

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

**OKSİJENLE ZENGİNLEŞTİRİLEN SENTETİK GAZ  
YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞININ  
DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Hazırlayan  
Buğrahan ALABAŞ**

**Danışman  
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

**Doktora Tezi**

**Şubat 2021  
KAYSERİ**



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

**OKSİJENLE ZENGİNLEŞTİRİLEN SENTETİK GAZ  
YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞININ  
DENEYSEL İNCELENMESİ  
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan  
Buğrahan ALABAŞ**

**Danışman  
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından FDK-2019-8816 numaralı proje ile desteklenmiştir. Ayrıca deney sisteminin imalat ve kurulumu Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından MAG-215M821 numaralı proje ile desteklenmiştir.**

**Şubat 2021  
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.

Buğrahan ALABAŞ

**“Oksijenle Zenginleştirilen Sentetik Gaz Yakıtların Yanma Kararsızlığının Deneysel İncelenmesi”** adı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi 'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

**Tezi Hazırlayan**

Buğrahan ALABAŞ

**Danışman**

Prof. Dr. İlker YILMAZ

**Sivil Havacılık ABD Başkanı**

Prof. Dr. İlke TÜRKMEN

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

06/02/2021

**JÜRİ:**

Danışman : Prof. Dr. İlker YILMAZ  
Üye : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ  
Üye : Prof. Dr. Yüksel KAPLAN  
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Güven TUNÇ  
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun .....tarih ve ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

...../...../.....

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve akademik olarak bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi sayın hocam Prof. Dr. İlker YILMAZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı aynı laboratuvarı paylaştığımız tez izleme jüri üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN ve Dr. Öğr. Üyesi Güven TUNÇ'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (FDK-2019-8816) teşekkür ederim.

Ayrıca; Türkiye Cumhuriyeti Devletinin kurucusu Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK ve aziz şehitlerimize şükranlarımı sunar, çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen sevgili eşim Bilge Yasemin ALABAŞ ve varlığıyla beni mutlu eden oğlum Bumin Kağan ALABAŞ' a, bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi annem Nuran ALABAŞ ve babam Mehmet Selim ALABAŞ'a en derin duygularıyla teşekkür ederim.

Buğrahan ALABAŞ

ŞUBAT 2021, KAYSERİ

# OKSİJENLE ZENGİNLEŞTİRİLEN SENTETİK GAZ YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞININ DENEYSEL İNCELENMESİ

Buğrahan ALABAŞ

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü  
Doktora Tezi, Şubat 2021  
Danışman: Prof. Dr. İlker YILMAZ

## ÖZET

Oksijence zenginleştirme prosesleri, günümüzde yakma sistemlerinde baca gazı emisyonunun azaltılmasında önemli bir yer tutmaktadır. Diğer taraftan oksijence zenginleştirmenin alevde meydana getirdiği kararlılık değişimleri, bu işlemin endüstriyel uygulamalardaki kullanımını kısıtlamaktadır. Kirletici emisyonların azaltılmasında önemi bilinen oksijence zenginleştirme sürecinde, yaşanan kararsızlıkların belirlenmesi ve hidrokarbon içeren yakıt karışımlarında bu kararsızlıkların oluşum şartlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, metan gazı içerisine farklı oranlarda H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> gazları ilave edilerek, yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirme performansları, farklı zorlayıcı frekanslardaki yanma kararsızlıkları ve yanma sonu emisyonları tespit edilmiştir. Ön karışım ve girdap destekli, bir yanma akustik odada yapılan deneylerde öncelikle CH<sub>4</sub> içerisine ilave edilen farklı gazların oksijence zenginleştirme limitine olan etkisi tespit edilmiştir. Bu limitler içerisinde yakıt karışımları oksijence zenginleştirilerek yakılmış ve yanma akustik odada yakıcı kollarındaki hoparlörlerin ürettiği frekanslarda alev zorlanmıştır. Alevde meydana gelen kararsızlıklar; dinamik basınç, statik basınç, ışık şiddeti ve alev görüntülerinde meydana gelen değişimlere göre değerlendirilmiştir. Ayrıca test edilen bütün yakıt karışımları için baca gazı emisyon ölçümleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar; oksijence zenginleştirmenin CO emisyonlarını oldukça azalttığı, NO<sub>x</sub> emisyonlarında bir miktar artışa neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımında alev kararlılığını artıran oksijence zenginleştirme, CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO alevlerinde kararsızlıklara sebep olmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Oksijence zenginleştirme, Metan, Dıştan akustik zorlama, Termo-akustik kararsızlıklar, Emisyon.



# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMBUSTION INSTABILITY OF OXYGEN ENRICHED SYNTHETIC GAS FUELS

Buğrahan ALABAŞ

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied  
Sciences PhD Thesis, February 2021  
Supervisor: Prof. Dr. İlker YILMAZ

## ABSTRACT

Oxygen enrichment processes has an important role in reducing flue gas emissions in combustion systems today. However, the stability changes caused by the oxygen enrichment in the flame structure restrict the use of this process in industrial applications. It carries great importance to determine the formation conditions of the instabilities in the process of enrichment with oxygen, especially in hydrocarbon-containing fuel mixtures, in reducing pollutant emissions.

In this thesis study, the oxygen enrichment performances, combustion instabilities at different forcing frequencies and flue gas emissions of the fuel mixtures were determined by adding different proportions of H<sub>2</sub>, CO and CO<sub>2</sub> gases into methane gas. In the experiments performed in a thermo-acoustic combustion chamber with premixed and swirl support. The effect of different gases addition into CH<sub>4</sub> on the oxygen enrichment limit was determined. Within these limits, the fuel mixtures were enriched with oxygen and burned, and the flame was forced by the acoustic frequencies generated by the speakers located arms of the chamber. Instability in flame were evaluated, according to dynamic pressure, static pressure, luminous intensity and changes in flame images. In addition, flue gas emission measurements were made for all fuel mixtures tested. Experimental results; It has shown that enrichment with oxygen significantly reduces CO emissions and causes a slight increase in NO<sub>x</sub> emissions. In addition, the oxygen enrichment, which increases the flame stability in the CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> mixture, caused instability in the CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO flames.

**Keywords:** Oxygen enrichment, Methane, External acoustic enforcement, Thermo-acoustic instabilities, Emission

## İÇİNDEKİLER

### OKSİJENLE ZENGİNLEŞTİRİLEN SENTETİK GAZ 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.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
GİRİŞ.....	1

## 1.BÖLÜM

### GENEL BİLGİLER

1.1. Metan İçerikli Gaz Karışımlarının Yanma Kararsızlıkları ve Emisyonları Üzerine Çalışmalar.....	3
1.2. Oksijence Zenginleştirmenin Yanma Kararsızlıkları ve Emisyonlara Etkisi Üzerine Çalışmalar.....	10
1.3. Termo-akustik Kararsızlıklar ve Dıştan Akustik Zorlamalı Sistemler Üzerine Yapılan Çalışmalar.....	15
1.4. Yanma Kararsızlıkları.....	18

1.4.1. Ön Karışımli Sistemlerdeki Kütle Kuvveti Kararsızlıkları .....	19
1.4.2. Ön Karışımli Sistemlerdeki Hidrodinamik Kararsızlıklar .....	20
1.4.3. Ön Karışımli Sistemlerdeki Difüviz-Termal Kararsızlıklar .....	20
1.4.4. Termo-Akustik Kararsızlıklar .....	21
1.4.5. Geri Tepme .....	22
1.4.6. Alev Sönmesi .....	24
1.5. Yanma Akustik Odada Kullanılan Yakıtların Özellikleri ve Oksijence Zenginleştirme Esasları .....	25
1.5.1. Metan .....	28
1.5.2. Hidrojen .....	29
1.5.3. Karbon monoksit .....	33
1.5.4. Oksijence Zenginleştirmenin Esasları .....	34
1.6. Baca Gazı Emisyonları .....	37
1.6.1. Karbondioksit .....	38
1.6.2. Karbonmonoksit .....	39
1.6.3. NO <sub>x</sub> Emisyonları .....	39

## 2. BÖLÜM

### DENEY SİSTEMİ

2.1. Deney Sistemi Ekipmanları .....	41
2.1.1. Deney Sistemi Tanıtımı .....	41
2.1.2. Hava Tedarik Sistemi .....	43
2.1.2.1. Hava Kompresörü .....	43
2.1.2.2. Harici Hava Tankı .....	44
2.1.2.3. Hava Filtresi ve Regülatörü .....	46
2.1.3. Yakıt Tedarik Sistemi .....	46

2.1.4. Kütle Akış Kontrolcüleri .....	48
2.1.5. Ön Karıştırıcı.....	51
2.1.6. Girdap Destekli Yakıcı.....	52
2.1.7. Yakıcı Ateşleme Sistemi.....	54
2.1.8. Yanma Odası .....	56
2.1.9. Dıştan Akustik Zorlama Ekipmanları.....	58
2.1.9.1. Fonksiyon Jeneratörü .....	58
2.1.9.2. Kuvvetlendirici .....	59
2.1.9.3. Osiloskop .....	59
2.1.9.4. Hoparlörler .....	60
2.1.10. Ölçüm Ekipmanları.....	61
2.1.10.1. Alev Kararlılığı Ölçüm Ekipmanları.....	61
2.1.10.2. Emisyon Ölçüm Ekipmanları.....	64
2.2. Deneysel Çalışma Şartları .....	65

### 3. BÖLÜM

#### DENEYSEL SONUÇLAR

3.1. Giriş .....	69
3.2. Metan İçerikli Yakıt Karışımlarının Yanma Limitleri.....	69
3.3. Oksijence Zenginleştirilmiş Metan İçerikli Yakıt Karışımlarının Yanma Kararsızlıkları .....	74
3.3.1. Oksijence Zenginleştirilmenin Saf Metan Yanma Kararsızlığına Etkisi .....	75
3.3.2. Oksijence Zenginleştirilmenin $CH_4/H_2$ Karışımlarının Yanma Kararsızlığına Etkisi .....	85
3.3.3. Oksijence Zenginleştirilmenin $CH_4/H_2/CO$ (Sentetik Gaz) Karışımlarının Yanma Kararsızlığına Etkisi .....	104

3.3.4. Oksijence Zenginleştirmenin CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> (Biyogaz) Karışımının Yanma Kararsızlığına Etkisi .....	130
3.4. Oksijence Zenginleştirilmiş Metan İçerikli Yakıt Karışımlarının Emisyon Davranışları .....	138
3.4.1. Oksijence Zenginleştirmenin Saf Metanın Emisyon Davranışına Etkisi.....	139
3.4.2. Oksijence Zenginleştirmenin CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> Karışımlarının Emisyon Davranışına Etkisi.....	141
3.4.3. Oksijence Zenginleştirmenin CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /CO (Sentetik Gaz) Karışımlarının Emisyon Davranışına Etkisi.....	143
3.4.4. Oksijence Zenginleştirmenin CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> (Biyogaz) Karışımlarının Emisyon Davranışına Etkisi .....	147

## 4. BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar.....	150
4.2. Öneriler .....	152
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>154</b>
<b>ÖZGEÇMİŐ.....</b>	<b>165</b>

## KISALTMALAR VE SİMGELER

<b><u>Sembol</u></b>	<b><u>Anlamı</u></b>	<b><u>Birimi</u></b>
PLIF	Planar laser-induced fluorescence	
$v_{\infty}$	Alev içerisindeki yanmış gazlar	m/s
$v_0$	Yanma işleminin tamamlanmış gazlar	m/s
Le	Lewis sayısı	
Da	Damköhler sayısı	
$S_L$	Laminer yanma hızı	cm/s
$\alpha$	Termal difüzyon	m <sup>2</sup> /s
d	Reaksiyon bölgesi uzunluğu	m
$U_{ref}$	Hız ölçeği	cm/s
dB	Desibel	
$T_{ad}$	Adyabatik alev sıcaklığı	K
M	Markstein numarası	
$l_f$	Alev kalınlığı	cm
$\rho$	Yoğunluğu	kg/m <sup>3</sup>
S	Girdap sayısı	
B	Kanatçık açısı	
$d_h$	Girdap üretici iç çapı	mm
LPG	Likit petrol gaz	
Scm	Standart cubic centimetres per minute	
LHV	Alt ısı değer	MJ/kg
$\Phi$	Eşdeğerlik oranı	
Ppm	Parts per million	
PIV	Particle image velocimetry	

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Yakıtlar ve içerdığı hidrokarbonlar.....	25
Tablo 1.2. Metan gaz yanma özellikleri .....	29
Tablo 1.3. Metan/hidrojen gaz karışımlarının yanma limitleri .....	29
Tablo 1.4. Hidrojen gazı yanma özellikleri.....	33
Tablo 1.5. Karbonmonoksit gazı yanma özellikleri.....	33
Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan gazların yoğunluk ve düzeltme faktörü değerleri.....	50
Tablo 2.2. Emisyon cihazı ölçüm hata oranları.....	65
Tablo 2.3. Deneylerde kullanılan yakıt karışımları.....	65
Tablo 2.4. Girdap üreticinin geometrik özellikleri .....	66
Tablo 2.5. Oksijence zenginleştirme hesaplamaları.....	67
Tablo 2.6. Yakıtların yanma karakteristiğine etki eden özellikleri.....	68
Tablo 3.1. Yakıt karışımlarının sönme ve geri tepme sınırları .....	70

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Açık bir tüp içerisindeki yanmada kararsızlık örneği .....	19
Şekil 1.2. Yüksek frekanslı dinamik kararsızlıklar nedeniyle hasar görmüş bir yakıcı..	21
Şekil 1.3. Rayleigh kriterleri gösterimi .....	22
Şekil 1.4. Geri tepmeye sebep olan girdapların oluşumu .....	23
Şekil 1.5. Farklı reaksiyonda kalma sürelerinde sıcaklık – zaman grafikleri .....	25
Şekil 1.6. Tipik gaz türbin yakıtlarının sıcaklık-bağıl yoğunluk grafiği.....	26
Şekil 1.7. Uçuculuk – tutuşma sıcaklığı değişim eğrisi .....	27
Şekil 1.8. Farklı yakıtların alt ısıl değer/ bağıl yoğunluk oranı .....	28
Şekil 1.9. Metan/hidrojen karışımının laminer yanma hızı değişimi .....	31
Şekil 1.10. Basınç, ısı yayılımı ve geri tepme sinyal genlikleri a) Saf metan,.....	32
Şekil 1.11. Karışım oranlarına göre laminer yanma hızları a) 1500 K , b) 1900 K.....	34
Şekil 1.12.Farklı eşdeğerlik oranlarında laminer yanma hızının oksijence zenginleştirme ile değişimi .....	35
Şekil 1.13. Metan'ın farklı eşdeğerlik oranlarında oksijence zenginleştirilerek yakılması sonucunda yanma özelliklerindeki değişim. a) Lewis sayısı b) Adyabatik alev sıcaklığı c) Markstein uzunluğu d) Alev kalınlığı .....	37
Şekil 2.1. Deney sisteminin şematik gösterimi .....	42
Şekil 2.2. Deney sistemi ön görünüşü .....	43
Şekil 2.3. Hava kompresörü ve tankı .....	44
Şekil 2.4. Harici hava tankı .....	45
Şekil 2.5. Kompresör ve harici tank kabini .....	45
Şekil 2.6. Hava filtresi ve regülatörü .....	46
Şekil 2.7. Yakıt tankları ve basınç regülatörleri.....	47
Şekil 2.8. Oksijen tankı .....	48
Şekil 2.9. Gaz akış hatları .....	49
Şekil 2.10. Kütle akış kontrolcüsü .....	49
Şekil 2.11 Vakum sistem kontrolcüsü.....	50
Şekil 2.12. Yakıt kollektörü .....	51
Şekil 2.13. Geleneksel yanma ve ön karışimli yanmanın karşılaştırması .....	52
Şekil 2.14. Ön karıştırıcı .....	52



Şekil 2.15. Brülör .....	53
Şekil 2.16. Girdap üreteçleri .....	54
Şekil 2.17. Girdap üreteci ölçülendirme kriterleri .....	54
Şekil 2.18. Kontrol paneli iç ve dış görünüşü .....	55
Şekil 2.19. Brülör otomatığı.....	56
Şekil 2.20. Yanma akustik oda.....	57
Şekil 2.21. Yanma odası teknik resmi.....	58
Şekil 2.22. Fonksiyon jeneratörü .....	59
Şekil 2.23. Kuvvetlendirici .....	59
Şekil 2.24. Osiloskop .....	60
Şekil 2.25. Hoparlör .....	60
Şekil 2.26. 29 giriş kanallı veri toplayıcı .....	61
Şekil 2.27. ProfiSignal ekran görünümü .....	62
Şekil 2.28. Piezorezistif basınç ölçerler A) Yakıcı, B) Alev .....	62
Şekil 2.29. Dinamik basınç sensörü .....	63
Şekil 2.30. Termal çiftler .....	63
Şekil 2.31. Optik dedektör .....	64
Şekil 2.32. Emisyon cihazı.....	64
Şekil 3.1. CO <sub>2</sub> ilavesinin metanın yanma sınırlarına etkisi.....	71
Şekil 3.2. H <sub>2</sub> ilavesinin metanın yanma sınırlarına etkisi .....	72
Şekil 3.3 Metan içerisine farklı H <sub>2</sub> /CO oranlarındaki yakıt ilavelerinin yanma sınırlarına etkisi .....	73
Şekil 3.4. Yanma akustik odanın rezonans bölgeleri .....	74
Şekil 3.5. Saf metan dinamik basınç dalgalanmaları a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	76
Şekil 3.6. Saf metan statik basınç değişimleri a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	78
Şekil 3.7. Saf metan ışık şiddeti değişimleri a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	79
Şekil 3.8. Saf metan-hava yanmasının alev görüntüleri.....	81
Şekil 3.9. Saf metanın %24 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	81
Şekil 3.10. Saf metanın %26 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	82
Şekil 3.11. Oksijence zenginleştirmenin saf metan yanmasında kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti .....	84
Şekil 3.12. Oksijence zenginleştirmenin saf metan alev görüntüsüne etkisi .....	85

Şekil 3.13. Hidrojen ilavesinin oksijence zenginleştirme limitine etkisi.....	86
Şekil 3.14. %10 H <sub>2</sub> içeren metan alevinin dinamik basınç dalgalanması a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	88
Şekil 3.15. %10 H <sub>2</sub> içeren metan alevinin statik basınç değişimi a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	89
Şekil 3.16. %10 H <sub>2</sub> içeren metan alevinin ışık şiddeti değişimi a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	90
Şekil 3.17. %10 H <sub>2</sub> ilaveli metanın %21 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri.	91
Şekil 3.18. %10 H <sub>2</sub> ilaveli metanın %24 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri.	92
Şekil 3.19. %10 H <sub>2</sub> ilaveli metanın %26 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri.	92
Şekil 3.20. %10 H <sub>2</sub> ilaveli yakıtta oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti .....	94
Şekil 3.21. Oksijence zenginleştirmenin %10 H <sub>2</sub> ilaveli metan alev görüntüsüne etkisi	95
Şekil 3.22. %20 H <sub>2</sub> içeren metan alevinin dinamik basınç dalgalanması a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	97
Şekil 3.23. %20 H <sub>2</sub> içeren metan alevinin statik basınç değişimi a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	98
Şekil 3.24. %20 H <sub>2</sub> içeren metan alevinin ışık şiddeti değişimi a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %26 O <sub>2</sub> .....	99
Şekil 3.25. %20 H <sub>2</sub> ilaveli metanın hava ile yanma alev görüntüleri .....	100
Şekil 3.26. %20 H <sub>2</sub> ilaveli metanın %24 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	101
Şekil 3.27. %20 H <sub>2</sub> ilaveli metanın %26 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	101
Şekil 3.28. %20 H <sub>2</sub> ilaveli yakıtta oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti .....	103
Şekil 3.29. Oksijence zenginleştirmiş %20 H <sub>2</sub> ilaveli alev görüntüsü.....	104
Şekil 3.30. Sentetik gazların oksijence zenginleştirme limitinin H <sub>2</sub> /CO oranına ile değişimi.....	106
Şekil 3.31. H <sub>2</sub> /CO = 0,5 için dinamik basınç dalgalanmaları a) %21 O <sub>2</sub> , b) %23 O <sub>2</sub> , c) %25 O <sub>2</sub> .....	108
Şekil 3.32. H <sub>2</sub> /CO = 0,5 için statik basınç değişimleri a) %21 O <sub>2</sub> , b) %23 O <sub>2</sub> , c) %25 O <sub>2</sub> .....	109

Şekil 3.33. $H_2/CO = 0,5$ için ışık şiddeti değişimleri a) %21 $O_2$ , b) %23 $O_2$ , c) %25 $O_2$ .....	110
Şekil 3.34. $H_2/CO = 0,5$ için %21 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	111
Şekil 3.35. $H_2/CO = 0,5$ için %23 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	112
Şekil 3.36. $H_2/CO = 0,5$ için %25 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	113
Şekil 3.37. $H_2/CO = 0,5$ için oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti .....	114
Şekil 3.38. $H_2/CO = 0,5$ için oksijence zenginleştirmenin alev görüntüsüne etkisi .....	115
Şekil 3.39. $H_2/CO = 1,5$ için dinamik basınç dalgalanmaları a) %21 $O_2$ , b) %23 $O_2$ , c) %25 $O_2$ .....	116
Şekil 3.40. $H_2/CO = 1,5$ için statik basınç değişimleri a) %21 $O_2$ , b) %23 $O_2$ , c) %25 $O_2$ .....	118
Şekil 3.41. $H_2/CO = 1,5$ için ışık şiddeti değişimleri a) %21 $O_2$ , b) %23 $O_2$ , c) %25 $O_2$ .....	119
Şekil 3.42. $H_2/CO = 1,5$ için %21 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	120
Şekil 3.43. $H_2/CO = 1,5$ için %23 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	121
Şekil 3.44. $H_2/CO = 1,5$ için %25 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri .....	121
Şekil 3.45. $H_2/CO = 1,5$ için oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti .....	123
Şekil 3.46. $H_2/CO = 1,5$ için oksijence zenginleştirmenin alev görüntüsüne etkisi .....	124
Şekil 3.47. $H_2/CO = 3$ için dinamik basınç dalgalanmaları a) %21 $O_2$ , b) %23 $O_2$ .....	125
Şekil 3.48. $H_2/CO = 3$ için statik basınç değişimleri a) %21 $O_2$ , b) %23 $O_2$ .....	126
Şekil 3.49. $H_2/CO = 3$ için ışık şiddeti değişimleri a) %21 $O_2$ , b) %23 $O_2$ .....	126
Şekil 3.50. $H_2/CO = 3$ için %21 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri.....	127
Şekil 3.51. $H_2/CO = 3$ için %23 $O_2$ içerikli hava ile yanması alev görüntüleri.....	128
Şekil 3.52. $H_2/CO = 3$ için oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti.....	129
Şekil 3.53. $H_2/CO = 3$ için oksijence zenginleştirmenin alev görüntüsüne etkisi.....	130
Şekil 3.54. $CH_4/CO_2$ karışımı dinamik basınç dalgalanmaları a) %21 $O_2$ , b) %24 $O_2$ , c) %28 $O_2$ .....	132
Şekil 3.55. $CH_4/CO_2$ karışımı statik basınç değişimleri a) %21 $O_2$ , b) %24 $O_2$ , c) %28 $O_2$ .....	133

Şekil 3.56. CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> karışımı ışık şiddeti değişimleri a) %21 O <sub>2</sub> , b) %24 O <sub>2</sub> , c) %28 O <sub>2</sub> .....	134
Şekil 3.57. CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> karışımının %21 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri..	135
Şekil 3.58. CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> karışımının %24 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri..	136
Şekil 3.59. CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> karışımının %28 O <sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri...	136
Şekil 3.60. CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> karışımında oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti.....	137
Şekil 3.61. Oksijence zenginleştirmenin yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi.....	139
Şekil 3.62. Oksijence zenginleştirmenin kirletici emisyonlara etkisi a) NO <sub>x</sub> , b) CO...	141
Şekil 3.63. Oksijence zenginleştirilmiş CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> karışımının yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi a) %10 H <sub>2</sub> , b) %20 H <sub>2</sub> .....	142
Şekil 3.64. CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> alevlerinde oksijence zenginleştirmenin zararlı emisyonlara etkisi a) NO <sub>x</sub> , b) CO.....	143
Şekil 3.65. Oksijence zenginleştirilmiş CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /CO karışımının yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi a) H <sub>2</sub> /CO = 0.5, b) H <sub>2</sub> /CO = 1.5, c) H <sub>2</sub> /CO = 3.....	145
Şekil 3.66. CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /CO alevlerinde oksijence zenginleştirmenin zararlı emisyonlara etkisi a) NO <sub>x</sub> , b) CO.....	146
Şekil 3.67. Oksijence zenginleştirilmiş CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> karışımının yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi.....	148
Şekil 3.68. CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> alevinde oksijence zenginleştirmenin zararlı emisyonlara etkisi a) NO <sub>x</sub> , b) CO.....	149

## GİRİŞ

Günümüzde enerjiye olan ihtiyacın artmasıyla beraber enerji kaynaklarının verimli kullanımı konusunda araştırmalar önem kazanmıştır. Dünyada enerji elde edilmesinde birçok kaynak kullanılmaktadır. Fosil yakıt olan metan bunların en dikkat çekici olanlarından. 2019 yılında ülkemizin elektrik üretiminin %29,8'i doğal gazın yakılması sonucu elde edilen enerji ile karşılanmıştır [1]. İçeriğinin yaklaşık %90'nı metan olan doğal gaz dünyamız için önemli bir enerji kaynağı olarak önemini sürdürmeye devam edecektir [2]. Elektrik üretimi dışında da ısınma sistemleri, ısıl işlem ve eritme fırınları gibi yüksek enerji gerektiren sistemlerde de metan içrikli doğal gaz yoğun olarak kullanılmaktadır.

Hidrokarbonlar sınıfına giren metan gazının enerji sektöründeki öneminden dolayı yanma kararsızlıkları ve yanma sonu emisyon davranışları üzerine yapılan çalışmalar da yoğunluk kazanmıştır. Bu çalışmalar metan içerisine farklı yakıtlar karıştırılarak, farklı yakıt/hava oranlarında, farklı yanma sistemlerinde yapılmaktadır. Bu çalışmalarda yanma şartlarındaki değişimin alev kararsızlıklarına ve baca gazı emisyonlarına etkisi incelenmektedir. Bu sayede alevin farklı şartlar altında kararlı bir şekilde yanabilmesi ve verimli bir enerji üretiminin amaçlanmasının yanı sıra baca gazı emisyonları da düşürülmeye çalışılarak doğamızın en önemli sorunlarından biri olan küresel ısınma ile mücadele yürütülmektedir.

Yanma kararsızlıklarının ve emisyonların düşürülmesi çalışmaları kapsamında oksijence zenginleştirilmiş yanma işlemi deneysel olarak incelenmektedir. Bu gazların yanma kararsızlıklarının incelenmesindeki bir yöntem de dıştan akustik

zorlama altında alevin kararlı bir şekilde yanmaya devam edebilme özelliğinin tespit edilmesidir. Bu amaçla hoparlörler vasıtasıyla akustik bir ses dalgası yaratılarak alev zorlanmakta ve farklı frekanstaki dalgalara karşı alev kararlılığı deneysel olarak incelenmektedir.

Bu tez çalışmasında yanma akustik odada, ön karışimli girdap destekli bir yakıcıda dıştan akustik zorlama altında metan içeren farklı gaz yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirme şartlarında yanma kararsızlıkları ve emisyon davranışları ilk kez deneysel olarak araştırılmıştır.



# 1. BÖLÜM

## GENEL BİLGİLER

Tez konusu ile ilgili güncel literatür üç alt başlık altında bu bölümde sunulmuştur.

### 1.1. Metan İçerikli Gaz Karışımlarının Yanma Kararsızlıkları ve Emisyonları Üzerine Çalışmalar

Metan gazının tek başına ya da farklı gaz karışımları ile beraber yanması konusunda literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Mameri at al., biyogaz-sentez gaz karışımlarının yanma karakteristiği ve ortalama efektif basıncı üzerine çalışmışlardır. Bu çalışmada biyogaz-sentez gaz karışımlarının laminer difüzyon alevleri ve alev sönme/geri tepme limitleri test edilmiştir. Kimyasal kinetik problemlerin çözümü GRI-Mech 3.0 ve Chemkin programı ile yapılmaktadır. Sonuçlar, gaz karışımındaki hidrojen oranında yaşanan artışın alevin sönme sıcaklığını neredeyse sabit tuttuğunu göstermiştir. Diğer taraftan biyogaz içerisindeki metan miktarındaki artış ise alevin sönme sıcaklığını azaltmıştır. Ortam basıncının gerilme hızıyla zıt bir şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Yüksek gerinim oranı ve basınç durumunda NO<sub>2</sub> emisyonlarında artış ölçülürken reaksiyon bölgesi kalınlığı neredeyse tüm gaz karışımları için sabit kalmıştır [3].

Zhang ve Jiang, biyogaz-hidrojen karışımlarını farklı oranlarda hidrojen ilavesini ve farklı CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> oranlarında kararsızlığını incelemiştirlerdir. Analizler, biyogaz-hidrojen yakıt bileşimindeki küçük değişikliklerin laminer yanma hızı ve adyabatik alev sıcaklığı gibi bir yanmanın önemli parametrelerinde dalgalanmaya yol açmadığını ortaya koymuştur. Laminer yanma hızı dalgalanmaları, fakirden zengin yakıt karışımına doğru gidildikçe artmakta ve zengin durumda daha kararsız bir alev ortaya çıkmaktadır. Hidrojenin alev hızındaki artışı tetiklemesi de yine kararsızlıkları destekleyen bir mekanizma olarak görülmüştür. Hidrojen kararsızlıklarının yanı sıra karbondioksit oranındaki artış da kararlılık üzerinde negatif bir etkiye sebep olmuştur. Sonuç olarak,

yüksek hidrojen oranına sahip bir biyogaz-hidrojen karışımında metan ilavesinin laminar yanma hızının dalgalanmasında karbondioksit oranındaki değişikliklere göre daha fazla etkili olduğu belirlenmiştir [4].

Samiran et al., ön karışımli bir model yakıcıda metan ilave edilerek kararlılık mekanizması desteklenmiş bir H<sub>2</sub>/CO sentez gaz karışımının yanma karakteristiğini çalışmışlardır. H<sub>2</sub>/CO oranını yüksek (3) ve orta (1,2) olarak belirlemişler ve karışımındaki H<sub>2</sub> oranı artışının yanmaya etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, H<sub>2</sub> oranındaki artışın tüm gaz karışımlarında NO<sub>x</sub> oluşumunu azalttığını fakat CO emisyonunu azaltma konusunda eşdeğerlik oranının H<sub>2</sub> payını artırmaktan daha etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, karışıma seyreltici olarak CO<sub>2</sub> ilavesi de yapılmış ve bu durumun H<sub>2</sub>/CO oranı orta seviyede olan karışımda NO<sub>x</sub> emisyonunu azalttığını ortaya koymuşlardır. Diğer yandan CO içermeyen sentez gazlarının fakir karışımli yanması durumunda CO<sub>2</sub> ilavesi ile NO<sub>x</sub> artışı gözlenmiştir. Yüksek H<sub>2</sub> ilavesinin hidrojen moleküllerinin yüksek difüzyon hızı ve yüksek alev hızından dolayı daha düşük sönme limitleri ortaya çıkartığı tespit edilmiştir [5].

Cellek ve Pınarbaşı, endüstride kullanılan düşük girdap destekli bir brülörde doğal gazın yanmasını incelemişlerdir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları ile desteklenmiştir. Doğal gazın modellenmesi aşamasında Eddy Dissipation yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca yakıt karışımı da değiştirilerek hidrojen zenginleştirilmiş doğal gaz ve saf hidrojenin yanma emisyonlarını karşılaştırmak amacıyla dört farklı yakıt karışımı oluşturulmuştur. Bu karışımlar % 75 Doğal gaz + % 25 Hidrojen, % 50 Doğal gaz + % 50 Hidrojen, %25 Doğal gaz + %75 Hidrojen ve %100 Hidrojen olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, doğal gazın Eddy Dissipation yöntemi kullanılarak Metan-Hava iki adımlı reaksiyon mekanizması ile modellenebileceği belirlenmiştir. Ayrıca yakıt olarak hidrojen zenginleştirilmiş doğal gazın kullanılması CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarını doğal gaz kullanımına oranla azaltmıştır. Buna rağmen NO<sub>x</sub> emisyonları seçilen brülör tipinde termal NO nedeniyle artış göstermiştir [2].

Kurji et al., yaptıkları çalışmada farklı oranlarda CH<sub>4</sub> ve CO<sub>2</sub> miktarlarını biyodizel ve dizel yakıtlarla karıştırarak girdap destekli yakıcıda test etmişlerdir. Bu yakıtların alev kararlılığı ve emisyonlarını ölçmek için 20 kW gücünde gaz türbini yanma özelliklerine sahip bir girdap destekli brülör kullanılmıştır. Ayrıca farklı eşdeğerlik oranları



kullanılarak eşdeğerlik oranının etkisi de incelenmiştir. Sonuç olarak, biyodizel/CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımının daha düşük CO emisyonu ortaya çıkardığı, %10 CO<sub>2</sub> içeren iki yakıt karışımından biyodizel içeren yakıtın %87 oranında daha düşük CO salınımı oluşturduğu belirlenmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonları açısından yapılan değerlendirmede ise yine biyodizel içerikli karışımın %50 oranında salınımı azalttığı belirlenmiştir. Dizel bazlı karışımlar ise biyodizel yakıtla kıyasla aksenel profilde daha yüksek CH yoğunluğu açığa çıkarmıştır [6].

Yılmaz ve Yılmaz, ön karışımli girdap destekli bir brülörde H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub>/CNG gazlarını karıştırarak yanma ve emisyon davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Öncelikle gaz karışımlarının alev geri tepmesi ve sönme değerleri belirlenmiştir. Değişken H<sub>2</sub>/CO oranları test edildikten sonra sentetik gaz karışımını daha iyi temsil edebilmesi için %20 oranında CO<sub>2</sub> ile seyreltme işlemi yapılmıştır. Yakıt karışımlarının yanma davranışları, yakıcı çevresindeki girişlerden aksenel ve radyal olarak alınan sıcaklık verilerine göre değerlendirilmiştir. Emisyon davranışları da NO<sub>x</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> emisyonları ile belirlenmiştir. Sonuç olarak, H<sub>2</sub>/CO oranı yakıcı boyunca sıcaklık dağılımını küçük bir miktarda değiştirirken, hidrojenin reaksiyon kinetiğinin sentetik gaz yanmasında en önemli rolü oynadığı anlaşılmıştır. Ayrıca CO<sub>2</sub> ile seyreltme CO emisyonlarını artırmıştır [7].

Lee et al., Taaen ve Buggenum enerji santrallerinde kullanılan sentetik gaz karışımlarının gaz türbini koşullarındaki yanma davranışlarını incelemişlerdir. Deneysel esnasında, kıyaslama yapılabilmesi için yanma durumlarının dinamik basınç özellikleri, NO<sub>x</sub> ve CO emisyonları ile beraber yanma odasındaki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Yakıt karışımı içerisinde seyreltici olmaması durumunda Taaen'da kullanılan karışımın Buggenum'dakinden daha kararlı olduğu ortaya çıkmıştır. Buna rağmen azot seyreltmesi ile beraber deneyler yapıldığında tam tersi bir şekilde Taaen sentez gazının daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda Buggenum santralinde kullanılan yakıt karışımına azot ilavesinin kararsızlıkları artırdığı belirlenmiştir. Emisyon değerlerine bakıldığında ise NO<sub>x</sub> emisyonunun her iki yakıt karışımında da 5 ppm'in altında tam ve istikrarlı bir yanma ile kontrol edilebildiği görülmektedir. Yapılan çalışma ile Taaen'da 2016 yılında kurulacak olan enerji santralinin optimum çalışma koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir [8].

Wu et al., bir difüzyon alevinde metana hidrojen ilavesinin emisyon ve ısı transfer karakteristiği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Yapılan deneylerde yakıcının ısı gücü sabit tutulmuştur. Sonuç olarak, hidrojen ilavesi ile beraber sıcaklığın arttığını, alev uzunluğunun azaldığını tespit etmişlerdir. Emisyon değerlerine bakıldığında ise hidrojen ilavesi ile beraber CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının azaldığı ortaya çıkmıştır. Daha yüksek hidrojen oranlarında CO'nun CO<sub>2</sub>'ye daha kolay dönüşmesine sebep olarak CO emisyonunu azaltırken, sisteme giren karbon miktarının düşmesi ise aynı zamanda CO<sub>2</sub> oranının da düşmesine sebep olmuştur. Bunlara rağmen ani ve termal NO<sub>x</sub> oluşum mekanizmaları NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırmıştır. Ek olarak hidrojen ilavesi toplam ısı akışını %20 oranında artırmıştır [9].

Yılmaz ve Yılmaz başka bir çalışmada CNG/H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> gazlarını içeren yakıt karışımının 0,2 aralıklarla 0,2'den 1,6'ya kadar farklı girdap sayılarında ve 0.6, 0.8, 1.0 olmak üzere farklı eşdeğerlik oranlarında yanma ve emisyon karakteristiğini araştırmışlardır. Ayrıca girdap sayısının alev geri tepme ve sönme limitlerine etkisi de incelenmiştir. Test edilen gaz karışımında H<sub>2</sub>/CO oranı 1 olarak sabit tutulmuş ve seyreltici olarak CO<sub>2</sub> ilave edilmiştir. Yanma ve emisyon davranışları hakkında bilgi alabilmek için yanma odasında çevresindeki girişlerden aksel ve radyal olarak alev sıcaklığı ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak, girdap sayısının alev karakteristiği üzerindeki etkisinin düzenli olarak değişmediği, özellikle eşdeğerlik oranına bağlı olarak girdap sayısı değişimlerinde deneyler sonucunda elde edilen verilerde farklılıklar olduğu ortaya çıkmıştır [10].

Lee yaptığı çalışmada farklı oranlarda H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub> içeren sentetik gaz karışımını ön karışımli bir gaz türbin yakıcısında test etmiştir. Yapılan testler sonucunda yakıt kompozisyonunun CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarına olan etkisi incelenmiştir. NO<sub>x</sub> ve CO emisyonlarının özellikleri ve sebepleri, yakıt özellikleri, eşdeğerlik oranı, alev sıcaklığı ve alev şekli arasındaki emisyon mekanizmaları analiz edilerek araştırılmıştır. Alev görüntüsü almak için OH kemilüminesans, doğrudan fotoğraf ve OH-PLIF yöntemleri kullanılmıştır. Sonuç olarak, alevin yapısı yakıt kompozisyonu ile önemli şekilde değişmiştir. % 100 CO yakıtı kullanıldığında ortaya çıkan alev büyük miktarda CO salınımına sebep olurken, diğer durumlarda tam yanma meydana gelmiştir. NO<sub>x</sub> oluşumundaki en temel etkeninin alev sıcaklığındaki artış olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma ile kullanılan yakıtta doğal gazdan sentez gaza dönüldükçe kararlı bir

yanmada optimum karışım oranlarının belirlenmesi, CO ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının en aza indirilmesi hedeflenmiştir [11].

Kuznetsov et al., atmosfer basıncının altındaki basınç büyüklüklerinde yanıcılık sınırları ve laminar yanma hızını hidrojen–hava karışımları için araştırmışlardır. Deneysel esnasında 8.2 dm<sup>3</sup> hacminde bir yanma odası kullanmışlardır. Alevi görselleştirmek için Schlieren sistemi ile yüksek hızlı kamera kullanılmıştır. Üst ve alt yanma sınırları ve laminar yanma hızı, başlangıçta 25 – 1000 mbar basınç ve hava içerisinde % 4- 80 hidrojen oranlarında tespit edilmiştir. Laminar yanma hızı ile ilgili olarak deneysel verilerden Markstein uzunluğu, toplam reaksiyon sırası ve aktivasyon enerjisi gibi temel alev özellikleri belirlenmiştir [12]. Dong et al., çalışmalarında Bunsen brülörü kullanarak H<sub>2</sub>/CO yakıt karışımlarının laminar yanma hızını ölçmüşlerdir. Hidrojen oranı %0 ila %100 arası değiştirilerek kompozisyondaki değişim ile laminar yanma hızının dalgalanması araştırılmıştır. Reaksiyon bölgesi alanı laminar yanma hızını hesaplamak için kullanılmıştır. Eşdeğerlik oranı zengin yanmadan fakir yanmaya doğru değiştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, H<sub>2</sub>/CO karışımlarının laminar yanma hızını hesaplamak için kolaylıkla kullanılabilen ampirik formüller elde edilmektedir [13].

Metan içeren yakıt kompozisyonlarının başında yenilenebilir enerji kaynağı olarak son dönemde popüler hale gelen biyogaz karışımları da bulunmaktadır. Biyogaz; biokütle, gübre, kanalizasyon, belediye atığı, yeşil atık, bitki materyali ve tarım ürünleri gibi biyo-bozunur malzemelerin fermantasyonu ile üretilir. Biyogaz kompozisyonları içerisinde büyük oranda CH<sub>4</sub> (% 50 – 60) ve CO<sub>2</sub> (% 30 – 40) bulundurmasına rağmen çok küçük miktarlarda Hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), N<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub> içerebilmektedir. Biyogaz yenilenebilir bir enerji kaynağı olduğu gibi karbon nötr bir yakıt olması yani yanma işlemi esnasında çevreye yeni bir sera gaz ilavesi ortaya çıkmaması sebebiyle de temiz bir enerji kaynağıdır [14,15].

Greco et al., ön karışimli bir sistemde yakıt kompozisyonunun biyogaz karışımlarında aleve etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, metan oranının yanma özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Öncelikle CH<sub>4</sub> oranı %50 olarak sabit tutulmuş ve CO<sub>2</sub> konsantrasyonu %40 , %49 , % 50 olarak değiştirilmiştir. Buna ek olarak CO<sub>2</sub> yerinde %10 oranına kadar N<sub>2</sub> ve %1'e kadar H<sub>2</sub> ilave edilmiştir. Bu kompozisyonlar arasında alev karakteristiğinde önemli bir fark saptanmamıştır [14].

İlbaş et al., farklı biyogazların yanma deneylerinin 3 boyutlu modellemesini yaparak, önceden ısıtılmış havanın biyogaz karışımlarının yanması esnasında ortaya çıkan alev sıcaklıklarının üzerindeki etkisi ve egzoz emisyonlarındaki SO<sub>2</sub> miktarının karışımdaki H<sub>2</sub>S miktarı ile değişimini incelemiştir. Türbülanslı difüzyon alevlerinin yapısal modellenmesi için standart k – ε türbülanslı akış modeli, PDF / Karışım Fraksiyonu yanma modeli ve yakıcıda P-1 radyasyon modeli kullanılmıştır. Bütün analizler için ticari bir sayısal akışkanlar dinamiği programı kullanılmıştır. Biyogazın yanma özelliklerini daha iyi anlamak için aksenel ve radyal yönlerde sıcaklık gradyanları belirlenmiştir. Her biyogaz karışımı için yakıcı gücü sabit 10 kW olarak seçilmiş ve hava fazlalık oranı  $\lambda = 1,2$  ile çalışılmıştır. İlk bulgular yeni üretilen brülör ile biyogazın başarılı bir şekilde yandığıdır. Ayrıca kullanılan biyogaz karışımının yüksek miktarda metan içermesinden dolayı yakıcı içerisindeki sıcaklık dağılımları saf metan yanmasına yakın belirlenmiştir. Biyogazların alev sıcaklıklarının ön ısıtma ile arttığı gözlemlenirken H<sub>2</sub>S miktarı arttıkça emisyon içerisindeki SO<sub>2</sub> miktarı da artmıştır [16].

Joo et al., yaptıkları çalışmada model bir gaz türbin yakıcısında hidrojen zenginleştirilmiş metan alevinin mekanik zorlamalar altındaki dinamik basınç değişimleri ve hız salınımlarını incelemiştir. Yüksek hızlı OH-PLIF ile görüntüler elde edilerek OH yoğunluğunun değişimleri gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, akustik rezonans frekanslarında meydana gelen hidrojen kaynaklı kararsızlıkların önlenmesi için yakıt/hava besleme hattı ve yakıcı tasarımının yeniden tasarlanması gerektiği tespit edilmiştir [17]. Zhang et al., değişken oranlardaki biyogaz-sentetik gaz karışımlarının yanma kararsızlıkları üzerine çalışmışlardır. Belirsizlik ölçümü kullanılarak, tipik bir biyogaz-sentetik gaz karışımında meydana gelebilecek % 0,75 oranındaki değişimin alev hızında % 10, kalınlığında ise % 7,5'lük bir dalgalanmaya sebep olabileceği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, hidrojen oranında yaşanan artışın alev hızında yüksek dalgalanmalara sebep olduğu anlaşılırken, metan oranındaki artışın ise termal verimlilik ve alev kalınlığında dalgalanmalara sebep olduğu tespit edilmiştir [18].

Devi et al., gözenekli radyal bir brülörde biyogaz yanması üzerine deneysel olarak çalışmışlardır. Araştırmalar 5-10 kW arası yakıcı gücünde 0.75-0.97 eşdeğerlik oranı aralığında yapılmıştır. Belirtilen koşullarda; sıcaklık dağılımı, radyasyon verimliliği ve emisyon özellikleri açısından radyal brülörün termal davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Brülör boyunca ısı dağılımının tüm testler için aynı olduğu

gözlemlenmiştir. Ölçülen CO ve NO<sub>x</sub> emisyonu değerlerinin giriş gücü ve eşdeğerlik oranı artışı ile arttığı saptanmıştır. %33'lük maksimum radyasyon verimi 5 kW giriş gücü ve 0.97 eşdeğerlik oranında elde edilmiştir. Sonuç olarak, yeni geliştirilen radyal brülörde biyogazın belirlenen eşdeğerlik oranlarında verimli bir şekilde yanabildiği belirlenmiştir [19].

Hu ve Zhang, biyogaz-hidrojen yanmasının alev kararlılığı üzerine deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Sabit hacimli bir yanma odasında biyogaz karışımı içerisine hidrojen ilave edilerek deneyler yapılmıştır. Alevin kararsızlığı değerlendirilirken basınç ve yakıt bileşenindeki değişimlerin alev şekli üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuçlar, alev kararsızlığının eşdeğerlik oranının azalması ile arttığını ve kararlılığın CO<sub>2</sub> oranı artışıyla azaldığını göstermektedir. Biyogaz-hidrojen karışımının giriş basıncının artmasıyla Markstein uzunluğu ve hidrodinamik kararsızlıklar azalmıştır. Karışım içerisindeki hidrojen oranıyla beraber giriş basıncının da artışı hem hidrodinamik hem de termal kütle difüzyon kararsızlığını artmıştır. Bu çalışma ilerleyen yıllarda hidrojen ile zenginleştirilmiş biyogaz karışımının motorlarda kullanılması için temel sağlaması amacıyla yapılmıştır [20].

Wei et al., hidrojenle zenginleştirilmiş biyogaz karışımının laminar yanma hızını deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Çalışmada H<sub>2</sub> ve CO<sub>2</sub> oranlarındaki değişimlerin yanma hızına olan kombine etkileri araştırılmıştır. Üç farklı biyogaz karışımı %60 CH<sub>4</sub> - %40 CO<sub>2</sub>, %50 CH<sub>4</sub> - %50 CO<sub>2</sub> ve %40 CH<sub>4</sub> - %60 CO<sub>2</sub> olmak üzere test edilmiş ve bu karışımları içerisine %10'ar artışlarla %50'ye kadar H<sub>2</sub> ilave edilmiştir. Sonuçlar, laminar yanma hızının bütün biyogaz karışımlarında H<sub>2</sub> ilavesi ile neredeyse doğrusal olarak arttığını ortaya koymuştur. Yine biyogaz karışımlarında CO<sub>2</sub> oranı artırıldıkça laminar yanma hızında düşme görülmüştür, bu durumun sebebi olarak ise adyabatik alev sıcaklığındaki azalma gösterilmiştir. GRI 3.0 mekanizmasının biyogaz-hidrojen karışımının laminar yanma hızını bulma konusunda San Diego mekanizmasından daha iyi sonuç verdiği düşünülmüştür. Biyogaz karışımlarında artan CO<sub>2</sub> oranı ile beraber daha fazla H<sub>2</sub> ilavesine ihtiyaç duyulmuştur. H<sub>2</sub> ilavesi ise termal ve hidrodinamik kararsızlıklar sebebi ile alevin kararlılığını etkili bir şekilde azaltmıştır [21].

Hosseini ve Wahid yaptıkları çalışmada ısı ve güç üretiminde biyogaz yanmasının geliştirilmesini araştırmışlardır. Çalışmada biyogaz yanması ve biyogazın hidrojenle

zenginleştirilerek yanması gibi farklı yanma modelleri denenmiştir. Biyogaz karışımlarının düşük ısı değerli olması sebebi ile hidrojen ilavesi yanma kararlılığını artırmış fakat  $\text{NO}_x$  emisyonlarını artırmıştır. Biyogazın alevsiz yanması durumunda yanma kararlılığı iyileşmiş, emisyon değerleri ise düşmüştür. Diğer taraftan alevsiz yanmanın özel ekipman gerektirmesi ve maliyetli olması nedeniyle bunun yerine hidrojenle zenginleştirmenin kullanılabileceği bu çalışmada ifade edilmiştir. Biyogazın hidrojenle zenginleştirilmesi durumunda ise alevsiz yanma durumuna göre çevreyi kirleten emisyonlarda artış meydana gelmiştir [22].

Bölüm 1.1.'de anlatıldığı gibi literatürde metan içerikli değişken yakıt türleri ile farklı yanma sistemlerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kararsızlık değişimleri ve emisyon değerleri incelenmiştir. Benzer şekilde karbon içerikli yakıt karışımlarına oksijenle zenginleştirme işleminin uygulanması da literatürde karşılaşılan çalışmalar arasındadır.

## **1.2. Oksijenle Zenginleştirmenin Yanma Kararsızlıkları ve Emisyonlara Etkisi Üzerine Çalışmalar**

Ma et al., 8 MW'lık bir enerji santralinde belediyenin katı atıklarının oksijenle zenginleştirilerek yakılması sonucu ortaya çıkan baca gazı emisyonunu araştırmışlardır. Oksijen giriş oranının  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , HCl emisyonları üzerindeki etkisini değerlendirmek için farklı oksijen oranlarında (%21, %24, %27) katı atık yanması araştırılmıştır. Oksijenle zenginleştirilmiş yanmanın performansını değerlendirebilmek için fırındaki yanma sıcaklığı ve termal verimlilik incelenmiştir. Oksijenle zenginleştirme sırasında  $\text{SO}_2$  ve HCl emisyon seviyelerinin düştüğü fakat  $\text{NO}_x$  emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir. Oksijen oranı artırıldıkça yanma fırınındaki ortalama sıcaklık artarken, yanmamış yakıt miktarı azalmıştır. Termal verimlilikte yaşanan iyileşme oksijenle zenginleştirerek yanma işleminin stokiyometrik yanma koşullarına daha yakın olduğunu göstermiştir [23].

Striugas et al., bir biyogazın sentez gazı ve oksijenle zenginleştirilmiş ortamdaki yanma kararlılığını ışımaya temelli karakterizasyon ile araştırmışlardır. İçeriğinde hacimce %15 ile 30 arasında  $\text{CO}_2$  bulunan biyogaz karışımı ön karışimli bir yakıcıda test edilmiştir. Sonuçlar,  $\text{OH}^*$ ,  $\text{CH}^*$  ve  $\text{C}^*$  ışımalarının oksijenle beraber arttığını göstermektedir. Ayrıca sentez gaz ilavesinde alev uzunluğunun  $\text{O}_2$  zenginleştirmesine kıyasla daha yüksek

olduğu tespit edilmiştir [24]. Zhang et al., oksijence zenginleştirmenin bir biyogaz yakıtında laminer yanma karakteristiğine olan etkisini sayısal ve deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada oksijen oranı %21'den %60'a kadar değiştirilmiştir. Sonuçlar, artan oksijen oranıyla beraber laminer alev hızının bütün yanma koşullarında arttığını ve CH<sub>4</sub> içeriği yüksek olan yakıtların oksijence zenginleştirmeye daha duyarlı olduğunu göstermiştir. Oksijence zenginleştirme hidrodinamik kararsızlıkları ortaya çıkarırken, difüzyonel-termal kararsızlıkları baskılamıştır [25].

Cano et al., oksijence zenginleştirme ve su ile seyreltmenin yüksek basınçlardaki laminer metan alevine etkisini araştırmışlardır. Deneylerde oksijence zenginleştirme oranı %21 ile %100 arasında değiştirilirken H<sub>2</sub>O mol oranı 0-0.8 arasında tutulmuştur. Çalışmada atmosferik basınç altında su ile seyreltme ve oksijence zenginleştirmenin laminer alev hızları, Markstein uzunlukları ve yanma kararlılıkları üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak, laminer yanma hızı ile adyabatik alev sıcaklığı arasında bir korelasyon oluşturulmuş ve hızları tahmin etmek için bir yöntem geliştirilmiştir [26]. Kayahan ve Özdoğan, 30 kW'lık bir sistemde linyitlerin ve biyo-kütlenin oksijence zenginleştirilerek yanma özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler iki farklı Türk linyiti, bir biyo-kütle ve bir de bunların karışımı olarak oluşturulan yakıt ile yapılmıştır. Karışım içerisinde biyo-kütlenin payı %20'ye kadar artırılmıştır. Oksijence zenginleştirme oranı ise %21'den %30'a kadar çıkarılmıştır. Oksijence zenginleştirme her durumda yanmayı desteklemiştir. Linyitlere biyo-kütle ilavesi sonucunda karışımdaki oksijen ve biyo-kütle oranı arttıkça yanma üzerinde sinerjik bir etki ortaya çıkmıştır. Oksijence zenginleştirmenin tüm durumlarda NO ve SO<sub>2</sub> emisyonlarını artırdığı gözlemlenmiştir. Biyo-kütle oranının artışı ise NO emisyonları her zaman aynı şekilde değiştiği belirlenmiştir [27].

Barzegar et al., Türk linyitlerinin oksijence zenginleştirilmesi ve oksiyakıt yanması koşullarında yanma karakteristiği üzerine çalışmışlardır. Deneyler %21 , %30 ve %40 oksijence zenginleştirilmiş hava ile yapılmıştır. Diğer taraftan O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> oranları aynı olan oksiyakıt yanması ile karşılaştırılmıştır. Hava ile yanma durumunda CaCO<sub>3</sub>'ün ayrışması 700 C° üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleşmiştir. Bu ayrışma işlemi ise oksijen oranından bağımsız olarak sıcaklık belirli bir sınıra geldiğinde gerçekleşmiştir. Oksiyakıt koşullarındaki alev geleneksel yanma sistemine göre daha yüksek aktivasyon enerjisi değerine sahip olmuştur. Orhaneli ve Soma linyitlerinin

değerlendirildiği çalışmada yüksek oksijen değerlerine çıktıkça daha yüksek aktivasyon enerjisi değerleri ortaya çıkmıştır [28].

Shaddix ve Williams, oksijence zenginleştirmenin türbülanslı ön karışimli metan alevlerindeki termal radyasyonu üzerine araştırma yapmışlardır. Oksijence zenginleştirmenin alev üzerindeki etkilerini görebilmek için oksijen oranı ve oksitleyici akış hızlarının bağımsız olarak değiştirilebileceği bir yakıcı tasarlanmıştır. Sonuçlar, oksijen oranının %100'den %50'ye düşmesinin termal radyasyon üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ek olarak, geliştirilen yakıcının yüksek saflıkta oksijen kullanan geleneksel yakıcılara kıyasla %85'e kadar yüksek termal radyasyon seviyelerine ulaşabilecekleri görülmüştür [29]. Yang et al., mikro boşluklu bir yakıcıda fakir karışım koşullarındaki  $H_2/N_2/O_2$  alevlerinin oksijence zenginleştirilmesi durumunda yanma verimliliğini araştırmışlardır. Çalışma esnasında hidrojenin yüksek bir giriş hızına sahip olduğu durumlarda yanma verimliliğinin hızlı bir şekilde düştüğü belirlenmiştir. Bu durumu iyileştirebilmek için oksijence zenginleştirme kullanılmıştır. Eşdeğerlik oranı 0.4 olarak sabit tutulmuş, oksijence zenginleştirme oranı ise %21, %24, %27 ve %30 olarak değiştirilmiştir. Sonuçlar, yanma verimliliğinin %30 oksijence zenginleştirme oranında 32 m/s giriş hızında %98.2'ye kadar ulaşabildiğini göstermiştir. Oksijen oranı arttıkça, temel reaksiyonların ve ısı salınımlarının önemli ölçüde arttığı ortaya çıkmıştır. Böylelikle hidrojen alevlerinde meydana gelen alev ucu açıklığı ortadan kaldırılarak yüksek giriş debilerinde dahi oksijence zenginleştirme sayesinde yüksek yanma verimliliği ortaya çıkarılabilmektedir [30].

Cai et al., yüksek basınçlarda,  $CH_4/O_2/N_2$  yakıt karışımının oksijence zenginleştirilmesi sonucunda laminer yanma hızı ve Markstein uzunluğu değişimini incelemişlerdir. Deneyler farklı eşdeğerlik ve oksijence zenginleştirme oranlarında yapılmıştır. Kimyasal kinetik reaksiyon Premix kodu ile üç farklı reaksiyon mekanizması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan doğrulama ile sayısal sonuçların birçok koşulda deneysel değerlerle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Oksijence zenginleştirme ile laminer yanma hızı önemli ölçüde artmıştır, difüzyon etkisi küçük bir pozitif etki sağlarken kinetik etki göz ardı edilebilir olarak tespit edilmiştir. Alev kalınlığı ve yoğunluk oranının bileşik etkileri ile Markstein uzunluğu oksijence zenginleştirme



arttıkça azalmıştır. Yüksek O<sub>2</sub> zenginleştirme oranlarında ise alev hidrodinamik kararsızlıklar nedeniyle kararlı durumunu yitirdiği tespit edilmiştir [31].

Zhu et al., akışkan yataklı ve ön ısıtmalı bir sistemde, toz haline getirilmiş kömürün oksijence zenginleştirilerek yakılması sonucunda ortaya çıkan NO<sub>x</sub> emisyonlarını incelemiştir. Deneylerde önce hava ile yanma koşullarında meydana gelen NO<sub>x</sub> emisyonları tespit edilerek, oksijence zenginleştirerek yanma sonucunda meydana gelen değişimlerle kıyaslanmıştır. Sonuçlar, oksijen oranı %21'den %24.6 ve %28.2'ye çıkarıldığında yakıt NO<sub>x</sub> oranlarının düştüğünü göstermektedir. Hava ile yanma koşulları ile kıyaslandığında ilk zenginleştirme oranında NO<sub>x</sub> emisyonu yarı yarıya düşmüştür. Kömürün yanma verimliliğindeki değişimler sıcaklık değişimleri ile tutarlı bir şekilde değişmiştir. Bu çalışma ile ön ısıtmanın oksijence zenginleştirilmiş hava ile yanma sistemlerine entegre edilmesinin avantajı tespit edilmiştir [32].

Imteyaz et al., ön karışimli model bir gaz türbin yakıcısında hidrojenle zenginleştirilmiş oksijen-metan yanmasının alev davranışını ve kararlılık haritasını çıkarmışlardır. Statik kararlılık değerleri, geri tepme ve sönme limitleri açısından oksidizerdeki %30 oksijen oranı sabit tutularak hidrojenle zenginleştirilmemiş durumdan zenginleştirmeli durum arasındaki değişimlere göre kıyaslanmıştır. Bu sayede belirtilen yanma sisteminde hidrojen zenginleştirmesinin etkisi incelenmiştir. Eşdeğerlik oranı 0,3 ila 1 arasında değiştirilmiş, hidrojen zenginleştirmesi ise %0 - %75 arasında tutulmuştur. Sonuçlar, hem geri tepme hem de sönme limitlerinin kimyasal kinetiklerdeki gelişimden dolayı artan H<sub>2</sub> oranı ile beraber olumsuz etkilendiğini göstermiştir. Hidrojen oranının kimyasal reaksiyonların ilerlemesi üzerine olan etkisini araştırabilmek için aksel ve radyal sıcaklık profilleri çıkarılmıştır. Alev şekilleri yüksek hızlı bir kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Eşdeğerlik oranı kıyaslamasında ise giriş hızında yaşanan artışın eşdeğerlik oranını düşürdüğü tespit edilmiştir. Ayrıca alev şekilleri incelendiğinde adyabatik alev sıcaklığının alevin statik kararlılık sınırlarını etkilemediği görülmüştür [33].

Fu et al., Çin'deki bir katı atık yakma tesisinde oksijenle zenginleştirerek yakma işleminin yanma sıcaklığı, baca gazı kayıpları ve ekonomik parametreleri üzerine çalışmışlardır. Günde 350 ton şehir atığı yakabilme kapasitesine sahip bu fırının kömürle yanma işlemine kıyasla oksijenle zenginleştirilerek yakılması arasında kıyaslama yapılmaktadır. Sonuç olarak, geleneksel hava ile yanma esnasında %0 , %5,

%10 ve %20 kömür ile yanma durumlarında baca gazı kayıpları sırasıyla %17, %15, %14 ve %13 çıkarken %25 oksijenle zenginleştirilmiş yanmada kayıp yaklaşık %12 olarak hesaplanmıştır. Oksijenle zenginleştirilmiş yanmanın baca gazı kayıpları aynı koşullardaki yanma işlemlerine göre daha düşük çıkmıştır. Yüksek nem içeriği katı atık yakma için zorluklar meydana getireceğinden dolayı yakma işleminden önce atıkları kurutmak gerekmektedir. Oksijenle zenginleştirme teknolojisi bu sistemde daha yüksek yanma sıcaklığı ortaya çıkarmaktadır. Teknik ve ekonomik analizlere dayanarak, katı şehir atıklarının oksijenle zenginleştirilerek yakılması belirgin bir avantaj sağladığı tespit edilmiştir [34].

Boushaki et al.. girdap destekli bir difüzyon alevinde oksijenle zenginleştirmenin yanma dinamiklerine ve emisyon değerlerine olan etkisini incelemişlerdir. Yakıt olarak kullanılan metan, brülör çıkışındaki deliklerden radyal olarak püskürtülmektedir. Bu durum alev kararlılığını artırmıştır. Deneyler %21 ile %30 arasında değişen oksijenle zenginleştirme oranlarında, 0,8 ve 1,4 arasındaki girdap sayılarında ve 0,8 ile 1 arasındaki eşdeğerlik oranlarında yapılmıştır. Sonuçlara göre, eşdeğerlik oranının artışı oksijenle zenginleştirmenin aksine kütle akış oranını artırmaktadır. Eşdeğerlik oranı arttıkça  $NO_x$  emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun da yüksek oksijenle zenginleştirme oranlarında bacadan çıkan  $CO_2$ 'nin tekrar sisteme verilmesi ile azaltılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca ön karışım olmayan bir mekanizmada, orta seviyede bir oksijenle zenginleştirme oranında yanma ile beraber yeni geliştirilen brülörün, baca gazında  $CO_2$  oranını artırarak tam yanma şartlarının oluşturduğu belirlenmiştir [35].

Hagihara et al., yaptıkları çalışmada salınımlı yanma modelini kullanarak oksijenle zenginleştirilmiş bir yanma sisteminde çok düşük  $NO_x$  emisyonu hedeflemişlerdir. Bu çalışmada oksidizerdeki oksijen oranı periyodik olarak kontrol edilmiş ve değiştirilmiştir. Sistemde düşük oksijen oranlı bir durumla karşılaşıldığı zaman oranı yükseltilmiş, tam tersi oksijenle zenginleştirme oranı yüksek geldiği zaman ise anlık olarak düşürmüştür. Oksijenle zenginleştirme oranı düşük olduğunda düşük alev sıcaklıkları ve oksitleyici atmosfer ortaya çıkarken, yüksek zenginleştirme durumunda yüksek alev sıcaklığı ve indirgeyici atmosfer ortaya çıkmıştır [36].

Riahi et al., eş eksenli bir brülörde doğal gaz yanmasının oksijen ve hidrojenle zenginleştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Çalışmada ön karışım olmayan bir yanma

mekanizması kullanılmış ve zenginleştirmenin alev karakteristiği ve yanma sonu emisyonları üzerine etkileri incelemiştir. Oksijen oranı hacimce %20 ila %50 arasında değiştirilirken, hidrojen oranı %0'dan başlayarak yakıt içerisinde %15 oranına kadar artırılmıştır. Deneyle stokiyometrik şartlarda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, oksijen ve hidrojen ilavesinin alev kararlılığını artırdığını, CO<sub>2</sub> emisyonunu artırırken CO oluşumunu azalttığını göstermiştir. Ayrıca oksijence zenginleştirme NO<sub>x</sub> oluşumunu da artmıştır [37].

Yepes ve Amell, bir biyogaz üretim tesisinde sentez gaz karışımının oksijence zenginleştirilerek yakılmasında ortaya çıkan laminer alev hızını araştırmışlardır. Sentez gaz karışımı olarak H<sub>2</sub>/CO/N<sub>2</sub> kullanılmıştır. Farklı eşdeğerlik oranlarında %21'den %35'e kadar oksijen oranı artırılmıştır. Alevler, Schlieren görüntüleri ile laminer yanma hızını belirlemek için kullanılmıştır. Sonuç olarak, laminer yanma hızı reaksiyon hızının artması nedeniyle karışımdaki oksijen oranı arttıkça artmıştır. Stokiyometrik bir yanmada, yakıcıdaki %4'lük oksijen artışında laminer yanma hızı %25 artmıştır. Diğer taraftan, yanıcılık sınırları artan karışımın daha geniş eşdeğerlik oranı aralıklarında kararlı bir şekilde yanmasına olanak sağlamaktadır [38].

