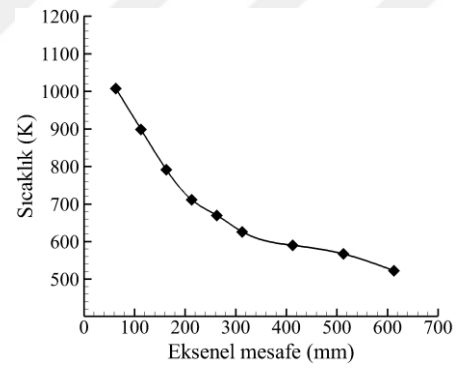
(k) 95 Hz / 0 Hz



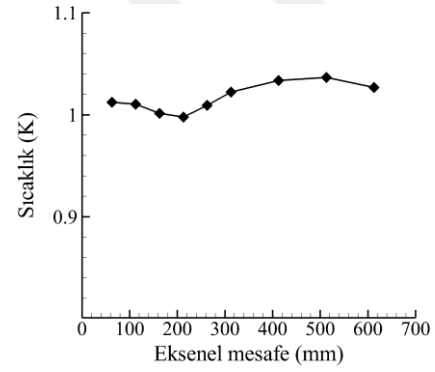
(l) 110 Hz



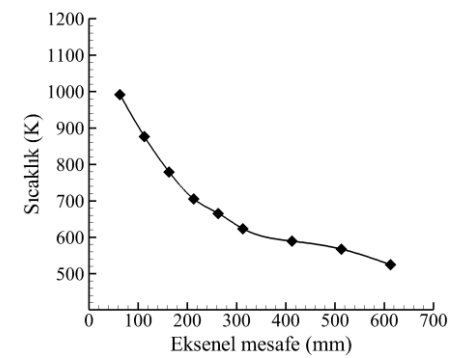
(m) 110 Hz



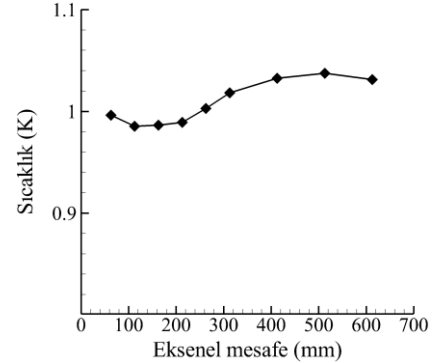
(n) 150 Hz



(o) 150 Hz



(p) 175 Hz



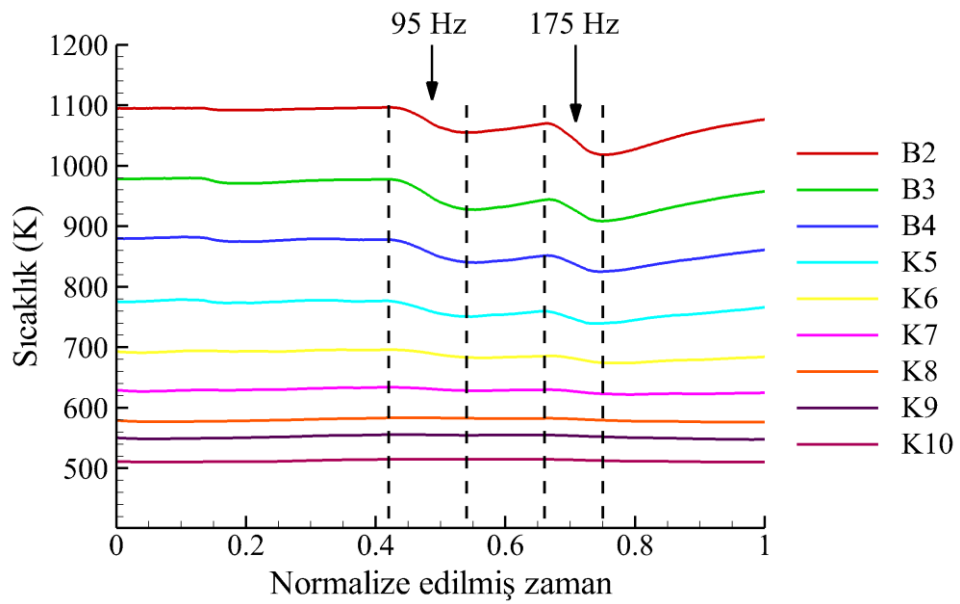
(r) 175 Hz

Şekil 4. 86. Farklı zorlama frekanslarında eksenel sıcaklık dağılımları.

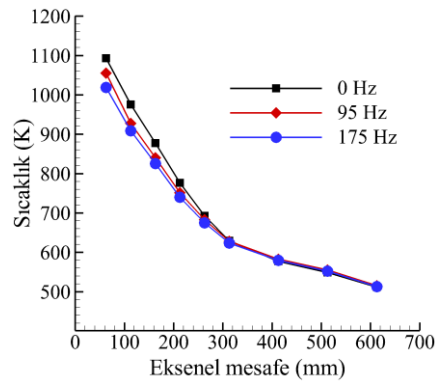
Tablo 4. 5. SR1 yakıtının zorlama altında alev ve baca sıcaklıkları.

Zorlama Frekansı (Hz)	T _{Alev} (K)	T _{Baca} (K)
0	995.46	508.84
40	997.05	511.01
60	999.30	517.55
80	1000.47	519.91
90	1003.02	522.67
95	833.02	511.33
110	964.61	512.97
150	1007.64	522.44
175	991.79	524.71

Benzer bir ölçüm SM4 yakıt karışımı içinde yapılmış elde edilen veriler Şekil 4.87 ve Tablo 4.6'da sunulmuştur. Eksenel sıcaklık dağılımları Şekil 4.87a'da zamana bağlı olarak her bir termoçift üzerinden gösterilmektedir. $S=0.2$ ve $\Phi=0.6$ 'da yapılan ölçümlerde her iki doğal akustik modunda da alev sıcaklıkları yaklaşık 40 K azalmıştır. Fakat baca sıcaklıklarında herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.



(a) Zamana bağlı sıcaklık dağılımı



(b) Daimi şartlar altında sıcaklık dağılımları

Şekil 4. 87. Doğal akustik modlarda zorlama altında sıcaklık dağılımları.

Tablo 4. 6. SM4 yakıtının akustik zorlama altında alev ve baca sıcaklıkları.

Zorlama Frekansı (Hz)	T _{Alev} (K)	T _{Baca} (K)
0	1093.14	511.84
95	1055.51	515.24
175	1018.84	513.00

SR1 yakıt karışımının farklı zorlama frekanslarında emisyon ölçümleri Tablo 4.7'de sunulmuştur. Bütün zorlama frekanslarında CO'in CO₂'e dönüşme oranı artmış, CO emisyonları ise azalmıştır. En düşük CO emisyonu 110 Hz zorlayıcı frekansında ölçülmüştür.

Tablo 4. 7. SR1 yakıt karışımının zorlama altında emisyon üzerine etkisi.

Zorlama Frekansı (Hz)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)
0	14.7	3.0	1124
40	14.2	3.2	1106
60	14.2	3.2	1069
80	14.2	3.2	1045
90	14.2	3.2	897
95	14.5	3.1	938
110	14.3	3.2	684
150	13.8	3.4	778
175	13.9	3.4	818

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında, sentetik gaz yakıtların ($H_2/CO/CO_2/CNG/CH_4$) yanma kararsızlıkları ve basınç dalgalanmaları ile alev sönmesi ve geri tepmesi olayının ortaya çıkışı arasındaki ilişki ön karışımli-girdap üreteçli-laboratuvar ölçekli bir yakıcıda araştırılmıştır. Yanma odasına kollarına yerleştirilen hoparlörler vasıtasıyla alev farklı frekanslardaki (0-300 Hz) sinüzoidal ses dalgalarıyla akustik olarak zorlanmıştır. Yapılan dinamik/statik basınç, ışık şiddeti, sıcaklık ve emisyon ölçümleri ile anlık alev görüntüleri alınarak yakıt kompozisyonu, eşdeğerlik oranı, girdap sayısı ve girdap üretici çap oranının alev davranışı üzerine etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Deneyle başlamadan önce kullanılacak sentetik gaz yakıt karışımlarının alt ve üst yanma limitleri belirlenmiştir. Deneylede H_2/CO oranı 0.5, 1.0, 2.0 ve 3.0 değerlerinde belirlenmiş; $H_2/CO=3.0$ oranında 4 adet sentetik gaz karışımının (%5-20 CH_4 ilavesi, %5 aralıklarla), diğer H_2/CO oranlarında ise 5'er adet sentetik gaz karışımının (%0-20 CO_2 inert gaz seyreltmesi, %5 aralıklarla) kararlı yanma aralıkları belirlenmiştir.

Yanma kararsızlıkları yanma odasının doğal akustik modlarının bir veya birkaçında gerçekleşmektedir. Bu sebepten kararlı yanma aralıklarından sonra yakıcının doğal akustik modlarının tespiti yapılmıştır. Daha sonra, belirlenen sentetik gaz karışımlarının farklı girdap sayısı ve eşdeğerlik oranlarında akustik aktüatör olarak hoparlörler ile termo-akustik yanma kararsızlıkları tetiklenerek alev davranışı basınç ve ışık şiddeti ölçümleri ile incelenmiştir. Ayrıca, anlık alev görüntüleri ile alev yapısı, tutunma pozisyonu ve rengi hakkında bilgiler sunulmuştur. Son olarak, farklı zorlayıcı frekanslarında aksel sıcaklık dağılımı ve emisyon değerlerinin değişimi incelenmiştir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar:

- H_2/CO oranının artmasıyla birlikte daha fakir şartlarda kararlı alevler elde edilmiş, diğer bir ifade ile H_2 miktarının artması daha fakir yakıt şartlarında (daha düşük eşdeğerlik oranlarında) kararlı alev elde edilmiştir.
- Sentetik gaz karışımı içerisindeki CO_2 konsantrasyonunun artması ile kararlı yanma aralıkları bütün H_2/CO oranlarında belirgin bir şekilde genişlemiştir. %20 CO_2 konsantrasyonuna sahip sentetik gaz karışımlarında ise bu artış çok belirgin olarak gözlemlenmiştir.
- Girdap sayısının değişimin veya girdap üretici çap oranlarının etkisi tekdüze olarak elde edilememiş, en geniş kararlı yanma aralığına girdap sayısının $S=1.4$ değerinde ulaşılmıştır.
- Hoparlörler yardımıyla yakıcı içerisine gönderilen ses dalgalarının gücü toplamda 253.11 W olarak ölçülmüştür.
- Üç farklı frekans değerinde (95, 175, 260 Hz) yanma odasının yüksek genlikli basınç dalgalanmaları ile rezonansa girdiği tespit edilmiştir.
- Yanma odası içerisinde yaklaşık 400 Pa genlikte basınç dalgaları oluşturulmuştur.
- Yakıt karışımı içerisinde artan CO_2 miktarının yakıt/hava karışımının yanma odasına giriş hızını artırdığı, yanma reaksiyon mekanizmalarını inhibe ederek reaksiyon için gerekli zamanı azalttığı ve bunun sonucu olarak boylamasında gelen akustik zorlamalar karşısında daha kararlı alevler elde edildiği görülmüştür.
- Yüksek H_2/CO oranlarında alevin düşük H_2/CO oranına sahip yakıt karışımlarına göre yanma kararsızlıklarına karşı daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir.
- Eşdeğerlik oranının değiştirilmesiyle, üst yanma limitlerine yaklaşıldıkça alev geri tepmesi, alt yanma limitlerine yaklaşıldıkça alev sönmesi olayı gözlemlenmiştir. Bu sebepten herhangi bir yanma sisteminde yakıt/hava karışım oranının doğru bir şekilde seçilmesi önem arz ettiği görülmüştür.

- Girdap sayısının termo-akustik zorlama altında alev davranışına etkisi olmadığı sadece yüksek girdap sayılarında gerçekleşebilecek alev geri tepmelerinde yakıcı iç çeperlerinde gerçekleşen basıncın daha yüksek olduğu (maksimum 375.36 mbar ölçülmüştür) tespit edilmiştir.
- Benzer şekilde girdap üreticinin çap oranının (d_h/d_o) termo-akustik zorlama altında alev davranışına belirgin bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.
- Yüksek H_2 içeriğine sahip sentetik yakıt karışımlarında kısa alevler elde edilmiş, yakıt kompozisyonuna ilave edilen CH_4 veya CO_2 gazlarının alev boyunu artırdığı görülmüştür.
- Bütün alevler fakir şartlarda ve yakıt karışımı içerisinde bulunan C ve H elementlerinden dolayı mavimsi ışımaya sahiptir.
- Doğal akustik modlarda aksel sıcaklık dağılımında azalmalar görülmüştür. Fakat baca sıcaklıklarında bütün zorlama frekanslarında artış gözlemlenmiştir.
- Zorlama frekanslarının tamamında CO emisyonları azalmış, en yüksek düşüş 110 Hz zorlama altında ölçülmüştür. Bu durum alevlerin doğal akustik modlar dışındaki düşük genlikli basınç dalgalanmalarında daha iyi bir emisyon dağılımının elde edilebileceğini göstermiştir.

