

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

**SENTETİK GAZ YAKITLARIN YANMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Harun YILMAZ**

**Danışman
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

Doktora Tezi

**Ocak 2018
KAYSERİ**

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

**SENTETİK GAZ YAKITLARIN YANMA
KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Harun YILMAZ**

**Danışman
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

**Bu çalışma; TÜBİTAK tarafından MAG-215M821 kodlu ve Erciyes Üniversitesi
BAP Birimi tarafından FDK-2016-6560 kodlu projeler ile desteklenmiştir.**

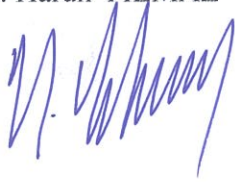
**Ocak 2018
KAYSERİ**

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.

Adı-Soyadı: Harun YILMAZ

İmza:

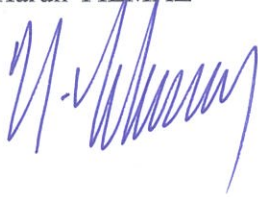


YÖNERGEYE UYGUNLUK

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

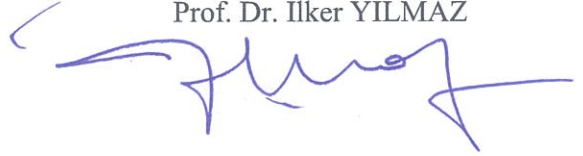
Hazırlayan

Harun YILMAZ



Danışman

Prof. Dr. İlker YILMAZ



Sivil Havacılık ABD Başkanı

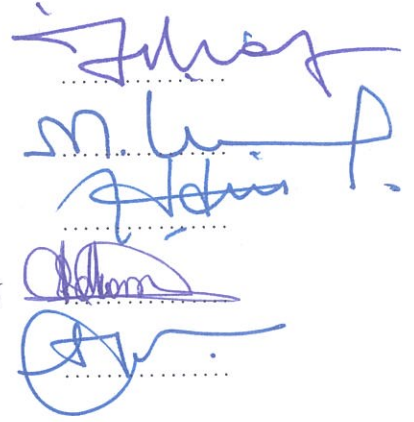
Prof. Dr. İlker YILMAZ

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

18/01/2018

JÜRİ:

Danışman : Prof. Dr. İlker YILMAZ
Üye : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ
Üye : Prof. Dr. Sebahattin ÜNALAN
Üye : Prof. Dr. Selahaddin Orhan AKANSU
Üye : Prof. Dr. Adem ACIR

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 30/01/2018 tarih ve 2018/06-12 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

30 / 01 / 2018

Prof. Dr. Mehmet AKKURT
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

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

Deneyisel çalışmalarım sırasında karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımlarından dolayı aynı laboratuvarı paylaştığımız çalışma arkadaşım Ömer ÇAM'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasına maddi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (Proje No: MAG-215M821) ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: FDK-2016-6560) teşekkür ederim.

Ayrıca; bu günlere gelmemde en büyük katkı sahibi anne ve babama, çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen eşime en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi genç yaşta kaybettiğim babam, İlhami YILMAZ'ın aziz hatırasına ithaf ediyorum.



Harun YILMAZ

Ocak 2018, KAYSERİ

SENTETİK GAZ YAKITLARIN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Harun YILMAZ

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Ocak 2018
Danışman: Prof. Dr. İlker YILMAZ**

ÖZET

Sentetik gazların değişken gaz bileşimi, pratik yakıcılarda karşılaşılan işletme şartlarında ilgili yakıtların yanma karakteristiklerinin ve alev davranışlarının kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirir.

Bu tez çalışmasında öncelikli olarak, farklı oranlarda CNG/H₂/CO/CO₂ içeren sentetik gaz karışımlarını, geniş bir çalışma şartı aralığında herhangi bir alev kararsızlığına (alev geri tepmesi, alev sönmesi, vuruntu veya termo-akustik kararsızlıklar) sebebiyet vermeden yakabilecek bir yakıcı sistemi tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Daha sonra, bu yakıcı sisteminde sentetik gaz yanma ve emisyon davranışına yakıt kompozisyonu, swirl (girdap) sayısı ve eşdeğerlik oranının etkileri; eksenel ve radyal sıcaklık, NO_x, CO ve CO₂ dağılımları belirlenerek deneysel olarak incelenmiştir. Gaz kompozisyonları belirlenirken H₂/CO oranı yüksek, orta ve düşük ısı değer sağlayacak şekilde, üç farklı değerde sabit tutulmuş ve her bir gaz karışımı farklı oranlarda CO₂ ile seyreltilmiştir. Son olarak, yakıcı içerisindeki akustik sınır şartlar yanma odası kollarına yerleştirilmiş hoparlörler vasıtasıyla 0-300 Hz aralığında frekansa sahip ses dalgaları oluşturularak değiştirilmiş ve bu şartlar altında saf CNG, CNG/H₂ ve CNG/H₂/CO karışımlarının alev davranışları; anlık alev görüntüleri, ışık yoğunluğu ve basınç profilleri incelenerek belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, gaz kompozisyonu ve swirl sayısına bağlı olarak sentetik gazların üretilen yakıcıdaki kararlı çalışma aralıkları, sentetik gaz bileşenlerinin yanma karakteristiklerine etkileri ve haricen uyarılmış akustik şartlarda sentetik gazların alev davranışları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sentetik gazlar, Swirl sayısı, Yakıt kompozisyonu, Yanma ve emisyon karakteristikleri, Alev geri tepmesi, Alev sönmesi.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMBUSTION CHARACTERISTICS OF SYNTHETIC GASES

Harun Yılmaz

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Ph.D. Thesis, January 2018

Supervisor: Prof. Dr. İlker YILMAZ

ABSTRACT

Gas composition diversity of synthetic gases necessitates comprehensively examination of flame characteristics and flame behavior of respective fuels at operating conditions encountered in practical burners.

In this thesis study, primarily, a burner system which can combust synthetic gas mixtures that contain varying amount of CNG/H₂/CO/CO₂ over a wide operating condition range without causing any flame instability (flashback, blowout, auto-ignition or thermo-acoustic instabilities) was designed and manufactured. Then, in this burner system, effects of gas combustion, swirl number and equivalence ratio on combustion and emission behavior of synthetic gas flames were experimentally investigated by determining axial and radial temperature, NO_x, CO and CO₂ distributions. While determining gas compositions, H₂/CO ratio was kept constant at three different value which could provide high, moderate and low heating value, and each gas mixture was diluted with varying amount of CO₂. Lastly, acoustic boundary conditions of the burner was modified via side arm mounted loud speakers by creating sound waves with frequencies in the range of 0-300 Hz and under these conditions, flame behavior of pure CNG, CNG/H₂ and CNG/H₂/CO mixtures were determined by investigating instantaneous flame images, pressure and luminous intensity profiles. As a result of this study, stable operating range of tested synthetic gas mixtures in respective burner based on the gas composition and swirl number, effects of synthetic gas constituents on flame characteristics, and flame behavior of synthetic gases under externally excited acoustic conditions were determined.

Keywords: Synthetic gases; Swirl number; Gas composition; Combustion and emission characteristics; Flashback; Blowout.

İÇİNDEKİLER

SENTETİK GAZ YAKITLARIN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

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

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1 Sentetik Gazların Yanma Karakteristikleri Üzerine Çalışmalar	3
1.2 Sentetik Gazların Alev Kararlılıkları Üzerine Çalışmalar	17

2. BÖLÜM

YANMA VE EMİSYONLAR

2.1. Yanma	24
2.1.1 Yanma ve Alev Tipleri.....	25

2.1.2 Alev Yapısı.....	27
2.2. Yanma Termodinamiği.....	27
2.2.1 Reaksiyon Entalpisi	28
2.2.2 Kimyasal Denge.....	29
2.2.3 Reaksiyon Kinetiği.....	30
2.3 Emisyonlar	31
2.3.1 Nitrojen Oksitler	34
2.3.2 Sülfür Oksitler.....	39
2.3.3 Karbon Monoksit.....	41
2.3.4 Yanmamış Hidrokarbonlar	42
2.3.5 Karbondioksit.....	43
2.3.6 Partikül Maddeler.....	44

3. BÖLÜM

DENEY SİSTEMİ

3.1 Gaz Kompozisyonlarının ve Yakıcının Termal Gücünün Belirlenmesi.....	45
3.2. Deney Sistemi.....	47
3.3. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Ekipmanları.....	48
3.3.1 Kendinden Oransal Vanalı Termal Debi Ölçerler ve Kontrol İstasyonu	48
3.3.2 Baca Gazı Analizörü	49
3.3.3 Termoçiftler.....	49
3.3.4 Basınç Sensörü	53
3.3.5 Foto Diyot	54
3.3.6 Hoparlör	54
3.3.7 Sinyal Jeneratörü.....	54
3.3.8 Amplifikatör	54

3.3.9 Veri kayıt cihazı	55
3.4 Yanma Odası	56
3.5 Gaz Akış Kanallarının İmalatı ve Montajı	61
3.6 Brülör Tasarımı ve İmalatı	64
3.6 Girdap Üretici Tasarımı ve İmalatı	66
3.7 Belirsizlik Analizi	69

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Gaz Kompozisyonu ve CO ₂ Seyreltiminin Kararlı Yanma Aralığına Etkisi.....	72
4.2 Gaz Kompozisyonu ve CO ₂ Seyreltiminin Yanma Karakteristiklerine Etkisi .	77
4.3 Swirl Sayısının Kararlı Yanma Aralığına Etkisi.....	109
4.4 Swirl Sayısının Yanma Karakteristiklerine Etkisi	113
4.5 Eşdeğerlik Oranının Yanma Karakteristiklerine Etkisi	127
4.6 Yakıt Kompozisyonu, Swirl Sayısı ve Eşdeğerlik Oranın Termo-akustik Zorlama Altında Alev Davranışına Etkisi	137

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar	145
5.2 Öneriler	150

KAYNAKLAR	152
-----------------	-----

EKLER	163
-------------	-----

EK 1. Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri.....	163
---	-----

EK 2. Ölçüm Ekipmanlarının Kalibrasyon Sertifikaları	168
--	-----

EK 3. CNG Bileşimi	173
ÖZGEÇMİŞ.....	174

KISALTMALAR VE SİMGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>	<u>Birimi</u>
PDF	Probability Density Function	
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği	
EINO _x	Emission Index of NO _x	
UHC	Unburned Hydrocarbon	
LES	Large Eddy Simulation	
RSM	Reynolds Stress Model	
DNS	Direct Numerical Simulation	
CCS	Carbon Capture System	
TF	Thickened Flame	
LSI	Low Swirl Injector	
THETA	Turbulent Heat Release Extension of TAU Code	
PAN	Peroksiasetil Nitrat	
TMS	Trimetilsilanol	
CVIB	Combustion Induced Vortex Breakdown	
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle	
OH-PLIF	OH Planar Laser Induced Fluorescence	
SCCM	Standard Cubic Centimeters per Minute	
SLM	Standard Liter per Minute	
CNG	Compressed Natural Gas	
SS	Swirl Sayısı	
Φ	Eşdeğerlik Oranı	
T	Sıcaklık	K
n	Mol Sayısı	
H_{ol}^0	Standart Referans Haldeki Oluşum Entalpisi	kJ/kmol
G	Gibbs Serbest Enerjisi	kJ/kmol
S	Entropi	kJ/(kmol.K)
p	Basınç	atm
k	Kimyasal Tepkime Hız Sabiti	mol L ⁻¹ s ⁻¹
a ve b	Tepkime Dereceleri	

A	Frekans Faktörü	
E	Aktivasyon Enerjisi	kJ mol^{-1}
R	Evrensel Gaz Sabiti	J/mol.K
h	Taşımla Isı Transfer Katsayısı	$\text{W/m}^2\text{K}$
σ	Stefan-Boltzmann sabiti	$\text{W/m}^2.\text{K}^4$
ε	Yayıcılık	
Nu	Nusselt Sayısı	
Pr	Prandtl Sayısı	
Re	Reynolds Sayısı	
V	Hız	m/s
ϑ	Kinematik Viskozite	m^2/s
α	Termal Viskozite	
ρ	Yoğunluk	kg/m^3
M	Molekül Ağırlığı	gr/mol-gr
d_h	Girdap Üreteci Merkez Çapı	mm
d_o	Girdap Üreteci Dış Çapı	mm
θ	Girdap Üreteci Kanatçık Açısı	Derece
β	Sistematik Hatalar	
ε	Rastgele Hatalar	

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2. 1. Çeşitli elementlerin elektronegativiteleri.....	24
Tablo 2. 2. Çeşitli yakıtların sülfür içerikleri.....	40
Tablo 3. 1. Belirlenen gaz karışımları ve bazı özellikleri (1 atm, 273 K).....	46
Tablo 3. 2. Girdap üreteçlerinin bazı özellikleri.	67
Tablo 4. 1. Test edilen gaz karışımlarının fakir sönme ve alev geri tepme eşdeğerlik oranları.	74
Tablo 4. 2. Yanma odası çıkışında ölçülen egzoz emisyonları.	108
Tablo 4. 3. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının fakir sönme ve alev geri tepme eşdeğerlik oranları.....	110
Tablo 4. 4. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının farklı swirl sayılarında yanma odası çıkışında ölçülen egzoz emisyonları.....	126
Tablo 4. 5. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının farklı swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında yanma odası çıkışında ölçülen egzoz emisyonları.	132
Tablo 4. 6. %100CNG ve %80CNG-%20H ₂ karışımının farklı swirl sayılarında fakir ve zengin tutuşma limitleri.	138
Tablo EK.1. 1. H ₂ /CO oranı 0,5, 1,0 ve 2,0 olan sentetik gaz karışımlarının düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.	163
Tablo EK.1. 2. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının ($\Phi=0,6$) farklı swirl sayılarında düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.	165
Tablo EK.1. 3. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının ($\Phi=0,8$) farklı swirl sayılarında düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.	166
Tablo EK.1. 4. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının ($\Phi=1,0$) farklı swirl sayılarında düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.	167
Tablo EK.3. 1. CNG bileşimi ve bazı özellikleri.	173

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Kıvılcım ateşlemeli bir motorda alev modları	25
Şekil 2. 2. Bunsen alevi şeması.....	26
Şekil 2. 3. Kirletici maddelerin etkileri.....	32
Şekil 2. 4. Basitleştirilmiş yakıt kaynaklı NO oluşum mekanizması.....	39
Şekil 3. 1. Deney sistemi şeması.	47
Şekil 3. 2. Kendinden oransal vanalı termal debi ölçer (MKS Type 1579).	48
Şekil 3. 3. Kontrol istasyonu.	48
Şekil 3. 4. Baca gazı analizörü.	49
Şekil 3. 5. B tipi termoçift.	49
Şekil 3. 6. Sıcaklık ölçüm noktaları	50
Şekil 3. 7. Basınç Sensörü.....	53
Şekil 3. 8. Alev geri tepmesi tespiti için kullanılan foto diyot.....	54
Şekil 3. 9. Deney sisteminde ölçüm ekipmanlarının yerleşimleri.....	55
Şekil 3. 10. Yanma odasının ölçüleri	56
Şekil 3. 11. Kulakçıkların teknik resim çizimleri ve katı modeli.....	57
Şekil 3. 12. Dış kapağa montajlanmış hoparlör.	58
Şekil 3. 13. Hoparlörün yanma odası içerisinden görünüşü.....	58
Şekil 3. 14. Yanma odasının ön cephe görünüşü.	59
Şekil 3. 15. Yanma odasının yan-arka cephe görünüşü.	59
Şekil 3. 16. Taşıyıcı tablaya ait teknik resim çizimleri ve taşıyıcı tabla katı modeli.....	60
Şekil 3. 17. Elektrik panosu.	60
Şekil 3. 18. Pilot ateşleme hattı.	61
Şekil 3. 19. Gaz akış kanalları.....	62
Şekil 3. 20. Kompresör, harici hava tankı, kompresör muhafazası için oluşturulmuş yapı.	63
Şekil 3. 21. Filtre ve basınç regülatörü.	63
Şekil 3. 22. Gaz Kolektörü.....	64
Şekil 3. 23. Hava/yakıt karıştırıcısı	64
Şekil 3. 24. Tasarlanan brülöre ait teknik resim çizimleri.	65
Şekil 3. 25. Brülör katı modeli.	65

Şekil 3. 26. Brülör.	66
Şekil 3. 27. Brülörün üst cephe görünüşü, iyonizasyon ve ateşleme elektrotları.	66
Şekil 3. 28. Girdap üreteçlerinden bazılarının katı model çizimleri:	
(a) Swirl sayısı=0,2, (b) Swirl sayısı=1,2.	68
Şekil 3. 29. İmal edilen girdap üreteçlerinden bazıları.	68
Şekil 3. 30. Tüm deney sistemi.	68
Şekil 4. 1. %20CNG-%53,3H ₂ -%26,7CO, %20CNG-%40H ₂ -%40CO ve %20CNG-%26,7H ₂ -%53,3CO karışımı sentetik gazların H ₂ /CO oranı ile kararlılık aralıklarının değişimi.	75
Şekil 4. 2. CO ₂ ilavesinin kararlı yanma aralığına etkisi. H ₂ /CO oranları:	
a) 0,5, b) 1,0, c) 2,0.	76
Şekil 4. 3. Eksenel sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=0,5).	78
Şekil 4. 4. Eksenel sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=0,5).	79
Şekil 4. 5. Eksenel sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=1,0).	80
Şekil 4. 6. Eksenel sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=1,0).	80
Şekil 4. 7. Eksenel sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=2,0).	81
Şekil 4. 8. Eksenel sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=2,0).	82
Şekil 4. 9. Eksenel sıcaklık dağılımları.	82
Şekil 4. 10. Eksenel sıcaklık dağılımları.	84
Şekil 4. 11. Eksenel sıcaklık dağılımları. H ₂ /CO: (a) 0,5, (b) 1,0, (c) 2,0.	85
Şekil 4. 12. H ₂ /CO oranı 2,0 olan karışımların anlık alev görüntüleri. CO ₂ içeriği: a) 0, b) % 5, c) %10, d) %15, e) %20.	86
Şekil 4. 13. CNG/H ₂ /CO karışımlarının anlık alev görüntüleri. H ₂ /CO oranı:	
a) 2,0, b) 1,0, c) 0,5.	88
Şekil 4. 14. Radyal sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=0,5).	90
Şekil 4. 15. Radyal sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=1,0).	91
Şekil 4. 16. Radyal sıcaklık dağılımları (H ₂ /CO=2,0).	92
Şekil 4. 17. Radyal sıcaklık dağılımları.	93
Şekil 4. 18. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları (H ₂ /CO=0,5).	96
Şekil 4. 19. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları (H ₂ /CO=1,0).	97
Şekil 4. 20. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları (H ₂ /CO=2,0).	98
Şekil 4. 21. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları.	99
Şekil 4. 22. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları.	102

Şekil 4. 23. Radyal O ₂ konsantrasyon dağılımları.	103
Şekil 4. 24. Radyal CO emisyonu dağılımları (H ₂ /CO=0,5).	104
Şekil 4. 25. Radyal CO emisyonu dağılımları (H ₂ /CO=1,0).	105
Şekil 4. 26. Radyal CO emisyonu dağılımları (H ₂ /CO=2,0).	106
Şekil 4. 27. Radyal CO emisyonu dağılımları.	107
Şekil 4. 28. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının farklı swirl sayılarında kararlılık aralıkları.	111
Şekil 4. 29. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının anlık alev görüntüleri. Swirl Sayısı: (a) 0,2, (b) 0,4, (c) 0,6, (d) 0,8, (e) 1,0, (f) 1,2, (g) 1,4, (h) 1,6.	112
Şekil 4. 30. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.	114
Şekil 4. 31. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.	115
Şekil 4. 32. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.	115
Şekil 4. 33. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.	116
Şekil 4. 34. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.	116
Şekil 4. 35. Radyal sıcaklık dağılımları.	118
Şekil 4. 36. Radyal sıcaklık dağılımları.	119
Şekil 4. 37. Radyal sıcaklık dağılımları.	121
Şekil 4. 38. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları.	122
Şekil 4. 39. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları.	123
Şekil 4. 40. Radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları.	124
Şekil 4. 41. Radyal CO emisyonu dağılımları.	125
Şekil 4. 42. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 0,4 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında eksenel sıcaklık dağılımları.	128
Şekil 4. 43. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 0,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında eksenel sıcaklık dağılımları.	128
Şekil 4. 44. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 1,0 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında eksenel sıcaklık dağılımları.	129
Şekil 4. 45. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında eksenel sıcaklık dağılımları.	129
Şekil 4. 46. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının farklı swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında anlık alev görüntüleri.	130

Şekil 4. 47. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 1,4 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında anlık alev görüntüleri.	131
Şekil 4. 48. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal sıcaklık dağılımları.	133
Şekil 4. 49. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal CO ₂ konsantrasyon dağılımları. ...	134
Şekil 4. 50. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal CO emisyonu dağılımları.	135
Şekil 4. 51. %20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂ karışımının 0,2 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal NO _x emisyonu dağılımları.	136
Şekil 4. 52. Yakıt fakir sönme limitinde %100 CNG alevi:	
a) Alev kopması başlangıcı-alev son derece salınımlı,	
b) Alev sönmeden hemen önce.	139
Şekil 4. 53. Yakıt zengin sönme limitinde %100 CNG alevi (sönmeden hemen önce, SS-0,2).	139
Şekil 4. 54. Yakıt zengin sönme limitinde %80CNG-%20H ₂ alevi:	
a) Alev salınım yapmaya başlamış, b) Sönmeye yakın,	
c) Sönmeden hemen önce (SS-0,2).	140
Şekil 4. 55. %100CNG alevinin farklı swirl sayılarında (yakıt zengin sönme limitinde) ışık yoğunluğu dağılımları.	142
Şekil 4. 56. %100CNG ve %80CNG-%20H ₂ karışımının ışık yoğunluğu dağılımları.	142
Şekil 4. 57. %40-CNG-%10H ₂ -%50CO alevinin 0,5 ve 0,8 eşdeğerlik oranlarındaki ışık yoğunluğu dağılımları (SS-0,2).	143
Şekil 4. 58. %40-CNG-%30H ₂ -%30CO karışımının basınç ve ışık yoğunluğu dağılımları.	144
Şekil EK.2. 1. Baca gazı analizörü kalibrasyon sertifikası.	168
Şekil EK.2. 2. Dijital debi ölçerlerin kalibrasyon sertifikaları: a) H ₂ , b) CO,	
c) CO ₂ , d) Hava.	172

GİRİŞ

Tüm fosil hidrokarbon yakıt kaynakları (kömür, petrol, doğal gaz) yenilenebilir değildir ve doğanın bizlere değerli bir armağanıdır. Sürdürebilir bir gelişim için bu enerji kaynaklarının etkili ve verimli bir şekilde kullanımının sağlanması gerekmektedir. Temiz yanma teknolojilerinin gelişimi, CO₂ gibi sera gazı emisyonları olmadan fosil yakıt kaynaklarının sürekli kullanımını mümkün kılacaktır [1]. Böyle bir temiz yanma teknolojisi, esasen hidrojen (H₂) ve karbon monoksit (CO) karışımı olan sentetik gazların kullanımını üzerine kuruludur [2].