### **1.3. Termo-akustik Kararsızlıklar ve Dıştan Akustik Zorlamalı Sistemler Üzerine Yapılan Çalışmalar**

Yılmaz et al., H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> 'den oluşan sentetik gaz karışımının alev karakteristiği üzerine çalışmışlardır. Çalışmada yüksek H<sub>2</sub>/CO oranına sahip bir sentetik gaz karışımı girdap destekli bir sistemde yanma kararlılığı ve emisyon davranışı yönünden incelenmiştir. Öncelikle karışımların alev geri tepmesi ve sönme limitleri tespit edilmiştir. H<sub>2</sub>/CO oranı deneyler esnasında sabit tutularak Metan oranı %5 artışlarla %20'ye kadar yükseltilmiştir. Tüm deneylerde 0.4 eşdeğerlik oranı ve 0.2 girdap sayısı sabit tutulmuştur. Alev dıştan akustik zorlamalı bir sistemde test edilmiş ve yakıcıdaki akustik alan 30-200 Hz frekans arası değiştirilmiştir. Alevin kararsızlıklarının belirlenmesi için dinamik basınç değerleri ve ışık şiddetindeki dalgalanmalardan yararlanılmıştır. Sonuç olarak sentetik yakıt karışımlarına CH<sub>4</sub> ilavesinin yanıcılık sınırlarını iyileştirdiği ve alev sıcaklığı ile beraber emisyonları artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca akustik zorlamalar altında alev davranışı değişmiş ve dinamik basınç dalgalanmaları meydana gelmiştir [39].

Emadi et al., girdap destekli bir yakıcıda dıştan akustik zorlama altındaki alevin termo-akustik kararsızlıklarını incelemiştir. Bu çalışmada 3,81 cm çapında düşük girdap sayılı bir yakıcı, farklı yakıt karışımları ile akustik olarak zorlanmıştır. Elde edilen sonuçlar yine düşük girdap sayılı 2,54 cm çapındaki başka bir yakıcıdan alınan sonuçlarla kıyaslanmıştır. Çalışmada 3,81 cm çapındaki yakıcının daha yüksek akustik modları olduğu ortaya çıkmıştır. Yakıtta hidrojen ilave edilmesi sonucunda alev hızının artması ve ateşleme sınırının azalması sonucunda kararlılığın düştüğü gözlemlenmiştir. Büyük ölçekli girdaplar, ısı yayma bölgesinin daha fazla yer değiştirmesine sebep olmuştur [40].

Yılmaz et al., yaptıkları çalışmada ön karışimli bir yakıcıda alev kararsızlıklarının deneysel olarak araştırılmıştır. Araştırmada %100 CH<sub>4</sub>'den başlayarak içerisine H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> gazları sırasıyla farklı oranlarda ilave edilmiştir. Yakıt karışımı değiştirilirken aynı zamanda girdap sayısı ve eşdeğerlik oranı da değiştirilerek yakıcı içerisindeki dinamik ve statik basınç dalgalanmaları ile alevin kararsızlıkları değerlendirilmiştir. H<sub>2</sub> ve CO yakıtlarının aynı anda kullanıldığı karışımlarda H<sub>2</sub>/CO oranları düşük (0,5), orta (1,5) ve yüksek (3) olarak değiştirilmiştir. Ayrıca bu sentetik gaz karışımları CO<sub>2</sub> ile de seyreltilerek, bunun alev olma etkisi incelenmiştir. Yanma kararsızlıklarını belirlemek için dıştan akustik zorlama, alev uygulanarak kararsızlık değişimleri belirlenmiştir. Bu kararsızlıkların tespiti için anlık olarak alev görüntüleri, ışık şiddeti ve basınç değişimleri de incelenmiştir. Sonuç olarak, girdap sayısının alev kararlılığı üzerinde monoton bir etkisi olduğu ve CO ilavesinin dıştan akustik zorlamalı bir sistemde alevi daha kararlı bir hale getirdiği tespit edilmiştir [41].

Kaufman et al., düşük girdap sayılı bir sistemde metan yakıtına hidrojen ilavesinin termo-akustik kararsızlıklara etkisini araştırmışlardır. Gaz türbin endüstrisindeki NO<sub>x</sub> emisyonlarını azaltma çalışmaları kapsamında bu araştırmada ön karışimli bir yakıcı mekanizması kullanılmıştır. Düşük girdaplı brülörlerin özellikle fakir karışimli yanmada yüksek girdap sayılı olanlara göre termo-akustik kararsızlıklara daha yatkın olduğu saptanmıştır. Deneyler 10 m/s yakıcı çıkış hızına sahip 3.81 cm'lik düşük girdaplı bir brülör ile yapılmıştır. Hidrojen ilavesinin alev yüzey eğriliği ve alev yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Akustik alan belirli frekanslarla hoparlör sistemi tarafından üretilmiştir. Sonuç olarak, yakıt karışımındaki hidrojen miktarının artırılması mutlak eğrilik yarıçapının artmasına sebep olmuştur. Alev yüzey yoğunluğu profilleri ise

parabolik bir davranış sergilemiştir. Ayrıca, akustik dalgalanmalar ve kararsız ısı salınımı arasındaki bağlantının saf metan alevlerine göre metan-hidrojen alevinde daha az olduğu gözlemlenmiştir [42].

Tuncer et al., ön karışimli hidrojen zenginleştirilmiş metan alevlerinin dinamiğini,  $\text{NO}_x$  ve geri tepme özelliklerini araştırmışlardır. Sentez gazların en önemli bileşenlerinden birisi olan hidrojenin ilavesi yüksek yanma oranı sebebi ile alev üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Çalışmada yakıt bileşimi %100 metandan başlanarak, hidrojen ilave edilmiştir. Artan hidrojen miktarı ile geri tepmeye karşı yüksek duyarlılığın olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca hidrojen oranındaki artış baskın akustik modlarda alevin ani değişikliklere uğramasına sebep olmaktadır. Termo-akustik kaynaklı basınç salınımları ve emisyonlar üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır [43].

Wang et al., metan-hidrojen yakıt karışımının farklı hidrojen oranlarında, farklı akustik zorlamalar altında ön karışimli girdap destekli bir yakıcıda yanma kararsızlıklarını incelemiştir. Çalışmada hidrojen içeriği %0, %10, %20 ve %40 olarak değiştirilirken akustik zorlama frekansı 110 – 240 Hz arasında tutulmuştur. Bir hoparlör tarafından oluşturulan akustik alan kararsız yanmanın akustik ortamını temsil etmektedir. Alev yapıları, alevin akış alanındaki girdap değişimleri, alev ön yapısındaki OH ışımaya ve termo-akustik salınım derecesi bu çalışmada araştırılmıştır. Sonuçlar, fakir karışımlarda hidrojen içeriğindeki artışın 170 – 240 Hz frekans aralığında yanma kararsızlıklarını azalttığını gösterirken diğer taraftan 110 – 160 Hz frekans aralığında yanma kararsızlıklarında artışa sebep olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun ana sebebi olarak; hidrojen oranındaki artışın, alevin akış alanındaki girdap gelişimini ve alev ön yapısındaki OH kemilüminesansı yoğunluğunu değiştirmesi olduğu ifade edilmiştir [44].

Yu et al., hidrojen ilavesinin ön karışimli Dimetil Eter alevlerinin laminer yanma hızı ve Markstein uzunluğuna etkisini incelemiştir. Çalışma farklı sıcaklıklarda, eş değerklik oranlarında ve hidrojen zenginleştirme oranlarında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, artan hidrojen oranının başlangıç sıcaklığı ve laminer yanma hızını artırdığını göstermektedir. Hidrojen ilavesi ile indüklenen kimyasal kinetik etki, termal etkilere kıyasla laminer alev hızının artırılmasında daha önemli rol oynamıştır. Ayrıca Markstein uzunluğunun değişiminde kritik bir eşdeğerlik oranı ortaya çıkmıştır. Kritik eşdeğerlik oranı altındaki karışımlarda hidrojen oranı artışında Markstein uzunluğu azalmaktadır. Bu durum

hidrojen ilavesi neticesinde termal kararsızlıkların artmasına neden olmuştur. Kritik eşdeğerlik oranı üzerindeki yanmalarda ise hidrojen mol oranı artışı ile Markstein uzunluğu artmaktadır [45].

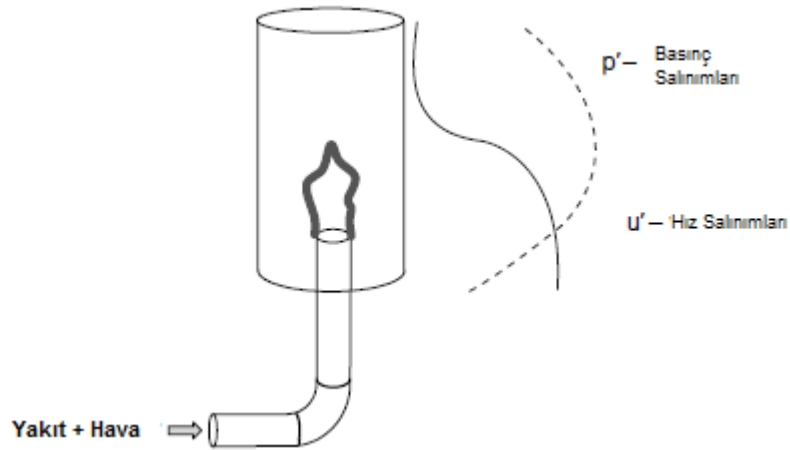
Sankaran ve Im, ön karışımli metan/hava alevlerinde hidrojen ilavesinin Markstein uzunluğu ve yanma limitleri üzerine etkilerini incelemiştir. Alevin tepkisi sabit koşullar altında farklı oranlarda hidrojen ilavesi ile incelenmiştir. Kararlılıkta etkili olan Markstein uzunluğu, Lewis ve Zeldovich sayılarının rakip etkileri nedeniyle kararsızlık değişimleri monoton olarak kaydedilememiştir. Sonuçlar, yanma sınırının karışımında hidrojen bulunması nedeniyle arttığını göstermiştir. Ayrıca kararsız alevin NO<sub>x</sub> oluşumu üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır [46]. Huang ve Ratner, ön karışımli düşük girdap sayılı bir brülörde termo-akustik kararsızlıkları çalışmışlardır. Bu çalışmada gaz türbinlerinde sıkça rastlanılan yanma kararsızlıklarına bir çözüm getirebilmek için yanmanın fiziksel mekanizması ve açığa çıkan enerjinin yanma akustiğine etkisi araştırılmıştır. Dıştan akustik zorlama altında yapılan deneylerde 13 ila 270 Hz frekans değerlerinde zorlayıcı akustik etki kullanılmıştır. Sonuçlar, kararsızlıkların Reynold ve Strouhal sayılarına bağlı olarak belirli frekans aralıklarında meydana geldiğini göstermektedir [47].

Yılmaz et al., düşük girdap sayılı bir brülörde hidrojen-metan karışım yakıtının termo-akustik kararsızlığını deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmanın amacı hidrojen ilavesinin yanma kararsızlığı üzerindeki etkisini belirlemektir. Yakıt olarak üç farklı karışım kullanılmıştır. Bunlar hidrojen oranlarına göre %7, %20 ve %30 olarak değişmektedir. Ayrıca dıştan akustik zorlamalar dört farklı frekansta (85, 125, 222 ve 399 Hz) uygulanmıştır. Akustik zorlama esnasında OH oranını ölçmek için OH-PLIF floresanı kullanılmıştır. Bu çalışmada, hidrojen oranının yanma özellikleri açısından çok önemli olduğu doğrulanmıştır. Tüm yanma koşullarında, artan hidrojen oranı ile beraber alev sıkıştırmasında önemli artışlar gözlemlenmiştir. Bu durum rezonansın olmadığı frekanslarda alev tepkisini artırırken, rezonans frekanslarındaki kuplaj yoğunluklarını azalttığı görülmüştür [48].

#### **1.4. Yanma Kararsızlıkları**

Gaz türbin sistemlerinde yanma kararsızlıkları ve bu kararsızlıkları ortadan kaldırmak araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Kararsız bir yanmanın meydana

getireceği zararlı emisyonların yanı sıra, yakıcı sistemine de vereceği zarar nedeniyle farklı yakıcı tiplerinde kararsızlıkların araştırıldığı çalışmalar önem kazanmaktadır. Yanma kararsızlıkları, yakıcı sisteminin doğal akustik modlarının büyük genlikli salınımları olarak ifade edilmektedir. Kararsızlıklar gaz türbin yakıcılarında olabileceği gibi roketler gibi yüksek hızlı sistemlerde de olabilmektedir. Yine endüstride ve konut ısıtmalarında kullandığımız yanma sistemlerinde de yanma kararsızlıkları ile karşılaşmaktadır. Kararsızlıkların ortaya çıkması genel olarak problemlere sebebiyet verir, çünkü bunlar yakıcı sistemleri için zarar verici büyüklükte olabilmektedir. Kararsızlıklar sonucu ortaya çıkan basınç ve hız salınımları ile beraber yanma odası duvarlarında yüksek termal gerilmeler meydana gelir, bu durum da yanma esnasında alevin yok olmasına sebep olan geri tepme (flashback) ve alev sönmesi (blow-off) durumlarını ortaya çıkarır. Genel olarak yanma kararsızlıkları yanmanın doğal akustik modları ile alakalı frekanslarda ortaya çıkar. Buna rağmen bazı durumlarda bir entropi dalgası veya alev bölgesinde üretilen bir girdap da kararsızlıklara sebep olabilmektedir. Şekil 1.1’de açık bir tüp içerisindeki yanma kararsızlığı gösterilmiştir [49].



Şekil 1.1. Açık bir tüp içerisindeki yanmada kararsızlık örneği [49]

Farklı yanma kararsızlığı mekanizmaları aşağıda anlatılmıştır.

#### 1.4.1. Ön Karışımli Sistemlerdeki Kütle Kuvveti Kararsızlıkları

Akışkanlar içerisinde, yoğunluğu düşük olan bir sıvının daha yüksek yoğunluklu bir sıvı içerisine koyulduğu zaman dengesiz bir şekilde yukarı doğru yükselme eğilimi göstereceği bilinmektedir. Bu sebepten, yukarı doğru ilerleyen alevlerde matematiksel olarak akışkan içerisinde ortaya çıkacak F kaldırma kuvveti, kararsızlıklara sebep

olmaktadır. Alev içerisinde yanmış gazların ( $v_{\infty}$ ) ve henüz yanma işlemini tamamlamamış gazların ( $v_0$ ) hız farklarından dolayı, yer çekimi etkisi altında kararsızlığın enine bir karakteristik uzunluğu ortaya çıkmaktadır. Bu uzunluk  $v_0 v_{\infty} / g$  denklemi ile ifade edilmektedir. Bu durumda alev hızı azaldıkça kararsızlıkların artacağı tespit edilmiştir [50].

#### 1.4.2. Ön Karışımli Sistemlerdeki Hidrodinamik Kararsızlıklar

Hidrodinamik kararsızlıklar ile ilgili alev teorisindeki çalışmalar Darrieus ve Landau tarafından ortaya koyulmuştur. Bu kararsızlık analizi alevin kendi yapısından kaynaklanan kuvvetleri ihmal ederek alevi bir bütün olarak sabit hızda ve daha yoğun kabul etmektedir. Bu durumda alev boyunca meydana gelen termal genleşmeleri inceleyerek kararsızlık analizi yapılmaktadır. Başlangıçta hareketsiz bir ortamda genişleyen küresel bir alev için alev tabakasının zamanla alanının artmasının hidrodinamik dengesizliğin başlangıcını geciktirdiği bilinmektedir. Hidrodinamik kararsızlığın ilk araştırmalarında dengesizliğin türbülansın kaotik bir karakteristiği olduğu düşünülmüştür. Bu sebepten ön karışımli alevlerin kendinden türbülanslı oluşu hidrodinamik kararsızlığa bağlanmıştır. Buna karşı kararsızlık denklemlerinden oluşturulan sayısal çalışmalar neticesinde, alev boyunca meydana gelen küçük yoğunluk değişimleri neticesinde hidrodinamik kararsızlığın ortaya çıktığı anlaşılmıştır. Her ne kadar bu büyük alevlerde hidrodinamik dengesizliğin baskın fenomen olması gerektiği görülse de, yaygın fenomenler, tabakanın sırtlarındaki cusp (sivri uç) yapısı olarak görülmektedir [50].

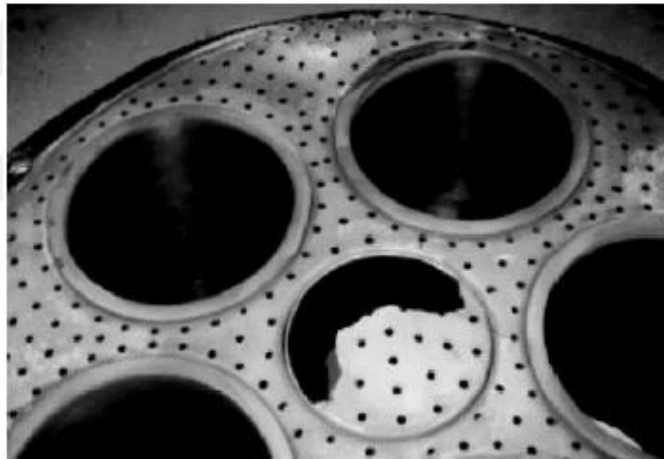
#### 1.4.3. Ön Karışımli Sistemlerdeki Difüzyiv-Termal Kararsızlıklar

Ses altı, ön karışımli ve ön karışımli alevlerde kütle ve ısının difüzyonu sebebi ile termal kararsızlıkların meydana geldiği bilinmektedir. Düşük Lewis sayısında meydana gelen bu kararsızlıklar, akış tamamen laminar olduğunda hücresel alev yapılarına yol açabilir. Düşük Le sayısı, yoğunluğu düşük yakıtların fakir karışımlarına veya yoğunluğu yüksek yakıtların zengin karışımlarına karşılık gelmektedir. Bu kararsızlıklar alevin yok olma eğilimine girmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Bu kararsızlık tipi, adyabatik alev hızının ve ona bağlı olarak da Markstein uzunluğunun hesaplanması ile tam olarak açıklanabilmektedir [50].



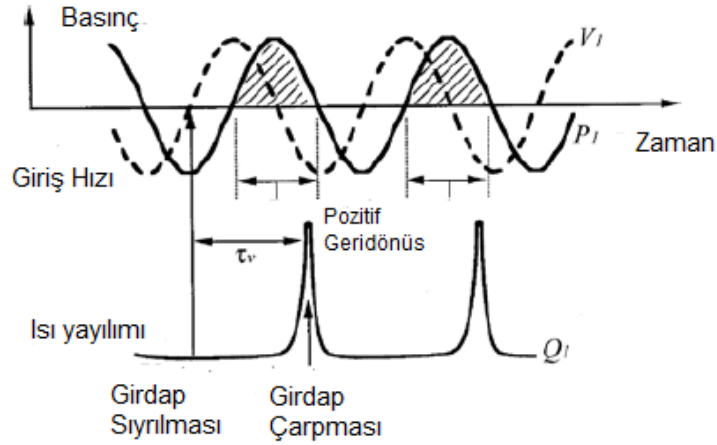
#### 1.4.4. Termo-Akustik Kararsızlıklar

Gaz türbin yakıcılarında sık karşılaşılan kararsızlardan birisi de akustik salınımlar nedeniyle ortaya çıkan kararsızlıklardır. Rezonans etkileşiminden kaynaklanan kararsızlıklar, akışta meydana gelen ısı salınımları nedeniyle ortaya çıkar. Sistem duvarlarında büyük genlikli titreşimler meydana getiren bu kararsızlıklar alev geri tepmesi ve sönmesine sebep olurlar. Yanma işleminde üretilen sıcaklık dalgalarıyla beraber hareket eden entropi dalgaları, konvektif modları içerir. Entropi dalgalanmaları ile beraber yukarı doğru yayılan basınç salınımları ortaya çıkarak yakıcı içerisindeki dinamik basınç değişimleri artar. Bu durum termo-akustik kararsızlık denilen ve yakıcıya zarar veren etkileri ortaya çıkarır. Şekil 1.2’de termo-akustik kararsızlıklar nedeniyle ortaya çıkan dinamik basınç dalgalanmalarının zarar verdiği bir yakıcı gösterilmiştir [49].



Şekil 1.2. Yüksek frekanslı dinamik kararsızlıklar nedeniyle hasar görmüş bir yakıcı [49]

Rayleigh mekanizması, bu kararsızlıkların ısı yayılımı ve basınç dalgalanmalarının aynı fazda olması durumunda meydana geldiğini ifade etmektedir. Bu ifade termo-akustik kararsızlıkların anlaşılmasını sağlamakla birlikte akustik salınımlar ile ısı yayılımının aynı faza geldiklerinde kararsızlıkların ortaya neden çıktığını tam olarak açıklamaktadır. Rayleigh kriterlerine göre bir yanma kararsızlığının anlaşılabilmesi için şu kriterlerin incelenmesi gerekmektedir. Şekil 1.3’de Rayleigh kriterleri şematik olarak göstermektedir [49].



Şekil 1.3. Rayleigh kriterleri gösterimi [49]

- 1) Alev - girdap etkileşimleri
- 2) Akustik – alev bağlantısı
- 3) Kararsız alevin sınırlarıyla etkileşimi
- 4) Ortak alev yok olması
- 5) Kararsız gerilmelerin etkisi

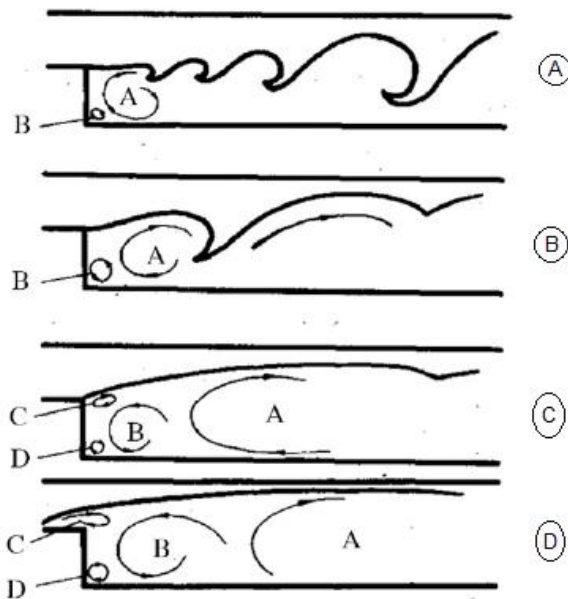
#### 1.4.5. Geri Tepme

Ön karışımli yanma mekanizmalarının tamamında görülen sorunlardan birisi geri tepme (flashback) eğilimidir. Geri tepme alevin brülöre istenmeyen şekilde nüfuz etmesidir. Alev yanma bölgesinin tersine doğru ön karışımın olduğu yere akma eğilimine girerse geri tepme meydana gelir. Temel olarak üç farklı geri tepme tipi belirlenmiştir. Bunlardan ilki serbest gaz akışında meydana gelen geri tepme, diğeri ön karışım bölümünde duvarlarla akışkan arasında meydana gelen sınır tabaka bölgesi ve bu bölgedeki akışın yavaşlamasıdır. Sonuncusu ise girdap destekli yanma sistemlerinde, girdap oluşumu kaynaklı geri tepmedir. Özellikle ön karışımli yanma mekanizmalarında ön karışım kısmındaki türbülanslı alev hızı, çıkıştaki bölgesel akış hızından daha yüksekse geri tepme meydana gelir. Normalde fakir karışım yanmalarında alev hızları düşüktür fakat yüksek sıcaklıklardaki motor çevrimleri gibi yanma işlemlerinde basınçlar ve türbülanslar artmaktadır. Bu yüksek sıcaklık seviyelerinden dolayı gazlarda meydana gelecek ön reaksiyonlar alevin hızını artırmaktadır. Bu sayede, akış hızı

istenilen en düşük seviyenin çok daha üzerine çıkarılarak geri tepme oluşumlarının önüne geçilmeye çalışılmaktadır [51].

Geri tepme esnasında yakıcı içerisinde yüksek seviyelerde dinamik basınç dalgalanmaları meydana gelmektedir. Bu basınç dalgalanmaları brülör hasarlarına sebebiyet vermektedir. Ortaya çıkacak bir brülör hasarı, ilave bir maliyete sebep olacağı gibi yanma sisteminin tamamını da tehlikeye atmaktadır. Aynı zamanda yanma kararsızlıkları ve ardından meydana gelen geri tepme sebebiyle, yanma sonu emisyonlarından olan  $\text{NO}_x$ 'i önemli seviyede artmaktadır [52].

Keller et al., Şekil 1.4'de gösterilen geri tepme mekanizmasının akış içerisindeki girdap dinamikleri tarafından tetiklendiği açıklamışlardır. Bir yanma sisteminin sembolize edildiği görselde, ilk şekilde yanma başlangıcında ana girdap oluşumu A olarak ortaya çıkar ve arkasında uydu girdap diyebileceğimiz bir B girdabı onu takip eder. İkinci durumda ise yanmış gazların çoğalmasıyla beraber iki girdapta büyümektedir. Bir sonraki şekilde devrdaim girdaplarının büyümesi ile beraber A girdabı aşağı itilerek B girdabı büyümeye devam eder, bu durumda ise geride daha küçük C ve D girdapları oluşur. B girdabının giderek büyümesi sonucunda ise girdap C yukarı doğru itilerek yakıcı içerisine doğru hareket eder. Bu durum da geri tepme mekanizmasını ortaya çıkarır [53].



Şekil 1.4. Geri tepmeye sebep olan girdapların oluşumu [53]

### 1.4.6. Alev Sönmesi

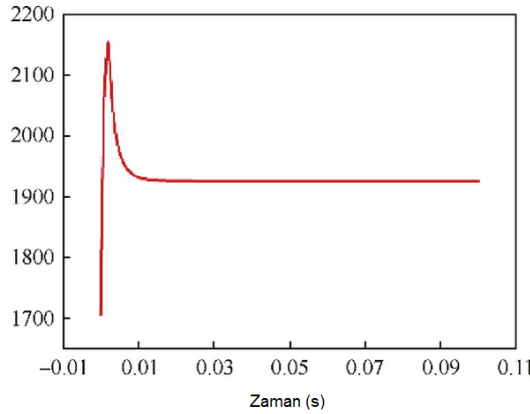
Yanma sırasında akış çok yüksek olduğu zaman veya yakıt miktarı çok düşürüldüğü zaman alev kararlı bir şekilde yanmaya devam edemez ve akış yönünde yayılarak söner. Bu durum alev sönmesi (Blow Off) olarak tanımlanmaktadır. Alev sönmesi gaz türbinli motorlar için ciddi bir sorun oluşturmaktadır [54]. Fakir karışım durumlarında ortaya çıkan bu durumun; giriş havası sıcaklığı, basıncı, hızı ve türbülansı ile de ilişkisi vardır. Bu kararsızlık mekanizmasının matematiksel açıklaması için Damköhler sayısı kullanılmaktadır. Damköhler sayısı reaksiyona girmesi gereken bileşenlerin reaksiyon bölgesinde kaldığı sürenin, gerçekte kalmaları gerektiği süreye oranı olarak ifade edilir. Bileşenlerin reaksiyon bölgesinde kalma süreleri azaldığı zaman alev sönmesi meydana gelmektedir. Denklem 1.1 ve 1.2’de Damköhler sayısı açıklanmaktadır. [55].

$$Da = \frac{\text{Bileşenlerin reaksiyon bölgesinde kalma zamanları}}{\text{Reaksiyon için gereken zaman}} \quad (1.1)$$

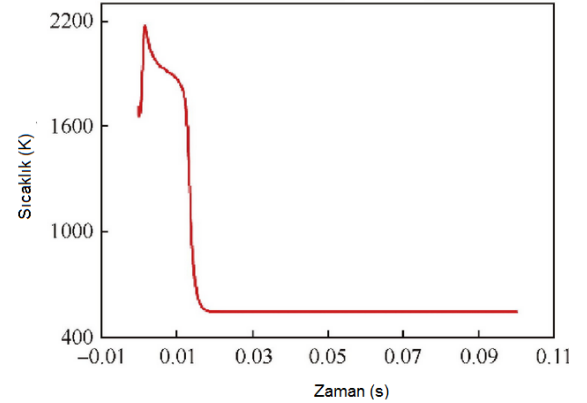
$$Da = \frac{S_L^2 \cdot d}{\alpha \cdot U_{ref}} \quad (1.2)$$

Yukarıdaki denklemlerde;  $S_L$  : Laminer yanma hızı,  $\alpha$ : Termal difüzyon, d: Reaksiyon bölgesi uzunluğu,  $U_{ref}$  = Hız ölçeğini ifade etmektedir.

Wang et al., Damköhler sayısına göre kararlı alevlerin sönmesi üzerine sayısal olarak çalışmışlardır. Araştırmada reaksiyonda kalma zamanları ayarlanarak Damköhler sayısı değiştirilmiş, ardından Chemkin yazılımında farklı reaksiyonda kalma zamanları için alev sıcaklığı değerleri incelenmiştir. Da sayısı 0.673 ile 1.351 arasında değiştirilmiştir. Şekil 1.5’de çalışma sonucu ortaya çıkan reaksiyonda kalma süresi – sıcaklık grafiği gösterilmiştir [56].



a) Kalma süresi = 0.00103 s



b) Kalma süresi = 0.00102 s

Şekil 1.5. Farklı reaksiyonda kalma sürelerinde sıcaklık – zaman grafikleri [56]

### 1.5. Yanma Akustik Odada Kullanılan Yakıtların Özellikleri ve Oksijene Zenginleştirme Esasları

Yakıtların katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç temel türü vardır. Çevremizde sıklıkla kullanılanlar; doğal gaz (metan), kömür, benzin (oktan) ve benzerleridir. Bu yakıtların büyük bir kısmı hidrokarbon olarak isimlendirilmektedir. Hidrokarbon, ismini içerisinde bulundurduğu hidrojen ve karbon elementlerinden alır [57].  $C_nH_{2n+2}$  formülü ile ifade edilen hidrokarbonlar kimyada alkanlar ya da parafinler olarak da isimlendirilmektedir. Alkanlar, içerisinde sadece hidrojen ve karbon atomlarının bulunduğu ve bu elementlerin tekli bağ yaptığı organik bileşiklerdir. Tablo 1.1’de günümüzde sıkça kullanılan hidrokarbon yoğunluklu yakıtlar ve içerdikleri hidrokarbonun formülü verilmiştir. Tabloda verilen yakıtların içeriğinin % 90 ve üzeri belirtilen parafinden oluşmaktadır [58].

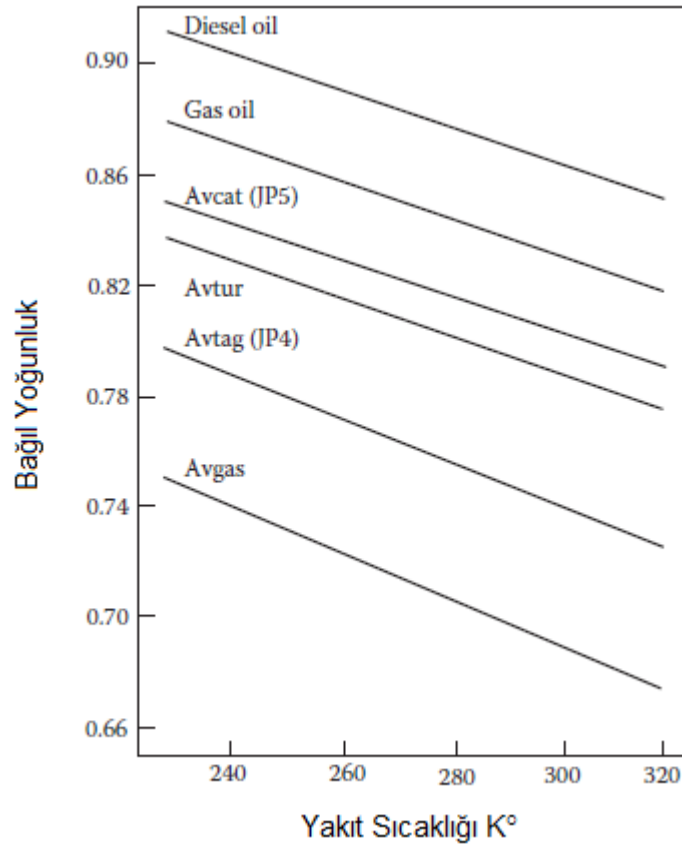
Tablo 1.1. Yakıtlar ve içerdiği hidrokarbonlar

Kullanılan Yakıt	Hidrokarbon	Kimyasal Formülü
Doğal Gaz	Metan	$CH_4$
Benzin	Oktan	$C_8H_{18}$
Motorin	Dodekan	$C_{12}H_{26}$
Jet Yakıtı	Kerosen	$C_{14}H_{30}$

Endüstride kullanılan her yakıtın farklı yanma özellikler bulunmaktadır. Bunlardan önemli bir tanesi de tutuşma sıcaklığıdır. Örnek olarak bir atmosfer basınç altında bazı yakıtların tutuşma sıcaklıkları şu şekildedir; Benzin – 260 C°, Hidrojen – 580 C°, Metan

– 630 C°, Karbonmonoksit – 610 C°. Yine parafinler dışında alternatif hidrokarbon çeşitleri de mevcuttur. Bunlar Olefinler, naftenler ve aromatiklerdir [57]. Yine endüstride kullanılan yakıtların başka ayırt edici ve bilinmesi gereken özellikleri mevcuttur.

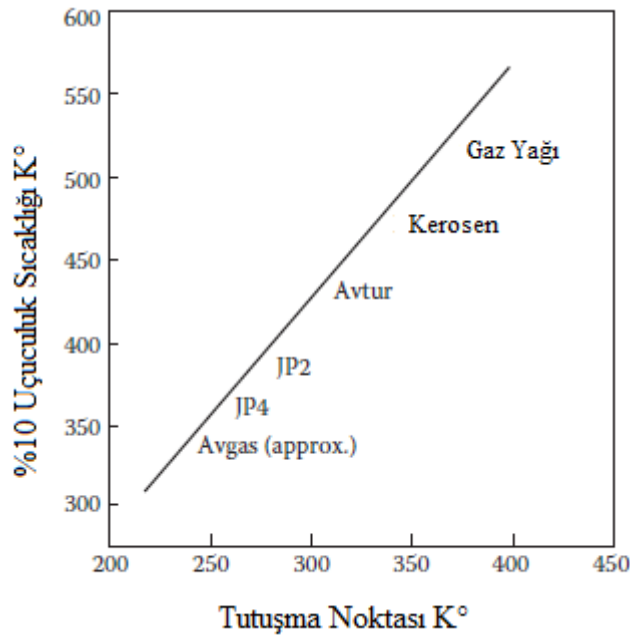
Bağıl yoğunluk, yakıtların kütlelerini hesaplayabilmemiz açısından önemli bir özelliktir. Taşıtların tamamında yakıt depoları hacim olarak ölçülmekte ve tasarlanmaktadır. Bu yüzden yakıtın yoğunluğu depoya koyulacak yakıtın kütlelerini belirlemektedir. Şekil 1.6'da tipik gaz türbin yakıcılarında kullanılan yakıtların sıcaklığa göre bağıl yoğunluk değişimleri gösterilmiştir [51].



Şekil 1.6. Tipik gaz türbin yakıtlarının sıcaklık-bağıl yoğunluk grafiği [51]

Yakıtların özelliklerinden bir diğeri de moleküler küttedir. Bu küttelin deneysel metodlarla bulunması en uygun yöntem olarak bilinmektedir. Başka bir özellik de buharlaşma basıncıdır, iyi bir yanmanın gerçekleşebilmesi için buharlaşma basıncının yüksek olması arzu edilmektedir. Buna rağmen düşük buhar basınçları da yüksek irtifalarda seyreden uçaklarda buharlaşma nedeniyle daha düşük yakıt kayıplarının

olmasına ve yangın tehlikesinin azalmasına sebep olacaktır. Bu durum avantaj olarak da kullanılmaktadır. Özellikle düşük buhar basıncına sahip yakıtlar, yüksek ses üstü uçuşlar için gerekli olmaktadır. Uçuculuk ise yine yakıtın yanma verimliliğini etkileyen bir faktördür. Artan uçuculuk sayesinde daha kararlı ve verimli bir yanma ortaya çıkmaktadır. Buna rağmen yüksek irtifalarda yakıtın çabuk buharlaşmasına ve yangın tehlikesine sebep olmaktadır. Şekil 1.7’de bazı yakıtların tutuşma noktaları ile uçuculuk sıcaklıkları arasındaki değişim gösterilmiştir [51,59].



Şekil 1.7. Uçuculuk – tutuşma sıcaklığı değişim eğrisi [51]

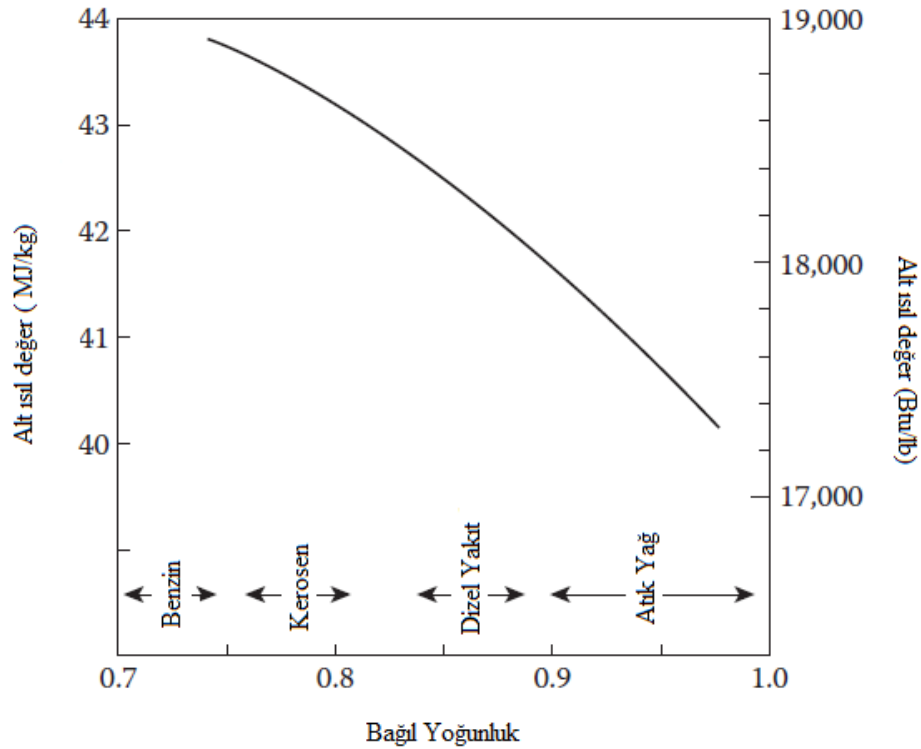
Yakıtların sisteme pompalanması için gereken güç ve türbülans değerleri gibi en önemli parametrelerden birisini belirleyen özellik de viskozitedir. Viskozite, bir akışkanın akışa karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanmaktadır. Bir yakıtın viskozitesi ne kadar yüksek olursa atomizasyon kalitesi de o kadar düşük olur. Bir başka özellik olarak da özgül ısı karşımıza çıkmaktadır. Modern uçaklarda yakıt aynı zamanda motor ve gövdenin ısını emen bir soğutucu olarak da kullanılmaktadır. Bu özellik bakımından parafinler özellikle aromatlere göre çok daha yüksek özgül ısılarına sahip oldukları için caziptirler.

Yakıtların bu temel özelliklerinin yanı sıra yanma düzeneklerinde ortaya çıkan diğer özellikleri de mevcuttur. Bunlardan en önemlisi ise ısı değer olarak görülebilmektedir. Isıl değer, yakıtın hava ile tam olarak yanması gerçekleştiği zaman açığa çıkan ısıdır. Gaz türbin yakıcılarında yanma sonrası ortaya çıkan CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O buhar fazında

oldukları için, alt ısı değer tanımı daha önemlidir. Genel olarak hafif yakıtlar en yüksek özgül enerji değerlerine sahiptirler. Bir yakıtın özgül enerjisi kimyasal bileşimine ve hidrojen/karbon oranına bağlıdır [59].

Gaz yakıtların enerji yoğunlukları genellikle metreküp başına megajoule olarak ifade edilmektedir. Yakıt sistemleri ile ilgili tasarımlar yapılırken genel olarak gaz yakıtların karşılaştırılmasında Wobbe endeksi kullanılır. Wobbe endeksinin hesaplanmasında kullanılan formül Denklem 1.3'de verilmiştir. Şekil 1.8'de farklı yakıt tiplerinin alt ısı değer ile bağlı yoğunluklarının karşılaştırması sunulmuştur [51].

$$\text{Wobbe endeksi} = \text{Enerji Yoğunluğu} / \text{Bağıl Yoğunluk} \quad (1.3)$$



Şekil 1.8. Farklı yakıtların alt ısı değer/ bağıl yoğunluk oranı [51]

Deneysel olarak yapılan bu çalışmada yakıt olarak metan, hidrojen ve karbonmonoksit kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarından önce bu yakıtların yanma karakteristiği ve emisyonları üzerine etkileri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

### 1.5.1. Metan

Metan, renksiz ve kokusuz bir gazdır ve tüm hidrokarbonların en basitidir. Dünya atmosferinin yaklaşık milyonda ikisini oluşturan metanın kimyasal formülü CH<sub>4</sub>'tür.



Metan gazı havada hacimce %5 ila %15 arasında olması durumunda patlamaya sebep olabilir, bir sera gazı olan metan gazının dünya atmosferinde giderek artıyor olması çevre sorunları üzerine araştırma yapan bilim adamlarının da ilgisini çekmektedir [60].

Günümüzde ev ısıtmalarında ve enerji üretimlerinde kullanılan doğal gazın içeriğinin en az %90'nı metan gazıdır. Ayrıca biokütlelerden elde edilen yakıtlarda da ısı değeri sağlayan en önemli kısım metandır. Örnek olarak bir biyogaz karışımının ortalama %60'ı metan gazından oluşmaktadır. Saf metan gazının yanma özellikleri Tablo 1.2'de verilmiştir [61].

Tablo 1.2. Metan gaz yanma özellikleri [61]

Yoğunluk	0.718 kg/m <sup>3</sup>	Alev Sıcaklığı	2206 C°
Alt Isıl Değer (m)	50.06 MJ/kg	Laminer Yanma Hızı	54 cm/s
Alt Isıl Değer (v)	35.91 MJ/m <sup>3</sup>	Kimyasal Reaksiyon Süresi	2.10 <sup>-5</sup>
Wobbe İndeksi	48.21 MJ/m <sup>3</sup>	Teorik Hava İhtiyacı	17.35 kg/kg

### 1.5.2. Hidrojen

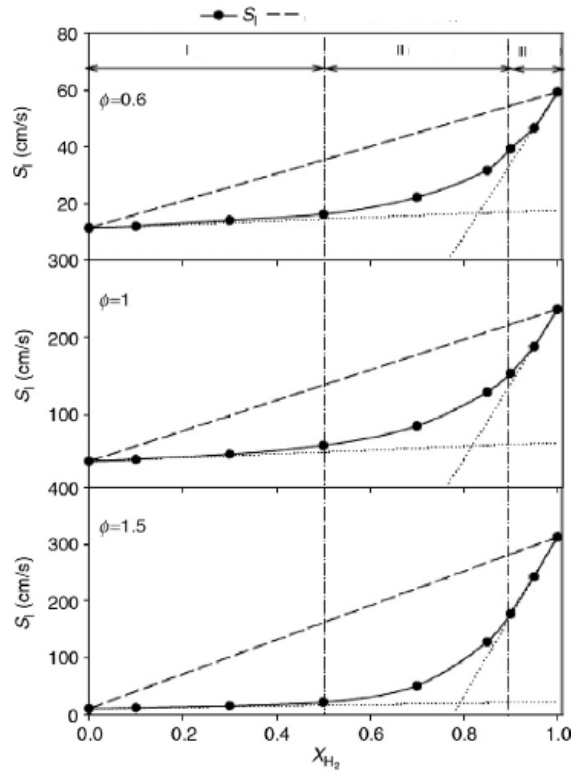
Hidrojen, metan ile kıyaslandığında alev yayılma hızı çok daha yüksek bir gazdır. Bu durum, H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> sisteminin daha hızlı reaksiyona girmesinden kaynaklanmaktadır. Yine bu yakıtın difüzyon katsayısı ve ısının alevden önce taşınması önemli özelliklerinden birisidir. Hidrojenin en önemli özelliklerinden birisi ise stokiyometrik bir yanma işlemi sonrasında oksijen ile birleşerek su oluşturmasıdır. Bu durum sera gazları ile mücadelenin büyük önem kazandığı günümüzde hidrojen yakıtının sıfır emisyon çalışmaları açısından önemini oldukça artırmaktadır. Van Den Schoor et al., yaptıkları çalışmada metan/hidrojen karışımlarının eşdeğerlik oranlarına göre alt ve üst yanma limitlerini tespit etmişlerdir. Tablo 1.3'de bu değerler sunulmuştur [62].

Tablo 1.3. Metan/hidrojen gaz karışımlarının yanma limitleri [62]

Yakıt Karışımı		Yanıcılık Değeri	
CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	Alt Değer	Üst Değer
% 100	% 0	0.438	1.787
% 80	% 20	0.355	1.899
% 60	% 40	0.278	2.128
% 40	% 60	0.218	2.511

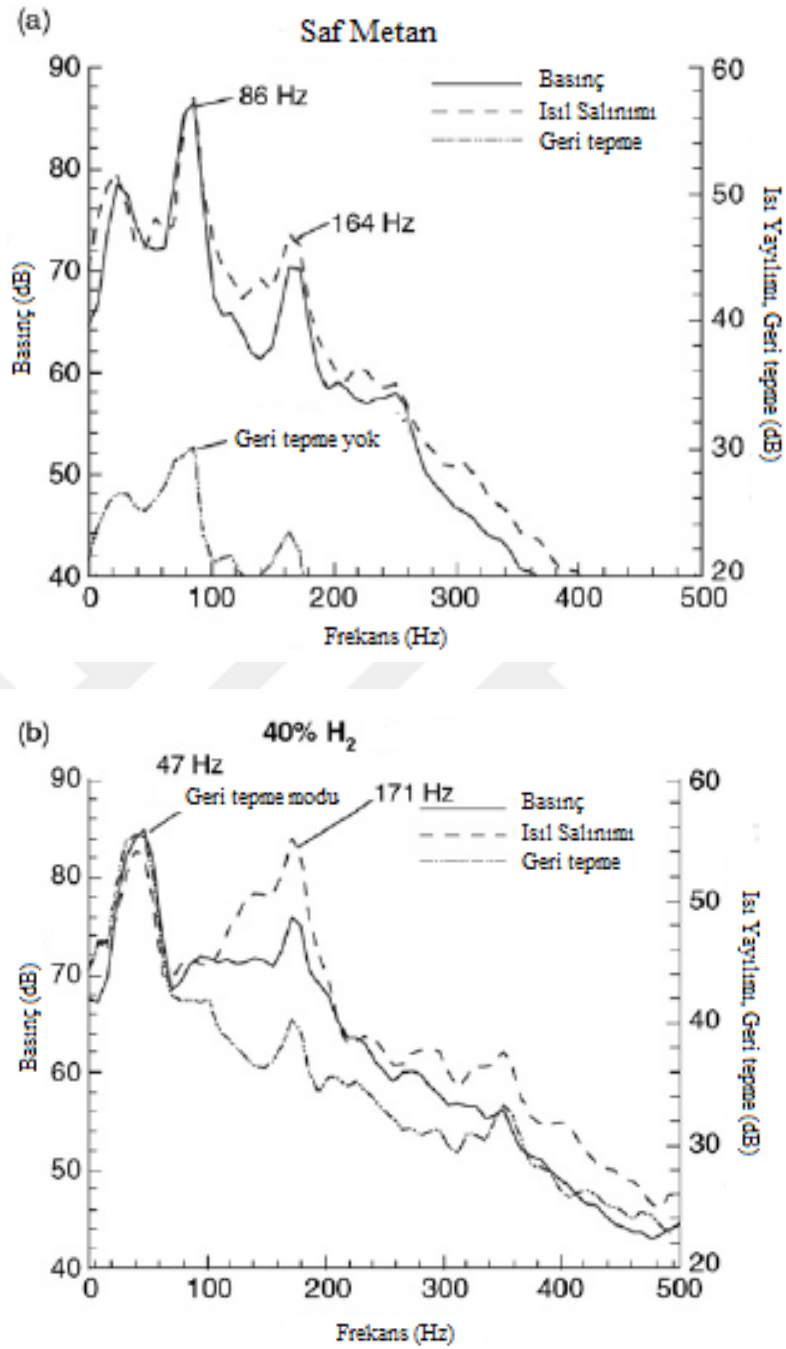
Tablo 1.3’de görüldüğü üzere hidrojen ilavesi araştırmacıların seçtiği yanma şartlarında yanıcılık limitlerini artırmaktadır. Bu değerlere göre yakıt karışımlarının içerisine hidrojen ilave etmek her zaman avantajlı gibi görünerek bizi yanıltabilir. Yakıtların yanmaya olan etkilerini incelerken bütün özelliklerini ve kimyasal etkileşimlerini aynı anda irdelemek gerekmektedir. Bu da farklı yakıcılarda farklı yanma şartlarında karışımların monoton olmayan tepkiler vermesine sebep olmaktadır.

Hidrojen yakıtının bir diğer önemli yanma özelliği de laminer yanma hızıdır. Şekil 1.9’da metan-hidrojen karışımının üç farklı eşdeğerlik oranında laminer yanma hızı değişimleri gösterilmektedir. Şekil 1.9 ayrıntılı incelendiği zaman hidrojen ilavesi neticesinde laminer yanma hızında büyük bir artışın olduğu açıkça ortadadır. Araştırmacılar ortaya çıkan değişim eğrisini artıştaki yükselmeyi dikkate alarak üç farklı bölgeye ayırmışlardır. Yaklaşık %40 oranına kadar hidrojen içerikli bir yakıtın hız değerleri birinci rejim bölgesinde gösterilerek büyük bir artış izlenmemektedir. Buna rağmen karışım içerisindeki hidrojen oranının %50 ve üzerine çıkması durumunda laminer yanma hızı parabolik bir şekilde yükselerek devam etmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere, laminer yanma hızında yaşanan büyük artışlar Markstein uzunluğunu düşürmektedir. Bu durum ise yanma kararsızlıklarının ortaya çıkarak alevin kararlı bir yanma rejimi gösterememesine sebep olmaktadır [52].



Şekil 1.9. Metan/hidrojen karışımının laminer yanma hızı değişimi [52]

Şekil 1.9'dan anlaşılacağı gibi yakıtların içerisine yapılacak olan hidrojen ilavesi belirli yüzdelere kadar olumlu sonuçlar ortaya çıkarsa da özellikle % 40 oranından sonra karışımın yanmama riskini artırmaktadır. Dıştan akustik zorlamalı bir sistemde yanma kararsızlıklarının incelendiği bu çalışmada hidrojenin akustik salınım özellikleri ve geri tepme sinyal genliklerinden de bahsetmek gerekmektedir. Şekil 1.10'da saf metan ve %40 hidrojen içeren metan-hidrojen karışımının basınç ve ısı salınım frekansları gösterilmiştir. Şekillerde görüleceği gibi saf metanın geri tepme sinyal genliği düşüktür, buna rağmen ısı ve basınç salınımlarının 86 Hz ve 164 Hz değerlerinde yoğunlaşmasından ve aynı frekansta geri tepme genliğinin düşük olmasından dolayı alev kararlı bir şekilde yanmaya devam edebilmiştir. %40 hidrojen ilaveli yakıtta bakıldığında ise bütün frekanslarda geri tepme sinyal genliğinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Özellikle 47 Hz ve 171 Hz frekans değerlerinde sinyallerdeki çakışmalar dikkat çekmektedir. Bu bölgelerde alev, ön karıştırıcı içerisinde ileri geri hareket ettikçe ve geri dönüş frekansında ısı yayılım dalgaları ürettikçe ortaya çıkan ısı yayılım dalgaları yanma sisteminin akustik moduyla birleşmektedir. Sistemde yaşanan bu akustik sinyallerin çakışması durumu kararlı yanmayı bozup geri tepme olayının meydana gelmesine sebep olmuştur [43].



Şekil 1.4. Basınç, ısı yayılımı ve geri tepme sinyal genlikleri a) Saf metan,

b) %40 H<sub>2</sub> [43]

Hidrojenin yanma kararlılığını etkileyen temel özelliklerini özetlemek için Tablo 1.4'te bazı değerler sunulmuştur. Tablo 1.4 incelendiği zaman hidrojenin metana göre çok daha hafif bir gaz olduğu anlaşılmaktadır. Bu sebepten dolayı kütsel bazda bakıldığında alt ısıl değeri metana göre çok daha yüksektir. Yine yüksek ısıl değerle beraber alev sıcaklığı değerleri de metandan daha yüksek olarak görülmektedir.

Kararlılığı etkileyen en önemli özelliklerden birisi olan en yüksek laminer yanma hızı ise metaninkinden yaklaşık 14 kat daha büyüktür [61].

Tablo 1.4. Hidrojen gazı yanma özellikleri [61]

Yoğunluk	0.09 kg/m <sup>3</sup>	Alev Sıcaklığı	2376 C°
Alt Isıl Değer (m)	119.97 MJ/kg	Laminer Yanma Hızı	770 cm/s
Alt Isıl Değer (v)	10.78 MJ/m <sup>3</sup>	Kimyasal Reaksiyon Süresi	2.10 <sup>-7</sup>
Wobbe İndeksi	40.09 MJ/m <sup>3</sup>	Teorik Hava İhtiyacı	34.53 kg/kg

### 1.5.3. Karbon monoksit

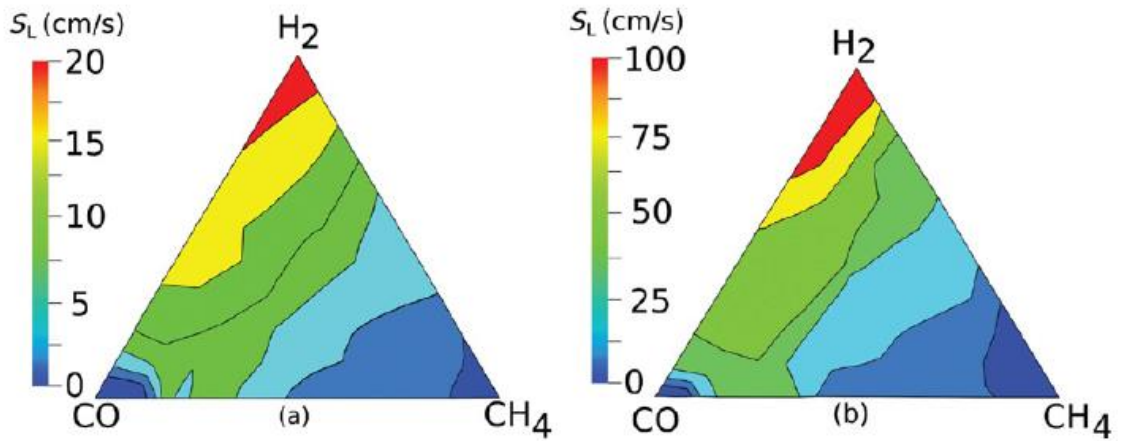
Karbon monoksit renksiz ve kokusuz bir gazdır. Karbon içerikli bir yakıt tamamen yanmadığında ortaya çıkar. Ayrıca eksik yanma ürünü olduğu için halen içerisinde enerji bulundurmaktadır. Bu yüzden yakıt olarak da kullanılabilir. Hem yakıt hem de emisyon kısmında ayrıca incelenecek olan karbon monoksit gazı zehirleyici bir gaz olması sebebiyle insan hayatının söz konusu olduğu yerlerde çok dikkat edilmesi gerekmektedir [63]. Sentetik gaz karışımlarının hidrojen ile beraber temel elemanı olan karbon monoksitin yanma özellikleri Tablo 1.5'te gösterilmiştir. Tablodaki değerler diğer yakıtlarla karşılaştırıldığında, karbon monoksitin minimum kimyasal reaksiyon süresinin ve laminer yanma hızının metan ve hidrojene göre daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca teorik yanma sonucunda karbondioksiti oluşturması için gereken tek oksijen atomu olduğu için teorik hava ihtiyacı ve buna bağlı olarak kütle bazda ısıl değeri düşüktür [61].

Tablo 1.5. Karbonmonoksit gazı yanma özellikleri [61]

Yoğunluk	1.251 kg/m <sup>3</sup>	Alev Sıcaklığı	2370 C°
Alt Isıl Değer (m)	10.1 MJ/kg	Laminer Yanma Hızı	2.7 cm/s
Alt Isıl Değer (v)	12.63 MJ/m <sup>3</sup>	Kimyasal Reaksiyon Süresi	6.10 <sup>-3</sup>
Wobbe İndeksi	12.85 MJ/m <sup>3</sup>	Teorik Hava İhtiyacı	2.49 kg/kg

Şekil 1.11'de, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> ve CO içeren yakıt karışımlarının içeriklerine göre laminer yanma hızı değişimleri gösterilmiştir. Bu şekillerden (a)'da 1500 K°, (b)'de ise 1900 K° adyabatik alev sıcaklığına göre hesaplamalar yapılmıştır. Üçgenlerin uç kısımları gösterdiği yakıtın %100 içerikte yanmasını temsil etmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi

talep edilen adyabatik alev sıcaklığı artırıldıkça ortaya çıkan laminer yanma hızı da artmaktadır. Bu karşılık karışımdaki hidrojen ilavesinin artışı yanma hızını en çok artıran faktör olurken, karbon monoksit değişiminin de laminer yanma hızını etkilediği görülmektedir [52].



Şekil 1.5. Karışım oranlarına göre laminer yanma hızları a) 1500 K , b) 1900 K [52]

#### 1.5.4. Oksijence Zenginleştirmenin Esasları

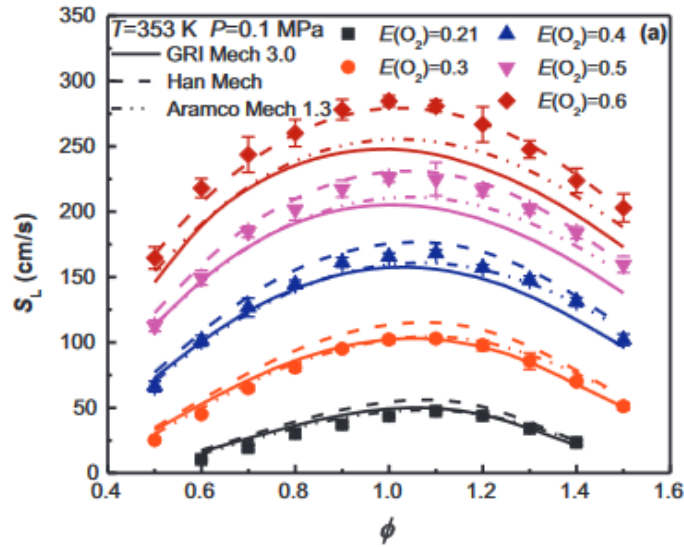
O<sub>2</sub> tüm yakıtların yanmasında oksitleyici olarak kullanılır. Dünya yüzeyinde en bol bulunan element olan oksijen tek başına element olarak var olabildiği gibi başka elementlerle de bileşik halinde olabilir. Yanma süreci için hava içerisindeki oksijen kullanılır, oksijenin bulunmadığı yahut yetersiz olduğu ortamlarda yanma meydana gelmez. Hava içerisinde hacimsel olarak %21 oranında oksijen, argon veya bazı kirletici emisyonlar dışında da %79 oranında azot elementi bulunmaktadır. Teorik bir yanmada oksijenin karbon ve hidrojen atomlarına tutunarak karbondioksit ve suyu oluşturması beklenmektedir. Fazla hava ile yanma işleminde ise fazla oksijen tekrar sistemden atılmaktadır.

Oksijence zenginleştirme işlemi kısaca oksitleyiciye giren hava içerisinde %21 olan oksijen oranını daha yüksek seviyelere çıkarma işlemidir. Bu işlem için öncelikle sisteme gönderilecek olan yakıtın belirlenen bir eşdeğerlik oranında yanması için ne kadar oksijen gerektiği tespit edilmektedir. Bunun ardından sisteme giren toplam oksijen hacmi sabit kalmak koşuluyla normal hava içerisinde %21 olan O<sub>2</sub> oranı artırılır. Sisteme giren oksijen miktarının sabit kalabilmesi için öncelikle hava kısılarak havadan sağlanan oksijen miktarı düşürülmüş olur, bunun yerine ise ilave bir tanktan oksijen temin edilerek kısılan havanın içerisindeki oksijen kadar miktar tamamlanır. Bu sayede

$O_2/N_2 + O_2$  oranı hava şartlarında %21 iken, zenginleştirme şartlarında sisteme giren azot miktarı düştüğü için oksijen miktarı artırılmış olur.

Son yıllarda, oksijence zenginleştirme enerji verimliliğini artırmak için bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Bu yöntem sayesinde baca gazı emisyonu içerisindeki  $CO_2$  miktarı artırılarak karbon yakalama ve depolama sürecine geçiş amaçlanmaktadır. Ortaya çıkan  $CO_2$ 'nin depolanmasının ardından sıfır emisyonla enerji üretiminin gerçekleştirilebilecek olması araştırmacılara umut vermektedir.

Oksijence zenginleştirme işlemi metan içerisine ilave edilen diğer yakıtlar gibi yanma kararsızlığı ve emisyon üzerine etkileri olan bir süreçtir. Laminer yanma hızı, markstein uzunluğu, adyabatik alev sıcaklığı, lewis sayısı gibi faktörler yanma kararsızlığını etkileyen önemli değişkenlerdir. Şekil 1.12'de saf metanın farklı eşdeğerlik oranlarında 0.1 MPa basınçta yakılması durumunda, oksijence zenginleştirmenin laminer yanma hızına etkisi gösterilmektedir. Şekil 1.12'de görüldüğü üzere zenginleştirme seviyesi arttıkça bütün eşdeğerlik oranlarında, laminer yanma hızında büyük bir artış gözlenmiştir. En büyük laminer yanma hızı seviyeleri ise stokiyometrik yanmaya yakın durumlarda ortaya çıkmaktadır [31].

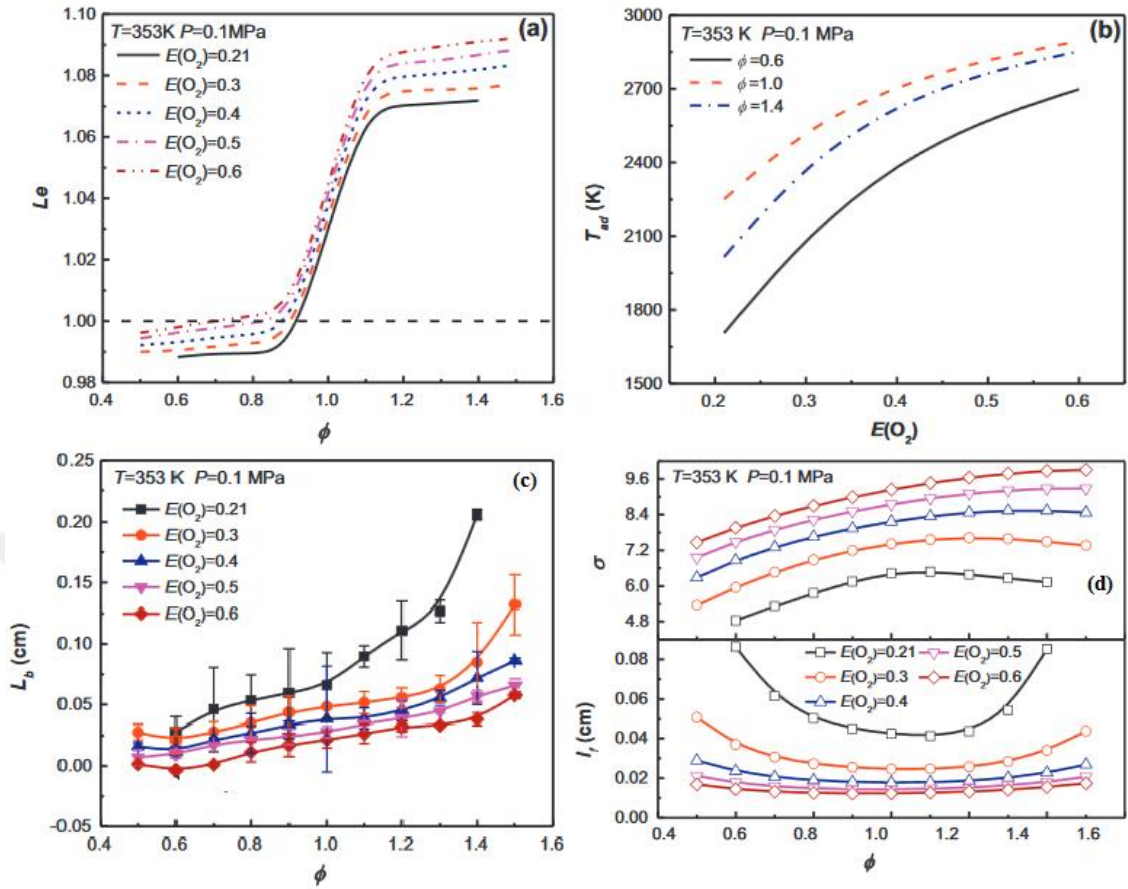


Şekil 1.6. Farklı eşdeğerlik oranlarında laminer yanma hızının oksijence zenginleştirme ile değişimi [31]

Şekil 1.13'de metan yakıtının farklı eşdeğerlik oranlarında oksijence zenginleştirilmesinin a- lewis sayısı, b- adyabatik alev sıcaklığı, c- markstein uzunluğu, d- alev kalınlığına etkisi gösterilmektedir. Bu şekillerde hem eşdeğerlik oranı artışının

hem de oksidizerdeki oksijen oranı artışının lewis sayısını artırdığı görülmektedir. Yine adyabatik alev sıcaklığı da parabolik olarak artış göstermektedir. Laminer yanma hızı ve lewis sayısında meydana gelen artış ile beraber markstein uzunluğunda azalma olduğu görülebilmektedir. Ayrıca eşdeğerlik oranındaki artışın da markstein uzunluğunu artırdığı aynı şekillerden anlaşılmaktadır. Bu durum daha yüksek eşdeğerlik oranlarında oksijence zenginleştirilme yeteneğinin arttığını, eşdeğerlik oranı artışı ve oksijence zenginleştirmenin markstein uzunluğunun değişimini ters yönde etkilediklerini göstermektedir. Yine hava ile yanma şartlarında eşdeğerlik oranında yaşanan artış markstein uzunluğunun artış oranını yükseltmiştir. Son olarak Şekil 1.13’de alev kalınlığı incelendiği zaman oksidizerdeki oksijen oranında yaşanan artışla beraber alev kalınlığının azaldığı, eşdeğerlik oranında stokiyometrik orandan uzaklaşıldıkça ise alev kalınlığının arttığı anlaşılmaktadır [31]. Bütün değerler ortak olarak değerlendirildiği zaman, oksijence zenginleştirme düşük oranlarda yapıldığında adyabatik alev sıcaklığında ve laminer yanma hızında meydana getirdiği artış ile beraber verimlilik ve kararlılığı artırmasına rağmen, yüksek oranlardaki zenginleştirmelerde lewis sayısı ve markstein uzunluğunun bileşik etkisinden dolayı kararsızlıklar artmaktadır. Ayrıca, oksijence zenginleştirme sonucu artan adyabatik alev sıcaklığı da termal  $NO_x$  oluşumunu artırmaktadır [64].