5.2. Öneriler

Deneysel çalışmalardan elde edilen tecrübeler doğrultusunda aşağıda belirtilen önerilerin dikkate alınmasının bundan sonraki çalışmalarda fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

- Kullanılan girdap üreteçlerinin daha hassas yüzey işleme özelliğine sahip teknolojiler ile üretilmesi alev yapısının daha hassas bir şekilde incelenmesini sağlayabilir.
- Güvenlik amaçlı kullanılan iyonizasyon telinin alev yapısına olan etkisini elimine etmek için görsel güvenlik teknolojileri kullanılabilir.
- Termoçiftlerin seramik koruyucu kılıf malzemesinin gaz geçirmezlik özelliği daha yüksek olan KER 799 olması ve tel çapları küçültülmesiyle de hem

radasyon kayıplarının hem de akış alanına olan etkilerin azaltılması faydalı olabilir.

- Sentetik gazların bileşiminde bulunabilen N_2 ve Ar gazlarının yanma kararsızlıklarına, kararlı yanma limitlerine, alev yapısına vb. özelliklere etkileri incelenebilir.
- Yapılacak sayısal çalışmalar ile yanma odasının akustik modları sayısal simülasyonlar ile desteklenebilir.
- Eşdeğerlik oranları, girdap sayısı ve yakıt kompozisyonları değişim aralıkları azaltılarak daha geniş kapsamlı çalışmalar yapılabilir.
- Yüksek teknolojik görüntüleme cihazları ile yanma kararsızlıklarının oluşumu ve nedenleri daha ayrıntılı olarak tespit edilebilir. Örneğin; yüksek hıza sahip stereoskopik parçacık görüntülemeli akış ölçüm cihazı (PIV), OH Düzlemsel lazerle uyarılmış floresan (PLIF) veya OH^* kemilüminesans ölçüm cihazları kullanılabilir.
- Kullanılan dinamik basınç ölçüm cihazının ölçüm aralığı, daha yüksek hassasiyete sahip olmak üzere ölçümler yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Lieuwen, T., Yetter, R., Yang, V., 2009. Synthesis Gas Combustion: Fundamentals and Applications. CRC Press, 400 pp.
2. Culick, F., Kuentzmann, P., 2006. Unsteady Motions in Combustion Chambers for Propulsion Systems. NATO Research and Technology Organization Neuilly-Sur-Seine, 664 pp.
3. Cheng, S., 1968, Combustion instability theory, pp 599-617. *In: Jet, Rocket, Nuclear, Ion and Electric Propulsion* (Ed: Loh W. H. T.). Springer.
4. Kim, K. T., 2016. Combustion instability feedback mechanisms in a lean-premixed swirl-stabilized combustor. **Combustion and Flame**, **171**:137-151.
5. García-Armingol, T., Ballester, J., 2015. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**(2):1229-1243.
6. Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, J. H., 2009. Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **34**(1):496-506.
7. Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, J. H., 2007. Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined pre-mixed hydrogen enriched methane flames, 857-868. *ASME turbo expo 2007: power for land, sea, and air*, American Society of Mechanical Engineers.
8. Burbano, H. J., Pareja, J., Amell, A. A., 2011. Laminar burning velocities and flame stability analysis of syngas mixtures at sub-atmospheric pressures. **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**(4):3243-3252.
9. Park, J., Lee, M. C., 2016. Combustion instability characteristics of H₂/CO/CH₄ syngases and synthetic natural gases in a partially-premixed gas turbine combustor: Part I—Frequency and mode analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(18):7484-7493.
10. Park, J., Lee, M. C., 2016. Combustion instability characteristics of H₂/CO/CH₄ syngases and synthetic natural gases in a partially-premixed gas turbine combustor: Part II—Time lag analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(2):1304-1312.
11. Steinberg, A. M., Boxx, I., Stöhr, M., Carter, C. D., Meier, W., 2010. Flow–flame interactions causing acoustically coupled heat release fluctuations in a thermo-

- acoustically unstable gas turbine model combustor. **Combustion and Flame**, **157**(12):2250-2266.
12. Choi, O., Lee, M. C., 2016. Investigation into the combustion instability of synthetic natural gases using high speed flame images and their proper orthogonal decomposition. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(45):20731-20743.
 13. Laera, D., Campa, G., Camporeale, S. M., Bertolotto, E., Rizzo, S., Bonzani, F., Ferrante, A., Saponaro, A., 2014. Modelling of thermoacoustic combustion instabilities phenomena: Application to an experimental test rig. **Energy Procedia**, **45**:1392-1401.
 14. Weigand, P., Meier, W., Duan, X. R., Stricker, W., Aigner, M., 2006. Investigations of swirl flames in a gas turbine model combustor: I. Flow field, structures, temperature, and species distributions. **Combustion and Flame**, **144**(1):205-224.
 15. Von Helmholtz, H., 1912. On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music. Longmans, Green, 576 pp.
 16. Allison, P. M., Driscoll, J. F., Ihme, M., 2013. Acoustic characterization of a partially-premixed gas turbine model combustor: Syngas and hydrocarbon fuel comparisons. **Proceedings of the Combustion Institute**, **34**(2):3145-3153.
 17. Lee, M. C., Yoon, J., Joo, S., Kim, J., Hwang, J., Yoon, Y., 2015. Investigation into the cause of high multi-mode combustion instability of H₂/CO/CH₄ syngas in a partially premixed gas turbine model combustor. **Proceedings of the Combustion Institute**, **35**(3):3263-3271.
 18. Meier, W., Weigand, P., Duan, X. R., Giezendanner-Thoben, R., 2007. Detailed characterization of the dynamics of thermoacoustic pulsations in a lean premixed swirl flame. **Combustion and Flame**, **150**(1):2-26.
 19. Hong, S., Shanbhogue, S. J., Speth, R. L., Ghoniem, A. F., 2013. On the phase between pressure and heat release fluctuations for propane/hydrogen flames and its role in mode transitions. **Combustion and Flame**, **160**(12):2827-2842.
 20. Huang, Y., Yang, V., 2005. Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor. **Proceedings of the Combustion Institute**, **30**(2):1775-1782.
 21. Zalluhoglu, U., Olgac, N., 2015. Thermo-acoustic instability: Theory and experiments. **IFAC-PapersOnLine**, **48**(12):75-80.

22. Pan, H., Bi, Q., Liu, Z., Feng, S., Feng, F., 2018. Experimental investigation on thermo-acoustic instability and heat transfer of supercritical endothermic hydrocarbon fuel in a mini tube. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **97**:109-118.
23. Jarmolowitz, F., Abel, D., 2010. Modeling and Model Predictive Control of a thermoacoustically unstable burner. **IFAC Proceedings Volumes**, **43**(1):68-73.
24. Wang, H., Zhou, J., Pan, Y., Wang, N., 2016. Experimental investigation on the characteristics of thermo-acoustic instability in hydrocarbon fuel at supercritical pressures. **Acta Astronautica**, **121**:29-38.
25. Yoon, S. H., Noh, T. J., Fujita, O., 2016. Onset mechanism of primary acoustic instability in downward-propagating flames. **Combustion and Flame**, **170**:1-11.
26. Aldredge, R. C., Killingsworth, N. J., 2004. Experimental evaluation of Markstein-number influence on thermoacoustic instability. **Combustion and Flame**, **137**(1):178-197.
27. Baladandayuthapani, N., Baraiya, N. A., Chakravarthy, S. R., 2018. Effect of inlet flow turbulence on the combustion instability in a premixed backward-facing step combustor. **Proceedings of the Combustion Institute**.
28. Dubey, A. K., Koyama, Y., Hashimoto, N., Fujita, O., 2018. Effect of geometrical parameters on thermo-acoustic instability of downward propagating flames in tubes. **Proceedings of the Combustion Institute**.
29. Allison, P. M., Chen, Y., Ihme, M., Driscoll, J. F., 2015. Coupling of flame geometry and combustion instabilities based on kilohertz formaldehyde PLIF measurements. **Proceedings of the Combustion Institute**, **35**(3):3255-3262.
30. Klein, S., 2017. On the identification of combustion instability mechanisms in industrial gas turbine combustors, GPPF-2017-2178. *1st Global Power and Propulsion Forum (GPPF 2017)*, 16-18 January, Zurich, Switzerland.
31. Yanez, J., Kuznetsov, M., Grune, J., 2015. Flame instability of lean hydrogen-air mixtures in a smooth open-ended vertical channel. **Combustion and Flame**, **162**(7):2830-2839.
32. Deshmukh, N. N., Sharma, S. D., 2017. Suppression of thermo-acoustic instability using air injection in horizontal Rijke tube. **Journal of the Energy Institute**, **90**(3):485-495.

33. Zan, H., Li, H., Jiang, Y., Wu, M., Zhou, W., Bao, W., 2018. Investigation on thermo-acoustic instability dynamic characteristics of hydrocarbon fuel flowing in scramjet cooling channel based on wavelet entropy method. **Acta Astronautica**, **147**:27-36.
34. Zhao, D., Li, X. Y., 2015. A review of acoustic dampers applied to combustion chambers in aerospace industry. **Progress in Aerospace Sciences**, **74**:114-130.
35. Lieuwen, T., Zinn, B., 1998. Theoretical investigation of combustion instability mechanisms in lean premixed gas turbines, 641. *36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 12-15 January.
36. Lieuwen, T., McDonnell, V., Santavicca, D., Sattelmayer, T., 2008. Burner development and Operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors. **Combustion Science and Technology**, **180**(6):1169-1192.
37. Zhang, Q., Shanbhogue, S. J., Lieuwen, T., 2010. Dynamics of premixed H₂/CH₄ flames under near blowoff conditions. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, **132**(11):111502-111508.
38. Lieuwen, T., Torres, H., Johnson, C., Zinn, B. T., 1999. A mechanism of combustion instability in lean premixed gas turbine combustors. , V002T002A001. *ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 2: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Combustion and Fuels; Oil and Gas Applications; Cycle Innovations*, Volume 2: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Combustion and Fuels; Oil and Gas Applications; Cycle Innovations.
39. Yuan, X., Glover, K., Dowling, A. P., 2010. Modeling investigation for thermoacoustic oscillation control, 3323-3328. *American Control Conference (ACC)*, 30 June - 2 July, IEEE.
40. Fernandez, V., Ratner, A., Culick, F. E. C., 2003. Measured influence of oscillations in fuel mixture fraction on flame behavior, 16-19 March. *Proceedings of the Third Joint Meeting of the US Sections of the Combustion Institute, Chicago, IL*.
41. Kang, D. M., Culick, F. E. C., Ratner, A. An experimental study of coupling between combustor pressure, fuel/air mixing, and flame behavior (Web sayfası: http://user.engineering.uiowa.edu/~aratner/us_sect_KangEtAl1.pdf), (Erişim Tarihi: 13/05/2019).

42. Kypraiou, A.-M., Giusti, A., Allison, P. M., Mastorakos, E., 2018. Dynamics of acoustically forced non-premixed flames close to blow-off. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **95**:81-87.
43. Thumuluru, S. K., Lieuwen, T., 2009. Characterization of acoustically forced swirl flame dynamics. **Proceedings of the Combustion Institute**, **32**(2):2893-2900.
44. Emadi, M., Kaufman, K., Burkhalter, M. W., Salameh, T., Gentry, T., Ratner, A., 2015. Examination of thermo-acoustic instability in a low swirl burner. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**(39):13594-13603.
45. Acharya, V., Shin, D.-H., Lieuwen, T., 2012. Swirl effects on harmonically excited, premixed flame kinematics. **Combustion and Flame**, **159**(3):1139-1150.
46. Han, X., Yang, J., Mao, J., 2016. LES investigation of two frequency effects on acoustically forced premixed flame. **Fuel**, **185**:449-459.
47. Wark, C., Eickmann, K., Richards, C., 2000. The structure of an acoustically forced, reacting two-phase jet. **Combustion and Flame**, **120**(4):539-548.
48. Huang, Y., Ratner, A., 2009. Experimental investigation of thermoacoustic coupling for low-swirl lean premixed flames. **Journal of Propulsion and Power**, **25**(2):365-373.
49. Yilmaz, I., Ratner, A., Ilbas, M., Huang, Y., 2010. Experimental investigation of thermoacoustic coupling using blended hydrogen–methane fuels in a low swirl burner. **International Journal of Hydrogen Energy**, **35**(1):329-336.
50. Kang, D. M., Culick, F. E. C., Ratner, A., 2007. Combustion dynamics of a low-swirl combustor. **Combustion and Flame**, **151**(3):412-425.
51. Emadi, M., Karkow, D., Salameh, T., Gohil, A., Ratner, A., 2012. Flame structure changes resulting from hydrogen-enrichment and pressurization for low-swirl premixed methane–air flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **37**(13):10397-10404.
52. Bellows, B., Lieuwen, T., 2004. Nonlinear response of a premixed combustor to forced acoustic oscillations, 455. *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 5-8 January, Reno, Nevada.
53. Preetham, S. H., Lieuwen, T. C., 2007. Response of turbulent premixed flames to harmonic acoustic forcing. **Proceedings of the Combustion Institute**, **31**(1):1427-1434.