Sentetik gazlar, lignoselülozik biokütle gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından, kömür gibi fosil yakıt kaynaklarından, evsel ve kentsel atıklardan veya en geniş ifade ile karbon içeren herhangi bir kaynaktan gazlaştırma yoluyla üretilirler. Bu gazlar, elektrik üretiminde doğalgaz yerine veya kimyasal madde ve sıvı yakıt üretiminde hammadde olarak kullanılabilirler. Sentetik gazların bileşimi reaktör ortamı (oksijen seviyesi, hava içeriği, basınç, sıcaklık vb.), reaktör tasarımı (sabit, akışkan yatak vb.), ısının reaktör ortamına verilme şekli (içten veya dıştan ısımalı) ve sentetik gaz üretimi için kullanılan hammaddeye (kömür, biokütle, atıklar vb.) bağlı olarak değişir. Sentetik gazlar; H₂, CO, CH₄, CO₂, N₂, H₂O ve düşük miktarlarda yüksek hidrokarbonlar içerebilirler [3-4].

Daha önce de belirtildiği gibi, geleneksel yakıtlardan farklı olarak sentetik gazların bileşimi farklılık gösterir. Geleneksel yakıtlar için optimize edilmiş yakma sistemlerinde bu yakıtları kullanmadan önce, alev kararlılıkları göz önünde bulundurularak, ilgili yakıtların yanma özelliklerinin ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasının temel amacı; geniş bir yakıt kompozisyonu, eşdeğerlik oranı ve swirl sayısı aralığında sentetik gazların yanma özelliklerinin ve alev davranışlarının belirlenmesidir.

Bu amaçla, laboratuvar ölçekli bir yakıcı sistemi tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Bu yakıcı sisteminde farklı yakıt tüplerinden sağlanan gazlar ön karışımli olarak farklı eşdeğerlik oranlarında ve swirl sayılarında yakılmış, yanma odası içerisindeki eksenel ve radyal sıcaklık dağılımları ve yanma sonu ürünlerinin konsantrasyon analizleri değerlendirilerek kullanılan yakıtların yanma ve emisyon davranışları belirlenmiştir. Ayrıca, yanma odası içindeki akustik sınır şartlar değiştirilerek alev dinamik olarak kararsız hale getirilmiş ve bu şartlar altında yakıt kompozisyonu, swirl sayısı ve eşdeğerlik oranının alev davranışına etkileri incelenmiştir. Deneyler sırasında yakıcının, gaz bileşimi ve swirl sayısına bağlı olarak kararlı çalışma aralığı da belirlenmiştir.

Literatürde, sentetik gazların yanma ve emisyon davranışlarını konu alan birçok çalışma bulunmaktadır. Tez çalışmasının bir sonraki bölümünde bu çalışmalar kısaca özetlenmiştir.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1 Sentetik Gazların Yanma Karakteristikleri Üzerine Çalışmalar

Lee et al. yüksek oranda H_2 ve CO içeren sentetik gazların yanma performanslarını deneysel olarak incelemiş ve elde ettikleri sonuçları, yanma performansı bakımından metan gazı yanmasından elde edilen sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Kullanılan gazların yanma performanslarını; türbin giriş sıcaklığı, yanma dinamikleri, emisyon karakteristikleri ve alev yapıları bakımından değerlendirmişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda, sentetik gazların yanma karakteristiklerini belirlemiş ve gaz türbin yakıcılarında metan gazı yerine sentetik gaz kullanıldığında ne tür problemler ortaya çıkacağını tespit etmişlerdir. Sonuçlar; sentetik gazların yanma karakteristiklerinin H_2/CO oranına bağlı olarak değişebileceğini, yüksek H_2 içeriğinin NO emisyonlarını artırdığını ancak düşük yüklerde bile CO emisyonunun olmadığını, sentetik gazların metanda olduğu gibi yanma titreşimine neden olmadığını ve çalışmada kullanılan gaz türbin yakıcısında metan gazı yerine sentetik gazın yakıcıda çok az bir değişiklik ile kullanılabileceğini göstermiştir [5].

İlbaş ve Karyeyen, hidrojen ilavesi içeren düşük ısı değerli kömür gazlarının yanma davranışlarını, sayısal olarak incelemiş ve hidrojen ilavesi ile bu gazların yanma performanslarını geliştirmeye çalışmışlardır. Çalışmalarında, PDF (Probability Density Function - Olası Yoğunluk Fonksiyonu) modelini ve deneysel sonuçlar ile daha iyi uyum gösterdiğinden k- ϵ realizeable türbülans modelini kullanmışlardır. Ayrıca, doğal gazın esas bileşeni olan metanı tahminleri doğrulamak için referans yakıt olarak kullanmışlardır. Metan alevinin tahmin edilen sıcaklık profillerini, deneysel sonuçlar ile kıyaslanmış ve iyi bir uyum elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar, hidrojenle zenginleştirilmiş kömür gazlarının yanma karakteristiklerinin hidrojen ilavesi ile

geliştiğini ancak hidrojen ilavesinin, NO_x seviyelerini bir miktar artırdığını göstermiştir [6].

Ghenai, gazlaştırma işlemi ile katı plastik atık ve biokütle karışımından elde edilen sentetik gaz yakıtların yanma davranışlarını HAD (Hesaplama Akışkanlar Dinamiği) yazılımları ile incelemiştir. Bu maksatla, yakıtı verimli bir şekilde yakmak ve emisyonları azaltmak için girdap üreteçli, silindirik bir gaz türbin yakıcısı tasarlamıştır. Çalışmasında, üç farklı yakıtı test etmiştir. Bunlar; saf CH_4 , sentetik gaz (%76,2 H_2 -%8,53 CO -%4,39 CO_2 -%10,90 CH_4) ve saf H_2 'dir. Sentetik gaz kompozisyonu ve düşük ısıtma değerinin; alev şekline, gaz sıcaklığına ve her bir birim enerji oluşumu için NO_x ve CO_2 kütlelerine etkilerini incelemiş ve sonuç olarak, doğal gaza kıyasla maksimum alev sıcaklığı ve NO kütle kesirlerinin sentetik gaz ve saf H_2 yanmasında daha yüksek olduğunu, sentetik gaz yanmasının yakıcı çıkışında daha az CO_2 emisyonları oluşturduğunu göstermiştir [7].

Bouziane et al. ön karışimsız sentetik gaz alevinin yapı ve emisyon karakteristiklerini etkileyen farklı parametreler üzerine, tek bir sentetik gaz kompozisyonu (%80 H_2 -%4 CH_4 -%10 CO_2 -%2 CO -%2 N_2) kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Alev hakkında daha fazla bilgi etmek için doğrudan fotoğraf çekerek niteliksel bir analiz gerçekleştirmişlerdir. NO_x ve CO emisyonları ölçümlerini ise geleneksel gaz analiz cihazları ile gerçekleştirmişler ve sentetik gaz, metan, metan+hidrojen alevi emisyonlarını karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, çalışmada kullanılan yakıcının çok fakir şartlarda çalışabildiğini ($\Phi < 0,1$), CO emisyonlarının eşdeğerlik oranı azaldıkça arttığını göstermiştir [8].

Joo et al. $\text{H}_2/\text{CO}/\text{CH}_4$ karışımı sentetik gazların model bir gaz türbin yakıcısında kısmi ön karışimli yanma karakteristiklerini araştırmışlardır. 0,7-1,3 eşdeğerlik oranı aralığındaki sentetik gazların alev yapılarını ve karakteristiklerini incelemek için kimyasal ısıldama ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Abel ters çevirme metodunu üç boyutlu kimyasal ısıldama görüntülerinden iki boyutlu kimyasal ısıldama alev görüntülerini elde etmek için kullanmışlar ve EINO_x 'i (Emission Index of Nitrous Oxide - NO_x Emisyon İndeksi), alev yapısı ve egzoz gazı arasındaki ilişkiyi araştırmak için ölçmüşlerdir. İlave olarak, EINO_x tahmini için bir yapay sinir ağı modeli oluşturmuşlardır. Bu modelde alev sıcaklığını, alev uzunluğunu ve giriş hava akış oranını

yapay sinir ağı giriş değerleri olarak kullanmışlardır. Sonuçlar, kısmi ön karışım alevi EINO_x karakteristiklerinin difüzyon alevinden farklı olduğunu, alev uzunluğu ile EINO_x karakteristiklerinin ilişkilendirilebileceğini ve alev görüntülerinin EINO_x tahmininde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu durumu, yapay sinir ağları modeli ile de doğrulamışlardır [9].

Baina et al. biokütleden elde edilen sentetik gaz karışımlarının CO, UHC ve NO_x emisyonları bakımından hava kademeli bir doğal gaz yakıcısında kullanılıp kullanılamayacağını araştırmışlardır. Bu maksatla, iki farklı gaz karışımı kullanmış ve kullanılan her bir karışıma katranı temsil etmesi (katranın yanma performansı üzerindeki etkisinin anlaşılması) için farklı oranlarda benzen ilavesi yapmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları yakıcı için optimum bir çalışma noktası bulmak maksadıyla eş değerlik oranını belirli bir aralıkta (fakir şartlarda) değiştirmişlerdir. Sonuçlar, benzen gibi poliaromatik hidrokarbonların varlığının egzoz gazları içindeki CO konsantrasyonunu azalttığını ve 0,68'den daha düşük eş değerlik oranlarında UHC konsantrasyonunu artırdığını ortaya çıkarmıştır. Son olarak, benzen ilavesi ile NO_x emisyonlarının arttığını tespit etmişlerdir [10].

Huynh ve Kong, üç farklı biokütleden (çam, akağaç-meşe karışımı, mısır tohumu) gazlaştırma işlemi ile elde edilmiş sentetik gazların, farklı oranlarda oksijence zenginleştirilmiş hava ile farklı buhar şartlarında yakılması sonucu oluşan NO_x emisyonlarını incelemişlerdir. NO_x emisyonu ölçümlerini, farklı ısı oranları, yakıcı çalışma aralıkları ve eş değerlik oranlarında kimyasal ısıldama teknolojili emisyon analizörü kullanarak yapmışlardır. Sonuçlar, odunsu biokütleden elde edilen sentetik gazların NO_x emisyonlarının, karışım fakirleştikçe ve ısı oranı düştükçe lineer bir şekilde azaldığını göstermiştir. Doğal gaz ile kıyaslandığında odunsu biokütleden elde edilen sentetik gazların NO_x emisyonları çok daha yüksek bulunmuştur. Bu durumu, biokütleden elde edilen sentetik gaz yanmasında yakıt kaynaklı NO_x oluşumunun etkin olduğu şeklinde yorumlamışlardır. Odunsu biokütleden elde edilen sentetik gazların aksine, mısır çekirdeğinden elde edilen sentetik gazlarda NO_x emisyonunun, fakir şartlarla birlikte azalmadan önce bir maksimum değere ulaştığını tespit etmişler ve benzer bir davranışı tüm yakıt akış oranlarında, tüm oksijence zenginleştirilmiş hava ve buhar şartlarında gözlemlemişlerdir. Bu üç farklı biokütleden elde edilen sentetik gazlar içerisinde mısır çekirdeğinden elde edilen sentetik gaz en fazla nitrojen içeriğine sahiptir.

Bu durum, sentetik gaz karışımındaki amonyak miktarının artmasına ve böylece çok yüksek NO_x emisyonlarına (450-900 ppm) neden olmuştur [11].

Martinez et al. hidrojen ve sentetik gazların türbülanslı yanma süreçlerini incelemek için LES (Large Eddy Simulation) metodunu kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, hidrojen içeriği ve Reynolds sayısının alev karakteristiklerine etkilerini göstermiştir. Bu sonuçlara göre; yüksek hidrojen içeriği daha kalın kesme tabakalarına ve CO içeren yakıt karışımlarına kıyasla daha yayılğan akış alanlarında daha yüksek sıcaklıklara yol açar, H_2/CO alevi hidrojen alevine kıyasla daha kırıxık akış alanları oluşturur, akıştaki vortisite sadece giriş hızından değil aynı zamanda yakıt kompozisyonundan da etkilenir, yanma işlemi sonucu salınan ısı büyük yoğunluk gradyenleri oluşturur ve bu gradyenler girdap oluşumuna katkıda bulunurlar, yakıt karışımı içinde CO varlığı girdap oluşumunu artırır [12].

Cameretti ve Tuccillo, biokütleden ve katı atıklardan değişik yollarla elde edilmiş gaz yakıtlar ile beslenen bir mikro gaz türbin yakıcı davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarının ilk kısmında, yanma odası kalma süresi içinde NO oluşumu için kritik eşitlikleri çözen boyutsuz, zaman bağımlı bir model kullanarak kirletici emisyon tahminleri yapmışlardır. Bu tahminler için başlangıç şartlarını mikro gaz türbin sisteminin çeşitli şartlar altındaki termo-akışkanlar dinamiği analizinden elde etmişlerdir. Çalışmalarının ikinci kısmında, bir HAD çalışmasını, mikro gaz türbin sisteminin termo-akışkanlar dinamiği simülasyonundan elde edilen sınır şartlar altında gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, düşük kalorik değerli yakıtların yanma verimlerini geliştirmek için birkaç çözüm yöntemi araştırmış, en uygun reaksiyon şemasını ve türbülans modelini belirlemek için bir duyarlılık analizi de gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma neticesinde, düşük kalorik değerli yakıtlar ile beslenen yakıcı davranışını, yanma verimi ve emisyon kontrolü açısından optimize etmeye çalışmışlardır [13].

Krieger et al. model bir gaz türbin yakıcısında (silindirik tip) oksijenli yakıt yanmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Ön karışimsız alevler için kimyasal reaksiyonları modellemek için denge yanma modelini, türbülansı modellemek için ise Reynolds Stress Model (RSM)'i kullanmışlardır. Çalışmalarında, propan/hava (%21 O_2 -%79 N_2) yanmasına ilaveten iki farklı O_2/CO_2 oranlı (1 ve 3,76) hava karışımı ile propan ve sentetik gaz yanmasını modellemişlerdir. Yapılan tahminler, propan/oksijenli hava

($O_2/CO_2=1$) alevinin, propan/hava ($\%21O_2$ - $\%79N_2$) alevine benzediğini fakat propan/oksijenli hava ($O_2/CO_2=1$) alevinde yakıcı merkezinde çok yüksek sıcaklık seviyelerinin olduğunu göstermiştir. Bu durumun, yetersiz gaz türbin model faktörüne (pattern factor) neden olacağı belirtilmiştir. Sentetik gaz/oksijenli hava alevleri ise primer bölgede (ilk seyreltme deliklerinden önce) yoğun reaksiyonlar göstermiştir [14].

Habib et al. sentetik gaz yanma ve emisyon karakteristiklerini sayısal olarak incelemiş ve 200 MW'lık bir yakıcıda metan yanması sonuçları ile kıyaslamışlardır. Bu maksatla, 21 adım ve 11 tür içeren detaylı bir reaksiyon kinetiği mekanizmasını sentetik gaz yanma işlemini modellemek için kullanmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları sentetik gaz karışımları; $\%67CO$ - $\%33H_2$, $\%50CO$ - $\%50H_2$ ve $\%33CO$ - $\%67H_2$ 'dir. Elde edilen sonuçlar:

- $\%33CO$ - $\%67H_2$ sentetik gaz karışımı, diğer karışımlara kıyasla en kısa alev uzunluğuna sahiptir.
- $\%50CO$ - $\%50H_2$ sentetik gaz karışımı en düşük maksimum kazan sıcaklığına, $\%67CO$ - $\%33H_2$ karışımı ise en yüksek maksimum kazan sıcaklığına sebep olmuştur. Kazan çıkış sıcaklığı ise hidrojen içeriği arttıkça artmıştır.
- Fazla hava faktörünün CO ve NO_x emisyonlarına etkisi yüksektir. Fazla hava $\%5$ 'ten $\%25$ 'e arttığında, NO_x emisyonları $\%30$ oranında azalmıştır.
- Test edilen tüm gaz karışımları içinde $\%50CO$ - $\%50H_2$ gaz karışımı, en düşük emisyonlara ve en iyi yanma karakteristiklerine sahiptir [15].

Safer et al. çeşitli sentetik gaz karışımlarına ait (H_2/CO oranı 0,4-2,0 aralığında) türbülanslı karşı akış difüzyon alevi davranışlarını, 1-10 atm ortam basıncı aralığında sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında, karışma oranına özel ilgi göstererek, yüksek şekil değiştirme hızlarında türbülanslı alev yapılarını ve NO emisyonlarını incelemişlerdir. Bu maksatla, Steady Laminar Flamelet Model'i alev yapısı hesaplamaları, Eulerian Particle Flamelet Model'i ise NO_x hesaplamaları için kullanmışlardır. Sayısal hesaplamalar, karışma oranının hidrojen ilavesi ve ortam basıncı artışı ile arttığını, maksimum alev sıcaklığının H_2 ilavesi ile azaldığını ve basınç artışı ile arttığını, hidrojen zengin sentetik gaz alevlerinde NO seviyelerinin azaldığı ve basınç artışı ile tekrar arttığını göstermiştir [16].

Safer et al. başka bir çalışmalarında sentetik gaz yanmasını iyileştirmek için oksijen ilavesi konusunu araştırmışlar ve sentetik gaz karşı akış difüzyon alevi üzerinde sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu sayısal çalışmada oksitleyici olarak oksijence (hacimce %21-%30 aralığında) zenginleştirilmiş hava, yakıt olarak H_2/CO oranları 0,25 ve 4 olan iki farklı sentetik gaz kullanmışlardır. Sayısal hesaplamalar, oksijen ilavesinin alev sıcaklığını (NO_x emisyonlarını), radyasyon ısı transferini ve tutuşabilirlik limitlerini artırdığını göstermiştir [17].

Dinesh et al. yüksek hidrojen içeriğine sahip sentetik gazların ön karışimsız, jet alevlerinin ($Re=6000$) üç boyutlu doğrudan sayısal simülasyonlarını (Direct Numerical Simulation) NO oluşumunu incelemek için gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, saf hidrojen alevi için alev sıcaklığı ve NO oluşumu arasında güçlü bir bağ olduğunu, H_2/CO sentetik gaz alevinde ise H_2 'nin CO ile seyreltilmesi sonucu elde edilen düşük sıcaklıklardan dolayı NO değerlerinde bir azalma olduğunu göstermiştir. H_2/CO sentetik gaz karışımı alevine ait NO oluşum sonuçları, düşük şekil değiştirme hızlarında NO oluşumunda Zeldovich mekanizmasının baskın olduğunu, yüksek şekil değiştirme hızlarında ise NO oluşumunun NNH mekanizmasından kaynaklandığını göstermiştir. Ayrıca, CO 'in oksidasyonunda CH radikallerinin bulunmamasından dolayı H_2/CO sentetik gaz alevlerinde NO oluşumunda Fenimore mekanizmasının en az etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [18].

Dinesh et al. başka bir çalışmalarında girdaplı, ön karışimsız H_2/CO sentetik gaz karışımlarının alev karakteristiklerini, LES (Large Eddy Simulation) ve detaylı kimya modeli kullanarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, hidrojen ve karbon monoksitçe zengin alevler arasında hem hız hem de diğer skalar özellikler bakımından büyük farklılıklar göstermiştir. Bu durum, yakıt çeşitliliğinin alev karakteristiklerine olan etkisine bağlanmıştır. Son olarak, H_2 'nin yüksek difüzyon kabiliyetinden dolayı hidrojen zengin karışımların karbon monoksitçe zengin karışımlara göre daha kalın alevler oluşturduğu tespit edilmiştir [19].