Şekil 1.7. Metan'ın farklı eşdeğerlik oranlarında oksijence zenginleştirilerek yakılması sonucunda yanma özelliklerindeki değişim. a) Lewis sayısı b) Adyabatik alev sıcaklığı c) Markstein uzunluğu d) Alev kalınlığı [63]

## 1.6. Baca Gazı Emisyonları

Tez çalışmasının önemli bir bölümünü oluşturan baca gazı emisyon değerleri, günümüzde enerji alanında araştırmalar yapan bilim adamları kadar çevre sorunları üzerine çalışanları da ilgilendirmektedir. Bu emisyonlar insan sağlığı için doğrudan zararlı olabileceği gibi dolaylı olarak da küresel ısınma ve diğer canlı türlerinin zarar görmesi neticesinde de insan yaşamını etkilemektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda gaz türbin yakıcılarında ve diğer enerji üretimi yapılan çevrimlerde emisyon değerlerini azaltmak için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Emisyon ölçüm cihazları ile düzenli olarak kaydedilen değerler sayesinde yanma verimliliği de hesaplanabilmektedir. Bunun için sisteme giren yakıt içerisindeki karbon kütlesi ile çıktındaki karbondioksit kütlesini kıyaslamak bir çözüm olabilir. Girişte yakıtta bulunan karbonlar, yanma sonunda ne kadar çok karbondioksite dönüşürse, o kadar verimli bir yanmanın olacağı genel olarak ifade edilebilir.

### 1.6.1. Karbondioksit

Gaz türbin yakıcılarında sıklıkla karşılaşılan emisyonları incelendiğinde en önemlisi karbondioksit emisyonudur. Karbondioksiti diğer emisyonlardan daha önemli görmemizin öncelikli sebebi şunlardır. Diğer emisyonlar kadar doğrudan zehirleyici olmamasına rağmen sera gazı etkisi ile beraber küresel ısınmanın temel sebebi olarak CO<sub>2</sub> emisyonları görülmektedir. Buna rağmen, yine diğer emisyonlardan farklı olarak CO<sub>2</sub> emisyonu bir hidrokarbonun teorik yanması neticesinde mutlaka açığa çıkan yanma sonu ürünü olmasıdır. Bir yanma işleminin temel amacı karbonları CO<sub>2</sub>'ye dönüştürerek enerji kazanımı elde etmek olduğu için CO<sub>2</sub>'nin karbon içerikli bir yakıt kullanıldığında yanma sonunda mutlaka farklı miktarlarda açığa çıkacağı bilinmektedir.

Karbondioksit emisyonunun bu öneminden dolayı son yıllarda sera gazı etkisine karşı mücadele edebilmek için bu sorunun çözümü noktasında önemli araştırmalar ortaya çıkmıştır. Bu çalışmalardan bir kısmı kütleli olarak ısıl değeri de yüksek olan hidrojeni yakıt karışımları içerisine katarak, CO<sub>2</sub> emisyonlarını düşürmeyi amaçlamaktadır. Hidrojen yakıtının hava ile yanması sonucunda ortaya zararsız olan H<sub>2</sub>O (su) çıkmaktadır. Bu durum karbon emisyonları ile mücadele konusunda araştırmacılara umut olmaktadır. Yakıt karışımlarının hidrojen ile zenginleştirmenin dışında sunulan çalışmanın da konusunu oluşturan oksijence zenginleştirme işlemi CO<sub>2</sub> emisyonlarının depolanarak çevreye atılmasını tamamen engelleme amacı taşımaktadır.

Uluslararası alanda Avrupa Birliği, Horizon 2020 kapsamında, karbon yakalama ve depolama projelerini desteklemektedir. Bu sistem oksijence zenginleştirilmiş bir yanmada sisteme giren azot miktarını azaltarak yanma sonu emisyonlarında CO<sub>2</sub> oranını artırmayı hedeflemektedir. Özellikle oksiyakıt yanması teknolojisinde hava yerine, yakıt saf oksijenle yakılmakta ve sisteme azot girmediği için teoride emisyon olarak sadece CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O çıkmaktadır. Bu durumda baca gazlarından sisteme bir geri besleme yolu yapılmakta ve karbondioksitin bir kısmı azot yerine seyreltici gaz olarak sisteme verilmektedir. Sonuç olarak, baca gazında tek zararlı emisyon CO<sub>2</sub> kaldığı için bunun da yakalanıp depolanma ve bu sayede sıfır emisyon ile enerji üretimi sağlama süreci ortaya çıkmaktadır. Yine oksijence zenginleştirilerek yakma işlemi de emisyonlar içerisinde CO<sub>2</sub> oranı yükselttilerek bunun yakalanıp depolanması hedeflenmektedir [65].

### 1.6.2. Karbonmonoksit

Eksik yanma sonucu ortaya çıkan bu emisyon zehirleyici bir gaz olarak bilinmektedir. Bir reaksiyonun tamamlanması için gerekli olan oksijenin bulunmaması durumunda ortaya çıkmaktadır. Yanma esnasında diğer bir oluşum mekanizması CO<sub>2</sub> ayrışmasıdır. Bu emisyon genellikle çok düşük yakıt/hava oranlarında veya bazı bölgelerde yakıt ve havanın yetersiz karışması durumlarında artış gösterir. CO emisyonları ön karışım mekanizmaları ile azaltılabilirken, yine hidrojen ilaveli yakıt karışımları ile de tamamen yok edilmesi için çalışmalar sürdürülmektedir. Bir yakıcı sisteminde CO emisyonunun yüksek olması o sistemin verimli bir yanma gerçekleştirilmediğini ve yakıt israfının bulunduğuna işaret etmektedir [51].

### 1.6.3. NO<sub>x</sub> Emisyonları

Gaz türbin yakıcıları başta olmak üzere yüksek sıcaklıklarda yanma işlemlerinin gerçekleştirildiği yakıcıların başlıca sorunlarından birisi NO<sub>x</sub> emisyonlarıdır. Bunlar NO ve NO<sub>2</sub> olmak üzere ikiye ayrılırken, yanmanın sonucunda NO olarak çıkan emisyon daha sonradan NO<sub>2</sub>'ye oksitlendiği için topluca NO<sub>x</sub> emisyonları olarak adlandırılır. Azot oksit emisyonlarının üç farklı oluşum mekanizması vardır.

NO<sub>x</sub> oluşum mekanizmalarından ilki, termal NO<sub>x</sub> ismiyle bilinen ve yüksek adyabatik alev sıcaklıkların tetiklediği bir mekanizmadır. Bu işlem ısı alan bir mekanizmaya sahiptir ve 1850 K° sıcaklıkta azotun oksidasyonu ile ortaya çıkar. Termal NO<sub>x</sub> özellikle oksijence zenginleştirme sonucunda adyabatik alev sıcaklığının artması ile beraber katlanarak artabilmektedir [64].

Diğer bir mekanizma ise ani-NO<sub>x</sub> oluşumudur. Bu mekanizma sıcaklık etkisinden dolayı ortaya çıkan NO<sub>x</sub>'e zıt olarak düşük sıcaklıklarda da meydana gelir. Genellikle zengin yakıt karışımlarında, yakıt-hava karışımı içerisindeki azot miktarının çok yüksek ya da çok düşük olması durumunda görülür. Oksijence zenginleştirme sürecinde de hava kısılarak yerine tanktan oksijen ilave edildiği için azot miktarı azalmaktadır. Bu azalmadan dolayı oksijence zenginleştirilmiş yanmada sık görülmektedir [65].

Son NO<sub>x</sub> oluşum mekanizması ise yakıt-NO<sub>x</sub>'tir. Doğadaki fosil yakıtların organik bileşenleri içerisinde azot bulunmaktadır, bu azot varlığı oksidasyona uğrayarak yanma sonunda emisyon olarak çıkmaktadır. Özellikle bazı sentez gaz karışımlarında azot

miktarları yüksek olabilmektedir. Yakıt-NO<sub>x</sub>'in oluşum seviyesi yakıt karışımının içerisindeki azot miktarına bağlı olarak artmaktadır [65].



## 2. BÖLÜM

### DENEY SİSTEMİ

#### 2.1. Deney Sistemi Ekipmanları

Bu bölümde, sunulan çalışmada kullanılan deney sistemi ve ekipmanları ile ilgili bilgiler verilmektedir.

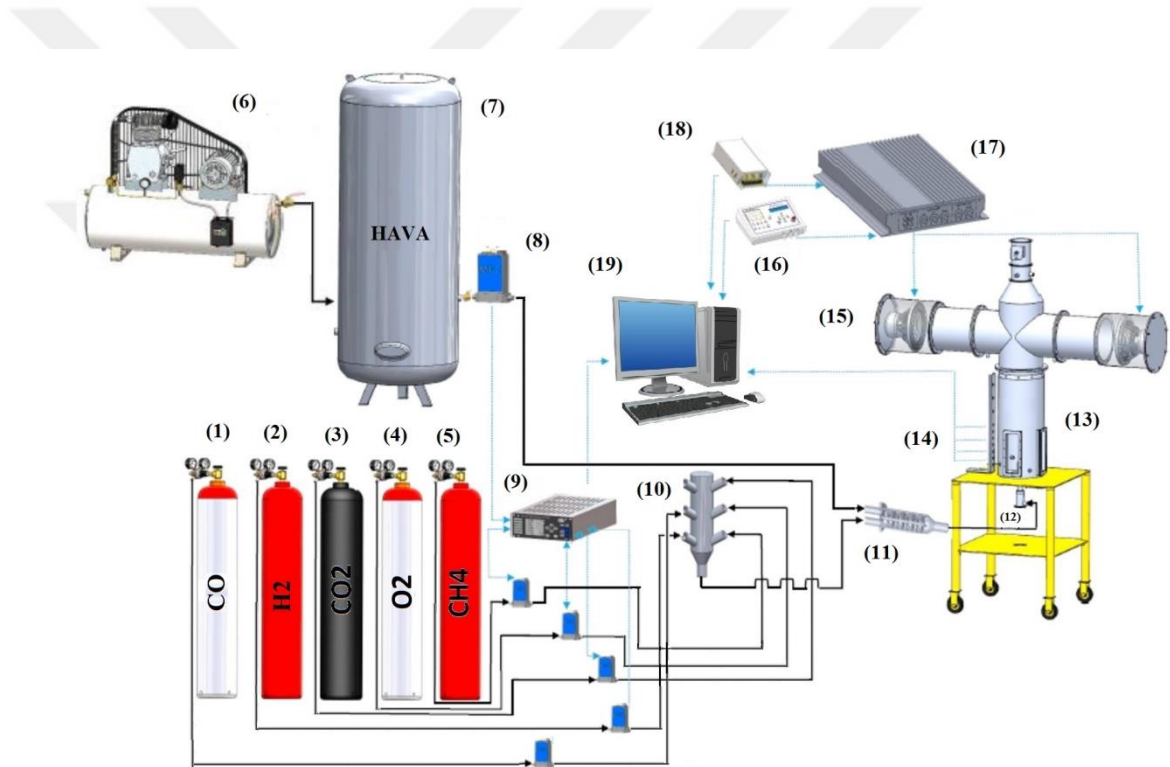
##### 2.1.1. Deney Sistemi Tanıtımı

DeneySEL çalışmanın yürütüldüğü yanma laboratuvarı Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Deneylerde kullanılan gaz yakıtlar tüplerden tedarik edilmektedir. H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> yakıt, CO<sub>2</sub> ise seyreltici olarak kullanılmıştır. Oksijence zenginleştirme işlemi için harici olarak tedarik edilen oksijen tankı deneylerde kullanılır. Oksijen tankı ile yakıt içeren diğer tanklar arasında patlama önleme amacıyla belirli bir mesafe bırakılmıştır. Bu tüplerden çıkan gaz hatları öncelikle kütle akış kontrolcülerine gelmektedir. Kütle akış kontrolcülerini ise (8) numaralı olarak görülen vakum sistemi kontrolcüsüne bağlıdır. Stokiyometrik yanma denklemi baz alınarak, istenilen ısı gücü yakalamak için yanma odasına gönderilmesi gereken gaz hacimleri belirlenmiştir. Belirlenen gaz hacimleri vakum sistem kontrolcüsüne elle girilmekte ve bu sayede kendisine bağlı olan kütle akış kontrolcülerini, tanktaki yakıtların deney sistemine giriş miktarını anlık olarak düzenlemektedir.

Kütle akış kontrolcülerinden çıkan gazlar (10) numara ile gösterilen kollektörde toplanmaktadır. Yakıt ve seyrelticiler bu şekilde yol izlerken, hava (6) numara ile gösterilen kompresör ile kütle akış kontrolcüsü sayesinde belirlenen sabit bir hacimde sisteme gönderilmektedir. Kompresörün çalışması esnasında düzenli bir hava akışını yanma akustik odasına sağlamak için bir hava tankı kullanılmıştır. Kollektörden çıkan gaz karışımı ve kompresörden gelen hava (11) numaralı karıştırıcıda karışmaktadır. Bu eleman yakıt ve havanın ön karışımını temin etmektedir. Ön karıştırıcıdan çıkan yakıt/hava karışımı (12) numara ile gösterilen brülöre girerek yanmaktadır. Yanma işlemi (13) numaralı yanma odasında meydana gelmektedir. Yanma odasının değişik

kısımlarına yerleştirilen ölçüm ekipmanları ile basınç, sıcaklık ve ışık şiddeti değerleri anlık olarak ölçülüp bilgisayara aktarılmaktadır.

Yanma akustik odanın diğer bir özelliği ise dıştan akustik zorlama altında yanma kararsızlıklarının ölçülebilmesidir. Akustik zorlamanın yapılabilmesi için gereken frekans (16) numaralı sinyal jeneratörü ile üretilerek yükseltici (17) ile güçlendirilmekte ve yanma odasının sağ ve sol kollarında bulunan (15) numaralı hoparlörler vasıtasıyla sisteme verilmektedir. Zorlama frekansları altında yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkan veriler bilgisayarda düzenli olarak takip edilebilmektedir.



Şekil 8 Deney sisteminin şematik gösterimi

Şekil 2.1’de gösterilen deney sistemindeki elemanlar aşağıda açıklanmıştır.

- |                          |                                   |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 1. CO Tankı              | 11. Ön Karıştırıcı                |
| 2. H <sub>2</sub> Tankı  | 12. Yakıcı                        |
| 3. CO <sub>2</sub> Tankı | 13. Yanma Odası                   |
| 4. O <sub>2</sub> Tankı  | 14. Piezorezistif Basınç Ölçerler |
| 5. CH <sub>4</sub> Tankı | 15. Hoparlörler                   |
| 6. Kompresör             | 16. Sinyal Jeneratörü             |
| 7. Hava Tankı            | 17. Ses Gücü Yükseltici           |

- |                             |                |
|-----------------------------|----------------|
| 8. Kütle Akış Kontrolcüsü   | 18. Osiloskop  |
| 9. Vakum Sistem Kontrolcüsü | 19. Bilgisayar |
| 10. Kollektör               |                |

Şekil 2.2’de deney sisteminin ön görünümü verilmiştir. Deney dışında, diğer tanklardaki yakıtlar ve oksijenin birleşerek tepkimeye girip patlama oluşturmaması için O<sub>2</sub> deney sisteminin bulunduğu yerde muhafaza edilmiştir.



Şekil 2.2. Deney sistemi ön görünüşü

### 2.1.2. Hava Tedarik Sistemi

Hava tedarik sistemini oluşturan ekipmanlar bu kısımda açıklanmıştır.

#### 2.1.2.1. Hava Kompresörü

Standart bir yanma işleminde yakıtın alev olarak ısı açığa çıkarabilmesi için temel gerekliliklerden birisi havadır. Yanma deneyi düzeneğimizde hava, bir kompresör vasıtasıyla sisteme aktarılmaktadır. Bu kompresör gücünü üç fazlı elektrik motorundan almaktadır. 650 lt/dk emiş kapasitesine ve 4 kW güce sahiptir. Kompresörün mevcut sistemi maksimum besleyebilme kapasitesi 0,65 m<sup>3</sup>/dk’dır. Bu da deneyler için gereken havayı fazlasıyla karşılayabilmektedir. Şekil 2.3’te gösterilen kompresörün harici hava tankı dışında stabil bir hava temini için 500 lt hacminde bir tanka sahiptir.



Şekil 2.3. Hava kompresörü ve tankı

#### 2.1.2.2. Harici Hava Tankı

Kompresörün dahili olan tankına ilave olarak 1000 lt hacminde harici bir hava tank, deney sisteminde bulunmaktadır. Şekil 2.4'te gösterilen bu tankın amacı deneyler süresince kompresörün arızalanması, gerekli stabil hava temini gibi durumlarda deney sistemine hava teminini aksatmamak için kullanılır. Ayrıca deneylerin yapılışı sırasında kompresörün çalışmasından dolayı aşırı gürültünün deney odasına gelmemesi için ayrı bir dış mekana kompresör ve tankı için özel bir kabin yerleştirilmiştir. Hava bu kabin içerisinden çıkan borularla sisteme tedarik edilmektedir.





Şekil 2.4. Harici hava tankı

Şekil 2.4'te gösterilen harici hava tankı üzerinde bulunan basınç göstergesi sayesinde içeride bulunan havanın basıncını görüp kontrol altında tutma imkanı bulunmaktadır. Kazaların önlenmesi amacıyla tankın üzerinde hava tahliye sistemi bulunmaktadır, bu sayede basınç emniyetli seviyenin üzerine çıktığında fazla hava dışarı atılabilmektedir.



Şekil 2.5. Kompresör ve harici tank kabini

### 2.1.2.3. Hava Filtresi ve Regülatörü

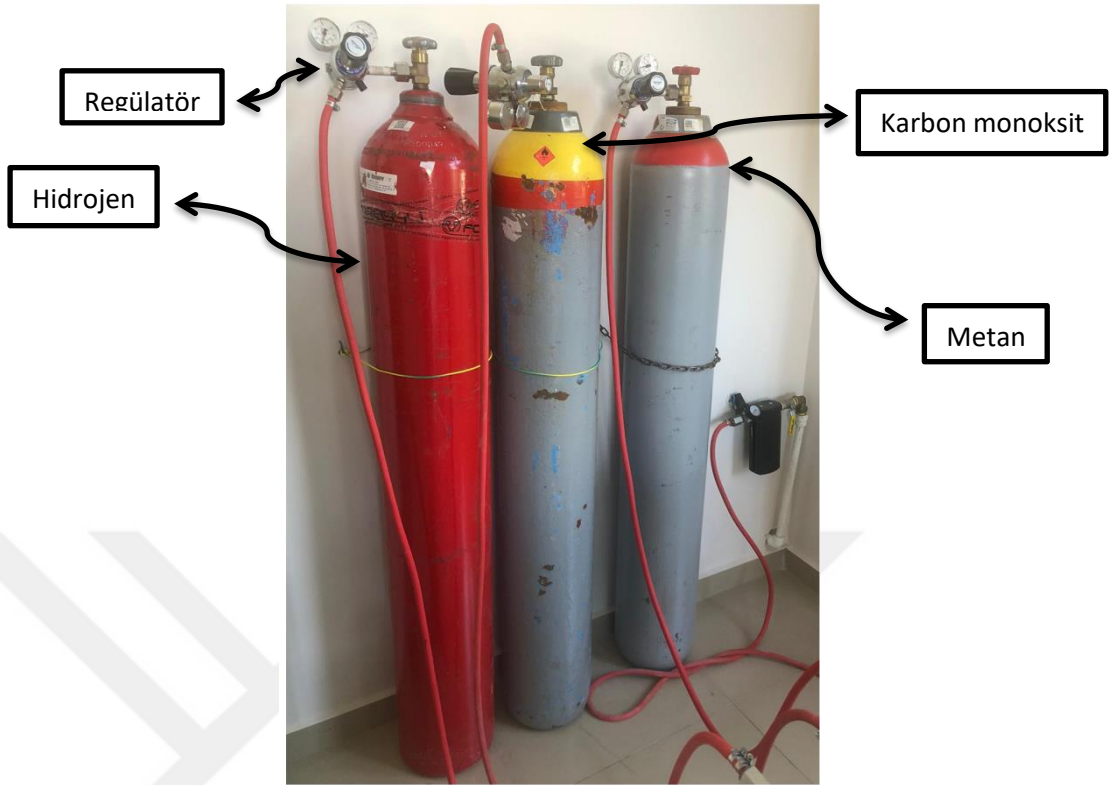
Tedarik edilen hava, kütle akış kontrolcüsüne girmeden önce tedarik hattının sonunda bir hava filtesi ve basınç regülatörü bulunmaktadır. Şekil 2.6'da gösterilen filtre sayesinde atmosfer ortamından tedarik edilen hava içerisindeki sistemi bozabilecek kir ve yağ gibi zararlı maddeler atılabilmektedir. Aynı zamanda filtre çıkışındaki regülatör, tanktan yaklaşık 10 bar basınçta gelen havayı 3 bara düşürerek kütle akış kontrolcülerinin zarar görmesini engellemektedir.



Şekil 2.6. Hava filtresi ve regülatörü

### 2.1.3. Yakıt Tedarik Sistemi

Yanma kararsızlığı deneylerinde metan ve diğer gaz yakıtlar karıştırılarak yanma akustik odasına gönderilmiştir. Bu yakıtların oksijence zenginleştirme altındaki kararsızlıkları incelenmiştir. Bu amaçla kullanılan gaz yakıt tankları Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Oksijen tüpü Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8. Yakıt tankları ve basınç regülatörleri

Metan gazının bulunduğu tank 50 Litre hacminde silindirik bir tüptür ve 200 bar basınçta  $12,6 \text{ m}^3$  gaz içermektedir. Bu tüpteki metan gazı %99,5 saflıktadır. Hidrojen gazı yine 50 Litre hacmindeki bir tüpte 200 bar basınçta  $8,35 \text{ m}^3$  içerikte bulunmaktadır. CO gazı, %99,99 saflıkta 40 Litre hacmindeki silindirik bir tankta bulunmaktadır. 200 bar basınçta  $7,8 \text{ m}^3$  yakıt içermektedir. Seyreltici olarak kullanılan  $\text{CO}_2$  gazı, %99,9 saflıkta 50 bar basınçta 35 kg içeriğe sahip bir tankta bulunmakta ve bu tanktan sisteme gaz temin edilmektedir. Son olarak oksijence zenginleştirme işleminin gerçekleştirilebilmesi için gereken ilave oksijen tankı da 230 bar basınç altında  $12,05 \text{ m}^3$  içerikteki tanklarda bulunmaktadır.



Şekil 2.9. Oksijen tankı

#### 2.1.4. Kütle Akış Kontrolcüleri

Tez çalışması boyunca farklı yakıt kompozisyonlarının oluşturulabilmesi için brülöre girecek olan yakıtın hacimsel olarak miktarını belirleyebilen kütle akış kontrolcüleri kullanılmıştır. Şekil 2.9'da kütle akış kontrolcüsünün de içerisinde bulunduğu gaz akış hatları gösterilmektedir. Yakıt tanklarından çıkan gazların, öncelikle regülatör vasıtasıyla basınçları 1,5 bar altına düşürülmektedir.



Şekil 2.9. Gaz akış hatları

Basıncı düşürülen gazlar Şekil 2.10'da gösterilen kütle akış kontrolcülerinden geçtikten sonra monometreler ve şamandıralı debimetreleri takip ederek kollektöre ilerlemektedir.



Şekil 2.10. Kütle akış kontrolcüsü

Yakıt hatlarında kullanılan kütle akış kontrolcüleri 600 ile 30000 sccm arası bir hacimsel debide gaz temini sağlayabilmektedir. Ayrıca hava tedarik hattında bulunan kütle akış kontrolcüsü ise 300 slm (standart litre) hacimsel debiye kadar hava miktarını sisteme aktarabilmektedir. Teorik bir yanmada yakıtları için gerekli hava miktarının, yakıtlara oranla hacimsel olarak çok daha yüksek olması sebebiyle hava tedarik hattı üzerindeki kütle akış kontrolcüsü daha yüksek debilerde akış sağlayabilen özelliklerde seçilmiştir. Şekil 2.11'de kütle akış kontrolcüleri tarafından yakıcıya sağlanacak olan

gazların ayarlanabildiği vakum sistem kontrolcüsü bulunmaktadır. Bu kontrolcü 6 farklı gaza kadar akış kontrol desteği sağlayabilmektedir. Kontrolcü üzerinde bulunan ayar tuşları ile gazların yoğunluklarına göre düzeltme faktörleri girilerek, hesaplanan hacimsel debiler kaydedilmekte ve bu sayede deney sürecinde istenilen debilerde hassas bir gaz temini yanma sistemine sağlanmaktadır.



Şekil 2.11. Vakum sistem kontrolcüsü

Tablo 2.1’de deneylerde kullanılan gazların yoğunluk ve düzeltme faktörü değerleri verilmektedir. Düzeltme faktörü farklı gaz tiplerinin yoğunluklarına göre hacimsel olarak akış hızlarını belirlemek için kullanılan bir değerdir. Bu değer kütle akış kontrolcüsünün üretici firması tarafından Azot gazına göre kalibre edilmiş ve  $N_2 = 1$  olarak kabul edilmiştir [66].

Tablo 2.1. Deneylerde kullanılan gazların yoğunluk ve düzeltme faktörü değerleri [66]

Gaz	Yoğunluk (g/L)	Düzeltilme Faktörü (k)
Metan	0.718	0.72
Hidrojen	0.09	1.01
Karbon Monoksit	1.251	1
Karbon Dioksit	1.964	0.70
Hava	1.293	1
Oksijen	1.427	0.993

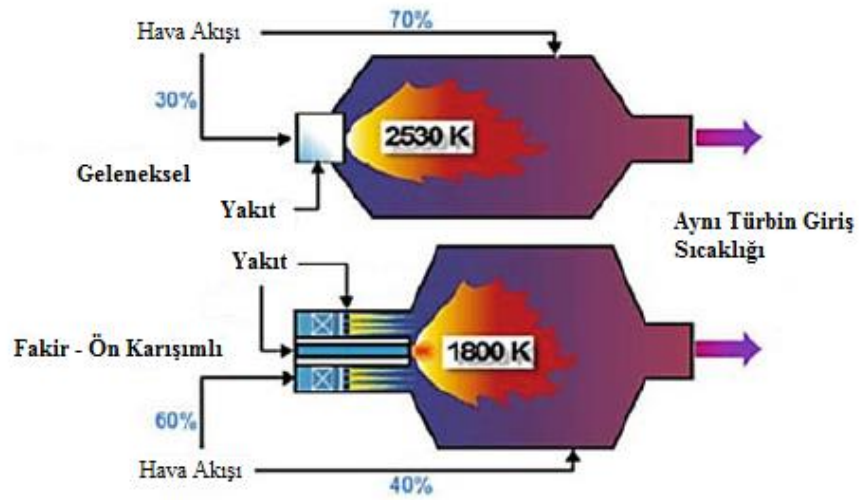
Yakıtlar, seyrelticiler ve oksijen kütle akış kontrolcülerinden hesaplanan debilerde geçtikten sonra Şekil 2.12’de gösterilen yakıt kollektörüne giriş yapmakta ve burada hava ile karışmadan önce kendi içerisinde karışmaktadır.



Şekil 2.12. Yakıt kollektörü

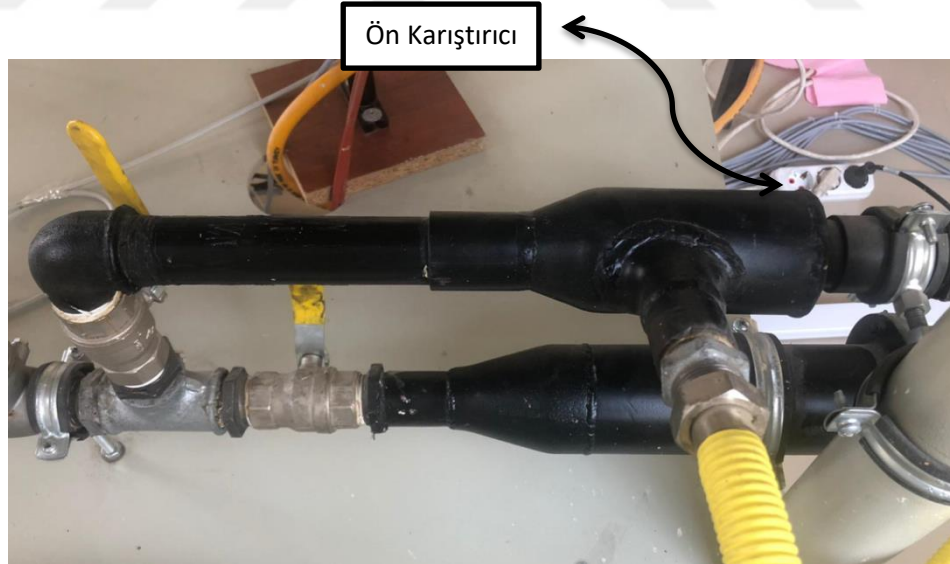
### 2.1.5. Ön Karıştırıcı

Yanma sistemlerinde ön karışimsız ve ön karışimli olmak üzere iki farklı yakıcı tipi bulunmaktadır. Ön karıştırıcı mekanizması brülöre girmeden önce yakıt ve havanın bir noktada birleşerek homojen bir şekilde karışmasını ve karışım halinde yanma akustik odasına girmesini sağlamaktadır. Şekil 2.13’de geleneksel yanma mekanizması ile fakir yakıt/hava oranına sahip ön karışimli bir yakıcının şematik gösterimi karşılaştırılmıştır. Geleneksel yanmada adyabatik alev sıcaklığı daha yüksek seviyelere çıkmasından dolayı yakıcı duvarlarındaki dinamik basınç dalgalanmaları büyümekte ve yanma kararsızlıklarına sebep olmaktadır. Ön karışimli yanmada ise adyabatik alev sıcaklığı daha düşük tutularak kararsızlıklara neden olan dinamik basınç dalgalanmaları engellenmektedir. Daha düşük adyabatik alev sıcaklığına rağmen yanma odası çıkışındaki türbine giriş sıcaklığı ise iki yanma mekanizmasında da aynı olmaktadır [67].



Şekil 2.13. Geleneksel yanma ve ön karışimli yanmanın karşılaştırması [67]

Şekil 2.14'te deneylerde kullanılan ön-karıştırıcı gösterilmektedir. Ön karıştırıcıya kollektörden gelen gazlar ve kompresörden tedarik edilen hava farklı hatlardan gelmekte ve burada sabit kanatçıklı ve delikli diskler vasıtasıyla homojen bir karışım sağlanmaktadır.



Şekil 2.14. Ön karıştırıcı

### 2.1.6. Girdap Destekli Yakıcı

Ön karışimli yanma deney düzeneğimizin çıkışını yanma işleminin meydana geldiği brülör oluşturmaktadır. Şekil 2.15.'te gösterilen, deneylerde kullanılan yakıcı maksimum 10 kW ısı güce sahip ve yüksek sıcaklıklara dayanabilecek özelliklerdedir.



Birçok yakıcı gibi saf metanı kararlı bir şekilde yakabilme özelliğine sahip olmakla beraber, sentetik gaz ve biyogaz karışımlarının içerisinde bulunan CO ve H<sub>2</sub> gaz yakıtlarını da farklı çalışma aralıklarında kararlı bir şekilde yakabilmektedir. Farklı yoğunluk ve ısıl değerlere sahip bu gaz yakıtların kararlı bir şekilde yanabilmesi için Yılmaz et al., termo-akustik yanma deneyi sistemlerinde kullanılan yakıcılardan yararlanarak yeni bir brülör imal ettirmişlerdir [48]. Bu tez çalışmasında bütün yanma deneyleri, yakıcı gücü olarak sabit 3 kW değerinde yapılmıştır.



Şekil 2.15. Brülör

Yakıcının bir diğer özelliği de çıkışında bulunan bir yuva sayesinde farklı girdap sayılarında girdap üreteçleri tarafından desteklenebilmesidir. Girdap üreteçleri kolayca sökülüp takılabilir şekilde imal edilmiştir. Namlu ucundaki üreteç çıkarılabilir veya farklı girdap sayıları, çap oranları ve kanatçık açılarındaki üreteçlerle değiştirilebilir. Bu sayede girdap üretici değişiminin yanma ve emisyon performansına etkisi de incelenebilmektedir. Şekil. 2.16.'da farklı girdap sayılarına sahip üreteçler gösterilmektedir.

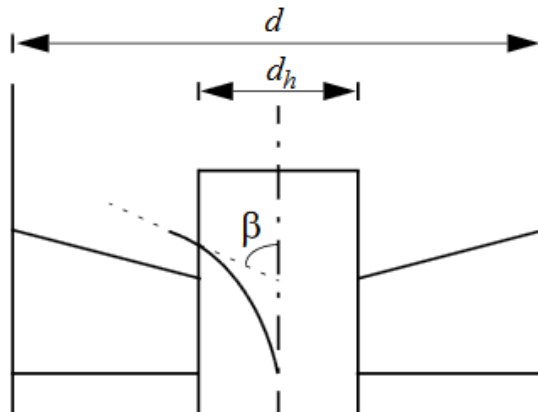


Şekil 2.16. Girdap üreticileri

Ön karışımli yanma mekanizmalarında ortaya çıkabilecek olan yanma kararsızlıklarının azaltılması ve yakıt/hava karışımının daha homojen hale gelerek yanması için girdap üreticileri kullanılmaktadır [68]. Girdap sayılarının hesaplanması için en sık kullanılan ifade Denklem 2.1’de sunulmuştur. Denklem 2.1’de bulunan  $d$ : dış çapı,  $d_h$ : iç çapı,  $\beta$ : kanatçıkların açısını temsil etmektedir. [69]. Deneyleerde kullanılan girdap üreticinin  $d_h/d$  oranı 0,5, kanatçık açıları ise  $52,12^\circ$  olarak sabit tutulmuştur. Denklem 2.1.deki hesaplamaya göre girdap sayısı tüm deneyleerde 1 olarak kullanılmıştır.

$$S = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^2} \right) \cdot \tan\beta \quad \text{Denklem 2.1}$$

Şekil 2.17’de girdap üreticinin ölçülendirme kriterleri gösterilmiştir.

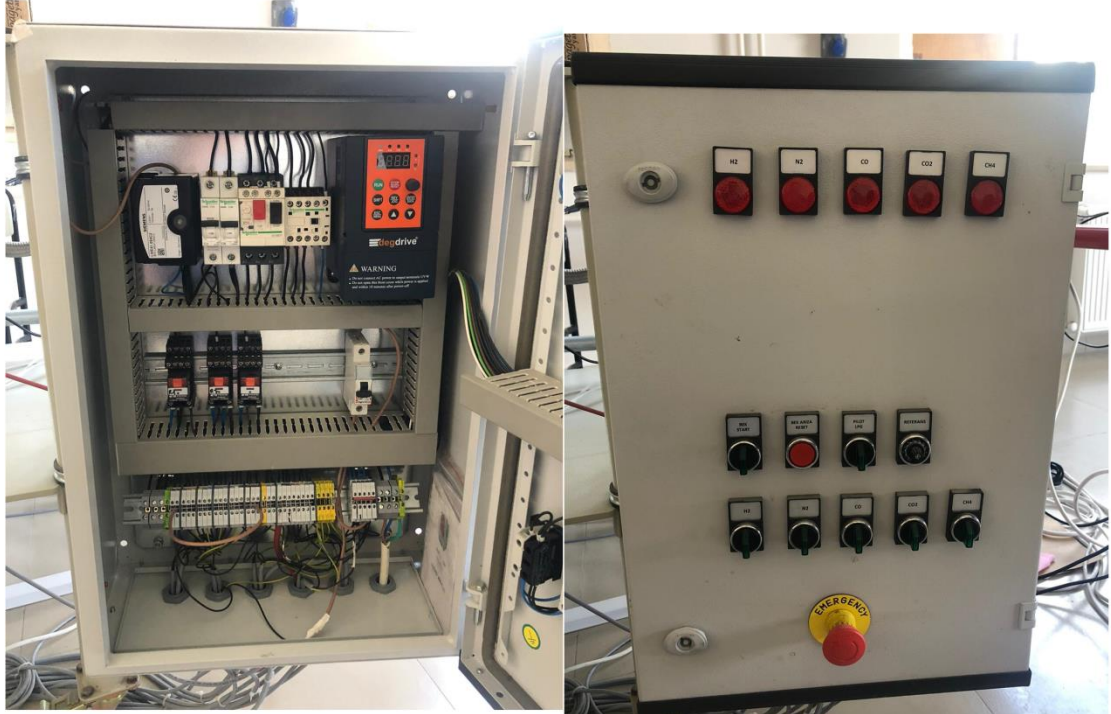


Şekil 2.17. Girdap üretici ölçülendirme kriterleri [69]

### 2.1.7. Yakıcı Ateşleme Sistemi

Yakıcının ilk ateşlemesinin yapılabilmesi ve hatlardan beslenen gaz geçişlerinin sağlanabilmesi için yanma odası yanında ayrı bir kontrol panosu oluşturulmuştur. Şekil 2.18’de iç ve dış kısmı gösterilen bu panel sayesinde otomatik olarak ateşleme

sağlanmaktadır. Ayrıca panel içerisinde iyonizasyon çubuğu, yanma odası etrafındaki soğutucular ve gaz besleme hatlarını da kontrol edebilen ekipmanlar bulunmaktadır.



Şekil 2.18. Kontrol paneli iç ve dış görünüşü

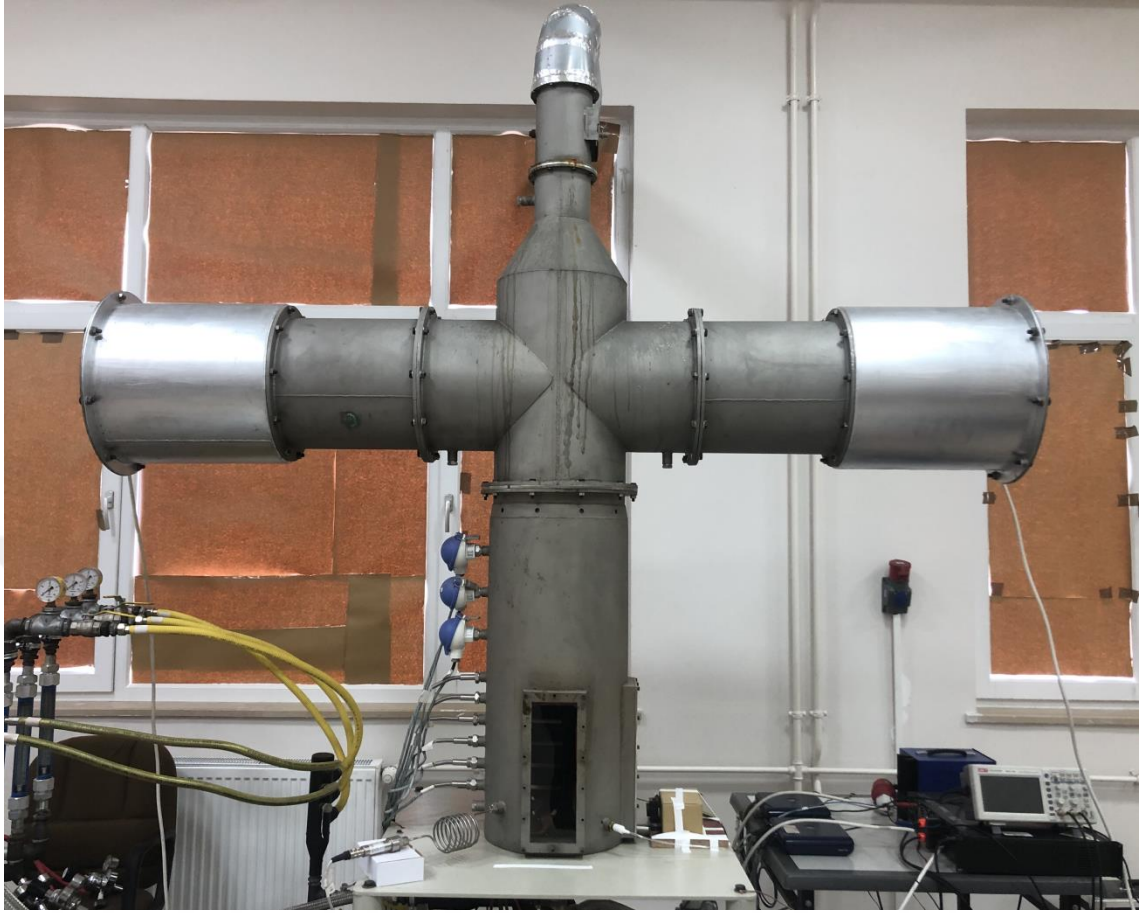
Kontrol panosunda bulunan, Şekil 2.19’da gösterilen Siemens LME41.054C2 brülör otomatiği sayesinde ateşleme gerçekleştirilmekte ve yakıcı içerisine gazların temini sağlanmaktadır [70]. Brülör otomatiği sistemi çalıştırmakla beraber iyonizasyon çubuğunu da kontrol edebilmektedir. Bu çubuk sayesinde alev sönmesi ve geri tepmesi durumlarında cihaz durumu algılayarak gaz temin hattını tamamen kapatmaktadır. Bu sayede, ön karışımli mekanizma sebebiyle oksijenle karışmış ve tutuşmaya hazır bir şekilde brülöre doğru ilerleyen yakıtların patlamasını engellemektedir. Brülör otomatiği kolayca çıkarılıp arızalanması durumunda değiştirilebilecek şekilde yerleştirilmiştir. Ayrıca, yakıtların hatlara beslenme süreleri dikkate alınarak ilk ateşleme esnasında alevin sağlanabilmesi için pilot alev temini amacıyla bir LPG tankından gelen gazdan faydalanılmaktadır. Yakıtların tamamının brülöre ulaşip kararlı bir alevin sağlanmasından sonra LPG tankı kapatılmaktadır.



Şekil 2.19. Brülör otomatığı [70]

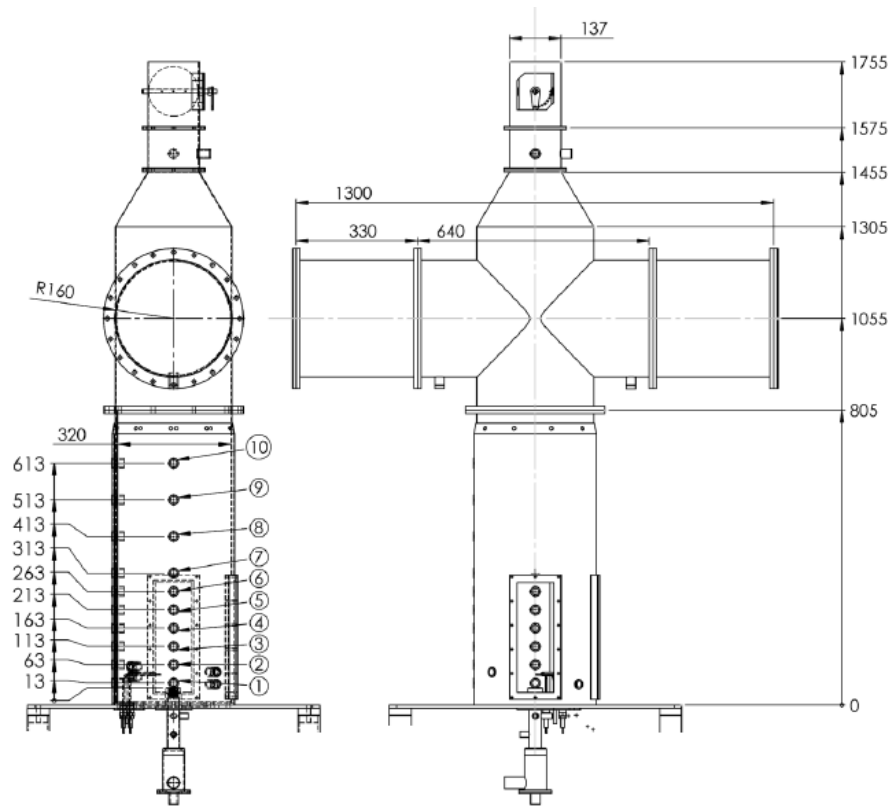
### 2.1.8. Yanma Odası

Deneyleerde kullanılan, 1650 mm uzunluğunda olan yanma odasının dış çapı 330 mm, iç çapı 320 mm'dir. Şekil 2.20'de gösterilen, ısıya dayanıklı bir şekilde paslanmaz çelikten imal edilen yanma odasının çevresinde deney esnasında gereken verilerin alınabilmesi için girişler bulunmaktadır. Bu girişlere basınç ve sıcaklık değerlerinin anlık olarak ölçülebildiği donanımlar yerleştirilmiştir. Ayrıca emisyon ölçümlerinin yapılabilmesi için yanma odası çevresinde 10, bacada 1 adet olmak üzere toplam 11 tane ölçüm yuvası vardır. Alevin gözle izlenebilmesi ve ışık şiddeti değerlerinin ölçülebilmesi için yanma odasının ön ve yan kısımlarında iki adet temperli cam bulunmaktadır. Bu camlar kolayca sökülüp takılabilir şekilde üretilmiş olup, yanma esnasında oluşabilecek arızalara hızlı müdahale şansı tanımaktadır. Ayrıca yanma odası tamamen sökülmeden yakıcı namlusunda takılı olan girdap üreteçleri de değiştirilebilmekte, bozulan iyonizasyon çubukları yenilenebilmektedir.



Şekil 2.20. Yanma akustik oda

Yanma odasının geometrik ölçüleri Şekil 2.21’de verilmiştir [41]. Bu kolların uzunlukları geçici bağlantı elemanları ile monte edilmiş kulakçıklar sayesinde uzatılmaktadır. Dıştan akustik zorlama frekansları altında yapılan deneyler, bu kulakçıklara yerleştirilen hoparlörler vasıtasıyla yapılmaktadır. Ayrıca kulakçıklar, hoparlörleri yanma bölgesinden uzaklaştırarak yüksek ısıdan dolayı deforme olmasını engelleyebilmektedir.



Şekil 2.21. Yanma odası teknik resmi [41]

### 2.1.9. Dıştan Akustik Zorlama Ekipmanları

Bu bölümde dıştan akustik zorlama frekanslarının sağlanabilmesi için kullanılan ekipmanlar açıklanmıştır.

#### 2.1.9.1. Fonksiyon Jeneratörü

Sunulan tez çalışmasını mevcut literatürdeki çalışmalardan ayıran ve özgün tarafını oluşturan en önemli kısmı, sistemin dıştan akustik zorlamalar altında çalıştırılabilme özelliğidir. Akustik zorlama şartlarının sağlanabilmesi için çalışmada 0,5 Hz – 5 MHz aralığında sinyal üretebilen bir fonksiyon jeneratörü kullanılmıştır. Şekil 2.22’de gösterilen jeneratör sabit 5 V genlikte sinüs dalgaları üreterek farklı frekans değerlerinde sistemin zorlama altında çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.22. Fonksiyon jeneratörü

### 2.1.9.2. Kuvvetlendirici

Jeneratörden elde edilen sinüs dalgalanmalarının istenilen akustik zorlama şartlarını sağlaması için Şekil 2.23'te gösterilen kuvvetlendirici ile yükseltilmesi gerekmektedir. Behringer Europower marka, EP4000 serisi sinyal kuvvetlendirici kullanılarak girişteki sinyaller 20 Hz – 20 kHz arasında değiştirilebilmektedir. Boyutları 88x483x402 mm olan kuvvetlendirici 4 kW güçle çalışmaktadır.



Şekil 2.23. Kuvvetlendirici

### 2.1.9.3. Osiloskop

Deneyleerde kullanılan osiloskop Şekil 2.24'te verilmiştir. Osiloskop ile kuvvetlendiriciden çıktıktan sonra hoparlörlere gidecek olan ses dalgalanmalarının faz farkları takip edilebilmektedir. İki ayrı hoparlöre gönderilen ses frekansları arasında faz farklarının oluşması özellikle dinamik basınç dalgalanmalarının tutarlı sonuçlar

vermemesine sebep olacaktır. Farklı yanma tiplerinde meydana gelecek olan alev kararsızlıklarının yorumlanmasında dinamik basınç dalgalanmaları temel kriter olduğu için osiloskop vasıtasıyla ses dalgalanmalarını kontrol etmek önem arz etmektedir.



Şekil 2.24. Osiloskop

#### 2.1.9.4. Hoparlörler

Yanma akustik odaya gelen alevi, farklı frekanslarda zorlamak için yakıcı kollarına iki adet hoparlör yerleştirilmiştir. Sinyal jeneratöründen çıkıp kuvvetlendiriciden geçen sinüs dalgaları hoparlörde ses dalgası olarak ortaya çıkmakta ve farklı frekanslarda alevi zorlamaktadır. Pioneer marka 1400 W gücündeki iki adet hoparlör 95 dB hassasiyete, 4 ohm empedansa ve 2 adet alüminyum bobine sahiptir. Kulakçıkların çıkarılabilir kapaklarına monte edilen Şekil 2.25’te gösterilen hoparlörlerin çapı 30,48 cm’dir.



Şekil 2.25. Hoparlör



### 2.1.10. Ölçüm Ekipmanları

Deneyleerde kullanılan ölçüm ekipmanları bu kısımda açıklanmıştır.

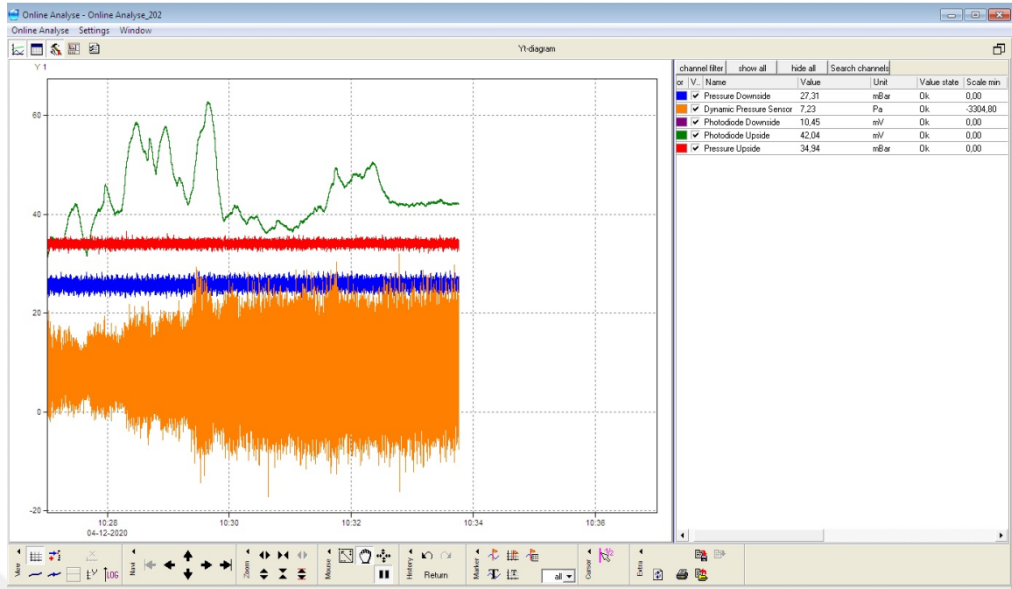
#### 2.1.10.1. Alev Kararlılığı Ölçüm Ekipmanları

Metan içerikli yakıt karışımlarının yanma kararsızlıkları ve emisyon değerleri incelenirken bu verilerin elde edilip işlenebilmesi için çeşitli ekipmanlar kullanılmıştır. Bu ekipmanlar, dört ana grupta incelenebilir; Sıcaklık, ışık şiddeti, emisyon ve basınç ölçümleri. Emisyon dışındaki diğer deney verileri yanma odası etrafında bulunan ölçüm ekipmanları vasıtasıyla iki adet Şekil 2.26’da gösterilen Expert Key marka 29 adet giriş kanallı veri toplayıcıda depolanmaktadır. Veri toplayıcıda gelen veriler buradan bilgisayara aktarılarak ProfiSignal isimli yazılım ile grafik haline getirilmektedir.



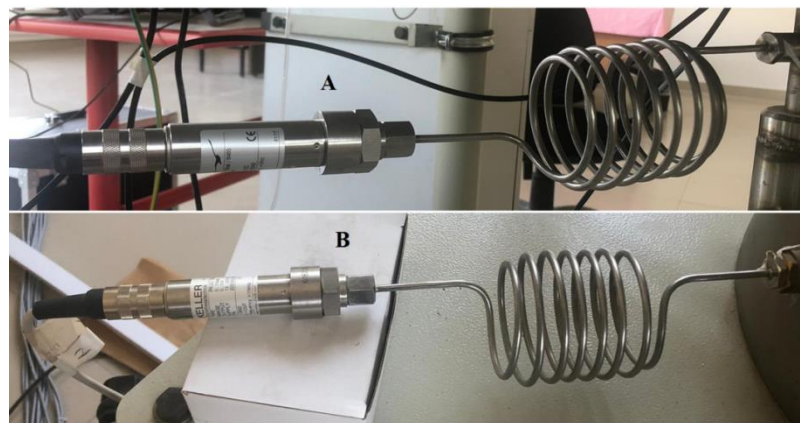
Şekil 2.26. 29 giriş kanallı veri toplayıcı

Şekil 2.27’de gösterilen program ile aynı anda dinamik ve statik basınç, yakıcı ve alev ışık şiddetleri ile beraber yanma odasının farklı eksenel mesafelerinden sıcaklık verilerini takip edebilmektedir.



Şekil 9 ProfiSignal ekran görünümü

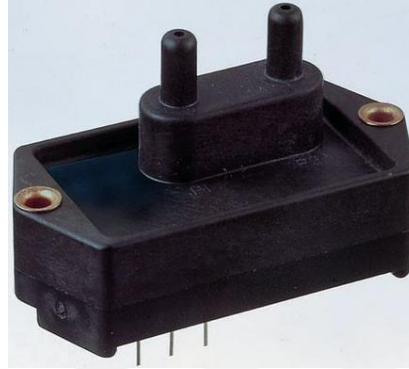
Alev geri tepmesi ve sönmesine sebep olan kararsızlıkların yorumlanabilmesi için gerekli olan dinamik ve statik dalgalanmaları verilerinin elde edilebilmesi için iki farklı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bunlardan ilki yakıcı ve alev statik basıncını ölçen piezorezistif basınç ölçerlerdir. Şekil 2.28’de görülebileceği gibi basınç ölçerler alev bölgesinde ve yakıcı etrafında olmak üzere iki adet bulunmaktadır. Keller marka basınç ölçerler 0 ila 10 bar arasında bir hassasiyetle kararsızlıklardan dolayı alevde meydana gelecek sönme ve geri tepme durumlarında statik basıncı ölçmektedirler.



Şekil 2.28. Piezorezistif basınç ölçerler A) Yakıcı, B) Alev

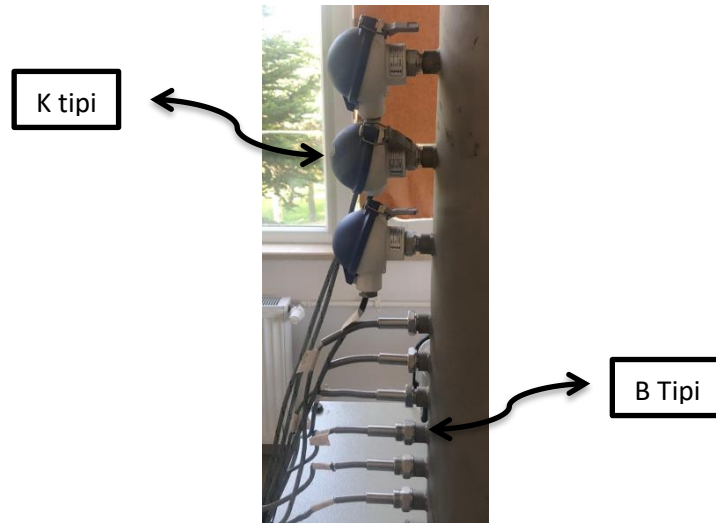
Diğer bir basınç ölçer ise geri tepme ve sönme durumu olmaksızın akustik zorlamalar altında alevde meydana gelen değişimleri tespit etmeyi sağlayan dinamik basınç

sensörüdür. Şekil 2.29’da gösterilen bu sensör Honeywell marka olup,  $H_2O$  ( $\pm 622$  Pa) hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 10 Dinamik basınç sensörü

Yapılan deneylerde yakıt karışımlarındaki ve oksijence zenginleştirme oranlarındaki değişimler sonucunda yanma odasının farklı bölgelerinde yaşanan sıcaklık değişimlerinin yorumlanabilmesi için Şekil 2.30’da gösterilen K tipi ve B tipi termal çiftler kullanılmaktadır. B tipi termal çiftler  $1800\text{ C}^\circ$  sıcaklığa kadar ölçüm yapabildiği için alev bölgesine yakın bölgelerde kullanılmaktadır. Krom-nikel alaşımında imal edilen K tipi termal çift ise  $1200\text{ C}^\circ$ ’ye kadar ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 2.30. Termal çiftler

Şekil 2.31.’de gösterilen optik dedektörler yakıcı ve alevin ışık şiddetlerini anlık olarak ölçebilmektedir. Thorlabs marka, PDA36A-EC serisi fotodiyotlar sayesinde yakıt karışımlarındaki değişimlerin ışık şiddetine etkisi incelenebilmektedir.



Şekil 2.31. Optik dedektör

### 2.1.10.2. Emisyon Ölçüm Ekipmanları

Yanma odasının farklı bölgeleri ve baca kısmından yanma sonu emisyon değerlerini ölçmek için kullanılan emisyon cihazı Şekil 2.32’de verilmiştir. Nova Plus marka emisyon ölçüm cihazı O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> emisyonlarını ölçebilirken, doğal gaz yanması için kalibre edildiğinde verim ve fazlalık hava yüzdesini de tespit edebilmektedir.



Şekil 2.32. Emisyon cihazı

Emisyon cihazının ölçüm hatası aralıkları Tablo 2.2’de verilmiştir [71].

Tablo 2.2. Emisyon Cihazı Ölçüm Hata Oranları [71]

	Ölçüm Hataları
O <sub>2</sub>	±0,2%
CO <sub>2</sub>	±0,3%
CO	±10 ppm
NO <sub>x</sub>	±5 ppm
SO <sub>2</sub>	±5 ppm

## 2.2. Deneysel Çalışma Şartları

Bir yanma akustik odada oksijence zenginleştirilmiş gaz yakıtların akustik zorlamalar altındaki kararsızlık ve emisyon değişimlerinin incelendiği bu çalışmada farklı yakıt karışımları farklı oksijence zenginleştirme oranlarında test edilmiştir. Bu yolla metan içerisine ilave edilen yakıtlar ve seyrelticilerin oksijence zenginleştirme sınırına olan etkisi belirlenmiştir. Daha sonra oksijence zenginleştirme sonucu ortaya çıkan yanma karakteristiği üzerinden kararsızlık değerlendirmesi yapılmıştır. Tez çalışması boyunca kullanılan yakıt karışımları ve bunların oksijence zenginleştirme oranları Tablo 2.3'de sunulmuştur.

Tablo 2.3. Deneyslerde kullanılan yakıt karışımları

Karışım Kodu	% CH <sub>4</sub>	% H <sub>2</sub>	% CO	% CO <sub>2</sub>	% O <sub>2</sub>	Bilinen İsmi
M1	100	0	0	0	21 – 24 – 26	Saf Metan
M2	60	0	0	40	21 – 24 – 28	Biyogaz Karışımı
M3	90	10	0	0	21 – 24 – 26	Metan – Hidrojen Karışımı
M4	80	20	0	0	21 – 24 – 26	Metan – Hidrojen Karışımı
M5	30	52,5	17,5	0	21 – 23	Sentetik Gaz Karışımı (H <sub>2</sub> /CO) = 3
M6	30	42	28	0	21 – 23 – 25	Sentetik Gaz Karışımı (H <sub>2</sub> /CO) = 1.5
M7	30	23,35	46,65	0	21 – 23 – 25	Sentetik Gaz Karışımı (H <sub>2</sub> /CO) = 0.5

Doğal gazın içeriğinin büyük bir kısmını oluşturan metan gazı, deneylerde kullanılan yakıt karışımlarının tamamına ilave edilmiştir. Öncelikle saf metan yakılarak farklı oksijence zenginleştirme oranlarında yanma özellikleri belirlenmiştir. Ardından, CO<sub>2</sub> ile seyreltmenin etkisi incelenmiş, başka bir deneyde ise H<sub>2</sub> ilavesi ve karışım içerisindeki değişiminin etkisi araştırılmıştır. Son olarak CO gazı da karışım içerisine ilave ederek karbonmonoksit gazında ki artışla beraber meydana gelen değişimler belirlenmiştir.

Yapılan deneylerde metan gazı bulundurularak, diğer gazların yanma karakteristiği ve oksijence zenginleştirme sonucundaki davranışlarının incelenebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca ilave edilen diğer gazlar sonucunda elde edilen karışımlarla, özellikle endüstriyel uygulamalarda sık kullanılan biyogaz ve sentetik gaz karışımları gibi yakıtların incelenmesine öncelik verilmiştir. Bu sayede yapılan tez çalışmasının endüstriyel çalışmalara da katkı sağlaması amaçlanmıştır.

DeneySEL çalışmalarda yakıt kompozisyonundaki değişim ve oksijen oranındaki artışın kararsızlığa etkisini daha iyi anlayabilmek için bazı değerler sabit tutulmuştur. Yakıcı gücü 3 kW olarak belirlenirken, yakıcı namlusuna girdap sayısı 1 olan üreteç yerleştirilmiştir. Ayrıca yakıtların sönme ve geri tepme değerleri tespit edilerek, bütün yakıt karışımlarının kararlı yanabildiği ortak değer olan 0.7 eşdeğerlik oranı bütün deneylerde kullanılmıştır. Yakıcı namlusunun desteklendiği girdap üreticinin geometrik özellikleri Tablo 2.4'te sunulmuştur.

Tablo 2.4. Girdap üreticinin geometrik özellikleri

Girdap Sayısı	Çap Oranı	İç Çap (mm)	Dış Çap (mm)	Kanatçık Açısı (°)
1	0.5	13.5	27	52.12°

Oksijence zenginleştirme işlemi, hava içerisinde normal şartlarda hacimce %21 olan O<sub>2</sub> oranının artırılmasıdır. Deneylerde eşdeğerlik oranının sabit tutulabilmesi için sisteme giren oksijen miktarının da sabit kalması gerekmektedir. Zenginleştirme işleminin yapılabilmesi için hava bir miktar kısılarak, kısılan havanın içerisindeki oksijen miktarı kadar ilave tanktan oksijen tedarik edilmiştir. Böylece oksijen oranı sabit tutularak azot miktarı düşülmüş ve O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> değeri yükseltilmiştir. Tablo 2.5'te yakıt karışımlarının 0,7 eşdeğerlik oranında yakılmaları için gereken hava miktarları, hava içerisindeki

oksijen miktarı ve oksijence zenginleştirme işleminin yapılabilmesi için harici oksijen tankından tedarik edilmesi gereken miktarlar verilmiştir. Ayrıca emisyon verilerinin değerlendirilebilmesi için toplam yakıt hava karışımı içerisindeki fazla oksijen oranı da hesaplanmıştır.

Tablo 2.5. Oksijence zenginleştirme hesaplamaları

Karışım No	Oksi-Zengin. (%)	Hava Miktarı (sccm)	Havadaki O <sub>2</sub> (sccm)	İlave O <sub>2</sub> (sccm)	Toplam O <sub>2</sub> (sccm)	O <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> (sccm)	Karışımdaki Aşırı Hava (%)
M1	21	68088	14298	0	14298	68088	% 5,86
M1	24	57313	12035	2263	14298	59576	% 6,64
M1	26	51512	10817	3481	14298	54993	% 7,15
M2	21	68015	14283	0	14283	68015	% 5,61
M2	24	57253	12023	2260	14283	59513	% 6,31
M2	28	46491	9763	4520	14283	51011	% 7,21
M3	21	67691	14215	0	14215	67691	% 5,84
M3	24	56980	11966	2249	14215	59229	% 6,6
M3	26	51213	10755	3460	14215	54673	% 7,24
M4	21	67233	14119	0	14119	67233	% 5,8
M4	24	56595	11885	2234	14119	58829	% 6,55
M4	26	50867	10682	3437	14119	54304	% 7,04
M5	21	62141	13050	0	13050	62141	% 5,46
M5	23	55302	11613	1437	13050	56739	% 5,9
M6	21	61548	12925	0	12925	61548	% 5,46
M6	23	54773	11502	1423	12925	56196	% 5,9
M6	25	49082	10307	2618	12925	51700	% 6,33
M7	21	60524	12710	0	12710	60524	% 5,46
M7	23	53862	11311	1399	12710	55261	% 5,9
M7	25	48266	10136	2574	12710	50840	% 6,33

Deneysel verilerin sunumundan önce deneylerde kullanılan yakıt karışımlarının bilinen yanma özellikleri Tablo 2.6.'te gösterilmiştir. Verilen bu özellikler yakıt karışımlarının kararsızlık özelliklerini doğrudan etkilediği için deney sonuçlarının yorumlanmasında önem arz etmektedir. Bu özellikler arasında gösterilen laminer yanma hızlarının yaklaşık olarak belirlenmesi için literatürde bulunan formüller olsa da, bu formüller yakıcının giriş basıncı, yakıtların karışım oranları ve eşdeğerlik oranları gibi faktörlere

göre değişmektedir. Bu yüzden laminar yanma hızı sayısal ve deneysel yöntemlerle başlıca bir çalışma olarak bulunması gerekmektedir. Tablo 2.6’da verilen değerler mevcut yakıt karışımları ve deney şartlarımıza en uygun literatür araştırmasına dayanan çalışmalardan elde edilmiştir. Tablo 2.6’daki değerler 1 atm basınç, 0,7 eşdeğerlik oranlarını için verilmiştir [13].