54. Ratner, A., Palm, S., Pan, W., Ramirez, B., Culick, F., 2002. Flame response to excitation at frequencies < 60 Hz as measured by phase-resolved NO PLIF, 195. *40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 14-17 January.
55. Zinn, B. T., Lieuwen, T. C., 2005, Combustion instabilities: Basic concepts, pp 3-26. *In: Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling* (Ed: Lu F. K.). American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston.
56. Goy, C. J., James, S. R., Rea, S., Lieuwen, T., Yang, V., 2005, Monitoring combustion instabilities: E. ON UK's experience, pp 163-175. *In: Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling*).
57. Noble, B., Emerson, B., Angello, L., Lieuwen, T., 2016. Advanced gas turbine combustor health monitoring using combustion dynamics data, 1-12. *59th ISA POWID/EPRI Symposium*, 27 June - 1 July, Cleveland, Ohio USA.
58. Higgins, B., 1802. On the sound produced by a current of hydrogen gas passing through a tube. **Journal of natural philosophy, chemistry and the arts**, 1(129-131):2.
59. Hathout, J. P., 1999. Thermoacoustic Instability, Fundamentals and Modeling in Combustion. Course No. 2280, Reacting Gas Dynamics Computational Lab, Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge
60. Plavnik, G., 2006. Pulse Combustion Technology, 143-148. *14th North American Waste to Energy Conference*, Tampa, Florida USA.
61. Tyndall, J., 1897. Sound. D. Appleton & Company New York, 335 pp.
62. Rijke, P. L., 1859. Notice of a new method of causing a vibration of the air contained in a tube open at both ends. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, 17(116):419-422.
63. Rayleigh, J. W. S., 1878. The explanation of certain acoustical phenomena. **Nature**, 18:319-321.
64. Rayleigh, J. W. S., 1896. Theory of Sound. MacMillan company ltd. London, 504 pp.
65. Niederberger, A. S. P., 2006. Investigations of Thermoacoustic Oscillations: Modeling, Identification and Control. Cuvillier Verlag, 156 pp.

66. Broda, J. C., Seo, S., Santoro, R. J., Shirhattikar, G., Yang, V., 1998. An experimental study of combustion dynamics of a premixed swirl injector. **Symposium (International) on Combustion**, **27(2)**:1849-1856.
67. Culick, F. E. C., 1987. Short Communication. **Combustion Science and Technology**, **56(4-6)**:159-166.
68. Huang, Y., 2008. Combustion Dynamics of Swirl-Stabilized Lean Premixed Flames in an Acoustically-Driven Environment. University of Iowa, Doktora Tezi, 126 s.
69. Putnam, A. A., Dennis, W. R., 1954. Burner Oscillations of the Gauze-Tone Type. **The Journal of the Acoustical Society of America**, **26(5)**:716-725.
70. Lieuwen, T. C., Yang, V., 2005. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms and Modeling. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 657 pp.
71. Nicoud, F., Poinso, T., 2005. Thermoacoustic instabilities: Should the Rayleigh criterion be extended to include entropy changes? **Combustion and Flame**, **142(1)**:153-159.
72. Kim, K. T., Santavicca, D. A., 2013. Interference mechanisms of acoustic/convective disturbances in a swirl-stabilized lean-premixed combustor. **Combustion and Flame**, **160(8)**:1441-1457.
73. Kim, K. T., Santavicca, D. A., 2013. Generalization of turbulent swirl flame transfer functions in gas turbine combustors. **Combustion Science and Technology**, **185(7)**:999-1015.
74. Richards, G. A., Lee, G. T., 1996. Gas turbine combustion instability, CONF-9605160-9605164. *Technical Meeting of the Central Section of the Combustion Institute*, 5-7 May, St. Louis, Missouri, USDOE Morgantown Energy Technology Center, WV (United States).
75. Poinso, T., 2017. Prediction and control of combustion instabilities in real engines. **Proceedings of the Combustion Institute**, **36(1)**:1-28.
76. Culick, F. E., Yang, V., 1995. Overview of combustion instabilities in liquid-propellant rocket engines. **Liquid Rocket Engine Combustion Instability**, **169**:3-37.

77. Culick, F. E., 2004. Combustion instabilities in solid propellant rocket motors. *RTO/VKI Special Course on Internal Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion*, 27-31 May, Rhode-Saint-Genèse, Belgium, California Inst. of Tech. Pasadena.
78. Noble, D. R., Zhang, Q., Shareef, A., Tootle, J., Meyers, A., Lieuwen, T., 2006. Syngas Mixture Composition Effects Upon Flashback and Blowout, 357-368. *Proceedings of GT2006 ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air*, 8-11 May, Barcelona, Spain, Volume 1: Combustion and Fuels, Education.
79. Lieuwen, T. C., 2006. Static and Dynamic Combustion stability. **The Gas Turbine Handbook National Energy Technology Laboratory**:197-203.
80. Nair, S., 2006. Acoustic Characterization of Flame Blowout Phenomenon. Georgia Institute of Technology, Doktora Tezi, 128 s.
81. Sé, Ducruix, b., Schuller, T., Durox, D., Sé, Candel, b., 2003. Combustion dynamics and instabilities: Elementary coupling and driving mechanisms. **Journal of Propulsion and Power**, **19**(5):722-734.
82. Straub, D. L., Richards, G. A., 1998. Effect of fuel nozzle configuration on premix combustion dynamics, 98-GT-492. *ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*, 2-5 June, American Society of Mechanical Engineers.
83. Kundu, K., Banerjee, D., Bhaduri, D., 1977. Theoretical analysis on flame stabilization by a bluff-body. **Combustion Science and Technology**, **17**(3-4):153-162.
84. Longwell, J. P., Frost, E. E., Weiss, M. A., 1953. Flame stability in bluff body recirculation zones. **Industrial & Engineering Chemistry**, **45**(8):1629-1633.
85. Williams, F., 1966. Flame stabilization of premixed turbulent gases. **Applied Mechanics Surveys**:1157-1170.
86. Oates, G. C., 1997. *Aerothermodynamics of Gas Turbine and Rocket Propulsion*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 412 pp.
87. Bloxham, M. Predicting lean blowout using the damkohler number. Jul; 2006.
88. Yılmaz, B., 2013. Metan-hava yanmasının HAD analizleri ile incelenmesi. **MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi**, **134**:5-12.
89. Lieuwen, T., McDonell, V., Santavicca, D., Sattelmayer, T., 2010, 9. Operability Issues Associated with Steady Flowing Combustors, pp 261-288. *In: Synthesis gas combustion, fundamentals and application*). Taylor & Francis Group.

90. Zhang, Q., Noble, D. R., Lieuwen, T., 2007. Characterization of fuel composition effects in H₂/CO/CH₄ mixtures upon lean blowout. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, **129**(3):688-694.
91. Irvin, G., Yetter, R. A., 2008. Combustion, 4th Edition. Elsevier United States of America, 800 pp.
92. Yamamoto, K., Kato, S., Isobe, Y., Hayashi, N., Yamashita, H., 2011. Lifted flame structure of coannular jet flames in a triple port burner. **Proceedings of the Combustion Institute**, **33**(1):1195-1201.
93. Kiesewetter, F., Hirsch, C., Fritz, J., Kroner, M., Sattelmayer, T., 2003. Two-dimensional flashback simulation in strongly swirling flows, 293-300. *ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference*, American Society of Mechanical Engineers.
94. Kroner, M., Fritz, J., Sattelmayer, T., 2002. Flashback limits for combustion induced vortex breakdown in a swirl burner, 413-422. *ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air*, American Society of Mechanical Engineers.
95. Kröner, M., Sattelmayer, T., Fritz, J., Kiesewetter, F., Hirsch, C., 2007. Flame propagation in swirling flows—effect of local extinction on the combustion induced vortex breakdown. **Combustion Science and Technology**, **179**(7):1385-1416.
96. Thibaut, D., Candel, S., 1998. Numerical study of unsteady turbulent premixed combustion: Application to flashback simulation. **Combustion and Flame**, **113**(1-2):53-65.
97. Lefebvre, A. H., Ballal, D. R., 2010. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions. CRC press, 558 pp.
98. Fire Science Tools, 2011. Premixed flame blowoff vs flashback in slow motion (Web sayfası: <https://www.youtube.com/watch?v=KmyGR6mSPe0>), (Erişim Tarihi: 13/05/2019).
99. Smith, M. J., 2004. Aircraft Noise. Cambridge University Press, 372 pp.
100. Strahle, W. C., 1971. On combustion generated noise. **Journal of Fluid Mechanics**, **49**(2):399-414.
101. Talei, M., Brear, M. J., Hawkes, E. R., 2014. A comparative study of sound generation by laminar, combusting and non-combusting jet flows. **Theoretical and Computational Fluid Dynamics**, **28**(4):385-408.

102. Dowling, A. P., Stow, S. R., 2003. Acoustic analysis of gas turbine combustors. **Journal of Propulsion and Power**, **19**(5):751-764.
103. Lieuwen, T., 2003. Modeling premixed combustion-acoustic wave interactions: A review. **Journal of Propulsion and Power**, **19**(5):765-781.
104. Schwarz, A., Janicka, J., 2009. Combustion Noise. Springer Science & Business Media, 291 pp.
105. Aimee, S. M., of Conference. Thermoacoustic instabilities. *Combustion SIG Meeting*, 28 Eylül 2017.
106. Fritsche, D., 2005. Origin and Control of Thermoacoustic Instabilities in Lean Premixed Gas Turbine Combustion. ETH Zurich, Doktora Tezi, 195 s.
107. Wiczorek, K., 2010. Numerical Study of Mach Number Effects on Combustion Instability. University of Montpellier II, Montpellier, France, Doktora Tezi, 159 s.
108. Hathout, J. P., Fleifil, M., Rumsey, J. W., Annaswamy, A. M., Ghoniem, A. F., 1997. Model-based analysis and design of active control of thermoacoustic instability, 830-835. *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications*, 5-7 Oct. 1997.
109. Fu, C., Tan, W., Liu, J., 2008. IMC control of combustion instability, 39-43. *2008 27th Chinese Control Conference*, 16-18 July 2008.
110. Bulat, G., inventor; Siemens Aktiengesellschaft, assignee. 2014. Helmholtz Resonator for a Gas Turbine Combustion Chamber, US Patent No: 8,689,933.
111. Eldredge, J. D., Dowling, A. P., 2003. The absorption of axial acoustic waves by a perforated liner with bias flow. **Journal of Fluid Mechanics**, **485**:307-335.
112. Lei, L., Zhihui, G., Chengyu, Z., Xiaofeng, S., 2010. A Passive Method to Control Combustion Instabilities with Perforated Liner. **Chinese Journal of Aeronautics**, **23**(6):623-630.
113. Rehman, S. F., Eldredge, J. D., 2007. Numerical investigation of a bias-flow perforated liner for damping of thermoacoustic instabilities, 209-219. *ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air*, 14-17 May, American Society of Mechanical Engineers.
114. Rupp, J., Carrotte, J., Macquisten, M., 2012. The use of perforated damping liners in aero gas turbine combustion systems. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, **134**(7):071502-071502-071510.

115. Kiser, J. D., Miller, C. J., Hultgren, L. S., Grady, J. E., Jones, M. G., 2013. Compact, Lightweight, Ceramic Matrix Composite Based Acoustic Liners for Reducing Subsonic Jet Aircraft Engine Noise. *37th Annual Conference on Composites, Materials, and Structures*, 28-29 January, Cocoa Beach / Cape Canaveral, Florida.
116. Anderson, W. E., Yang, V., 1995. Liquid Rocket Engine Combustion Instability. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 579 pp.
117. Park, I. S., Sohn, C. H., 2010. Nonlinear acoustic damping induced by a half-wave resonator in an acoustic chamber. **Aerospace Science and Technology**, **14**(6):442-450.
118. Sohn, C. H., Park, J. H., 2011. A comparative study on acoustic damping induced by half-wave, quarter-wave, and Helmholtz resonators. **Aerospace Science and Technology**, **15**(8):606-614.
119. Kim, Y. J., Lee, D. K., Kim, Y., 2018. Experimental study on combustion instability and attenuation characteristics in the lab-scale gas turbine combustor with a sponge-like porous medium. **Journal of Mechanical Science and Technology**, **32**(4):1879-1887.
120. Culick, F. C. Combustion Instability in Solid Rocket Motors. Volume 2. A Guide for Motor Designers. Chemical Propulsion Information Agency Laurel MD, 1981.
121. Oefelein, J. C., Yang, V., 1993. Comprehensive review of liquid-propellant combustion instabilities in F-1 engines. **Journal of Propulsion and Power**, **9**(5):657-677.
122. Hartje, D. T., Rearden, F. H., 1972. Liquid propellant rocket combustion instability. **NASA SP-194**.
123. Annaswamy, A. M., Fleifil, M., Rumsey, J. W., Prasanth, R., Hathout, J., Ghoniem, A. F., 2000. Thermoacoustic instability: model-based optimal control designs and experimental validation. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, **8**(6):905-918.
124. Annaswamy, A. M., Ghoniem, A. F., 2002. Active control of combustion instability: theory and practice. **IEEE Control Systems Magazine**, **22**(6):37-54.
125. Karyeyen, S., 2016. Geliştirilen bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Doktora Tezi, 183 s.