Dinesh et al. Laminar Flamelet Model'i ile birleştirilmiş üç boyutlu LES kullanarak türbülanslı, ön karışimsız H_2/N_2 ve H_2/CO sentetik gaz alevlerini de simule etmişlerdir. Çalışmalarında dört farklı sentetik gaz karışımını (N_2 içeren ve değişik oranlarda hidrojen veya karbon monoksitçe zengin karışımlar) modellemişlerdir.

Çalışmalarındaki esas amaç, yakıt değişkenliğinin alev karakteristiklerine etkisini araştırmaktır. Yakıt değişkenliği etkilerini hem ani alev yapılarını hem de zaman ortalamalı alev özelliklerini inceleyerek araştırmışlardır. Sonuçlar, hidrojen zengin karışımın alev karakteristikleri ve yanma dinamiklerinde hidrojen difüzyon hızının baskın olduğunu, hidrojen zengin yakıt alevinin karbon monoksit zengin yakıt alevine göre daha kalın olduğunu, H_2/CO oranının alev sıcaklığına etkisinin düşük ancak alev kalınlığı ve şekil değiştirme hızına etkisinin büyük olduğunu ve son olarak alev yapısı ve maksimum alev sıcaklığının büyük ölçüde yakıt kompozisyonuna bağlı olduğunu göstermiştir [20].

Cipriani, farklı bileşimlerdeki sentetik gazların hem ön karışımli hem de ön karışimsız yanma ve emisyon davranışlarını incelemiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak, katı oksit yakıt hücrelerinde sentetik gaz kullanımı konusunu da araştırmıştır. Bu maksatla detaylı bir sayısal model geliştirmiş, katı oksit yakıt hücresinin anot kimyasını değerlendirmek ve yakıt hücresinin optimal dizaynında kullanmak için bu sayısal modelden elde edilen sonuçları deneysel veriler ile valide etmiştir. Çalışmasında, sentetik gaz kompozisyonunun ve diğer parametrelerin yanma performansına etkilerini de incelemiştir. Sonuçlar, sentetik gaz kompozisyonun CO emisyonunu önemli ölçüde etkilediğini, adyabatik alev sıcaklığının düşmesinin esas nedeninin seyreltici (CO_2 , N_2 , su buharı) olduğunu, eşdeğerlik oranının adyabatik alev sıcaklığını (yanma entalpisi ve ısı kapasitesini etkileyerek) önemli ölçüde değiştirdiğini, H_2 ilavesinin laminar alev hızını artırdığını ve katı oksit yakıt hücrelerinde verimli bir şekilde sentetik gaz kullanılabileceğini belirlemiştir [21].

Enjeksiyon yanması (mikroskobik ölçekte karıştırarak) gaz türbin motorlarında NO_x emisyonlarını azaltmak için kullanılan etkili bir yoldur fakat yakıcı nozulu yakınında yüksek sıcaklıklara neden olur. Zhang et al. bu problemi çözmek için mikro karışım enjeksiyon yanması ile birlikte N_2 ile seyreltme konusunu incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar, bu metodun sadece NO_x emisyonlarını azaltmadığını aynı zamanda alev sıcaklığını da azaltarak nozulu koruduğunu göstermiştir. N_2 ilavesi arttıkça, NO_x emisyonlarının ve sıcaklığın azaldığı tespit edilmiştir. Bu çalışmada, çeşitli deneysel işletme şartlarında, NO_x emisyonları 6 ppm'den daha düşük bir değere kadar azaltılmıştır ki bu değer geleneksel gaz türbin yakıcıların NO_x emisyon değerlerinden daha düşüktür.

CO emisyonlarının ise N_2 ilavesi ile arttığı fakat yanma şartları kontrol edilerek düşürülebileceği belirtilmiştir. [22].

Torre et al. oksijenli sentetik gaz ve oksijenli metan alevlerinin radyasyonla ısı salınım özelliklerini araştırmışlardır. Birçok oksijenli yakıt sisteminde baca gazları, alev sıcaklığını düşürmek için yakıt ve oksitleyici ile ön karıştırılır. Devirdaim edilen bu gazlardan radyasyonla olan ısı transferinin (1,2 – 5,0 μm dalga boyu aralığında) CO_2 ve H_2O 'dan olan radyasyon emisyonunun yükselmesinden dolayı arttığı tahmin edilmiştir. Torre ve arkadaşları bu durumdan etkilenerek oksijenli sentetik gaz yanmasının global ve spektral özelliklerini ve bağımlı değişkenlerin radyasyon emisyonunu nasıl etkileyeceğini araştırmışlardır. Bu değişkenler; CO_2 'nin seyreltici etkisi, yakıttaki H_2 yüzdesi, ateşleme girdisi, eş değerlik oranının radyasyon ısı salınımına ve H_2O-CO_2 'in spektral radyasyonuna etkisidir. Elde edilen sonuçlar, sentetik gazların radyasyonla ısı salınımı faktörünün yüksek ateşleme girdilerinde ve yüksek H_2 konsantrasyonlarında azaldığını göstermiştir. Ayrıca, CO_2 'nin yüksek devirdaim oranlarında ısı salınımı faktöründe bir artış görülmüştür [23].

Deneysel çalışmalar ile kıyaslandığında hesaplamalı akışkanlar dinamiği alev davranışının ucuz ve güvenli bir şekilde anlaşılmasını mümkün kılar. Bu yaklaşımın doğruluğu fiziksel modelin düzgün bir şekilde oluşturulmasına ve uygun türbülans, radyasyon ve kimya modellerinin kullanımına bağlıdır. Kimya modeli alev sıcaklığı, alev hızı gibi çeşitli alev özelliklerinin ve emisyonların belirlenmesi için önemli bir elementtir. Sentetik gaz yanması için çeşitli kimya mekanizmaları geliştirilmiş ve deneysel veriler ile (çeşitli sentetik gaz karışımları için) valide edilmiştir. Goswami et al. hacimce %85-15 H_2-CO ve H_2-N_2 karışımlarını oksitleyici olarak O_2-He karışımı ile fakir şartlarda ve yüksek basınçlarda (1-10 atm arası) yakmışlar ve laminar yanma hızlarını ölçmüşlerdir. Bu deneyleri, 298 K başlangıç sıcaklık değerinde ısı akısı metodu kullanarak yürütmüşlerdir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçları literatürde bulunan sentetik gazların yüksek basınçlarda yakılmasına ait kimyasal kinetik şemaları ile karşılaştırmışlar ve kinetik şemalar ile deneysel sonuçlar arasında büyük farklılıklar gözlemlemişlerdir. Bu durumun, bazı kilit kimyasal reaksiyonlardan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Reaksiyon oranı ve H , HO_2 ve OH gibi türlerin üretimi ve tüketimine neden olan önemli reaksiyonlarda yüksek bir belirsizliğin hala bulunduğunu gösteren duyarlılık analizi vasıtasıyla bir kimyasal kinetik çalışması yapmışlar ve fakir karışımlar için $H + O_2 (+M)$

→ H_2O (+M) reaksiyonunun model ve deney sonuçları arasındaki farklılığa önemli ölçüde katkıda bulunduğunu belirtmişlerdir [24].

Kobayashi et al. yüksek miktarda CO_2 ile seyreltilmiş $CO/H_2/O_2$ karışımının türbülanslı ön karışım alevinin karakteristiklerini 1,0 MPa'a kadar yüksek basınçlarda deneysel olarak incelemişlerdir. CCS (Carbon Capture System) sistemine bağlı IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) gaz türbin yakıcısı için sentetik gaz kompozisyonunu, laminar yanma hızını, adyabatik alev sıcaklığını ve stokiyometriyi göz önünde bulundurarak CO/H_2 oranını, eş değerlik oranını ve CO_2 mol kesrini belirlemişlerdir. Yüksek basınçlı bir yanma odasında sabitlenen Bunsen tipi alev için OH-PLIF ve radyasyon ölçümlerini yapmışlardır. OH-PLIF görüntülerini kullanarak alev yüzey yoğunluğunu, türbülanslı alev bölgelerinin ortalama hacmini ve türbülanslı yanma hızını hesaplamışlar, metan/hava alevi ve sentetik gaz/hava alevine ait sonuçlar ile kıyaslamışlardır. $CO/H_2/CO_2/O_2$ alevine ait alev yüzey yoğunluğunu, metan/hava ve $CO/H_2/CO_2$ /hava alevinden daha yüksek bulmuş ve bu durumun, yüksek basınçtaki daha küçük ölçekli alev kıvrımlarının ve daha küçük Markstein uzunluklarının sebep olduğu türbülanslı girdap hareketlerine karşı daha az alev pasifliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. $CO/H_2/CO_2/O_2$ alevlerinin türbülanslı alev bölgelerinin ortalama hacminin $CO/H_2/CO_2$ /hava alevine yakın, CH_4 /hava alevinden ise çok daha küçük olduğunu tespit etmiş, bu durumu ise yüksek basınçlarda türbülanslı alevlere Markstein uzunluğunun etkisi ile açıklamışlardır. Son olarak, çok yüksek CO_2 konsantrasyonundan dolayı $CO/H_2/CO_2/O_2$ alevinin toplam radyasyon yoğunluğunun CH_4 /hava alevinden 1,6 kat daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir [25].

Venkateswaran et al. H_2/CO karışımlarının global türbülanslı tüketim hızlarını ölçmüşlerdir. Bu ölçümleri, ortalama akış hızı ve türbülans yoğunluklarında ve hacimce %30-%90 aralığında H_2 içeren H_2/CO karışımları için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında iki farklı türde deney yapmışlardır. İlkinde, karışımdaki H_2 oranını ve karışımın eşdeğerlik oranını aynı laminar alev hızını elde etmek için her bir yakıt kompozisyonu için ayarlamışlar, ikincisinde ise eşdeğerlik oranlarını sabit bir H_2 seviyesinde değiştirmişlerdir. Sonuçlar, global türbülanslı tüketim hızının yakıt kompozisyonuna (karışım içeriğindeki hidrojen arttıkça türbülanslı tüketim hızı artar) büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermiştir [26].

Ge et al. parçacık görüntülemeli akımölçerler kullanarak, swirl sabitlemeli sentetik gaz alevi karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarından elde edilen sonuçlar: CO/H₂ molar oranındaki artışla birlikte yakıt nozulu ile alevdeki yakıt vorteksi arasındaki mesafe ilk önce artar daha sonra azalır, maksimum ortalama eksenel hız ise sürekli artar; yakıt/hava akış oranının artışı ile yakıt vorteksi ilk başta genişler daha sonra incilir, nozul ile yakıt vorteksi arasındaki mesafe ilk başta azalır daha sonra artar, resirkülasyon bölgesinin iç sınırı ise artar [27].

Li et al. sentetik gazların (H₂/CO/CO₂) ön karışımli laminar alevlerinin yanma karakteristiklerini, Schlieren tekniği kullanarak bir deney vasıtasıyla sistematik bir şekilde incelemişlerdir. Deneylerinde H₂/CO/CO₂/hava karışımının H₂/CO kısmında H₂'nin hacim kesrini %30-100 arasında, aynı karışımın tamamında CO₂'nin hacim kesrini %0-60 arasında, eş değerlik oranını ise 0,4-1,0 arasında değiştirmişlerdir. Çalışmalarında, alev yayılma hızına, Markstein uzunluğuna ve laminar yanma hızlarına H₂ kesrinin, CO₂ kesrinin ve eşdeğerlik oranının etkisi araştırmışlardır. Elde ettikleri laminar yanma hızı değerlerini, literatürde bulunan değerler ile kıyaslamış ve mükemmel bir uyum elde etmişlerdir. Eş değerlik oranı azaldıkça ve seyreltici kesri arttıkça alevlerin daha az kararlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Laminar yanma hızlarının; adyabatik sıcaklık, termal yayılabilirlik ve CO + OH ↔ CO₂ + H kimyasal reaksiyonunda CO₂ iştirakının azalmasının birleşik etkileri sonucu, CO₂ seyreltici kesrinin artışı ile azaldığını; hidrojen kesrinin artışı ile termal etkiden daha çok, kimyasal etki ve difüzyon etkisi sonucu önemli ölçüde arttığını tespit etmişlerdir [28].

Taamallah et al. gaz türbin yakıcılarında hidrojen zengin sentetik gaz ön karışım alevine yakıt kompozisyonunun etkisini, sistem kararlılığı ve emisyonlar bakımından sayısal olarak incelemişlerdir. Ayrıca, farklı kompozisyondaki yakıtlar ile çalışabilen gaz türbin teknolojilerini incelemişler ve tamamen ön karışımli yanma için bu teknolojilerin bir kısmının kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmadan elde sonuçların bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- H₂ varlığı, düşük eş değerlik oranlarında çalışmaya müsaade ederek fakir tutuşabilirlik limitlerini azaltır.
- H₂ ilavesi ile yakıcı yüksek şekil değiştirme hızlarında çalışabilir.

- Yüksek H_2 yüzdesi, fakir karışımlarda bile bazı tür alev geri tepmesi olayları (sınır tabaka alev geri tepmesi) riskini artıran, çok yüksek türbülanslı alev hızlarına neden olur.
- Metan-hidrojen karışımlarında veya sentetik gaz karışımlarında yakıt kompozisyonunu değiştirmek (eş değerlik oranı sabit tutulursa) yanma işleminin dinamik kararlılığını değiştirir.
- Hidrojence zengin karışımın kararlılığının muhafaza edilmesi için eş değerlik oranının azalması gerekir.
- Hidrojen ilavesi, NO_x emisyonlarını azaltmak için kullanılabilir. Bu işlem sadece fakir karışımlarda mümkündür (düşük alev sıcaklıklarından dolayı) çünkü bu değişiklik, aynı güç çıkışının elde edilebilmesi için (eş değerlik oranı azaldığından ve hidrojenin düşük ısıl değerinden dolayı) hacimsel hava akış oranının artmasını gerektirir. Bu durum da turbo-makine komponentlerindeki kısıtlamalardan dolayı her zaman mümkün değildir [29].

Shao et al. model bir yakıcıda, swirl stablizerli sentetik gaz difüzyon alevinin yapısını farklı yakıt ve hava girdap yoğunluklarında (swirl sayısında) OH-PLIF metodu kullanarak ölçmüşlerdir. Bu maksatla %28,5 CO , %22,5 H_2 ve %49 N_2 içeren düşük ısıtma değerli sentetik gazı, termal gücü 34 kW olan bir yakıcıda atmosfer basıncında yakmışlardır. Sonuçlar, hava girdap yoğunluğu arttıkça (aynı yakıt girdap yoğunluğu için) alev yapısının alev uzunluğundaki küçük bir düşüş hariç çok az fark gösterdiğini fakat aynı hava girdap oranı için yakıt girdap yoğunluğu artışının alev şekli, alev uzunluğu ve reaksiyon bölgesi dağılımını büyük ölçüde etkilediğini açığa çıkarmıştır. Bu nedenle hava girdap yoğunluğu ile kıyaslandığında yakıt girdap yoğunluğunu alev yapısını etkileyen önemli bir parametre olarak belirlemişlerdir. Anlık OH-PLIF görüntüleri, düşük girdap yoğunluklarında, reaksiyon bölgesi dağılımları farklı üç ayrı alev yapısı göstermiştir. Yüksek girdap yoğunluklarında ise kararlı ve üniform reaksiyon bölgesi dağılımına sahip tek bir alev yapısı göstermiştir. Bu durumu, yüksek girdap yoğunluğunun sentetik gaz difüzyon alevinin kararlılığını artırarak verim artışına neden olacağı şeklinde yorumlamışlardır [30].

De ve Acharya, hidrojence zenginleştirilmiş ön karışım alevine swirl sayısı, ön karışım oranı ve geometrinin etkisini Thickened Flame (TF) modeli ile LES kullanarak araştırmışlardır. TF modeli vasıtası ile türbülanslı akış alanı ve yanma kimyasını

eşleştirmişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlar literatürde bulunan deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum göstermiştir. Elde edilen sonuçların bazıları aşağıda listelenmiştir.

- Swirl sayısı ve ön karışım oranındaki artış, hidrojenin yüksek yanabilirliğinden dolayı (hidrojen alev önü boyunca reaksiyonu hızlandırır böylece reaksiyon bölgesinde sıcaklık artar ve bu sıcaklık artışı Combustion Induced Vortex Breakdown'a neden olur), yanma sistemini yukarı akım alev hareketine daha duyarlı hale getirmiştir.
- Yüksek swirl sayılarında ön karışım oranı ve yakıcı geometrisinden bağımsız olarak yukarı akım alev hareketleri her zaman görülür.
- Ön karışımli sistemler düşük swirl sayılarında daha kararlı davranırlar.
- Yüksek swirl sayısı (sabit H_2 oranında), resirkülasyon bölgesinin boyutunu artırır.
- Swirl sayısındaki artış, yüksek türbülansdan dolayı her zaman alev ilerlemesine neden olur. Böylece kimyasal reaksiyonlar (ön karışım oranı da aynı etkiye sahiptir) artar.
- Geometrinin alev davranışına etkisi düşüktür [31].

Fan et al. farklı oranlarda CH_4 , CO ve H_2 içeren sentetik gaz karışımlarını laboratuvar ölçekli bir yakıcıda yakmışlar ve bu gazların yanma karakteristiklerini (alev kararlılığı, sıcaklık gradyeni, ateşleme ve NO_x oluşumu bakımından), alev sıcaklıkları ve baca gazı kompozisyonlarını ölçerek ve analiz ederek incelemişlerdir. Primer hava katsayısını (PA), toplam hava katsayısını (TA) ve sentetik gaz komponentlerini (CS) kilit parametreler olarak seçmişlerdir. Elde edilen sonuçlar; primer hava katsayısının sentetik gazın ateşlenmesinde ve NO_x oluşumunda baskın olduğunu, toplam hava katsayısının baca gazı sıcaklıklarını etkilediğini (yüksek sıcaklık bölgelerinden sonra) ve NO_x oluşumunun H_2/CO oranı arttıkça yükseldiğini göstermiştir [32].

Chun et al. ön karışimsız sentetik gaz alevi yapısını, sönme limitlerini ve NO_x emisyonu karakteristiklerini sayısal olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar: sönme gerinme oranı sentetik gazdaki H_2 oranı arttıkça daha az yakıt seyreltimi ve yüksek ilk sıcaklıklarla artar, bu değer yüksek basınçta çok fazla seyreltilmiş yakıt karışımı hariç basınç artışı ile de yükselir, maksimum sıcaklık ve $EINO_x$ az önce belirtilen şartlar altında artar, gerinme oranı arttıkça $EINO_x$ azalır. Chun et al. ayrıca NO_x oluşumu reaksiyon adımlarını da analiz etmişler ve sonuçları, NO reaksiyon adımı diyagramı ile açıklamışlardır. Bu analizden elde edilen sonuçlar; N radikallerindeki artışın yüksek ilk sıcaklıklarda ve basınçlarda daha yüksek NO_x oluşumuna neden olduğunu, basınç arttıkça $EINO_x$ 'in

yavaşça arttığını, termal NO oluşumunun seyreltme ile azaltılabileceğini ve yüksek sönme gerinme oranlı yanma şartlarının daha fazla NO_x oluşumuna neden olabileceğini göstermiştir. Yapılan çalışma neticesinde, bütün bu sonuçlar değerlendirilerek, sentetik gaz yanması için optimum bir çalışma aralığının belirlenmesi gerektiği belirtilmiştir [33].

Delattin et al. fakir ön karışimli, basınçlandırılmış bir mikro türbin yakıcısında (çok az modifiye edilmiş) yakıt beslemesini doğal gazdan kademeli olarak sıvı sentetik gaza değiştirerek, sentetik gazların yanma davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Her iki yakıtın yakıt karakteristikleri arasındaki büyük farklılıklardan kaynaklanacak olası problemleri tespit etmek için sıcaklık, basınç ve emisyon profillerini ve alev görüntülerini sürekli olarak incelemişlerdir. Test sırasında vuruntu, dinamik veya statik kararsızlık gibi problemler gözlemlenmiştir. Sonuçlar, sıcaklık profillerinin müsaade edilen limitler içerisinde kaldığını ve alev tutunma pozisyonunda önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Deneyler sırasında, yakıcının kısmen veya tamamen yüklü olduğu durumlarda sentetik gaz yanması, çok düşük NO_x ve CO emisyonları oluşturmuştur. Bu çalışma sonucunda çalışmalarında kullandıkları mikro türbin yakıcısında yakıt olarak sentetik gaz kullanılabileceğini açığa çıkarmışlardır [34].

Littlejohn ve Cheng, bir gaz türbin-düşük swirl enjektörü tarafından oluşturulan türbülanslı ön karışım alevine yakıt kompozisyonunun etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Yedi farklı yakıt karışımının (seyreltilmiş veya seyreltilmemiş hidrokarbon ve hidrojen yakıtlar) fakir sönme limiti ve emisyon analizlerinden elde edilen sonuçlar, LSI'nin (Low Swirl Injector) 5ppm'den daha az NO_x emisyonları oluşturan kararlı alevleri desteklemekte yeterli olduğunu göstermiştir. Hız istatistik analizleri, LSI'nin tepkili ve tepkisiz akış alanlarının benzer özellikler gösterdiğini açığa çıkarmıştır. Sonuç olarak, LSI'nin, hidrokarbon yakıtlar için önemli bir değişikliğe ihtiyaç duymadığını ancak H₂ ile seyreltilmiş yakıtlar için bazı değişiklikler gerektirdiği ifade edilmiştir [35].