Tablo 2.6. Yakıtların yanma karakteristiğine etki eden özellikleri [13,43]

Karışım Kodu	Yoğunluk ( kg/m <sup>3</sup> )	Alt Isıl Değer (MJ/kg)	Yakıt Debisi (kg/h)	Wobbe İndeksi (MJ/Nm <sup>3</sup> )	Laminar Yanma Hızı (m/sn)
M1	0.717	50.114	0.215	46,97	0,2
M2	1.22	17.689	0.610	21,63	0,1248
M3	0.65	51.113	0.211	45,61	0,38
M4	0.59	52.288	0.206	44,45	0,56
M5	0.48	38.806	0.278	29,76	0,38
M6	0.60	31.268	0.345	26,81	0,31
M7	0.82	23.414	0.461	23,47	0,24



## 3. BÖLÜM

### DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerden elde edilen veriler bu bölümde sunulmuştur.

#### 3.1. Giriş

Çağımızda enerji ihtiyacını karşılamakta kullanılan yakıtların tutuşması için farklı ortam şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bunlardan bir tanesi de yakıtın yanabilmesi için uygun yakıt/hava oranının sağlanmasıdır. Bu tez çalışmasında, farklı yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirme durumlarında yanma kararlılığı ve emisyon davranışları incelenmeden önce yanma limitleri belirlenmiştir. Eşdeğerlik oranı, bu yanma sınırlarının belirlenmesinde kullanılan bir terim olarak karışıma çıkmaktadır [72].

#### 3.2. Metan İçerikli Yakıt Karışımlarının Yanma Limitleri

Metan yakıtının farklı eşdeğerlik oranlarında kararlı bir yanma gösterdiği bilinmektedir. Kararlı yanma aralığı alevin flashback (geri tepme) ve blowoff (sönme) yaptığı sınırlar arasındaki eşdeğerlik oranlarıdır. Bu aralığın bulunması için kütle akış kontrolcüsü ile sisteme aktarılan hava miktarı belirlenmektedir, sisteme giren yakıtta göre yakıtın stokiyometrik oranda yanabilmesi için gereken hava miktarı tespit edilir. Tespit edilen bu havayla birlikte tutuşma sağlandıktan sonra yakıt/hava karışımı içerisindeki hava artırılarak eşdeğerlik oranı düşürülür ve karışım fakir hale getirilir. Bu sayede yakıtın tamamen fakir hale gelerek söndüğü yer sönme limiti olarak kaydedilir. Bu işlemin devamında yakıt karışımı içerisindeki hava miktarı azaltılarak, eşdeğerlik oranı artırılır ve zengin bir karışım haline getirilir. Bu durumda havanın yetersiz kalıp alevin yok olduğu en yüksek eşdeğerlik oranı tespit edilerek geri tepme limiti belirlenir [73].

Bu tez çalışmasında yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirme esnasında kararlılık değişimleri incelenmeden önce saf metan ve diğer bütün yakıt karışımları için hava ile

yanma durumunda alev sönme ve geri tepme eşdeğerlik oranları belirlenmiştir. Belirlenen değerler ile metan içerisine ilave edilen hidrojen, karbon monoksit ve karbondioksit gazlarının alevin yanma limitlerine etkisi değerlendirilmiştir. Tablo 3.1’de yakıt karışımları ve yanma limitleri gösterilmektedir. Ön karışımli bir yanma için girdap sayısı (1) ve yakıcı ısıl gücü (3) değerinde belirlenmiştir.

Tablo 3.1. Yakıt karışımlarının sönme ve geri tepme sınırları

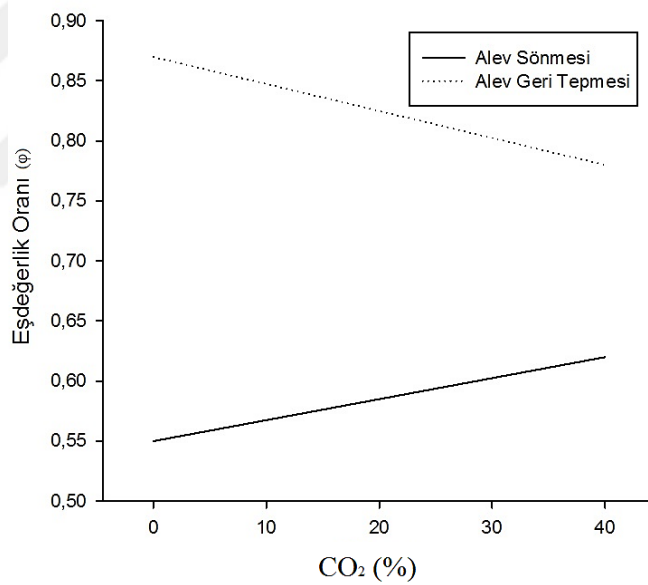
Yakıt Karışım Kodu	Alev Sönmesi ( $\phi$ )	Alev Geri Tepmesi ( $\phi$ )
M1	0,55	0,87
M2	0,62	0,78
M3	0,55	0,88
M4	0,55	0,90
M5	0,33	0,74
M6	0,44	0,81
M7	0,52	0,89

Öncelikle saf metan yanmasının geri tepme ve sönme limitleri belirlenmiştir. Kararlı bir alev ortaya çıkarıldıktan sonra karışım içerisindeki hava miktarı artırılarak eşdeğerlik oranı 0,55’e kadar düşürülmüş ve tam bu noktada fakir karışım sınır noktasına gelinerek alevde sönme meydana gelmiştir. Diğer taraftan karışım içerisindeki hava miktarı düşürülerek eşdeğerlik oranı 0,87’ye çıkarılmış ve bu orandan sonra alev yakıcı içerisinde geriye doğru yayılarak alev geri tepmesi meydana gelmiştir. Bir yakıt karışımının yanma sınırlarının belirlenmesinde temel parametreler ısı yayılım oranı ve laminer yanma hızlarıdır. Karışım içerisindeki farklı yakıtların oranları değiştikçe, oranı değişen yakıtın yoğunluğu, üst ısıl değeri ve laminer yanma hızına etkisi yanma limitlerini de değiştirmektedir [74].

Saf metanın yanma limitlerinin belirlenmesinden sonra metan içerisine CO<sub>2</sub> ilavesi yapılarak hem karbondioksit ilavesinin yanma sınırlarına olan etkisi tespit edilmiş hem de literatürde biyogaz karışımı olarak bilinen bir yakıt haline getirilmiştir. M2 koduyla verilen biyogaz karışımı % 60 CH<sub>4</sub> - % 40 CO<sub>2</sub> içermektedir. Şekil 3.1’de saf metan yanması durumuna göre CO<sub>2</sub> ilavesinin yanma sınırlarına olan etkisi gösterilmektedir. Geçmiş çalışmalarda metan içerisine yapılan karbondioksit ilavelerinde %20 oranına kadar alev sönmelerinde önemli bir değişim görülmezken, alev geri tepmeleri limitleri büyük ölçüde artmıştır. Bunun sebebi olarak yakıt karışımlarının fakirden zengine ilerledikçe geri tepme eğiliminin artması, CO<sub>2</sub> gazının ise hava içerisinde bulunan azot

elementine benzer şekilde seyreltici etkisinin bulunması sebebiyle yüksek eşdeğerlik oranlarında azalan havadaki azotu yerini ikame edişi görülmektedir [75].

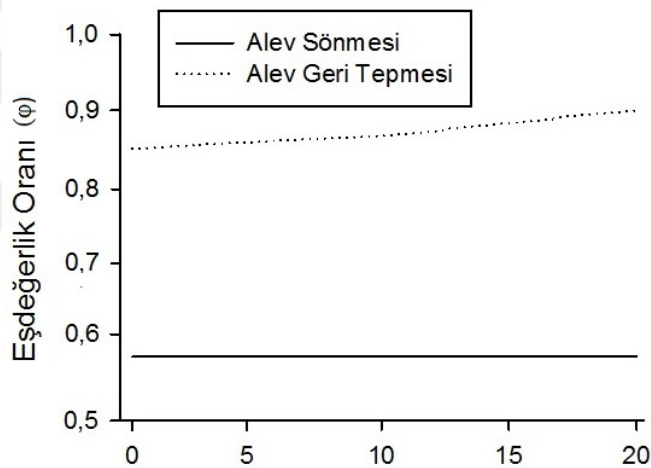
Diğer taraftan bu tez çalışmasında test edilen biyogaz karışımında CO<sub>2</sub> oranı %40 olarak belirlenmiştir. Yüksek orandaki CO<sub>2</sub> seyreltici etkisinden dolayı yakıtın ısı değerini 50,1 MJ/kg'dan 17,68 MJ/kg'a kadar düşürmüş ve alev 0,62 eşdeğerlik oranında sönerken, 0,78 eşdeğerlik oranında ise geri tepme meydana gelmiştir. Bu durum yoğunluğu metana göre çok daha yüksek ve yakıt karışımının alt ısı değerini düşüren CO<sub>2</sub> gazının yüksek oranlardaki ilavesinde yanma sınırını daralttığını göstermektedir [76]. Liao et al., benzer bir yakıt türü olarak doğal gazın CO<sub>2</sub> ile seyreltilmesinin yanma limitlerine olan etkilerini incelemiştir. Bu çalışmada da seyreltme oranı ile beraber Şekil 3.1'de gösterilen değerlere benzer bir sonuç elde edilmiş ve daralan bir yanma limiti görülmüştür [77].



Şekil 3.1. CO<sub>2</sub> ilavesinin metanın yanma sınırlarına etkisi

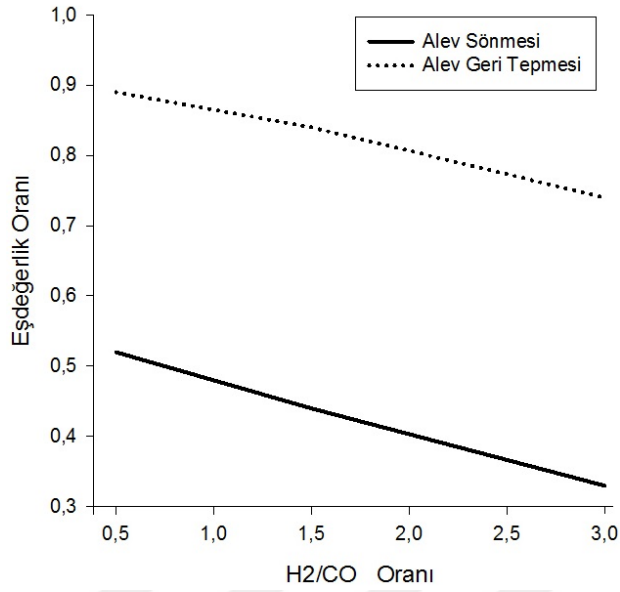
Metan yakıtının karbondioksit ile seyreltilmesi neticesinde ortaya çıkan yanma limitlerinin değerlendirilmesinden sonra saf metan içerisine hidrojen ilave ederek H<sub>2</sub> zenginleştirmesinin metanın yanma sınırlarına olan etkisi incelenmiştir. H<sub>2</sub> gazı oksijenle birleşerek yanma işlemini gerçekleştirdiği zaman ısı açığa çıkaran bir yakıttır. Isıl değerinin yüksek olmasından dolayı H<sub>2</sub> ilavesi durumunda zenginleştirme terimi kullanılırken, CO<sub>2</sub> ilavesi durumunda, gazın ısı değeri düşürmesinden dolayı seyreltme terimi ile ifade edilmektedir. Şekil 3.2 incelendiğinde saf metan içerisine yapılan

hidrojen ilavesinde alevin sönme limitlerinde önemli bir değişiklik meydana gelmediği görülmektedir. Bu durum, hidrojen yakıtının yüksek ısı değere sahip olması ve metana göre kütleli olarak daha yüksek hava ihtiyacının olmasından dolayı fakir karışım oranlarında dahi kararlı bir yanma meydana gelmesi ile açıklanabilmektedir [61]. Diğer yandan karışım içerisindeki hava miktarı kısılıp eşdeğerlik oranı artırıldığında ise hidrojen ilaveli saf metan yanmasında alevin geri tepme limitlerinin yükseldiği görülmektedir. Özellikle hidrojenin yüksek oranlardaki ilavelerinde yanma limitlerini artırdığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan %90 CH<sub>4</sub> - %10 H<sub>2</sub> ve %80 CH<sub>4</sub> - %20 H<sub>2</sub> karışımlarında da benzer şekilde yanma limitlerini artırmıştır [62]. Buna rağmen, elde edilen değerlerin bu çalışma özgü olduğu ve düşük hidrojen ilavelerinde geçerli olduğunun bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 3.2. H<sub>2</sub> ilavesinin metanın yanma sınırlarına etkisi

Hidrojenle zenginleştirme işleminden sonra metan içerisine eklenen diğer yakıt ise karbon monoksittir. CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> içeren yakıt karışımının içerisine farklı oranlarda CO eklenerek, yanma limitlerindeki değişimler gözlemlenmiştir. Ayrıca karışım içerisindeki H<sub>2</sub>/CO oranları yüksek, orta ve düşük olarak belirlenerek endüstride sentetik gaz karışımı olarak bilinen yakıtlar oluşturulmuştur. Bu sayede literatüre yapılan akademik katkının yanı sıra endüstriyel uygulamalarda kullanılan yakıt karışımları da test edilerek pratik çalışmalara bilgi sağlama amacı güdülmüştür. Şekil 3.3'te yüksek CO oranından başlanarak daha düşük CO oranına doğru farklı sentetik gaz karışımlarının yanma limitleri belirlenmiştir.



Şekil 3.3. Metan içerisine farklı H<sub>2</sub>/CO oranlarındaki yakıt ilavelerinin yanma sınırlarına etkisi

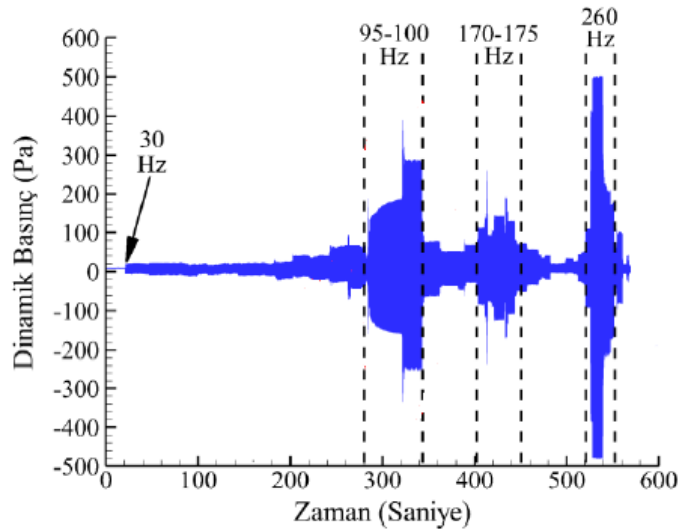
Şekil 3.3 incelendiğinde açıkça karışım içerisindeki hidrojen oranı arttıkça alevin hem sönme hem de geri tepme limitinin azaldığı görülmektedir. Laminer yanma hızı ve ısı değeri metan ve hidrojene göre çok daha düşük olan karbonmonoksit yakıt karışımı içerisine ilave edildikçe yanma sınırları fakirden zengin yakıt karışımına doğru ilerlemiştir. Isıl değeri kütleli olarak daha düşük olan bir yakıtın karışım içerisine ilave edilmesi durumunda fakir yanma sınırının olumsuz etkilenmesi ve buna karşın zengin karışımlarda daha yüksek eşdeğerlik oranlarında yanabilmesi beklenen bir durum olmuştur. Ayrıca H<sub>2</sub>/CO oranı 3 değerine çıktığında ise ısı değeri yüksek olan hidrojenin karışım içerisinde %52,5 seviyesine gelmesi ve etkin rol oynamasından dolayı yanma limiti fakir karışım sınırlarına doğru değişmiştir. Dene sonuçları, karbonmonoksit ilavesinin özellikle teorik hava ihtiyacını önemli ölçüde azaltması ve ısı değeri düşürmesinden dolayı metan içerikli sentetik gaz karışımlarında yanma sınırlarını zengin karışım oranlarına doğru genişlettiğini göstermektedir [61,78].

Yakıt karışımlarının yanma limitlerinin belirlenmesinden sonra, bütün karışımların kararlı bir şekilde yanabildiği eşdeğerlik oranı olan 0,7 değeri çalışma kapsamında tüm deneylerde sabit alınmıştır. Hava ile yanma ve oksijence zenginleştirme deneylerinin tamamında eşdeğerlik oranı 0,7 olarak sabit tutulmuştur.

### 3.3. Oksijence Zenginleştirilmiş Metan İçerikli Yakıt Karışımlarının Yanma Kararsızlıkları

Bu tez çalışmasında metan içerisine CO, H<sub>2</sub> ve CO ve gazları ilave edilerek farklı oksijen oranlarında kararsızlık ve emisyon davranışları incelenmiştir. Metan içerikli farklı yakıt karışımlarının yanma kararsızlığı ve emisyon davranışları incelenmeden önce içerisine ilave edilen CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> ve CO gazlarının oksijence zenginleştirme limitlerine ve yanma kararsızlıklarına olan etkilerinin yorumlanabilmesi için öncelikle saf metan yakılarak kararsızlık değişimleri tespit edilmiştir.

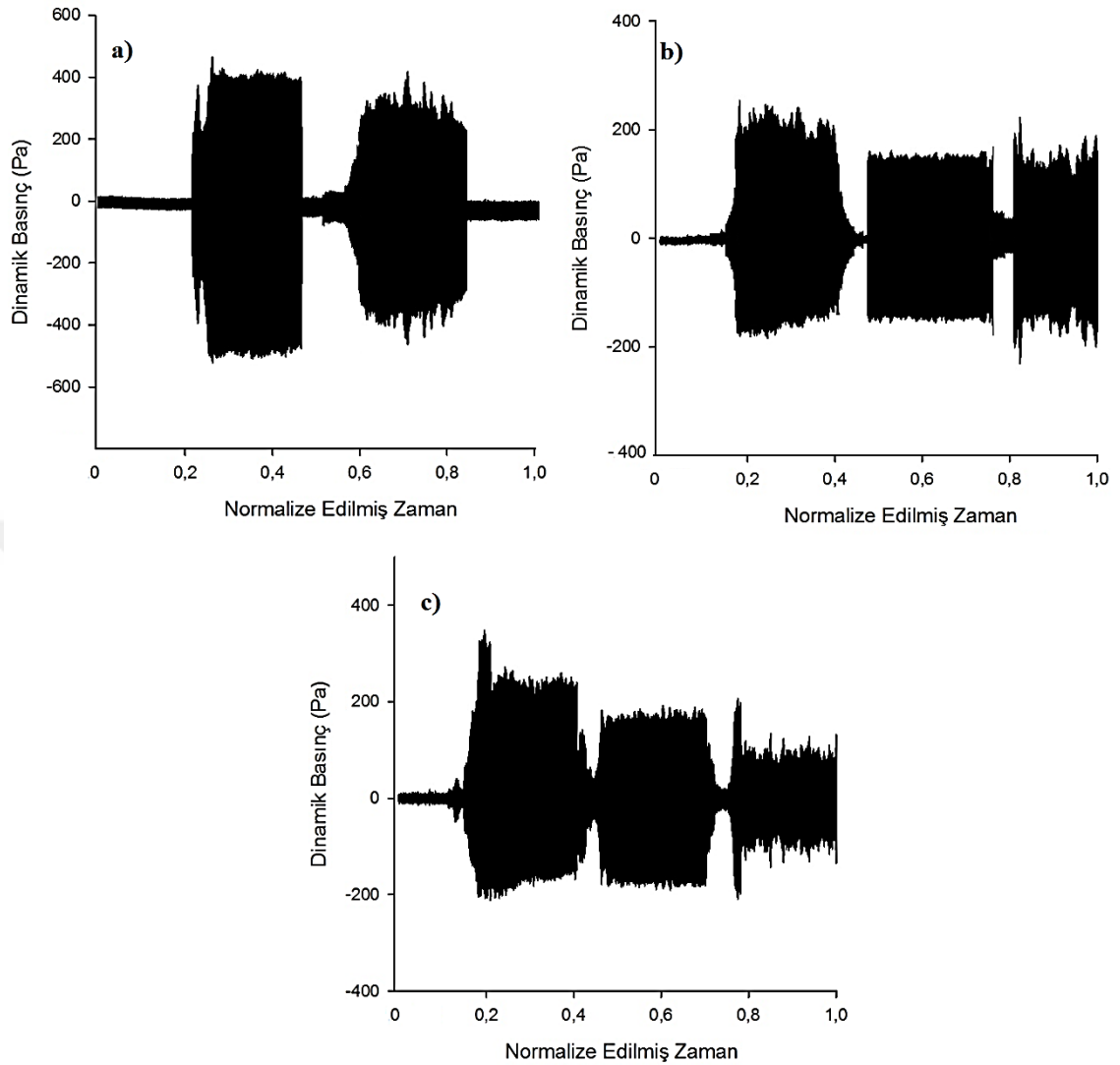
Kararsızlık davranışlarının incelenmesi amacıyla dinamik basınç dalgalanmaları başta olmak üzere statik basınç ve ışık şiddeti verileri elde edilmiştir. Yanma deneylerinin yapılışı esnasında yakıcı kollarında bulunan hoparlörler vasıtasıyla ortaya çıkarılan farklı frekanslardaki akustik ses dalgaları dinamik basınç dalgalanmalarına sebep olmaktadır. Bu ses dalgaları özellikle 95 Hz, 175 Hz ve 260 Hz değerlerinde hem dinamik basınç değerlerinde hem de ışık şiddetinde önemli değişimlere sebep olmaktadır. Ortaya çıkan değişimin yanı sıra bu frekanslardaki zorlamalarda bir insanın fark edebileceği ve rahatsız olabileceği büyüklükte bir gürültü ortaya çıkmaktadır. Diğer frekans değerlerine göre yanma üzerine önemli bir etkisi olan bu üç frekans değeri sistemin rezonans değerleri olarak belirlenmiştir. Yanma akustik odada yapılan bir deney esnasında ortaya çıkan dinamik basınç dalgalanmaları ve rezonans bölgeleri Şekil 3.4'te gösterilmiştir [79].



Şekil 3.4. Yanma akustik odanın rezonans bölgeleri [79]

### 3.3.1. Oksijence Zenginleştirmenin Saf Metan Yanma Kararsızlığına Etkisi

Metanın farklı oksijen oranlarında zenginleştirilmesinin kararsızlık mekanizmalarına olan etkisinin incelenebilmesi için öncelikle hacimsel olarak %21 oranında O<sub>2</sub> içeren standart şartlardaki hava ile yakılmıştır. Şekil 3.5a incelendiğinde metan-hava karışımının farklı akustik zorlama frekanslarında dinamik basınç değişimleri görülmektedir. Alevin dinamik basınç dalgalanmaları incelendiğinde sistemin ilk akustik rezonans değeri olan 95 Hz frekanstaki zorlamada en yüksek ve en düşük dinamik basınç değerleri arasındaki salınım genliği 985 Pa olarak ortaya çıkmaktadır. Rezonanstan çıkıldıktan sonra 175 Hz frekansa gelene kadar dinamik basınç dalgalanmaları başlangıç durumuna yakın bir şekilde seyretmiştir. Bu durum daha önceden bulunmuş olan rezonans değerlerinin alev yapısına olan etkisini açıkça göstermektedir. 175 Hz frekanstaki akustik zorlamada dinamik basınç dalgalanmaları 875 Pa olurken, sistemin son rezonans değeri olan 260 Hz frekansa gelindiğinde ise başlangıç haline yakın bir şekilde 70,43 Pa genlikte bir salınım meydana gelmiştir. Ses dalgasının frekansının artması zorlayıcı kuvveti azalttığı için yüksek frekanslı zorlamalarda düşük frekanslara göre alevde önemli bir dinamik basınç dalgalanması olmamıştır [80].



Şekil 11 Saf metan dinamik basınç dalgalanmaları a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Metan-hava alevinde yapılan incelemeden sonra oksijence zenginleştirmenin etkisinin görülebilmesi için eşdeğerlik oranı (0,7), yakıcı gücü (3 kW) ve girdap sayısı (1) sabit tutularak hava içerisindeki oksijen oranı %24 seviyesine yükselmiştir. Şekil 3.5b'de dinamik basınç salınımları verilen alevin kararlılık değişimleri incelendiğinde, 95 Hz frekansa gelene kadar dinamik basınç dalgalanmalarında belirli bir değişim olmayan alev bu frekansa geldikten sonra rezonansa girerek 438 Pa genlikte salınım yapmaya başlamıştır. Akustik zorlayıcı frekansın 175 Hz değerine artırılması ile 316,8 Pa salınım görülmüştür. Ayrıca hava ile yanma koşullarında çok düşük bir salınım değerine sahip olan 260 Hz frekanstaki zorlamada ise oksijence zenginleştirme durumunda olumsuz bir etki görülmüş ve dinamik basınç dalgalanmaları büyük bir artış göstererek 452 Pa



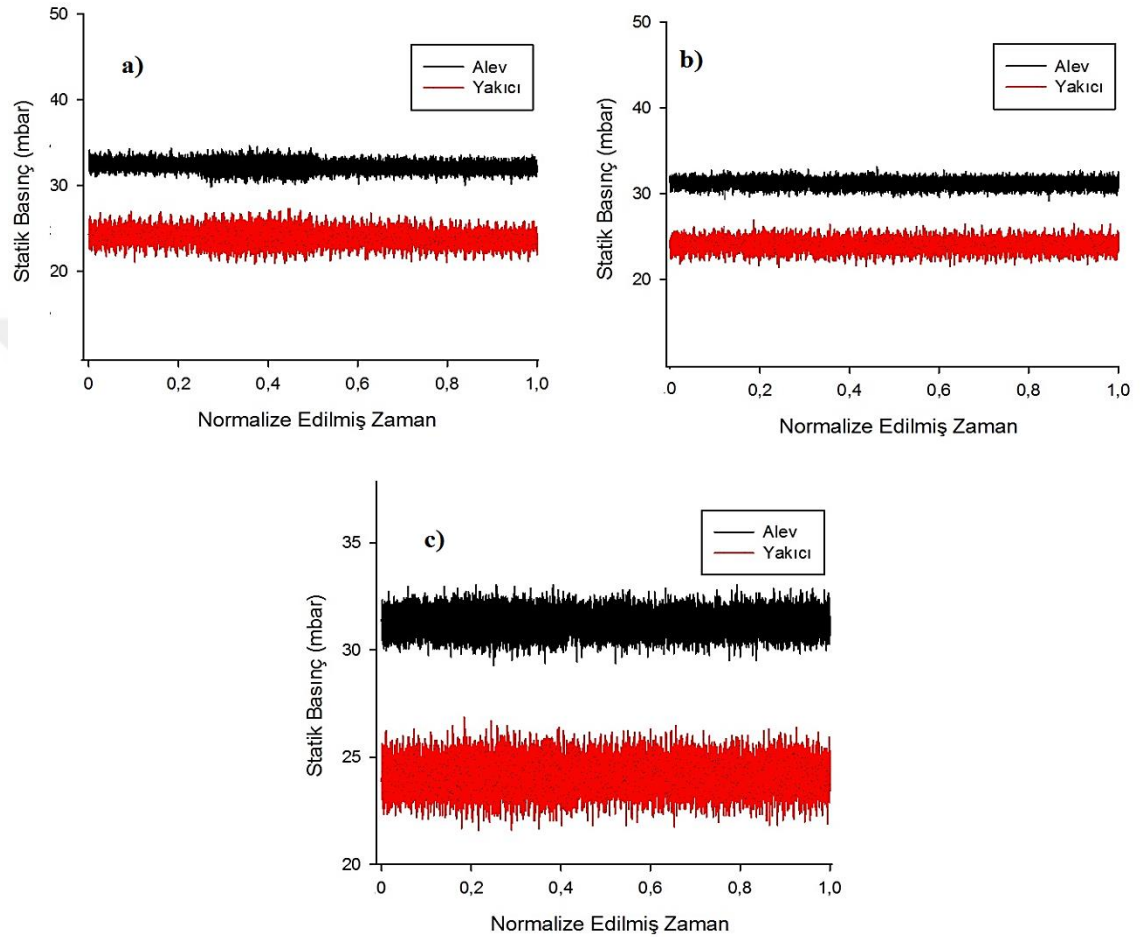
ölçülmüştür. Bu durum oksijen ilavesi sonucunda geri tepme sinyal genliğinin ileri doğru hareket ettiğini göstermektedir [43].

Saf metan yakıtının oksijence zenginleştirilmesi deneylerinin sonucusu ise % 26 O<sub>2</sub> içeren hava ile yakılmasıdır. Ön karışımli bir yakıcıda 0,7 eşdeğerlik oranı ve 1 girdap sayısında oksijence zenginleştirilebilme limiti 27,6 olan metan özellikle hidrojen ilavesi sonucunda meydana gelecek yanma kararsızlıklarının karşılaştırılabilmesi için %26 O<sub>2</sub> oranında yakılmıştır. 95 Hz frekanstaki akustik zorlama altında dinamik basınç genliği 560,4 Pa ölçülen alevin daha sonraki akustik rezonans değerlerinde salınım genlikleri düşmüştür. Sistemin ikinci rezonans değeri olan 175 Hz frekansta en yüksek ve en düşük dinamik basınç değerleri arasındaki genlik 381 Pa iken, 260 Hz frekansa büyüklüğünde 276,7 Pa değeri belirlenmiştir. Özellikle düşük akustik zorlama frekansında meydana gelen rezonans durumu alevin daha yüksek bir bozucu etkiye maruz kalmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden de 95 Hz zorlayıcı frekans altında elde edilen dinamik basınç değerleri neredeyse bütün deney şartlarında diğer frekanslara göre daha yüksek çıkmaktadır. Düşük frekans seviyelerinin daha yüksek ses basınçlarını ortaya çıkardığı literatürdeki çalışmalarda da ortaya koyulan bir durumdur [81].

Şekil 3.6a'da metan-hava alevinin yakıcı ve alev bölgesi için akustik zorlamalar altındaki statik basınç dalgalanmaları görülmektedir. Statik basınç değişimlerinin de dinamik basınçta meydana gelen değişimlere benzer biçimde 95 Hz frekanstaki zorlama anında yoğunlaştığı görülmektedir. İlk rezonans bölgesinde yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç 27,31 mbar olarak ölçülürken, bu bölge geçildikten sonra daha düşük seviyelerde seyrederek yanma devam etmiştir. Yakıcı içerisinde ortaya çıkan maksimum statik basınç, dinamik basınç dalgalanmaları ile ilişkili bir şekilde hareket etmiştir.

Saf metan alevinin %24 oranında oksijence zenginleştirilmesi durumunda ortaya çıkan statik basınç değişimleri de Şekil 3.6b'de gösterilmektedir. Dinamik basınç dalgalanmalarından da görüldüğü gibi yakıcı içerisindeki statik basınç, normalize edilmiş zamana göre 0,18 yakınlarında maksimum seviyesine ulaşmış ve 26,85 mbar değeri ölçülmüştür. Bu nokta dinamik basınç dalgalanma genliğinin de en yüksek olduğu ana karşılık gelmektedir. Akustik zorlama frekansı 175 Hz'ye çıkarıldığında 26,47 mbar değerine gerileyen maksimum statik basınç, sistemin üçüncü rezonans

değeri olan 260 Hz frekansa ulaşıldığında ise küçük bir miktar artarak 26,55 mbar olarak tespit edilmiştir.

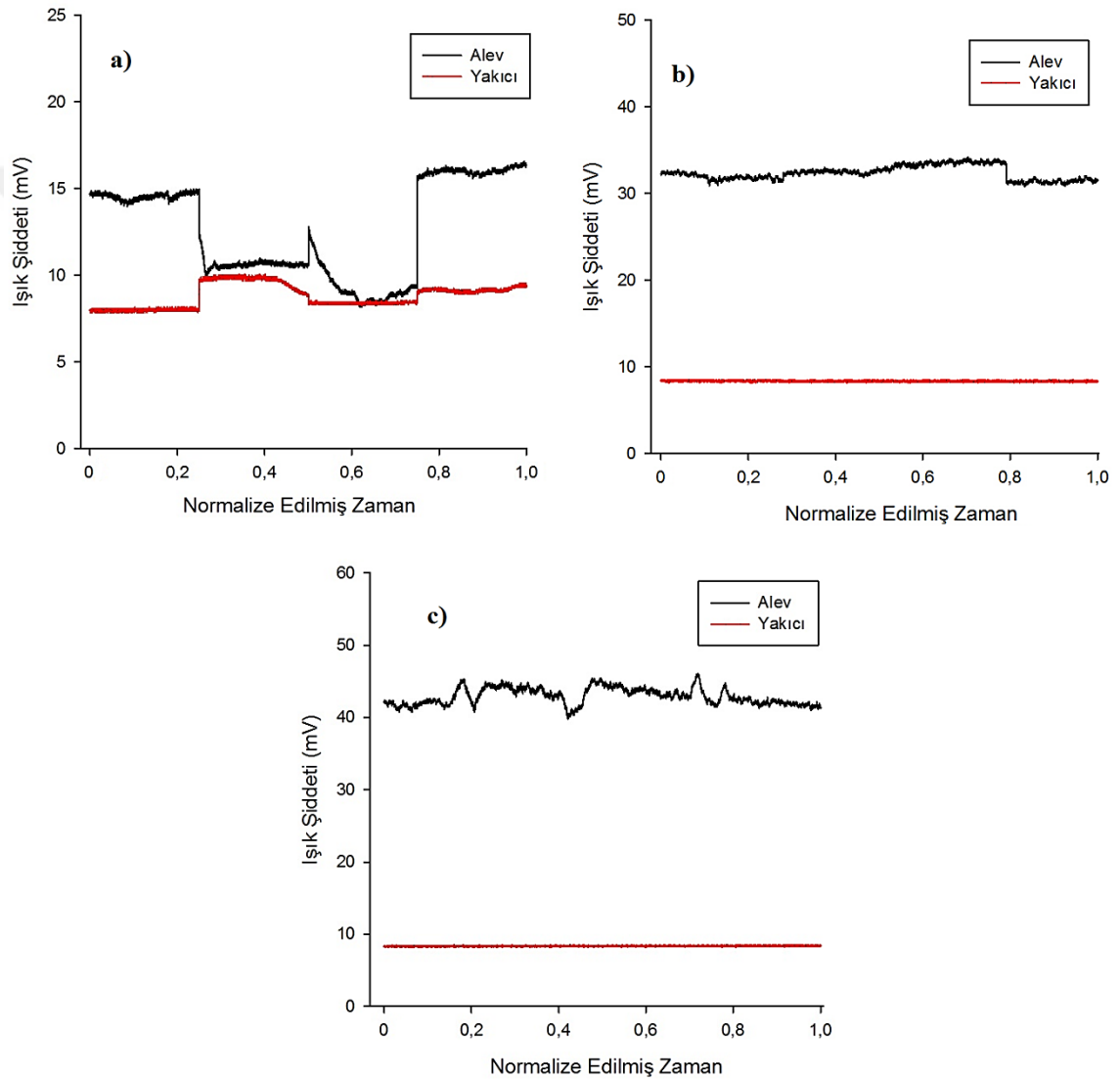


Şekil 3.6. Saf metan statik basınç değişimleri a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Şekil 3.6c'de %26 O<sub>2</sub> oranında zenginleştirilmiş metan alevinin yakıcı içerisindeki ve alev bölgesindeki statik basınç değişimleri gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde dinamik basınç dalgalanmalarına benzer bir şekilde yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç değeri yine 95 Hz frekans altında 26,85 mbar değerinde meydana gelmiştir. İlerleyen akustik zorlama frekanslarında ise 175 Hz ve 260 Hz'de sırasıyla 26,47 mbar ve 26,4 mbar değerleri ölçülmüştür. Alevin bütün akustik zorlama frekanslarında kararlı bir şekilde yanması, geri tepme veya sönme eğilimine girmemesi sebebiyle statik basınç ölçümlerinde büyük bir dalgalanma meydana gelmemiştir.

Metan-hava alevinin kararlılığını belirleyen bir diğer ölçüm değeri ise ışık şiddetidir. Şekil 3.7a'da alevin ışık şiddeti değişimleri incelendiğinde ise 95 Hz ve 175 Hz

zorlayıcı frekanslarda alevde meydana gelen parlaklık kaybı açıkça görülmektedir. Maruz kaldığı zorlayıcı frekanstan dolayı kararsızlaşan alevin parlaklığı azalmış ve yakıcı içerisine doğru geri çekilmiştir. Parlaklık kaybı benzer şekilde 175 Hz frekans altında da devam ederken zorlayıcı frekansın artması ile beraber alev, zorlamasız durumdaki yanma kararlılığına geri dönmüş ve 260 Hz frekans değerine sahip olan son rezonans bölgesinde önemli bir değişim meydana gelmemiştir.



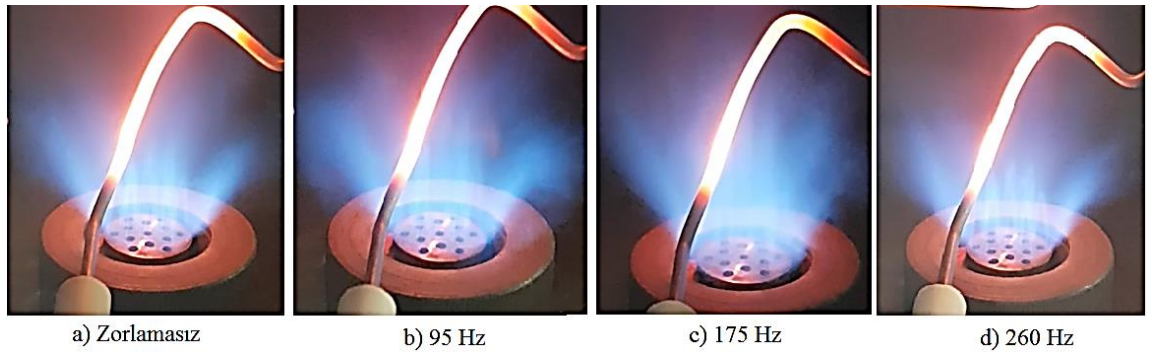
Şekil 3.7. Saf metan ışık şiddeti değişimleri a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Şekil 3.7b'de saf metanın hacimsel olarak %24 oranında O<sub>2</sub>'ye sahip ile yakılması sonucunda ortaya çıkan ışık şiddeti değişimleri gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde zorlamasız durumda 32,5 mV olarak ölçülen alev parlaklık değeri 95 Hz frekans altında 31,1 mV'ye düşerken dinamik basınç genliğinin en düşük olduğu 175

Hz frekanstaki zorlamada ilk duruma göre artış göstermiş ve 33,5 mV olmuştur. Oksijence zenginleştirme sonucunda geri tepme sinyal genliği ileri doğru kayan metan alevinin parlaklığı yüksek frekanstaki zorlama altında (260 Hz) düşerek yeniden 31,2 mV değerini görmüştür.

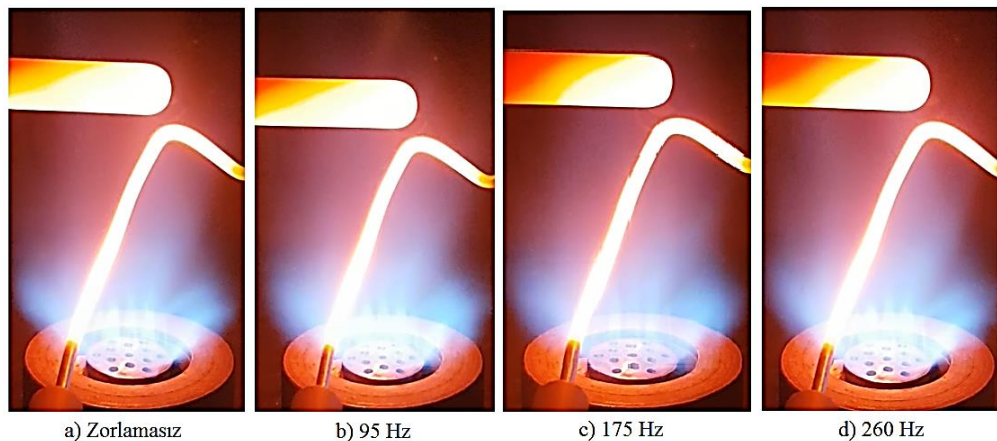
Saf metanın %26 oranında oksijence zenginleştirildiği çalışmanın yorumlanmasında önemli olan diğer bir sonuç da Şekil 3.7c'de gösterilen ışık şiddeti değerleridir. Değerler incelendiğinde zorlamasız halde 42,2 mV olan ışık şiddeti değeri, 95 Hz frekanstaki zorlama altında salınım yaparak 40,9 mV değerine kadar düşme göstermiştir. Frekans değeri yükselip bozucu etki azaldıkça ışık şiddetinde yaşanan düşüş sonlanarak tekrar zorlamasız duruma yakın değerler ölçülmüştür. 175 Hz ve 260 Hz zorlayıcı frekanslardaki ölçülen değerler sırasıyla 44 mV ve 42,16 mV olarak aynı şekilde sunulmuştur.

Bu şekillerden de anlaşılacağı gibi saf metanın %21 oranında oksijen içeren hava ile yanması büyük oranda kararlı bir alev ortaya çıkarmaktadır. Şekil 3.8'de alevin zorlamasız durumda ve farklı frekanslardaki zorlamalar altında alınan alev görüntüleri sunulmuştur. İlk görüntüde zorlamalı durumlar ile karşılaştırma yapılabilmesi için akustik zorlamanın olmadığı bir andaki alevin şekli verilmiştir. 95 Hz zorlayıcı frekanstaki görüntü ile kıyaslandığında rezonansa giren sistemde alev bölgesinde meydana gelen bozulmalar açıkça görülebilmektedir. Alev her ne kadar güçlü bir şekilde yanmaya devam etse de, boyu kısalarak yanlara doğru dağılmıştır. Benzer bozulma 175 Hz akustik zorlama altında da mevcuttur, ilk rezonans değerinden farklı olarak bu bölgedeki alevin daha kararlı olduğu gözlemlenebilmektedir. Son rezonans değerimiz olan 260 Hz frekansta ise zorlamasız duruma kıyasla neredeyse hiçbir değişiklik olmamıştır. Ölçüm aletlerinden alınan kararlılık verileri ve alev görüntüleri karşılaştırıldığı zaman benzer sonuçların ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 3.8. Saf metan-hava yanmasının alev görüntüleri

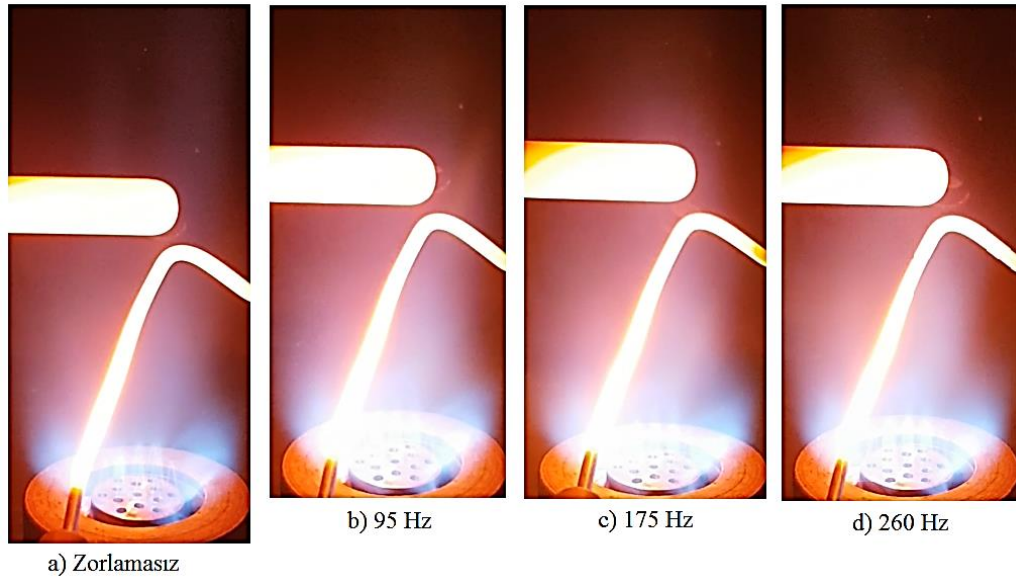
Saf metanın %24 oksijen içeren hava ile yakıldığı bu deneyde ilk durumda akustik zorlamanın olmadığı bir anda alev görüntüsü alınmıştır. Şekil 3.9'da sunulan görüntülerde uzun ve parlak bir görüntü sergileyen alev akustik zorlama altında rezonans değerine girdikçe küçülerek yakıcı içerisine doğru geri çekilmiştir. Basınç dalgalanmalarının en düşük olduğu 175 Hz frekanstaki zorlama anında alınan görüntüler başlangıç anına en yakın olarak görülmektedir. Özellikle yüksek frekanstaki zorlamanın oksijence zenginleştirilmiş metan yanması üzerindeki etkisi 260 Hz frekans değerindeki alev görüntülerinden açıkça belli olmaktadır. Alev bu noktada bozulmaya uğrayarak salınımlı bir halde yanmaya devam etmiş ve kararsızlaşmıştır. Meydana gelen kararsızlığa rağmen alev yanmayı sürdürmüştür.



Şekil 3.9 Saf metanın %24 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

Şekil 3.10'da, içerisinde %26 oranında oksijen içeren hava ile yakılan metanın farklı frekanslardaki akustik zorlamalar altında alev görüntülerinde yaşanan değişimler gösterilmiştir. Zorlamasız durumda yüksek bir parlaklığa sahip alevin boyu da şekilde görülen ısıl çiftin üzerindedir. Alev merkezi incelendiği zaman bu yüksek alev boyundan dolayı daha az yoğun bir merkez oluşumu gözle görülebilmektedir. Buna

karşılık 95 Hz ve 175 Hz akustik frekans değerlerinde alev boyunda bir miktar küçülme olarak yakıcı içerisine doğru geri çekilmiş ve taban bölgesinde yoğunlaşmıştır. Zorlamasız durumda yakıcı çıkış delikleri düşük alev yoğunluğundan dolayı rahat bir şekilde görülürken, zorlamalı durumlarda bu görüntü bozulmuştur. 260 Hz frekansta ise alev şekli tekrar zorlamasız duruma yakın bir hale gelmiş ve boyu uzamıştır.

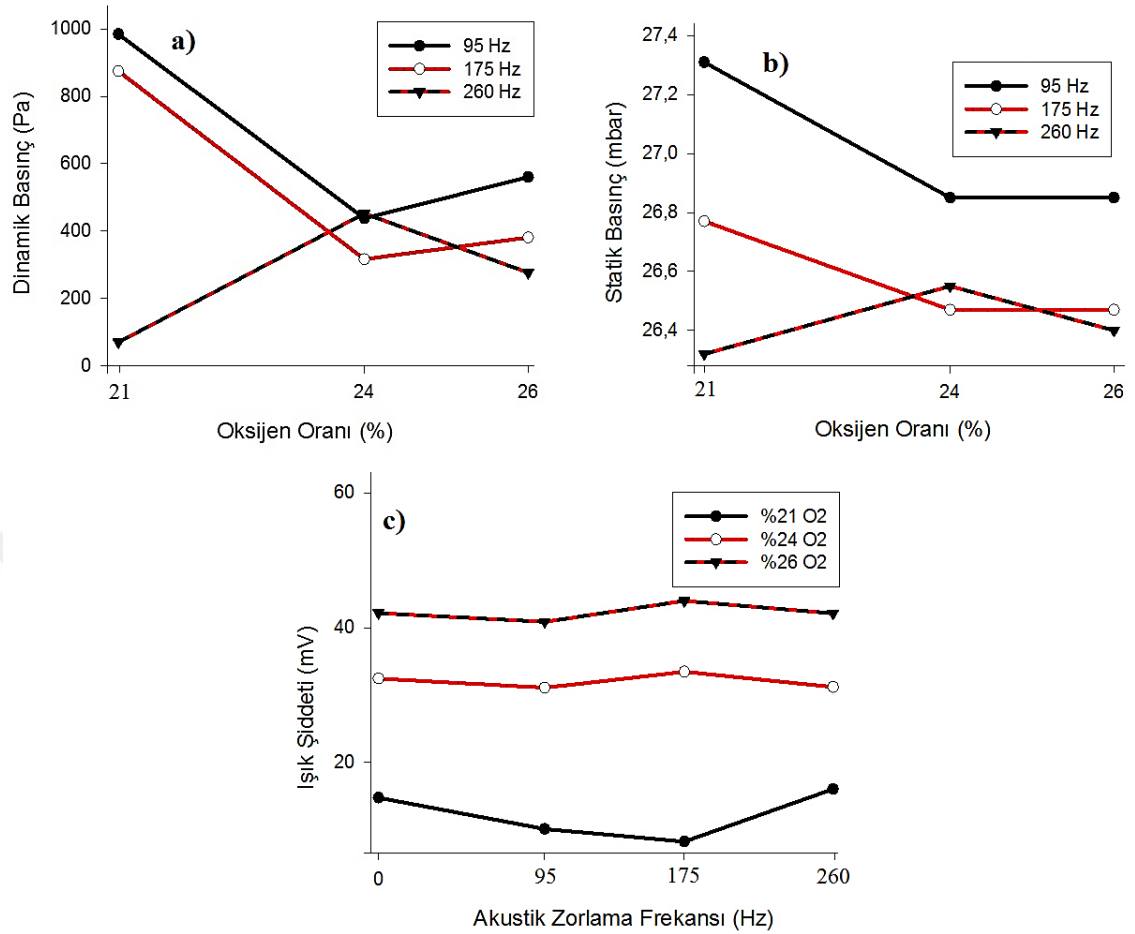


Şekil 3.10 Saf metanın %26 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

Saf metan yanmasının farklı oksijen oranlarındaki yanma kararlılığının yorumlanmasında kullanılan deneysel veriler her bir oksijen oranı için ayrı bir şekilde gösterilmiş ve detaylı olarak açıklanmıştır. Oksijence zenginleştirmenin etkisinin daha belirgin bir şekilde anlaşılabilmesi için farklı oksijen oranlarındaki kararlılığı etkileyen değişimler Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

Sistemin ilk akustik rezonans değeri olan 95 Hz’de saf metan ile doğrudan havanın yakılması durumunda alev zorlanmış ve dinamik basınçta dalgalanmalar meydana gelmiştir. En büyük ve en küçük basınç değerleri arasındaki farka bakıldığında 985 Pa değeri ortaya çıkmıştır. Aynı değere %24’lük oksijen oranı için bakıldığında ise 438 Pa görülmektedir. Bu durum saf metanın %24’lük oksijence zenginleştirilerek yakılmasının hava ile yanmaya göre daha kararlı olduğunu açıklamaktadır. Diğer bir oksijence zenginleştirme oranı olan %26 O<sub>2</sub> değerine baktığımızda ise dinamik basınç dalgalanmaları tekrardan artış göstererek 560,4 Pa değerinde ölçülmüştür.

175 Hz frekanstaki zorlama altında yapılan kıyaslamada ise hava ile yanma durumunda 875 Pa olan dinamik basınç dalgalanması, %24 oksijence zenginleştirme oranında yine yarıdan fazla düşerek 317 Pa'ya gerilemiştir. Zenginleştirme %26'e çıktığında ise 381 Pa genlik ile yine %20 ye yakın bir değerde artış göstererek kararlılık bozulmaya başlamıştır. Kararsızlık mekanizmasının akustik zorlamalar altında ters bir görüntü çizdiği tek frekans ise 260 Hz olmuştur. Yüksek frekanslı zorlamalar altındaki yanma kararsızlıklarının düşük frekanslara göre farklı sonuçlar vermesinden dolayı Wang et al., yaptıkları çalışmada %40'a kadar hidrojen ilaveli bir metan karışımının akustik zorlama altındaki davranışlarını farklı iki ayrı frekans aralığında incelemişlerdir. Bunun sebebi olarak da yakıt karışımı içerisine eklenen bileşenlerin ısı salınım frekanslarının farklı olmasıdır. Bu salınım frekanslarının, akustik zorlama frekans şiddeti ile çakışma durumuna göre kararlılıkta değişimlerin olduğu belirtilmiştir [44]. Bu tez çalışmasında da literatürdekine benzer şekilde 95 Hz ve 175 Hz frekans değerlerinde alınan veriler ile 260 Hz frekanstaki zorlama altında alınan değerler genellikle ters ilişkili hareket etmiştir. 260 Hz frekanstaki akustik zorlama altında alınan veriler; hava ile yanma durumunda 70,43 Pa olan dinamik basınç salınımı ortaya çıkmış ve alevde hiçbir kararsızlık ve salınım görülmemiştir. Buna karşılık oksijen oranı %24'e çıkarıldığında kararsızlık artarak salınım 452,13 Pa olarak ölçülmüştür. Oksijen oranı metanın maksimum oksijence zenginleştirme oranına yaklaştıkça alevdeki kararlılıkta küçük bir artış meydana gelerek 276,7 Pa dinamik basınç genliği meydana gelmiştir.



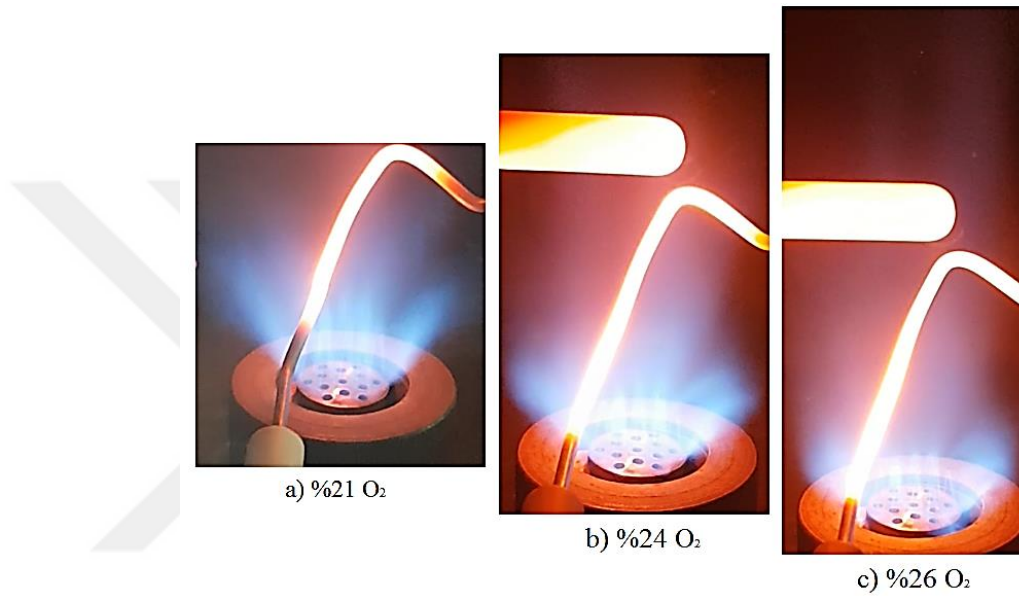
Şekil 3.11. Oksijence zenginleştirmenin saf metan yanmasında kararsızlığa etkisi a)

Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti

Saf metan yanmasının farklı oksijence zenginleştirme değerlerindeki ışık şiddeti değişimleri ise yine alev kararlılığını değerlendirme açısından önemli bilgiler vermektedir. Şekil 3.11c'de farklı oksijence zenginleştirme oranlarında ışık şiddeti değerleri sunulmaktadır. Buna göre hava ile yanma, % 24 ve % 26 oksijence zenginleştirme oranlarında ölçülen sırasıyla 14,78 mV, 32,5 mV ve 42,2 mV değerleri oksijen oranı artışının saf metan yanmasında alev parlaklığını artırdığını ispatlamaktadır. Bunun sebebi karışım içerisindeki oksijen oranı arttıkça alevin daha yoğun bir hale gelerek ışık şiddetinin artmasıdır [82]. Ayrıca Şekil 3.12'de saf metanın hava ve oksijence zenginleştirilmiş hava ile yanma durumlarında ortaya çıkan alev görüntüleri gösterilmiştir. Alev görüntülerinde yaşanan parlaklıktaki artış gözle de görülebilmektedir.



Basınç ve ışık şiddeti ölçümlerinden aldığımız sonuçlara bakıldığında oksijence zenginleştirme neticesinde laminer yanma hızının termal etki ile önemli ölçüde artması neticesinde %24 O<sub>2</sub> oranı saf metan yanmasını kararlılık açısından iyileştirmiştir. Karışımın maksimum zenginleştirme sınırı olan % 27,6 oranına yaklaştıkça azalan alev kalınlığı ve artan yoğunluk oranının etkisi ile Markstein uzunluğunun azalması ve hidrodinamik kararsızlıklar, kararlılığı tekrardan düşürmüştür [31].

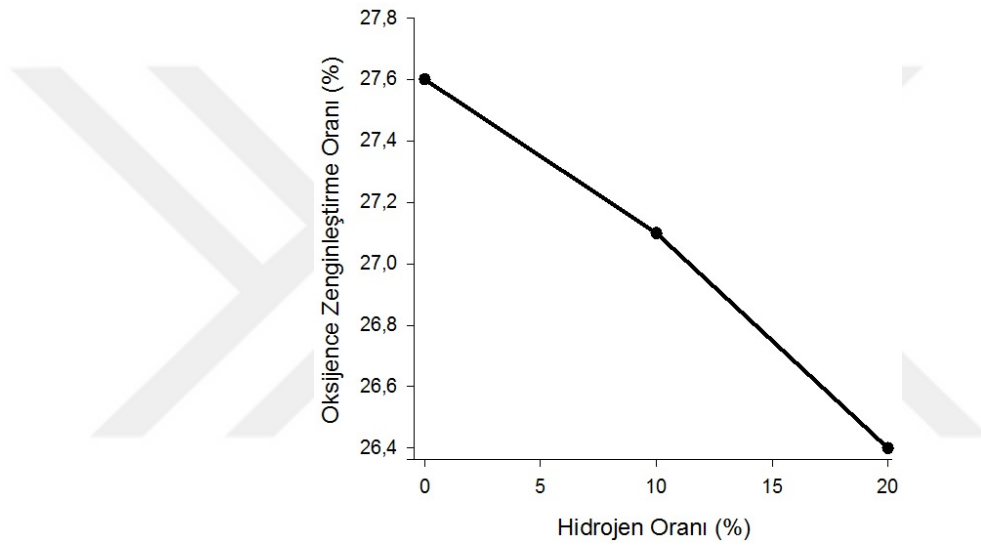


Şekil 3.12. Oksijence zenginleştirmenin saf metan alev görüntüsüne etkisi

### 3.3.2. Oksijence Zenginleştirmenin CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> Karışımlarının Yanma Kararsızlığına Etkisi

Bu bölümde, metan içerisine hacimsel oranda %10 ve %20 H<sub>2</sub> ilave edilmiş ve farklı akustik zorlama frekanslarında kararsızlık değişimleri incelenmiştir. Hidrojence zenginleştirilmiş metan gazının akustik zorlamalar altındaki yanma kararsızlıklarının incelenmesinden önce akustik zorlama olmaksızın hidrojen ilavesinin metanın oksijence zenginleştirilebilme limitine olan etkisi belirlenmiştir. Şekil 3.13'te görüleceği gibi metan içerisine hiçbir yakıtın ilave edilmediği durumda kararlı yanabildiği maksimum oksijen oranı %27,6 iken, içerisine hacimsel olarak %10 H<sub>2</sub> ilave edilmesi sonucunda bu limit %27,1'e düşmüştür. CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> içerisindeki hidrojen oranı %20'ye çıkarıldığında ise maksimum O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> oranı %26,4 olarak belirlenmiştir. Bu oksijen oranının üzerine çıkıldığında ise akustik zorlamanın olmadığı yanma şartlarında dahi kararlı bir alev ortaya çıkmamıştır. Bu açıklamadan anlaşılacağı gibi metan içerisine yapılan hidrojen

ilavesi arttıkça yakıt karışımının oksijence zenginleştirilebilme limiti düşmektedir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, hidrojenin en belirgin özelliklerinden birisi, laminer yanma hızının diğer yakıtlara göre çok yüksek oluşudur [61]. Hidrojenin sebep olduğu laminer yanma hızı artışına ek olarak oksijence zenginleştirme işlemlerinin de metan içerikli yakıt karışımlarında laminer yanma hızı artışına sebep olduğu bilinmektedir [38]. Yanma hızını artıran iki bileşenin aynı anda karışım içerisinde artırılması alevde kararsızlıkların ortaya çıkmasına ve geri tepme eğiliminin artarak alevin kaybolmasına sebep olmuştur.



Şekil 3.13. Hidrojen ilavesinin oksijence zenginleştirme limitine etkisi

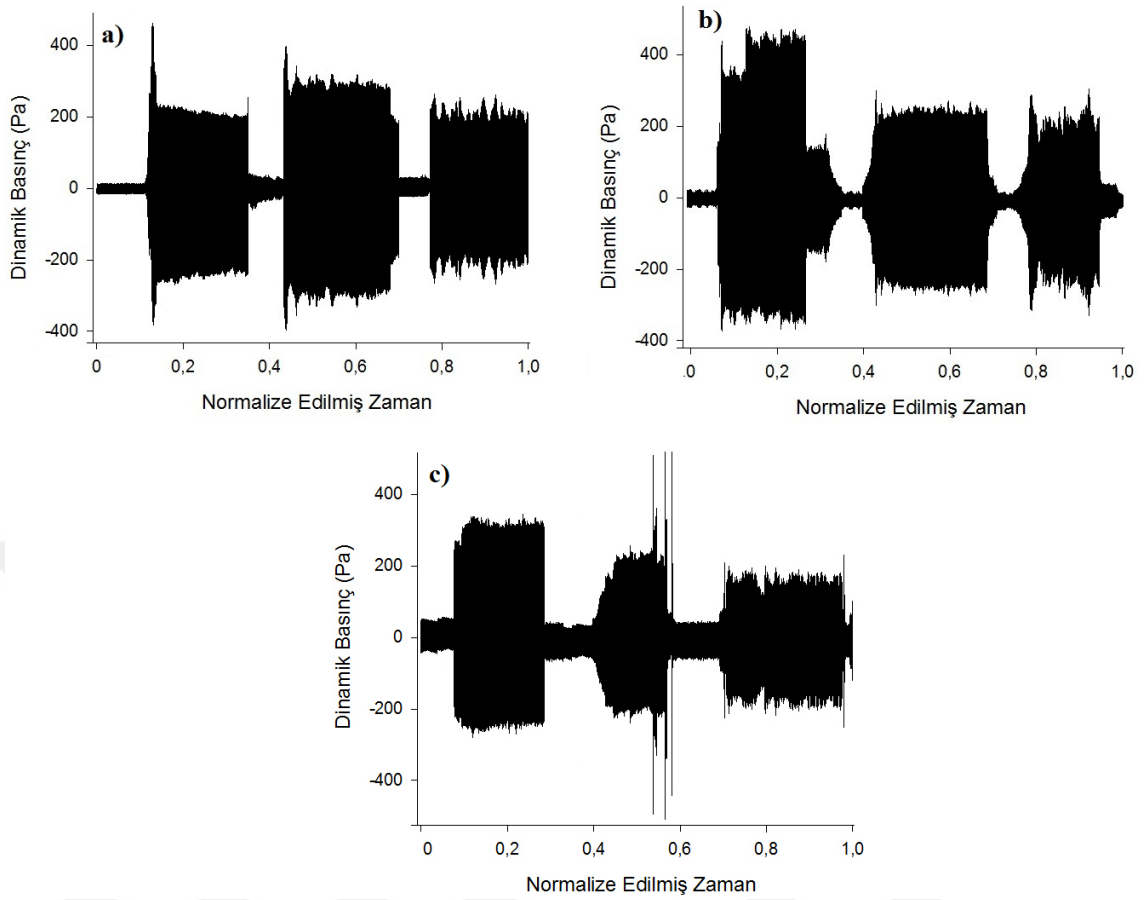
Oksijence zenginleştirme limitleri belirlenen yakıtlar daha sonra sırasıyla %24 ve %26  $O_2$  oranlarında yakılarak farklı akustik zorlayıcı rezonans frekanslarında kararsızlık ölçümleri alınmıştır. Yanma odası kollarında bulunan iki adet hoparlör ile dıştan zorlanan yanmada saf metan yanmasında olduğu gibi dinamik basınç, statik basınç ve ışık şiddeti değerleri kaydedilmiştir. Hidrojence zenginleştirilmiş yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirilmesi bakımından saf metanla kıyaslanabilmesi için öncelikle her bir karışım için kararsızlığı belirleyen değerler sunulmuştur. Daha sonra verilen değerler saf metan yanması, %10  $H_2$  ve %20  $H_2$  oranları için bir şekil üzerinde özetlenmiştir.