126. Yılmaz, H., 2018. Sentetik Gaz Yakıtların Yanma Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, 196 s.
127. Yılmaz, İ., 2006. Model bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Doktora Tezi, 185 s.
128. Zhang, J., 2007. Micro injection fuel/air premixer/combustion. Louisiana State University, Doktora Tezi, 95 s.
129. Bakar, R. A., Aziz, A. A., Sera, M. A., 2002. Effect of air fuel mixer design on engine performance and exhaust emission of a CNG fuelled vehicles. *Segundo congreso mundial de Ingenieros*, 22-25 July, Sarawak – Malasia, Universiti Teknologi Malaysia.
130. Brückner-Kalb, J. R., Napravnik, C., Hirsch, C., Sattelmayer, T., 2007. Development of a Fuel-Air Premixer for a Sub-ppm NO_x Burner. **ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 2: Turbo Expo**, (47918):597-606.
131. Hayashi, S. Fuel/air premixer for gas turbine combustor. Google Patents; 2008.
132. Joshi, N. D., Epstein, M. J., Durlak, S., Marakovits, S., Sabla, P. E., 1994. Development of a fuel air premixer for aero-derivative dry low emissions combustors, 94-GT-253. *ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 3: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Combustion and Fuels; Oil and Gas Applications; Cycle Innovations*, 13-16 June, The Hague, Netherlands, Volume 3: Coal, Biomass and Alternative Fuels; Combustion and Fuels; Oil and Gas Applications; Cycle Innovations.
133. Palies, P., Durox, D., Schuller, T., Candel, S., 2010. The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames. **Combustion and Flame**, **157**(9):1698-1717.
134. Beér, J. M., Chigier, N. A., 1964. Velocity and static-pressure distributions in swirling air jets issuing from annular and divergent nozzles. **Journal of basic Engineering**, **86**(4):788-796.
135. Beér, J. M., Chigier, N. A., 1972. Combustion Aerodynamics. 280 pp.
136. Tuncer, O., 2006. Active Control of Spray Combustion. Louisiana State University, Doktora Tezi, 339 s.
137. Sheen, H. J., Chen, W. J., Jeng, S. Y., Huang, T. L., 1996. Correlation of swirl number for a radial-type swirl generator. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **12**(4):444-451.

138. Feyz, M. E., Pishbin, S. I., Ghazikhani, M., Modarres Razavi, S. M. R., 2015. Parametric assessment of a low-swirl burner using the exergy analysis. **Energy**, **79**:117-126.
139. Martin, B. L., 2006. Underwater Propulsion (Web sayfası: https://enme.umd.edu/combustion/underwater_propulsion.htm), (Erişim Tarihi: 31.12.2018).
140. Gupta, A. K., Lilley, D. G., Syred, N., 1984. Swirl flows. Abacus Press Tunbridge Wells, Kent, England, 488 pp.
141. Aliyu, M., Nemitallah, M. A., Said, S. A., Habib, M. A., 2016. Characteristics of H₂-enriched CH₄O₂ diffusion flames in a swirl-stabilized gas turbine combustor: Experimental and numerical study. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(44):20418-20432.
142. İlbaş, M., Karyeyen, S., Yilmaz, İ., 2016. Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(17):7185-7191.
143. Samiran, N. A., Ng, J. H., Mohd Jaafar, M. N., Valera-Medina, A., Chong, C. T., 2016. H₂-rich syngas strategy to reduce NO_x and CO emissions and improve stability limits under premixed swirl combustion mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(42):19243-19255.
144. Spangelo, Ø., 2004. Experimental and Theoretical Studies of a Low NO_x Swirl Burner. Norwegian University, Doktora Tezi, 134 s.
145. Bianca, J. D., Bauver, W. P. I., McGowan, J. G. Dynamic flow model for low-Btu gasification of coal for electric power generation. Final report R and D Task 9 (Phase I). ; Combustion Engineering, Inc., Windsor, CT (USA), 1977 FE-1545-57 United States Dep. NTIS, PC A16/MF A01. HEDB English.
146. Duff, M., Towey, J., 2010. Two ways to measure temperature using thermocouples feature simplicity. **Accuracy, and Flexibility, Analog Dialog**:44-10.
147. West, W., Westwater, J., 1953. Radiation-conduction correction for temperature measurements in hot gases. **Industrial & Engineering Chemistry**, **45**(10):2152-2156.
148. Krishnan, S., 2014. An Approach to Thermocouple Temperature Measurements that Reduces Uncertainties Associated with Radiative Corrections. Washington University in St Louis, Yüksek Lisans Tezi, 41 s.

149. Krishnan, S., Kumfer, B. M., Wu, W., Li, J., Nehorai, A., Axelbaum, R. L., 2015. An approach to thermocouple measurements that reduces uncertainties in high-temperature environments. **Energy & Fuels**, **29**(5):3446-3455.
150. Collis, D., Williams, M., 1959. Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. **Journal of Fluid Mechanics**, **6**(3):357-384.
151. Kim, C. S., Hong, S.-D., Kim, Y.-W., 2012. Radiation-corrective gas temperature measurement in a circular channel. **Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XII**, **75**:157.
152. Moffat, R. J., 1988. Describing the uncertainties in experimental results. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **1**(1):3-17.
153. Kline, S. J., McClintock, F. A., 1953. Describing uncertainty in single sample experiments. **Mech Engineering**, **75**:3-8.
154. Airy, S. G. B. Theory of Errors of Observation. Macmillan, London; 1879.
155. Dam, B., Love, N., Choudhuri, A., 2011. Flashback propensity of syngas fuels. **Fuel**, **90**(2):618-625.
156. McDonell, V., 2006. Key combustion issues associated with syngas and high-hydrogen fuels. The Gas Turbine Handbook, Gulf Professional Publishing, Oxford, UK.
157. Todd, D. M., 2000. Gas turbine improvements enhance IGCC viability. *Gasification Technologies Conference*, San Francisco, CA.
158. Zhang, Q., 2008. Lean Blowoff Characteristics of Swirling H₂/CO/CH₄ Flames. Georgia Institute of Technology, Doktora Tezi, 149 s.
159. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2018. Elektrik (Web sayfası: <https://www.enerji.gov.tr/tr-tr/sayfalar/elektrik>), (Erişim Tarihi: 24.02.2019).
160. World energy council, 2016. World Energy Resources (Web sayfası: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf>), (Erişim Tarihi: 24.02.2019).
161. Rebecca, L., 2009. Earth's Energy Budget (Web sayfası: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/EnergyBalance/page4.php>), (Erişim Tarihi: 23.02.2019).
162. University of Waikato, Science Learning Hub – Pokapū Akoranga Pūtaiao, 2007. Reflection of solar radiation by clouds (Web sayfası: ...)

<https://www.sciencelearn.org.nz/images/1133-reflection-of-solar-radiation-by-clouds>), (Erişim Tarihi: 23.02.2019).

163. European Climate Foundation (ECF), Roadmap 2050: a practical guide to a prosperous, low-carbon Europe. Volume I: technical and economic assessment. 2010.
164. Abbott, J., 2014. Syngas from renewables. Nitrogen+Syngas. Johnson Matthey Process Technologies.
165. Kačur, J., Laciak, M., Durdan, M., 2010. Measurement of the relevant values in underground coal gasification process. **AT & P Journal**, **1112010**:51-55.
166. Irvin, G., Richard, Y., 2008. Combustion. Academic Press, 774 pp.
167. Affens, W. A., McLaren, G. W., 1972. Flammability properties of hydrocarbon solutions in air. **Journal of Chemical & Engineering Data**, **17**(4):482-488.
168. Grumer, J., Harris, M. E., 1952. Flame-stability limits of methane, hydrogen, and carbon monoxide mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry**, **44**(7):1547-1553.
169. Karbasi, M., Wierzba, I., 1998. The effects of hydrogen addition on the stability limits of methane jet diffusion flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **23**(2):123-129.
170. Schefer, R. W., 2003. Hydrogen enrichment for improved lean flame stability. **International Journal of Hydrogen Energy**, **28**(10):1131-1141.
171. Takahashi, F., Mizomoto, M., Tsuruyama, K., 1990. Stability limits of hydrogen/air coflow jet diffusion flames, 34. *28th Aerospace Sciences Meeting*.
172. Yoon, Y., Donbar, J. M., Driscoll*, J. F., 1994. Blowout stability limits of a hydrogen jet flame in a supersonic, heated, coflowing air stream. **Combustion Science and Technology**, **97**(1-3):137-156.
173. Zabetakis, M. G., 1965. Flammability characteristics of combustible gases and vapors. Bureau of Mines Washington DC, 130 pp.
174. Guo, H., Smallwood, G. J., Liu, F., Ju, Y., Gülder, Ö. L., 2005. The effect of hydrogen addition on flammability limit and NO_x emission in ultra-lean counterflow CH₄/air premixed flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, **30**(1):303-311.

175. Hui, X., Zhang, C., Xia, M., Sung, C.-J., 2014. Effects of hydrogen addition on combustion characteristics of n-decane/air mixtures. **Combustion and Flame**, **161**(9):2252-2262.
176. Ji, C., Wang, S., 2009. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions. **International Journal of Hydrogen Energy**, **34**(18):7823-7834.
177. Shivaprasad, K. V., Raviteja, S., Chitrakar, P., Kumar, G. N., 2014. Experimental investigation of the effect of hydrogen addition on combustion performance and emissions characteristics of a spark ignition high speed gasoline engine. **Procedia Technology**, **14**:141-148.
178. Wang, J., Huang, Z., Tang, C., Miao, H., Wang, X., 2009. Numerical study of the effect of hydrogen addition on methane–air mixtures combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, **34**(2):1084-1096.
179. Law, C. K., 2006. *Combustion Physics*. Cambridge University Press, 722 pp.
180. Glassman, I., 1996. *Combustion*. Academic Press NY, 631 pp.
181. Gao, H.-B., Qu, Z.-G., Tao, W.-Q., He, Y.-L., 2013. Experimental investigation of methane/(Ar, N₂, CO₂)–air mixture combustion in a two-layer packed bed burner. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **44**:599-606.
182. Guo, H., Min, J., Galizzi, C., Escudié, D., Baillot, F., 2010. A numerical study on the effects of CO₂/N₂/Ar addition to air on liftoff of a laminar CH₄/air diffusion flame. **Combustion Science and Technology**, **182**(11-12):1549-1563.
183. Liu, F., Guo, H., Smallwood, G. J., 2003. The chemical effect of CO₂ replacement of N₂ in air on the burning velocity of CH₄ and H₂ premixed flames. **Combustion and Flame**, **133**(4):495-497.
184. Liu, F., Guo, H., Smallwood, G. J., Gülder, Ö. L., 2001. The chemical effects of carbon dioxide as an additive in an ethylene diffusion flame: implications for soot and NO_x formation. **Combustion and Flame**, **125**(1):778-787.
185. Wang, S., Ji, C., Zhang, B., Cong, X., Liu, X., 2016. Effect of CO₂ dilution on combustion and emissions characteristics of the hydrogen-enriched gasoline engine. **Energy**, **96**:118-126.
186. Fuman, Z., 2008. *Experimental Measurements and Modeling Prediction of Flammability Limits of Binary Hydrocarbon Mixtures*. Department of Chemical Engineering, Texas University, Texas, USA, Yüksek Lisans Tezi, 108 s.

187. Terpstra, M., 2012. Flammability Limits of Hydrogen-Diluent Mixtures in Air. University of Calgary, Yüksek Lisans Tezi, 72 s.
188. Yilmaz, H., Yilmaz, I., 2019. Combustion and emission characteristics of premixed CNG/H₂/CO/CO₂ blending synthetic gas flames in a combustor with variable geometric swirl number. **Energy**, **172**:117-133.
189. Shao, W., Xiong, Y., Mu, K., Zhang, Z., Wang, Y., Xiao, Y., 2010. The influence of fuel-air swirl intensity on flame structures of syngas swirl-stabilized diffusion flame. **Journal of Thermal Science**, **19**(3):276-283.
190. Zhou, L. X., Chen, X. L., Zhang, J., 2002. Studies on the effect of swirl on no formation in methane/air turbulent combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, **29**(2):2235-2242.
191. O'Connor, J., Acharya, V., Lieuwen, T., 2015. Transverse combustion instabilities: Acoustic, fluid mechanic, and flame processes. **Progress in Energy and Combustion Science**, **49**:1-39.
192. White, S., 2016. What percentage of the light spectrum are humans able to see with their eyes (Web sayfası: <https://www.quora.com/What-percentage-of-the-light-spectrum-are-humans-able-to-see-with-their-eyes>), (Erişim Tarihi: 02/05/2019).
193. Stamatoglou, P., 2014. Spectral Analysis of Flame Emission for Optimization Of Combustion Devices on Marine Vessels. Lund University, Yüksek Lisans Tezi, 44 s.
194. Turns, S. R., 2000. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications - 2nd Editions. McGraw-Hill New York Singapore, 676 pp.
195. Zukoski, E. E., 1978, Afterburners, pp. *In*: The Aerothermodynamics of Aircraft Gas Turbine Engines (Ed: Gordon C. O.). Washington University, Seattle.
196. Seo, S., 2003. Combustion instability mechanism of a lean premixed gas turbine combustor. **KSME International Journal**, **17**(6):906-913.
197. O'Connor, J., Hemchandra, S., Lieuwen, T., 2016, Chapter 7 - Combustion instabilities in lean premixed systems, pp 231-259. *In*: Lean Combustion (Second Edition) (Eds: Dunn-Rankin D., Therkelsen, P.). Academic Press, Boston.
198. Syred, N., Beér, J. M., 1974. Combustion in swirling flows: A review. **Combustion and Flame**, **23**(2):143-201.
199. Lilley, D. G., 1977. Swirl flows in combustion: a review. **AIAA journal**, **15**(8):1063-1078.