Zhou et al. laminar, ön karışimli CO/H₂ (%50-50) alevinin bir boyutlu sayısal simülasyonu ile bu karışımın seyreltme limitlerine ilk basınç ve sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Bu maksatla seyreltme limiti civarındaki alev kalınlığını, maksimum alev sıcaklığını, laminar alev hızını ve kütle yanma hızlarını analiz etmişlerdir. Sonuçlar, yüksek ilk sıcaklıklarda seyreltme limitlerinin, seyreltme limitlerindeki laminar alev

hızlarının ve kütle yanma hızlarının arttığını, seyreltme limitlerindeki alev kalınlığının artan basınç ile azaldığını ve ilk sıcaklık artışı ile belirli belirsiz arttığını göstermiştir. Azalan alev kalınlığı, flamelet modelin yüksek basınçlarda türbülanslı yanma işlemleri için daha avantajlı olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Ayrıca, reaksiyon kalınlığının alev kalınlığına oranı ve Zeldovich numarası, artan basınç ile önce artmış daha sonra ise azalmıştır. Duyarlılık analizleri, Zeldovich numarasının tek düze olmayan eğiliminin aşağıdaki başlangıç reaksiyonlarının birleşik etkilerinden kaynaklandığını göstermiştir [36].



Brambilla et al. $\text{H}_2/\text{CO}/\text{O}_2/\text{N}_2$ karışımının ön karışımli yanma dinamiklerini hem sayısal hem de deneysel olarak 7 mm uzunluğa sahip orta ölçekli bir kanalda, standart atmosfer şartlarında, 0,25-0,42 yakıt fakir eşdeğerlik oranlarında, 550-1320 K duvar sıcaklıklarında ve 1:1'den 20:1'e kadar hacimsel $\text{CO}:\text{H}_2$ oranlarında incelemişlerdir. Çalışmalarını optik olarak erişilebilir bir kanal akışlı reaktörde, OH radikallerinin görüntülenmesi için yüksek hızlı düzlemsel lazer, alt ve üst duvar sıcaklıklarını ölçmek için termoçiftler kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Sayısal hesaplamaları, başlangıç sentetik gaz reaksiyon mekanizmalarını ve detaylı tür taşınımalarını içeren iki boyutlu bir kod ile gerçekleştirmişlerdir. Yapılan ölçümler, sabit yanma modunun yüksek duvar sıcaklıklarında ve yüksek $\text{CO}:\text{H}_2$ oranlarında daha avantajlı olduğunu, salınımlı yanma modunun ise tam tersi şartlarda daha avantajlı olduğunu göstermiştir. Sabit yanma modunda tahmin edilen emisyonlar: 25-94 ppm CO ve 0,1-0,3 ppm H_2 ; salınımlı yanmada ise tam yanma gerçekleşmediğinden, CO ve H_2 emisyonları çok yüksektir [37].

Domenico et al. yarı teknik ölçekli bir yakıcıda sentetik gaz yanmasını hem sayısal hem de deneysel olarak incelenmişlerdir. Farklı oranlarda H_2 , N_2 , CH_4 ve CO içeren sentetik gaz karışımlarını bahsi geçen yakıcıda hem atmosfer hem de yüksek basınç şartlarında yakmışlardır. Akış alanını incelemek için parçacık görüntülemeli akımölçer ve türbülanslı akışı (tepkili) simüle etmek için DLR HAD kodu THETA'yı kullanmışlardır. Yapılan çalışma, sayısal analizlerin hem yanma odası içinde akış özelliklerini göstermede

hem de yakıt kompozisyonu ve işletme şartlarının yakıcı performansına etkisini anlamada yeterli olduğunu göstermiştir. Farklı bileşimlerdeki sentetik gazların yanma odası çıkış sıcaklıkları benzer olmasına rağmen maksimum sıcaklık değerleri ve reaksiyon bölgesi uzunluklarında yakıt kompozisyonuna bağlı olarak büyük farklar görülmüştür [38].

1.2 Sentetik Gazların Alev Kararlılıkları Üzerine Çalışmalar

Yakıt kompozisyonu ve işletme şartlarının yanma özelliklerine etkilerinden ayrı olarak, alev kararlılığına olası etkileri konusuna da özel ilgi gösterilmiştir. Ön karışım ve difüzyon alevlerinin çalışma aralıkları (alev geri tepme ve sönme limitleri ile tanımlanır) birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılar, özellikle H_2 gibi sentetik gaz bileşenlerinin alevin kararlılık aralığını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sentetik gazlar yüksek miktarda CO de içerirler. CO kararlılık aralığını fakir şartlara doğru taşır. CH_4 , CO ve H_2 alev davranışını etkileyen çok farklı taşınım özelliklerine ve alev hızlarına sahiptirler. Örneğin H_2 ve CO düşük eşdeğerlik oranlarında çalışmaya müsaade ederek (bu durum emisyonları azaltır) yüksek sıcaklıklı ve yüksek hızlı alevler oluştururlar. Ancak, bu tür yakıtlar alev geri tepmesine neden olurlar ve bu durum, sıcaklık dayanımı düşük olan ve konum olarak yanma odalarının yukarı akımına yerleştirilmiş olan yakıt enjeksiyonları için bir güvenlik tehdidi oluşturur. Bu nedenle birçok araştırmacı alev geri tepme mekanizmasını araştırmıştır.

Tuncer et al. sentetik gazların önemli bir bileşeni olan hidrojenin (yüksek yanma oranından dolayı) saf metan yakıtı ilavesinin alev davranışına (fakir sönme limiti, alev geri tepmesi ve basınç genliği) etkisini incelemişlerdir. Bu maksatla laboratuvar ölçekli, ön karışımli bir yakıcı tasarlamış ve üretmişlerdir. Bu yakıcıda saf metandan başlayarak artan oranlarda hidrojen içeren yakıt karışımlarını yakmışlardır. Çalışmalarında ısı salınımı, emisyon ve alev geri tepmesi ölçümlerini gerçek zamanlı olarak yapmışlar ve ayrıca termo-akustik temelli basınç dalgalanmaları ve alev geri tepmesi arasındaki ilişkiyi de araştırmışlardır. Yapılan çalışma, hidrojenin mol kesrindeki artışın alev geri tepme eğilimini artırdığını, hidrojen ilavesinin dominant akustik modda ani bir değişikliğe neden olabileceğini, hidrojen ilavesinin NO oluşumunu artırmasına rağmen çok fakir şartlarda yanmaya imkân sağladığını, basınç çevrimi, periyodik alev geri tepme davranışı ve NO emisyonları arasında yakın bir bağlantı olduğunu göstermiştir [39].

Sayad et al. ön karışımı, atmosferik ve değişken swirl sayılı bir yakıcıda çeşitli sentetik gaz karışımlarının kararlılık limitlerine swirl sayısının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Fakir sönme ve alev geri tepmesi deneylerini farklı oranlarda H_2 , CO ve CH_4 içeren yakıt karışımları için iki farklı swirl sayısında (0,53 ve 0,66) gerçekleştirmiş ve swirl sayısını 0,66'dan 0,53'e düşürmenin, çeşitli sentetik gaz karışımlarının alev geri tepme eğilimlerini azalttığını ancak aynı yakıtların fakir sönme limitlerini önemli ölçüde etkilemediğini belirtmişlerdir. H_2/CH_4 (%50-%50) karışımı için yakıcıdaki akış alanını, 0,66 ve 0,53 swirl sayılarında, farklı eşdeğerlik oranlarında yüksek hızlı parçacık görüntülemeli akımölçer ile incelemişlerdir. Eşdeğerlik oranını alev geri tepme limitine doğru artırmanın, swirl sayısına bağlı olarak akış alanına çeşitli etkileri olduğunu göstermişlerdir. Alev geri tepmesi başlangıcında kaydedilen yüksek hız OH-kimyasal ışıltama görüntüleri, alev stabilizasyon mekanizmasında 0,66 ve 0,53 swirl sayıları arasında önemli farklılıklar olduğunu açığa çıkarmıştır. Hem akım ölçümleri hem de OH kimyasal ışıltama görüntüleri, swirl sayısı 0,66'da alev geri tepmesinin CVIB (Combustion Induced Vortex Breakdown) mekanizmasından, 0,53 swirl sayısında ise alev hızı ve çekirdek akıştaki akış hızı arasındaki rekabetten kaynaklandığını göstermiştir [40].

Zhang et al. N_2 ve CO_2 gibi inert komponentlerin fakir, ön karışımı H_2/CO sentetik gaz alevlerinin yayılma ve sönme davranışlarına etkisini hem sayısal hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında sönme uzama oranlarını ters akış tekniği ile ölçmüşler, laminar alev hızlarını ise literatürden elde etmişlerdir. Sayısal simülasyonları bir boyutlu serbest yayılma ve ters-jet konfigürasyonlarında detaylı yanma kimyası ve moleküler taşınım tanımlamaları ile gerçekleştirmişlerdir. Sayısal simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum göstermiştir. Hem sayısal hem de deneysel analizler, CO_2 ilavesinin alev yayılma ve sönme davranışına N_2 'den daha fazla etki ettiğini göstermiştir. Ek olarak, sayısal simülasyonlarda N_2 ve CO_2 ilavesinin termal, yayınabilirlik değişim ve kimyasal etkilerinin nicel olarak öncelikli önemini değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, termal etkinin laminar alev hızının ve sönme şekil değiştirme hızının azalmasında baskın bir rol oynadığını, CO_2 ilavesinden kaynaklanan kimyasal etkinin sönme limitini azaltmada laminar alev hızını azaltmadan belirli belirsiz daha etkili olduğunu, yayınabilirlik değişim etkisinin ise hem O_2 hem de N_2 ilavesi için ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir [41].

Armingol ve Ballester, sentetik gaz yanmasındaki temel kaygılar (kararlılık aralığı, yanma kararsızlıkları ve kirletici emisyonlar) üzerine çalışmışlar ve basınç dalgalanmaları ile alev geri tepmesi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Sonuçlar, yakıt kompozisyonunun kararlılık aralığı (özellikle alev geri tepmesi oluşumu) üzerindeki önemli etkisini ve yakıcı konfigürasyonunun da kararlılık aralığını etkilediğini açığa çıkarmıştır. Bu çalışmada kritik Damköhler numarasının tanımlanması gibi bazı yaklaşımların bulunmasına rağmen belirli yakıt karışımlarının ve yakıcı geometrilerinin kararlılık aralığı oldukça doğru bir şekilde tahmin edilmiştir. Son olarak, yüksek hidrojen içerikli bazı yakıt karışımlarında, belirli şartlar altında, alev geri tepmesi ve termo-akustik kararsızlıklar arasında tetikleyici bir mekanizmanın olduğu belirlenmiştir [42].

Lee et al. H_2 , CO , N_2 , CO_2 ve buhar karışımından oluşan sentetik gazların yanma performanslarını araştırmışlar ve bu gaz karışımlarındaki N_2 , CO_2 ve buharın seyreltme etkilerini incelemişlerdir. Yanma testlerini model bir (GE7EA) endüstriyel gaz türbin yakıcısında, ortam basıncında gerçekleştirmişlerdir. N_2 , CO_2 ve buharın seyreltme oranlarını değiştirerek, NO_x ve CO emisyonlarını, yanma kararsızlıklarını, alev şekillerini ve yanma odasının bazı noktalarındaki sıcaklıkları gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, seyreltici oranı arttıkça NO_x emisyonlarının azaldığını ve her bir birim güç üretimi için NO_x emisyonu azalma oranının seyreltıcinin kütle akış oranı ve sabit basınç ısı kapasitesinin bir ürünü olan seyreltici ısı kapasitesine logaritmik olarak bağlı olduğunu göstermiştir. CO emisyonun 10 ppm'in altında olduğu birçok yanma durumunda yanma verimini tatmin edici bir şekilde iyi bulmuşlar ve alev geri tepmesi gibi yanma kararsızlıkları gözlemlememişlerdir. Çalışma neticesinde N_2 , CO_2 ve buharın, güvenilir bir çalışma aralığı sağlayarak, NO_x emisyonlarını kontrol etmede etkili olduğunu göstermişlerdir [43].

Lee et al. başka bir çalışmada kömürden elde edilen sentetik gazların (özellikle Taean IGCC ve Buggenum IGCC tesislerinde üretilen sentetik gazlar) bir gaz türbin yakıcısındaki yanma karakteristiklerini araştırmışlardır. Bu sentetik gazların yanma performanslarını değerlendirmek için GE7EA model yakıcısında yüksek basınç ve sıcaklıklarda yanma testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde alev kararlılığını, dinamik basınç karakteristiklerini, NO_x ve CO emisyonlarını, yanma odasındaki sıcaklığı ve alev yapılarını ısı girdisi ve seyreltici oranlarını değiştirerek gözlemlemişlerdir. Buggenum

tesisinden elde edilen gazın (seyreltme yok) kararlılık aralığını yüksek hidrojen içeriğinden dolayı daha yüksek bulmuşlardır. Ancak, sentetik gazlar nitrojen ile seyreltildiğinde Buggenum'dan elde edilen gazın kararlılık aralığının olumsuz etkilendiğini, Taeen'den elde edilen gazın ise daha kararlı bir şekilde yandığını tespit etmişlerdir. Bu durumun, gaz karışımlarının H_2/CO oranlarının ve seyreltici ısı kapasitelerinin farklı olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. NO_x , CO emisyonları ve yanma verimi analizlerinden elde edilen sonuçlar, her iki gazın NO_x emisyonlarının hemen hemen tam ve kararlı bir yanma ile 5 ppm'in altına düşürülebileceğini göstermiştir [44].

Lee ve Kil, kömürden elde edilen düşük kalorik değerli sentetik gazların alev kararlılıklarını, termal ve yakıt kaynaklı NO_x oluşum karakteristiklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları sentetik yakıtı, yakıcıya olan termal girişin doğal gaz ile aynı olması isteği ile CO , H_2 ve amonyak karışımından üretmişlerdir. Bu sentetik gaz karışımı için eş değerlik oranını değiştirerek kararlı yanma aralığını belirlemek, alev sönmesi ve alev geri tepmesi gibi alev kararsızlıklarını tanımlamak için alev davranışını gözlemlenmişlerdir. Egzoz gazlarındaki NO_x içeriğini, sentetik gaz yanması sonucu oluşan termal ve yakıt kaynaklı NO_x emisyonlarını doğal gaz yanması sonucu oluşan NO_x emisyonu sonuçları ile kıyaslamak için ölçmüşlerdir. Son olarak, N_2 ile seyreltme işlemini NO_x azaltma tekniği olarak uygulamış, bu tekniğin NO_x emisyonu ve alev kararlılığına etkilerini araştırmışlardır [45].

Burbano et al. H_2/CO /hava karışımlarının ve hacimce %60'a kadar N_2 , %20'ye kadar da CO_2 ile seyreltilmiş eş molar H_2/CO karışımlarının laminar yanma hızlarını farklı eşdeğerlik oranlarında ve deniz seviyesine yakın atmosfer şartlarında ($P=0,95$ atm, $T=303 \pm 2$ K) deneysel olarak ölçmüşlerdir. Deneylerinde alevleri, konturlu-slot tipi nozul yakıcılar kullanarak oluşturmuş ve Schlieren görüntülerini açıcı metodu ile laminar yanma hızlarını belirlemek için kullanmışlardır. Sayısal hesaplamaları detaylı reaksiyon mekanizmaları kullanarak yapmışlar ve bu sayısal hesaplamalardan elde ettikleri sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslamışlardır. Sonuçlar, N_2 ve CO_2 seyreltme kesirlerindeki artışın (ısı salınımındaki azalma ve ısı kapasitesindeki artıştan dolayı) laminar yanma hızlarını azalttığını, aynı seyreltme kesrinde CO_2 'nin laminar yanma hızına etkisinin (CO_2 'nin yüksek ısı kapasitesinin yanma sırasındaki çözöştürücü etkisinden dolayı) daha yüksek olduğunu göstermiştir [46].

Huang ve Yang, fakir-ön karışımli-swirl stablizerli bir yakıcıda akış gelişimi ve yanma dinamiklerine, giriş swirl sayısının etkisini LES kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, giriş swirl sayısı kritik bir değeri aştığında girdap çözülmesi sonucu bir merkezi (halka şekilli) resirkülasyon bölgesinin aşağı akımda oluştuğunu, swirl sayısı daha da artırılırsa resirkülasyon bölgesinin yukarı akıma doğru ilerlediğini ve merkezin hemen arkasındaki zayıf resirkülasyon bölgesi ile birleştiğini, swirl sayısının daha da artmasının merkezi resirkülasyon akışının yakıt girişine sızmasına ve alev geri tepmesine neden olabileceğini, yüksek swirl sayısının türbülans yoğunluğunu (ve sonuç olarak alev hızını) artırma eğiliminde olduğunu ve bunun sonucunda alev yüzey alanının artacağını, net ısı salınımının ise artan alev hızından dolayı değişmeden kalacağını göstermiştir. Son olarak, ters akustik salınımların sıklıkla yüksek swirl sayılı akışların etkilerine galip geldiği, düşük swirl sayılı akışlarda uzunlamasına modların dalga hareketlerini domine ettiği tespit edilmiştir [47].

Yoon et al. model bir gaz türbin yakıcısında, farklı çalışma şartlarında yanma kararsızlığı ve yakıt kompozisyonu arasındaki ilişkiyi araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Alev yapısını OH kimyasal ışıltama ve OH-PLIF ölçme tekniği ile görselleştirmişlerdir. Çeşitli yakıt kompozisyonları kullanılarak gerçekleştirilen ısı girdisi ve giriş hava sıcaklığı değişimi deneyleri, yanma kararsızlığının belirli şartlar ve yakıt kompozisyonuna bağlı olarak değişen kararsızlık frekansı altında gerçekleştiğini göstermiştir. Sonuçlar:

- Yakıt kompozisyonu, dinamik alev davranışını etkiler.
- H_2/CH_4 oranı arttıkça alev daha kararsız hale gelir.
- CO konsantrasyonu arttıkça dinamik basınç genliği azalır.
- Hava sıcaklığı, alev davranışını etkiler [48].

Emadi et al. düşük swirl sayılı-fakir-ön karışımli bir yakıcının termo-akustik davranışını birkaç parametrenin değişik varyasyonları açısından deneysel olarak incelemişlerdir. Bu parametreler; eş değerlik oranı, yanma odası basıncı, akış hızı ve yakıt karışımına hidrojen ilavesi miktarıdır. Bu çalışmada farklı kompozisyonlarda iki farklı yakıt kullanılmıştır. Bunlar; saf metan ve %80 metan - %20 hidrojen karışımıdır. Yapılan çalışmalar, eşdeğerlik oranındaki artışın dominant akustik modların frekans ve genliğini artırdığını, yakıt akış oranındaki artışın akustik modlara etkisinin düşük olduğunu (saf

metanda akış hızındaki artış frekansı azaltmış, hidrojen ilaveli yakıtta ise frekansta artışlar görülmüştür) göstermiştir. Basıncın akustik davranışa etkisi düzensiz olduğundan anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Ayrıca, yakıcı ve yanma odası tasarımının da akustik davranışı etkilediği tespit edilmiştir [49].

Mansfield ve Wooldrige, sentetik gazların bileşiminde bulunabilen CH_4 (sentetik gazların yaygın bir bileşenidir) ve trimetilsilanol (kentsel atıklardan elde edilen sentetik gazlarda bulunan bir bileşen) gibi yabancı kimyasal maddelerin, sentetik gazların yanma performanslarına etkilerini incelemişler ayrıca yüksek basınç ve düşük sıcaklık şartlarında (gaz türbinli motor çalışma aralığı) bu gazların ateşleme özelliklerini de araştırmışlardır. Ateşleme sürecinin yüksek hız görüntülerini ve basınç zaman geçmişi ölçümlerini, vuruntu gecikme zamanlarını belirlemek ve ateşleme davranışını gözlemlemek için kullanmışlardır. Bu çalışmada dört farklı kompozisyona sahip sentetik gaz kullanılmışlardır. Bunlar; $\%30\text{H}_2$ - $\%70\text{CO}$, $\%27\text{H}_2$ - $\%67\text{CO}$ - $\%6\text{CH}_4$, $\%30\text{H}_2$ - $\%70\text{CO}$ -10 ppm TMS (trimetilsilanol), $\%30\text{H}_2$ - $\%70\text{CO}$ -100 ppm TMS'dir. Bütün yakıt karışımları için eşdeğerlik oranını 0,1, sıkıştırma işleminden sonra basınçları 5 ve 15 atm, sıcaklıkları ise 1010 ve 1110 K olarak belirlemişlerdir. Sonuçlar, yüksek basınçlarda iki adımlı ateşleme davranışı (iki ayrı ısı salınımı ve basınç yükselme bölgesi ile birlikte) göstermiştir. Bu nedenle ilk ve ikinci vuruntu gecikme zamanı tanımlanmış ve şaşırtıcı bir şekilde bu zamanların yabancı madde içeriğinden farklı şekillerde etkilendikleri gösterilmiştir. Ayrıca, CH_4 ilavesinin vuruntu gecikme zamanını 15 atm'de $\%40$ 'a kadar, 5 atm'de ise üç kata kadar artırdığı; TMS ilavesinin ise vuruntu gecikme zamanını azalttığı, yakıt tüketimini artırdığı ve H_2O oluşumunu azalttığı gösterilmiştir [50].