$CH_4/H_2$  karışımlarından %90  $CH_4$  - %10  $H_2$  karışımının hava ile yanması durumunda ortaya çıkan dinamik basınç salınım değerleri Şekil 3.14a'da gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi, en düşük rezonans frekansı olan 95 Hz frekansta alev zorlandığında en yüksek ve en düşük dinamik basınç değerleri arasında 846 Pa genlik ölçülmektedir. Rezonanstan çıkılarak 175 Hz akustik frekansa doğru ilerlendiğinde ise

bu frekans değerinde 793,7 Pa genlik ortaya çıkmıştır. Bozucu etkinin genellikle daha küçük olduğu yüksek frekanslı akustik zorlama olan 260 Hz frekansta ise dinamik basınç genliği 532,3 Pa değerine kadar gerilemiştir. Alınan sonuçlar saf metan yanmasına benzer şekilde değişim göstermesine rağmen hidrojen ilavesi sonucunda yüksek akustik zorlama frekansı altındaki alevin hidrojen ilavesiyle daha kararsız olduğu gözlemlenmiştir. Ortaya çıkan kararsızlıklar sebebiyle alevde titreşimler meydana gelse de bütün zorlama şartlarında kararlı bir yanma devam etmiş, hacimsel olarak %10 H<sub>2</sub> içeren karışımın %21 oranında oksijen içeren standart hava ile yakılması sonucunda herhangi bir geri tepme ve sönme olmamıştır.

şekil 3.14b'de ise aynı yakıt karışımının %24 oranında oksijenle zenginleştirilerek yakılması esnasında dinamik basınç dalgalanmaları görölmektedir. 95 Hz frekanstaki akustik zorlama altında 852,9 Pa genlikte salınım yapan metan/hidrojen alevi 175 Hz frekanstaki rezonans değerine getirilip burada zorlamaya maruz bırakıldığı zaman ise 602,7 Pa genlikteki bir dinamik basınç salınımına maruz kalmıştır. Diğer taraftan üçüncü akustik rezonans değeri olan 260 Hz frekans altında zorlama yapıldığında ise bu değer 636,4 Pa değerine çıkmıştır. Alev bütün zorlamalarda kararlı bir şekilde yanmaya devam ederken özellikle son akustik rezonans esnasında dinamik basınç salınım genliğine bir artış gözlemlenmiştir.

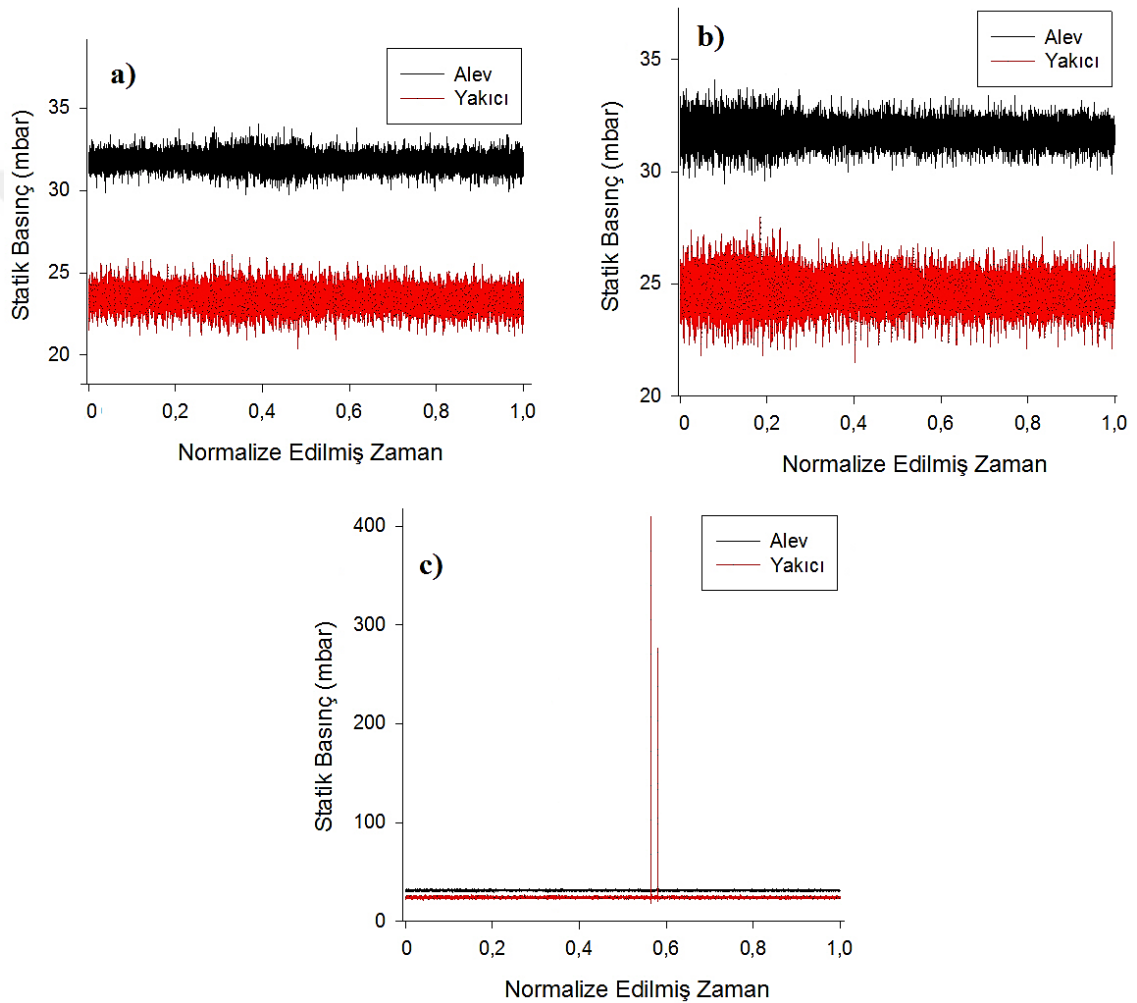
Son oksijence zenginleştirme oranı olan %26 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanma işleminde ortaya çıkan dinamik basınç salınım değerleri ise şekil 3.14c'de sunulmaktadır. Yüksek oranda oksijenle zenginleştirilen yakıt karışımının akustik zorlamalar karşısında gösterdiği tepki ise; 95 Hz frekans altında 618,2 Pa olan salınım değeri, 175 Hz ve 260 Hz frekanslarda sırasıyla 1029,3 Pa ve 417,2 Pa olarak ölçölmüştür. Bu yakıt karışımında özellikle 175 Hz frekans altındaki akustik zorlamada ortaya çıkan kararsızlık dikkat çekmektedir.



Şekil 3.14. %10 H<sub>2</sub> içeren metan alevinin dinamik basınç dalgalanması a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Şekil 3.15'te aynı karışımın hava ile yanması durumunda yakıcı içerisinde ve alev bölgesinde meydana gelen statik basınç değişimleri sunulmuştur. Yakıcı içerisindeki statik basınç değişimleri üç farklı rezonans değeri için de incelendiğinde 95 Hz, 175 Hz ve 260 Hz frekanslardaki akustik zorlamalarda maksimum değer sırasıyla 26,09 mbar, 25,71 mbar ve 25,55 mbar olarak görülmektedir. Yanma esnasında alev kararsızlıklarından dolayı alev geri tepmesi meydana gelmediği için statik basınç değerlerinde de büyük bir değişim görülmemiştir. Dinamik basınç değerlerine benzer şekilde bütün zorlayıcı frekanslarda alevin yanmaya devam ettiği anlaşılırken, zorlayıcı frekans büyüdükçe maksimum statik basınç değeri daha aşağı çekilmiştir. Oksijence zenginleştirmenin başladığı %24 O<sub>2</sub> oranındaki deneyde 95 Hz frekans altında yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç değeri 28 mbar olarak ölçülmüştür. Zorlayıcı frekans 175 Hz'e getirildiğinde ise 27 mbar'a kadar gerilerken bu frekanstan sonra 260 Hz frekansa gelindiğinde statik basınçta önemli bir değişiklik olmayarak 27,08 mbar değeri tespit edilmiştir.

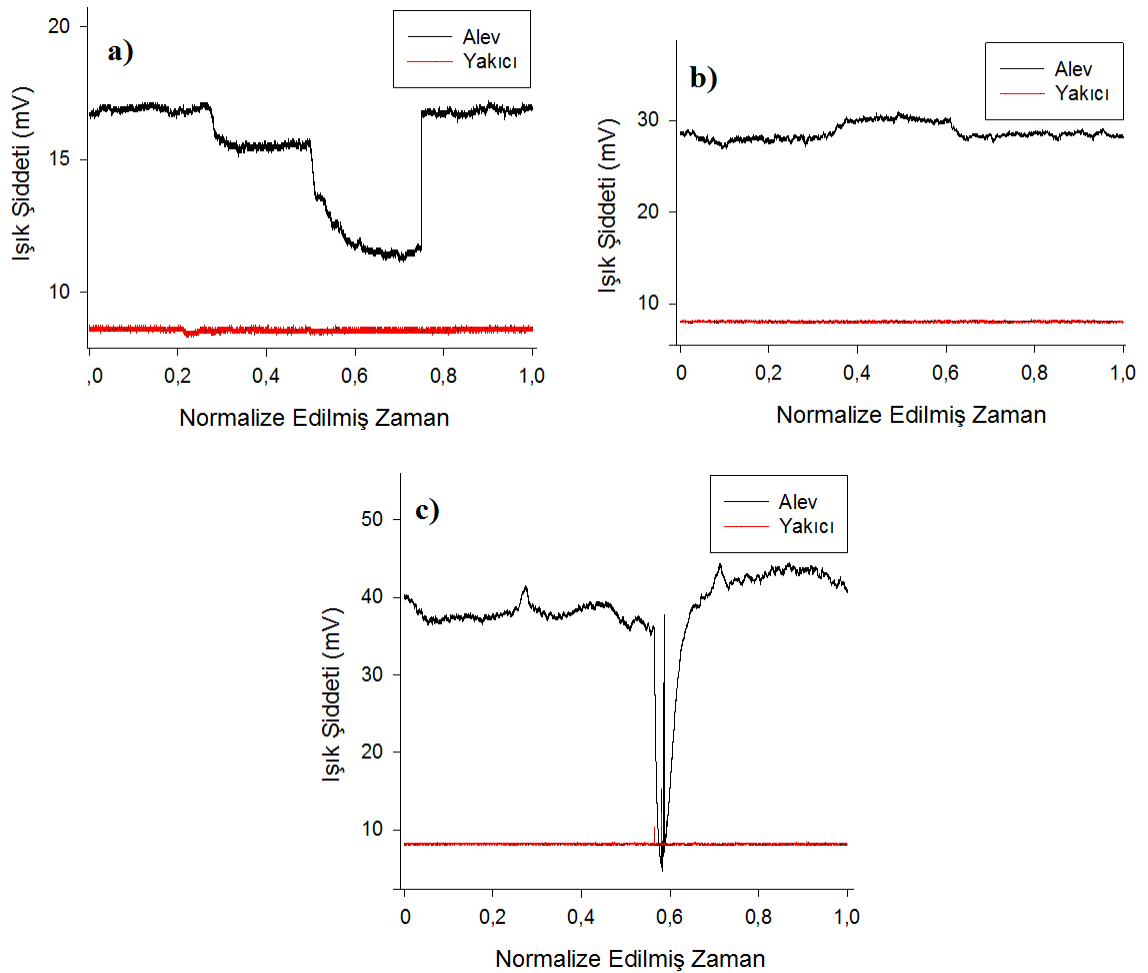
Hacimsel olarak %10 oranında H<sub>2</sub> ilave edilmiş metanın %26 O<sub>2</sub> ile yakılması durumunda ise alevin kararsızlığı açısından önemli bir değişiklik meydana gelmiştir. 95 Hz ve 260 Hz frekans değerlerinde 26,8 mbar ve 26,5 mbar gibi çok küçük aralıklarda değişen maksimum statik basınç büyüklüğü, 175 Hz frekans altında 410,15 mbar gibi büyük bir değişim göstermiştir. Bu durum alevin kararsızlık rejimine girdiğini fakat halen yanmanın devam edebildiğini göstermektedir.



Şekil 3.15. %10 H<sub>2</sub> içeren metan alevinin statik basınç değişimi a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Dıştan akustik zorlama altında yanma kararsızlıklarının değerlendirilmesinde kullanılan bir diğer deney sonucu ise ışık şiddeti değişimleridir. %21 oksijen oranındaki standart hava ile yapılan yanma işleminde ortaya çıkan ışık şiddeti değişimleri Şekil 3.16'da gösterilmektedir. %10 H<sub>2</sub> içeren yakıt karışımının hava ile yakılması durumunda zorlamasız koşulda 16,88 mV olarak ölçülen ışık şiddeti 95 Hz frekanstaki akustik zorlama altında 15,45 mV değerine gerilemiştir. Sistemin rezonans değerinde

kararsızlaşarak parlaklığını kaybeden alev 175 Hz frekanstaki rezonans değerine geldiğinde ise yakıcı içerisine doğru çekilip parlaklığını ve uzunluğunu kaybetmiştir. Dinamik basınç değişimlerinde de alevi en az etkileyen zorlama değeri olan 260 Hz frekansta ise göze çarpan bir kararsızlık yaşanmayarak alev eski parlaklığına kavuşmuştur. Oksijence zenginleştirilmiş yakıt karışımının akustik zorlanması altındaki ışık şiddeti incelendiğinde ise; %24 O<sub>2</sub> oranında zorlamasız durumda 28,2 mV olan ışık şiddeti 95 Hz zorlayıcı frekans altında 26,9 mV seviyesine gerilemiştir. Akustik zorlama frekansı artırıldıkça sırasıyla 175 Hz ve 260 Hz frekanslarda da ışık şiddetinde belirgin bir değişiklik meydana gelmemiştir. 30,9 mV ve 28,3 mV değerleri ölçülerek alev kararlı bir şekilde yanmaya devam etmiştir.

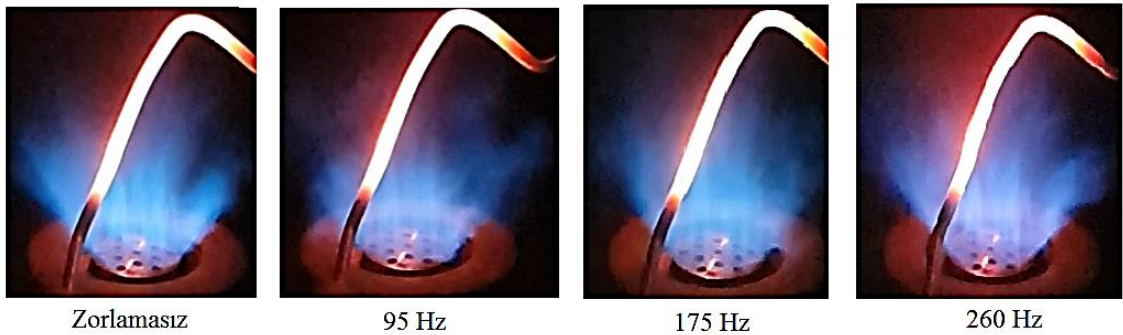


Şekil 3.16. %10 H<sub>2</sub> içeren metan alevinin ışık şiddeti değişimi a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Dinamik ve statik basınç değerlerinden elde edilen sonuçlara benzer bir şekilde %10 hidrojen ilaveli yakıt karışımını %26 O<sub>2</sub> oranında özellikle 175 Hz zorlayıcı frekans

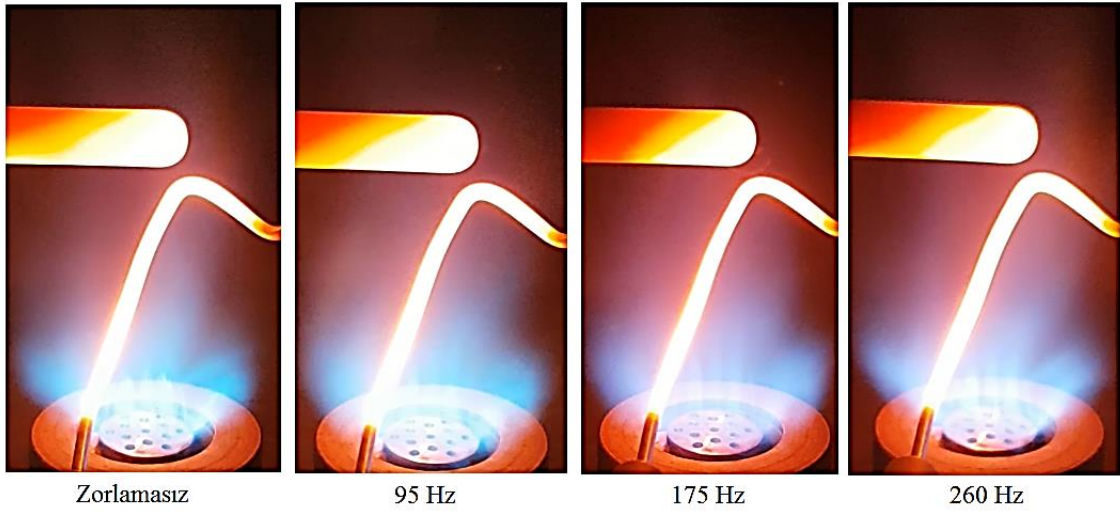
altında kararsızlığa maruz kalmıştır. Akustik zorlama olmaksızın alınan değerlerde 39,1 mV olan ışık şiddeti 95 Hz frekans altında küçük bir düşüşle 36,5 mV'ye gerilemiştir. Kararsızlığın arttığı 175 Hz frekansında ise yakıcı içerisine doğru çekilerek ışık şiddeti 4,73 mV değerine kadar düşmüştür. Bu düşüş büyük bir kararsızlığın ortaya çıktığını ve alevin geri tepme eğiliminin arttığını göstermektedir, buna rağmen alev yanmaya devam etmiştir. Zorlayıcı etkisi önceki rezonans değerlerinden daha düşük olan 260 Hz frekansta ise ışık şiddeti tekrardan 42,1 mV değerine gelerek kararlı bir yanma meydana gelmiştir.

Şekil 3.17'de %10 H<sub>2</sub> ilaveli yakıt karışımının hava ile yanması esnasında farklı zorlama frekansları altındaki alev görüntüleri verilmiştir. Bu görüntülere göre zorlamasız anda kararlı bir şekilde yanan alev 95 Hz akustik frekans altındaki zorlamada salınımlı bir şekilde yanmaya başlamış ve merkezden etrafa doğru yayılarak düzensizleşmiştir. 175 Hz frekansta da halen kararsız bir yanma gösteren alev bu bölgedeki zorlamaya da direnmiş ve 260 Hz zorlayıcı frekansta küçük bir miktar bozulma olsa da zorlamasız haldeki görüntüsüne en yakın şekle gelmiştir.



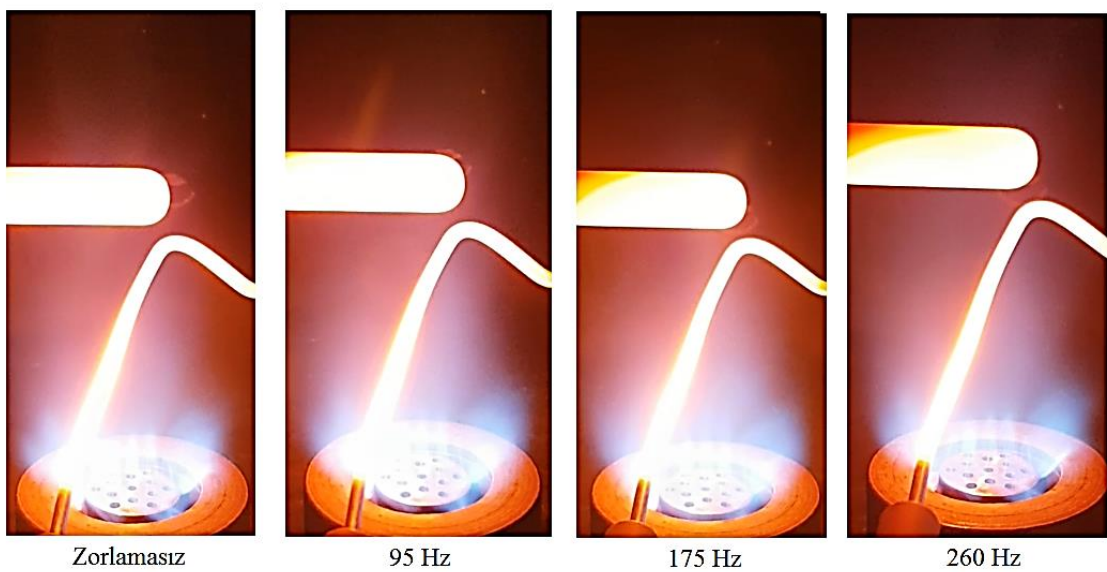
Şekil 3.17. %10 H<sub>2</sub> ilaveli metanın %21 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

%24 oranında oksijenle zenginleştirilmiş yakıt karışımının akustik zorlamalar altındaki alev görüntüleri Şekil 3.18'de verilmektedir. Hava ile yanma durumlarına göre kararlılığında farklılık ortaya çıkmayan alev en fazla ilk akustik rezonans frekansı olan 95 Hz'de bozulma yaşarken diğer rezonans değerlerinde başlangıç şekline benzer durumu göstermiştir.



Şekil 3.18. %10 H<sub>2</sub> ilaveli metanın %24 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

Şekil 3.19'da yüksek oranda oksijenle zenginleştirilmiş alevin görüntüleri görülmektedir. Zorlamasız durumda ısıl çiftin çok daha üzerine çıkan alev 95 Hz frekans altında geriye doğru çekilerek biraz daha yoğunlaşmıştır. Dinamik basınç salınımlarının en yüksek olduğu 175 Hz frekans altındaki zorlamada ise parlaklığı ve uzunluğu azalarak girdap üreticisinin içerisine doğru çekilmiş ve alevin tabanında bulunan girdap üreticinin delikleri yoğunlaşan alev yapısından dolayı daha az görünür hale gelmiştir. Deneylerin yapıldığı son akustik rezonans değeri olan 260 Hz frekansta ise alev zorlamasız durumdaki parlaklık ve uzunluğuna yakın bir hale gelmiştir.

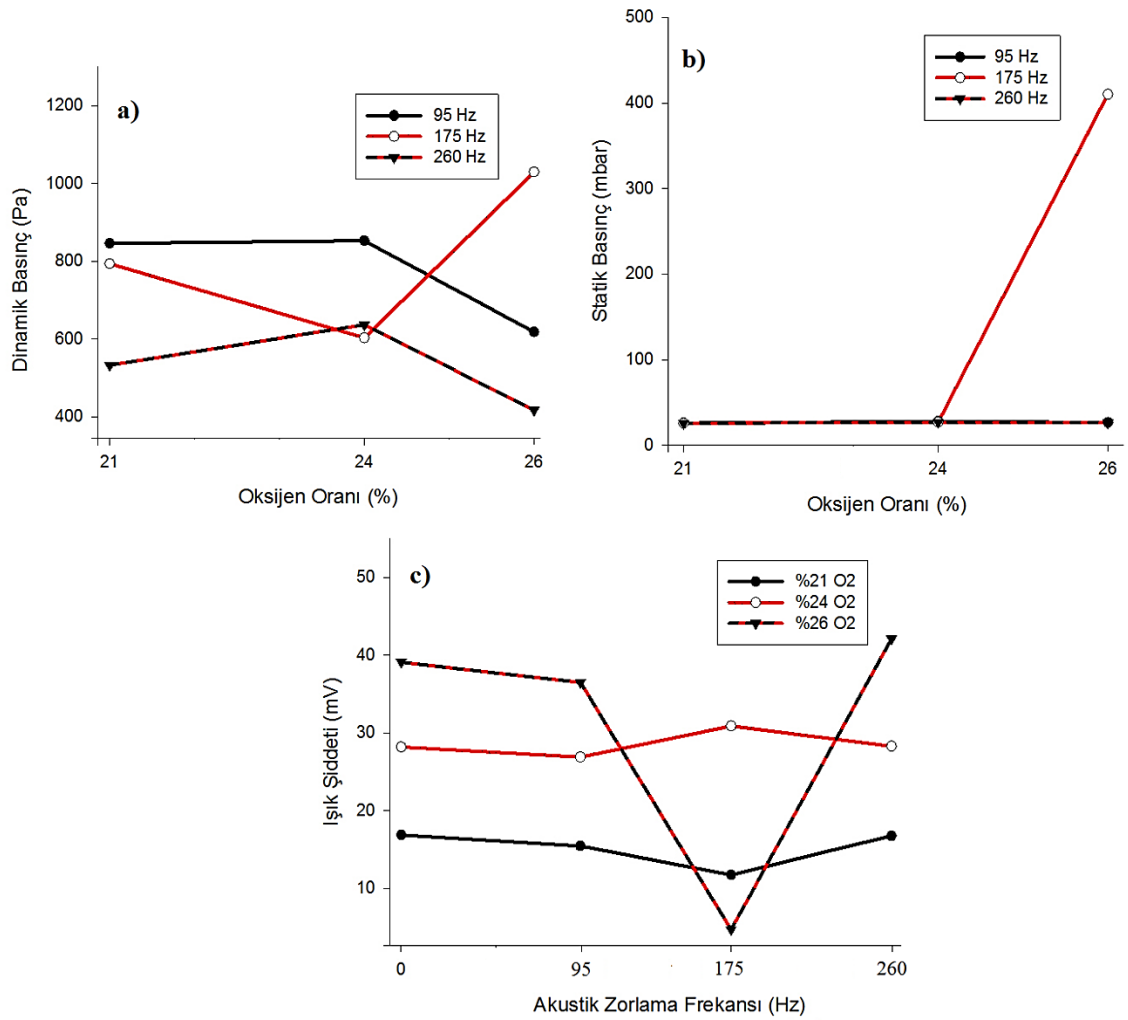


Şekil 3.19. %10 H<sub>2</sub> ilaveli metanın %26 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri



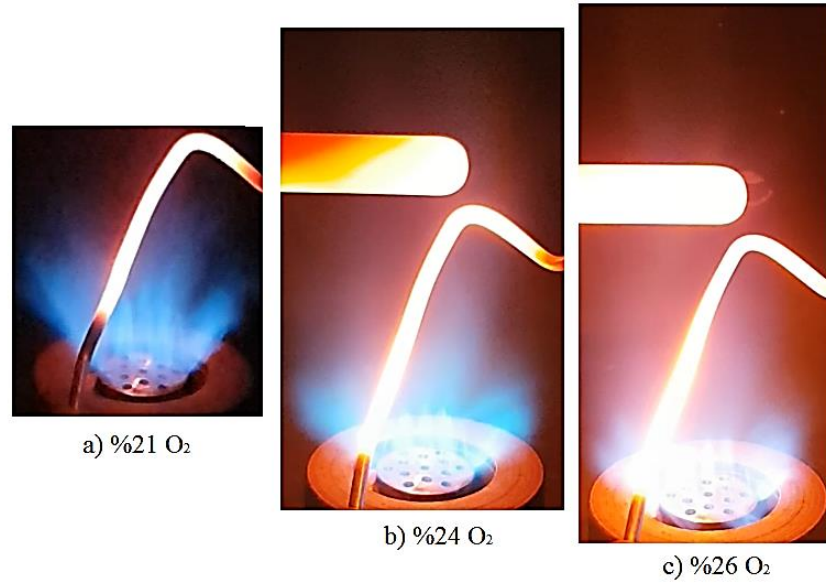
Hava ile yanma ve farklı oksijence zenginleştirme oranlarında dinamik basınç salınımı, maksimum statik basınç ölçümü ve ışık şiddeti değişimleri ayrıntılı bir şekilde verilen %90 CH<sub>4</sub> - %10 H<sub>2</sub> karışımının oksijence zenginleştirme oranlarına göre kararlılık değişiminin daha kolay anlaşılabilmesi için Şekil 3.20'de kararsızlığı etkileyen değerlerin değişimleri verilmiştir.

Hem dinamik basınç hem de statik basınç değerleri incelendiği zaman %10 hidrojen ilave edilmiş metan içeren bir yakıtın oksijence zenginleştirilmesi durumunda alev kararlılığı olumlu bir değişim göstermemiştir. %24 oksijence zenginleştirme oranında kararlılık neredeyse aynı kalmıştır. Sadece dinamik basınç değerlerine bakıldığında 95 Hz rezonans değerinde %26 oksijence zenginleştirmede ve 175 Hz'de %24 O<sub>2</sub> oranında deney sisteminin hata payı sınırları içerisinde sapmalar meydana gelmiştir. Oksijen ilavesi ile beraber laminer yanma hızı ve Lewis sayısındaki artışlar hidrojen ilavesiz bir yakıtta kararlılığı iyileştirmiştir [31]. Reaksiyon hızının artması ile karışımdaki oksijen oranındaki %4'lük bir artış stokiyometrik bir yanma için yaklaşık %25'lik bir laminer yanma hızı artışına sebep olur [38]. Oksijene ek olarak aynı anda karışım içerisindeki hidrojen oranının artışı laminer yanma hızını daha da artırarak Markstein uzunluğunun daha fazla düşmesine sebep olmuştur. Saf metan, geri tepme sinyal genliği düşük bir yakıttır ve hidrojen ilavesi ile beraber geri tepme sinyal genliği artış göstermektedir. Özellikle 175 Hz frekans zorlama altında artan geri tepme sinyal genliğinin hidrojen ilaveli yakıtın ısı salınım frekansına yaklaşması kararsızlıkları tetiklemiştir [43]. Farklı zorlayıcı frekansların kararlılık değişimine yaptıkları monoton olmayan etkiden dolayı Wang et al., yaptıkları çalışmada kararlılık değişimlerini iki farklı frekans aralığı için ayrıca yorumlamışlardır [44]. Literatürdeki bilgilerle beraber statik ve dinamik basınç için ölçülen tüm değerleri bütün olarak ele alırsak %24 O<sub>2</sub> zenginleştirme oranında kararlılık değişmezken %26 O<sub>2</sub> oranında ise kararsızlıklar ortaya çıkmıştır. %26 O<sub>2</sub> oranındaki kararsızlık artışını 175 Hz frekansta yapılan zorlamadaki statik ve dinamik basınç artışlarından açık bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 3.20. %10 H<sub>2</sub> ilaveli yakıtta oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti

Işık şiddetinin zorlamasız ve akustik zorlamalı durumlar için oksijence zenginleştirme oranına göre değişimi de Şekil 3.20c'de sunulmuştur. Hava ile yanmada 16,88 mV olan ışık şiddeti, %24 O<sub>2</sub> oranında 28,2 mV'ye çıkmıştır. % 26 O<sub>2</sub> oranında ise daha da artarak 39,1 mV değeri elde edilmiştir. Bu durum saf metan yanmasına benzer bir sonuç olarak, daha önce açıklanan sebeplerden dolayı oksijence zenginleştirmenin ışık şiddetinde artışa neden olduğunu ortaya koymaktadır. Ek olarak Şekil 3.21'de %10 hidrojen ilaveli metan gazının oksijence zenginleştirilmesi durumunda alev parlaklığında meydana gelen artışın görülebilmesi için akustik zorlamanın olmadığı durumlar için alev görüntüleri verilmiştir.



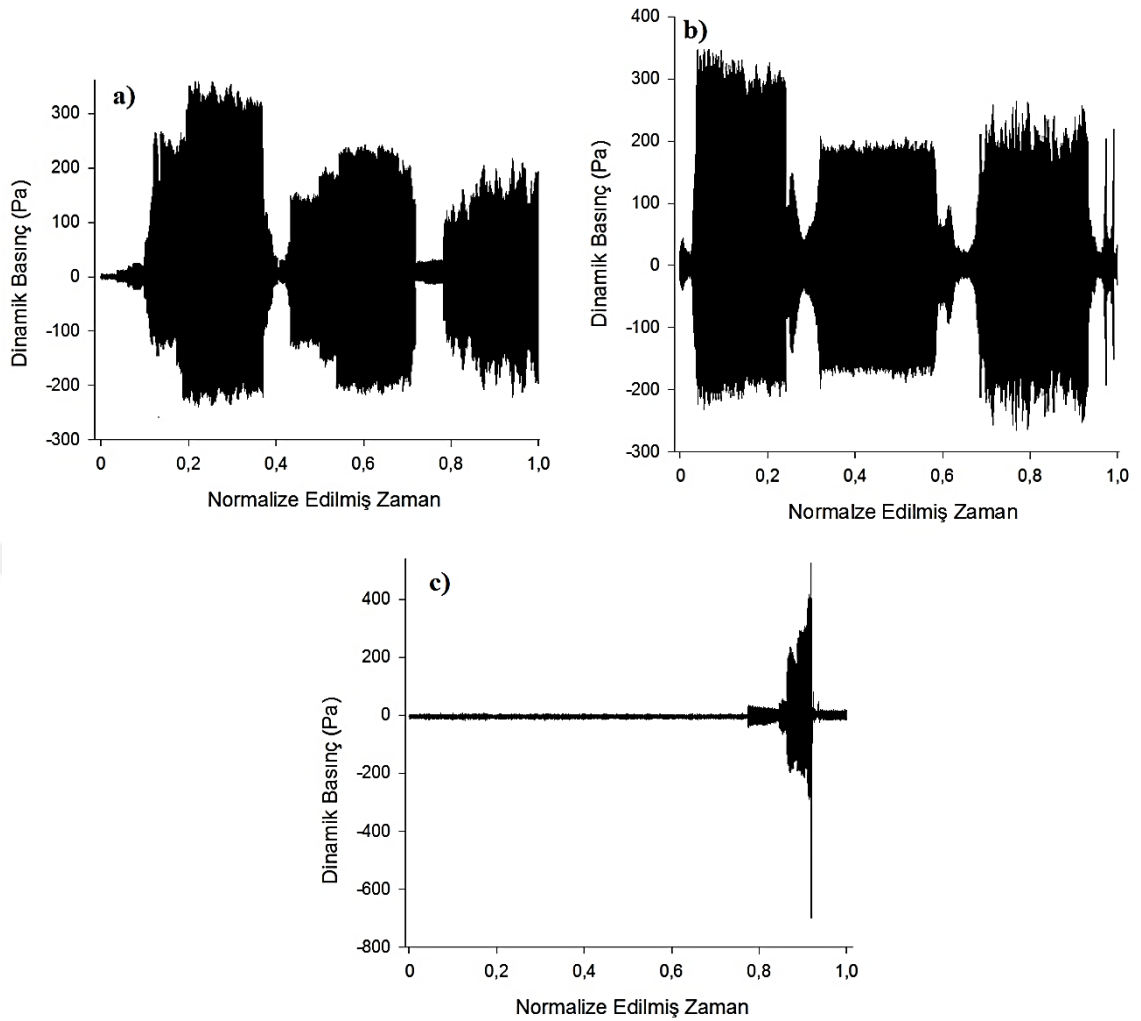
Şekil 3.21. Oksijence zenginleştirmenin %10 H<sub>2</sub> ilaveli metan alev görüntüsüne etkisi

Metan-hidrojen karışımlarının oksijence zenginleştirilmesi durumunda ortaya çıkan yanma kararsızlıklarının incelendiği bölümde diğer bir çalışma ise hacimsel olarak %20 hidrojen içeren metanın farklı oksijen oranlarında zenginleştirilmesidir. Çalışmanın bu kısmında karışım içerisindeki hidrojen oranı artırılarak hem hidrojen hem de oksijen oranındaki artışların yanma kararsızlıklarına etkisini incelemek amaçlanmıştır. Şekil 3.23a'da %80 CH<sub>4</sub> - %20 H<sub>2</sub> içeren alevin %21 oranında oksijen içeren hava ile yanma durumunda ortaya çıkan dinamik basınç salınımları gösterilmektedir. İçerisindeki hidrojen miktarı artırılan yakıt karışımı 95 Hz frekans akustik zorlama altında 629 Pa dinamik basınç genliğinde salınım göstermiş ve kararlı bir şekilde yanmaya devam etmiştir. Yanma akustik odanın ikinci rezonans değeri olarak belirlenen 175 Hz frekansta ise 469,2 Pa genliğe düşerek akustik zorlamadan daha az etkilenmiştir. 260 Hz frekanstaki rezonans değerinde ise 440,1 Pa genlikle salınımlı bir yanma yaparak yanmaya devam etmiştir.

Oksijence zenginleştirme aşamasının başladığı ilk oran olan %24 O<sub>2</sub> içeren hava ile yakılan CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> alevine ait dinamik basınç değişim görüntüleri Şekil 3.22b'de gösterilmektedir. 95 Hz frekans altında 590,18 Pa genlikle kararlı yanma gösteren oksijence zenginleştirilmiş yakıt karışımı, 175 Hz frekansa geldiğinde ise daha kararlı bir alev şekli ortaya koyarak 395,7 Pa dinamik basınç genliğiyle yanmaya devam etmiştir. Diğer yakıt karışımlarında olduğu gibi karışım O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> oranı %24'e çıkarıldığı zaman 260 Hz frekans akustik zorlama altındaki dinamik basınç

dalgalanmaları artmıştır. Bu noktadaki dinamik basınç dalgalanması 529 Pa olarak ölçülmüştür. %24 O<sub>2</sub> ile zenginleştirme esnasında alevin kararsızlık mekanizmasının düşük frekanstan yüksek frekansa doğru kaymasının temel sebebi oksijence zenginleştirme ile beraber yakıt karışımlarının yanması esnasında ortaya çıkan ısı yayılım parametrelerinin artışı olarak bilinmektedir [83]. Yine bütün zorlama frekanslarında alevde kararsızlıklar meydana gelmesine rağmen geri tepme ve sönme durumu ortaya çıkmamış alev yanmaya devam etmiştir.

Çalışmanın son zenginleştirme seviyesi olan %26 O<sub>2</sub> oranlı ile yanmada elde edilen sonuçları ise Şekil 3.22c'de sunulmaktadır. Hidrojen ilavesi artırılmış ve yüksek oksijen içeriğine sahip yakıt karışımı, akustik zorlama frekansları altında yanmaya başladığında ilk rezonans değeri olan 95 Hz frekans test edilmiş ve bu bölgede alev 1225,1 Pa dinamik basınç değişim genliği ile geri tepme yapmıştır. Oksijence zenginleştirilmiş CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> alevleri içerisinde ilk defa zorlayıcı akustik frekans altında geri tepme gerçekleşmiştir. Alevin statik basınç ve ışık şiddeti değişimleri incelendikten sonra bu durumun sebepleri açıklanacaktır.



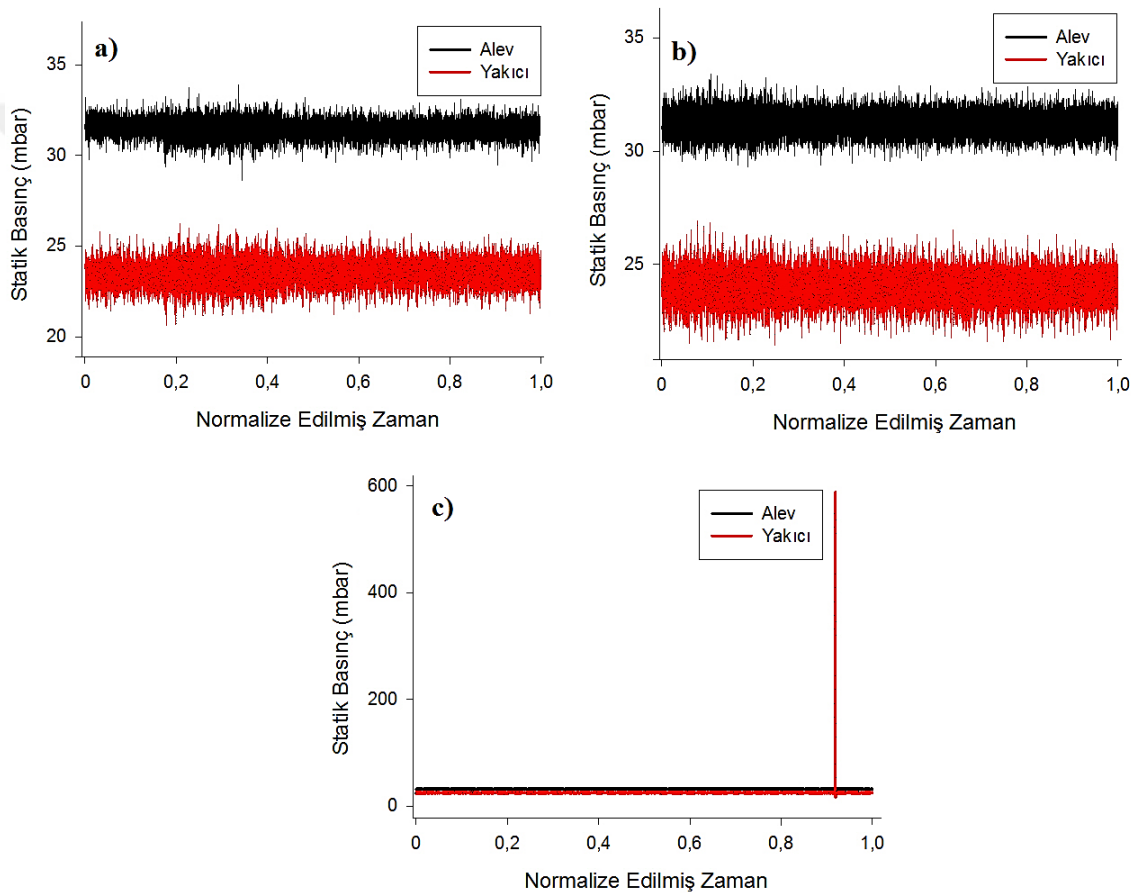
Şekil 3.22. %20 H<sub>2</sub> içeren metan alevinin dinamik basınç dalgalanması a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Dinamik basınç dalgalanmaları verilen yakıt karışımının kararsızlık mekanizmasının daha anlaşılır hale gelmesi için Şekil 3.23'te farklı oksijen oranlarında zorlayıcı akustik frekanslar altındaki statik basınç değişimleri gösterilmiştir. Bu değerlere göre yakıt karışımının hava ile yanması durumunda yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç 95 Hz frekans altında 26,24 mbar olarak ölçülmüştür. Diğer rezonans frekansları olan 175 Hz ve 260 Hz'de ise maksimum statik basınç sırasıyla 25.8 mbar ve 25.7 mbar değerlerine gerilemiştir.

Şekil 3.23b incelendiğinde ise alevde bir geri tepme veya sönme olmadığı için yakıcı içerisindeki statik basınç değerlerinde önemli bir değişim yine gerçekleşmemiştir. Yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç değerleri sistemin akustik rezonans frekanslarına göre sırasıyla 26,9 mbar, 26,3 mbar ve 26,3 mbar olarak değişmiştir. Bu şekillerden anlaşılacağı üzere büyük bir kararsızlık mekanizmasının ve dinamik basınç

değişiminin olmadığı bölgelerde statik basınç değişimleri kararsızlığı yorumlama açısından ayırt edici bir bilgi vermemektedir.

Buna karşın alevin tamamen kararsız bir yapıya bürünerek geri teptiği ve yanmaya devam edemediği %26 O<sub>2</sub> ile zenginleştirilmiş yakıt karışımında ise sistem sadece ilk akustik rezonans bölgesi olan 95 Hz frekans altında zorlanabilmiş ve bu anda dinamik basınç grafikleriyle de benzer bir ilişki göstererek 588,46 mbar statik basınçla alevde geri tepme meydana gelmiştir.

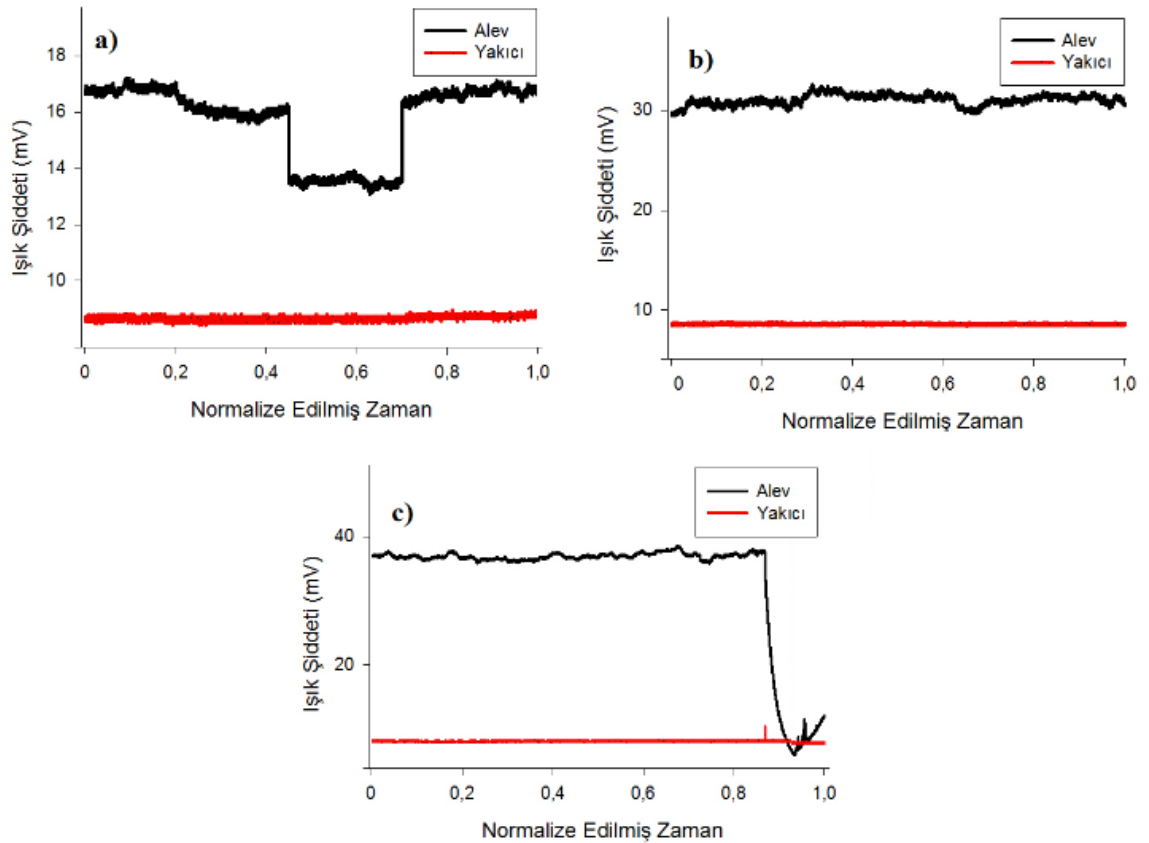


Şekil 3.23. %20 H<sub>2</sub> içeren metan alevinin statik basınç değişimi a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

Akustik zorlamanın yanma kararlılığına olan etkisinin incelenmesi için gereken diğer bir veri ise ışık şiddeti ölçümleridir. Şekil 3.24'de farklı oksijen oranlarındaki akustik zorlama altında meydana gelen ışık şiddeti değişimleri görülmektedir. %20 H<sub>2</sub> ilaveli metan yakıtının hava ile yakılması durumunda, başlangıçta 16,9 mV olarak ölçülen ışık şiddeti, 95 Hz frekansta 15,8 mV değerine gerilediği görülmektedir. Zorlayıcı akustik frekans 175 Hz'de ışık şiddeti değeri ise 13,3 mV'ye kadar düşerek parlaklığını

kaybetmektedir. Ölçüm yapılan son frekans değeri olan 260 Hz’de ise tekrardan 16,8 mV ışık şiddeti büyüklüğüne dönerek kararlı bir şekilde yanmaktadır. Şekil 3.24b’ye bakıldığında ise oksijence zenginleştirmenin %24 oranında tutulduğu karışımın ışık şiddeti değişimlerini görülmektedir. Zorlamasız durumda 29,7 mV olan değer, bütün zorlama frekanslarında önemli bir düşüş yaşamadan devam etmiş ve alev parlaklığını kaybetmemiştir. 95 Hz, 175 Hz ve 260 Hz zorlayıcı akustik frekanslar altında ölçülen büyüklükler sırasıyla 30,9 mV, 31,8 mV ve 31,7 mV olarak tespit edilmiştir.

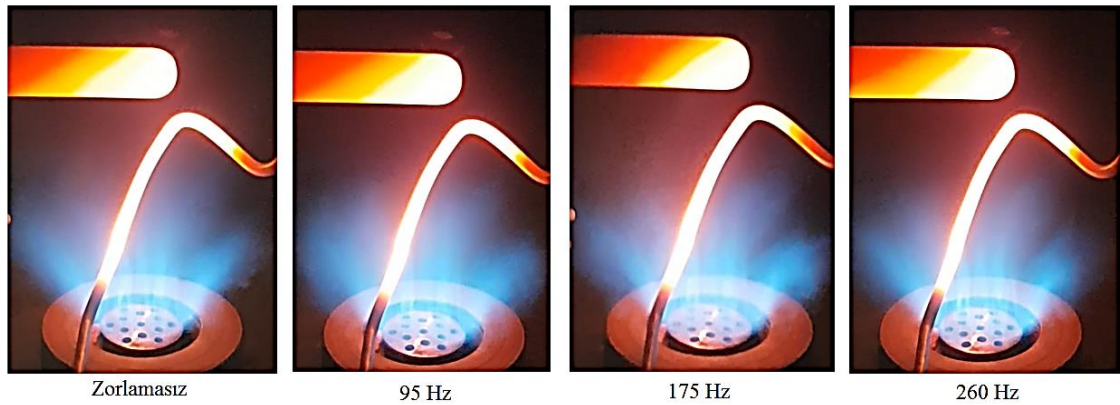
Alevin geri tepmeye maruz kaldığı %26 O<sub>2</sub> oranında ise akustik zorlamanın olmadığı durumda 36,1 mV olan alev parlaklığı alevin henüz 95 Hz frekans altında zorlandığı anda sönmekten dolayı 6,02 mV değerine düşüp tamamen yakıcı içerisine çekilmiştir.



Şekil 3.24. %20 H<sub>2</sub> içeren metan alevinin ışık şiddeti değişimi a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %26 O<sub>2</sub>

%80 CH<sub>4</sub> - %20 H<sub>2</sub> alevinin oksijence zenginleştirilmesi sonucu ortaya çıkan değişimler belirlenmiş ve bunlar sunulmuştur. Sayısal değerlerle beraber alevin yapısında meydana gelen değişimlerin gözle de incelenmesi kararsızlıkları değerlendirme açısından bilgiler verilmektedir. Şekil 3.25’de hava ile yakılan yakıt karışımının farklı anlardaki alev

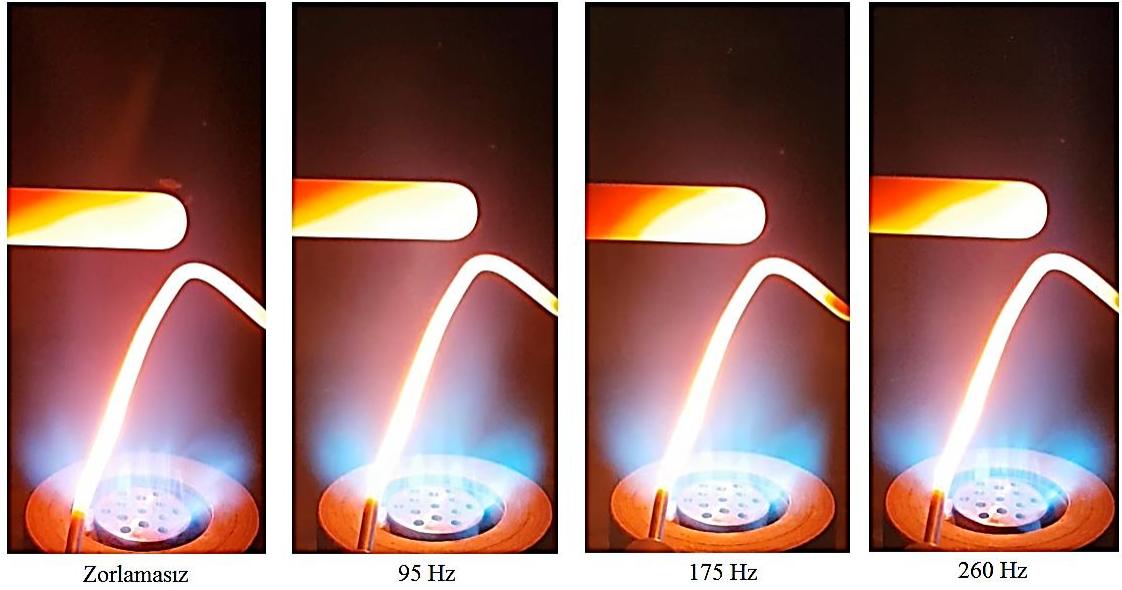
görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntülere göre zorlamasız durumda düzenli bir formda yanan alev üzerine akustik zorlama etkisi bindikçe boyu küçük bir miktarda kısalarak genişlemiş ve titreşimli bir yanma gerçekleştirmiştir. Alev şekillerinden zorlamasız durumdaki şekle en yakın olanı saf metan alevi ve %10 hidrojen ilaveli karışımda olduğu gibi 260 Hz zorlayıcı frekans altındaki alev olmuştur. Alev görüntüsündeki en büyük bozulma ise ışık şiddetinin en düşük seviyeyi gördüğü 175 Hz akustik frekans altındaki alev olmuştur.



Şekil 3.25. %20 H<sub>2</sub> ilaveli metanın hava ile yanma alev görüntüleri

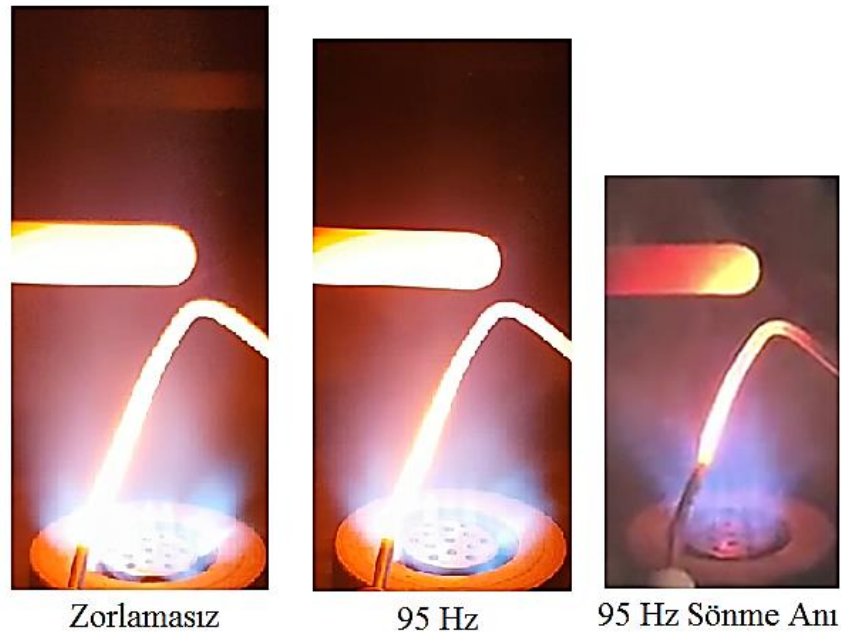
Şekil 3.26'da %24 oksijen oranı ile zenginleştirilmiş karışımın alev görüntüleri sunulmuştur. Zorlamasız durumdaki görüntüde alev son derece parlak ve ısıl çiftin biraz üzerine çıkacak kadar uzun bir şekildedir. Zorlayıcı frekans altında ise alevin parlaklığı kaybolmamasına rağmen boyunda küçük bir azalma ve tabana doğru yoğunlaşma açıkça görülmektedir.





Şekil 3.26. %20 H<sub>2</sub> ilaveli metanın %24 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

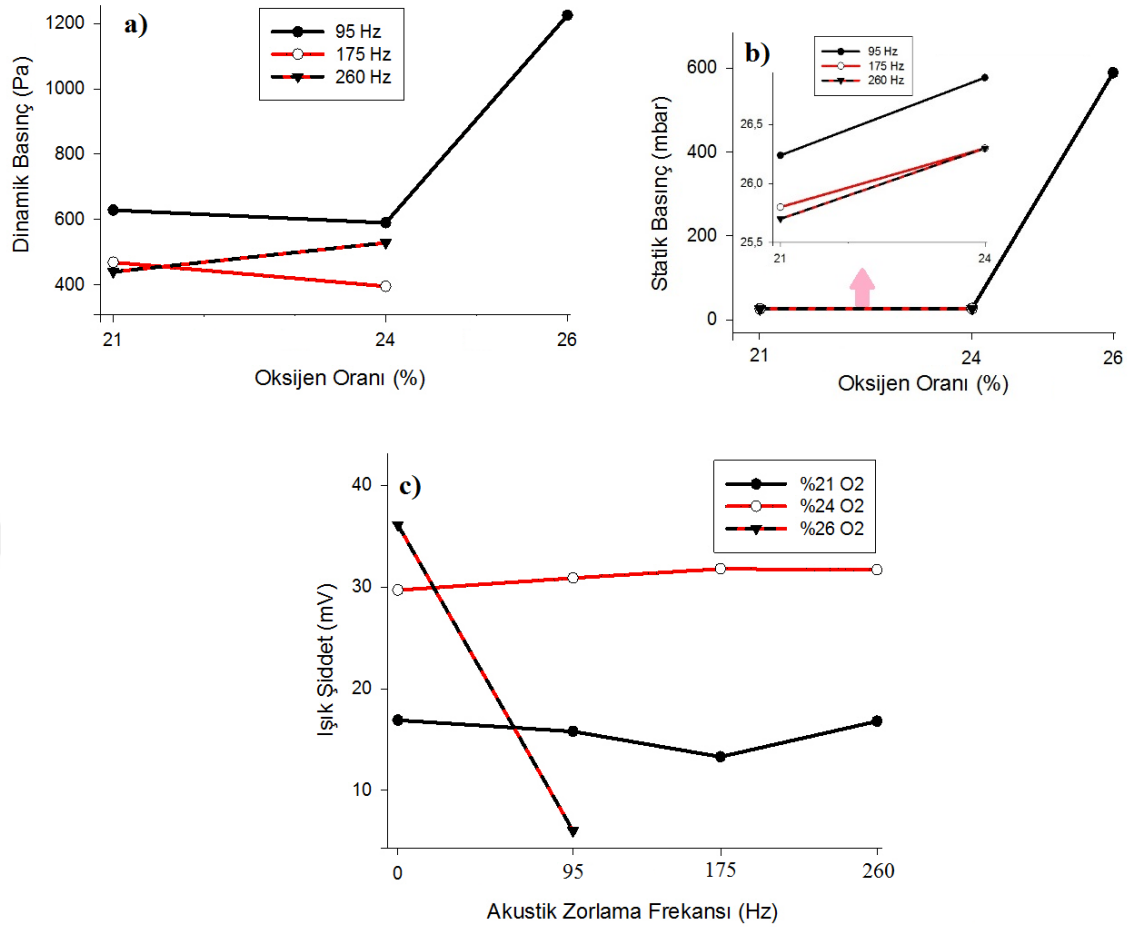
Son olarak içerisinde %26 oksijen bulunan hava ile yakılan karışımın alev görüntüleri Şekil 3.27'de gösterilmiştir. Zorlamasız halde ısıl çiftin çok daha üzerine çıkan alev boyutu 95 Hz frekansta geriye doğru çekilmeye başlamış ve alev yakıcı etrafında tutunamayarak girdap üreticisinin içerisine çekilmeye başlamıştır. Son görüntüde ise alevin girdap üreticisinin içerisine tamamen çekildiği ve sönmek üzere olduğu an verilmiştir.



Şekil 3.27. %20 H<sub>2</sub> ilaveli metanın %26 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

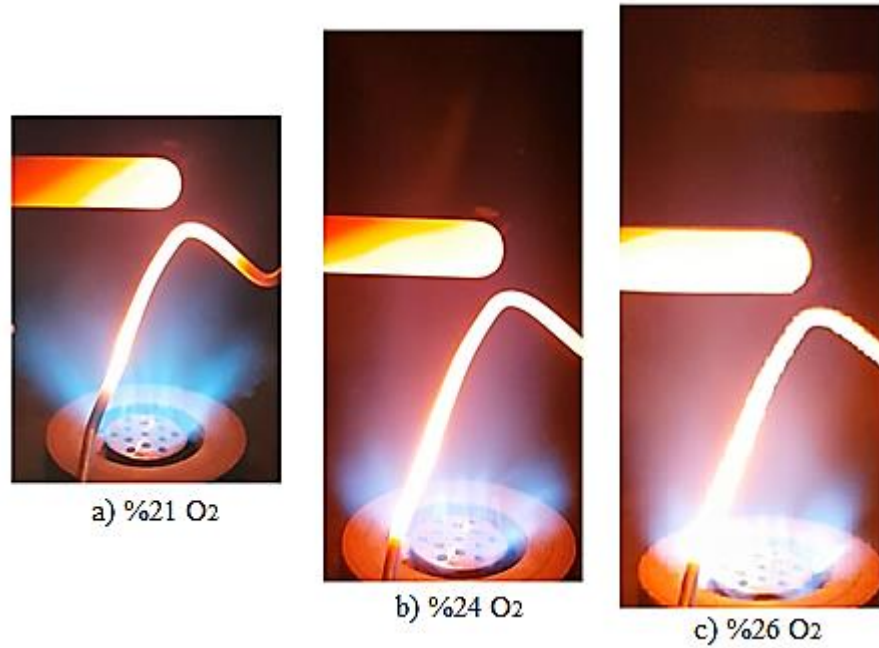
Şekil 3.28’de oksijence zenginleştirme oranına göre alevin dinamik basınç, statik basınç ve ışık şiddetlerinde meydana gelen değişimler verilmiştir. Elde edilen verilerden; karışımdaki hidrojen oranının %20’ye çıkarılması ile beraber oksijence zenginleştirme durumunda önemli bir kararlılık artışı görülmemiştir. %24 O<sub>2</sub> oranında karışımdaki hidrojen oranının daha baskın olması ve ısı yayılımındaki artışa ek olarak, fakir karışımlardaki hidrojenin girdap gelişimini inhibe etme özelliği ve yanmamış gaz karışım miktarını azaltarak daha iyi bir yanma imkanı tanınması, kararsızlıkta 175 Hz frekansta küçük (dinamik basınç kıyaslamasına göre %15) bir iyileşmeye sebep olmuştur [44]. Buna karşı, saf metan ve %10 hidrojen ilaveli yakıtla karşılaştırıldığı zaman ilk defa %26 O<sub>2</sub> zenginleştirme oranında alev akustik zorlamaya dayanamamıştır. Bu durum hidrojen ilavesi arttıkça oksijence zenginleştirmenin kararsızlıkları tetiklediğini açıkça ortaya koymaktadır. Diğer taraftan saf metan alevinde maksimum oksijence zenginleştirme oranı %27,6 iken Hidrojen ilavesinin artması ile beraber en fazla %26,4 oranına çıkılabilmektedir. Bu değer üzerindeki O<sub>2</sub> zenginleştirmelerde zorlamasız durumda dahi yanma gerçekleşmemiştir.

Kararsızlık artışının nedenleri olarak, fakir karışımlarda artan hidrojen ilavesi ile beraber Zeldovich sayısının azalması aktivasyon sıcaklığını düşürmektedir. Özellikle kritik eşdeğerlik oranının (1,1) altındaki karışımlarda hidrojen ilavesi ile beraber Markstein uzunluğu düşmektedir [84,45]. Markstein uzunluğu hesaplanmasında Lewis ve Zeldovich sayıları ile beraber ısı yayılım parametresinin rakip etkiler ortaya çıkarması hidrojen ilavesi ile beraber doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir [46]. Hidrojenin yüksek laminer yanma hızından dolayı metan içerisine ilave edilmesi durumunda hız artışı literatürdeki birçok çalışmada gösterilmiştir [85]. Hem hidrojen ilavesi hem de oksijence zenginleştirmenin laminer yanma hızını artırdığı ve Markstein uzunluğunu düşürdüğü bilinmektedir. İki zenginleştirmenin aynı anda yapılması ile beraber kararsızlıklarda artış meydana gelmiştir. Laminer yanma hızında meydana gelen bu artış alevin termo-akustik kararsızlıklara karşı daha dirençsiz bir hale gelmesine sebep olmuştur [86]. Aynı zamanda hidrojen ilavesi ile beraber maksimum ısı yayılım sinyal genliğinin daha düşük frekanslara doğru çekilmesi ve geri tepme sinyal genliğinin yükselmesi neticesinde 95 Hz frekansta karışımın maksimum basınç ve ısı yayılım frekansı geri tepme sinyal genliği ile çakışarak alev geri tepmesi meydana gelmiştir [87].



Şekil 3.28. %20 H<sub>2</sub> ilaveli yakıtta oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti

Karışım sabit düşünülüp oksijen oranı ile zorlamasız durumdaki ışık şiddeti artışı karşılaştırıldığında önceki karışımlarda meydana gelen artış davranışını gözlemek yine mümkündür. Şekil 3.28 incelendiğinde %21 O<sub>2</sub> oranındaki hava ile yanma esnasında 16,9 mV olan ışık şiddet, %24 O<sub>2</sub> zenginleştirme durumunda 29,7 mV ölçülürken, son zenginleştirme oranı olan %26 O<sub>2</sub> ile test edildiğinde artış göstererek 36,1 mV değeri tespit edilmiştir. Karşılaştırma için alevlerin akustik zorlama olmadan kararlı bir şekilde yandıkları andaki görüntüler Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29. Oksijence zenginleştirmiş %20 H<sub>2</sub> ilaveli alev görüntüsü

### 3.3.3. Oksijence Zenginleştirmenin CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO (Sentetik Gaz) Karışımlarının Yanma Kararsızlığına Etkisi

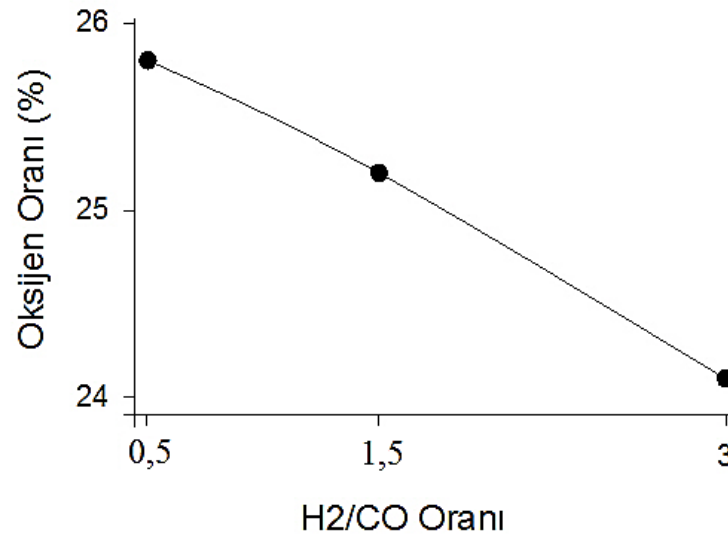
Sentetik gaz karışımları, atık biokütlelerin gazlaştırılması sonucu elde edilmektedir ve sentez gazı adıyla da bilinmektedir [88]. İçerisindeki en önemli bileşenleri H<sub>2</sub> ve CO olan sentetik gazlar, aynı zamanda yakıt enerjisinin de büyük kısmını bu gazlardan almaktadır. Sentetik gaz karışımları içerisinde bu bileşenlere ek olarak CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> gibi farklı gazlar da bulunabilmektedir. Gazlaştırma işleminden sonra üretilen tipik bir sentetik gaz karışımında yaklaşık olarak %18-20 H<sub>2</sub>, %18-20 CO, %2 CH<sub>4</sub>, %11-13 CO<sub>2</sub> bulunurken, geri kalan kısmında ise N<sub>2</sub> bulunmaktadır [89].