200. Stone, C., Menon, S., Combustion instabilities in swirling flows. *37th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 8-11 July, Salt Lake City, Utah.
201. Johnson, R. W., 2016. Handbook of Fluid Dynamics. Crc Press, 1580 pp.
202. Ishak, M. S. A., Jaafar, M. N. M., 2014. Effect of velocity variation at high swirl on axial flow development inside a can combustor. **Jurnal Teknologi**, **71**(2).
203. Sander, F. G., 1982. Axial Vane-Type Swirler Performance Characteristics. Oklahoma State University Stillwater, Oklahoma, 108 pp.
204. Khandelwal, B., Lili, D., Sethi, V., 2014. Design and study on performance of axial swirler for annular combustor by changing different design parameters. **Journal of the Energy Institute**, **87**(4):372-382.
205. Treedet, W., Suntivarakorn, R., 2018. Effect of various inlet geometries on swirling flow in can combustor. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, **12**:3712-3723.
206. Berglin, N., Berntsson, T., 1998. CHP in the pulp industry using black liquor gasification: thermodynamic analysis. **Applied Thermal Engineering**, **18**(11):947-961.
207. Dry, M. E., 2002. The Fischer–Tropsch process: 1950–2000. **Catalysis Today**, **71**(3):227-241.
208. Tristantini, D., Lögdberg, S., Gevert, B., Borg, Ø., Holmen, A., 2007. The effect of synthesis gas composition on the Fischer–Tropsch synthesis over Co/ γ -Al₂O₃ and Co–Re/ γ -Al₂O₃ catalysts. **Fuel Processing Technology**, **88**(7):643-649.
209. Azimov, U., Tomita, E., Kawahara, N., Harada, Y., 2011. Effect of syngas composition on combustion and exhaust emission characteristics in a pilot-ignited dual-fuel engine operated in PREMIER combustion mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**(18):11985-11996.
210. Choudhuri, A. R., Gollahalli, S. R., 2000. Combustion characteristics of hydrogen–hydrocarbon hybrid fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, **25**(5):451-462.
211. Syred, N., Abdulsada, M., Griffiths, A., O’Doherty, T., Bowen, P., 2012. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners. **Applied energy**, **89**(1):106-110.

EKLER

EK 1. DÜZELTİLMİŞ SICAKLIK DEĞERLERİ

Tablo EK 1. 1. SR1 sentetik gaz karışımı düzeltilmiş sıcaklık değerleri.

Zorlama Frekansı (Hz)	Ölçülen Sıcaklık (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık (K)
0	995.46	23.17	1018.63
40	997.05	23.35	1020.40
60	999.30	23.59	1022.89
80	1000.47	23.72	1024.19
90	1003.02	24.02	1027.22
95	833.02	9.85	842.87
110	964.61	20.00	984.61
150	1007.64	24.52	1032.16
175	991.79	22.78	1014.57

Tablo EK 1. 2. SM4 sentetik gaz karışımı düzeltilmiş sıcaklık değerleri.

Zorlama Frekansı (Hz)	Ölçülen Sıcaklık (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık (K)
0	1093.14	35.65	1128.79
95	1055.51	30.38	1085.89
175	1018.84	25.81	1044.65

EK 2. ÖLÇÜM EKİPMANLARININ KALİBRASYON SERTİFİKALARI



Certificate of Calibration

The following data was collected in compliance with ISO/IEC 17025 against a Flow Transfer Standard identified by Serial Number below, which was compared vs. a NIST traceable Primary Standard.

UUT Model Number:	GE50A007304KBV020	STD Model Number:	P4B013304R600AA
UUT Serial Number:	022184902	STD Serial Number:	021884724
User Range:	30000 (sccm)	Calibration By:	MKS-FLOWTEST-10
User Gas:	H ₂	Checked By:	Bazultoa
User Max. / Min Full Scale:	30000 / 20001 (sccm)	Calibration Date:	12 January, 2017
Calibration Bin ID:	12	Calibration Time:	7:42:36 PM
Calibration Gas:	N ₂	Calibration Attitude:	HBD
As Found:	[]	In Tolerance:	[X]
As Left:	[X]	Out of Tolerance:	[]

Setpoint (sccm)	UUT (sccm)	STD (sccm)	Error (%rdg)
3000.0	3000.0	2996.0	0.134
7500.0	7500.0	7501.0	-0.013
15000	15000	15009	-0.060
22500	22500	22513	-0.058
30000	30000	30033	-0.110

Notes:

1. The latest revision of MKS Calibration Procedure was followed during this calibration
2. All units must be operated on a properly regulated electrical power supply for a minimum of warm up time before check/adjustment of zero flow condition.
3. The ambient temperature at time of calibration was 23°C at normal atmospheric pressure.
4. The NIST traceable test report for the flow transfer standard shall be furnished upon request.
5. This calibration is referenced to 0°C and 760 Torr.
6. The allowable tolerance for the calibrated device is (+/-) 1% error of mass flow reading.
7. These calibration results relate only to the item(s) calibrated, as indicated above.
8. If reproduction of this report is necessary, it shall only be reproduced in full.

MKS Instruments, Inc.
6 Shattuck Road
Andover, MA 01810-2449, USA
(800) 227-8766, (978) 975-2350
Fax: (978) 975-0093

End of Report
Page 1 of 1

01/12/2017 7:42:36 PM
www.mksinst.com



Certificate of Calibration

The following data was collected in compliance with ISO/IEC 17025 against a Flow Transfer Standard identified by Serial Number below, which was compared vs. a NIST traceable Primary Standard.

UUT Model Number:	GE50A009304KBV020	STD Model Number:	P4B013304R600AA
UUT Serial Number:	022184903	STD Serial Number:	021884724
User Range:	30000 (sccm)	Calibration By:	MKS-FLOWTEST-10
User Gas:	CO	Checked By:	Bazulto
User Max. / Min Full Scale:	30000 / 20001 (sccm)	Calibration Date:	11 January, 2017
Calibration Bin ID:	12	Calibration Time:	10:25:29 PM
Calibration Gas:	N ₂	Calibration Attitude:	HBD
As Found:	[]	In Tolerance:	[X]
As Left:	[X]	Out of Tolerance:	[]

Setpoint (sccm)	UUT (sccm)	STD (sccm)	Error (%rdg)
3000.0	3000.0	3000.0	0.000
7500.0	7500.0	7501.0	-0.013
15000	15000	15011	-0.073
22500	22500	22534	-0.151
30000	30000	30035	-0.117

Notes:

1. The latest revision of MKS Calibration Procedure was followed during this calibration
2. All units must be operated on a properly regulated electrical power supply for a minimum of warm up time before check/adjustment of zero flow condition.
3. The ambient temperature at time of calibration was 23°C at normal atmospheric pressure.
4. The NIST traceable test report for the flow transfer standard shall be furnished upon request.
5. This calibration is referenced to 0°C and 760 Torr.
6. The allowable tolerance for the calibrated device is (+/-) 1% error of mass flow reading.
7. These calibration results relate only to the item(s) calibrated, as indicated above.
8. If reproduction of this report is necessary, it shall only be reproduced in full.

MKS Instruments, Inc.
 6 Shattuck Road
 Andover, MA 01810-2449, USA
 (800) 227-8766, (978) 975-2350
 Fax: (978) 975-0093

End of Report
 Page 1 of 1

01/11/2017 10:25:29 PM
 www.mksinst.com

SIX SHATTUCK ROAD, ANDOVER, MASSACHUSETTS 01810, (978) 975-2350, FAX: (978) 975-0093



Certificate of Calibration

The following data was collected in compliance with ISO/IEC 17025 against a Flow Transfer Standard identified by Serial Number below, which was compared vs. a NIST traceable Primary Standard.

UUT Model Number:	GE50A025304KBV020	STD Model Number:	P4B013504R600AA
UUT Serial Number:	022184911	STD Serial Number:	021886654
User Range:	30000 (sccm)	Calibration By:	GMFC-CAL-02
User Gas:	CO ₂	Checked By:	Bazultoa
User Max. / Min Full Scale:	38000 / 22800 (sccm)	Calibration Date:	13 January, 2017
Calibration Bin ID:	13	Calibration Time:	10:26:51 PM
Calibration Gas:	N ₂	Calibration Attitude:	HBD
As Found:	[]	In Tolerance:	[X]
As Left:	[X]	Out of Tolerance:	[]

Setpoint (sccm)	UUT (sccm)	STD (sccm)	Error (%rdg)
5000.0	5001.0	4998.0	0.060
12500	12503	12498	0040
25000	25000	25004	-0.016
37500	37500	37596	-0.255
50000	49999	50068	-0.138

Notes:

1. The latest revision of MKS Calibration Procedure was followed during this calibration
2. All units must be operated on a properly regulated electrical power supply for a minimum of warm up time before check/adjustment of zero flow condition.
3. The ambient temperature at time of calibration was 23°C at normal atmospheric pressure.
4. The NIST traceable test report for the flow transfer standard shall be furnished upon request.
5. This calibration is referenced to 0°C and 760 Torr.
6. The allowable tolerance for the calibrated device is (+/-) 1% error of mass flow reading.
7. These calibration results relate only to the item(s) calibrated, as indicated above.
8. If reproduction of this report is necessary, it shall only be reproduced in full.

MKS Instruments, Inc.
6 Shattuck Road
Andover, MA 01810-2449, USA
(800) 227-8766, (978) 975-2350
Fax: (978) 975-0093

End of Report
Page 1 of 1

01/13/2017 10:26:51 PM
www.mksinst.com



Certificate of Calibration

The following data was collected in compliance with ISO/IEC 17025 against a Flow Transfer Standard identified by Serial Number below, which was compared vs. a NIST traceable Primary Standard.

UUT Model Number:	GE50A028304KBV020	STD Model Number:	P4B013504R600AA
UUT Serial Number:	022341087	STD Serial Number:	017085805
User Range:	30000 (sccm)	Calibration By:	AND-D-FLOWCAL
User Gas:	CH ₄	Checked By:	castanedaf
User Max. / Min Full Scale:	36000 / 21600 (sccm)	Calibration Date:	17 January, 2018
Calibration Bin ID:	13	Calibration Time:	5:11:18 PM
Calibration Gas:	N ₂	Calibration Attitude:	HBD
As Found:	[]	In Tolerance:	[X]
As Left:	[X]	Out of Tolerance:	[]

Setpoint (sccm)	UUT (sccm)	STD (sccm)	Error (%rdg)
5000.0	5000.0	4995.0	0.100
12500	12500	12490	0.080
25000	25000	25005	-0.020
37500	37500	37515	-0.045
50000	49999	50015	-0.032

Notes:

1. The latest revision of MKS Calibration Procedure was followed during this calibration
2. All units must be operated on a properly regulated electrical power supply for a minimum of warm up time before check/adjustment of zero flow condition.
3. The ambient temperature at time of calibration was 23°C at normal atmospheric pressure.
4. The NIST traceable test report for the flow transfer standard shall be furnished upon request.
5. This calibration is referenced to 0°C and 760 Torr.
6. The allowable tolerance for the calibrated device is (+/-) 1% error of mass flow reading.
7. These calibration results relate only to the item(s) calibrated, as indicated above.
8. If reproduction of this report is necessary, it shall only be reproduced in full.

MKS Instruments, Inc.
 6 Shattuck Road
 Andover, MA 01810-2449, USA
 (800) 227-8766, (978) 975-2350
 Fax: (978) 975-0093

End of Report
 Page 1 of 1

01/17/2018 5:11:18 PM
 www.mksinst.com

SIX SHATTUCK ROAD, ANDOVER, MASSACHUSETTS 01810, (978) 975-2350, FAX: (978) 975-0093



CALIBRATION RECORD SHEET

DUT

Dev. Under Test:	1579A00832LS1BV	Range:	300 slm AIR
Serial Number:	022186577	Cal. Table No:	1
Cal. Date:	2017-01-11	Cal. Table Active:	Yes

Calibration

#	Dev. Under Test: [slm]	Flow Rate [slm]	rel. Deviation [% of F.S.]
0	0.21	0.00	0.07
1	30.00	29.79	0.07
2	60.00	59.88	0.04
3	119.97	120.12	-0.05
4	179.97	180.03	-0.02
5	240.00	240.18	-0.06
6	299.73	300.18	-0.15

Calibration Conditions

Orientation:	horizontal	Ambient Temp:	23.0 °C
Calibration Gas:	N2	GCF:	1.000
Inlet Pressure:	2700 mbar		

Reference

Reference Unit:	1559A-300L-RV	QC check ID:	P-FD.0105
Serial Number:	017163888	QC ID expires:	2017-07-17
Calibration System:	MICROCAL F	QC check ID:	P-FD4.0000
Serial Number:	G19513G40	QC ID expires:	2017-06-05

In Tolerance:	Yes	As Found:	No
Out of Tolerance:	No	As Left:	Yes
Process Date:	2017-01-11	Data by:	Nevareza
Print Date:		Checked by:	469

This calibration was performed with a reference which was calibrated against DryCal ML-800 (traceable to NIST). The Device Under Test (DUT) was warmed and stabilized for the recommended time specified by manufacturer, before check/adjustment to zero. Units sccm/slm are referenced to 0°C and 1013.25 mbar.