Ding et al. kuru sentetik gazın ($\%50\text{H}_2$ - $\%50\text{CO}$), nemli sentetik gazın ($\%40\text{H}_2$ - $\%40\text{CO}$ - $\%20\text{H}_2\text{O}$) ve $\%5$ oranında CH_4 içeren saf olmayan sentetik gazın sönme limitlerini ve emisyon davranışlarını incelemişlerdir. Bir karşı akış alev konfigürasyonunu (fakir-ön karışimli yanma şartlarında) farklı basınç ve farklı sentetik gaz kompozisyonlarında, seyreltici seviyesini (N_2 , CO_2 , H_2O) değiştirerek, emisyon ve sönme karakteristiklerini anlamak için simule etmişlerdir. Seyreltici oranı artırıldığında, sentetik gaz kompozisyonu değiştirildiğinde ve alevde sabit bir gerilme oranı muhafaza edildiğinde elde edilen sayısal sonuçlar: CO_2 ile seyreltilmiş nemli ve kuru sentetik gaz alevlerinin sönme limitleri aynıdır ancak nemli sentetik gazın sönme sıcaklığı daha yüksektir, yakıt karışımında H_2O varlığı N_2 ile seyreltilmiş alevin sönme limitini azaltır fakat sönme

sıcaklığını artırır, sentetik gazda CH_4 varlığı alev sönme limitini artırır ancak CO_2 ile seyreltilmiş gaz alevinin sıcaklığına bir etkisi yoktur, seyreltilmiş nemli sentetik gazlar için sönme limiti ve sönme sıcaklığı basınç ile artar, sentetik gaz karışımındaki CO konsantrasyonunun artması NO emisyonlarını artırır [51].

2. BÖLÜM

YANMA VE EMİSYONLAR

2.1. Yanma

Yanma, “ısı veya hem ısı hem de ışık oluşturan hızlı oksidasyon tepkimeleri veya görece çok az ısı oluşturan ve hiç ışık üretmeyen yavaş oksidasyon tepkimeleri” olarak tanımlanır. Bu tanımlama, yanma işlemlerinde kimyasal reaksiyonların önemini vurgulamaktadır çünkü yanma işlemi ile yakıtta kimyasal bağlar şeklinde depolanan enerji, ısı enerjisine dönüştürülerek farklı şekillerde kullanılabilir hale getirilir [52]. Buradan hareketle, yanma “enerji yayan (ekzotermik) kimyasal dönüşüm” olarak da tanımlanır [53].

Yanma işlemi, bir oksitleyicinin varlığında yakıtın yandığı kimyasal bir süreçtir. Kimyasal açıdan oksitleyici “elektron kabul eden bir element”, yakıt ise “elektron veren bir element” şeklinde ifade edilir. Herhangi bir elementin elektron alma ve verme kabiliyeti “elektronegativite”, bir elementin yakıt veya oksitleyici olarak kullanılabileceğini veya kullanılmayacağını belirler. Tablo 2.1’de bazı elementlerin elektronegativiteleri verilmiştir [54].

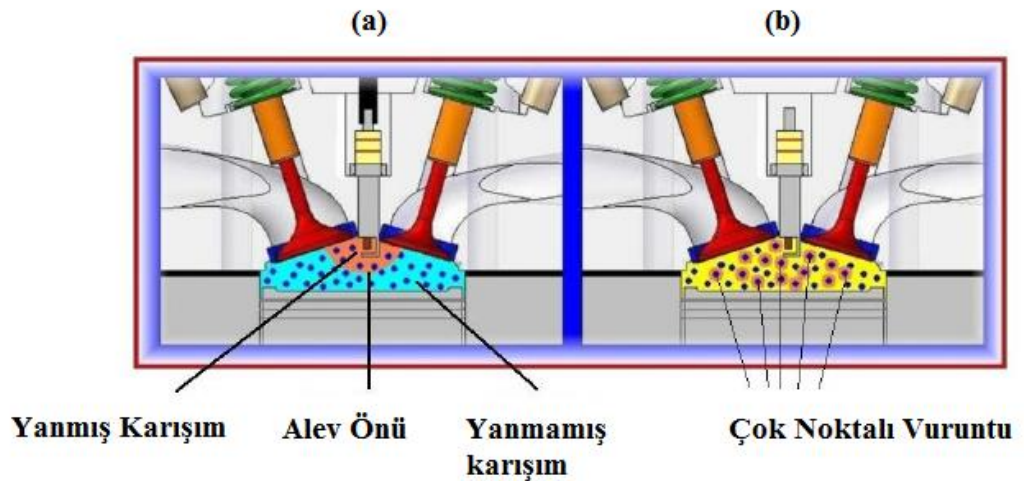
Tablo 2. 1. Çeşitli elementlerin elektronegativiteleri [54].

Element	Elektronegativite
F	4
O	3,5
N, Cl	3,0
Br	2,8
C, S, I	2,5
H, P	2,1
B	2,0
Be, Al	1,5
Mg	1,2
Li, Ca	1,0
Na, Ba	0,9

Florun elektronegativitesi, doğada en yaygın olarak bulunan oksitleyici olan oksijenden bile daha yüksektir. Bu durum, flor + oksijen tepkimesinde florun oksitleyici, oksijenin ise bilinenin aksine yakıt olacağını gösterir. Karbon, hidrojen, alüminyum ve magnezyum gibi yakıtların elektronegativiteleri oksijenden daha düşüktür. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yakıtlar, hidrokarbon kökenlidir [54].

2.1.1 Yanma ve Alev Tipleri

Yanma işlemi, alevli veya alevsiz olabilir ve bu alevler ön karışım veya difüzyon alevi olarak karakterize edilirler. Alevli ve alevsiz yanma modları arasındaki farklar Şekil 2.1'de kıvılcım ateşlemeli bir motorda gerçekleşen yanma işlemi ile görselleştirilmiştir. Şekil 2.1a'da yoğun kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği ince bir bölgenin yanmamış hava yakıt karışımı boyunca yayıldığı görülebilir. Bu ince reaksiyon bölgesi (alev önü), alev olarak adlandırılır. Alevin arkasında ise sıcak yanma ürünleri yer alır. Alev, yanma odası boyunca hareket ettikçe, yanmamış hava yakıt karışımının basınç ve sıcaklığı artar. Belirli şartlar altında (Şekil 2.1b), yanmamış gaz karışımının bazı bölgelerinde hızlı oksidasyon tepkimeleri gerçekleşir. Bu durum, yanma odası içinde ani basınç yükselmelerine neden olur ve oluşan karakteristik sestten dolayı vuruntu olarak adlandırılır. Vuruntu, tasarımcıların kaçındığı istenmeyen bir durumdur [52].

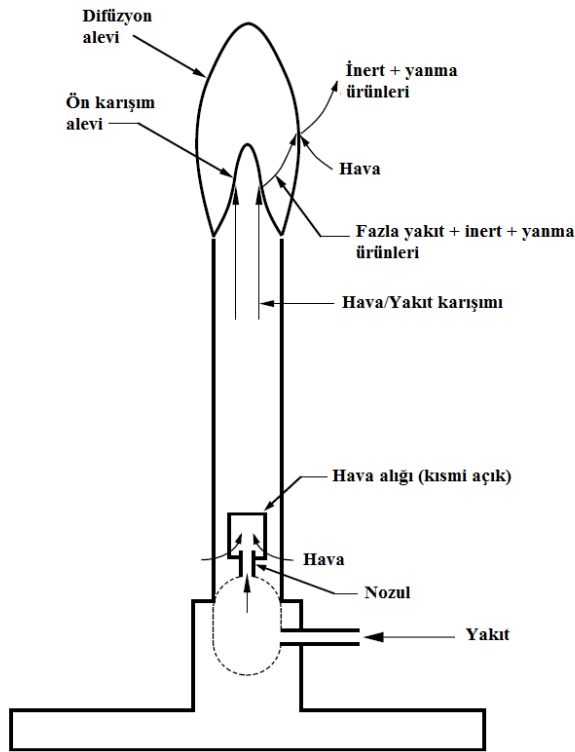


Şekil 2. 1. Kıvılcım ateşlemeli bir motorda alev modları [55].

Alev türleri, hava ve yakıtın karışma durumuna bağlıdır. Ön karışım alevinde, hava ve yakıt yanma işleminden önce moleküler seviyede karıştırılır. Karışma işlemi hava ve yakıttan en az birinin sıvı veya gaz halde olmasını gerektirir. Böylece moleküller etrafa

yayılabilirler. Kıvılcım ateşlemeli motor, ön karışım alevinin görülebileceği bir örnektir. Aksine, difüzyon alevinde hava yakıt başlangıçta birbirlerinden ayrılır. Kimyasal reaksiyonlar sadece, hem karışma hem de reaksiyon işleminin meydana geldiği yakıt ve oksitleyici arasındaki ara yüzde gerçekleşir. Difüzyon alevine en basit örnek, mum alevidir. Bazı yakıcılarda her iki alev de farklı seviyelerde yer alabilir. Difüzyon terimi, kimyasal türlerin moleküler difüzyonunu ifade eder (yakıt molekülleri bir taraftan aleve doğru yayılırken, diğer taraftan oksitleyici molekülleri aleve doğru yayılırlar) [52, 56].

Şekil 2.2’de her iki tür alev görselleştirilmiştir. Bu örnekte yakıt, yakıt nozulundan gelmekte, hava ise ayarlanabilir bir hava alğından alınmakta ve yakıt ile karıştırılmaktadır. Brülör çıkışında hava yakıt karışımının oluşturduğu alev, ön karışım alevidir. Hava akış oranının ayarlanabildiği varsayılırsa, oluşan alev yakıt zengin veya fakir olur. Eğer karışım zengin ise ön karışım alevini geçen fazla yakıt veya yakıt kaynaklı ara türler ortamda bulunan oksijenle tepkimeye girer ve difüzyon alevi oluşur.



Şekil 2. 2. Bunsen alevi şeması [56].

Alev, akışın doğasına bağlı olarak laminar veya türbülanslı olarak da sınıflandırılır. Laminar akışta akım çizgileri belirgindir, türbülanslı akışta ise akım çizgileri yoktur ve akım özellikleri zamana bağlı olarak dalgalanır. Türbülanslı akışlar, akıştaki

kararsızlıklar viskoz etkiler sonucunda kontrol altına alınamadığında ve her bir noktada akış hızı dalgalandığında gerçekleşir. Akıştaki kararsızlıklar ve değişken akış özellikleri, türbülanslı akışların karakteristik özellikleridir. Türbülansın varlığı, hava yakıt karışma durumunu (makroskobik seviyede) iyileştirir fakat reaksiyonun gerçekleşmesi için karışma işleminin moleküler (mikroskobik) seviyede olması gerekir. Alev akışın doğasına bağlı olarak (hızına) subsonik ve süpersonik olarak da sınıflandırılır. Subsonik bir akışta, difüzyon işleminin moleküler çarpışma süreçleri baskındır ve reaksiyonların tamamlanması için yeterince zaman vardır. Subsonik alevler, günlük hayatta sıklıkla karşılaştığımız mum, pilot alevi vb. alevlerdir. Süpersonik yanmada yüksek akış hızı, konvektif taşınımın moleküler difüzyonu baskılamasını sağlar. Patlamalarda ve süpersonik uçuşlarda karşılaşırlar. Son olarak, hava yakıt karışımı aynı fazda ise (sıvı veya gaz) yanma işlemi homojen, aynı fazda değilse heterojen olarak adlandırılır [56].

2.1.2 Alev Yapısı

Bir alev bölgesi iki kısma ayrılır. Bunlar; ön ısıtma bölgesi (çok az ısı salınımı olur) ve reaksiyon bölgesidir (kimyasal enerjinin büyük bir kısmı salınır). Atmosferik basınçta alev oldukça incedir (mm seviyesinde). Reaksiyon bölgesini de iki kısma ayırmak mümkündür. Bunlar; çok hızlı kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği ince bölge ve yavaş kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği daha geniş bölgedir. Yakıt moleküllerinin parçalanması ve birçok ara türün oluşması, ince reaksiyon bölgesinde gerçekleşir. Bu bölgede bimoleküler reaksiyonlar baskındır. Atmosferik basınçta hızlı tepkimelerin gerçekleştiği bölge oldukça incedir (bir milimetreden daha küçüktür). Bu nedenle sıcaklık ve tür konsantrasyonu gradyanları çok büyüktür. Bu gradyanlar, alevin kendi kendine yayılmasını sağlar (ısı ve radikal türlerin reaksiyon bölgesinden ön ısıtma bölgesine difüzyonu ile). İkincil (yavaş) reaksiyon bölgesinde üçlü radikal rekombinasyon reaksiyonları baskındır. Bu reaksiyonlar, bimoleküler reaksiyonlardan daha yavaştır. Karbon monoksitin $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ reaksiyonu ile yanması bu bölgede olur. Bu ikincil reaksiyon bölgesinin kalınlığı birkaç milimetreye kadar uzayabilir (1 atm'de) [52].

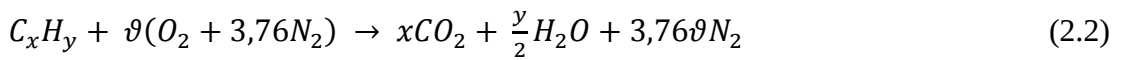
2.2. Yanma Termodinamiği

Zaman bağımlı birçok kimyasal tepkime içermekle beraber, yanma işleminin getirisi ve bir hava yakıt karışımından belirli şartlar altında alınacak enerji miktarı, termodinamik yasaları tarafından belirlenir. Stokiyometrik bir hava yakıt karışımı, teorik olarak bir

hidrokarbon yakıtı tamamen karbondioksit ve suya dönüştürecek kadar oksijen içeren bir karışım olarak ifade edilir. Eşdeğerlik oranı ise bir karışımın zengin, fakir veya stokiyometrik olduğunu belirtmek için kullanılır ve şu şekilde tanımlanır [57];

$$\varphi = \frac{(H/Y)_{teorik}}{(H/Y)_{gercek}} \quad (2.1)$$

H , havanın kütlesi; Y , yakıtın kütlesidir. Genel, stokiyometrik bir hidrokarbon yanma denklemi:



$$\vartheta = x + \frac{y}{4} \quad (2.3)$$

2.2.1 Reaksiyon Entalpisi

Reaksiyon veya yanma entalpisi, kimyasal reaksiyondan dolayı net entalpi değişimini ifade eder. Bu değer endotermik reaksiyonlar için pozitif, ekzotermik reaksiyonlar için negatiftir.

$$\Delta h_R = h_{ürün}(T_f) - h_{giren}(T_R) \quad (2.4)$$

T_f , alev sıcaklığı; T_R , tepkimeye giren maddelerin sıcaklığıdır [57].

Yukarıda da belirtildiği gibi, kimyasal bir reaksiyondan ne kadar enerji salınacağı reaksiyona giren maddelerin ve ürünlerin enerjilerinden belirlenir. Bu nedenle ürünlerin ve reaksiyon stokiyometrisinin hassas bir şekilde kimyasal analiz ile belirlenmesi gerekir [58]. Bir yanma işleminde kinetik ve potansiyel enerji değişimi ihmal edilir, sistem tarafından herhangi bir iş yapılmadığı varsayılırsa, salınan ısı Q :

$$Q = -\Delta h_R \quad (2.5)$$

Yukarıdaki denklem hem reaksiyona giren maddelerin hem de ürünlerin sıcaklıklarının ve o sıcaklıklardaki entalpi değerlerinin bilinmesini gerektirir. Kimyasal bir reaksiyonda ne kadar enerji absorbe edileceği ya da ne kadar enerji salınacağı her bir türün standart referans haldeki oluşum entalpisinden (H_{ol}^0) kolayca hesaplanabilir. Oluşum entalpisi, belirli bir haldeki maddenin kendi kimyasal bileşiminden ileri gelen entalpisidir.

Başlangıç noktası oluşturmak için tüm kararlı elementlerin (O_2 , N_2 , H_2 , N_2 , C vb.) $25\text{ }^\circ\text{C}$, 1 atm deki (standart referans hal - T_0) oluşum entalpileri sıfır kabul edilir [59]. Herhangi bir kimyasal reaksiyonun ısısı veya standart referans halde salınacak ısı miktarı:

$$\Delta H_{T_0} = \sum_i \text{ürün } n_i (\Delta H_{ol}^0)_{T_{0,i}} - \sum_j \text{giren } n_j (\Delta H_{ol}^0)_{T_{0,j}} = -Q \quad (2.6)$$

n_i ve n_j sırasıyla; reaksiyona giren maddelerin ve ürünlerin mol sayılarıdır.

Ürünlerin (T_2) ve reaksiyona giren maddelerin (T_0') sıcaklığı, standart referans değerden farklı olduğunda reaksiyon ısısı veya salınan ısı miktarı:

$$\Delta H = \sum_i \text{ürün } n_i \left[\{(H_{T_2}^0 - H_0^0) - (H_{T_0}^0 - H_0^0)\} + (\Delta H_{ol}^0)_{T_0} \right]_i - \sum_j \text{giren } n_j \left[\{(H_{T_0}^0 - H_0^0) - (H_{T_0}^0 - H_0^0)\} + (\Delta H_{ol}^0)_{T_0} \right]_j = -Q \quad (2.7)$$

denklemini ile hesaplanabilir ancak birçok sistemde reaksiyona giren maddelerin standart referans halde olduğu varsayılır [60]. Yakıcı gücünü hesaplamak için elde edilen sonuç, (Q) yakıt debisi ile çarpılır.

Yanma sonucu açığa çıkan ısı, sadece ürünlerin sıcaklığını yükseltmek için kullanılırsa ΔH ve Q sıfıra eşit olur. Bu durumda ürün sıcaklığı (T_2) adyabatik alev sıcaklığı olarak adlandırılır [57, 60] ve denklem 2.7 şu hale gelir:

$$\sum_i \text{ürün } n_i \left[\{(H_{T_2}^0 - H_0^0) - (H_{T_0}^0 - H_0^0)\} + (\Delta H_{ol}^0)_{T_0} \right]_i = \sum_j \text{giren } n_j \left[\{(H_{T_0}^0 - H_0^0) - (H_{T_0}^0 - H_0^0)\} + (\Delta H_{ol}^0)_{T_0} \right]_j \quad (2.8)$$

Ürünlerin sıcaklığı $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 'den düşükse, ürünler CO_2 , H_2O , N_2 ve O_2 gibi kararlı türlerdir ve miktarları kütle dengesi kurularak hesaplanabilir fakat birçok yanma sisteminde sıcaklıklar $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 'den çok yüksek olduğundan, kararlı türler ayrışmaya başlar. Ayrışma (çözünme) reaksiyonları endotermiktir. Bu nedenle alev sıcaklığı bir miktar düşer [60].

2.2.2 Kimyasal Denge

Bazı şartlar altında kimyasal reaksiyonlar tamamlanamayabilir ve bu durumda ürünlerin kompozisyonu stokiometrik eşitlikte gösterilenden farklı olur. Termodinamiğin ikinci kanunu, denge şartı için bir kriter oluşturur. Kimyasal dengenin sağlandığı nokta, verilen

bir basınç ve sıcaklıkta Gibbs fonksiyonunun (veya serbest enerji değişiminin) minimum (bir başka ifadeyle entropinin en yüksek) olduğu nokta olarak tanımlanır [58].

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.9)$$

G , Gibbs serbest enerjisi; S , entropidir.

Reaksiyona giren maddeler ve ürünler ideal gaz gibi davranırlarsa (birçok yanma sisteminde orta basınçlarda), Gibbs fonksiyonundaki değişim (T sıcaklığında) denge sabitine (K^0) bağlı olarak;

$$\Delta G_T^0 = -RT \ln K^0 \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir.

$$\nu_A A + \nu_B B + \dots = \nu_P P + \nu_Q Q + \dots \quad (2.11)$$

Eşitlik 2.11'de gösterilen reaksiyon için denge sabiti:

$$K^0 = \frac{\left(\frac{p_P}{p^0}\right)^{\nu_P} \left(\frac{p_Q}{p^0}\right)^{\nu_Q}}{\left(\frac{p_A}{p^0}\right)^{\nu_A} \left(\frac{p_B}{p^0}\right)^{\nu_B}} \quad (2.12)$$

p_i , i türünün kısmi basıncı; p^0 , standart basınç. Belirli bir sıcaklık aralığında ΔH ve ΔS değişmese bile, ΔG sıcaklık ile değişmelidir. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak denge sabiti;

$$\ln \left(\frac{K_2^0}{K_1^0} \right) = \frac{-\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (2.13)$$

şeklinde yazılabilir [58].

2.2.3 Reaksiyon Kinetiği

Bütün yanma prosesleri kimyasal reaksiyonlar sonucu salınan toplam enerji miktarına bağlıyken, sadece bazı tür alevler reaksiyon hızına bağlıdırlar. Örneğin; patlama dalgaları, difüzyon alevleri, damlacık yanması ve sıvı püskürtmeli roket motorları kimyasal kinetiklerden bağımsızken; ön karışım alevleri ve içten yanmalı motorlar reaksiyon kinetiklerine hayli bağımlıdırlar [58].

Bütün kimyasal reaksiyonlar belirli bir hızda gerçekleşirler ve sistemin şartlarına son derece bağlıdır. Bu şartların en önemlileri; reaksiyona giren maddelerin konsantrasyonları, sıcaklık ve radyasyon etkileri ve bir katalizör veya inhibitörün varlığıdır. Reaksiyon hızı, reaksiyona giren herhangi bir maddenin veya açığa çıkan herhangi bir ürünün konsantrasyonu bakımından, ilgili türün konsantrasyonunun azalma veya artma hızı olarak ifade edilebilir [60].