Literatürde sentetik gazlar ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, termo-akustik kararsızlıkların ve emisyon değişimlerinin çalışıldığı görülmektedir. Buna rağmen özellikle yine emisyon azaltma konusunda avantajları olduğu bilinen oksijence zenginleştirme ve bu zenginleştirme esnasında ortaya çıkan termo-akustik kararsızlıklar ön karışımli girdap destekli bir yanma akustik odada hiç çalışmamıştır. Önceki bölümlerde saf metan ve metan içerisine hidrojen ilavesi sonucunda ortaya çıkan kararsızlıklar ve oksijence zenginleştirmenin etkisi incelenmiştir. Tez çalışmasının bu kısmında CH<sub>4</sub> ve H<sub>2</sub> içeren gaz karışımına karbonmonoksit ilave edilerek sentetik gaz karışımı haline getirilmiştir. Bu sayede hem H<sub>2</sub> ilavesinde hem de CO gazı ilavesinin

oksijence zenginleştirilmiş yakıt karışımlarındaki kararsızlık etkileri incelenmiştir. Böylece bu alanda, literatürdeki bir eksik kapatılmıştır.

Sentetik gaz karışımlarının yanmasında önemli bir faktör  $H_2/CO$  oranları olarak bilinmektedir. Bu yüzden, tez çalışmasında yüksek (3), orta (1,5) ve düşük (0,5) olmak üzere üç farklı sentetik gaz karışımı seçilmiş ve kararlılığı artırmak için bütün karışımların içerisine hacimsel olarak %30  $CH_4$  ilave edilmiştir. Öncelikle gaz karışımlarının oksijence zenginleştirilebilme limitleri belirlenerek, bütün sentetik gaz karışımlarında ortak bir kıyaslama yapılabilmesi için bu deneylerinin tamamı aynı oksijen oranlarında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.30'da sentetik gaz karışımlarının artan hidrojen oranına göre oksijence zenginleştirilebilme limitleri gösterilmiştir. Sabit 3 kW yakıcı güçte yapılan deneylerde, eşdeğerlik oranı 0,7 olarak belirlenmiş ve girdap sayısı diğer deneylerde olduğu gibi 1 seçilmiştir. Bu şekil incelendiğinde, yüksek oranda karbonmonoksit içeren yakıt karışımında %25,8  $O_2$  maksimum zenginleştirme limiti olarak tespit edilirken,  $H_2/CO$  oranı 1,5 olan yakıt karışımında bu oran %25,2 seviyesine gerilemiştir. Karışım içerisindeki hidrojen oranı %52,5 ile en yüksek değere sahip olan yakıtta ise oksijence zenginleştirme limiti daha da gerileyerek %24,1 olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, hidrojenle beraber sentetik gaz yakıtların oksijence zenginleştirilebilme üst limitinin düştüğü açıkça görülmektedir. Tam aksine ise karbonmonoksit oranındaki artış oksijence zenginleştirme limitini de artırmıştır. Hidrojenin yüksek laminer yanma hızı ve reaksiyona girebilme kapasitesi alevin kararsızlaşmasına sebep olmaktadır [90]. Hidrojenle beraber oksijence zenginleştirmenin de laminer yanma hızında büyük artışlara sebep olduğu bilinmektedir [38]. İki zenginleştirme kademesinin bir arada yapılması alevde kararsızlık mekanizmalarının oluşumuna ve bu yüzden herhangi bir akustik zorlama olmadan dahi alevin geri tepme yapmasına sebep olmaktadır.



Şekil 3.30. Sentetik gazların oksijence zenginleştirme limitinin H<sub>2</sub>/CO oranına ile değişimi

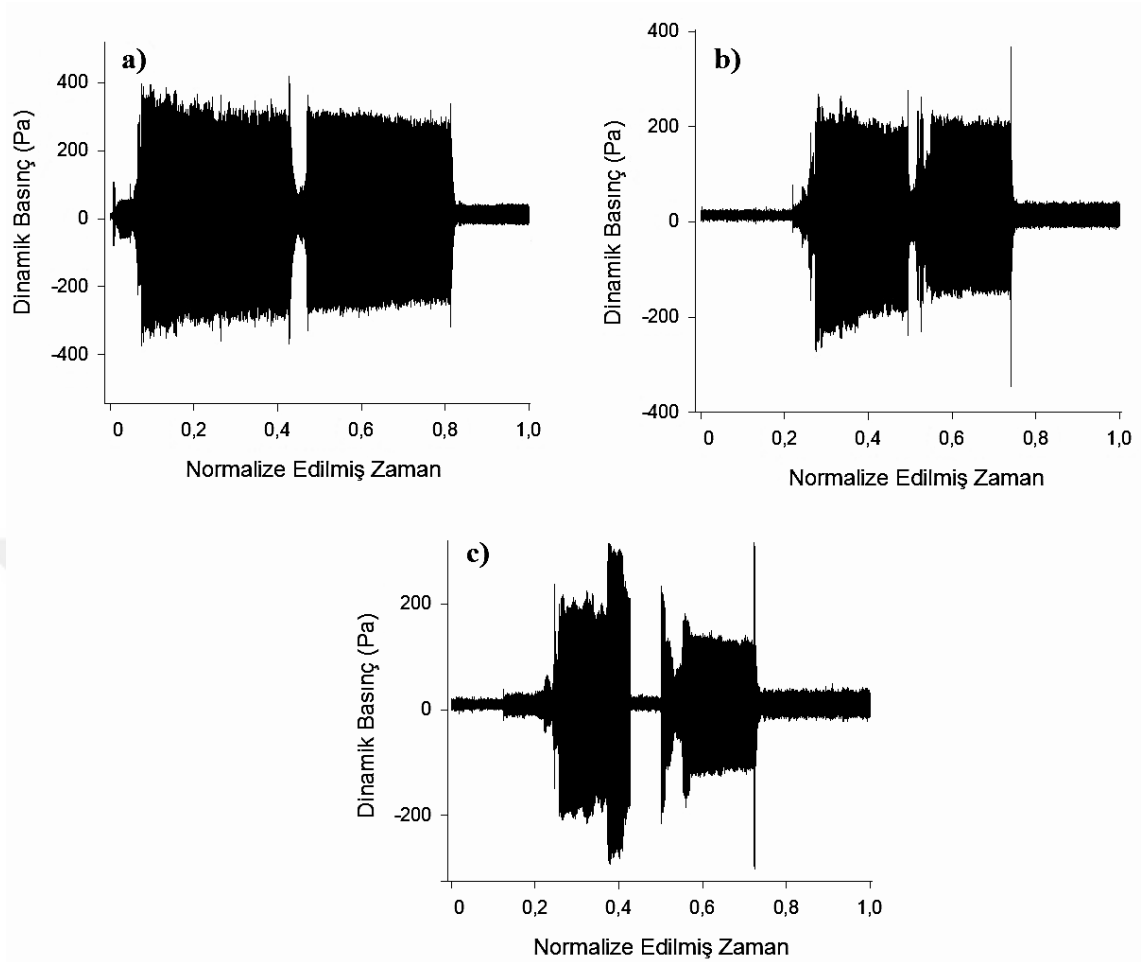
Oksijence zenginleştirilebilme limitleri belirlenen gaz karışımlarının farklı oksijen oranlarındaki kararsızlık ve baca gazı emisyonlarının değerlendirilebilmesi için üç farklı karışımda ortak zenginleştirme oranları seçilmiştir. H<sub>2</sub>/CO oranı en düşük olan karışımdaki zenginleştirme oranı %25,8 olmasından dolayı maksimum zenginleştirme değeri %25 olarak belirlenmiş, ayrıca %21 oranında oksijen içeren hava ile kıyaslanırken ara bir değer olarak %23 O<sub>2</sub> oranı da test edilmiştir. Zenginleştirme oranı olarak %23 O<sub>2</sub> değerinin seçilmesinin bir diğer sebebi de hidrojen oranı yüksek yakıt karışımının %25 O<sub>2</sub> oranında kararlı bir alev meydana getirememesidir. Bu sebeple H<sub>2</sub>/CO oranı yüksek (3) sentetik gaz karışımı için %25 O<sub>2</sub> zenginleştirme deneyi yapılamamış sadece %23 oranında zenginleştirme şartları için deneyler gerçekleştirilebilmiştir.

Sentetik gaz karışımlarının yanma kararsızlıklarının incelenebilmesi için öncelikle yüksek karbonmonoksit içeren yakıt karışımının %21 oranında oksijenli hava ile yakma deneyleri yapılmıştır. H<sub>2</sub>/CO oranı 0,5 olan bu gaz karışımının içeriği Tablo 2.3.'de verildiği üzere %30 CH<sub>4</sub> / %23,35 H<sub>2</sub> / %46,65 CO gazlarından oluşmaktadır. Şekil 3.31 incelendiğinde yüksek karbonmonoksit içerikli sentetik gaz karışımının üç farklı oksijen oranında, akustik zorlamalar altındaki dinamik basınç dalgalanmaları görülmektedir. İçeriğinde %21 oranında oksijen olan standart hava ile yakıldığında sistemin ilk rezonans değerinin olan 95 Hz frekansta 781 Pa genlikte bir salınım gösteren alev, 175 Hz frekansda geldiğinde ise 664 Pa dinamik basınç genliği ile yanmaya

devam etmiştir. Devamında akustik zorlama frekansının artırılmasıyla beraber alevin üzerine etki eden bozucu güç azalarak 260 Hz frekans altında alev sadece 57,47 Pa genlikte zorlamasız hale yakın bir şekilde yanmaya devam etmiştir.

Karışımın ilk oksijence zenginleştirme kademesi olan %23 O<sub>2</sub> oranına gelindiğinde ise 95 Hz zorlayıcı frekans altında yanarken 503 Pa dinamik basınç genliği ortaya çıkaran sentetik gaz alevi, 175 Hz frekansta bu değer de üzerine çıkarak en yüksek ve en düşük dinamik basınç değerleri arasında 715 Pa'lık bir salınım yapmıştır. Yine son akustik rezonans değeri olan 260 Hz'de ise bozucu etki büyük oranda azalarak 58,7 Pa salınım genliği ölçülmüştür [83].

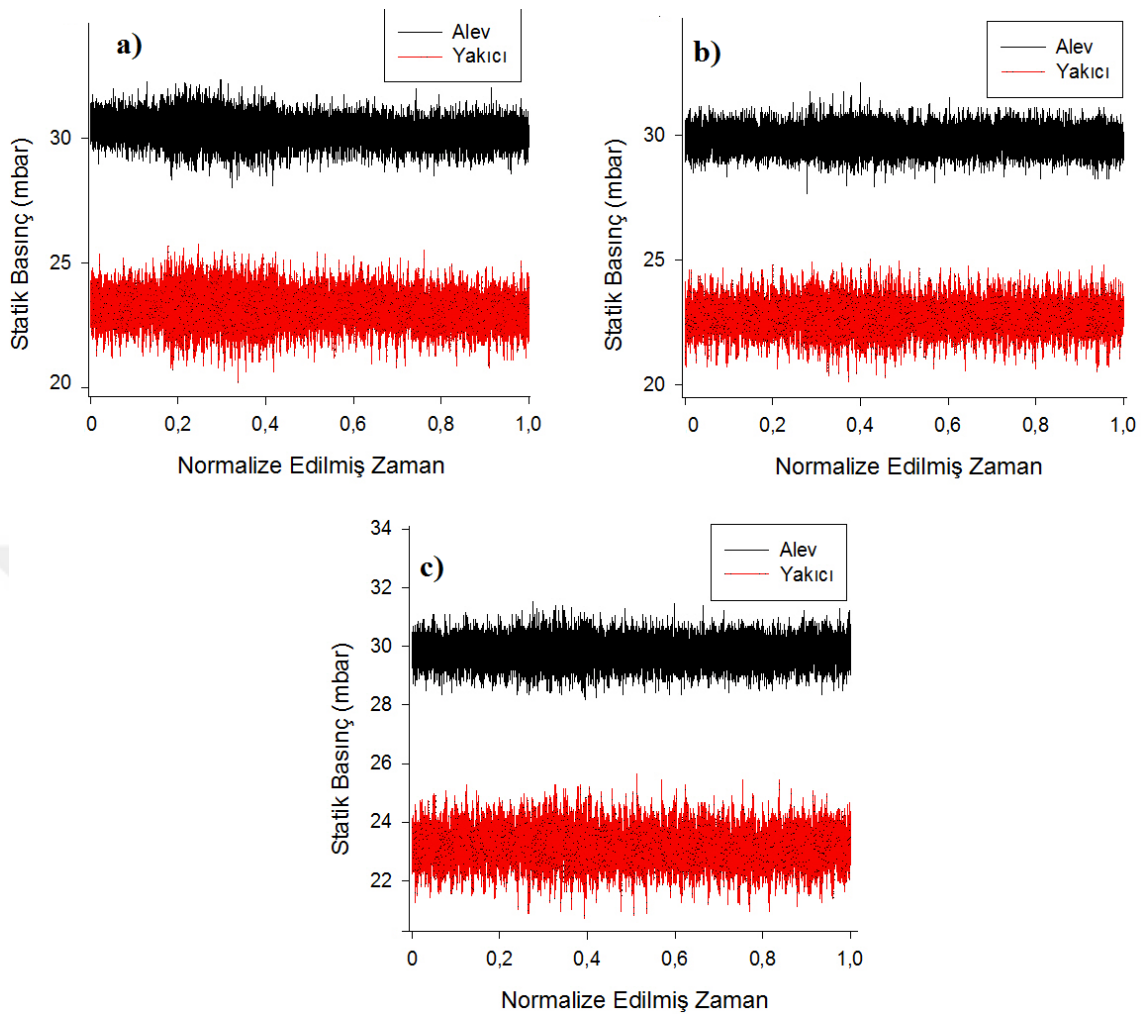
İçeriğinde yoğun miktarda CO gazı bulunduran sentetik gaz karışımının %25 oranında oksijence zenginleştirilmesi durumunda ise ilk akustik zorlama frekansında 504 Pa genlikte salınım göstererek yanmaya devam eden alev, zorlama frekansının artırılmasıyla beraber 612 Pa dinamik basınç genliği göstermiştir. 260 Hz değerindeki zorlayıcı akustik frekans altında ise alev yine son derece küçük bir salınım göstererek 74,51 Pa genlik ortaya çıkarmıştır. Sadece dinamik basınç değişimleri incelendiği zaman H<sub>2</sub>/CO oranı 0,5 olan sentetik yakıt karışımına uygulanan oksijence zenginleştirme işleminin alevin kararlılığını küçük bir oranda artırdığı belirlenmiştir. Oksijence zenginleştirmenin kararsızlık değişimlerine olan etkisini tam olarak açıklayabilmek için statik basınç ve ışık şiddeti verilerinin de incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.31.  $H_2/CO = 0,5$  için dinamik basınç dalgalanmaları a) %21  $O_2$ , b) %23  $O_2$ , c) %25  $O_2$

Alevin farklı zorlamalar altındaki oksijence zenginleştirme oranına göre statik basınç değişimleri Şekil 3.32’de gösterilmektedir. Hava ile yanma durumunda, farklı akustik zorlamalar altında geri tepme veya sönme davranışı göstermeyen alevin, 95 Hz frekansta yakıcı içerisindeki maksimum statik basıncı 25,89 mbar olarak ölçülmüştür. Ayrıca sistemin diğer akustik rezonans değerleri olan 175 Hz ve 260 Hz zorlayıcı frekanslarda da sırasıyla 25,34 mbar ve 25,14 mbar olarak belirlenmiştir. Oksijence zenginleştirme deneylerinin başlangıcı olan %23  $O_2$  seviyesinde ise ilk rezonans değeri olan 95 Hz frekans altında 25,44 mbar olan yakıcı statik basınç değeri, 175 Hz frekansa gelindiğinde 25,14 mbar’a düşmüştür. Akustik zorlama frekansı 260 Hz büyüklüğüne çıktığında ise 24,82 mbar değerine gerilemiştir.



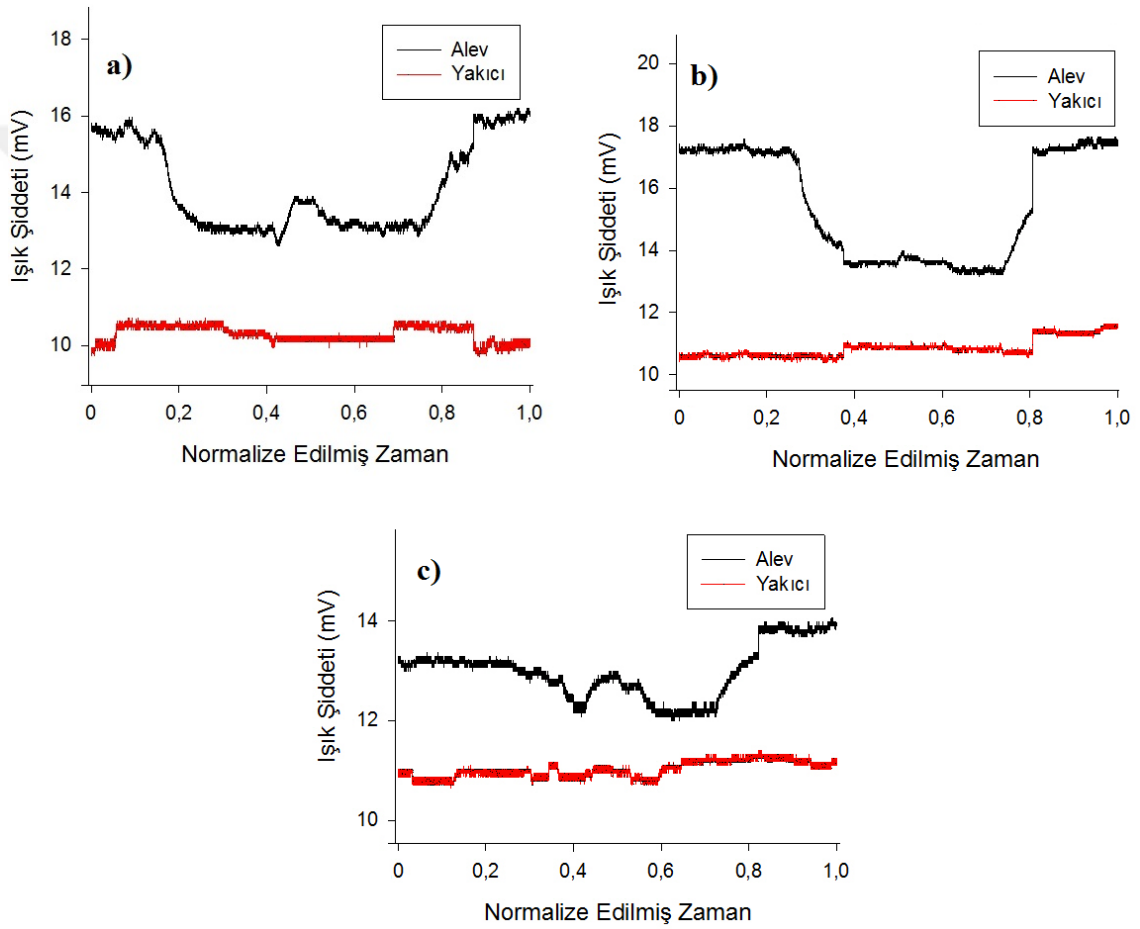


Şekil 3.32.  $H_2/CO = 0,5$  için statik basınç değişimleri a) %21  $O_2$ , b) %23  $O_2$ , c) %25  $O_2$

Sentetik gaz karışımları deneylerinde kullanılan en yüksek oksijen oranı olan %25  $O_2$  seviyesinde ise farklı akustik rezonans değerleri olan 95 Hz, 175 Hz ve 260 Hz frekanslar altında yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç büyüklükleri sırasıyla 25,53 mbar, 25,69 mbar ve 25,45 mbar olarak tespit ölçülmüştür. Akustik zorlamalar altında meydana gelen statik basınç değişimlerinin tamamı değerlendirildiğinde;  $H_2/CO$  oranı 0,5 olan yakıt karışımı bütün oksijence zenginleştirme oranlarında geri tepme ve sönmeyi ortaya çıkarabilecek bir büyük bir kararsızlığa maruz kalmamıştır. Bütün zorlayıcı frekanslara karşı direnç gösterebilen alevin statik basınç değerleri bu yüzden göze çarpan bir değişim göstermemiştir.

Kararsızlık oluşumlarının değerlendirilebilmesi için gereken diğer bir parametre ise ışık şiddetinde yaşanan değişimlerdir. Şekil 3.33'te yüksek karbonmonoksit içeriğine sahip yakıtın farklı zenginleştirme oranlarındaki ışık şiddeti değişimleri gösterilmektedir. %21

O<sub>2</sub> içerikli yakıcı hava kullanıldığında, zorlamasız durum altında kararlı bir yanma gösteren alevin ışık şiddeti 15,83 mV olarak ölçülürken, alevin akustik alan içerisinde zorlanmaya başlamasıyla beraber 95 Hz frekans altındaki parlaklığı 12,78 mV değerine düşmüştür. Zorlama frekansı artırılarak 175 Hz bölgesine gelindiğinde ise parlaklık yine 12,73 mV olarak belirlenmiştir. Dinamik basınç değişimlerinin en düşük olduğu akustik zorlama rezonans değeri olan 260 Hz frekansta ise alev tekrar zorlamasız duruma yakın bir hale gelmiş ve 16,24 mV ışık şiddetiyle yanmaya devam etmiştir.

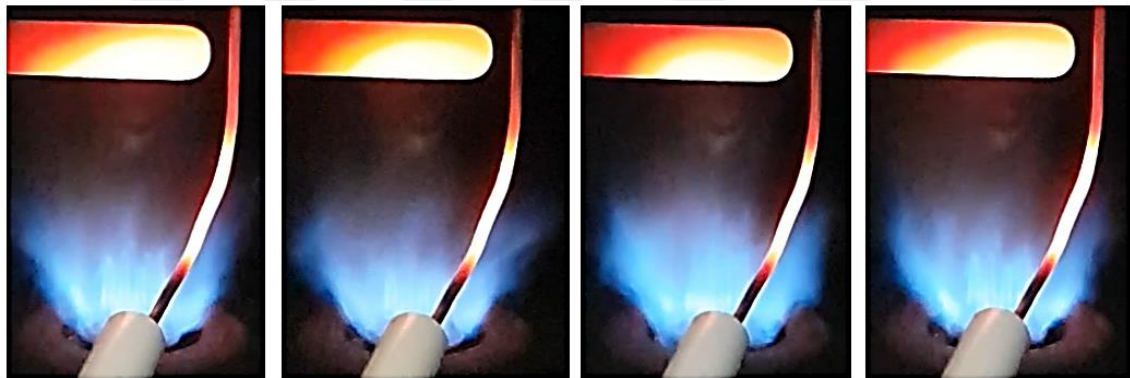


Şekil 12 H<sub>2</sub>/CO = 0,5 için ışık şiddeti değişimleri a) %21 O<sub>2</sub>, b) %23 O<sub>2</sub>, c) %25 O<sub>2</sub>

Karışım içerisindeki havanın kısılıp ilave oksijen eklenmesiyle %23 seviyesine çıkarılan O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> oranı alevin ışık şiddeti değişimleri Şekil 3.33'te verilmiştir. Akustik zorlamanın olmadığı anda ışık şiddeti 17,34 mV ölçülmüştür. 95 Hz frekans altında parlaklığını kaybeden alevin ışık şiddeti 13,4 mV tespit edilmiştir. Diğer bir zorlama frekansı olan 175 Hz'de ise alev yine zorlamasız duruma göre düşük bir parlaklıkla 13,14 mV etrafında yanmaya devam etmiştir. Sistemin son rezonans değeri olan 260 Hz frekans altında ise ışık şiddeti tekrardan 17,64 mV değerine çıkmıştır. Oksijen oranının

%25'e çıkarıldığı deneyde dıştan akustik zorlama yapılmadığı bir anda 13,22 mV olarak ölçülen ışık şiddeti, akustik zorlamanın başlamasıyla beraber diğer oksijen oranlarında olduğu gibi düşüş göstermiş ve 95 Hz frekans altında 12,09 mV değerine gerilemiştir. 175 Hz frekansta da yakın bir değer olarak 12,01 mV ışık şiddetinde yanmaya devam eden alev zorlama frekansının yüksek seviyelere (260 Hz) çıkmasıyla beraber yeniden parlaklığını kazanmış ve 13,99 mV ışık şiddeti tespit edilmiştir.

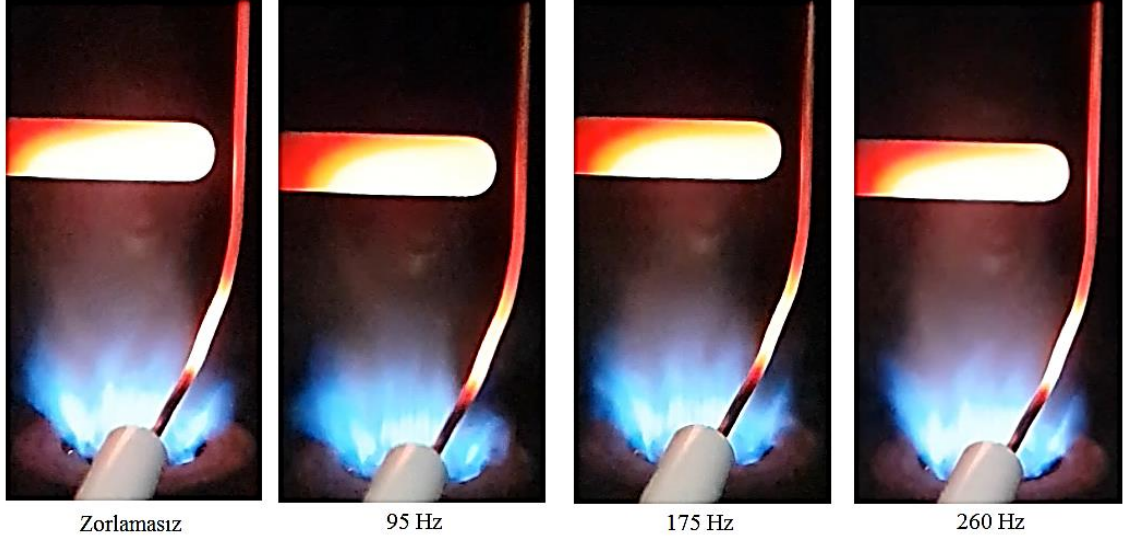
Yakıt karışımının kararlılık değişimlerinin görülebilmesi için hassas ölçüm aletleri ile alınan değerlere ek olarak Şekil 3.34'te  $H_2/CO$  oranı 0,5 olan yakıt karışımının %21 oksijen ile yakılması durumunda akustik zorlamalar altındaki alev görüntüleri sunulmuştur. Bu şekil incelendiğinde ilk durumda kararlı bir yanma gösteren alev 95 ve 175 Hz akustik frekanslarda zorlanarak kararlılığını yitirmeye başlamış ve salınımlar yaparak yakıcı merkezinden uzaklaşmaya başlamıştır. Diğer taraftan zorlayıcı frekans 260 Hz'ye çıkarıldığında ise alev tekrar zorlamasız duruma yakın bir görüntü ortaya koymuştur.



Şekil 3.34.  $H_2/CO = 0,5$  için %21  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

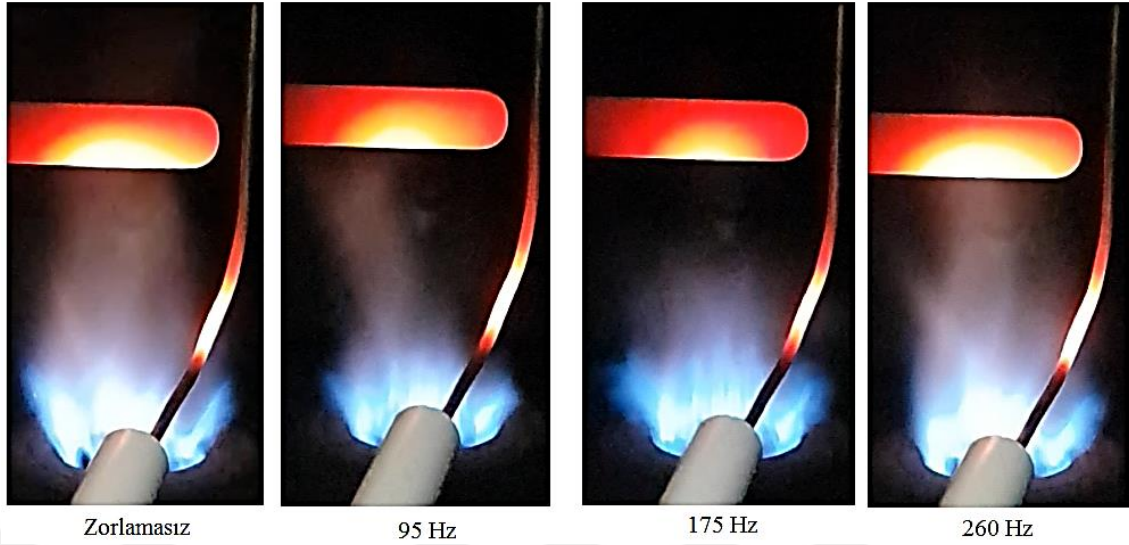
Sentetik gazların oksijence zenginleştirilmesi deneylerinin ilki olan %23  $O_2$  oranındaki yüksek karbonmonoksit içerikli alevin görüntüleri Şekil 3.35'de gösterilmiştir. Zorlamasız durumda parlak ve ısıl çiftin tam üzerine kadar gelebilen alev boyu mevcutken, akustik zorlama ile beraber özellikle 95 Hz frekans altında alevin boyu kısalmış ve yakıcı içerisine doğru geri çekilmeye başlamıştır. Zorlayıcı frekans 175 Hz değerine çıkarıldığında ise alev salınımlı bir şekilde kararsız yapıda yanmaya devam etmiştir. Son akustik rezonans seviyesi olan 260 Hz'de ise ışık şiddeti değişimlerinde de görüldüğü gibi göze çarpan bir değişiklik olmamıştır. Alev başlangıç haline yakın bir

durum göstermiştir. Alev görüntüleri incelendiği zaman göze çarpan en önemli sonuç, dinamik basınç değişimlerine benzer bir alev görüntüsü ortaya çıkarmıştır.



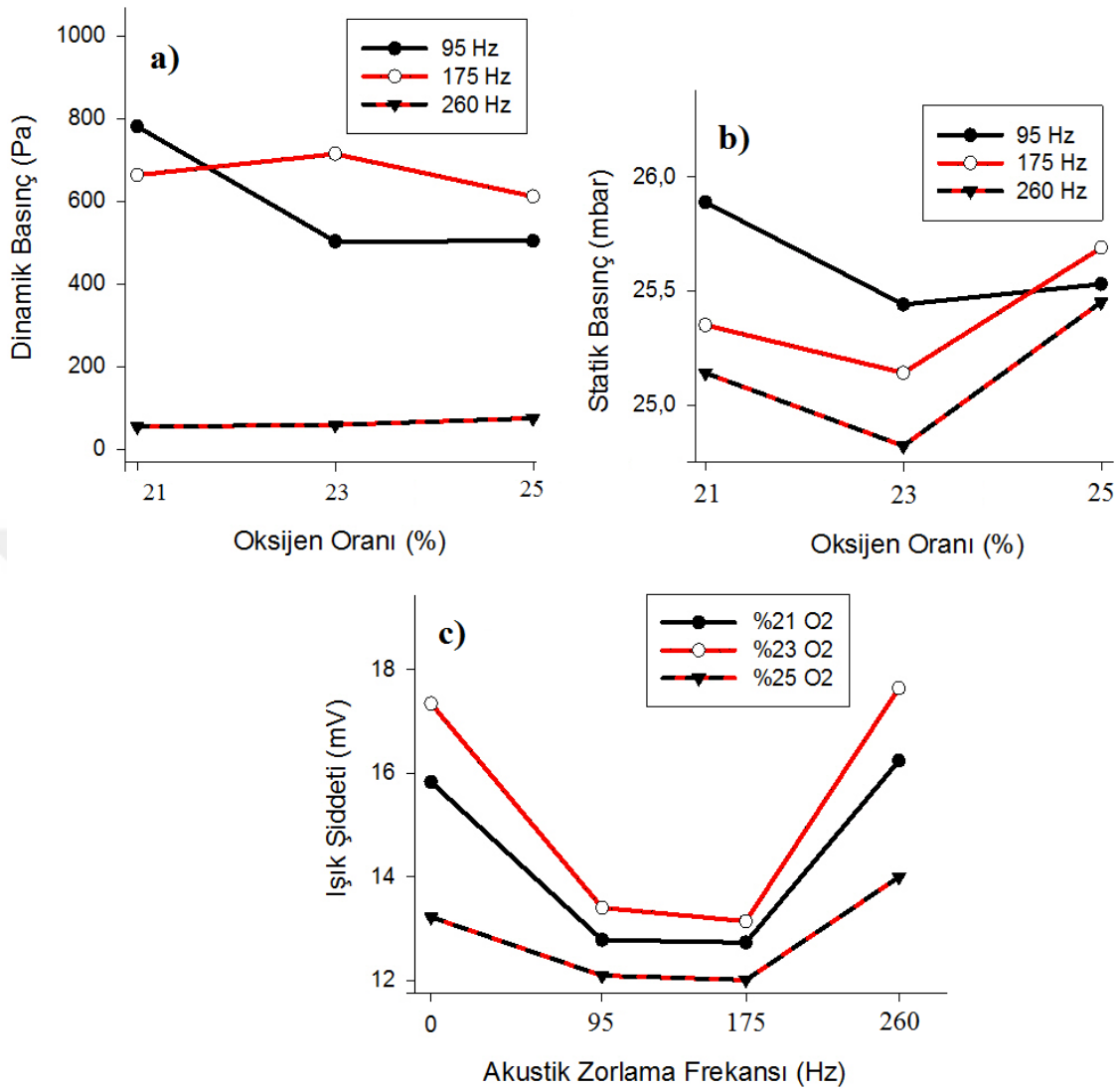
Şekil 3.35.  $H_2/CO = 0,5$  için %23  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

Karışımın oksijen zenginleştirme sınırına en yakın değer olan %25  $O_2$  oranında ise alev görüntüleri Şekil 3.36'da sunulmuştur. Zorlamasız durumda boyu ısı çifti yaklaşabilen alev 95 Hz frekans altında ortaya çıkan akustik kararsızlık modlarının etkisiyle büyük ölçüde kararsız bir yanma sergilemiştir. Özellikle 175 Hz frekans değerine geldiğinde alev girdap üreticinin içerisine tamamen çekilerek güçlükle tutunabilmiş buna rağmen sönmemiştir. Alevin ısı çiftinin üzerinde oluşturduğu parlaklığa dikkat edildiği zaman zorlamasız durum ile 175 Hz frekans altındaki alev durumu gözle de görülebilmektedir. Son olarak bütün oksijen oranlarında olduğu gibi 260 Hz zorlayıcı frekans altında alev görüntüleri zorlanmamış durumdaki alevle yakın olmuştur.



Şekil 3.36.  $H_2/CO = 0,5$  için %25  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

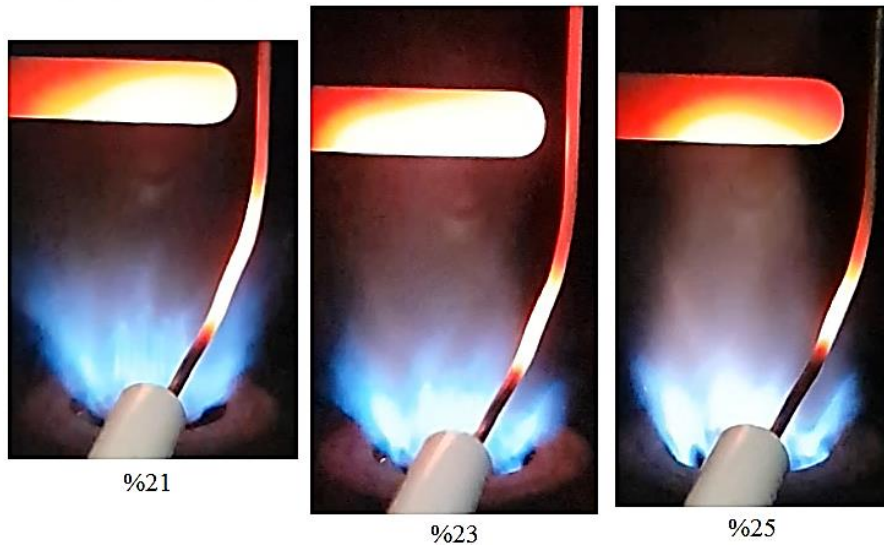
Metan içerisine  $H_2$  ve  $CO$  ilave edilerek oluşturulan sentetik gaz karışımlarının ilki olan yüksek karbonmonoksit içerikli yakıt karışımının farklı oranlarda oksijence zenginleştirilmesi sonucu ortaya çıkan kararsızlık verileri detaylı olarak açıklanmıştır. Şekil 3.37’de bütün oksijence zenginleştirme oranları için alevin yanma kararsızlıkları gösterilmiştir. Bu şekil zaman öncelikle  $H_2/CO$  oranı 0,5 olan yakıt karışımının hava ile yanma ve bütün oksijence zenginleştirme durumlarında akustik zorlamalar altında kararlı bir yanma gösterdiği anlaşılmaktadır. Alevde sönme ve geri tepme meydana getirecek kadar büyük bir kararsızlığın olmaması yakıcı içerisindeki maksimum statik basınçta göze çarpan bir değişiklik oluşturmamıştır.



Şekil 3.37.  $H_2/CO = 0,5$  için oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti

Dinamik basınç değişimleri karşılaştırıldığında ise karışım içerisindeki oksijence zenginleştirme oranının artışı özellikle düşük akustik frekanslarda alevin daha kararlı bir biçimde yanmasını sağlarken 175 Hz frekansta benzer durumu göstermemiştir. Oksijence zenginleştirme işlemi metan/hidrojen alevlerinde olduğu gibi alevin ısı yayılım parametresinde artışa sebep olarak, geri tepme sinyal genliğini yüksek frekans değerlerine doğru ilerletmiştir [91]. Bütün oksijen oranlarında ortak bir nokta olarak 260 Hz frekanstaki akustik zorlama altında kayda değer bir kararsızlık yaşanmamıştır, sadece oksijen oranının artışı ile %25 O<sub>2</sub> oranında kararsızlık mekanizmalarını tetiklemeyecek kadar küçük bir artış meydana gelmiştir

Alevin yanma görüntüleri ve ışık şiddeti değişimleri de karasızlıklar konusunda basınç değerleri kadar önemli birer parametredir. Dinamik basınç değişimlerine benzer bir şekilde yüksek basınç genliğinin olduğu 95 Hz ve 175 Hz frekans değerlerinde alevin parlaklığında da önemli düşüşler meydana gelmiştir. 260 Hz frekanstaki akustik rezonans bölgesinde ise alev büyük bir zorlanmaya maruz kalmadığı için ışık şiddetleri de bütün oksijen oranlarında benzer şekilde tekrardan yükselişe geçmiştir. Burada; %21 Oksijen içeren standart hava ile yanma durumuna göre %23 O<sub>2</sub> oranı kıyaslandığında oksijence zenginleştirmenin alev parlaklığında artışa sebep olduğu görülmektedir. Diğer taraftan oksijen oranı %25'e çıkarıldığında ise yakıt karışımının oksijence zenginleştirme sınırına çok yakın bir seviyeye gelmiş olmasından dolayı alevin ışık şiddeti düşmeye başlayarak yakıcı içerisine doğru çekilmiştir. Ek olarak Şekil 3.38'de oksijence zenginleştirme kademelerine göre akustik zorlamanın olmadığı durumlarda alınan alev görüntüleri kıyaslanmıştır. Bunlar incelendiğinde özellikle alevin ısıl çiftin üzerinde oluşturduğu izlerden en yüksek parlaklığa sahip olanın %23 O<sub>2</sub> içeren karışım olduğu belirlenmiştir. En düşük parlaklık seviyesi ise %25 oksijen oranında ortaya çıkmıştır.

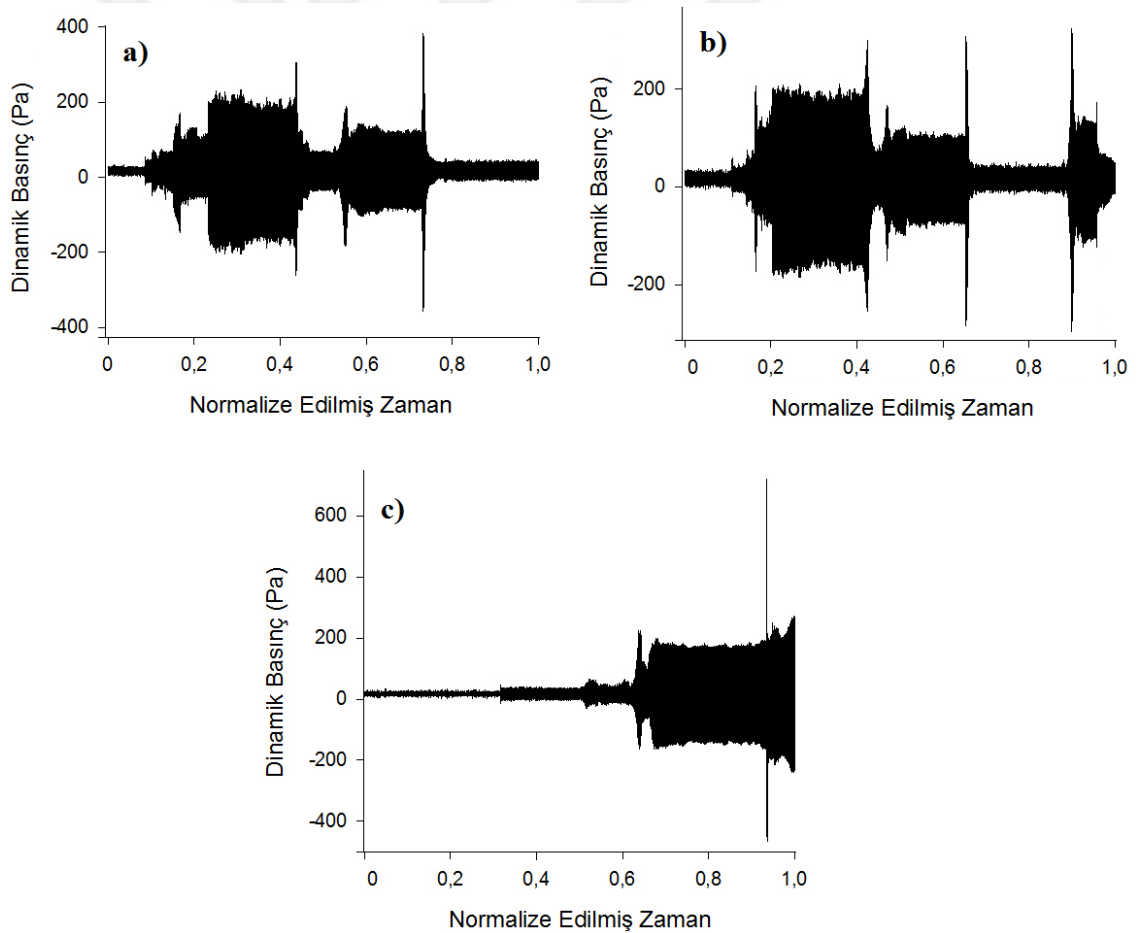


Şekil 13 H<sub>2</sub>/CO = 0,5 için oksijence zenginleştirmenin alev görüntüsüne etkisi

Yakıt karışımı içerisinde yoğun olarak bulunan karbonmonoksit gazının laminer yanma hızının düşük olmasından dolayı oksijence zenginleştirmenin düşük H<sub>2</sub>/CO oranlarında daha elverişli olduğunu göstermiştir [61]. Buna rağmen alt ısıl değeri metan ve hidrojen ile kıyaslandığı zaman kütleli olarak düşük olan karbonmonoksit gazının yakıt

karışımı içerisinde yoğun olması nedeniyle metan yanması kadar kararlı bir yanma gerçekleşmemiş ve oksijence zenginleşmenin %25'e çıktığı durumda kararlılıkta önemli bir artış meydana gelmezken, %25,8 O<sub>2</sub> oranının üzerine çıkılamamıştır.

Metan içerikli yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirilmesinin alev kararlılığına olan etkisinin incelenmesi için CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO olan sentetik gaz karışımı kullanılmıştır. Bu sentetik gazlar için temel bir ayırım kriteri olan H<sub>2</sub>/CO oranı orta (1,5) seviyede tutulmuştur. Bu sayede karışım içerisindeki hidrojen oranının artışı ve karbonmonoksitteki düşüşün oksijence zenginleştirme performansına etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 3.39'a bakıldığında H<sub>2</sub>/CO oranı 1,5 olan sentetik yakıt karışımının %21 oksijen oranındaki hava ile yanma ve oksijence zenginleştirme durumlarındaki dinamik basınç dalgalanmaları gösterilmiştir.



Şekil 3.39. H<sub>2</sub>/CO = 1,5 için dinamik basınç dalgalanmaları a) %21 O<sub>2</sub>, b) %23 O<sub>2</sub>, c) %25 O<sub>2</sub>

Alev kararlılığının değerlendirilmesinde en önemli kriterlerden birisi olan dinamik basınç dalgalanmaları incelendiğinde karışımın standart hava ile yanması durumunda ilk

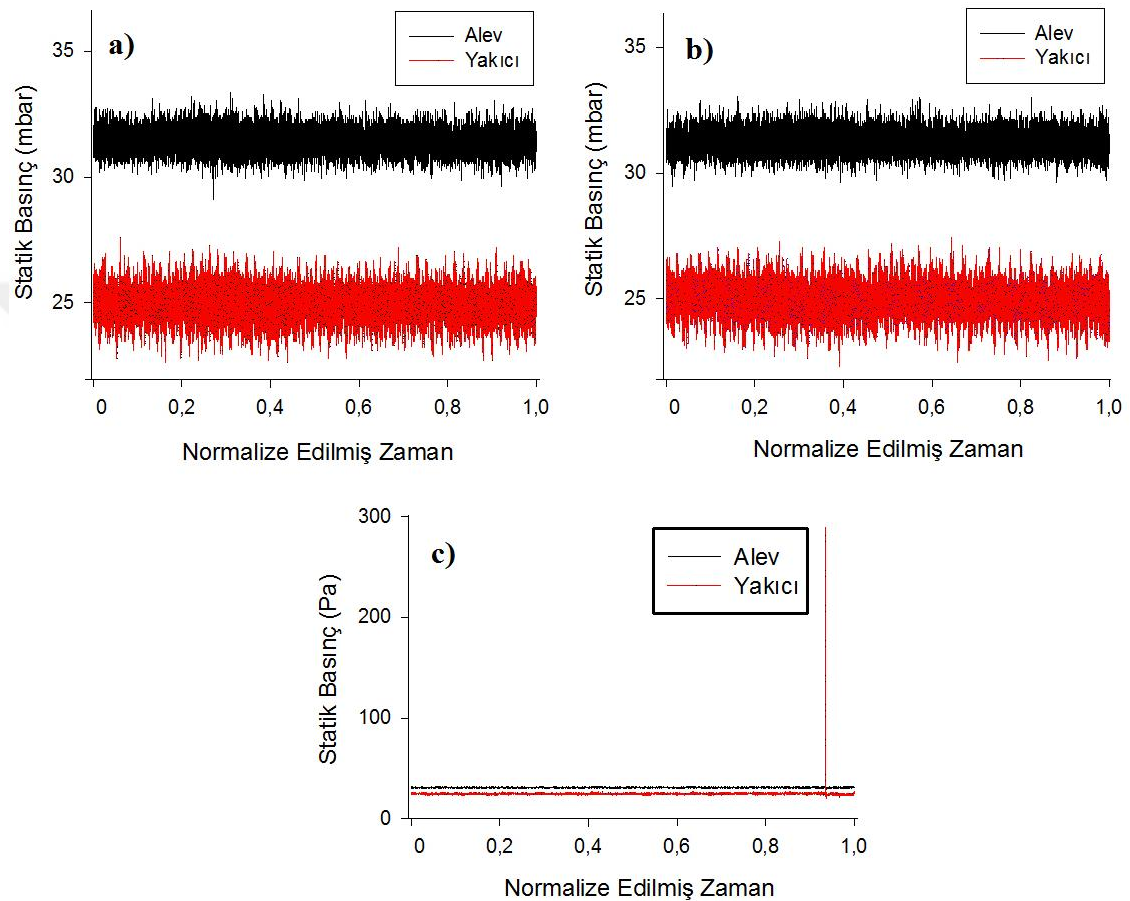


akustik rezonans bölgesi olan 95 Hz frekansta 561 Pa basınç genliği ile salınım yaparken, 175 Hz frekans değerine gelindiğinde 734 Pa genlik ölçülmüştür. Akustik zorlama frekansı yüksek seviyelere çıkarılarak 260 Hz değerine gelindiğinde ise alev 55 Pa gibi küçük bir salınımla zorlamasız hale yakın bir durumda yanmaya devam etmiştir. Diğer bir deneyde ise hava içerisindeki oksijen oranı %23'e çıkarılarak zenginleştirme uygulanmıştır. Bu durumda ise 95 Hz zorlayıcı frekans altında 549 Pa dinamik basınç genliğinde tepki gösteren alev, 175 Hz frekansa çıkıldığında 589 Pa genlikte dinamik basınç salınımı göstererek benzer bir rejimde yanmaya devam etmiştir. Son rezonans seviyesi olan 260 Hz frekansta ise salınım genliği yükselerek 612 Pa ölçülmüştür. Diğer bütün yakıt karışımlarında olduğu gibi oksijence zenginleştirme yine alevin geri tepme sinyal genliğinin yüksek frekanslara doğru kaymasına sebep olmuştur [43].

Sentetik gaz deneylerinde uygulanabilen en yüksek oksijen oranı olan %25'de ise, alev akustik zorlamanın olmadığı durumda zayıf bir şekilde de olsa yanmaya devam edebilirken akustik zorlama frekanslarının uygulanması ve yanma akustik odanın doğal rezonans frekansı olan 95 Hz frekansa ulaşılmasıyla beraber alev geri tepmesi meydana gelmiştir. Tam geri tepmenin meydana geldiği noktadaki dinamik basınç genliği ise 1602 Pa olarak ölçülmüştür. Bu durum  $H_2/CO$  oranı 1,5 olan yakıt karışımının yüksek oranda oksijenle zenginleştirilmesinin kararsızlık mekanizmalarını tetiklediğini göstermektedir.

Şekil 3.40'te  $H_2/CO$  oranı 1,5 için sentetik gaz karışımının farklı oksijen oranlarındaki statik basınç değişimleri gösterilmiştir. Hava ile yanma durumunda ilk akustik rezonans bölgesi olan 95 Hz frekansta yakıcı içerisindeki statik basıncın çıktığı en yüksek değer 27,25 mbar olarak ölçülmüştür. Akustik zorlamanın 175 Hz'ye getirilmesiyle beraber 27,07 mbar'a düşen statik basınç değeri son rezonans değerinde de 27,21 mbar olarak tespit edilmiştir. Oksijen oranı %23'e çıkarılarak zenginleştirilmiş yakıt karışımında ise yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç değerleri 95 Hz, 175 Hz ve 260 Hz frekanslardaki zorlamalar altında sırasıyla 27,34 mbar, 27,40 mbar ve 27,51 mbar olarak kaydedilmiştir.  $H_2/CO$  oranı 1,5 olan yakıt karışımının %21  $O_2$  içeren standart hava ile yakıldığı ve ardından oksijen oranının %23'e çıkarılarak zenginleştirme işleminin uygulandığı deneylerde, akustik zorlamalar altında alevde sönme ve geri tepme durumu meydana gelmemiştir. Bu yüzden yakıcı içerisindeki statik basınç değerlerinde önemli bir değişiklik ortaya çıkmamıştır. Zenginleştirme oranı %25

O<sub>2</sub> seviyesine gelindiğinde ise alev kararsız bir rejimde yanmaya başlamış ve yanma odasının rezonans değeri olan 95 Hz frekansta alev geri tepmiştir. Bu noktada ölçülen yakıcı statik basıncı 394,25 mbar'a kadar yükselmiştir. Alevde yaşanan kararsızlık dinamik basınç verilerinde olduğu gibi statik basınç değişiminde de açıkça görülmüştür.

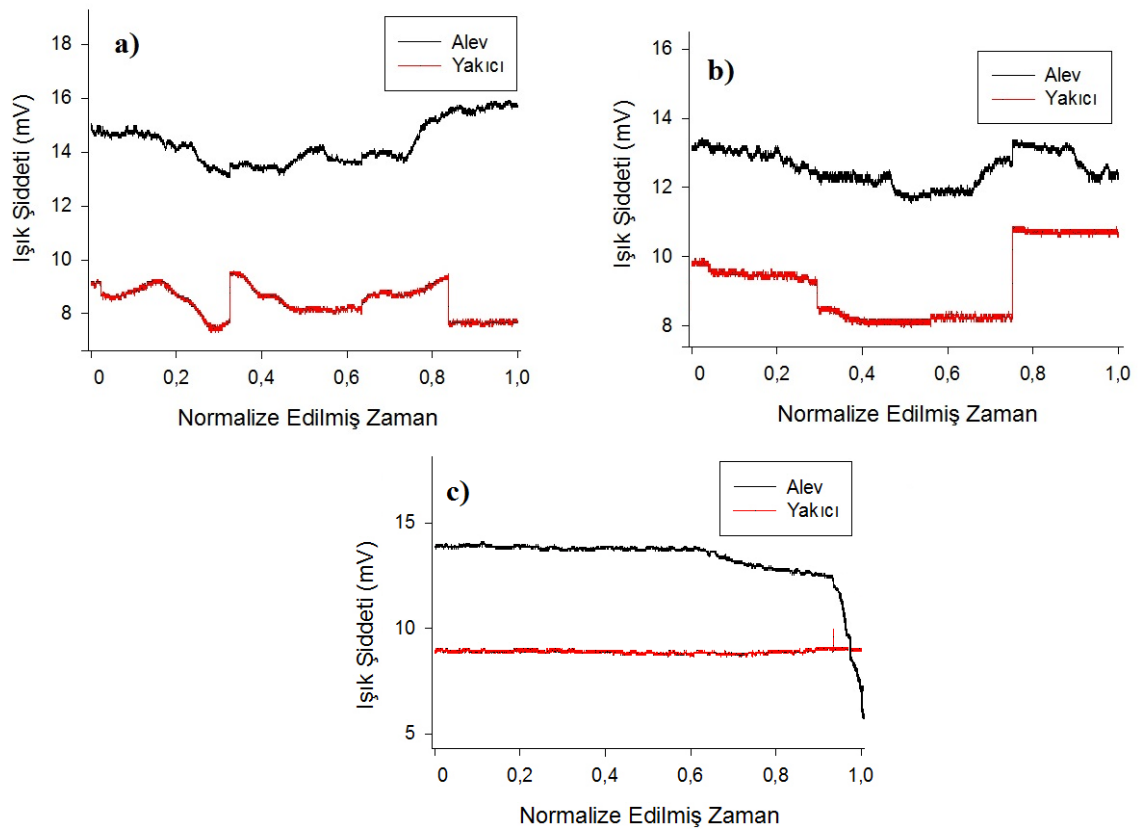


Şekil 3.40. H<sub>2</sub>/CO = 1,5 için statik basınç değişimleri a) %21 O<sub>2</sub>, b) %23 O<sub>2</sub>, c) %25 O<sub>2</sub>

Karışımın oksijence zenginleştirilmesi sonucu basınç değerlerinde meydana gelen değişimler yorumlandıktan sonra, Şekil 3.41'de ışık şiddeti değişimleri gösterilmiştir. Bunlar incelendiğinde standart hava ile yanma durumunda akustik zorlamanın olmadığı bir anda alınan veriye göre, ışık şiddeti büyüklüğü 14,97 mV olarak tespit edilmiştir. 95 Hz zorlayıcı frekans altında alevde meydana gelen kararsızlıklardan ötürü 12,84 mV ölçülen parlaklık, 175 Hz frekansa gelindiğinde ise 13,6 mV değerinde kaydedilmiştir. Bozucu etkinin diğer frekanslara göre daha az olduğu 260 Hz zorlayıcı frekansta ise ışık şiddeti tekrar yükselerek 15,97 mV değerine çıkmıştır.

O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> oranı %23'e çıkarılan karışımın akustik zorlamalar altındaki ışık şiddeti değişimleri ise; zorlamasız durumda 13,44 mV olan ışık şiddeti, 95 Hz frekansta 12,08

mV'ye gerilemiştir. Akustik zorlama frekansının artırılmasıyla beraber 175 Hz'de daha da gerileyerek 11,61 mV değerine geldikten sonra 260 Hz frekansta 12,12 mV büyüklüğüne tekrardan yükselmiş fakat yine de zorlamasız durumun altında kalmıştır. Dinamik basınç verileri ile kıyaslandığı zaman %23 oranında oksijence zenginleştirilmiş karışımın 260 Hz frekans anındaki basınç genliğinin de yüksek olduğu görülebilmektedir. Işık şiddeti değişimleri de dinamik basınç verilerini doğrular nitelikte ortaya çıkarak oksijence zenginleştirmenin akustik zorlamalara karşı olan tepkiyi üst frekanslara taşıdığını göstermektedir [92]. Karışımın oksijence zenginleştirme limiti olan %25,2 O<sub>2</sub> oranına en yakın deney olarak belirlenen %25 oksijence zenginleştirme kademesinde ise zorlamasız durumda 14,07 mV olan ışık şiddeti, ilk akustik rezonans değeri olan 95 Hz frekansta alevin geri tepme yapmasından dolayı 5,24 mV değerine kadar düşerek yakıcı içerisine geri çekilerek kaybolmuştur.



Şekil 3.41. H<sub>2</sub>/CO = 1,5 için ışık şiddeti değişimleri a) %21 O<sub>2</sub>, b) %23 O<sub>2</sub>, c) %25 O<sub>2</sub>

Kararsızlığın basınç ve ışık şiddeti verileri ile değerlendirilmesiyle beraber gözle görülebilen değişimlerin de açıklanabilmesi için Şekil 3.42'de karışımın %21 O<sub>2</sub> oranında yakılması sonucu farklı akustik zorlamalar altındaki alev görüntüleri

sunulmuştur. Zorlamasız durumda, daha doğrusal bir şekilde yanan alev 95 Hz frekanstaki akustik zorlama bölgesine gelinmesiyle beraber kararlılığını yitirmiş ve parlaklığını kaybetmiştir. Akustik zorlama frekansının artırılmasıyla beraber ışık şiddeti verilerinde de kaydedildiği gibi parlaklık artarak yanmaya devam etmiş ve 260 Hz frekansta başlangıçtaki parlaklığından daha yüksek bir seviyeye çıkmıştır. Akustik zorlama altında alınan görüntüler üzerinden yorum yapabilmek için en belirgin kıstas, alevin ısıl çift üzerinde oluşturduğu izi incelemek olacaktır. Bu şekilde alev yapıları incelendiğinde özellikle 95 Hz frekanstaki alev küçülmesi açıkça anlaşılabilir.



Zorlamasız

95 Hz

175 Hz

260 Hz

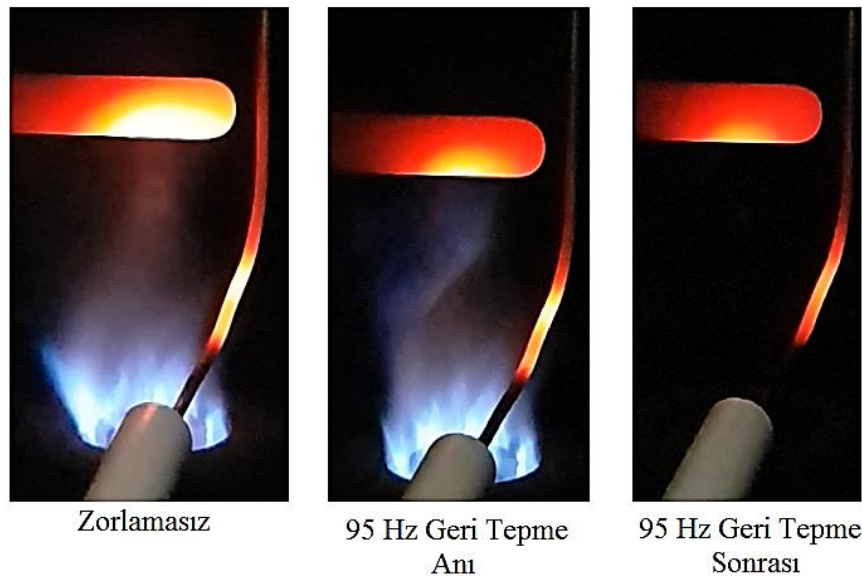
Şekil 14  $H_2/CO = 1,5$  için %21  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

Şekil 3.43'de ise aynı yakıt karışımının %23  $O_2$  oranında oksijenle zenginleştirilmesi ve bu süreç esnasında ortaya çıkan alev görüntüleri verilmiştir. Yanmanın kararlı bir şekilde devam ettiği ve dıştan akustik zorlamanın olmadığı anda alınan görüntüde alevin düzenli bir şekilde yandığı görülebilmektedir. Alev boyu ve kararlılığı akustik zorlama ile beraber düşerken, zorlama frekansı 260 Hz büyüklüğüne getirildiğinde ise alev tekrardan parlak bir şekilde yanmaya devam etmiştir.



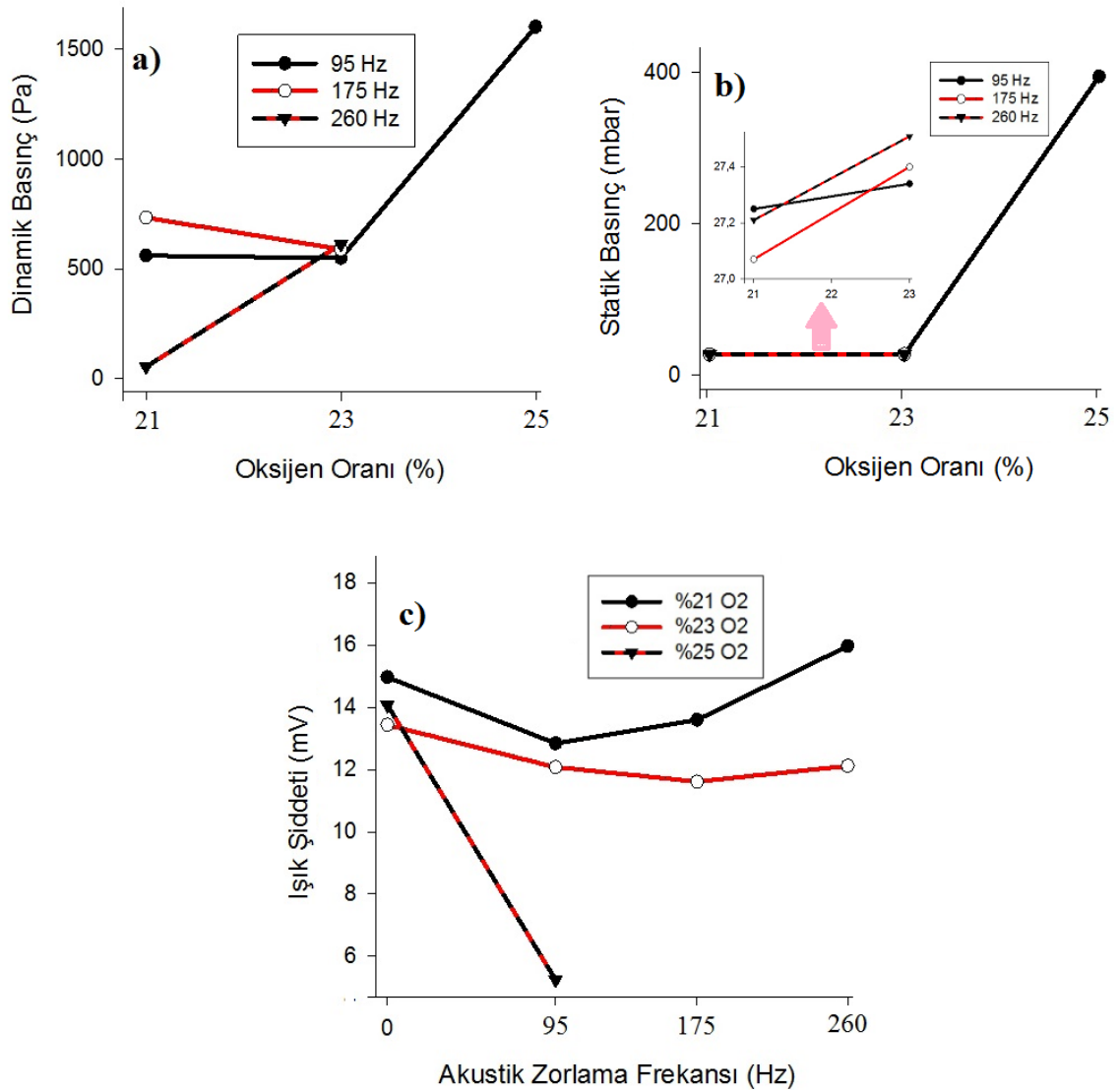
Zorlamasız 95 Hz 175 Hz 260 Hz  
Şekil 3.43.  $H_2/CO = 1,5$  için %23  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

$H_2/CO = 1,5$  için karışımın son oksijence zenginleştirme kademesi ise %25  $O_2$  değeridir. Şekil 3.44'de alev görüntüleri sunulmuştur. Bu görüntülere bakıldığında zorlamasız ortamda %23  $O_2$  oranındaki karışıma göre daha parlak bir şekilde yanan alev 95 Hz akustik zorlama frekansında meydana gelen kararsızlığa dayanamayarak geri tepmiştir. Alev görüntüleri içerisinde, akustik zorlama ile beraber meydana gelen geri tepmenin olduğu andaki alev şekli gösterilmiştir. Bir sonraki görüntüde ise alevin ortadan kalktığı görülmektedir.