MKS Instruments Inc. / Ave. Libre Comercio esq. con Calzada Industrial #1 / Parque Industrial Nuevo Nogales /
Nogales, Sonora 84000 Mexico / Tel: +52 631 311 25 00

Document No.: FRM_QW44

Revision: 2014-02-19

MRU BACA GAZI VE EMİSYON ÖLÇÜM CİHAZLARI LTD. ŞTİ.

**KALİBRASYON SERTİFİKASI****FİRMA ADI :** GAZİ ÜNİVERSİTESİ**CİHAZ MODELİ:** NOVAplus Analizör NOVAplus RCU**CİHAZ SERİ NO:** 014297 014253**TARİH:** 10.04.2017**SERTİFİKA NO:** KS.BG.17.027

Bacagazı analiz cihazlarının kalibrasyon ve ayarı sertifikalı test gazları ile yapılmaktadır.

Sertifikalı Test Gazları Listesi:

CO/O ₂ Silindir No: 530044	SO ₂ Silindir No: 01330
CO/H ₂ /O ₂ Silindir No: 530065	NO Silindir No: 01333
NO ₂ Silindir No: 01233	

Ölçüm Sonuçları:

	Silindir Değeri	İlk Okuma	Ayarlanan Değer
O ₂ (%)	0.0	0.0	0.0
O ₂ (%)	10.2	10.3	10.2
CO (ppm)	507	N/A	507
CO/H ₂ (ppm)	812	N/A	812
NO (ppm)	80	82	80
NO ₂ (ppm)	64	48	64
SO ₂ (ppm)	509	476	509

MRU BACA GAZI VE EMİSYON ÖLÇÜM
CİHAZLARI LIMITED ŞİRKETİ
Şeyhli Mah. Seyit Ali Sok. No:6-2
Pendik İST. Tel: 0216 378 91 33
Pendik V.D. 6230367892

MRU BACA GAZI VE EMİSYON ÖLÇÜM CİHAZLARI LTD. ŞTİ.

Şeyhli Mah. Seyit Ali Sok. No: 6/2 Kurtköy Pendik İstanbul

Tel: 0216 378 91 33 – 34 PBX

Faks: 0216 378 91 35

Mobil: 0541 234 16 78

info@mru.eu



Piezoresistive Pressure Transmitter

Prod.No : 222305.3042

TYPE : PR-23 / 10bar / 8465

SN : 618725

OUTPUT : 0 ... 10 V



RANGE : 0 ... 10 bar

Linearity	-0.11	%FS(Lnorm)	bar	V
Max.Pressure	15	bar	0.00	0.000
Supply	13 ... 32	V DC	2.50	2.508
Comp.Temp.Range	-10 ... 80	°C	5.00	5.011
			7.50	7.505
			10.00	9.990

1 : GND				
2 : +OUT				
3 : +Vcc				2
			20.01.2017	BOS

KELLER Druckmesstechnik
 CH-8404 Winterthur, St.Gallerstrasse 119
 D-79798 Jestetten, Schwarzwaldstr.17



Piezoresistive Pressure Transmitter

Prod.No : 222305.3042

TYPE : PR-23 / 10bar / 8465

SN : 618724

OUTPUT : 0 ... 10 V



RANGE : 0 ... 10 bar

Linearity	-0.11	%FS(Lnorm)	bar	V
Max.Pressure	15	bar	0.00	0.000
Supply	13 ... 32	V DC	2.50	2.508
Comp.Temp.Range	-10 ... 80	°C	5.00	5.010
			7.50	7.504
			10.00	9.987

1 : GND				
2 : +OUT				
3 : +Vcc				1
			20.01.2017	BOS

KELLER Druckmesstechnik
 CH-8404 Winterthur, St.Gallerstrasse 119
 D-79798 Jestetten, Schwarzwaldstr.17

Delphin Technology AG Lustheide 81 D- 51427 Bergisch Gladbach Tel.: +49 2204 97685-0 Fax: +49 2204 97685-85 info@delphin.com www.delphin.com	<h2 style="margin: 0;">Test Certification</h2>	
--	--	---

Device:	EK200L	PCBName/Version:	UNE200 V1.2.0
Serial-Number:	50011410	PCBNumber:	M-30601380
USBSerial-Number:	1140	Calibration-Device:	MOKA4

Date: 28.04.2016

Channel	Measuring range	Setpoint value	Measured value	Tolerance	Measurement Uncertainty	Result
A IN 1	10000 mV	-9500,139 mV	-9500,109 mV	2,000 mV	382,505 µV	OK
A IN 1	10000 mV	-4750,065 mV	-4750,140 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 1	10000 mV	0,002 mV	0,091 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 1	10000 mV	4750,032 mV	4750,169 mV	2,000 mV	216,251 µV	OK
A IN 1	10000 mV	9499,939 mV	9500,154 mV	2,000 mV	382,498 µV	OK
A IN 2	5000 mV	-4500,081 mV	-4500,130 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 2	5000 mV	-2249,988 mV	-2249,929 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 2	5000 mV	0,002 mV	-0,035 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 2	5000 mV	2249,966 mV	2249,835 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 2	5000 mV	4499,993 mV	4500,041 mV	2,500 mV	207,500 µV	OK
A IN 3	2000 mV	-1799,988 mV	-1799,988 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 3	2000 mV	-899,995 mV	-899,987 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 3	2000 mV	0,002 mV	0,004 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 3	2000 mV	899,978 mV	899,956 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 3	2000 mV	1799,970 mV	1799,981 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 4	1000 mV	-899,995 mV	-900,001 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 4	1000 mV	-450,000 mV	-450,004 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 4	1000 mV	0,002 mV	0,005 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 4	1000 mV	449,998 mV	449,994 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 4	1000 mV	899,978 mV	900,000 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 5	500 mV	-449,999 mV	-450,004 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 5	500 mV	-224,996 mV	-225,000 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 5	500 mV	0,002 mV	0,001 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 5	500 mV	224,997 mV	224,994 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 5	500 mV	449,998 mV	450,005 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 6	200 mV	-179,996 mV	-179,996 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 6	200 mV	-89,997 mV	-89,999 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 6	200 mV	0,001 mV	0,001 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 6	200 mV	89,998 mV	89,997 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 6	200 mV	179,997 mV	179,998 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 7	100 mV	-89,997 mV	-89,999 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 7	100 mV	-44,998 mV	-45,000 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 7	100 mV	0,001 mV	0,001 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 7	100 mV	45,000 mV	45,001 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 7	100 mV	89,998 mV	90,003 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 8	10000 mV	-9500,138 mV	-9500,188 mV	2,000 mV	382,505 µV	OK
A IN 8	10000 mV	-4750,064 mV	-4750,128 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 8	10000 mV	0,002 mV	0,013 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 8	10000 mV	4750,035 mV	4750,083 mV	2,000 mV	216,251 µV	OK
A IN 8	10000 mV	9499,941 mV	9500,081 mV	2,000 mV	382,498 µV	OK
A IN 9	5000 mV	-4500,077 mV	-4500,130 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 9	5000 mV	-2249,987 mV	-2249,940 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 9	5000 mV	0,001 mV	0,043 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 9	5000 mV	2249,966 mV	2249,893 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 9	5000 mV	4499,997 mV	4500,038 mV	2,500 mV	207,500 µV	OK
A IN 10	2000 mV	-1799,991 mV	-1799,995 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 10	2000 mV	-899,996 mV	-900,034 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 10	2000 mV	0,002 mV	0,020 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 10	2000 mV	899,978 mV	900,020 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 10	2000 mV	1799,968 mV	1800,010 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 11	1000 mV	-899,995 mV	-900,002 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 11	1000 mV	-450,000 mV	-449,987 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 11	1000 mV	0,002 mV	0,012 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 11	1000 mV	449,998 mV	449,991 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 11	1000 mV	899,978 mV	899,999 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 12	500 mV	-449,999 mV	-450,003 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 12	500 mV	-224,997 mV	-224,997 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 12	500 mV	0,002 mV	-0,003 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 12	500 mV	224,997 mV	224,982 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK

Delphin Technology AG Lustheide 81 D- 51427 Bergisch Gladbach Tel.: +49 2204 97685-0 Fax: +49 2204 97685-85 info@delphin.com www.delphin.com	<h2>Test Certification</h2>	
--	-----------------------------	---

Device:	EK200L	PCBName/Version:	UNE200 V1.2.0
Serial-Number:	50011410	PCBNumber:	M-30601380
USBSerial-Number:	1140	Calibration-Device:	MOKA4

Date: 28.04.2016

Channel	Measuring range	Setpoint value	Measured value	Tolerance	Measurement Uncertainty	Result
A IN 12	500 mV	449,997 mV	449,999 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 13	200 mV	-179,996 mV	-180,000 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 13	200 mV	-89,997 mV	-90,000 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 13	200 mV	0,001 mV	0,001 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 13	200 mV	89,998 mV	89,996 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 13	200 mV	179,997 mV	180,002 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 14	100 mV	-89,997 mV	-89,998 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 14	100 mV	-44,998 mV	-44,998 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 14	100 mV	0,002 mV	0,001 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 14	100 mV	45,000 mV	45,000 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 14	100 mV	89,997 mV	90,000 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 15	10000 mV	-9500,139 mV	-9500,169 mV	2,000 mV	382,505 µV	OK
A IN 15	10000 mV	-4750,065 mV	-4750,019 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 15	10000 mV	0,002 mV	0,087 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 15	10000 mV	4750,032 mV	4750,056 mV	2,000 mV	216,251 µV	OK
A IN 15	10000 mV	9499,939 mV	9500,265 mV	2,000 mV	382,498 µV	OK
A IN 16	5000 mV	-4500,081 mV	-4500,139 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 16	5000 mV	-2249,988 mV	-2250,006 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 16	5000 mV	0,002 mV	-0,037 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 16	5000 mV	2249,966 mV	2249,903 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 16	5000 mV	4499,993 mV	4500,031 mV	2,500 mV	207,500 µV	OK
A IN 17	2000 mV	-1799,988 mV	-1799,992 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 17	2000 mV	-899,995 mV	-900,044 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 17	2000 mV	0,002 mV	0,003 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 17	2000 mV	899,978 mV	900,010 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 17	2000 mV	1799,970 mV	1799,977 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 18	1000 mV	-899,995 mV	-900,002 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 18	1000 mV	-450,000 mV	-449,991 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 18	1000 mV	0,002 mV	0,004 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 18	1000 mV	449,998 mV	449,989 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 18	1000 mV	899,978 mV	900,007 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 19	500 mV	-449,999 mV	-450,004 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 19	500 mV	-224,996 mV	-225,002 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 19	500 mV	0,002 mV	0,001 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 19	500 mV	224,997 mV	224,993 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 19	500 mV	449,998 mV	450,001 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 20	200 mV	-179,996 mV	-179,997 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 20	200 mV	-89,997 mV	-89,999 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 20	200 mV	0,001 mV	0,003 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 20	200 mV	89,998 mV	89,997 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 20	200 mV	179,997 mV	180,000 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 21	100 mV	-89,997 mV	-89,998 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 21	100 mV	-44,998 mV	-44,999 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 21	100 mV	0,001 mV	0,000 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 21	100 mV	45,000 mV	45,000 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 21	100 mV	89,998 mV	90,002 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 22	10000 mV	-9500,138 mV	-9500,188 mV	2,000 mV	382,505 µV	OK
A IN 22	10000 mV	-4750,064 mV	-4750,128 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 22	10000 mV	0,002 mV	0,013 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 22	10000 mV	4750,035 mV	4750,083 mV	2,000 mV	216,251 µV	OK
A IN 22	10000 mV	9499,941 mV	9500,081 mV	2,000 mV	382,498 µV	OK
A IN 23	5000 mV	-4500,077 mV	-4500,081 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 23	5000 mV	-2249,987 mV	-2249,980 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 23	5000 mV	0,001 mV	0,006 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 23	5000 mV	2249,966 mV	2249,942 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 23	5000 mV	4499,997 mV	4500,007 mV	2,500 mV	207,500 µV	OK
A IN 24	2000 mV	-1799,991 mV	-1799,995 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 24	2000 mV	-899,996 mV	-900,034 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 24	2000 mV	0,002 mV	0,020 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK

Delphin Technology AG Lustheide 81 D- 51427 Bergisch Gladbach Tel.: +49 2204 97685-0 Fax: +49 2204 97685-85 info@delphin.com www.delphin.com	<h2 style="margin: 0;">Test Certification</h2>	
--	--	---

Device:	EK200L	PCBName/Version:	UNE200 V1.2.0
Serial-Number:	50011410	PCBNumber:	M-30601380
USBSerial-Number:	1140	Calibration-Device:	MOKA4

Date: 28.04.2016

Channel	Measuring range	Setpoint value	Measured value	Tolerance	Measurement Uncertainty	Result
A IN 24	2000 mV	899,978 mV	900,036 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 24	2000 mV	1799,968 mV	1800,010 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 25	1000 mV	-899,995 mV	-899,994 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 25	1000 mV	-450,000 mV	-450,005 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 25	1000 mV	0,002 mV	0,012 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 25	1000 mV	449,998 mV	450,001 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 25	1000 mV	899,978 mV	899,991 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 26	500 mV	-449,999 mV	-450,004 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 26	500 mV	-224,997 mV	-225,006 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 26	500 mV	0,002 mV	-0,003 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 26	500 mV	224,997 mV	224,989 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 26	500 mV	449,997 mV	449,998 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 27	200 mV	-179,996 mV	-179,999 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 27	200 mV	-89,997 mV	-90,000 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 27	200 mV	0,001 mV	0,001 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 27	200 mV	89,998 mV	89,997 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 27	200 mV	179,997 mV	180,001 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 28	100 mV	-89,997 mV	-89,998 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 28	100 mV	-44,998 mV	-44,997 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 28	100 mV	0,002 mV	0,002 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 28	100 mV	45,000 mV	44,998 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 28	100 mV	89,997 mV	90,001 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A OUT 1	20 mA	-20,000 mA	-20,001 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	-10,000 mA	-10,001 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	0,000 mA	0,002 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	10,000 mA	9,997 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	20,000 mA	19,998 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	10000 mV	-9500,000 mV	-9501,145 mV	5,000 mV	382,540 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	-4750,000 mV	-4750,908 mV	5,000 mV	216,282 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	0,000 mV	0,839 mV	5,000 mV	3,542 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	4750,000 mV	4748,377 mV	5,000 mV	216,193 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	9500,000 mV	9498,820 mV	5,000 mV	382,459 µV	OK
A OUT 2	20 mA	-20,000 mA	-20,003 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	-10,000 mA	-10,002 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	0,000 mA	0,002 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	10,000 mA	10,001 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	20,000 mA	20,000 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	10000 mV	-9500,000 mV	-9501,364 mV	5,000 mV	382,548 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	-4750,000 mV	-4749,842 mV	5,000 mV	216,244 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	0,000 mV	1,416 mV	5,000 mV	3,571 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	4750,000 mV	4749,740 mV	5,000 mV	216,241 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	9500,000 mV	9501,871 mV	5,000 mV	382,566 µV	OK
FREQ 1		10,000 Hz	10,000 Hz	0,001 Hz	0,005 Hz	OK
FREQ 1		62507,331 Hz	62507,375 Hz	6,251 Hz	6,251 Hz	OK
FREQ 1		125004,460 Hz	125004,875 Hz	12,500 Hz	12,500 Hz	OK
FREQ 1		187502,340 Hz	187502,625 Hz	18,750 Hz	18,750 Hz	OK
FREQ 1		249998,960 Hz	249999,750 Hz	25,000 Hz	25,000 Hz	OK
DIN 1		HIGH	HIGH			OK
DIN 1		LOW	LOW			OK
DOUT 1		HIGH	HIGH			OK
DOUT 1		LOW	LOW			OK

Delphin Technology AG Lustheide 81 D- 51427 Bergisch Gladbach Tel.: +49 2204 97685-0 Fax: +49 2204 97685-85 info@delphin.com www.delphin.com	<h2>Test Certification</h2>	
--	-----------------------------	---

Device:	EK200L	PCBName/Version:	UNE200 V1.2.0
Serial-Number:	50011780	PCBNumber:	M-30601393
USBSerial-Number:	1177	Calibration-Device:	MOKA4

Date: 07.12.2016

Channel	Measuring range	Setpoint value	Measured value	Tolerance	Measurement Uncertainty	Result
A IN 1	10000 mV	-9500,159 mV	-9500,252 mV	2,000 mV	382,506 µV	OK
A IN 1	10000 mV	-4750,079 mV	-4750,002 mV	2,000 mV	216,253 µV	OK
A IN 1	10000 mV	0,001 mV	0,004 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 1	10000 mV	4750,055 mV	4749,878 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 1	10000 mV	9499,972 mV	9500,046 mV	2,000 mV	382,499 µV	OK
A IN 2	5000 mV	-4500,092 mV	-4500,075 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 2	5000 mV	-2249,991 mV	-2249,995 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 2	5000 mV	0,001 mV	0,005 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 2	5000 mV	2249,971 mV	2249,943 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 2	5000 mV	4500,016 mV	4500,033 mV	2,500 mV	207,501 µV	OK
A IN 3	2000 mV	-1799,991 mV	-1799,985 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 3	2000 mV	-899,997 mV	-900,006 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 3	2000 mV	0,002 mV	0,002 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 3	2000 mV	899,979 mV	899,965 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 3	2000 mV	1799,975 mV	1799,979 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 4	1000 mV	-899,997 mV	-899,995 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 4	1000 mV	-450,002 mV	-449,995 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 4	1000 mV	0,001 mV	0,011 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 4	1000 mV	449,999 mV	449,994 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 4	1000 mV	899,980 mV	899,989 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 5	500 mV	-450,001 mV	-449,995 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 5	500 mV	-224,996 mV	-224,990 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 5	500 mV	0,002 mV	0,006 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 5	500 mV	224,996 mV	224,989 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 5	500 mV	449,999 mV	450,001 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 6	200 mV	-179,996 mV	-179,993 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 6	200 mV	-89,997 mV	-89,997 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 6	200 mV	0,001 mV	0,003 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 6	200 mV	89,998 mV	89,998 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 6	200 mV	179,997 mV	179,998 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 7	100 mV	-89,997 mV	-89,997 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 7	100 mV	-44,998 mV	-44,996 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 7	100 mV	0,002 mV	0,004 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 7	100 mV	45,000 mV	45,000 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 7	100 mV	89,998 mV	89,998 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 8	10000 mV	-9500,156 mV	-9500,166 mV	2,000 mV	382,505 µV	OK
A IN 8	10000 mV	-4750,076 mV	-4750,001 mV	2,000 mV	216,253 µV	OK
A IN 8	10000 mV	0,001 mV	0,004 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 8	10000 mV	4750,055 mV	4749,878 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 8	10000 mV	9499,970 mV	9500,042 mV	2,000 mV	382,499 µV	OK
A IN 9	5000 mV	-4500,092 mV	-4500,078 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 9	5000 mV	-2249,989 mV	-2249,998 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 9	5000 mV	0,001 mV	0,006 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 9	5000 mV	2249,970 mV	2249,948 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 9	5000 mV	4500,018 mV	4500,036 mV	2,500 mV	207,501 µV	OK
A IN 10	2000 mV	-1799,990 mV	-1799,985 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 10	2000 mV	-899,998 mV	-899,982 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 10	2000 mV	0,001 mV	0,033 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 10	2000 mV	899,980 mV	899,990 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 10	2000 mV	1799,970 mV	1799,992 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 11	1000 mV	-899,997 mV	-899,989 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 11	1000 mV	-450,001 mV	-450,000 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 11	1000 mV	0,001 mV	0,010 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 11	1000 mV	450,000 mV	449,999 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 11	1000 mV	899,980 mV	899,981 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 12	500 mV	-450,001 mV	-450,000 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 12	500 mV	-224,996 mV	-225,000 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 12	500 mV	0,002 mV	0,001 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 12	500 mV	224,996 mV	224,989 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK

Delphin Technology AG Lustheide 81 D- 51427 Bergisch Gladbach Tel.: +49 2204 97685-0 Fax: +49 2204 97685-85 info@delphin.com www.delphin.com	<h2 style="margin: 0;">Test Certification</h2>	
--	--	---

Device:	EK200L	PCBName/Version:	UNE200 V1.2.0
Serial-Number:	50011780	PCBNumber:	M-30601393
USBSerial-Number:	1177	Calibration-Device:	MOKA4

Date: 07.12.2016

Channel	Measuring range	Setpoint value	Measured value	Tolerance	Measurement Uncertainty	Result
A IN 12	500 mV	449,999 mV	449,997 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 13	200 mV	-179,997 mV	-179,995 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 13	200 mV	-89,998 mV	-89,996 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 13	200 mV	0,002 mV	0,003 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 13	200 mV	89,997 mV	89,997 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 13	200 mV	179,997 mV	179,998 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 14	100 mV	-89,997 mV	-89,997 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 14	100 mV	-44,998 mV	-45,000 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 14	100 mV	0,001 mV	0,001 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 14	100 mV	45,000 mV	44,998 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 14	100 mV	89,997 mV	89,998 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 15	10000 mV	-9500,159 mV	-9500,173 mV	2,000 mV	382,506 µV	OK
A IN 15	10000 mV	-4750,079 mV	-4750,002 mV	2,000 mV	216,253 µV	OK
A IN 15	10000 mV	0,001 mV	0,004 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 15	10000 mV	4750,055 mV	4749,878 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 15	10000 mV	9499,972 mV	9499,968 mV	2,000 mV	382,499 µV	OK
A IN 16	5000 mV	-4500,092 mV	-4500,043 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 16	5000 mV	-2249,991 mV	-2249,935 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 16	5000 mV	0,001 mV	0,003 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 16	5000 mV	2249,971 mV	2249,886 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 16	5000 mV	4500,016 mV	4500,062 mV	2,500 mV	207,501 µV	OK
A IN 17	2000 mV	-1799,991 mV	-1799,973 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 17	2000 mV	-899,997 mV	-900,063 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 17	2000 mV	0,002 mV	0,002 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 17	2000 mV	899,979 mV	900,019 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 17	2000 mV	1799,975 mV	1799,975 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 18	1000 mV	-899,997 mV	-899,987 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 18	1000 mV	-450,002 mV	-449,993 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 18	1000 mV	0,001 mV	0,011 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 18	1000 mV	449,999 mV	449,989 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 18	1000 mV	899,980 mV	899,990 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 19	500 mV	-450,001 mV	-449,996 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 19	500 mV	-224,996 mV	-224,987 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 19	500 mV	0,002 mV	0,006 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 19	500 mV	224,996 mV	224,984 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 19	500 mV	449,999 mV	450,004 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 20	200 mV	-179,996 mV	-179,995 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 20	200 mV	-89,997 mV	-89,996 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 20	200 mV	0,001 mV	0,005 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 20	200 mV	89,998 mV	89,997 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 20	200 mV	179,997 mV	179,997 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 21	100 mV	-89,997 mV	-89,996 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 21	100 mV	-44,998 mV	-44,997 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 21	100 mV	0,002 mV	0,002 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 21	100 mV	45,000 mV	44,999 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 21	100 mV	89,998 mV	90,000 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 22	10000 mV	-9500,156 mV	-9500,136 mV	2,000 mV	382,505 µV	OK
A IN 22	10000 mV	-4750,076 mV	-4750,116 mV	2,000 mV	216,253 µV	OK
A IN 22	10000 mV	0,001 mV	-0,000 mV	2,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 22	10000 mV	4750,055 mV	4749,999 mV	2,000 mV	216,252 µV	OK
A IN 22	10000 mV	9499,970 mV	9499,983 mV	2,000 mV	382,499 µV	OK
A IN 23	5000 mV	-4500,092 mV	-4500,056 mV	2,500 mV	207,503 µV	OK
A IN 23	5000 mV	-2249,989 mV	-2249,987 mV	2,500 mV	128,750 µV	OK
A IN 23	5000 mV	0,001 mV	0,001 mV	2,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 23	5000 mV	2249,970 mV	2249,930 mV	2,500 mV	128,749 µV	OK
A IN 23	5000 mV	4500,018 mV	4500,017 mV	2,500 mV	207,501 µV	OK
A IN 24	2000 mV	-1799,990 mV	-1799,984 mV	1,000 mV	113,000 µV	OK
A IN 24	2000 mV	-899,998 mV	-899,994 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 24	2000 mV	0,001 mV	0,017 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK

Delphin Technology AG Lustheide 81 D- 51427 Bergisch Gladbach Tel.: +49 2204 97685-0 Fax: +49 2204 97685-85 info@delphin.com www.delphin.com	<h2 style="margin: 0;">Test Certification</h2>	
--	--	---

Device:	EK200L	PCBName/Version:	UNE200 V1.2.0
Serial-Number:	50011780	PCBNumber:	M-30601393
USBSerial-Number:	1177	Calibration-Device:	MOKA4