Denklem 2.11'deki tepkime için hız kanunu;

$$\frac{-1}{v_A} \frac{d[A]}{dt} = \frac{-1}{v_B} \frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{v_P} \frac{d[P]}{dt} = \frac{1}{v_Q} \frac{d[Q]}{dt} = k[A]^a[B]^b \quad (2.14)$$

k , oran sabiti; a ve b (tepkimeye giren maddelerin konsantrasyonlarına bağlı olarak) tepkime dereceleri; $(a + b)$ genel tepkime derecesidir. Her bir tepkime derecesi, reaksiyon hızının tür konsantrasyonlarına bağımlılığının ölçüsüdür [58]. Herhangi bir reaksiyonun sıcaklık bağımlılığı (Arrhenius formunda);

$$k = A \exp^{(-E/RT)} \quad (2.15)$$

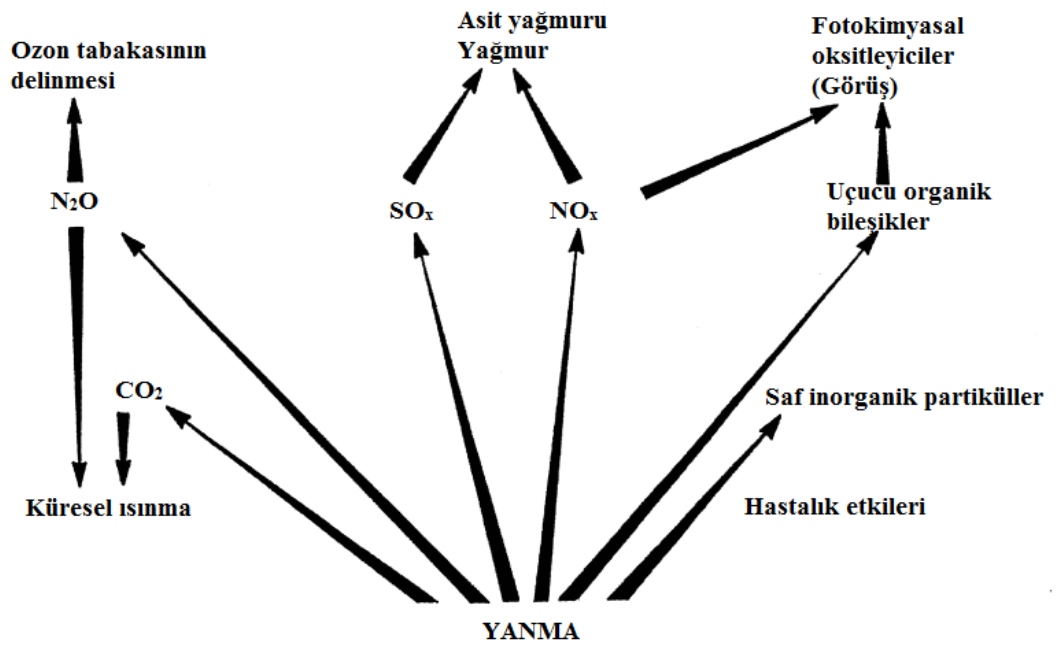
A , frekans faktörü; E , aktivasyon enerjisi; R evrensel gaz sabitidir. Her iki terim de sıcaklıktan bağımsızdır. A , bir moleküldeki kimyasal bağların yeniden düzenlenebildiği hız (titreşim frekansına bağlıdır) olarak tanımlanır [58].

2.3 Emisyonlar

İdeal bir yanma işlemi, yakıt ve oksijeni zararsız reaksiyon ürünlerine dönüştürür ancak pratikte birçok istenmeyen yan ürün oluşur. Bu yan ürünler, kirletici maddeler olarak adlandırılırlar [57]. Yanma sonucu oluşan kirletici maddelerin bir kısmı ve etkileri, Şekil 2.3'de görselleştirilmiştir.

Yanma sonu ürünlerinin (kirletici maddelerin) çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı emisyon kontrolü, modern yakıcı sistemleri dizaynında önemli bir faktördür. Burada bahsi geçen emisyonlar; partikül maddeler (kurum, kül, çeşitli aerosoller vb.), sülfür oksitler (SO_2 , SO_3), yanmamış veya kısmi yanmış hidrokarbonlar (aldehitler vb.), nitrojen oksitler (NO , NO_2), CO_2 ve N_2O gibi sera gazları ve karbon monoksittir [52, 61].

Hava kirliliği ile ilgili ilk düzenlemeler, endüstriyel süreçler ve sabit güç üretim tesislerinden olan görünür partikül madde emisyonları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunun sonucunda 1950 – 1980 yılları arasında, ABD’de partikül madde emisyonları büyük ölçüde azaltılmıştır [52]. 1940’lı yılların ortalarında fotokimyasal hava kirliliğinin ilk semptomları Los Angeles bölgesinde görülmüştür. Araştırmacılar, gün ışığının varlığında nitrojen oksitler (NO_x), karbon monoksit ve yanmamış hidrokarbonların daha önce karşılaşılmayan yeni bir tür sise neden olduğunu belirlemişler ve bu fotokimyasal sisin nedeninin otomobillerden yayılan egzoz emisyonları olduğunu saptamışlardır [58, 60]. Bu nedenle otomobillerde emisyon kontrolü, 1960’lı yıllarda Kaliforniya’da yasalaşmış ve 1963 yılında Federal Temiz Hava Kanunu’nda ulusal hava kalitesi standartları birçok kirlenici madde için belirlenmiştir [52].



Şekil 2. 3. Kirlenici maddelerin etkileri [62].

Birincil kirlenici maddeler (doğrudan kaynaktan yayılırlar – yanmamış hidrokarbonlar, NO , partiküller ve sülfür oksitler), atmosferde birçok reaksiyona girerek ikincil kirlenici maddeleri oluştururlar. İkincil kirlenici maddeler; NO_2 , O_3 , aldehitler, ketonlar, peroksiasil (PAN) ve alkali nitratlardır. Bazı kirlenici maddeler her iki kategoriye de girerler. Örneğin; NO_2 hem kara taşıtlarından doğrudan yayılır hem de atmosferde NO ’den fotokimyasal olarak oluşur [58, 60]. Birincil ve ikincil kirlenici maddeler çevreyi ve insan sağlığını birçok şekilde etkilerler (Şekil 2.3). Bu etkiler dört ana başlıkta sınıflandırılabilir:

Atmosferin özelliklerinin değişmesi: Atmosferde karbon temelli maddelerin, sülfatların, organik bileşiklerin ve nitrojen dioksitin varlığı görüşü azaltır [61]; sülfürik asit damlaları oluşturan SO_2 'nin yüksek konsantrasyonları sonucu sis oluşumu ve yağış miktarı artar, solar radyasyon azalır, sıcaklık ve rüzgar dağılımı değişir. Sera gazları, global iklim değişikliklerine neden olur [52].

Bitki örtüsünün zarar görmesi: Fototoksik SO_2 , PAN, C_2H_4 ve diğerleri bitki örtüsüne zarar verir; fototoksikler klorofili parçalar ve fotosentezi engellerler [52]. NO de bitki örtüsüne zarar verir [61]. SO_x ve NO_x emisyonları sonucunda oluşan asit yağmurları toprağı ve suyu etkiler [61].

Materyallerin kirlenmesi ve bozunmaya uğraması: Binalar, diğer yapılar ve toprak üzerinde biriken partikül maddeler sadece estetik kaliteyi azaltmaz aynı zamanda ek temizle maliyeti de getirirler. Asit ve alkalın partiküller (özellikle sülfür içerenler), korozyona (boya, elektrik bağlantıları, duvarlar vb.) neden olurlar [61]. Ozon ise plastik maddeleri aşırı derecede yıpratır [52].

Hastalıkların ve insan ölümlerinin artması: İnsanlar üzerinde araştırma yapmanın zorluğundan ve kontrol edilemeyen birçok değişkenden dolayı emisyonların insan sağlığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek zordur. Ancak, emisyonların astım ve solunumla ilgili hastalıkları tetiklediğı iyi bilinen bir gerçektir [63]. Akut ve kronik bronşitin varlığı, SO_2 ve partikül madde emisyonları ile ilişkilendirilebilir. Donora, Pensilvanya (1948), Londra (1952) ve New York (1966) hava kirliliğı vakaları birçok ölümlere ve diğer etkilere neden olmuştur. Bu vakalar, eş zamanlı yüksek derecede SO_2 ve partikül madde emisyonlarının sonucudur. Fotokimyasal sisteki ikincil hava kirleticileri göz bozukluklarına neden olur. Karbon temelli partiküller, adsorbe edilmiş kansorejen maddeler içerebilirler [52]. Karbon monoksit, kanın oksijen tutma kapasitesini azaltır ve ortamdaki yoğunluğuna bağlı olarak baş ağrısı, kusma, koma ve hatta ölüme sebebiyet verebilir [61].

Yukarıda açıklanan etkilerin tamamı atmosferin en alt tabakası olan troposfer tabakası ile ilgilidir. Süpersonik hava araçların uçtuğı irtifalardaki NO_x emisyonları, stratosferik ozon tabakasının aşağıdaki reaksiyonlar ile delinmesine neden olur. Reaksiyon mekanizması:



İlk reaksiyonda ozon, nitrojen oksit ile parçalanır. İkinci reaksiyonda ise nitrojen oksit tekrar oluşur ve ozon parçalanma adımı tekrar başlar. Stratosfer tabakasındaki ozonun yok olması zararlı ultraviyole ışınlarının yer yüzeyine ulaşmasına neden olur [61]. Ultraviyole ışınları, cilt kanserine ve gözün çeşitli kısımlarını etkileyerek katarakt ve körlüğe neden olur. Ayrıca bitki ve hayvan sağlığını da olumsuz yönde etkiler.

Katı ve sıvı yakıtlar ile kıyaslandığında gaz yakıtlar daha temiz yanarlar. Sıvı ve katı yakıtları (emisyon bakımından) kontrol etmek zordur. Katı yakıtlar, kül de oluştururlar. Enerji üretim tesislerinde kül, dip külü ve uçucu kül olmak üzere ikiye ayrılır. Kül, ağır metal içerdiğinden dolayı kirletici madde olarak kabul edilir. Sıvı ve gaz yakıtlar ise çok az kül oluştururlar [57]. Bütün yakıtlarda olduğu gibi, sentetik gaz yanmasında da NO_x , SO_2 , CO, uçucu organik bileşikler, partikül maddeler ve eser derecede diğer türler (cıva ve diğer metaller) gibi birçok kirletici madde oluşur. Açığa çıkan kirletici madde miktarı, sentetik gaz kompozisyonuna ve yakıcının işletme şartlarına bağlı olarak değişir [2]. En yaygın kirletici madde türleri ve oluşum adımları ilerleyen kısımlarında açıklanacaktır.

2.3.1 Nitrojen Oksitler

NO_x , yanma sistemlerinde önemli olan birçok nitrojen oksidi tanımlayan kolektif bir terimdir. Yanma proseslerinden yayılan esas nitrojen oksit, nitrik oksittir (NO - çevreye ve insan sağlığına etkisi çok azdır). Azot monoksit, esasen oksijen atomu konsantrasyonu ve sıcaklığın yüksek olduğu alev sonrası gazları içerisinde oluşur [58]. Daha sonra NO, atmosferde uçucu organik bileşenler de içeren fotokimyasal reaksiyonlarla NO_2 'ye dönüşür. Bu ikincil oksidasyon reaksiyonu, birincil NO oluşum reaksiyonundan oldukça yavaştır (gün mertebesinde) [2, 64]. Yanma sonu ürünlerinde NO_2 konsantrasyonu, NO'den daha düşüktür çünkü alev bölgesinde oluşan NO_2 'in büyük bir kısmı alev sonrası bölgede NO'ye dönüşür. Bu nedenle NO_2 , yanma işlemlerinde bir ara tür olarak değerlendirilir. Ayrıca, NO_2 en zehirli gazlardan biridir ve çok ciddi sağlık problemlerine neden olur [65]. N_2O , akışkan yataklı yakıcılar gibi düşük sıcaklıklarda çalışan yakıcılar dışındaki yakma sistemlerinden çok düşük miktarlarda yayılır. N_2O önemli bir sera gazıdır. Küresel ısınma potansiyeli CO'den 298 kat daha fazladır [2].

Nitrojen içermeyen yakıt yanmasında NO, üç farklı kimyasal mekanizma ile (havadaki N₂ ile) oluşur. Bu mekanizmalar; termal veya Zeldovich mekanizması, Fenimore veya ani mekanizma ve N₂O ara mekanizmasıdır [52, 56, 60, 61]. Yüksek miktarda H₂ ve düşük miktarlarda hidrokarbon içeren sentetik gaz yanmasında NO_x oluşumunda dördüncü bir mekanizma (NNH) baskındır. NNH, nitrojenin H atomu ile reaksiyonu sonucu oluşur [2].

2.3.1.1 Termal veya Zeldovich Mekanizması

Termal NO, atmosferik nitrojenin, alevin yüksek sıcaklık bölgelerinde ve alev sonrası gazlar içinde (termal NO oluşum hızı, yanma reaksiyonu hızlarından daha düşük olduğundan [61]) oksitlenmesi sonucu oluşur. Termal NO oluşumu endotermiktir ve 1850 K'in üzerindeki sıcaklıklarda (ilk reaksiyonun aktivasyon enerjisi, N₂ molekülündeki güçlü üçlü bağdan dolayı çok yüksek olduğundan [66]) çok yüksek hızlarda gerçekleşir [61]. Bu nedenle termal NO mekanizması olarak adlandırılır ve oluşan NO miktarı sıcaklık ile üstel olarak doğru orantılıdır.

Zeldovich mekanizması:

O₂ = 2O dengesi, yanma odası içerisinde kurulduktan sonra;



reaksiyonları gerçekleşir. Termal NO oluşumuna aşağıdaki reaksiyonun da katkısı vardır [2, 52, 57, 58, 61, 65, 66].



Reaksiyon 2.20, sadece stokiyometri yakınındaki ve zengin karışımlar için önemlidir çünkü bu tür karışımlarda alev sıcaklığı, önemli miktarlarda NO oluşacak kadar uzun süre yüksek tutulur [61].

NO oluşumu, stokiyometrik hava/yakıt karışımının yakıt fakir kısmında maksimum değer alır. Bu durum, yakıt ve nitrojen arasındaki rekabetten (kullanılabilir oksijen için)

kaynaklanır. Belirli belirsiz zengin karışımlarda yanma sıcaklığı daha yüksek olmasına rağmen kullanılabilir oksijen yakıt tarafından tüketilir [61].

NO oluşum hızı (reaksiyon 2.18-2.20'ye göre):

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_1[O][N_2] + k_2[N][O_2] + k_3[N][OH] \quad (2.21)$$

çünkü

$$\frac{d[N]}{dt} = k_1[O][N_2] - k_2[N][O_2] - k_3[N][OH] \quad (2.22)$$

ve nitrojen atomlarının yarı kararlı halde oldukları varsayılabilir (reaksiyon 2.19 ve 2.20'nin tepkime hızı yüksek). Örneğin; $\frac{d[N]}{dt} \cong 0$ ise, NO oluşum hızı;

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_1[O][N_2] \quad (2.23)$$

Böylece NO oluşumu k_1 , $[O]$ ve $[N_2]$ azaltılarak minimize edilebilir [66]. Bu eşitliğin arkasında yatan mantık: “NO kimyası, yanma kimyasından çok daha yavaştır. Böylece, O ve OH atom konsantrasyonlarının denge haline gelmeleri için yeterince vakit vardır.” [52]. Oksijen atomu konsantrasyonu, termodinamik veri kullanılarak elde edilebilir ancak görece düşük basınçlarda yanlış sonuçlar verir. Oksijen atomu konsantrasyonu, kısmi denge kabulü ile (hidrojenin yanma tepkimesinden [66]);

$$[O] = \frac{k_{H+O_2} \cdot k_{OH+H_2} \cdot [O_2][H_2]}{k_{OH+O} \cdot k_{H+H_2O} \cdot [H_2O]} \quad (2.24)$$

hesaplanabilir. Oksijen atomu konsantrasyonu; O_2 , H_2 ve H_2O konsantrasyonlarından hesaplanabilir. O_2 , H_2 ve H_2O kararlı türler olduklarından, konsantrasyonları kolayca ölçülebilir veya tahmin edilebilir. Kısmi denge kabulü, 1700 K'in altındaki sıcaklıklarda geçerli değildir. Bu kısıtlama, NO oluşumu açısından bir değişiklik yaratmaz çünkü k_1 belirtilen sıcaklık değerinin altında anlamsızdır [66].

Ön karışimsız sistemlerde zaman, sıcaklık ve kompozisyon, NO_x emisyonlarını belirleyen en önemli parametrelerdir. Ancak, ön karışimsız sistemlerde kompozisyon akış içerisinde noktadan noktaya değişir ve akışkanın karışma durumu tarafından kontrol edilir. Aynı şekilde sıcaklık dağılımı da kompozisyon dağılımı ile eşleştirilebilir. Bu durum, ön

karışimsız sistemlerde kirletici madde oluşumunu belirlemek için çok karmaşık yaklaşımlar gerektirir. Bu nedenle ön karışimsız sistemlerde “Termal NO, eş zamanlı olarak yüksek sıcaklıklara, yüksek O ve OH atomları konsantrasyonlarına sahip alev bölgelerinde ve stokiyometri yakınında oluşur.” kabulü yapılır. Bu bölgeler ince, laminar benzeri alev bölgeleri veya alev ucu yakınındaki geniş bölgeler olabilirler. Bu bölgelerdeki detaylı sıcaklık ve kompozisyon dağılımları; akışkan mekaniği, kimyasal-kinetik ve termal etkiler tarafından belirlenir [52].

2.3.1.2 Ani veya Fenimore Mekanizması

Yüksek sıcaklıklı yakma sistemlerinde termal mekanizma geniş bir eşdeğerlik oranı aralığında etkili olurken, Fenimore mekanizması zengin karışımlarda etkili olmaktadır. Fenimore mekanizması, termal mekanizmaya kıyasla daha az sıcaklık bağımlıdır ve daha hızlıdır. Bu mekanizma hidrokarbonların yanma kimyaları ile çok yakından bağlantılıdır. Fenimore, bir miktar NO’nin ön karışimli laminar alev bölgesinde (termal NO oluşumu için yeterince vakit yokken) hızlıca oluştuğunu tespit etmiş ve bu hızlıca oluşan NO’ye ani NO adını vermiştir [52, 57]. Ani NO oluşumunu, hidrokarbon radikalleri ile moleküler nitrojen arasındaki tepkimeler başlatır. Bu tepkimeler neticesinde aminler ve siyano bileşikler oluşur. Aminler ve siyano bileşikler daha sonra, NO oluşturacak ara türlere dönüşürler. CH (alev önünde oluşan ara bir türdür [66]) oluşum adımları ihmal edilirse, Fenimore mekanizması:



Yaklaşık olarak 1.2’den küçük eşdeğerlik oranları için hidrojen siyanidin NO’ye dönüşümü:



1.2'den daha büyük eşdeğerlik oranları için diğer NO oluşum mekanizmaları devreye girer ve kimyasal mekanizma çok daha karmaşık hale gelir [52].

2.3.1.3 N₂O Ara Mekanizması

N₂O ara mekanizması, yakıt fakir eşdeğerlik oranlarında, yüksek basınç (üçlü reaksiyondan dolayı [66]) ve düşük sıcaklıklarda etkili olmaktadır [60] çünkü fakir şartlar CH oluşumunu baskılayarak Fenimore mekanizması ile daha az NO oluşumuna, düşük sıcaklık şartları ise termal mekanizmayı baskılayarak daha az termal NO oluşumuna neden olur [66]. Ayrıca bu mekanizma, toplam NO oluşum miktarı görece düşük olduğunda önemlidir [60]. O atomlarının moleküler nitrojene saldırımları bakımından bu mekanizma, termal NO mekanizması ile benzerdir. Ancak, üçüncü bir molekülün “M” varlığında bu reaksiyon sonucu N₂O oluşur ve N₂O ara mekanizması başlamış olur [66].



Oluşan N₂O daha sonra, esasen



reaksiyonu ile NO'ye dönüşür.



reaksiyonları da NO oluşumunda etkilidirler [61].

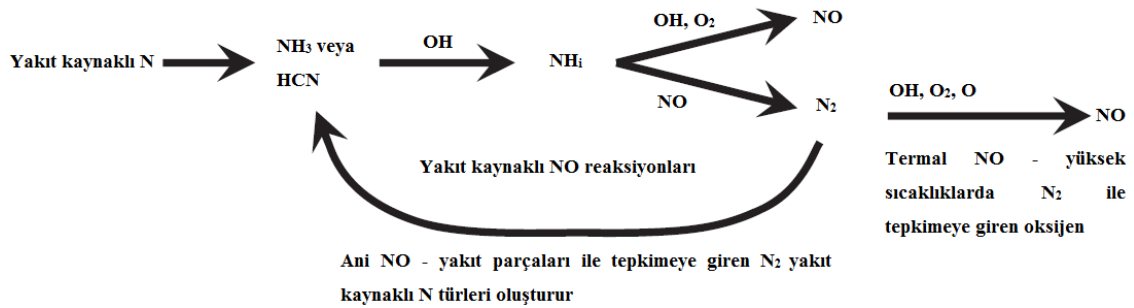
2.3.1.4 NNH Mekanizması

Daha önce belirtildiği gibi NO, NNH radikalleri vasıtası ile de oluşabilir [60];



2.3.1.5 Yakıt Bağlı Nitrojen Mekanizması

Kalın petrol yağı ve kömür, önemli miktarlarda organik nitrojen içerir ve yakıt bağlı nitrojen düşük sıcaklıklarda bile (1000 °C civarı) NO'ye dönüşebilir [65]. Bağlı nitrojen bileşikleri içeren yakıtların yanması sırasında nitrojen bileşikleri yanma bölgesine girmeden önce termal bozunmaya uğrarlar. Bu nedenle NO oluşum öncüleri, düşük molekül ağırlıklı nitrojen içeren bileşikler (Şekil 2.4) veya radikaller (NH_3 , NH_2 , NH , HCN , CN , vb.) olur [60]. Daha sonra, HCN ve NH_3 (birincil olarak yayılan türlerdir [2]) ani NO oluşum adımlarını izleyerek NO'ye dönüşür [52].