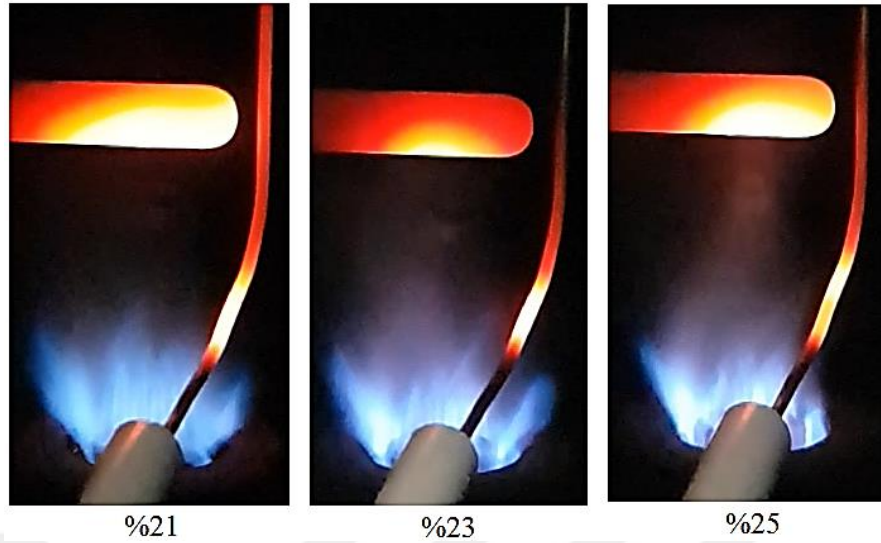
Zorlamasız 95 Hz Geri Tepme Anı 95 Hz Geri Tepme Sonrası  
Şekil 3.44.  $H_2/CO = 1,5$  için %25  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

Sentetik gaz karışımlarının oksijence zenginleştirilmesi deneylerinde test edilen ikinci yakıt karışımı olan H<sub>2</sub>/CO oranı 1,5 değerindeki karışımın, kararsızlık mekanizmaları basınç ve alev parlaklığı verileri ile değerlendirilmiştir. Buna ek olarak, Şekil 3.45’de %30 CH<sub>4</sub> - %42 H<sub>2</sub> - %28 CO içeren yakıt karışımının farklı oksijence zenginleştirme seviyelerindeki kararsızlık değişimleri gösterilmiştir. Oksijence zenginleştirme seviyelerine göre meydana gelen kararsızlık olaylarına bakıldığı zaman %21 oranında oksijen içerikli standart hava ile yanma durumunda ve %23 O<sub>2</sub> ile zenginleştirme halinde bütün akustik zorlamalar altında alev kararsızlıklara rağmen yanmaya devam edebilmiştir. Şekil 3.45 incelendiğinde yakıt karışımının dinamik basınç dalgalanmalarının oksijence zenginleştirme ile beraber ısı yayılım parametresinde meydana gelen artıştan dolayı 260 Hz’e doğru kaydığı görülmektedir. Buna ek olarak oksijence zenginleştirmenin alev kalınlığında meydana getirdiği azalma ve Markstein uzunluğunu düşürmesinden dolayı %25 oksijen oranında yakıt karışımı kararsız bir şekilde yanarak akustik zorlamaya karşı dirençsiz bir hale gelmiş ve geri tepmiştir [93]. Işık şiddeti değişimlerine bakıldığında, alevin söndüğü %25 O<sub>2</sub> oranındaki 95 Hz akustik frekans anında meydana gelen düşüş beklenen bir durum olarak kabul edilebilmektedir. Diğer yandan, standart hava ile yanma durumunda ışık şiddeti daha yüksek olan yakıt karışımı oksijence zenginleştirme ile beraber parlaklığını kaybetmiştir. Bu noktada ışık şiddeti verileri ile dinamik basınç değişimleri ortak değerlendirildiğinde; hidrojen oranı yükselen bir yakıt karışımında oksijence zenginleştirme ile beraber %23 O<sub>2</sub> oranında alev kararlılığında artış meydana gelmemiş, % 25 oranına gelindiğinde ise kararlılık düşmüştür. Kararlılık değişimlerine bağlı olarak alevin parlaklığı oksijence zenginleştirme sonucunda düşmüştür.



Şekil 3.45.  $H_2/CO = 1,5$  için oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti

Oksijence zenginleştirmenin  $H_2/CO = 1,5$  için parlaklığa olan etkinin görülebilmesi amacıyla Şekil 3.46'da zorlamasız durumlar için alev görüntüleri verilmiştir. Bu şekilde fotodiyotlar aracılığıyla alınan ışık şiddeti verileri ile alevin parlaklık seviyeleri birbirleri ile örtüşmektedir. İçerisinde %42 oranında hidrojen bulunduran karışımın hava ile yanması durumunda ortaya çıkan alevin bütün oksijence zenginleştirme deneylerinde oluşan alevlerden daha parlak olduğu görülebilmektedir. Diğer taraftan %23  $O_2$  oranında, alev en düşük ışık şiddetine sahip olurken, oksijence zenginleştirmenin artırılıp alevin daha kararsız hale geldiği %25  $O_2$  seviyesinde ise kalınlığı azalan alev yakıcı bölgesinden uzaklaşarak geri tepme eğilimine daha yakın hale gelmiş ve parlaklığında küçük bir artış meydana gelmiştir.



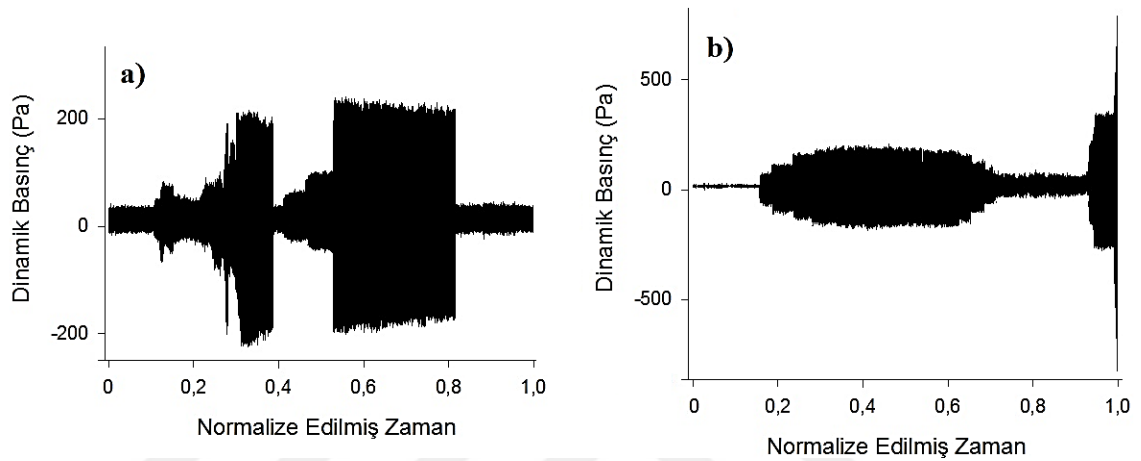
Şekil 3.46.  $H_2/CO = 1,5$  için oksijence zenginleştirmenin alev görüntüsüne etkisi

Sentetik yakıt karışımları deneylerinin sonuncusu olarak ise  $H_2/CO = 3$  olan karışımın oksijence zenginleştirilmesi esnasında meydana gelen kararsızlık değişimleri incelenmiştir. Bu sayede, metan içerisine ilave edilerek kararlılığa olan etkileri görülmeye çalışılan gazlardan hidrojenin oranı karışım içerisinde %52,5 seviyesine çıkarılarak, yüksek hidrojen içeriğinin oksijence zenginleştirme performansına olan etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Zenginleştirmenin etkisinin görülebilmesi için öncelikle hava ile yakılan yakıt, daha sonra %23  $O_2$  oranında test edilmiştir. Bu yakıt karışımının oksijence zenginleştirilebilme limiti, içerisindeki yoğun hidrojen oranından dolayı daha önce test edilen karışımlara göre en düşük seviyede kalmıştır. Yüksek oksijence zenginleştirme oranlarında sentetik gazlardaki  $H_2/CO$  oranında meydana gelen artışın hava ile yanma durumuna göre laminer alev hızında meydana getirdiği artış çok daha yüksektir [94]. Bu sebeple yüksek hidrojen oranına sahip yakıt karışımı yüksek oksijence zenginleştirme oranlarında kararsız bir alev ortaya çıkararak, oksijence zenginleştirmenin olmadığı durumlarda daha sürdürülebilir bir yanma gerçekleştirmiştir.

Şekil 3.47’de yüksek hidrojen oranına sahip sentetik gaz karışımının hava ile yanma ve oksijence zenginleştirme durumlarında akustik zorlamalar karşısındaki dinamik basınç davranışları gösterilmektedir. Hava ile yanma durumunda 95 Hz akustik frekans altındaki alevin dinamik basınç genliği 438 Pa olurken, 175 Hz frekans değerinde yaklaşık aynı kalarak 432 Pa genlik ölçülmüştür. 260 Hz zorlayıcı frekans değerine

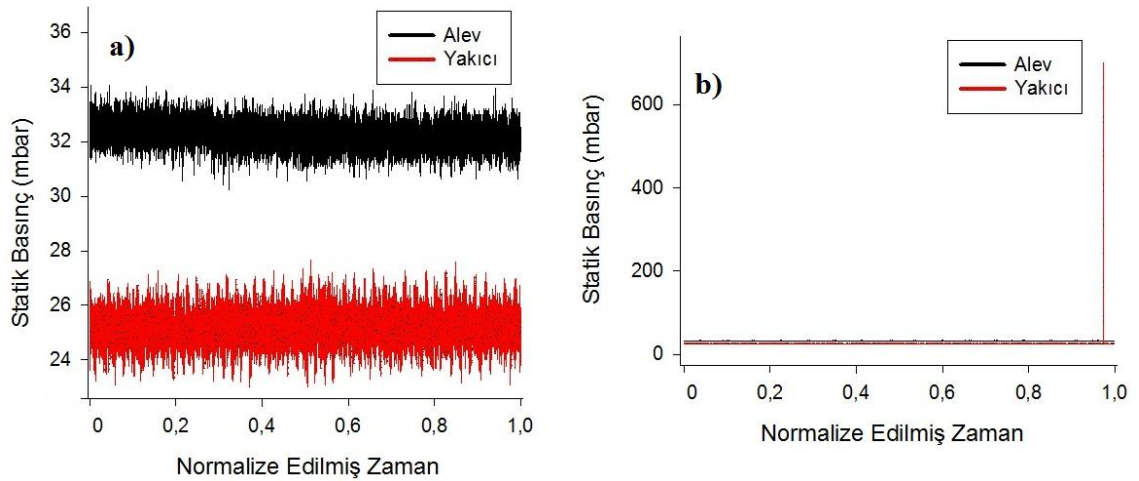


gelindiğinde ise alev etki eden bozucu etki azalmış ve sadece 67.74 Pa basınç aralığında bir salınım meydana gelmiştir. Yakıcı içerisindeki oksijen oranı %23'e çıkarılarak zenginleştirme işlemi yapıldığında ise alev sistemin ilk rezonans değeri olan 95 Hz frekansta zorlanmış ve 403 Pa dinamik basınç genliğinde yanmaya devam etmiştir. Zorlayıcı akustik frekans 175 Hz değerine geldiğinde ise alev kararsızlaşarak 1615 Pa büyüklüğünde bir basınç genliğinde geri tepmiştir.



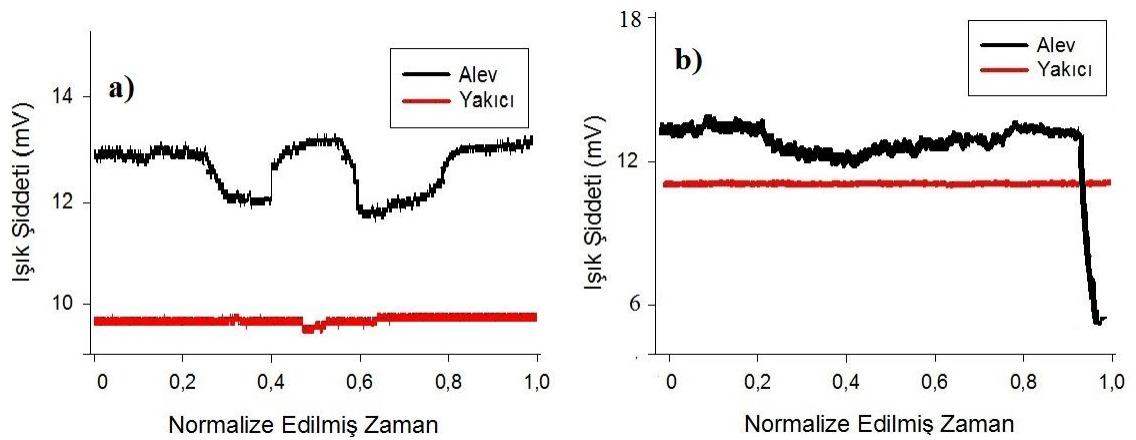
Şekil 3.47.  $H_2/CO = 3$  için dinamik basınç dalgalanmaları a) %21  $O_2$ , b) %23  $O_2$

Yüksek  $H_2/CO$  oranına sahip sentetik gaz karışımının yanma deneyleri esnasında ortaya çıkan statik basınç değişimleri ise Şekil 3.48'de sunulmuştur. %21 oranında oksijen içeren standart hava ile yanma durumunda bütün akustik zorlamalar altında yanmaya devam eden alevin statik basınç değerlerinde önemli bir fark ortaya çıkmamıştır. Sırasıyla 95 Hz, 175 Hz ve 260 Hz frekanslarda yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç değeri 27,68 mbar, 27,57 mbar ve 27,2 mbar olarak kaydedilmiştir. Oksijen oranının artırılması durumunda ise alev 95 Hz frekans altında 27,89 mbar statik basınç ile yanmaya devam ederken, geri teptiği 175 Hz frekanstaki akustik rezonans değerinde 700,15 mbar basınç tepkisine sebep olmuştur.



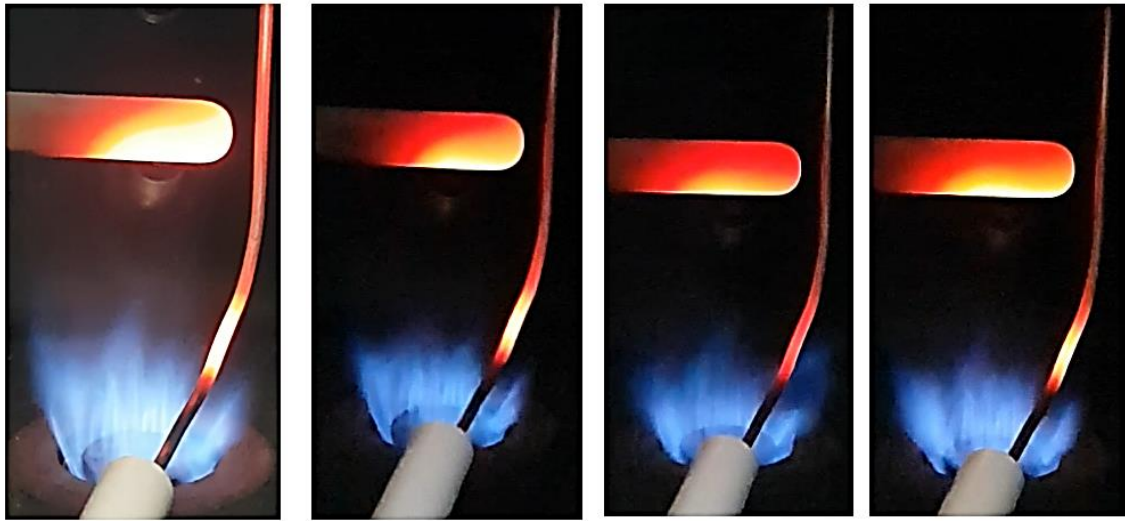
Şekil 3.48.  $H_2/CO = 3$  için statik basınç değişimleri a) %21  $O_2$ , b) %23  $O_2$

Alevin kararsızlık mekanizmalarının yorumlanabilmesi için önemli olan bir diğer değişken ise alevin ışık şiddeti değerleridir. Şekil 3.49'da akustik zorlamalar altındaki alev ışık şiddeti değişimleri gösterilmiştir. Zorlamasız durumda 12,91 mV ışık şiddetinde yanan alev 95 Hz frekans altında parlaklığını kaybederek 11,92 mV değerine gerilemiştir. Akustik zorlama frekansı 175 Hz'ye çıkarıldığında 11,61 mV şiddetinde yanmaya devam etmiş ve 260 Hz frekansa gelindiğinde 13,29 mV büyüklüğüne tekrardan çıkarak kararlı bir yanma sergilemiştir. Oksijence zenginleşen ve kararsız hale gelen alevde ise zorlamasız anda 12,62 mV ölçülen ışık şiddeti, ilk akustik rezonans değeri olan 95 Hz frekansta 11,69 mV değerine gerilerken, geri tepmenin meydana geldiği 175 Hz frekansta ise alev yakıcı içerisine tamamen çekilerek yok olmuştur. Alevin yok olduğu noktada ölçülen ışık şiddeti 5,16 mV olmuştur.



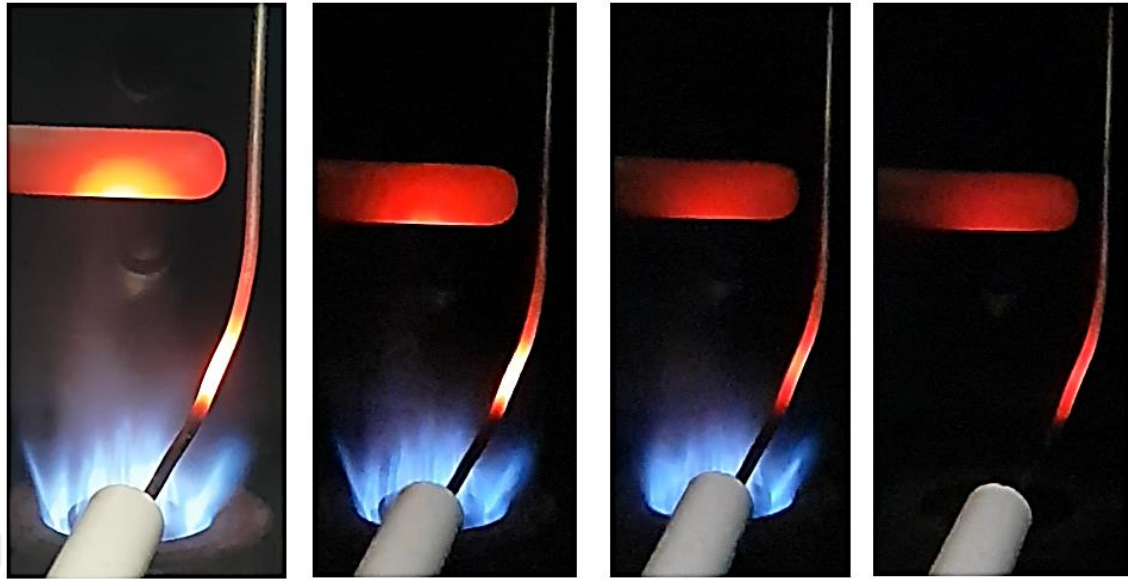
Şekil 3.49.  $H_2/CO = 3$  için ışık şiddeti değişimleri a) %21  $O_2$ , b) %23  $O_2$

Alevde meydana gelen değişikliklerin gözle de görülebilmesi için Şekil 3.50’de yüksek oranda hidrojen içeren sentetik gaz yakıtın hava ile yanması durumundaki alev görüntüleri sunulmuştur. İlk görüntüde kararlı bir şekilde yanan sentetik gaz – hava alevi akustik frekanslar altında zorlanmaya başlamasıyla beraber salınımlı bir şekilde yanmaya başlamış ve parlaklığını kaybetmiştir. En düşük parlaklık seviyesine 175 Hz frekans altındaki zorlama da sahip olan alev, akustik zorlama frekansının artışıyla beraber 260 Hz’de tekrar parlak bir görüntü almaya başlamıştır.



Zorlamasız 95 Hz 175 Hz 260 Hz  
Şekil 3.50.  $H_2/CO = 3$  için %21  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

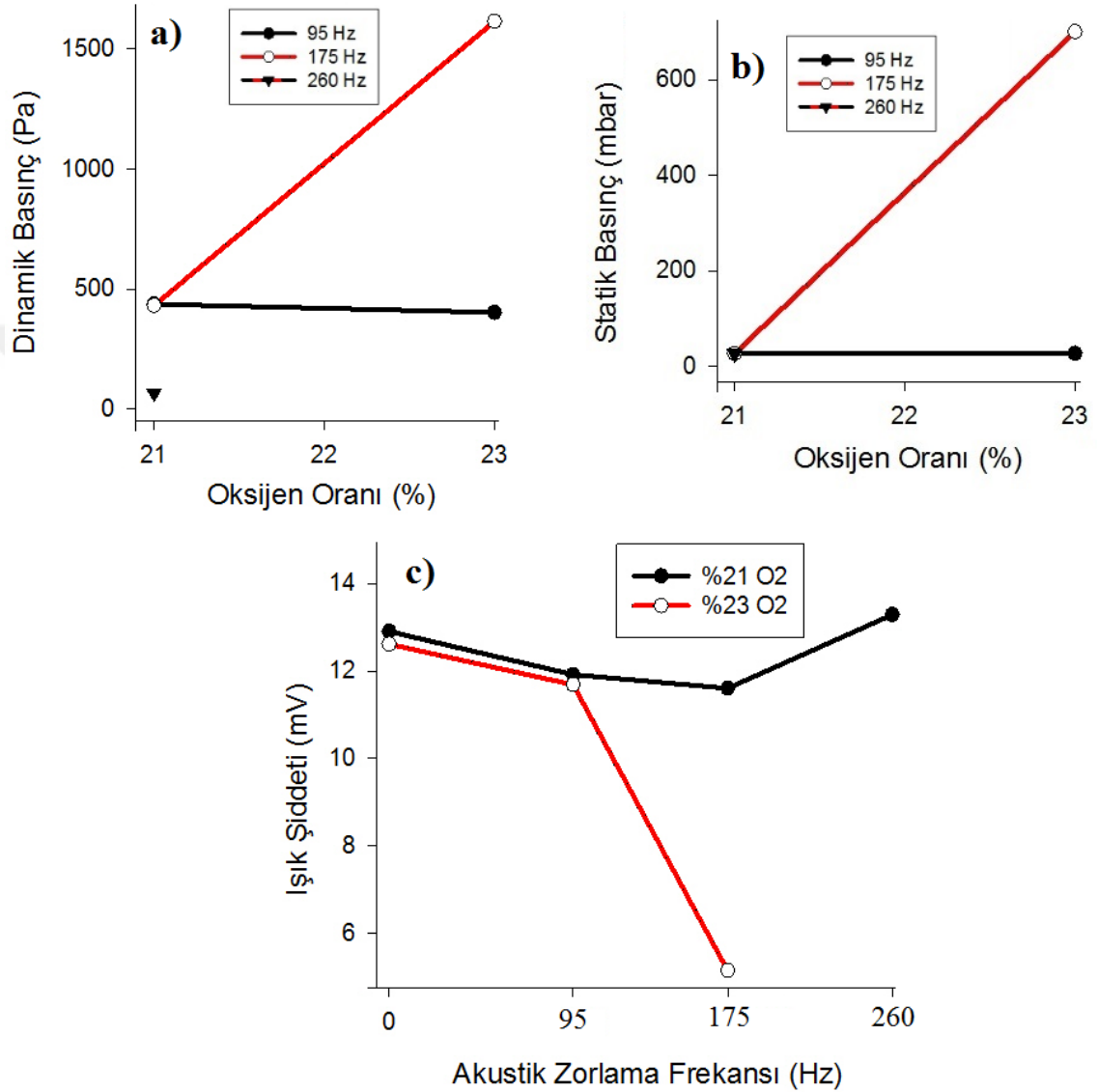
Şekil 3.51’de ise aynı yakıt karışımının oksijenle zenginleştirilmesi sonucu ortaya çıkan alev görüntüleri gösterilmiştir. Zorlamasız durumda dahi parlak bir görüntüye sahip olmayan alev 95 Hz frekanstaki zorlama altında yakıcı içerisine doğru geri çekilmeye başlamıştır. Geri tepmenin meydana geldiği frekans aralığı olan 175 Hz’de ise alevin geri tepmeden önceki son görüntüsü incelendiğinde ısıl çift üzerindeki alev izinin tamamen silindiği ve parlaklığın düştüğünü görülmüştür.



Zorlamasız 95 Hz 175 Hz Sönme Anı  
Şekil 3.51.  $H_2/CO = 3$  için %23  $O_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

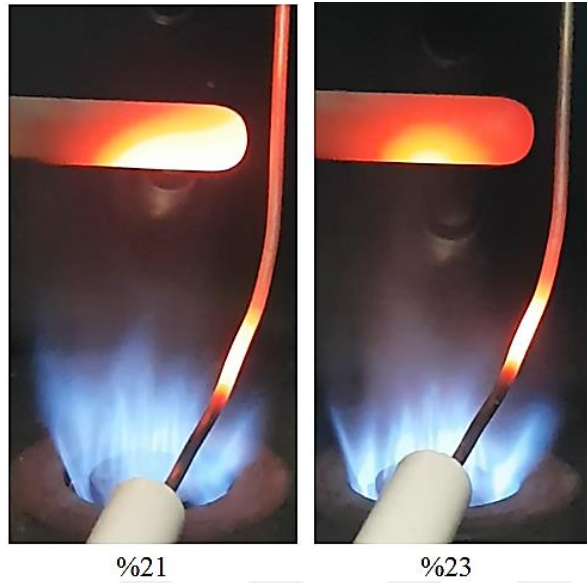
Sentetik gaz karışımlarının sonuncusu, yüksek oranda hidrojen içeren yakıt karışımının oksijence zenginleştirilmesi durumunda alev kararlılığında meydana gelen değişimler Şekil 3.52’de verilmiştir. Öncelikle dinamik basınç değişimleri karşılaştırıldığında diğer sentetik gaz karışımlarında olduğu gibi oksijence zenginleştirme ile beraber alevin akustik rezonansa karşı duyarlılık sınırlarının 175 Hz frekansa doğru ilerlediği görülmektedir. Yüksek  $H_2/CO$  oranına sahip sentetik gaz karışımlarının içerisindeki hidrojenden dolayı özellikle fakir yanma sınırları içerisinde laminer yanma hızlarının daha yüksek olduğu bilinmektedir. Oksijence zenginleştirme ve hidrojen oranındaki artışın aynı anda laminer yanma hızında artış meydana getirmesi alevde yaşanan kararsızlığın en önemli sebeplerinden birisidir [95]. Ayrıca literatürdeki çalışmalarda hidrojen artışı ve oksijence zenginleştirmenin laminer yanma hızında olduğu gibi lewis sayısına etkisi de benzer niteliktedir. Karışım içerisindeki artan hidrojen ve oksijen oranları Lewis sayısını düşürürken, Markstein uzunluğu da buna bağlı olarak azalmaktadır. Markstein uzunluğunda meydana gelen büyük düşüş, alevin tamamen kararsız bir yapıya bürünerek %23  $O_2$  oranında akustik zorlamaya karşı dirençsiz bir hale gelmesine sebep olmuştur. Ek olarak alev, hidrojen oranı daha düşük olan karışımların yanabildiği %25  $O_2$  oranında da kararsızlıklardan ötürü geri tepme yaparak kaybolmuştur [96].

Alevin akustik alan içerisinde kararsız bir hale gelmesinin bir diğer sebebi de hidrojenin kimyasal reaksiyon süresinin düşük olmasıdır. Kimyasal reaksiyona bağlı ısı salınım süresi azalan hidrojen alevinde alev zayıflamış bir durum sergilemektedir [44].



Şekil 3.52.  $H_2/CO = 3$  için oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti

Işık şiddeti verileri ise yakıt karışımının oksijence zenginleştirilmesi ile beraber parlaklığında bir artışın meydana gelmediğini göstermektedir. Şekil 3.53’de görüleceği gibi alevde meydana gelen kararsızlıklardan ötürü alev yakıcı içerisine çekilerek daha kısa bir profil çizmiştir. Alev görüntüleri arasındaki farkı ve ışık şiddetinin değişimini yine ısıl çift üzerinde meydana gelen kor büyüklüğünden anlamak mümkündür.



Şekil 3.53.  $H_2/CO = 3$  için oksijence zenginleştirmenin alev görüntüsüne etkisi

### 3.3.4. Oksijence Zenginleştirmenin $CH_4/CO_2$ (Biyogaz) Karışımının Yanma Kararsızlığına Etkisi

Organik atıklardan kullanılabilir olarak üretilen yakıt anlamına gelen biyogaz, yenilenebilir enerji kaynakları arasında sayılmakta ve güncel araştırmalara konu olmaktadır. Büyük oranda metandan oluşan biyogaz karışımları aynı zamanda karbondioksit de içermektedir. İçerdiği karbondioksit sebebiyle hem seyreltilmiş bir gaz karışımı olurken aynı zamanda yanma sonu emisyonu bakımından da karbon nötr olarak bilinmektedir. Karışım içerisinde bulunan gazlara göre değişmekle beraber havadan yaklaşık %20 daha hafif olan biyogaz 650-750 °C sıcaklıkta tutuşmaktadır. Özellikle son yıllarda yapılan emisyon çalışmalarında  $CO_2$  döngüsü bakımından emisyonları %85'e kadar azaltılabileceği gözlemlenmiştir [97].

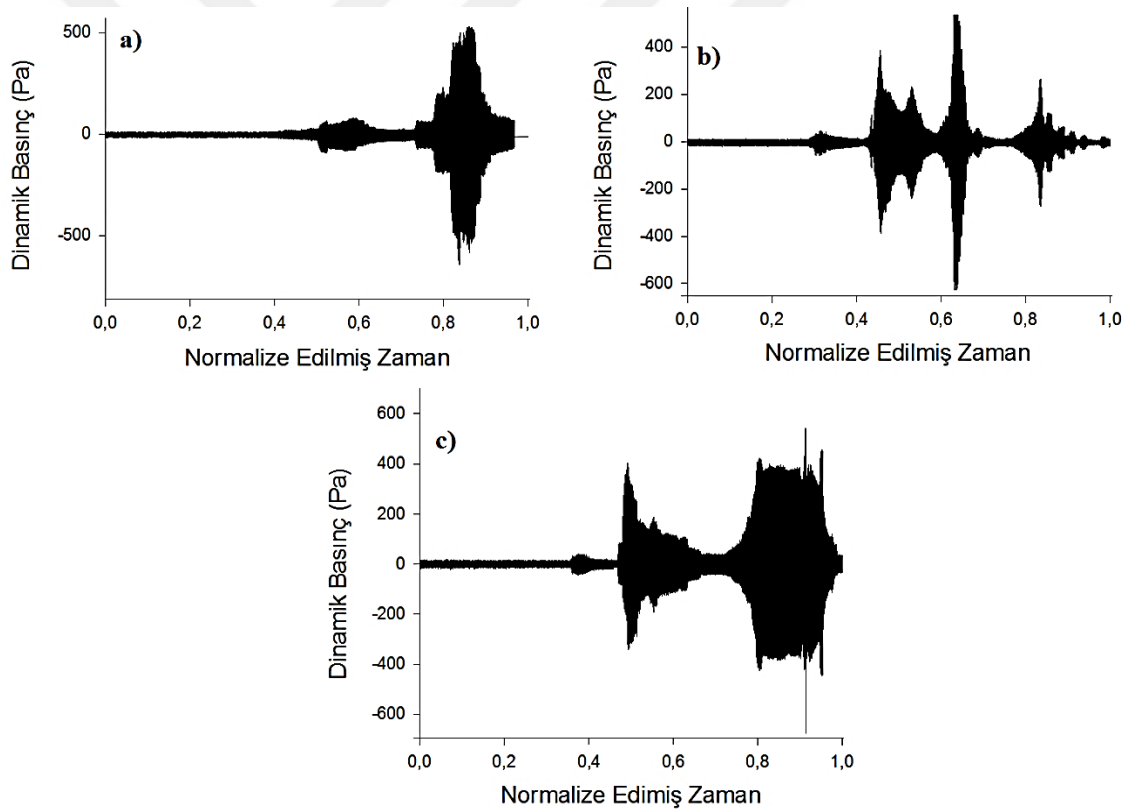
Biyogazın temiz ve yenilenebilir bir yakıt olmasından dolayı son yıllarda biyogaz yanması üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak yanma kararsızlıkları, alev görüntüleri ve yanma sonu ortaya çıkan egzoz emisyonları incelenerek değişken parametrelerde bu değerlerin karşılaştırılması yapılmıştır. Bu kısımdaki çalışmanın literatürdeki araştırmalardan farkı; biyogaz karışımının oksijence zenginleştirilerek yakılması ve farklı akustik zorlama frekanslarında alev kararlılığındaki değişimlerin ilk defa çalışılmıştır. Aynı zamanda ön karışımli bir yakıcıda girdap destekli bir yanma mekanizması bu amaçla, ilk kez kullanılmıştır.

Tez çalışmasının bu kısmında oksijence zenginleştirilerek yanması esnasında kararlılık ve emisyon ölçümleri elde edilen metan gazına hacimsel olarak %40 oranında karbondioksit ilave edilmiştir. Bu sayede oksijence zenginleştirilmiş metan gazının karbondioksit ile seyreltilmesinin yanma kararsızlığına etkisi araştırılmıştır. Seyreltici olarak ilave edilen karbondioksit %40 oranında tutularak endüstride biyogaz karışımı olarak bilinen %60 CH<sub>4</sub> - %40 CO<sub>2</sub> yakıt karışımı oluşturulmuş, bu sayede pratik uygulamalar için de faydalı olabilecek bir çalışmayı literatüre kazandırmak amaçlanmıştır.

Oksijence zenginleştirmenin biyogaz karışımındaki kararsızlıklar üzerindeki etkisinin incelenmesi için öncelikle karbondioksit ilavesinden sonra metanın oksijence zenginleştirme limitlerinde meydana gelen değişim araştırılmıştır. Sisteme giren hava miktarı düşülerek ilave bir tanktan oksijen tedariki yapılmış ve bu durumda O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> oranı %31'e kadar çıkarılabilmektedir. Saf metan yanmasında %27,6'ya kadar çıkarılabilen oksijence zenginleştirme limiti CO<sub>2</sub> ilavesiyle beraber %31 değerine genişlemiştir. Oksijence zenginleştirme işlemlerinde yakıt-hava karışımı içerisinde azot miktarı eksilmektedir. Bu sebeple azot gazına benzer nitelikte seyreltici görevi üstlenen CO<sub>2</sub> gazının yakıt içerisinde olması, karışımın oksijence zenginleştirilebilme limitini artırmıştır. Biyogaz karışımında bulunan CO<sub>2</sub> gazı azota benzer bir şekilde ısı değeri olmayan bir gazdır ve %40 gibi yüksek bir oranda yakıt karışımı içerisinde bulunması yakıt karışımının kütsel olarak alt ısı değerini düşürmektedir.

Biyogaz karışımının farklı oksijen oranlarında yanması sonucu akustik zorlamalar altında ortaya çıkan dinamik basınç salınımları Şekil 3.54'de gösterilmiştir. CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımının %21 O<sub>2</sub> oranındaki hava ile yanması durumunda sistemin ilk akustik rezonans değeri olan 95 Hz frekans altında zorlamaya dayanamayarak 1062 Pa genlikte sönmüştür. Bu durum alt ısı değeri CO<sub>2</sub> ilavesiyle beraber düşürülen karışımın fakir yanma sınırları içerisinde yakılmasından dolayı dıştan akustik zorlamalara karşı daha dirençsiz hale geldiğini göstermektedir. Abubakar et al., yaptıkları benzer bir çalışmada CO<sub>2</sub> ile seyreltilmiş propan alevini farklı oksijen oranlarında incelenmiştir. Özellikle yüksek akustik frekanslar altında yaptıkları testlerde, %45 CO<sub>2</sub> oranında yakıt karışımının ısı salınımı ve basınç dalgalanmaları arasında yükselen bir bağlantıdan dolayı kararsızlıkların tetiklendiğini belirtmişlerdir [98].

Karışımın %24 oranında oksijenle zenginleştirilmesi durumunda ise 95 Hz zorlayıcı akustik frekans altında alev 775 Pa dinamik basınç genliği ile yanmaya devam etmiştir. Oksijence zenginleştirme ile beraber ısı salınım karşılığı daha yüksek frekanslara doğru ilerleyen alevin 175 Hz frekans altındaki dinamik basınç genliği 1151 Pa olmasına rağmen yanmaya devam etmiştir. Son akustik rezonans değeri olan 260 Hz frekansta ise aleve etki eden bozucu kuvvet düşerek en düşük ve en yüksek dinamik basınç değerleri arasında 530 Pa genlik ortaya çıkmıştır. Oksijence zenginleştirme seviyesinin daha da yükseltilerek %28'e çıkarıldığı son çalışmada ise  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  alevi 95 Hz frekans altında 733 Pa genlikte yanmaya devam ederken, frekans değerinin 175 Hz büyüklüğüne getirilmesiyle beraber 1213 Pa değerindeki bir dinamik basınç salınımı altında alev kaybolmuştur.

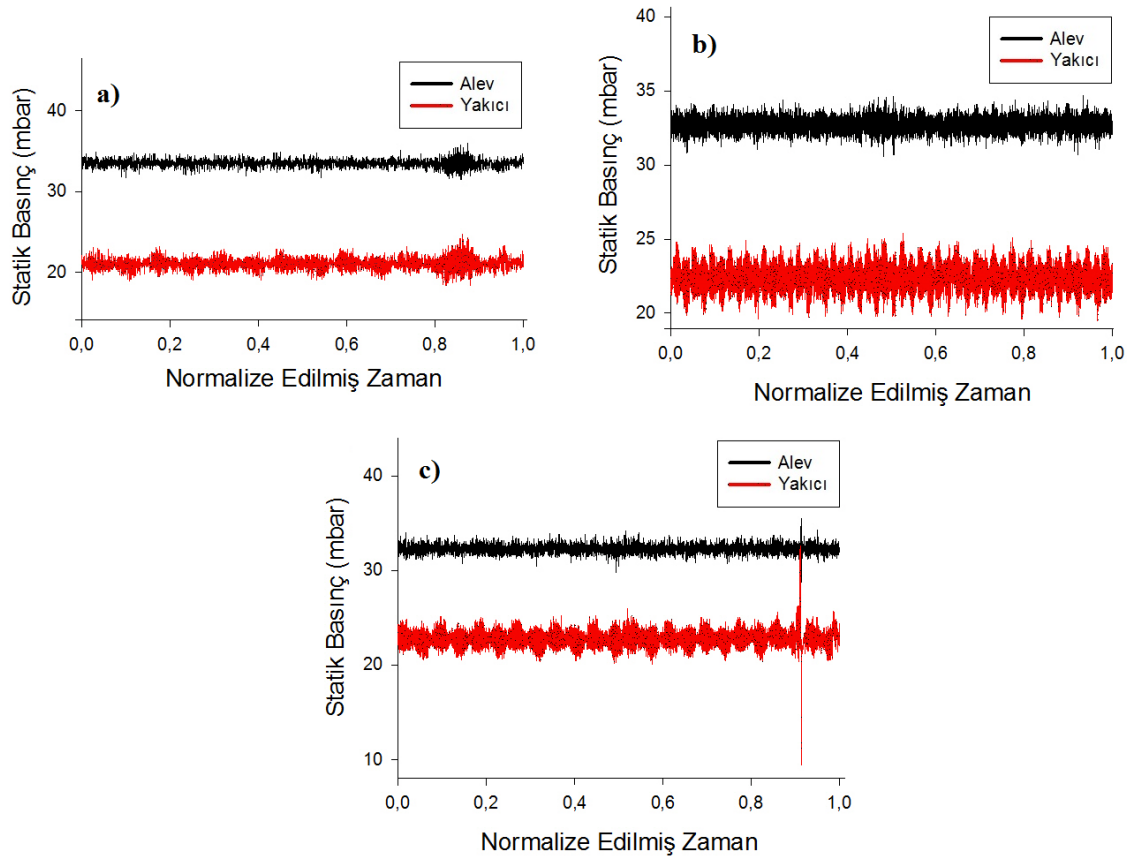


Şekil 3.54.  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  karışımı dinamik basınç dalgalanmaları a) %21  $\text{O}_2$ , b) %24  $\text{O}_2$ , c) %28  $\text{O}_2$

Karışımın kararlılık değişimlerinin değerlendirilmesindeki bir diğer parametre ise yakıcı içerisindeki maksimum basınç değişimleridir. Şekil 3.55 incelendiğinde, alevde sönmenin meydana geldiği an olan 95 Hz frekanstaki zorlamada yakıcı içerisindeki maksimum basınç 24,79 mbar olarak ortaya çıkmıştır. Alevin geriye doğru şiddetli bir

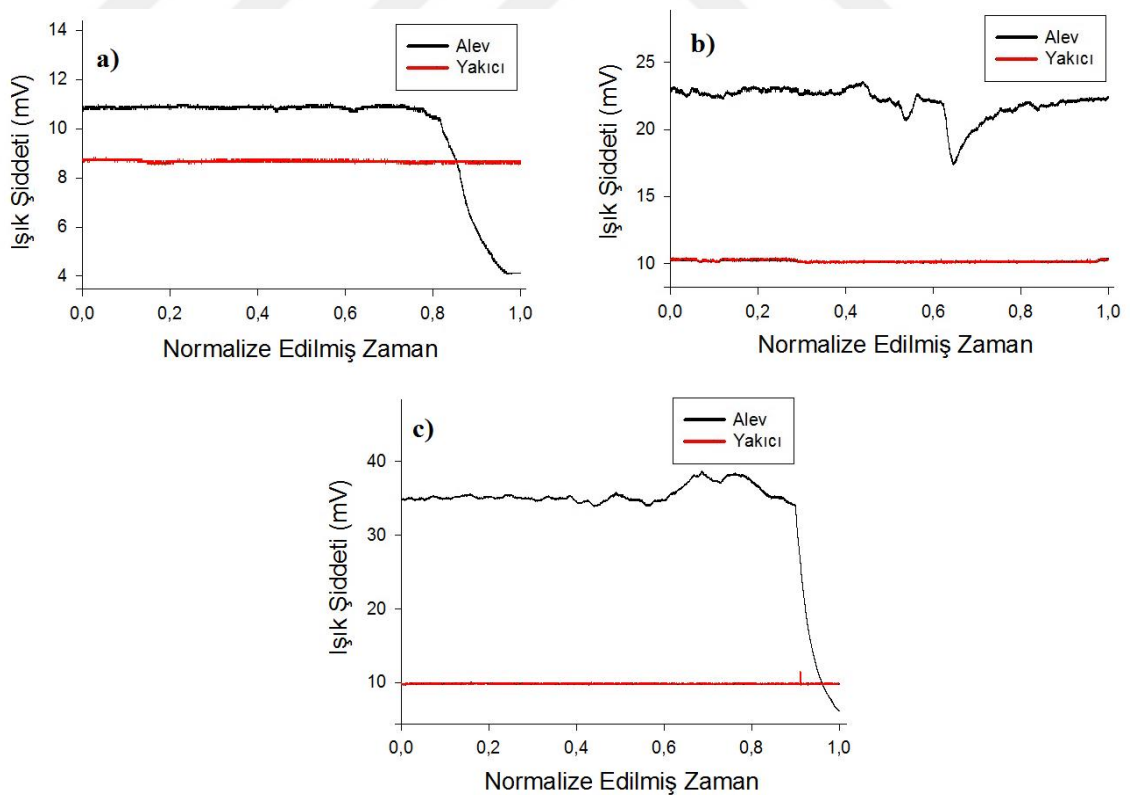


tepme yapmamış olmasından dolayı basınç değerinde bir sıçrama oluşmamıştır. %24 oksijen oranında yapılan deneyde ise alev bütün zorlama frekansları altında kararlı bir şekilde yanmaya devam etmiştir. Yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç değerleri 95 Hz, 175 Hz ve 260 Hz frekanslar altında sırasıyla 25,4 mbar, 24,96 mbar ve 25,1 mbar olarak ölçülmüştür.  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  karışımına uygulanan en yüksek oksijen seviyesi olan %28  $\text{O}_2$  oranında ise 95 Hz akustik frekans altında kararlı bir şekilde yanmaya devam eden yakıt/hava karışımının maksimum yakıcı statik basıncı 26,1 mbar olarak belirlenirken, alevin yok olduğu 175 Hz frekansta ise statik basınç 32,82 mbar değerine yükselmiştir. Biyogaz karışımının tüm oksijen zenginleştirme oranlarında statik basınç değişimlerine bakıldığında dinamik basınç dalgalanmalarına benzer bir şekilde akustik rezonans değerlerinde bir artış görülmektedir. Buna rağmen özellikle  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  karışımları ile kıyaslandığında ise, yakıt karışımının ısıl değerinin düşük olmasından kaynaklı olarak alev yok olurken yakıcı içerisinde büyük bir statik basınç değişimi yaşanmamıştır.



Şekil 3.55.  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  karışımı statik basınç değişimleri a) %21  $\text{O}_2$ , b) %24  $\text{O}_2$ , c) %28  $\text{O}_2$

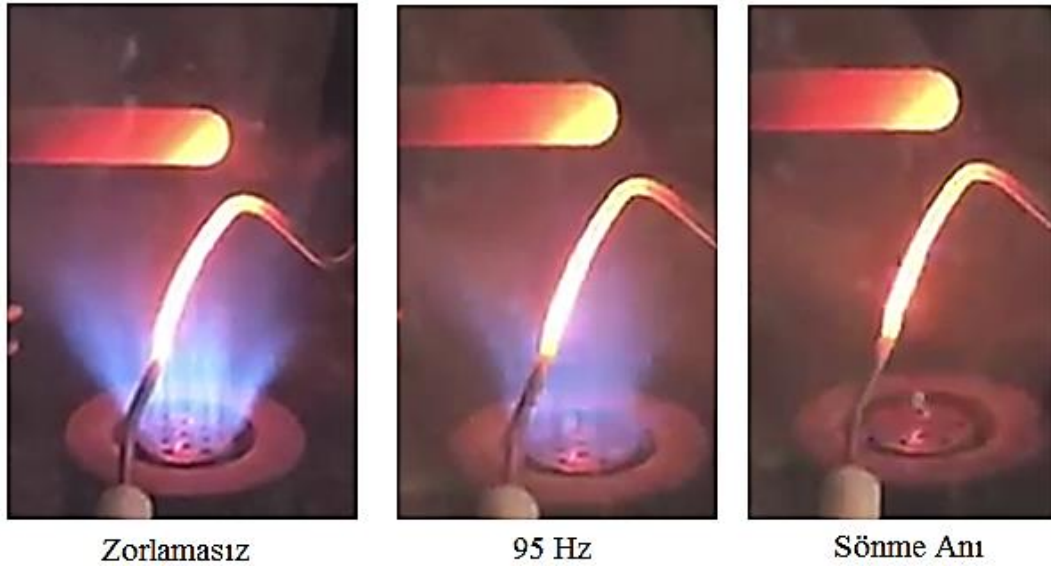
Metan içerisinde karbondioksit eklenerek oluşturulan biyogaz karışımının oksijence zenginleştirilmesi durumunda ortaya çıkan ışık şiddeti değişimleri Şekil 3.56'da sunulmuştur. Yakıt karışımının standart hava ile yanması durumunda 10,83 mV olan ışık şiddeti, alev üzerine dıştan akustik zorlamanın uygulanması ve rezonans değeri olan 95 Hz büyüklüğüne gelinmesiyle beraber yaşanan sönmeden dolayı 4,11 mV değerine kadar düşmüştür. %24 O<sub>2</sub> oranında ise zorlamasız durumda 23,11 mV büyüklüğünde olan alev parlaklığı, sistemin ilk akustik rezonans değeri olan 95 Hz frekans altında 20,66 mV değerine düşmüş, zorlayıcı frekansın artırılmasıyla beraber 175 Hz'de 17,34 mV şiddetine kadar gerilerken, 260 Hz frekansta tekrar 22,47 mV parlaklığına ulaşmıştır. Dinamik basınç dalgalanmalarına benzer şekilde en yüksek basınç değişiminin yaşandığı 175 Hz frekansta ışık şiddeti en düşük seviyesini görmüştür. Son olarak, oksijen oranının %28'e çıkarıldığı yanma deneyinde ise zorlamanın olmadığı durumda ışık şiddeti 34,79 mV olarak ölçülmüştür. Alevi sönmediği 95 Hz frekans altında 34,03 mV değerine gerileyen ışık şiddeti, 175 Hz zorlayıcı frekansta alevin sönmesinden dolayı yok olma seviyesine gelerek en son 6,4 mV ölçülmüştür.



Şekil 3.56. CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımı ışık şiddeti değişimleri a) %21 O<sub>2</sub>, b) %24 O<sub>2</sub>, c) %28 O<sub>2</sub>

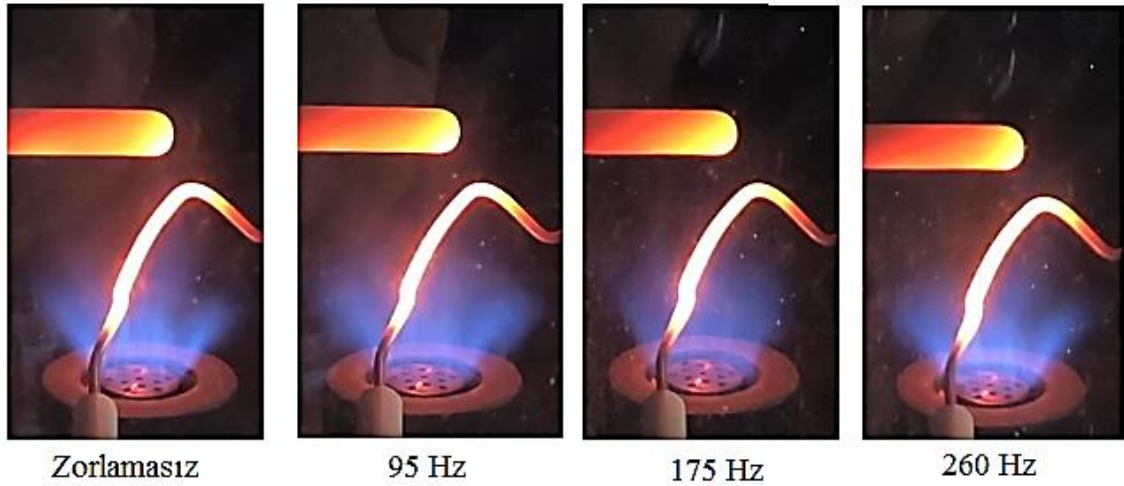
CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> alevinde yapılan ışık şiddeti değerlendirmelerinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.57'de karışımın hava ile yanması durumunda ortaya çıkan alev görüntüleri

sunulmuştur. Akustik zorlamanın olmadığı bir anda alınan görüntüde kısa olmasına rağmen düzenli bir şekilde yanan alev görülmektedir. Buna rağmen 95 Hz akustik frekans altındaki durumda alev tamamen kararsızlaşarak hem uzunluğunu hem de kalınlığını kaybetmiştir. Son durumda ise yakıcı içerisine çekilerek sönmüştür.



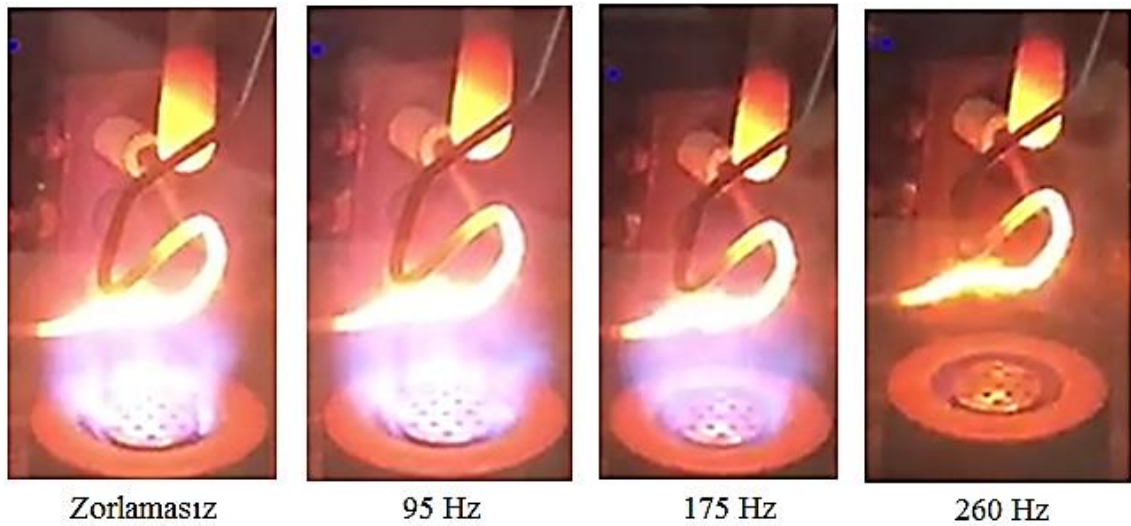
Şekil 16 CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımının %21 O<sub>2</sub> içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

Şekil 3.58'de ise %24 O<sub>2</sub> oranındaki hava ile yanma durumu verilmiştir. Zorlamasız durumda parlak bir şekilde yanan alev, akustik zorlamalar altında kararlılığını kaybederek yakıcı merkezinden kopuk bir şekilde yanmaya başlasa da geri tepme yahut sönmeye sebep olacak kadar büyük bir kararsızlık meydana gelmemiştir. Alevin en kararsız olduğu an 175 Hz frekans altındaki durum olarak görülmektedir. Isıl çift üzerinde oluşan alev izleri incelendiğinde en küçük parlaklığın bu noktada olduğu görülebilmektedir. 260 Hz frekansta ise biyogaz alevi zorlamasız durumdaki kararlılığa yakın bir seviyede yanmaya devam etmiştir.



Şekil 3.58.  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  Karışımının %24  $\text{O}_2$  İçerikli Hava ile Yanması Alev Görüntüleri

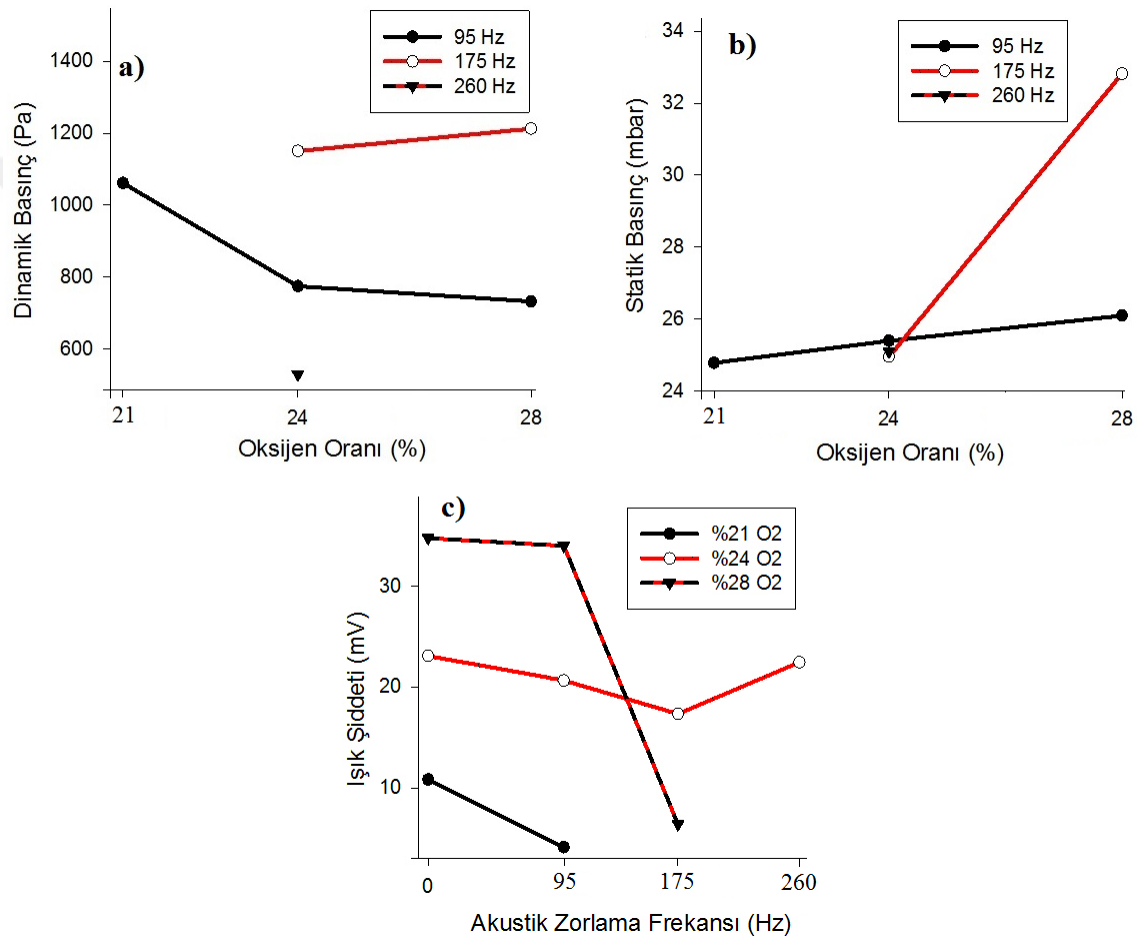
Oksijence zenginleştirme deneylerinin en yüksek seviyesi olan %28  $\text{O}_2$  oranında alev görüntüsü Şekil 3.59'da sunulmaktadır. Zorlamasız durumda yüksek oksijen oranının da etkisiyle son derece parlak bir görüntüde yanan alev, 95 Hz frekans altındaki zorlamada küçük salınımlara rağmen yanmaya devam ederken 175 Hz frekansa geldiğinde yavaşça girdap üreticisinin içerisine doğru geri çekilerek sönmüştür. Oksijence zenginleştirmenin yüksek oranlara çıkması alevin kararlılığını olumsuz etkilemiştir.



Şekil 3.59.  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  karışımının %28  $\text{O}_2$  içerikli hava ile yanması alev görüntüleri

%60  $\text{CH}_4$  - %40  $\text{CO}_2$  karışımının farklı oksijen oranlarındaki dinamik basınç genliği, statik basınç değişimi ve ışık şiddeti ölçümleri Şekil 3.60'da karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir. Biyogaz karışımının içerisindeki yoğun karbondioksitin laminer yanma hızını ve damhökler sayısını düşürmesi sebebiyle akustik zorlamalar altındaki kararsızlığı düşük bulunmaktadır [55]. Buna rağmen oksijen oranındaki artışla beraber

yanma hızının tekrardan yükselmesi özellikle %24 O<sub>2</sub> seviyesine kadar kararlılık açısından olumlu bir gelişme ortaya çıkarmıştır. Oksijen oranı daha da artırılarak %28'e çıkarıldığında ise alev, hava ile yanma durumuna göre hala daha kararlı olsa da %24 O<sub>2</sub> oranındaki akustik zorlama davranışlarına bakıldığında kararsızlıkta düşüş görülmektedir. %24 Oksijen oranındaki alev bütün zorlama frekanslarına karşı yanmaya devam ederken, %28 O<sub>2</sub> seviyesinde 175 Hz frekansta sönme meydana gelmiştir [99].



Şekil 3.60. CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımında oksijence zenginleştirmenin kararsızlığa etkisi a) Dinamik basınç, b) Yakıcı statik basıncı, c) Alev ışık şiddeti

Kararlılık değişimini sisteme giren toplam O<sub>2</sub> miktarı aynı olması ve eşdeğerlik oranının sabit tutulmasına rağmen yakıcı içerisindeki azot miktarının azalmasından dolayı kütsel olarak yakıt/hava oranı zenginleştirme ile beraber artış gösterdiği belirlenmiştir. Yakıt/hava oranındaki bu artış % 24 O<sub>2</sub> değerine kadar olumlu bir etkiye sebep olurken % 28 O<sub>2</sub> oranında yakıt kütselinin daha baskın hale gelmesi ile kararlılığa sağladığı katkı azalmaya başlamıştır. Sistem içerisindeki oksijen oranındaki artış ve oksijenin yanmayı hızlandırması da kararsızlığı tetikleyen bir diğer mekanizma olarak

değerlendirilmektedir. % 28 O<sub>2</sub> değerindeki kararlılık durumu halen hava ile yanmaya oranla daha yüksek olmasına ve alevin ilk akustik rezonans değerinde sönmemesine rağmen zenginleştirme oranı % 31 O<sub>2</sub> ve üzerinde değerlere çıkarıldığında zorlamasız durumda dahi alev kararlı bir şekilde yanmamıştır. Bu durum sistem içerisinde seyreltici gazların etkisinin de yanıcı gazlar kadar kararlılığa katkı sağladığını ve oksijen oranının fazla artırılması durumunda alevin hızının çok artarak yok olmaya sebep olduğunu göstermektedir.

Kararsızlık değişimlerine ek olarak, deneylerde kullanılan bütün yakıt karışımlarında olduğu gibi biyogaz karışımında da oksijence zenginleştirme ile beraber 175 Hz frekans altındaki dinamik basınç salınımları hava ile yanma durumuna göre artışa geçmiştir. Bu durum oksijence zenginleştirmenin birçok farklı karışımda alevin akustik frekans karşılığını 95 Hz'den 175 Hz frekansa doğru değiştirdiğini göstermektedir. Ayrıca termo-akustik kararsızların artışa geçtiği frekansların yakıcı tasarımına, yakıt karışımı içerisindeki bileşenlerin oranına, girdap sayısına, yakıt/hava oranına ve oksijence zenginleştirme oranına göre değiştiği literatürdeki çalışmalara benzer bir şekilde ortaya çıkmıştır [100,101]. Oksijence zenginleştirmenin ışık şiddetine etkisi incelendiğinde ise akustik zorlamanın olmadığı şartlarda oksijen oranı arttıkça alevin parlaklığı 3 katına kadar artış göstermiştir.

### **3.4. Oksijence Zenginleştirilmiş Metan İçerikli Yakıt Karışımlarının Emisyon Davranışları**

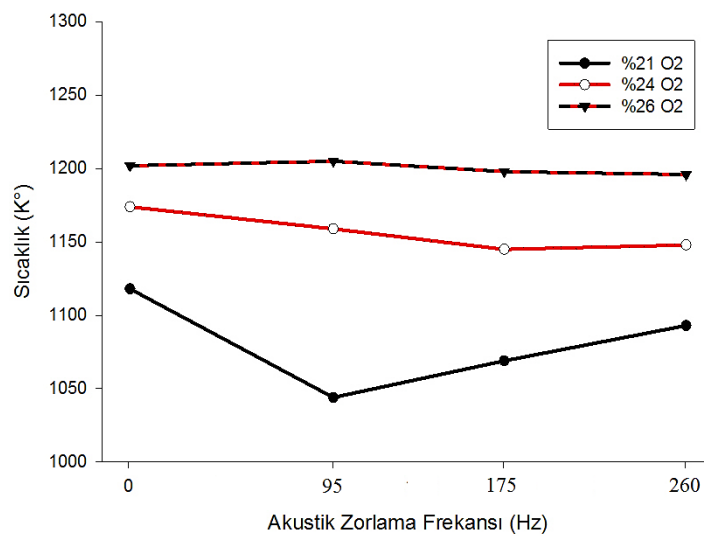
İçerisinde bir karbon atomu ve dört hidrojen atomu barındıran metan, günümüzün en önemli enerji kaynaklarından birisidir. Biokütleden termal gazlaştırma yöntemi ile de üretilebilmektedir [102]. Dünya atmosferindeki moleküler bolluğu CO<sub>2</sub>'nin %0.5'i kadar iken sera gazı etkisi açısından 50 kat daha tehlikelidir [103]. Oksijen ile yakılması durumunda teorik olarak CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O emisyonlarını ortaya çıkaran metan karbon emisyonlarının da temel sebeplerinden birisi olarak görülmektedir.

Metanın tam yanması durumunda CO<sub>2</sub> ve eksik yanmasında ise CO emisyonlarına sebep olmasından dolayı araştırmacılar son yıllarda emisyon azaltma çalışmalarına verdikleri önemi artırmışlar ve bu alanda çalışmalar yapmışlardır. Metanın oksijence zenginleştirilerek yakılması da bu çalışmaların başında gelmektedir. Farklı yakıcılarda oksijence zenginleştirilmesi konusunda çalışmalar yapılan metanın ön karışimli bir yanma akustik odada, girdap destekli bir mekanizma ile emisyon değerlerindeki

değişimin test edilmesi gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca emisyon değerlerinin yanı sıra tez çalışmasının orijinalliğini ortaya koyan temel kriter de yapılan testlerde farklı akustik zorlamalar altında yanma kararsızlıklarının incelenmesidir. Çalışmanın bu bölümünde metan içerisine farklı oranlarda H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> gazları ilave edilerek oksijence zenginleştirme şartlarındaki emisyon davranışları incelenmiştir.