Date: 07.12.2016

Channel	Measuring range	Setpoint value	Measured value	Tolerance	Measurement Uncertainty	Result
A IN 24	2000 mV	899,980 mV	899,979 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 24	2000 mV	1799,970 mV	1799,992 mV	1,000 mV	112,999 µV	OK
A IN 25	1000 mV	-899,997 mV	-899,994 mV	1,000 mV	43,000 µV	OK
A IN 25	1000 mV	-450,001 mV	-450,000 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 25	1000 mV	0,001 mV	0,003 mV	1,000 mV	3,500 µV	OK
A IN 25	1000 mV	450,000 mV	449,980 mV	1,000 mV	25,000 µV	OK
A IN 25	1000 mV	899,980 mV	899,983 mV	1,000 mV	42,999 µV	OK
A IN 26	500 mV	-450,001 mV	-450,000 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 26	500 mV	-224,996 mV	-225,002 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 26	500 mV	0,002 mV	0,001 mV	0,500 mV	3,500 µV	OK
A IN 26	500 mV	224,996 mV	224,992 mV	0,500 mV	16,000 µV	OK
A IN 26	500 mV	449,999 mV	450,001 mV	0,500 mV	25,000 µV	OK
A IN 27	200 mV	-179,997 mV	-179,994 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 27	200 mV	-89,998 mV	-89,998 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 27	200 mV	0,002 mV	0,003 mV	0,400 mV	3,500 µV	OK
A IN 27	200 mV	89,997 mV	89,999 mV	0,400 mV	8,000 µV	OK
A IN 27	200 mV	179,997 mV	179,997 mV	0,400 mV	14,200 µV	OK
A IN 28	100 mV	-89,997 mV	-89,997 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A IN 28	100 mV	-44,998 mV	-45,000 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 28	100 mV	0,001 mV	0,002 mV	0,200 mV	3,500 µV	OK
A IN 28	100 mV	45,000 mV	44,999 mV	0,200 mV	5,750 µV	OK
A IN 28	100 mV	89,997 mV	89,998 mV	0,200 mV	8,000 µV	OK
A OUT 1	20 mA	-20,000 mA	-20,004 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	-10,000 mA	-9,998 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	0,000 mA	-0,001 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	10,000 mA	10,002 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	20 mA	20,000 mA	20,003 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 1	10000 mV	-9500,000 mV	-9500,343 mV	5,000 mV	382,512 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	-4750,000 mV	-4749,194 mV	5,000 mV	216,222 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	0,000 mV	-0,922 mV	5,000 mV	3,546 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	4750,000 mV	4749,493 mV	5,000 mV	216,232 µV	OK
A OUT 1	10000 mV	9500,000 mV	9498,911 mV	5,000 mV	382,462 µV	OK
A OUT 2	20 mA	-20,000 mA	-19,998 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	-10,000 mA	-10,001 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	0,000 mA	0,002 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	10,000 mA	9,997 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	20 mA	20,000 mA	20,002 mA	0,010 mA	0,000 mA	OK
A OUT 2	10000 mV	-9500,000 mV	-9499,106 mV	5,000 mV	382,469 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	-4750,000 mV	-4750,736 mV	5,000 mV	216,276 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	0,000 mV	1,144 mV	5,000 mV	3,557 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	4750,000 mV	4749,602 mV	5,000 mV	216,236 µV	OK
A OUT 2	10000 mV	9500,000 mV	9500,686 mV	5,000 mV	382,524 µV	OK
FREQ 1		10,000 Hz	10,000 Hz	0,001 Hz	0,005 Hz	OK
FREQ 1		62507,309 Hz	62507,375 Hz	6,251 Hz	6,251 Hz	OK
FREQ 1		125004,460 Hz	125004,625 Hz	12,500 Hz	12,500 Hz	OK
FREQ 1		187502,340 Hz	187502,562 Hz	18,750 Hz	18,750 Hz	OK
FREQ 1		249998,960 Hz	249999,500 Hz	25,000 Hz	25,000 Hz	OK
DIN 1		HIGH	HIGH			OK
DIN 1		LOW	LOW			OK
DOUT 1		HIGH	HIGH			OK
DOUT 1		LOW	LOW			OK

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Ömer ÇAM
Uyruğu: Türkiye Cumhuriyeti (T.C.)
Doğum Tarihi ve Yeri: 26.10.1990 – Beykoz/İSTANBUL
Medeni Durum: Evli
E-posta: ocam@erzincan.edu.tr, omercam@erzincan.edu.tr
Cep Tel. +90 506 648 42 34
Yazışma Adresi: Erzincan Binalı Yıldırım Üniversitesi, Yalnızbağ Yerleşkesi,
 Ali Cavit Çelebioğlu Sivil Havacılık Yüksekokulu, 1.Kat,
 Oda: E4-122, 24100, Erzincan.

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans-Anadal	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü	2007-2012
Lisans-Yandal	Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	2009-2012
Lisans-Erasmus	Linnaeus University, Engineering Department Mechanical Engineering, Växjö, İSVEÇ	2010-2011
Lise	Sümer Lisesi, Kocasinan, KAYSERİ	2005-2007

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2011-2012	Boydak Holding, Merkez Çelik San. ve Tic. A.Ş. Melikgazi, KAYSERİ	Tekn. ve Sistem Gel. Uzm. Yard.

2012-2017	Erciyes Üni., Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde Motor Bölümü	Araştırma Görevlisi
2017-Halen	Erzincan Üni., A.C.Ç. Sivil Havacılık Yüksekokulu, Uçak Gövde Motor Bölümü	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

SCI, SSCI, AHCI, ESCI indekslerine giren dergilerde yayınlanan makaleler

1. Yılmaz, I., Yılmaz, H., Cam, O., Ilbas, M., 2018. Combustion characteristics of premixed hydrogen/air flames in a geometrically modified micro combustor. **Fuel**, **217**:536-543.
2. Cam, O., Yılmaz, H., Tangoz, S., Yılmaz, I., 2017. A numerical study on combustion and emission characteristics of premixed hydrogen air flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**(40):25801-25811.
3. Yılmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., Yılmaz, I., 2017. Effect of different turbulence models on combustion and emission characteristics of hydrogen/air flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**(40):25744-25755.
4. Yılmaz, H., Cam, O., Yılmaz, I., 2017. Effect of micro combustor geometry on combustion and emission behavior of premixed hydrogen/air flames. **Energy**, **135**:585-597.
5. Yılmaz, I., Keiyinci, S., Cam, O., Karci, A., 2017. Experimental investigation of aerodynamic parameters on flapping wing (Çırpan kanadın aerodinamik parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi). **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, **32**(3):1035-1050.
6. Yılmaz, I., Yılmaz, H., Cam, O., 2018. An experimental study on premixed CNG/H₂/CO₂ mixture flames. **Open Engineering**, **8**(1):32-40.

Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Yılmaz, I., Cam, O., Tastan, M., Karci, A., 2016. Experimental investigation of aerodynamic performance of different wind turbine airfoils (Farklı rüzgar türbin kanat profillerinin aerodinamik performansının deneysel incelenmesi). **Journal of Polytechnic**, **19**(4):577-584.
2. Güneş, R., Çam, Ö., Apalak, M. K., 2012. Investigation of interaction between nitinol stent and a vascular plaque using finite element method (Plaklı bir damar ile nitinol stent etkileşimin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi). **Sakarya University Journal of Science**, **16**(3):319-329.

Kitap Bölümleri

1. Yılmaz, H., Omer, C., Yılmaz, I., 2018, Investigation of an optimal operating condition for a micro combustor regarding basic thermophotovoltaic system requirements, 27-41. *In: The Role of Exergy in Energy and the Environment, Green Energy and Technology* (Eds: Nižetić S., Papadopoulos, A.). Springer, Cham.

Hakemli konferans/kongre/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

1. Yılmaz, H., Cam, O., Yılmaz, I., 2019. Comparison of combustion and emission characteristics of output synthetic gas compositions of two different power stations, pp. 1-10. *VII. Mühendislikte Yakıtlar, Yanma ve Yangın Konferansı (7th International Conference on Renewable Fuels Combustion and Fire – FCE2019)*, 10-13 Mart 2019, Antalya, Türkiye.
2. Yılmaz, I., Yılmaz, H., Cam, O., 2018. Sentetik gaz yakıtların yanma kararsızlıklarının deneysel incelenmesi, pp. 33-41. *I. Uluslararası GAP Matematik – Mühendislik - Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi*, 4-7 Ekim 2018, Şanlıurfa, Türkiye.
3. Yılmaz, H., Cam, O., Yılmaz, I., 2018. Yüksek H₂/CO oranına sahip sentetik gaz yakıtların yanma karakteristiklerinin deneysel incelenmesi, pp. 42-49. *I. Uluslararası GAP Matematik - Mühendislik - Fen ve Sağlık Bilimleri Kongresi*, 4-7 Ekim 2018, Şanlıurfa, Türkiye.
4. Yılmaz, I., Cam, O., Yılmaz, H., 2018. Experimental investigation of premixed H₂/CO/CNG/CO₂ blending syngas flames: effect of swirl number and equivalence

ratio, pp. 61-68. *14th International Conference of Combustion (INCOS2018)*, 25-27 Nisan 2018, Karabük, Türkiye.

5. Cam, O., Yilmaz, H., Yilmaz, I., 2018. Dynamic and static flame behavior of premixed $H_2/CO/CNG/CO_2$ -air mixtures under externally modified acoustic conditions, pp. 117-123. *14th International Conference of Combustion (INCOS2018)*, 25-27 Nisan 2018, Karabük, Türkiye.
6. Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O., Soy Turk, M. A., 2018. Effect of CO_2 dilution on premixed $H_2/CO/CNG$ blending synthesis gas flames, pp. 1-10. *16th International Conference on Clean Energy (ICCE 2018)*, 9-11 Mayıs 2018, Gazimağusa, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti.
7. Yilmaz, H., Cam, O., Yilmaz, I., 2018. An experimental study on effect of swirl number and gas composition on combustion and emission behavior of premixed $H_2/CO/CNG$ blending synthetic gas flames in a novel combustor, pp. 1-12. *16th International Conference on Clean Energy (ICCE 2018)*, 9-11 Mayıs 2018, Gazimağusa, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti.
8. Yilmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, I., 2017. Numerical investigation on combustion behavior of premixed hydrogen/air flames in a micro combustor with varying geometric properties: part - II effect of multi-channel arrangement, pp. 225-236. *6th International Conference on Renewable Fuels, Combustion and Fire (FCE2017)*, 18-21 Mayıs 2017, Nevşehir, Türkiye.
9. Yilmaz, H., Cam, O., Ilbas, M., Yilmaz, I., 2017. Numerical investigation on combustion behavior of premixed hydrogen/air flames in a micro combustor with varying geometric properties: part - I effect of backward facing step and cavity, pp. 212-224. *6th International Conference on Renewable Fuels, Combustion and Fire (FCE2017)*, 18-21 Mayıs 2017, Nevşehir, Türkiye.
10. Yilmaz, H., Yilmaz, I., Cam, O., 2017. Investigation of the effects of equivalence ratio and thermal power on the combustion and emission behaviour of premixed hydrogen air mixture in a micro combustor, pp. 1-11. *9th International Exergy*,

Energy and Environment Symposium (IEEEES-9), 14-17 Mayıs 2017, Split, Hırvatistan.

- 11.** Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O., 2017. Combustion and emission behavior of premixed CNG/H₂/CO₂ mixture flames: effect of swirl number and gas composition, pp. 144-150. *International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment (SEEME)*, 26-28 Temmuz 2017, Newcastle Upon Tyne, İngiltere.
- 12.** Yilmaz, I., Cam, O., 2017. Numerical investigation of effect of different turbulence models on the combustion characteristics by the probability density function (PDF) model, pp. 151-161. *International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment (SEEME)*, 26-28 Temmuz 2017, Newcastle Upon Tyne, İngiltere.
- 13.** Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, H., Yilmaz, I., 2016. Numerical investigation of NO_x emissions in a micro-cylindrical combustor with premixed hydrogen-air mixture, pp. 324-330. *9th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection*, 22-25 Eylül 2016, Kayseri, Türkiye.
- 14.** Yilmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, I., 2016. The effect of different turbulence models on the flame and emissions characteristics of hydrogen-air flames, pp. 200-207. *9th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection*, 22-25 Eylül 2016, Kayseri, Türkiye.
- 15.** Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O., 2016. Farklı kompozisyonlardaki sentetik gazların yanma performanslarının incelenmesi, pp. 1240-1251. *VI. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, 28-30 Eylül 2016, Kocaeli, Türkiye.
- 16.** Yilmaz, I., Cam, O., Tastan, M., 2015. Boundary layer flow separation control of two dimensional NACA2415 airfoil, pp. 115-124. *8th Ankara International Aerospace Conference*, 10-12 Eylül 2015, Ankara, Türkiye.

17. Yılmaz, I., Cam, O., 2014. Gözenekli yakıcıda farklı denklik oranları ve giriş sıcaklarında yanma karakteristiklerinin araştırılması, pp. 1-11. *V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, 8-10 Eylül 2014, Kayseri, Türkiye.
18. Güneş, R., Cam, O., Apalak, M. K., 2012. Investigation of interaction between nitinol stent and a vascular plaque using finite element method (Plaklı bir damar ile nitinol stent etkileşimin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi), pp. 319-329. *6. Biyomekanik Uluslararası Katılımlı Kongre*, 28-30 Eylül 2012, Sakarya, Türkiye.