Şekil 2. 4. Basitleştirilmiş yakıt kaynaklı NO oluşum mekanizması [2].

Nitrojen içeren bileşiklerin NH_3 ve HCN 'e dönüşümü oldukça hızlı olduğundan yakıt bağlı NO oluşumunda reaksiyon hızını kısıtlayan reaksiyonlar, N atomu ile olan reaksiyonlardır [66].



2.3.2 Sülfür Oksitler

Yanma işlemlerinde sülfür oksitler, yakıttaki sülfür bileşiklerinin yakma havası ile reaksiyonu sonucu oluşurlar. Yanma sonucu oluşan sülfür oksitler, esasen SO_2 ve SO_3 'tür (ikisi birlikte SO_x olarak ifade edilir). Sülfür oksitler, zehirli ve aşındırıcıdır ve atmosferde sülfürik asit oluşumuna neden olurlar. Yakıt içeriğinde bulunan sülfürün nerdeyse tamamı oksitlendiğinden SO_x emisyonları, ya yakıtta bulunan sülfür bileşikleri ya da yanma sonu ürünlerindeki SO_x kaldırılarak kontrol edilebilir [52, 61]. Yakıttaki sülfür, katalitik hidrodesülfürizasyon teknikleri ile kaldırılabilir ancak bu işlemin maliyeti çok yüksektir [60]. Baca gazlarından SO_x 'i kaldırmak için kullanılan en yaygın metot,

SO₂'yi kireçtaşı (CaCO₃) veya kireç (CaO) ile tepkimeye sokmaktır. Tablo 2.2'de çeşitli yakıtların tahmini SO_x içerikleri görülmektedir. Kömür ve atık yağlarda sülfür içeriği yüksek, kurşunsuz benzinde ise çok düşüktür [61].

Yanma sonu gazlarında SO₃, denge konsantrasyonlarından genellikle daha yüksek miktarlarda bulunsa da (bunun nedeni, SO₃'i, SO₂ ve O₂'e indirgeyecek homojen reaksiyonların yavaş olmasıdır [60]) SO₂ miktarının sadece küçük bir yüzdesidir. Egzoz gazı akışında SO₃ ve H₂O'nun eş zamanlı varlığı sonucunda SO₃ ve H₂O hızlıca tepkimeye girerek sülfürik asit (SO₃ + H₂O → H₂SO₄) oluşturur.

Tablo 2. 2. Çeşitli yakıtların sülfür içerikleri [61].

Yakıt	Aralık
Ağırlık %	%
Kömür	≤ 10
Ağır atık yağ	0,5 - 4
Harmanlanmış atıklar ve ham petrol	0,2 – 3
Dizel yakıt (No. 2)	0,1 – 0,8
Kurşunsuz benzin	0,015 – 0,06

SO₂, gaz fazı reaksiyonlarında veya bir partikül (veya damlacık) üzerine absorbe edildikten sonra öncelikli olarak OH radikalleri tarafından oksitlenir. Suyla olan sonraki tepkimeler sonucu sülfürik asit oluşur. SO₂ reaksiyon mekanizmaları, ortam şartları tarafından kontrol edilir. Kış aylarında fotokimyasal reaksiyonlar çok yavaştır. Sülfür emisyonları kuru çökeltme işlemi ile kontrol edilir. Yaz aylarında ise SO₂, aşağıdaki tepkimelerle oksitlenir.



2 ve 3. tepkimelerde (2.40-41) oluşan SO₃, hızlıca su ile tepkimeye girerek H₂SO₄ oluşturur. Hava sıcaklığı 0 °C'ye yakın ve bağıl nem yüksek ise partiküller tarafından absorbe edilen SO₂, ağır bronşiyal tahrişe neden olan dumanlı sis oluşumuna yol açar [52, 58].

Sentetik gazlarda birincil sülfür kaynağı, hidrojen sülfürdür (H_2S). Sülfür zengin sentetik gazlarda sülfür konsantrasyonu %2'yi geçebilir. Sentetik gazların bileşiminde bulunabilen diğer sülfür bileşikleri; karbonil sülfür, merkaptan, dimetil sülfür, dimetil disülfür ve karbon disülfürdür [2]. H_2S oksidasyonu (düşük sıcaklık) reaksiyon mekanizması [60]:



Açığa çıkan türlerin sonraki reaksiyonları sonucu yanma şartları ve ortamda bulunan türlere bağlı olarak SO_2 ve SO_3 oluşur.

2.3.3 Karbon Monoksit

Yakıt zengin yanma proseslerinde, CO_2 oksidasyonunu tamamlamak (yanmanın son aşaması) için yeterli oksijen azlığından dolayı büyük miktarlarda CO salınımı olur [58]. Bu nedenle birçok yakma cihazında, normal çalışma şartlarında zengin karışımlardan kaçınılır [52, 61]. Ayrıca, stokiyometrik veya belirli belirsiz fakir karışımlarda CO_2 çözünmesinden dolayı önemli miktarlarda CO oluşur. Pratikte, CO emisyonları denge hesaplamalarından tahmin edilenden değerlerden daha yüksektirler ve yanma hızı ve görece maksimum sıcaklık değerlerinin düşük olduğu düşük güç şartlarında en yüksek değeri alırlar. Yakıtın eksik yanmasından dolayı açığa çıkan CO emisyonlarının çoğu, aşağıdaki gerekçelerin bir veya birkaçından kaynaklanır [61].

- Çok düşük eşdeğerlik oranlı yakıt/hava karışımlarından veya yetersiz kalma zamanından kaynaklanan uygun olmayan yanma hızları,
- Yakıt ve havanın uygun olmayan karışıma durumu, yakıt/hava oranının yanma işlemini desteklemeyecek kadar düşük olduğu veya çok fazla CO salınımına neden olacak aşırı zengin bölgeler oluşturur.

- Alev sonu ürünlerinin (radikal türlerin) soğuk bir yüzey tarafından söndürülmesi (ısı transferi, reaksiyon bölgesinin soğuması ve radikal yıkımı süreçleri alevi söndürür [61]).

Karbon monoksitin en dikkate değer tehlikesi renksiz, kokusuz ve tatsız bir gaz olmasıdır. Yanıcıdır ve havadan çok az hafiftir. Daha önce de belirtildiği gibi kanda oksijen taşınmasını engeller ve hemoglobin ile birleşerek karboksihemoglobin oluşturur [57].

2.3.4 Yanmamış Hidrokarbonlar

Bir yanma işleminden mümkün olan en yüksek ısı enerjisini elde etmek için yakıtın tamamının oksitlenmesi gerekir. Türbülans yoğunluğu çok yüksek olduğunda (alev önünde yüksek şekil değiştirme hızı, alev sönmesine neden olur [66]), hava/yakıt karışımı çok fakir olduğunda veya yakma ortamı soğuk yüzeylerle çevrelendiğinde (bu durumda yüzeyde ince bir film tabakası şeklinde yanmamış yakıt hava karışımı kalır ve bu ince film tabakası sonraki difüzyon, konveksiyon ve oksidasyon süreçlerine bağlı olarak yanmamış hidrokarbon emisyonlarına katkıda bulunur [52]) yakıtın tamamı oksitlenmez ve kısmi yanma ürünleri dışarı atılır. Bu kısmi yanma ürünleri; yakıt zerrelere (yanmamış hidrokarbon emisyonlarının sadece üçte biri yakıt molekülleridir [52]), dekompozisyon ürünleri (yakıt pirolizleri) veya alevde oluşan türlerdir [57].

Uçucu organik hidrokarbonlar, bunların radikalleri ve polisiklik aromatik hidrokarbonlar (zengin karışımlarda oluşurlar ve kurum oluşumu öncüleridirler [66]) da eksik yanma ürünleridir. Uçucu organik bileşiklerin oluşumu ve kontrolü yakıt kompozisyonuna bağlıdır (hidrokarbon içermeyen yakıtlar önemli miktarlarda uçucu organik bileşikler oluşturmazlar) [2]. Katı yanmasında uçucu kül, yanmamış yakıtın bir kısmını beraberinde götürür [57]. Yanmamış hidrokarbon emisyonları, tamamlanamayan alev yayılmasından da kaynaklanabilir. Bu durum, tutuşabilirlik limitleri yakınlarındaki fakir veya seyreltilmiş karışımlarda gözlemlenir [52].

Atmosferde yanmamış hidrokarbonlar dumanlı sis oluşumuna neden olurlar ve daha sonra CO₂ ve H₂O'e oksitlenirler. Kapalı ortamlara salınan yanmamış hidrokarbonlar oksijeni ortamdan uzaklaştırarak boğulmaya sebep olurlar [57]. Yanmamış hidrokarbonlara ek olarak, kısmi yanmış türler ön karışımsız yanma sistemlerinden salınırlar. Bu türler

(aldehitler, ketonlar vb.) fotokimyasal sis içerisinde oldukça reaktiflerdir. Göz irritasyonuna ve kötü kokuya sebep olurlar [52].

2.3.5 Karbondioksit

Ortamda yeterli miktarda hava olur, hava ve yakıt moleküler seviyede karışırsa yakıtta bulunan karbonun tamamı karbondioksite dönüşür. Hidrokarbonların oksitlenmesi basitçe iki adımda incelenebilir. İlk adımda yakıt molekülleri CO'e parçalanırlar, ikinci adımda ise CO oksitlenerek CO₂ oluşturur. Eğer ortamda H₂ içeren türler yoksa (az miktarda H₂O ve H₂ bile oksidasyon oranını büyük ölçüde artırır) CO oksitlenmesinin yavaş bir şekilde gerçekleştiği iyi bilinen bir gerçektir. Hidroksil radikalleri ile CO oksitlenmesi, O₂ ve O ile CO oksitlenmesinden çok daha hızlıdır [2, 52].

Düşük konsantrasyonlarda hidrojen içeren türlerin varlığı CO-O₂ kinetiklerini katalize eder. H₂O ile katalize edilen CO oksidasyon reaksiyonları [60]:



İlk reaksiyon yavaştır ve CO₂ oluşumuna önemli bir katkısı olmaz ancak diğer reaksiyonları başlatır. Eğer katalizör H₂O yerine H₂ ise aşağıdaki iki adım da az önceki reaksiyonlara eklenir [60].



Sentetik gaz yanmasında CO₂ emisyonu CO, hidrokarbonlar ve CO₂'den kaynaklanır. Ayrıca, kıvılcım ateşlemeli motorlarda motor yağının dekompozisyonu da CO₂ emisyonlarını önemli ölçüde artırır. Açığa çıkan CO₂ kütlesi;

$$\text{kg CO}_2 \text{ her bir Nm}^3 (0^\circ\text{C}) \text{ sentetik gaz için} = 1,963 \sum (y_i n_{C,i}) \quad (2.52)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. y_i , sentetik gaz bileşeninin mol kesri; $n_{C,i}$, gaz bileşeninin karbon atomu sayısıdır [2].

2.3.6 Partikül Maddeler

Yanma ve çevre bilimi bakımından partikül madde terimi, sıvı veya katı partiküllerden oluşan atmosferdeki aerosollerini ifade eder. Partikül maddelerin kompozisyonu kaynağına bağlı olarak değişir. Tipik partikül madde bileşenleri: inorganik oksitler, kloridler (tuz), sülfatlar, nitratlar, organik karbon, inorganik karbon (siyah karbon) ve biyolojik oluşumlardır (bakteri, polen, sporlar veya virüsler) [57]. Ön karışımli yakıcılarda partikül madde emisyonları sadece zengin şartlarda (kurum) ve yakıt katkılarından dolayı oluşur. Kömürün içeriğinde bulunan mineral maddeler sonucu oluşan kül dışında, ön karışimsız yanma işlemlerinde oluşan birincil partikül madde kurumdur. Kurum oluşumu, birçok difüzyon alevinin özünde olan bir özelliktir. Difüzyon alevinde kurum zengin bölgelerde oluşur ve alevden kurum yayılıp yayılmama durumu, kurum oluşumu ve kurum oksidasyonu arasındaki rekabete bağlıdır. Kurum oluşumunu minimize etmek için oksidasyondan önce oluşan kurum miktarı azaltılabilir ve/veya oksidasyon hızı artırılabilir [52]. Kurum, katı halde yayılan yanmamış karbon partikülleridir (yanmamış hidrokarbon sıvı ve gaz türleri ifade eder.) [57].

Sentetik gazlardaki partikül maddeler kaynağına bağlı olarak üç geniş kategoriye ayrılır. Bunlar; yakıttaki inorganik materyaller (yoğuşmuş olarak veya buhar fazında salınıp daha sonra yoğuşurlar), akışkan yataklı gazlaştırmıcılardan tasfiye olan yatak materyalleri ve yoğuşarak katran oluşturan poliaromatik hidrokarbon türleridir [2].

Partikül maddelerin daha önce bahsedilen bitki ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerine ilaveten olumlu etkileri de vardır. Örneğin; birçok endüstriyel fırında karbon partiküller, alevin ışınsal gücünü artırır ve daha iyi ısı transferi sağlar, bazı difüzyon alevlerinde karbon partikülleri bilerek oluşturulur ve alev sonrası bölgede ek yakma havası ile emisyon standartlarını sağlamak için yakılır [60].

3. BÖLÜM

DENEY SİSTEMİ

3.1 Gaz Kompozisyonlarının ve Yakıcının Termal Gücünün Belirlenmesi

Sentetik gazların bileşimi, gazlaştırma işlemi sırasındaki basınç ve sıcaklığa, reaktör tipine, sentetik gaz elde etmek için kullanılan karbon içeren hammaddenin (biokütle, kömür, plastik veya kentsel atıklar) bileşimine ve gazlaştırıcı tipine (hava, su buharı, saf oksijen vb.) bağlı olarak değişir. Ayrıca, geleneksel yakıtlar ile kıyaslandığında sentetik gazların ısı değerleri ve Wobbe indeksleri daha düşüktür. Teknik açıdan bu iki durum, bir takım problemler oluşturur (alev kararsızlığı, düşük verim, güvenilirlik vb.) [67, 68].

Bu bağlamda, hem brülör tasarımı için hem de deneysel çalışmalar sırasında test edilecek sentetik gaz karışımları belirlenirken PSI, Tampa, El Dorado, Pernis, Sierra Pacific, ILVA, Schwarze Pumpe, Sarlux, Fife, Exxon Singapore, Motiva Delaware, PIEMSA ve Tonghua istasyonlarından elde edilen gazların bileşimleri incelenmiş ve bu gaz karışımlarının H_2/CO oranları göz önünde bulundurularak yüksek, orta ve düşük ısı değerli gaz karışımları belirlenmiştir [69].

Gaz bileşimlerinde nitrojen varlığı ihmal edilerek Tablo 3.1’de yer alan gaz karışımları, bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek olan deneylerde kullanılmak üzere belirlenmiştir. Tüm gaz karışımlarına, hacimce H_2/CO oranları üç farklı değerde (0,5, 1,0 ve 2,0) sabit tutularak, %0-20 aralığında (%5 artırılarak) CO_2 ilavesi yapılmıştır. Sentetik gazların yaygın bir bileşeni olan metanı temsil etmesi ve geniş bir eşdeğerlik oranı aralığında $H_2/CO/CO_2$ karışımları için kararlı bir alev elde edilemediğinden, her bir gaz karışımına belirli bir miktar CNG ilavesi yapılmıştır. CNG bileşimi, Tablo EK 3.1’de bulunabilir.

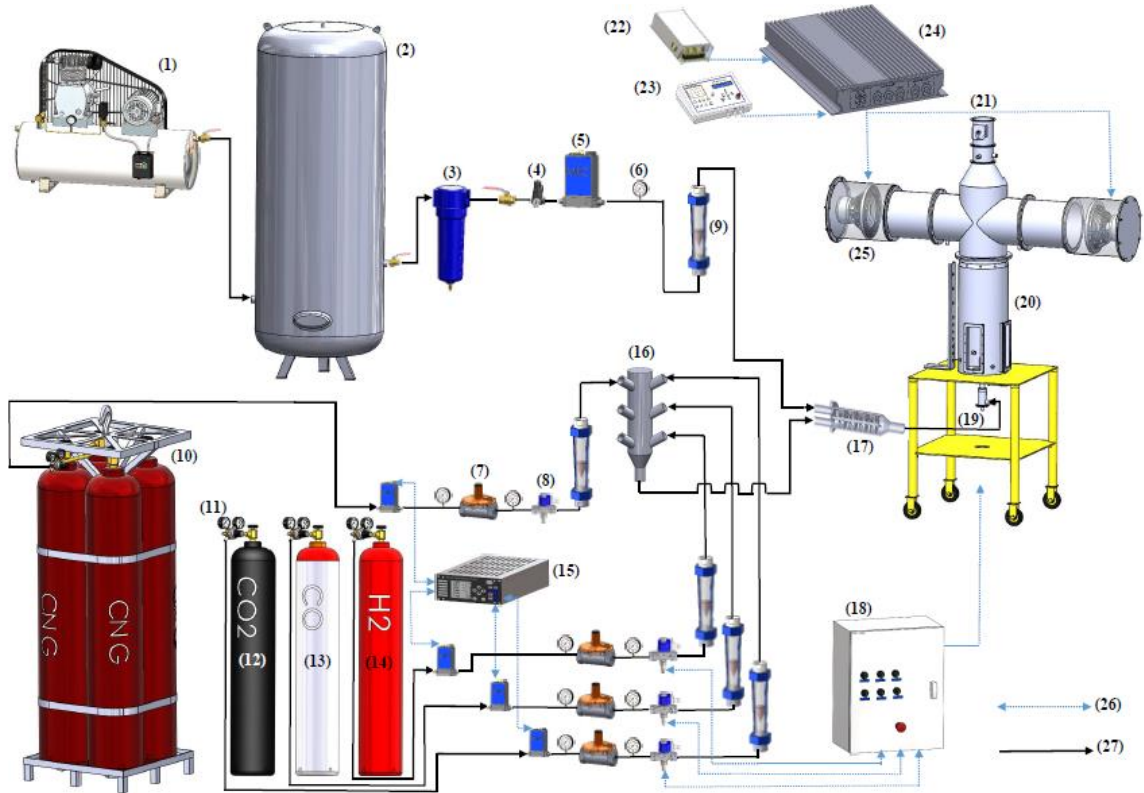
Yakıcının termal gücü, ihtiyaç duyulan yakıt ve bu ihtiyaca bağlı tam yanma için gereken minimum hava miktarını belirler. Sınırlı olan imkânlarla çok fazla sayıda deney yapılması amaçlandığından ve yüksek yakıt/hava akış oranları çok daha pahalı ve karmaşık akış kontrol elemanları gerektirdiğinden, yakıcıya olan termal giriş yakıt bileşiminden bağımsız olarak 3 kW değerinde sabit tutulmuştur. Bu termal güce uygun yakıt akış oranları, yanma işleminin farklı hava/yakıt oranlarında gerçekleştiği varsayılarak Denklem 2.6'dan hesaplanmıştır.

Tablo 3. 1. Belirlenen gaz karışımları ve bazı özellikleri (1 atm, 273 K).

Gaz Karışımı (Hacimce)	İsimlendirme (Karışım Yakıt)	Wobbe İndeksi (MJ/m³)	Isıl Değeri (kJ/kg)	H ₂ /CO
%20CNG-%26,7H ₂ -%53,3CO	KY1	21,78	20144,80	0,5
%20CNG-%25H ₂ -%50CO-%05CO ₂	KY2	20,35	18211,66	
%20CNG-%23,4H ₂ -%46,6CO-%10CO ₂	KY3	19,04	16524,02	
%20CNG-%21,7H ₂ -%43,3CO-%15CO ₂	KY4	17,81	15004,54	
%20CNG-%20H ₂ -%40CO-%20CO ₂	KY5	16,66	13645,00	
%20CNG-%40H ₂ -%40CO	KY6	24,17	24367,50	1,0
%20CNG-%37,5H ₂ -%37,5CO-%05CO ₂	KY7	22,28	21457,40	
%20CNG-%35H ₂ -%35CO-%10CO ₂	KY8	20,60	19013,56	
%20CNG-%32,5H ₂ -%32,5CO-%15CO ₂	KY9	19,07	16932,24	
%20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂	KY10	17,68	15138,33	
%20CNG-%53,3H ₂ -%26,7CO	KY11	27,53	31077,36	2,0
%20CNG-%50H ₂ -%25CO-%05CO ₂	KY12	24,87	26277,57	
%20CNG-%46,6H ₂ -%23,4CO-%10CO ₂	KY13	22,59	22498,66	
%20CNG-%43,3H ₂ -%21,7CO-%15CO ₂	KY14	20,63	19506,56	
%20CNG-%40H ₂ -%20CO-%20CO ₂	KY15	18,91	17053,70	
%40CNG-%10H ₂ -%50CO	KY16	26,91	23621,41	0,2
%40CNG-%30H ₂ -%30CO	KY17	31,18	31062,79	1,0
%40CNG-%40H ₂ -%20CO	KY18	34,24	37050,78	2,0
%100CNG	-	51,72	50144,38	-
%80CNG-%20H ₂	KY19	49,22	52288,79	-

3.2. Deney Sistemi

Deneyler sırasında kullanılacak olan yakıt kompozisyonları, bu yakıtların özellikleri ve yakıcının termal gücü belirlendikten sonra tüm yakma sisteminin tasarımı tamamlanmış ve imalat aşamasına geçilmiştir. Şekil 3.1’de tüm deney sisteminin şematik görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 1. Deney sistemi şeması.