### 3.4.1. Oksijence Zenginleştirmenin Saf Metanın Emisyon Davranışına Etkisi

Saf metanın hava ile yanması ve oksijence zenginleştirilmesi durumlarındaki emisyon değişimleri bu bölümde incelenmiştir. Yanma odalarında adyabatik alev sıcaklığının özellikle NO<sub>x</sub> emisyonları üzerinde yaptığı etkiler bilindiği için emisyon değişimlerini incelemeye önce yakıcı çıkışındaki sıcaklık değerlerini Şekil 3.61’de verilmiştir. Oksijence zenginleştirmenin doğrusal etkisini inceleyebilmek için zorlamasız durumlardaki sıcaklık değerleri ve zorlama altındaki değişimleri karşılaştırılmıştır. Saf metanın hava ile yanmasında zorlamasız durumda 1118 K sıcaklık değeri %24 O<sub>2</sub> oranında 1174 K’ye çıkarken, %26 O<sub>2</sub> oranında ise sıcaklık 1202 K olarak ölçülmüştür. Elde edilen değerler literatürdeki birçok çalışmada olduğu gibi oksijence zenginleştirmenin alev sıcaklığını artırdığını göstermektedir. Seyreltici ve alev sıcaklığını azaltıcı etkisi olduğu bilinen azotun oksijence zenginleştirme ile beraber hava içerisindeki miktarının düşmesi alev sıcaklığında yaşanan artışın temel nedeni olarak görülmektedir.



Şekil 3.61. Oksijence zenginleştirmenin yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi

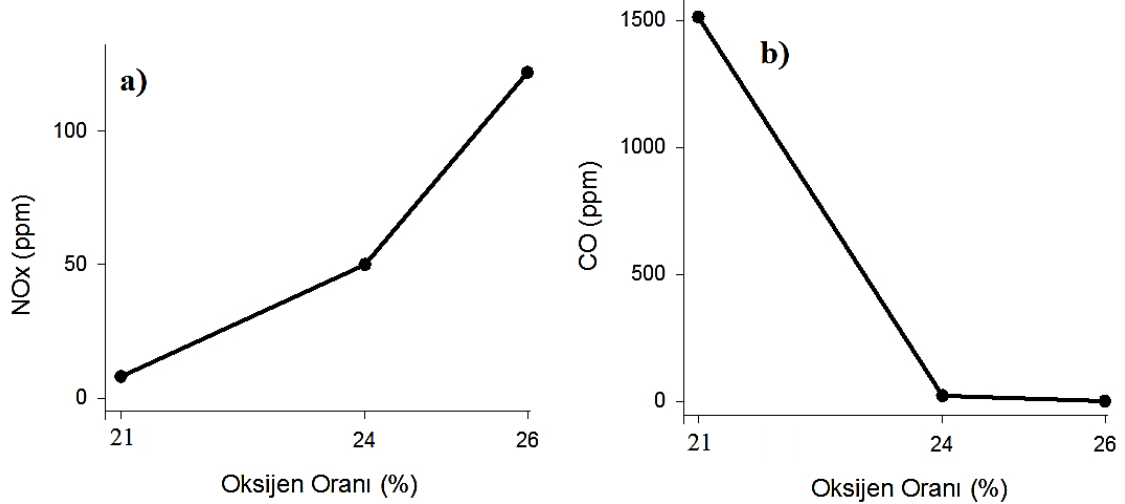
Hem yanma odası çevresindeki girişlerden hem de baca kısmından emisyon cihazı yardımıyla değerler alınabilmektedir. Bu tez çalışmasında, yanmanın tamamlanıp yanmış gazların çevre ortamına atıldığı baca kısmından emisyon değerleri alınmıştır. Oksijence zenginleştirmenin CO ve NO<sub>x</sub> kirletici emisyonlarına etkisi Şekil 3.62'de sunulmuştur.

Saf metan yakıtına uygulanan oksijence zenginleştirme işlemi ile beraber hem %24 hem de %26 oksijen oranlarında NO<sub>x</sub> seviyelerinde büyük bir artış gözlemlenmektedir. Hava ile yanma durumunda 8 ppm olan emisyon değeri, %24 O<sub>2</sub> oranında 50 ppm'e çıkmıştır. O<sub>2</sub> seviyesi %26'ya çıkarıldığında ise NO<sub>x</sub> emisyonu seviyesi 122 ppm'e ulaşmıştır. Bilindiği üzere NO<sub>x</sub> oluşumunun üç ayrı mekanizması bulunmaktadır. Bu çalışmada oluşan NO<sub>x</sub> ise termal ve ani NO<sub>x</sub> oluşumlarına uymaktadır. Öncelikle termal NO<sub>x</sub> incelendiğinde 1300 C° ( 1573 K) değeri üzerinde sıklıkla görülmektedir. Bu yüzden NO<sub>x</sub> artışının önemli bir sebebi sıcaklık artışı olsa da sıcaklık değerlerimizin bu kadar yüksek olmamasından dolayı sadece termal NO<sub>x</sub>'e bağlamak yanlış olacaktır. İkinci bir NO<sub>x</sub> oluşum mekanizması ise toplam yakıt hava karışımı içerisindeki azotun çok yüksek ya da çok düşük olması durumunda ortaya çıkan ani NO<sub>x</sub>'tir. Oksijence zenginleştirme esnasında sistemdeki azot miktarının düşmesinden dolayı azotun seyreltici etkisi azalarak ani NO<sub>x</sub> oluşumu ortaya çıkmıştır [64,65].

Bir diğer zararlı emisyon olan CO emisyonunun da yanma sonu ürünü olarak azaltılması büyük önem taşımaktadır. Yanma sonu ürünü olarak karbonmonoksitin çıkması eksik yanmanın meydana geldiği ve yanma veriminin azaldığı anlamına gelmektedir. Şekil 3.62 incelendiğinde akustik zorlama olmaması durumunda hava ile yanma koşulunda 1513 ppm olan CO değeri, %24 O<sub>2</sub> oranında 22 ppm'e kadar düşmüştür. %26 oranındaki oksijence zenginleştirmede ise CO emisyonu 1 ppm ölçülmüştür. Deneylede kullanılan ölçüm ekipmanlarının ölçüm hatalarının verildiği Tablo 2.2.'den görüleceği gibi emisyon cihazının ölçüm aralığı NO<sub>x</sub> ve CO için 5 ppm'den başlamaktadır. Bu durumdan dolayı CO emisyonunu hemen hemen yok sayılabilir. Saf metana uygulanan oksijence zenginleştirme oranı arttıkça CO emisyon değerleri düşmüştür. Literatürdeki çalışmalarda, farklı yanma sistemleri ve çalışma şartları incelenmiştir. Oksijence zenginleştirme işlemi karışımdaki oksijen oranını artırdığı için eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarını düşürmüştür [35,104]. Bu



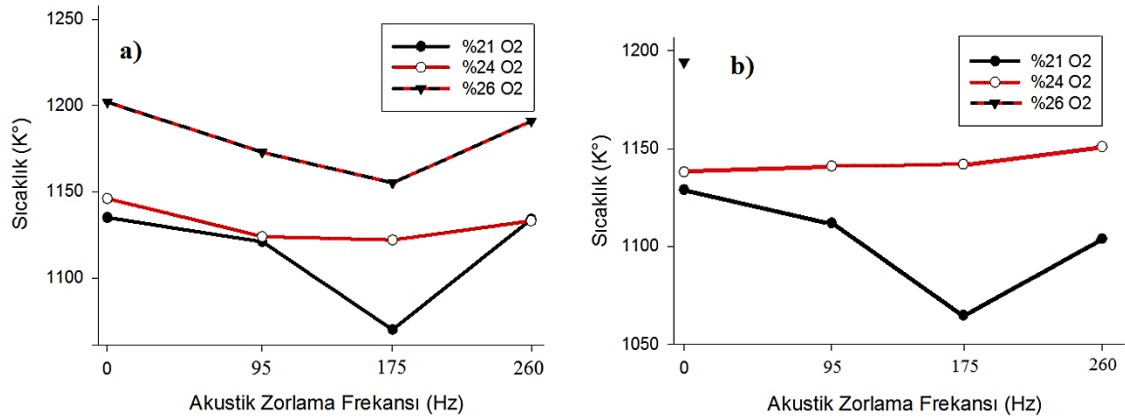
durum oksijence zenginleştirmenin CO emisyonlarını istenilen seviyeye düşürme konusuna katkı sağladığını desteklemektedir.



Şekil 3.62. Oksijence zenginleştirmenin kirletici emisyonlara etkisi a) NO<sub>x</sub>, b) CO

### 3.4.2. Oksijence Zenginleştirmenin CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> Karışımlarının Emisyon Davranışına Etkisi

Günümüzde yanma sistemlerin temel sorunlarından biri olan baca gazı emisyonları konusu metan içerikli yakıt karışımlarında da büyük önem arz etmektedir. Kararlı ve verimli bir yanmanın en önemli göstergelerinden birisi de yanma sonu emisyonlarıdır. Oksijence zenginleştirmenin CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> alevlerinin yanma kararsızlıkları üzerine yaptığı etkinin incelenmesinden sonra bu alevlerin yanma sonu emisyonlarının da açıklanması gerekmektedir. Bu sebeple, baca gazı emisyonlarının daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 3.63'de CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> alevlerinin oksijence zenginleştirilmesi esnasında ortaya çıkan yakıcı bölgesi alev sıcaklıkları gösterilmiştir. İlk olarak %10 oranında hidrojen ilave edilen karışım incelendiğinde %21 oksijene sahip standart hava ile yapılan deneyde 1135 K olan sıcaklık değeri zenginleştirme ile beraber ilk önce 1146 K'ye çıkmış, oksijen oranı %26'ya çıkarıldığında ise sıcaklık daha da yükselerek 1202 K olarak ölçülmüştür. Benzer oksijen oranları için %20 H<sub>2</sub> içeren yakıt karışımı incelendiğinde, yine hava ile yanma koşullarında 1129 K olarak kaydedilen sıcaklık, ilk oksijence zenginleştirme kademesinde 1138 K, ardından oksijen oranı daha da artırılarak %26'ya çıkarıldığında ise 1194 K sıcaklık ortaya çıkmıştır. Oksijence zenginleştirme saf metanda olduğu gibi hidrojen ilave edilmiş metan karışımlarında da tamamında alev sıcaklığını artırmıştır.

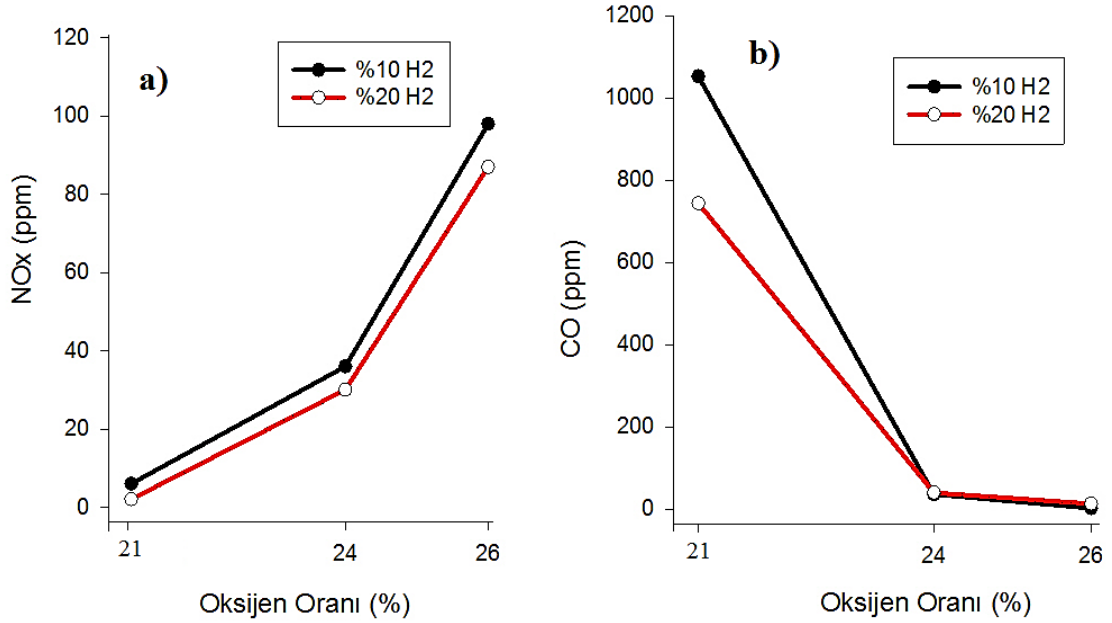


Şekil 17 Oksijence zenginleştirilmiş CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> karışımının yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi  
a) %10 H<sub>2</sub>, b) %20 H<sub>2</sub>

Şekil 3.64'te her iki yakıt karışımı için de oksijence zenginleştirme durumlarına göre CO ve NO<sub>x</sub> kirlenici emisyonlarının değişimi gösterilmiştir. Buna göre %90 CH<sub>4</sub> - %10 H<sub>2</sub> içeren yakıt karışımının hava ile yakılması durumunda 6 ppm olan NO<sub>x</sub> emisyon değeri, oksijence zenginleştirme ile beraber önce 36 ppm'e ardından 98 ppm değerine yükselmiştir. Benzer şekilde %20 Hidrojen içeren diğer yakıt karışımında da hava ile yanma durumunda 2 ppm olan NO<sub>x</sub> değeri, %24 O<sub>2</sub> oranındaki zenginleştirme sırasında 30 ppm'e çıkarken, %26 oksijen oranına gelindiğinde 87 ppm olarak ölçülmüştür. Bu verilere göre, oksijen ilavesi termal etkilerden dolayı bütün yakıt karışımlarında ortak olarak NO<sub>x</sub> oluşumunu artırmaktadır [105].

Diğer bir kirlenici emisyon olan CO incelendiği zaman ise oksijen ilavesi ile beraber büyük bir düşüş görülmektedir. %10 hidrojen içeren yakıtta, hava ile yanma durumunda 1053 ppm ile başlayan CO emisyonu, sırasıyla %24 ve %26 oksijen oranlarında 36 ppm ve 2 ppm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde %20 H<sub>2</sub> içeren diğer karışımda ise %21 oksijen içeren hava ile yandığı zaman 744 ppm CO emisyonu ortaya çıkaran yakıt, oksijence zenginleştirme işleminden sonra 40 ppm ve %26 oksijen zenginleştirmesinde CO emisyonu 13 ppm olarak ölçülmüştür. Saf metan dahil olmak üzere bütün yakıt karışımları için ortak bir durum ortaya çıkmaktadır. Oksijence zenginleştirme NO<sub>x</sub> emisyonlarını artırırken, oksijen oranının artmasıyla CO'nin CO<sub>2</sub>'ye dönüşümü artmaktadır [106]. Ayrıca saf metan yanmasında ortaya çıkan sonuçlarla beraber, metan içerisine ilave edilen hidrojenin oranı arttıkça CO emisyonunda büyük bir düşüş yaşandığı görülmektedir. Hidrojen ilavesi ile beraber, ısı değeri sağlayan yakıtlar

içerisindeki karbon miktarının azalması karbona bağlı olarak ortaya çıkan emisyonların düşüşüne sebep olmaktadır [107].



Şekil 18 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> alevlerinde oksijence zenginleştirmenin zararlı emisyonlara etkisi a) NO<sub>x</sub>, b) CO

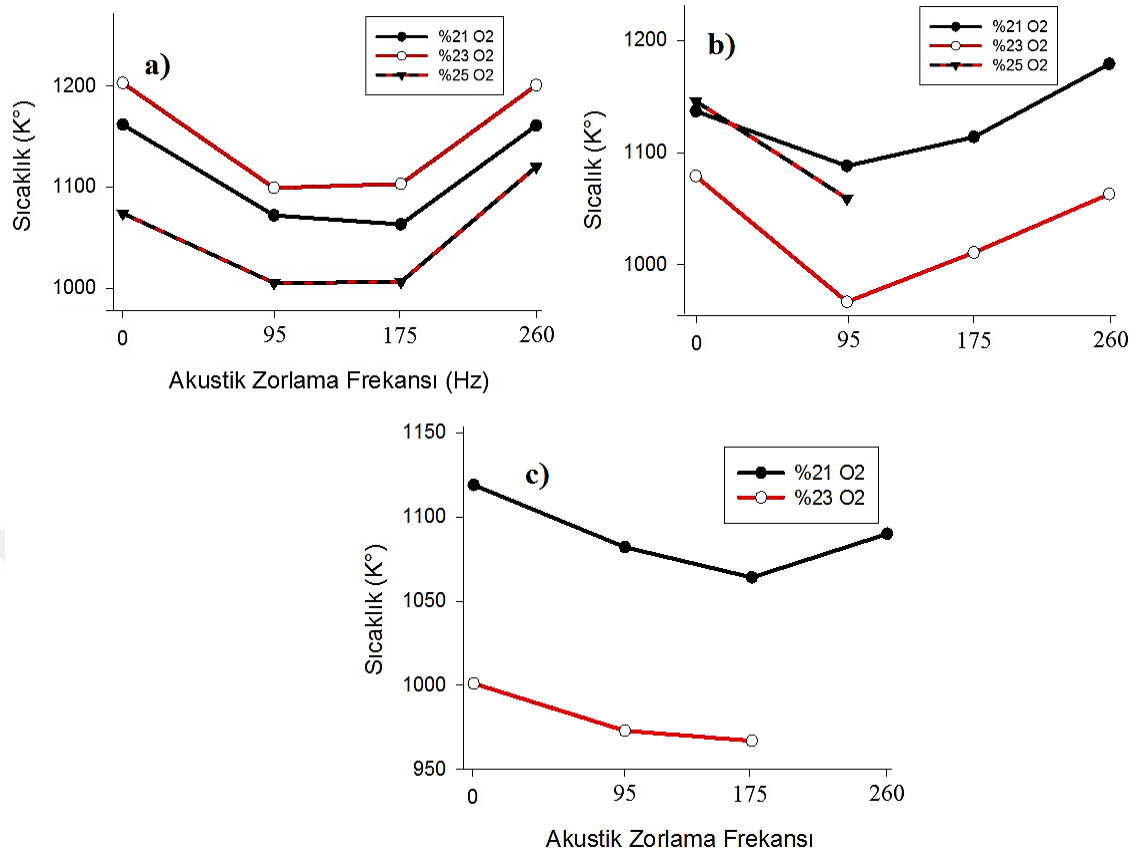
### 3.4.3. Oksijence Zenginleştirmenin CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO (Sentetik Gaz) Karışımlarının Emisyon Davranışına Etkisi

Günümüzde sentetik gaz karışımlarının içerisinde bulunan hidrojen den ötürü düşük kirletici emisyonlara neden olduğu bilinmektedir. Teorik koşullardaki avantajına rağmen hidrojen ilavesiyle beraber artan laminar yanma hızı ve ortaya çıkan kararsızlıklar, yanma odalarında pratik koşullarda emisyon artışlarına da sebep olabilmektedir. Bu sebeple farklı yakıcılarda, farklı çalışma şartlarında araştırmacılar sentetik gaz yakıtların emisyon davranışlarını deneysel olarak incelemektedirler.

Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalardan birinde Azimov ve et al., primer yanma modunda çalıştırılan bir motorda sentetik gaz karışımının yanma ve emisyon davranışlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, karışım içerisindeki artan hidrojen içeriğinin daha yüksek yanma sıcaklıklarına ve buna bağlı olarak NO<sub>x</sub> oluşumlarına sebep olduğunu tespit eden araştırmacılar, CO ve HC emisyonlarında da azalma olduğunu ifade etmişlerdir [108]. Diğer taraftan güncel bir çalışmada da Scribano et al., girdap destekli bir yakıcıda sentetik gaz yakıtları farklı H<sub>2</sub>/CO oranlarına göre sayısal olarak incelemişlerdir.

Yüksek (3), orta (1) ve düşük (0,33) H<sub>2</sub>/CO oranlarında test edilen karışımların emisyon sonuçlarına bakıldığında CO emisyonlarının artan hidrojenle beraber azaldığı görülürken NO<sub>x</sub> emisyonları da benzer şekilde düşmüştür [109]. Literatürde bulunan iki farklı çalışma karşılaştırıldığında yakıt karışımı içerisindeki artan H<sub>2</sub> oranıyla beraber ilkinde NO<sub>x</sub> emisyonu artarken, güncel olanda düştüğü görülmektedir. Bu durum farklı yakıt karışımlarının yanma performanslarının yakıcı tasarımı, yakıt/hava oranı, girdap sayısı, giriş basıncı gibi birçok farklı parametreye göre değiştiğini göstermektedir. Bu yüzden sentetik yakıt karışımlarının emisyon davranışları üzerine yapılan çalışmalara hala güncelliğini korumaktadır.

Farklı yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirilmesi sonucunda ortaya çıkan yakıcı bölgesi alev sıcaklıkları Şekil 3.65'te gösterilmiştir. H<sub>2</sub>/CO oranı 0,5 olan karışım ele alındığında hava ile yanma durumunda 1162 K olan yakıcı çıkış sıcaklığı, oksijence zenginleştirme sonucunda 1203 K sıcaklığa çıkmıştır. Buna rağmen oksijence zenginleştirme oranının artırılması ve %25'e çıkarılması durumunda ise 1074 K seviyesine düşmüştür. Diğer bir sentetik gaz karışım olan H<sub>2</sub>/CO oranı 1.5 seviyesindeki karışım da ise standart hava ile yanma durumunda sıcaklık 1137 K ölçülürken, %23 ve % 25 O<sub>2</sub> oranlarında sırasıyla 1079 K ve 1146 K sıcaklıklar kaydedilmiştir. Hidrojen oranı yüksek olan son karışım da ise %21 oranında oksijen içeren hava ile yakılan karışım da alev sıcaklığı 1119 K olurken, %23 O<sub>2</sub> seviyesinde ise 1001 K'ye kadar düşmüştür.

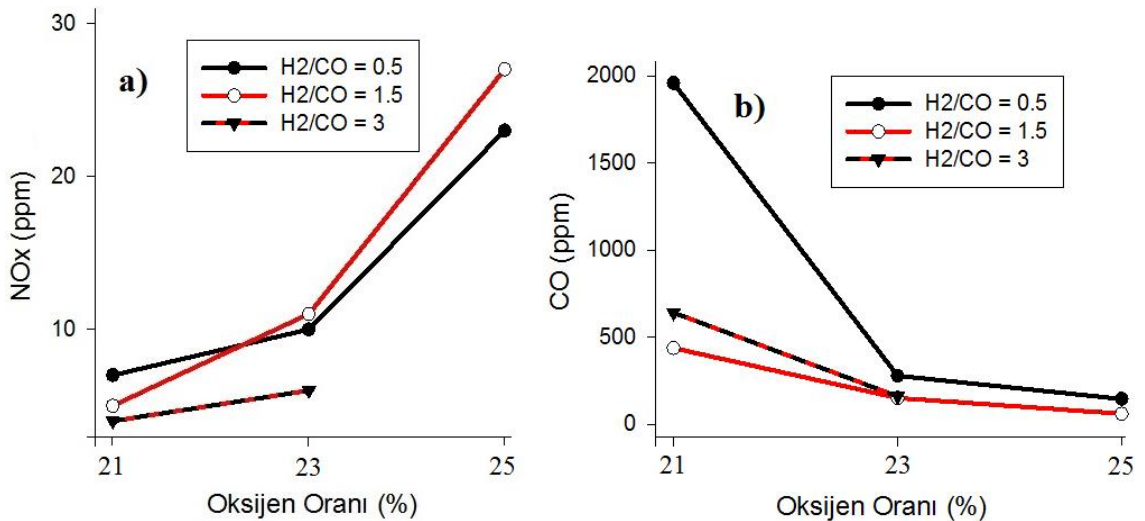


Şekil 3.65. Oksijence zenginleştirilmiş CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO karışımının yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi a) H<sub>2</sub>/CO = 0.5, b) H<sub>2</sub>/CO = 1.5, c) H<sub>2</sub>/CO = 3

Farklı karışımlardan elde edilen sıcaklık sonuçları ortak bir şekilde değerlendirildiğinde yüksek hidrojen oranına sahip yakıt karışımında uygulanan oksijence zenginleştirme işlemi kararsızlık değişimlerine benzer bir şekilde alev sıcaklığını olumsuz etkilemiştir. Saf metan yanmasında oksijence zenginleştirme sonucunda yükselen alev sıcaklığı, %52,5 oranında hidrojen içeren karışımda 118 K kadar düşmüştür. Karışım içerisindeki hidrojen ve oksijen oranlarında yaşanan artışın laminar yanma hızını artırması, hidrokarbonların kararlı bir şekilde yanarak ısı açığa çıkarabilme kapasitelerini düşürmüştür [61]. Diğer bir karışım olan H<sub>2</sub>/CO oranının 1,5 tutulduğu sentetik gaz yakıtında, yine %23 oksijen oranında yakıcı sıcaklığında düşüş yaşanmıştır. Buna rağmen oksijen seviyesinin hidrojene oranla daha baskın hale gelmesiyle beraber alev sıcaklığında tekrar yükseliş başlamıştır. Karbonmonoksit oranı yüksek olan yakıt karışımında ise oksijenle beraber %23 oranına kadar alev sıcaklığında artış meydana gelirken, oksijen zenginleştirilmesi %25 seviyesine çıkarıldığında tekrar alev sıcaklığında düşme yaşanmıştır. Karbon monoksitin, metan ve hidrojene göre çok düşük bir laminar yanma hızına sahip olması nedeniyle oksijence zenginleştirme küçük oranlarda olumlu

bir etki gösterirken, karışımın oksijence zenginleştirilebilme limitine yaklaşıldığında yaşanan kararsızlık artışından dolayı bu durum tersine dönmüştür.

Sıcaklık değişimleri açıklanan yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirme şartları altındaki kirletici emisyon değişimleri Şekil 3.66'da gösterilmiştir.  $\text{NO}_x$  emisyonları incelendiğinde bütün yakıt karışımlarında oksijence zenginleştirme ile beraber emisyonların arttığı açıkça görülmektedir. Bu noktada termal  $\text{NO}_x$  mekanizması kadar ani  $\text{NO}_x$  oluşumu da önemlidir. Yüksek karbonmonoksit oranına sahip yakıt karışımında %21 Oksijen oranındaki hava ile yanma durumunda 7 ppm olan emisyon ölçümü, oksijence zenginleştirme ile beraber önce 10 ppm değerine daha sonra 23 ppm'e çıkmıştır.  $\text{H}_2/\text{CO}$  orta seviye olan yakıtta ise sırasıyla %21, %23 ve %25  $\text{O}_2$  oranlarında emisyon değerleri 5 ppm, 11 ppm, 27 ppm olarak artış göstermiştir. Diğer bir karışım olan yüksek hidrojen içerikli sentetik gaz yakıtta ise hava ile yanma durumunda 4 ppm olan  $\text{NO}_x$  emisyonu, %23 Oksijen oranında 6 ppm seviyesine yükselmiştir [110]. Sonuçlara değerlendirildiğinde sabit %21  $\text{O}_2$  oranında yanma durumunda karışım içerisindeki hidrojen artışı Scribano et al, çalışmasında olduğu gibi  $\text{NO}_x$  emisyonlarını düşürmüştür [109].



Şekil 3.66.  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{CO}$  alevlerinde oksijence zenginleştirmenin zararlı emisyonlara etkisi a)  $\text{NO}_x$ , b) CO

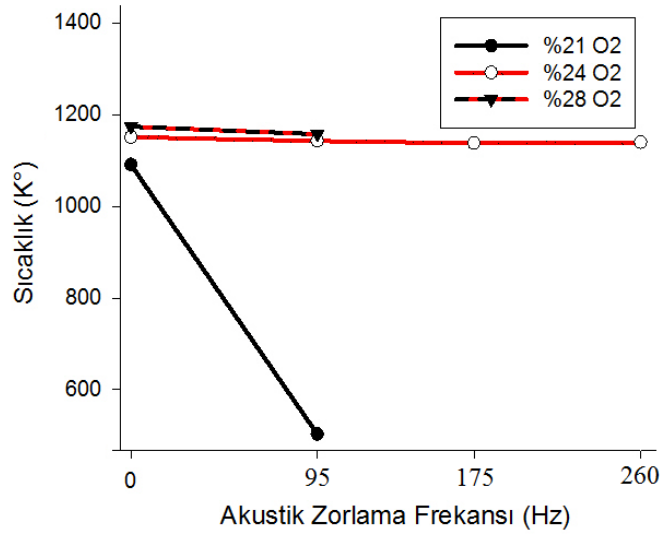
Yanma verimliliğini azaltan ve eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarında saf metan ve metan-hidrojen yakıt karışımlarındaki benzer şekilde oksijence zenginleştirme ile beraber büyük bir düşüş yaşanmıştır.  $\text{H}_2/\text{CO}$  oranı 0,5 olan yakıt karışımında %21  $\text{O}_2$

oranında gerçekleştirilen yanma işleminde 1959 ppm olan CO emisyonu, O<sub>2</sub> seviyesi %23'e çıkarıldığında 278 ppm'e düşmüş, zenginleştirme seviyesinin %25'e çıkarılmasıyla beraber ise 145 ppm'e kadar gerilemiştir. Orta seviye (1,5) H<sub>2</sub>/CO oranına sahip karışımda ise standart hava ile yanma durumunda 437 ppm ölçülen emisyon seviyesi, %23 ve %25 O<sub>2</sub> oranlarında önce 150 ppm, ardından da 60 ppm değerine düşmüştür. İçeriğinin yaklaşık yarısı (52,5) hidrojenden oluşan yakıt karışımında ise zenginleştirilmemiş koşullarda 640 ppm olan CO emisyonu, zenginleştirme ile beraber 160 ppm'e düşmüştür. Bu sonuçlar, bütün yakıt karışımlarında oksijence zenginleştirme CO emisyonlarını büyük ölçüde düşürmüştür. Diğer yandan içeriğindeki karbonmonoksit oranı yüksek olan yakıt karışımının hava ile yanması sonucunda diğer karışımlara göre ortaya çıkan CO emisyonu daha yüksek olmuştur [106].

#### **3.4.4. Oksijence Zenginleştirmenin CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> (Biyogaz) Karışımlarının Emisyon Davranışına Etkisi**

Biyogaz karışımları son yıllarda çevreci yakıt olarak endüstriyel uygulamalarda da kullanımı artan bir alternatif enerji kaynağıdır. Biyogaz karışımlarının içerisinde bulundurduğu karbondioksit sebebiyle saf metan alevine göre düşük adyabatik alev sıcaklıklarına sahip oldukları ve buna bağlı olarak da NO<sub>x</sub> emisyonlarının daha düşük seviyede kaldığı bilinmektedir [111].

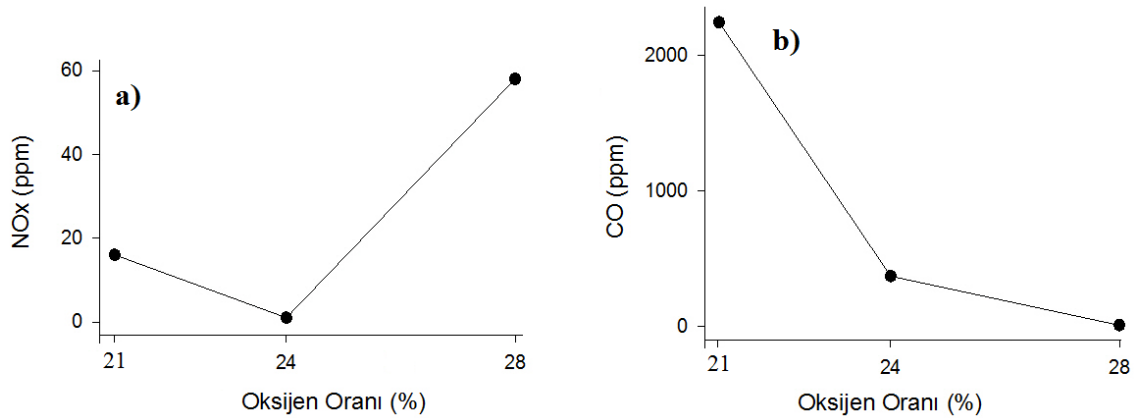
Şekil 3.67'de CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımının farklı oksijen oranlarındaki akustik zorlama rezonansları altında meydana gelen alev sıcaklığı değişimleri gösterilmektedir. Standart koşullardaki hava ile yanma durumunda 1091 K olan alev sıcaklığı, %24 Oksijen oranında artarak 1151 K'ye çıkmıştır. Oksidizer içerisindeki oksijen oranının %28'e kadar çıkarılmasıyla sıcaklık 1174 K ölçülmüştür. Sonuçlar %60 oranında metan içeren biyogaz karışımında uygulanan oksijence zenginleştirme işleminin alev çıkış sıcaklığını artırdığını göstermektedir. Karbondioksit benzer şekilde seyreltici etkisi olduğu bilinen azot miktarının karışım içerisinde azaltılması sıcaklığın yükselmesinde doğrudan etkili olmuştur.



Şekil 3.67. Oksijence zenginleştirilmiş CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımının yakıcı çıkış sıcaklığına etkisi

Karışımın alev sıcaklığı ve kararlılığına bağlı olarak ortaya çıkan yanma sonu emisyonları ise Şekil 3.68’de gösterilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonları incelendiğinde %21 O<sub>2</sub> oranındaki hava ile yanma durumunda 16 ppm olan emisyon seviyesi, oksijen oranının %24’e çıkarılmasıyla beraber 1 ppm’e kadar düşerek neredeyse yok olmuştur. Diğer taraftan %28 O<sub>2</sub> oranında, NO<sub>x</sub> emisyonları tekrar yükselişe geçerek 58 ppm seviyesine kadar çıkmıştır. Saf metan yanması, hidrojen ve karbonmonoksit ilaveleri sonucunda ortaya çıkan yakıt karışımlarının tamamında oksijence zenginleştirilme koşullarında NO<sub>x</sub> emisyonları artmıştır. Buna rağmen CO<sub>2</sub> ilaveli bir yakıt karışımında %24’e kadar yapılan oksijence zenginleştirme emisyonu düşürme eğilimindedir. Bu durum yakıt/hava karışım içerisindeki azot miktarının çok düşük yahut çok yüksek olduğu durumlarda ortaya çıkan ani-NO<sub>x</sub> oluşumu ile açıklanabilmektedir. İlk anda seyreltilmiş yakıt karışımı içerisinde ilave bir seyreltici görevi üstlenen azotun azaltılması oksijenle birleşerek NO<sub>x</sub> oluşturmasını engellerken, azot miktarının daha da düşürülmesi hem termal etkileri artırmış hem de ani-NO<sub>x</sub> mekanizmasını tetiklemiştir [105].





Şekil 3.68. CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> alevinde oksijence zenginleştirmenin zararlı emisyonlara etkisi a) NO<sub>x</sub>, b) CO

Tez çalışmasında incelenen diğer zararlı emisyon olan CO değerlerinde ise, bütün yakıt karışımlarında olduğu gibi oksijence zenginleştirme ile beraber büyük bir düşüş tespit edilmiştir. Oksijen oranı %21 iken 2247 ppm olarak ölçülen karbonmonoksit emisyonu, sırasıyla %24 ve %28 O<sub>2</sub> seviyelerinde önce 372 ppm'e daha sonra da 10 ppm'e kadar düşmüştür. Karışım içerisindeki oksijen oranındaki artış, karbonların oksijenle daha hızlı bir şekilde birleşerek CO<sub>2</sub>'yi oluşturmasını ve bu sebeple eksik yanma ürünü olan CO emisyonunun düşmesini sağlamıştır. Literatürdeki benzer bir çalışmada Yanık, oksijence zenginleştirme sonucunda CO emisyonlarının düştüğünü tespit etmiştir [112].

## 4. BÖLÜM

### SONUÇ VE ÖNERİLER

#### 4.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında laboratuvar ölçekli, ön karışımli bir yanma akustik odada metan içerikli gaz yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirme şartlarında yanma kararsızlığı ve emisyon davranışları incelenmiştir. Öncelikle metan içerisine, H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> gazları katılarak geri tepme ve sönme limitleri ve ilave edilen gazların bu limitlere olan etkisi belirlenmiştir. Yakıt karışımlarının kararlı yanma aralıklarının belirlenmesinden sonra hepsinin kararlı bir şekilde yanabildiği eşdeğerlik oranı olan 0,7 değeri bütün deneylerde sabit tutulmuştur. Ayrıca yakıcı çıkışına iyi bir karışım için girdap üretici yerleştirilmiş ve tüm deneylerde 1 girdap sayısını veren üretici kullanılmıştır.

Oksijence zenginleştirilebilme sınırları belirlenen karışımların alev kararlılık değişimleri yanma odasının kollarında bulunan hoparlörler vasıtasıyla uygulanan dıştan akustik zorlama frekansları altında ölçülmüştür. Bu amaçla yanma odasının doğal akustik modları belirlenmiş ve bu bölgelerde meydana gelen dinamik basınç, statik basınç, ışık şiddeti, sıcaklık değişimleri ve alev görüntüleri kaydedilmiştir. Kararlılık verilerine ek olarak, bütün yakıt karışımları ve farklı oksijence zenginleştirme oranları için yanma odasının baca bölgesinden yanma sonu emisyon verileri ölçülmüştür.

Deneylelerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Metan içerisine farklı oranlarda H<sub>2</sub>, CO ve CO<sub>2</sub> gazları ilave edilmiş, karbondioksitin gazının oksijence zenginleştirme sınırını artırdığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan hidrojen oranındaki artışın hem CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> hem de CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO karışımlarında zenginleştirme limitini düşürdüğü görülmüştür. En düşük oksijence zenginleştirme sınırı hacimsel olarak %52.5 oranında hidrojen içeren yakıt karışımında ortaya çıkmıştır.
- Hidrojen ilavesinin fakir karışım yanma limiti olan alev sönmesi sınırını düşürdüğü, yüksek orandaki karbondioksit ilavesinin ise alevin yanma sınırlarını daralttığı belirlenmiştir. Ayrıca karışım içerisinde karbon monoksit oranı arttıkça alevin geri tepme sınırı yükselmiştir.

- Oksijence zenginleştirme ile beraber bütün yakıt karışımlarının akustik frekanslara karşı gösterdiği zorlanmanın şiddeti üst frekanslara doğru kaymıştır. %21 O<sub>2</sub> oranında alevin en çok zorlandığı doğal frekans 95 Hz iken, O<sub>2</sub> oranının artması ile beraber alevin kararsızlaşma eğilimi 175 Hz ve 260 Hz frekanslara doğru ilerlemiştir.
- Saf metan yanmasında oksijence zenginleştirme %24 oranına kadar kararlılığı artırırken, %28 oranında düşüşe sebep olmuştur.
- CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> alevlerinde oksijence zenginleştirme %24 oranına kadar kararlılıkta önemli bir artış sağlamamış, tam aksine %26 O<sub>2</sub> oranında alev kararsızlaşmaya başlamıştır. İçerisinde %20 hidrojen içeren yakıt karışımı yüksek oksijen zenginleştirme oranında akustik zorlamalara karşı dirençsiz hale gelmiştir.
- Düşük H<sub>2</sub>/CO oranına sahip sentetik gaz karışımında, özellikle 95 Hz zorlayıcı frekans altındaki alevin kararlılığı artmıştır. Buna rağmen sentetik gaz karışımının içerisindeki hidrojen oranının yükselmesi ve H<sub>2</sub>/CO oranının 1,5'e çıkmasıyla alev kararlılığı oksijen zenginleştirmesiyle beraber düşmüştür.
- CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/CO içeren sentetik gaz karışımlarından oksijence zenginleştirmeye karşı en hassas olanı ve kararsızlığını kaybedeni H<sub>2</sub>/CO = 3 olan karışım belirlenmiştir. %23 O<sub>2</sub> içeren hava ile yakılan karışımın 175 Hz frekans altında zorlanması durumunda alev geri tepmesi meydana gelmiştir.
- Seyreltilmiş bir yakıt olarak CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> alevi akustik zorlamaya karşı dirençsiz olmasına rağmen, %24 oranındaki oksijen seviyesine çıkarıldığında kararlılığı artmış ve alev akustik zorlamalara karşısında yanmaya devam etmiştir. Özellikle yakıt karışımları içerisinde oksijence zenginleştirme ile beraber en belirgin kararlılık artışı bu karışımda meydana gelmiştir. Diğer taraftan oksijen seviyesi %28'e çıkarıldığında kararsızlık tekrar düşmeye başlamıştır.
- Deneyleerde kullanılan bütün yakıt karışımlarında CO emisyonları oksijence zenginleştirme ile beraber düşmüştür ve neredeyse sıfır değerine gelmiştir. En yüksek CO emisyonu 2247 ppm ile CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> karışımının hava ile yanması durumunda ortaya çıkarken oksijence zenginleştirme ile beraber 10 ppm değerine kadar düşmüştür. Bu durum CO emisyonları açısından oksijence zenginleştirmenin önemini açıkça ortaya çıkarmıştır.
- CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> yakıt karışımı hariç diğer bütün karışımlarda oksijen oranında yaşanan artışla beraber NO<sub>x</sub> emisyonlarını artmıştır. Sadece biyogaz karışımında içerisindeki seyreltici gazın etkisi ile %24 O<sub>2</sub> oranında düşüş yaşanırken, oksijen seviyesinin %28'e çıkarılmasıyla beraber bu karışımda da NO<sub>x</sub> oluşumu artmıştır. Bu durum dikkate alındığında oksijence zenginleştirme sürecinin en

önemli dezavantajlarından birsinin  $\text{NO}_x$  emisyonlarının artışı olduğu belirlenmiştir.

- %21  $\text{O}_2$  içerikli standart hava ile yanma durumları dikkate alındığında yakıt karışımlarına yapılan hidrojen ilavesinin CO emisyonlarını düşürdüğü görülmüştür.
- Sentetik gaz alevleri haricindeki deneylerde kullanılan tüm karışımlarda oksijence zenginleştirme ile beraber alevin ışık şiddeti değerlerinde büyük bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu karışımlarda alev bölgesi sıcaklıkları da artış göstermiştir. Diğer karışımlardan farklı olarak karbonmonoksit içeren ve karışım içerisindeki metan yüzdesi düşük olan sentetik gaz yakıtlarda ise sıcaklık ve ışık şiddeti değişimleri oksijence zenginleştirme ile monoton bir davranış göstermemiştir.
- Laminer yanma hızı metana kıyasla çok yüksek olan hidrojenin içerisinde bulunduğu karışımların oksijence zenginleştirilmesi sonucundaki kararlılık değişimleri olumsuz olarak tespit edilmiştir.

#### 4.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında çıkan sonuçlara ve deneyimlerde, bundan sonra ilgili alanlarda yapılacak çalışmalarda aşağıdaki önerilerin yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir;

- Oksijence zenginleştirme sürecinde ortaya çıkan  $\text{NO}_x$  emisyonu artışının önlenmesi için farklı yakıcı tasarımları geliştirilerek, eşdeğerlik oranı ve girdap sayısı gibi farklı işletme şartlarının etkileri belirlenebilir.
- Yeni yakıcı ve girdap üretici tasarımları ile daha yüksek oksijen oranlarında zenginleştirme yapılması sağlanabilir. Özellikle hidrojen içerikli yakıtların oksijence zenginleştirilmesinde yaşanan kararsızlıklara yeni tasarımlarla çözüm aranabilir.
- Alev kararsızlığının sayısal çalışmalarla belirlenmesinde sayısal olarak önemli değişkenlerden olan Markstein uzunluğu, Lewis sayısı, Zel'dovich sayısı, laminer yanma hızı, ısı yayılım parametresi ve geri tepme sinyal genliği gibi değerlerin ölçülebilmesi için yüksek hıza sahip stereoskopik parçacık görüntülemeli akış ölçüm cihazı (PIV) gibi yüksek teknolojik cihazların kullanımı daha detaylı incelemeye imkan sağlayabilir.
- Yüksek akustik zorlama frekanslarında zorlayıcı frekansın kararsızlığa etkileri incelenebilir.

- Detaylı modeller kullanılarak yanma kararsızlığı sayısal çalışmalarla incelenebilir.
- Yanma akustik odada, oksijence zenginleştirilmiş yakıtların yanma kararsızlığı OH-PLIF kullanılarak daha detaylı incelenebilir.
- Oksijence zenginleştirme ile beraber havadaki  $N_2$  yerine  $CO_2$ 'nin seyreltici olarak kullanıldığı oksi-yakıt yanması deneysel olarak araştırılabilir.



## KAYNAKLAR

1. T.C Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Bilgi Merkezi, Enerji. (Web sayfası: <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik> ), (Erişim Tarihi: 28.10.2020).
2. Celtek, M. S., Pınarbaşı, A., 2018 Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, **43 (2)**: 1194-1207.
3. Mameri, A., Boussetla, S., Belalmi, R., Aouachria, Z., 2019. Combustion characterization of the mixtures biogas-syngas, strain rate and ambient pressure effects. **International Journal of Hydrogen Energy**, **44 (39)**: 22478-22491.
4. Zhang, K., Jiang, X., 2018. An assessment of fuel variability effect on biogas-hydrogen combustion using uncertainty quantification. **International Journal of Hydrogen Energy**, **43 (27)**: 12499-12515.
5. Samiran, N. A., Ng, J., Jafaar, M. N. M., Velara-Medina, A., Chong, C. T., 2016. H<sub>2</sub>-rich syngas strategy to reduce NO<sub>x</sub> and CO emissions and improve stability limits under premixed swirl combustion mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41 (42)**: 19243-19255.
6. Kurji, H., Velara-Medina, A., Okon, A., Chong, C. T., 2017. Combustion and emission performance of CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/biodiesel and CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/diesel blends in a swirl burner generator. **Energy Procedia**, **142**: 154-159.
7. Yılmaz, H., Yılmaz, İ., 2019. Effects of synthetic gas constituents on combustion and emission behavior of premixed H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub>/CNG mixture flames. **Journal of the Energy Institute**, **92 (4)**: 1091-1106.
8. Lee, M. C., Yoon, J., Joo, S., Yoon, Y., 2015. Gas turbine combustion characteristics of H<sub>2</sub>/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40 (34)**: 11032-11045.
9. Wu, L., Kobayashi, N., Li, Z., Huang, H., Li, J., 2015. Emission and heat transfer characteristics of methane-hydrogen hybrid fuel laminar diffusion flame. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40 (30)**: 9579-9589.

10. Yılmaz, H., Yılmaz, İ., 2019. Combustion and emission characteristics of premixed CNG/H<sub>2</sub>/CO/CO<sub>2</sub> blending synthetic gas flames in a combustor with variable geometric swirl number. **Energy**, **172**: 117-133.
11. Lee, M. C., 2016. Effects of H<sub>2</sub>/CO/CH<sub>4</sub> syngas composition variation on the NO<sub>x</sub> and CO emission characteristics in a partially-premixed gas turbine combustor. **Science China Technological Sciences**, **59** (12): 1804-1813.
12. Kuznetsov, M., Kobelt, S., Grune J., Jordan T., 2012. Flammability limits and laminar flame speed of hydrogen–air mixtures at sub-atmospheric pressures. **International Journal of Hydrogen Energy**, **37** (22): 17580-17588.
13. Dong, C., Zhou, Q., Zhao, Q., Zhang, Y., Xu, T., Hui, S., 2009. Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures. **Fuel**, **88** (10): 1858-1863.
14. Greco, A., Mira, D., Jiang X., 2017. Effects of fuel composition on biogas combustion in premixed laminar flames. **Energy Procedia**, **105**: 1058-1062.
15. Kalsi, S. S., Subramanian, K. A., 2017. Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine. **Renewable Energy**, **106**: 78-90.
16. İlbaşı, M., Şahin, M., Karyeyen, S., 2018. 3D numerical modelling of turbulent biogas combustion in a newly generated 10 KW burner. **Journal of the Energy Institute**, **91** (1): 87-99.
17. Joo, S., Kwak, S., Lee, M.C., 2021. Effect of fuel line acoustics on the flame dynamics of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> syngas in a partially premixed gas turbine combustor. **Fuel**, **285**: 119231.
18. Zhang, K., Lupo G., Duwig, C., 2021. Investigation of wet combustion instability due to bio-syngas fuel variability. **Fuel**, **285**: 119120.
19. Devi, S., Sahoo, N., Muthukumar, P., 2020. Experimental studies on biogas combustion in a novel double layer inert Porous Radiant Burner. **Renewable Energy**, **149**: 1040-1052.
20. Hu, Z., Zhang, X., 2019. Experimental study on flame stability of biogas/hydrogen combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, **44** (11): 5607-5614.

21. Wei, Z., Zhen, H., Fu, J., Leung, C., Cheung, C., Huang, Z., 2019. Experimental and numerical study on the laminar burning velocity of hydrogen enriched biogas mixture. **International Journal of Hydrogen Energy**, **44 (39)**: 22240-22249.
22. Hosseini, S. E., Wahid, M. A., 2014. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, **40**: 868-875.
23. Ma, C., Li, B., Chen, D., Wenga, T., Ma, W., Lin, F., Chen, G., 2019. An investigation of an oxygen-enriched combustion of municipal solid waste on flue gas emission and combustion performance at a 8 MWth waste-to-energy plant. **Waste Management**, **96**: 47-56.
24. Striūgas, N., Zakarauskas, K., Paulauskas, R., Skvorcinskiene, R., 2020. Chemiluminescence-based characterization of tail biogas combustion stability under syngas and oxygen-enriched conditions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **116**: 110133.
25. Zhang, Q., Chen, G., Deng, H., Wen, X., Wang, F., Zhang, A., Sheng, W., 2021. Experimental and numerical study of the effects of oxygen-enriched air on the laminar burning characteristics of biomass-derived syngas. **Fuel**, **285**: 119183.
26. Cano, J. P. C., Cabot, G., Foucher F., Persis, S., 2018. Oxygen-enriched air gasification of biomass materials for high-quality syngas production. **Fuel**, **225**: 499-508.
27. Kayahan, U., Özdoğan, S., 2016. Oxygen enriched combustion and co-combustion of lignites and biomass in a 30 kWth circulating fluidized bed. **Energy**, **116 (1)**:317-328.
28. Bergazar, R., Yozgatlıgil, A., Atımtay, A. T., 2019. Combustion characteristics of Turkish lignites at oxygen-enriched and oxy-fuel combustion conditions. **Journal of the Energy Institute**, **92 (5)**: 1440-1450.
29. Shaddix, C. R., Williams, T. C., 2017. The effect of oxygen enrichment on soot formation and thermal radiation in turbulent, non-premixed methane flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, **36 (3)**: 4051-4059.



30. Yang, W., Li, L., Fan, A., Yao, H., 2018. Effect of oxygen enrichment on combustion efficiency of lean  $H_2/N_2/O_2$  flames in a micro cavity-combustor. **Chemical Engineering and Processing - Process Intensification**, **127**: 50-57.
31. Cai, X., Wang, J., Zhang, W., Xie, Y., Zhang, M., Huang, Z., 2016. Effects of oxygen enrichment on laminar burning velocities and Markstein lengths of  $CH_4/O_2/N_2$  flames at elevated pressures. **Fuel**, **184**: 466-473.
32. Zhu, S., Lyu, Q., Zhu, J., 2019. Experimental investigation of  $NO_x$  emissions during pulverized char combustion in oxygen-enriched air preheated with a circulating fluidized bed. **Journal of the Energy Institute**, **92** (5): 1388-1398.
33. İmteyaz, B. A., Nemitallah, M. A., Abdelhafez, A. A., Habib, M. A., 2018. Combustion behavior and stability map of hydrogen-enriched oxy-methane premixed flames in a model gas turbine combustor. **International Journal of Hydrogen Energy**, **43** (34): 16652-16666.
34. Fu, Z., Zhang, S., Li, X., Shao, J., Wang, K., Chen, H., 2015. MSW oxy-enriched incineration technology applied in China: Combustion temperature, flue gas loss and economic considerations. **Waste Management**, **38**: 149-156.
35. Boushaki, T., Merlo, N., Chauveau, C., Gökalp, I., 2017. Study of pollutant emissions and dynamics of non-premixed turbulent oxygen enriched flames from a swirl burner. **Proceedings of the Combustion Institute**, **36**(3): 959-3968.
36. Hagihara, Y., Haneji, T., Yamamoto, Y., Lino, K., 2017. Ultra-Low  $NO_x$  Oxygen-enriched Combustion System using Oscillation Combustion Method. **Energy Procedia**, **120**: 189-196.
37. Riahi, Z., Mergheni, M. A., Sautet, J. C., Nasrallah, S. B., 2016. Experimental study of natural gas flame enriched by hydrogen and oxygen in a coaxial burner. **Applied Thermal Engineering**, **108**: 287-295.
38. Yepes, H. A., Amell, A. A., 2013. Laminar burning velocity with oxygen-enriched air of syngas produced from biomass gasification. **International Journal of Hydrogen Energy**, **38**: 7519-7527.
39. Yılmaz, H., Çam, Ö., Yılmaz, İ., 2020. Experimental Investigation of Flame Characteristics of  $H_2/CO/CH_4/CO_2$  Synthetic Gas Mixtures. **Combustion Science and Technology**, <https://doi.org/10.1080/00102202.2020.1716219>.

40. 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**: 13594-13603.
41. Yılmaz, H., Çam, Ö., Yılmaz, İ., 2020. Experimental investigation of flame instability in a premixed combustor. **Fuel**, **262**: 116594.
42. Kaufman, K., Emadi, M., Ratner, A., 2013. Effect of hydrogen addition to methane fuel in a low swirl burner, pp. 1957-1967. 8th U. S. National Combustion Meeting, May 19-22, 2013, Utah.
43. Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, J. H., 2009. Dynamics, NO<sub>x</sub> and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **34**: 496-506.
44. Wang, M., Zhong, Y., Deng, K., 2019. Experiment investigation of the effects of hydrogen content on the combustion instability of methane/hydrogen lean premixed swirl flames under different acoustic frequency ranges. **AIP Advances**, **9**(4).
45. Yu, H., Hu, E., Cheng, Y., Yang, K., Zhang, X., Huang, Z., 2015. Effects of Hydrogen Addition on the Laminar Flame Speed and Markstein Length of Premixed Dimethyl Ether–Air Flames. **Energy & Fuels**, **29**: 4567-4575.
46. Sankaran, R., Im, H. G., 2006. Effects of hydrogen addition on the Markstein length and flammability limit of stretched methane/air premixed flames. **Combustion Science and Technology**, **178** (9): 1585-1611.
47. 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.
48. Yılmaz, 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.
49. Zinn, B., T., Lieuwen, T. C., 2005. Combustion instabilities: Basic concepts, pp. 3-24. In: *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling: Volume 210 Progress in Astronautics and Aeronautics* (Eds: T. C. Lieuwen, V. Yang). American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, VA.

50. Williams, F. A., 2018. *Combustion Theory: The Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems*, 2nd Edition. The Benjamin/Cummings Publishing Company, 680 pp.
51. Lebefre, A. H., Ballal, D. R., 2010. *Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions*. CRC press, 558 pp.
52. Benim, A. C., Syed, K. J., 2015. *Flashback Mechanisms in Lean Premixed Gas Turbine Combustion*. Academic Press, 134 pp.
53. Keller, J.O., Vaneveld, K., Korschelt, D., Hubbard, G.L., Ghoniem, A.F., Daily, J.W., Oppenheim, A.K., 1982 Mechanism of instabilities in turbulent combustion leading to flashback. *AIAA J.*, **20 (2)**: 254–262.
54. Mishra, R., Kishorekumar, S., Chandel, S., 2015. Investigation of flame blow-out in a low bypass military turbofan engine. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **15**: 227-232.
55. Bloxham, M., 2006. Predicting lean blowout using the damkohler number.
56. Wang, Z., Hu, B., Deng, A., Zhang, J., Zhao, Q., 2019. Predicting lean blow-off of bluffbody stabilized flames based on Damköhler number. *Chinese Journal of Aeronautics*, **32 (2)**: 308-323.
57. Çengel, Y. A., Boles, M. A., 2014. *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th Edition. McGraw-Hill Education, 1024 pp.
58. Hucknal, D. J., 1985. *Chemistry of Hydrocarbon Combustion*. Springer Netherlands, 416 pp.
59. Keating, E. L., 2007. *Applied Combustion*, 2nd Edition. CRC Press, 657 pp.
60. Lundegard, P. D., 1964. Methane, pp. 97-110. In: *Environmental Forensics Contaminant Specific Guide* (Eds: R. Morrison, B. Murphy). Academic Press.
61. Huth, M., Heilos, A., 2013. Fuel flexibility in gas turbine systems: Impact on burner design and performance, pp. 635-684. In: *Modern Gas Turbine Systems* (Eds: P. Jansohn). Woodhead Publishing.
62. Van den Schoor, F., Hermanns, R.T.E., van Oijen, J.A., Verplaetsen, F., de Goey, L.P.H., 2008. Comparison and evaluation of methods for the determination of flammability limits, applied to methane/hydrogen/air mixtures. *Journal of Hazardous Materials*. **150 (3)**: 573–581.

63. Miller, B. G., 2010. Clean Coal Engineering Technology. Butterworth-Heinemann, pp. 696.
64. Merlo, N., Boushaki, T., Chauveau, C., Persis, S., Pillier, L., Sarh, B., Gökalp, I., 2013. Experimental Study of Oxygen Enrichment Effects on Turbulent Non-premixed Swirling Flames. **Energy & Fuels**, **27**: 6191-6197.
65. European Commission, Horizon 2020, Competitive Low-Carbon Energy. (Web sayfası: <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/competitive-low-carbon-energy> ), (Erişim tarihi: 29.10.2020)
66. MKS Series 946, Vacuum System Controller: Operation and Maintenance Manual. MKS Technology and Productivity, HPS Products, pp: 134.
67. Nemitallah, M. A., Abdelhafez, A. A., Habib, M. A., 2020. Approaches for Clean Combustion in Gas Turbines. Springer International Publishing, pp. 417.
68. 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.
69. Spangelo, Ø., 2004. Experimental and Theoretical Studies of a Low NO<sub>x</sub> Swirl Burner. Norwegian University, Doktora Tezi, 134 s.
70. Siemens, 2015. Brülör Kontrolleri LME Series 7.101, Siemens AG Building Technologies Division, pp: 1.
71. Technical document of flue gas emissions measurement. MRU Instruments Nova Plus RCU, pp. 4.
72. Janes, A., Chaineaux, J., Marlair, G., Carson, D., Benaissa, W., Tribouilloy, B., 2011. Experimental study of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> mixtures flammability. AIChE Spring Meeting 2011 & 7. Global Congresson Process Safety (GCPS), Chicago, United States. pp. NC. ineris-00976228.
73. Glassman, I., Yetter, R. A., 1996. Combustion. Academic Press NY, 203 pp.
74. Grumer, J., Harris M.E. 1952. Flame-stability limits of methane, hydrogen and carbon monoxide mixture. **Industrial & Engineering Chemistry**, **44** (7): 1547-1553.
75. Slefarski, R., 2019. Study on the Combustion Process of Premixed Methane Flames with CO<sub>2</sub> Dilution at Elevated Pressures. **Energies**, **12** (3): 348.

76. Hu, X., Yu, Q., Sun, N., Liu, J., 2016. Effects of High Concentrations of CO<sub>2</sub> on the Lower Flammability Limits of Oxy methane Mixtures. **Energy & Fuels**, **30** (5): 4346-4352.
77. Liao, S. Y., Cheng, Q., Jiang, D. M., Gao, J., 2005. Experimental study of flammability limits of natural gas-air mixture. **Journal of Hazardous Materials**, **119** (1-3): 81-84.
78. Stephan R.Turns., 2000. An Intoruction to Combustion: Concept and Applications. 2nd Editions. McGraw-Hill New York Signapore, 676 pp.
79. Çam, Ö., 2019. Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 226 pp.
80. O'Connor, J., Acharya, V., Lieuwen T., 2015. Transverse combustion instabilities: Acoustic,fluid mechanic, andflame processes. **Progress in Energy and Combustion Science**, **49**: 1-39.
81. Waye, K. P., 2011. Effects of low frequency noise and vibrations: Environmental and occupational perspectives, pp. 240-253. In: Encyclopedia of Environmental Health (Eds: J. O. Nriagu). Elsevier Science.
82. Chu, H., Han, W., Cao, W., Tao, C., Raza, M., Chen. L., 2019. Experimental investigation of soot morphology and primary particle size along axial and radial direction of an ethylene diffusion flame via electron microscopy. **Journal of the Energy Institute**, **92**: 1294-1302.
83. Rajkumar, K., Govindarajan, P., 2010. Experimental Investigation of Oxygen Enriched air intake on Combustion Parameters of a Single Cylinder Diesel Engine. **International Journal of Engineering Science and Technology**, **2** (8): 3621-3627.
84. Tang, C., Huang, Z., Jin, C., He, J., Wang, J., Wang, X., Miao, H., 2008. Laminar burning velocities and combustion characteristics of propane–hydrogen–air premixed flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **33**: 4906-4914.
85. Hermanns, R. T. E., Konnov, A. A., Bastiaans, R. J. M., de Goey, L. P. H., Lucka, K., Köhne, H., 2010. Effects of temperature and composition on the laminar burning velocity of CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> flames. **Fuel**, **89** (1): 114-121.

86. Aldredge, R. C., Killingsworth, N. J., 2004. Experimental evaluation of Markstein number influence on thermo-acoustic instability. **Combustion and Flame**, **137** (1):178-197.
87. 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.
88. Capodaglio, A. G., 2019. Ecofuel feedstocks and their prospects, pp. 15-51. In: *Advances in Eco-Fuels for a Sustainable Environment* (Eds: A. K. Azad). Woodhead Publishing.
89. Bates, R. P., Dölle, K., 2017. Syngas Use in Internal Combustion Engines – A Review. *Advances in Research*, 10 (1): 1-8.
90. Zhang, Y., Wu, J., Ishizuka S., 2009 Hydrogen addition effect on laminar burning velocity, flame temperature and flame stability of a planar and a curved CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-air premixed flame. **International Journal of Hydrogen Energy**, **34** (1): 519-527.
91. Sekar, R. R., Marr, W. W., Cole, R. L., Marciniak, T. J., Longman, D. E., 1991. Experimental Evaluation of Oxygen-Enriched Air and Emulsified Fuels in a Single-Cylinder Diesel Engine. Energy Systems Division Argonne National Laboratory, Illinois, 355 pp.
92. Tao, C., Zhou, H., 2020. Effects of different preheated CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> jet in cross-flow on combustion instability and emissions in a lean-premixed combustor. **Journal of the Energy Institute**. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.07.006>.
93. Zhang, K., Hu, G., Liao, S., Zuo, Z., Li, H., Cheng, Q., Xiang, C., 2016. Numerical study on the effects of oxygen enrichment on methane/air flames. **Fuel**, **176**: 93-101.
94. Salzano, E., Basco, A., Cammarota, F., Di Sarli, V., Di Benedetto, A., 2012. Explosions of syngas/CO<sub>2</sub> mixtures in oxygen-enriched air. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, **51**: 7671-7678.
95. Di Sarli, V., Basco, A., Cammarota, F., Di Benedetto, A., Salzano, E., 2012. Flammability of syngas/CO<sub>2</sub> mixtures in oxygen-enriched air. XXXV Meeting of the Italian Section of the Combustion Institute, October 10-12, 2012, Milano. 10.4405/35proci2012.III4.

96. Bouvet, N., Halter, F., Chauveau, C., Yoon, Y., 2013. On the effective Lewis number formulations for lean hydrogen/hydrocarbon/air mixtures. **International Journal of Hydrogen Energy**, **38**: 5949-5960.
97. Arvanitoyannis, I. S., Tserkezou, P., 2008. Cereal waste management: Treatment methods and potential uses of treated waste, pp. 629-702. In: *Waste Management for the Food Industries* (Eds: I. S. Arvanitoyannis). Academic Press.
98. Abubakar, Z., Mokheimer, E. M. A., 2020. Thermo-acoustic combustion instability of propane oxy combustion with CO<sub>2</sub> dilution: Experimental analysis. **International Journal of Energy Research**, **44** (2): 1031-1045.
99. Qin, W., Egolfopoulos, F. N., Tsotsis, T. T., 2001. Fundamental and environmental aspects of landfill gas utilization for power generation. **Chemical Engineering Journal**, **82**: 157-172.
100. Oh, S., Park, Y., Seon, G., Hwang, W., Do, H., 2020. Impacts of N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> diluent gas composition on flame emission spectroscopy for fuel concentration measurements in flames. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, **149**: 119174.
101. 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.
102. Hung, Y.T., Kajitvichyanukul, P., K.Wang, L., *Handbook of Water and Energy Management in Food Processing*, 27-Advances in anaerobic systems for organic pollution removal from food processing waste water, Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition. 2008, pp 755-775.
103. Wuebbles, D.J, 2001. Atmospheric gases , pp 293-305. In: *Encyclopedia of Biodiversity* (Eds: S. A. Lewin). Academic Press.
104. Alabaş, B., Tunç, G., Taştan, M., Yılmaz, İ., 2020. Experimental investigation of the oxygen enrichment in synthetic gases flames. *Fuel*, **270** :117482
105. Blaszcak, R.J., 1999. Nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>): Why and how they are controlled. Clean Air Technology Center, U.S. Environmental Protection Agency Research Triangle Park North Carolina, pp: 57.

106. Zaidaoui, H., Boushaki, T., Sautet, J. C., Chauveau, C., Sarh, B., Gökalp, I., 2017. Effects of CO<sub>2</sub> dilution and O<sub>2</sub> enrichment on non-premixed turbulent CH<sub>4</sub>-air flames in a swirl burner. **Combustion Science and Technology**, **190** (4): 784-802.
107. Karagoz, Y., 2018. Effect of hydrogen addition at different levels on emissions and performance of a diesel engine. **Journal of Thermal Engineering**, **4** (2): 1780-1790.
108. 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.
109. Scribano, G., Cheng, X., Tran, M., 2021. Numerical simulation of the effects of hydrogen and carbon monoxide ratios on the combustion and emissions for syngas fuels in a radiant burner. **Energy**, **214**: 118910.
110. Park, S., Kim, Y., 2017. Numerical modeling for structure and NO<sub>x</sub> formation characteristics of oxygen-enriched syngas turbulent non-premixed jet flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**: 20809-20823.
111. İlbaşı, M., Şahin, M., Karyeyen, S., 2016. Combustion Behaviours of Different Biogases in an Existing Conventional Natural Gas Burner: **An Experimental Study**. **International Journal of Renewable Energy Research-IJRER**, **6**: 1178-1188.
112. Yanık, E., 2017. Model Bir Yanma Odasında Oksijence Zenginleştirilmiş Yanmanın Sayısal Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 71 pp.