Deney sisteminde yer alan ekipmanlar:

1. Hava Kompresörü	10. CNG Tankı	19. Brülör
2. Harici Hava Tankı	11. Basınç Regülatörü	20. Yanma Odası
3. Filtre (Su buharı ve yağ temizliği için)	12. CO ₂ Tankı	21. Baca
4. Basınç Regülatörü	13. CO Tankı	22. Güç Kaynağı
5. Elektronik Debi Ölçer	14. H ₂ Tankı	23. Sinyal Üretici
6. Manometre	15. Kontrol İstasyonu	24. Amplifikatör
7. Basınç Regülatörü	16. Gaz Kolektörü	25. Hoparlör
8. Solenoid Valf	17. Hava/Yakıt Ön Karıştırıcısı	26. Elektrik Bağlantıları
9. Yüzer Tip Debi Ölçer	18. Kontrol Paneli	27. Gaz Temin Hatları

Yukarıdaki tüm sistem ve ekipmanlar deney sistemini oluşturmaktadır. Bu sistem, sentetik gaz yakıtların yanma karakteristiklerini ve alev davranışlarını (statik ve dinamik) incelemek için kullanılmıştır. İlerleyen bölümlerde, kullanılan ölçüm ekipmanları ve bu ekipmanların özellikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.3. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Ekipmanları

3.3.1 Kendinden Oransal Vanalı Termal Debi Ölçerler ve Kontrol İstasyonu

Gaz karışımlarındaki her bir gazın miktarının hassas bir şekilde ayarlanabilmesi için her bir gaz (3 adet-MKS Type GE50A) ve hava hattına (1 adet-MKS Type 1579-Şekil 3.2) bağlanmıştır. Debi ölçerlerin seçiminde, yakıcı gücü ve eşdeğerlik oranına göre hesaplanan yakıt ve hava akış oranları göz önünde bulundurulmuştur. Gaz hatlarında ve hava hattında kullanılan debi ölçerlerin ölçüm aralıkları (N_2 eşdeğeri) sırasıyla; 5-30000 SCCM ve 6-300 SLM'dir. Bütün debi ölçerler kullanılacak gaza göre (CO , H_2 , CO_2 ve hava) kalibre edilmişlerdir.



Şekil 3. 2. Kendinden oransal vanalı termal debi ölçer (MKS Type 1579).

Debi ölçerlerin kontrolü için 6 kanallı bir kontrol istasyonu (MKS Series 946-Şekil 3.3) temin edilmiştir. Arzu edilen gaz miktarı, uygun gaz düzeltme faktörü kullanılarak, kontrol istasyonuna manuel olarak girilmiş ve kontrol istasyonu, bağlı olduğu birbirinden bağımsız 4 (maksimum) farklı debi ölçerden arzu edilen miktarda akışkan geçişini temin etmiştir.



Şekil 3. 3. Kontrol istasyonu.

3.3.2 Baca Gazı Analizörü

Emisyon ölçümleri taşınabilir (NOVA Plus RCU-Şekil 3.4) bir baca gazı analizörü ile yapılmıştır. Analizör; O₂, CO, NO, NO₂, SO₂ ve CO₂ emisyonlarını sırasıyla; %0-21 ±0,2, 0-4000 ±10 ppm (istenirse 10000 ppm'e kadar), 0-1000 ±5 ppm, 0-200 ±5 ppm, 0-2000 ±10 ppm, %0-40 ±0,3 aralığında hassas bir şekilde ölçebilmektedir. Ayrıca, bu cihaz ile sıcaklık ölçümü de yapılabilmektedir. Cihaz, tüm fonksiyonlarının uzaktan kumanda ile kontrolüne, ölçülen tüm değerlerin depolanabilmesine ve aktarılmasına da imkân sağlamaktadır.



Şekil 3. 4. Baca gazı analizörü.

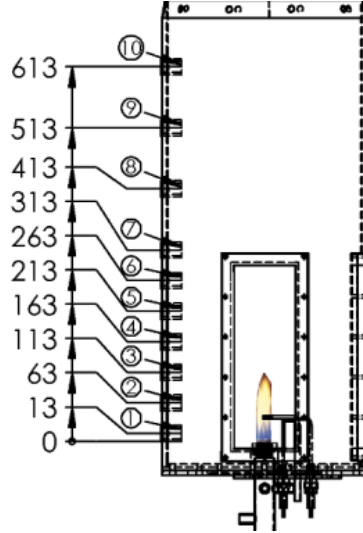
3.3.3 Termoçiftler

Radyal ve eksenel sıcaklık ölçümleri için kullanılmıştır. Toplam 9 adet termoçift temin edilmiştir (3 adet B tipi, 6 adet K tipi). Bütün termoçiftler sıcaklık dayanımlarını artırmak için seramik ile kaplanmıştır (Şekil 3.5). B tipi termoçiftler Pt%13Rh-Pt alaşımından, K tipi termoçiftler ise NiCr-Ni alaşımından imal edilmiştir. Sıcaklık ölçüm aralıkları; B tipi için 0-1800 °C, K tipi için -200-1200 °C'dir. Bütün termoçiftler 20 cm uzunluğundadır. Tel çapları: B tipi, 0.8 mm; K tipi, 0.7 mm'dir.



Şekil 3. 5. B tipi termoçift.

Şekil 3.6’da termoçift tespit noktalarının brülör çıkışına olan eksenel uzaklıkları görülmektedir.



Şekil 3. 6. Sıcaklık ölçüm noktaları (bütün ölçüler milimetre cinsindendir).

3.3.3.1 Ölçülen Sıcaklık Değerlerinin Düzeltilmesi

Yanma sıcaklığı, bir yanma işleminin verimini belirleyen en önemli parametrelerden birisidir. Bu nedenle yanma sıcaklığının bilinmesi son derece önemlidir. Düşük maliyet, sağlamlık ve kullanım kolaylığı gibi avantajlarından dolayı termoçiftler sıcaklık ölçümü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, sıcaklığı ölçülen sistem ile sıcaklık sensörü arasındaki ısı transferinden dolayı sıcaklık ölçümlerinde hatalar kaçınılmazdır. Sıcaklık ölçümünde (özellikle yüksek sıcaklıklarda) hatalar, büyük oranda yüzey radyasyonundan kaynaklanmaktadır [70, 71].

Radyasyon kayıplarından kaynaklanan sıcaklık ölçüm hatalarının düzeltilmesi için birçok teknik geliştirilmiştir. Lemaire ve Menanteau, bu tekniklerden bazılarını incelemiş ve birbirlerine göre avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmişlerdir [71]. Ayrıca, literatürde radyasyon kayıplarının hesaplanması ile ilgili birçok çalışma bulunabilir [72-76]. Termoçift için basit bir ısıl denge (kararlı halde), kontrol hacmi temelinde;

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} + \dot{Q}_{\text{iletim}} + \dot{Q}_{\text{ışınım}} = 0 \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Bu durumda termoçiftin, taşınım ile sıcak gazdan ısı kazandığı, telleri vasıtasıyla iletimle ısı kaybettiği ve ışınlama ile hem ısı kazandığı hem de kaybettiği

varsayılır. Işınım ile net ısı akısı, termoçift ve çevresi arasındaki sıcaklık gradyanına bağlıdır (termoçiftin yayıcılığı ve emiciliği birbirine eşit, dış duvarın yayıcılığı bire eşit kabul edilirse). Eğer dış duvarın sıcaklığı termoçift tel sıcaklığından düşükse ısı transferi, termoçiftten dış duvara doğru olacaktır. Gerçekte, duvarın (partiküllerin hacim kesrine ve yayıcılığına bağlıdır-reaktif akışlarda duvarın yayıcılığı değişir) ve termoçiftin (probu kimyasal değişime maruz kalabilir, kurum ile kaplanabilir) yayıcılığını hesaplamak çok zordur [77].

Bazı durumlarda termoçift malzemesinin yüksek sıcaklıklar nedeniyle zarar görmesini engellemek için kaplanması gerekir. Bu durumda ısı denge (çevre ve ortam sabit sıcaklıkta, termoçift teli denge halinde);

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} + \dot{Q}_{\text{ışınım}-1} = \dot{Q}_{\text{iletim}} + \dot{Q}_{\text{ışınım}-2} \quad (3.2)$$

haline gelir. Burada $\dot{Q}_{\text{taşınım}}$, sıcak gazdan tele taşınım ile ısı transferi; $\dot{Q}_{\text{ışınım}-1}$, gazdan tele radyasyonla ısı transferi; $\dot{Q}_{\text{iletim}}$, telden kaplamaya iletimle ısı transferi; $\dot{Q}_{\text{ışınım}-2}$, telden duvara ışınlama ile ısı transferidir. $\dot{Q}_{\text{ışınım}-1}$, gazın yayıcılığı çok düşük olduğu için ihmal edilebilir. $\dot{Q}_{\text{iletim}}$, termoçift geometrisine bağlı olarak minimize edilebilir. Termoçift telinin uzunluğu artarsa (tel çapından çok fazla) iletim kayıpları azalır. Collis ve Williams [78], uzunluk/çap oranının 1000'den daha yüksek olması gerektiğini belirtmiştir. İletim etkileri, termoçift teli gaz akışı ile çapraz akış konfigürasyonunda hizalanarak da azaltılabilir. Böylece termoçiftin görece uzun ve ince tellerinden iletimle olan ısı transferi de ihmal edilebilir. Bu durumda ısı denge [79-81]:

$$\dot{Q}_{\text{taşınım}} = \dot{Q}_{\text{ışınım}} \quad (3.3)$$

$$h \cdot A_{\text{tel}} \cdot (T_{\text{gaz}} - T_{\text{tel}}) = A_{\text{tel}} \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{tel}}^4 - T_{\text{duvar}}^4) \quad (3.4)$$

h , taşınım ile ısı transfer katsayısı; A_{tel} , telin yüzey alanı; T_{gaz} , gaz sıcaklığı; T_{tel} , tel sıcaklığı; T_{duvar} , duvar sıcaklığı; σ , Stefan-Boltzmann sabiti ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$); ε , telin yayıcılığıdır. Denklem 3.4, yeniden düzenlenirse;

$$T_{\text{gaz}} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{tel}}^4 - T_{\text{duvar}}^4)}{h} + T_{\text{tel}} \quad (3.5)$$

elde edilir [80, 81]. Isı kapasitesi, viskozite ve ısıl iletkenlik gibi taşınım özellikleri sıcaklık ile değiştiğinden yukarıdaki denklemin çözümü (sıcaklık bilinmediğinden tel ve gaz sıcaklığının ortalaması) iteratif yöntemler ile yapılabilir [80]. 1250 K üzerinde ölçüm yapan termoçiftler için tel yayıcılığı yaklaşık olarak;

$$\varepsilon = 9,35 \times 10^{-5} T_{tel} + 0,06 \quad (3.6)$$

denklemini ile hesaplanabilir [82, 83].

Taşınım ile ısı transfer katsayısının artması, radyasyon kayıplarını azaltır. h , Nusselt sayısından hesaplanabilir.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.7)$$

Burada; D , telin çapı; k , ısıl iletkenlik katsayısıdır [54]. Nusselt sayısı, Prandtl ve Reynolds sayılarının bir fonksiyonu olarak;

$$Nu = C Re^m Pr^n \quad (3.8)$$

ifade edilebilir. C, m, n sabittir. Termoçift geometrisine, Reynolds sayısına ve gaz kompozisyonuna bağlı olarak değişirler. Reynolds sayısı, tel üzerindeki gaz hızından hesaplanabilir. Prandtl sayısı ise aşırı derecede sıcaklık bağımlıdır ve T_{gaz} bilinmeden hesaplanamaz [77]. Martins [84], taşınım ile ısı transfer katsayısının, $0,01-10^5$ arasındaki Reynolds sayılarında aşağıdaki formül ile tahmin edilebileceğini belirtmiştir.

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,42 Pr^{0,2} + 0,57 Pr^{0,33} Re^{0,5} \quad (3.9)$$

$$Re = \frac{VD}{\vartheta} ; Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} \quad (3.10; 3.11)$$

V , ortalama gaz hızı; ϑ , kinematik viskozite; α , termal viskozitedir. Gaz sıcaklığına bağlı olarak ısıl iletkenlik katsayısı, kinematik viskozite ve termal viskozite arasındaki ilişki;

$$k = 3,75 \times 10^{-5} T_{tel} + 0,04 \quad (3.12)$$

$$\vartheta = 2,5 \times 10^{-7} T_{tel} - 1,43 \times 10^{-4} \quad (3.13)$$

$$\alpha = 2,89 \times 10^{-7} T_{tel} - 1,33 \times 10^{-4} \quad (3.14)$$

yukarıdaki bağıntılardan hesaplanabilir [54]. Reynolds sayısının hesaplanmasında ortalama gaz hızı olarak yakıcının termal gücüne göre hesaplanan hava/yakıt giriş hızı alınabilir. Bu kaba bir yaklaşımdır. Alev ürünleri ısıttığından ürünlerin yoğunluğu, reaksiyona giren maddelerin yoğunluğundan daha düşüktür. Süreklilik, yanmış gaz hızının yanmamış gaz hızından daha yüksek olmasını gerektirir.

$$\rho_u v_u A = \rho_b v_b A \quad (3.15)$$

Burada alt indisler u ve b sırasıyla yanmamış ve yanmış gazları ifade eder. ρ_u , yanmamış gaz yoğunluğu; v_u , yanmamış gaz hızıdır. Atmosferik basınçta, tipik bir hidrokarbon alevi için yoğunluk oranı yedidir. Bu nedenle alev boyunca gaz akışı bir hayli artar [52]. Gaz yoğunluğu;

$$\rho_{gaz} = \frac{P}{RT_{gaz}} MW_{gaz} \quad (3.16)$$

denklemleri ile hesaplanır. Bu denklemde ρ_{gaz} , gaz yoğunluğu; P , basınç; R , gaz sabiti; T_{gaz} , gaz sıcaklığı; MW_{gaz} , yanma sonu gazlarının molekül ağırlığıdır [80]. Denklem 3.16'da hesaplanan gaz yoğunluğu (yanma sonu ürünlerinin) kullanılarak, yanmış gaz hızı hesaplanabilir veya yanmış gaz hızı yaklaşık olarak hava/yakıt giriş hızının yedi katı alınabilir. Düzeltilmiş sıcaklık değerleri EK 1'de verilmiştir.

3.3.4 Basınç Sensörü

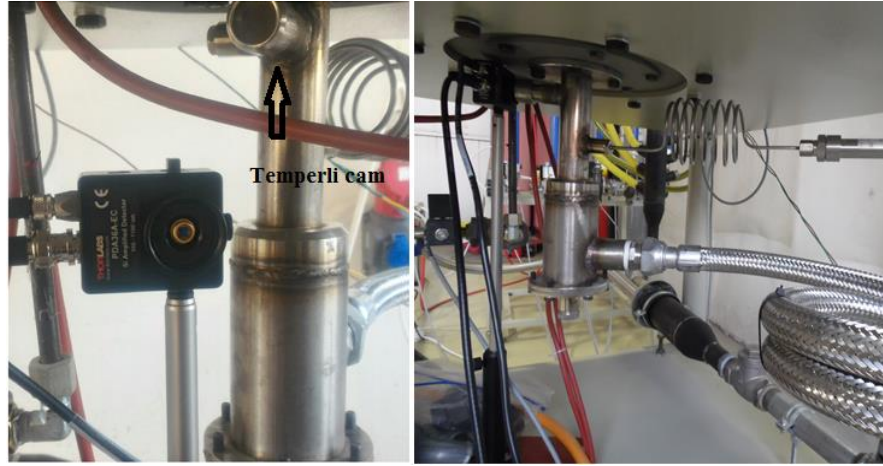
Yanma odası içerisinde basınç değişimlerine bağlı olarak alev geri tepmesini ve diğer yanma kararsızlıklarını tespit etmek için kullanılmıştır. 2 adet temin edilmiştir (KELLER PR-23-Şekil 3.7). Bunlardan bir tanesi yanma odası üzerine yerleştirilmiş ve termoakustik zorlama altında alev davranışını incelemek için kullanılmıştır. Diğer, brülör içerisindeki basınç yükselişine bağlı olarak alev geri tepmesi tespiti için kullanılmıştır.



Şekil 3. 7. Basınç Sensörü.

3.3.5 Foto Diyot

Alev davranışını görsel olarak incelemek için 2 adet temin edilmiştir (PDA36A(-EC)-Şekil 3.8). Foto diyotlardan bir tanesi alev bölgesinden görüntü almak için oluşturulmuş açıklığın, diğeri ise brülör üzerinde temperli cam ile kapatılmış açıklığın ön kısmına yerleştirilmiştir. Brülör üzerindeki foto diyot alev geri tepmesi tespiti için kullanılmıştır.



Şekil 3. 8. Alev geri tepmesi tespiti için kullanılan foto diyot.

3.3.6 Hoparlör

Yanma odası içerisindeki akustik sınır şartları değiştirerek termo-akustik kararsızlıkları başlatmak için 1400 W gücünde 2 adet hoparlör (Pioneer TS-W311D4) temin edilmiştir. Bu hoparlörlerin efektif çalışma frekansı aralıkları; 20-125 Hz'dir. Bu frekans aralığı dışında hoparlörlerden elde edilen güç azalmaktadır.

3.3.7 Sinyal Jeneratörü

Sinyal jeneratörleri, farklı türde ve frekanslarda elektrik sinyali üretmeye yararlar. Hoparlörlerden arzu edilen frekansta ses (basınç) dalgası çıkışı, sinyal jeneratörü (Unit UTG9005C) vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir.

3.3.8 Amplifikatör

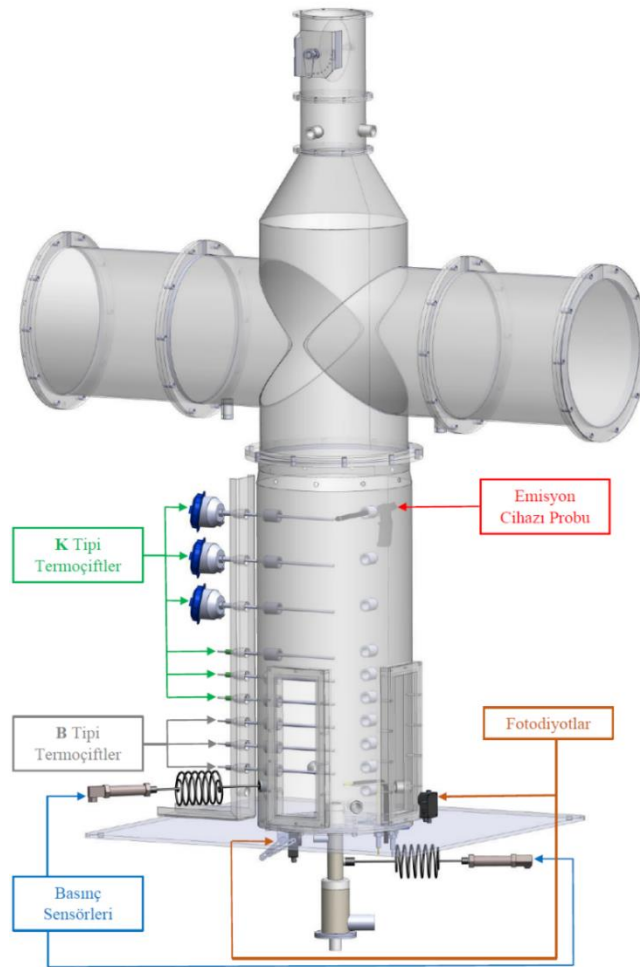
Amplifikatörler, girişine uygulanan elektrik işaretini (sinyali) yükselten elektronik devrelerdir. Müzik sistemlerinde kaynak cihazdan gelen ses sinyallerinin güçlendirilmesini sağlarlar. Sinyal jeneratörünün ürettiği sinyallerin yükseltilmesi için 2000 W gücünde bir adet amplifikatör temin edilmiştir (Behringer Europower EP400).

Amplifikatörün ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisi için bir adet güç kaynağı da deney sistemine eklenmiştir.

3.3.9 Veri kayıt cihazı

Termoçiftlerden elde edilen verileri ölçülebilir parametrik bilgilere dönüştürmek, kaydetmek ve deneyler sırasında ölçüm değerlerini bir bilgisayar vasıtasıyla izlemek maksadıyla temin edilmiş ve kullanılmıştır. Veri kayıt cihazı (Expert Key 200L), 28 kanallıdır ve toplam 100 kS/s örnekleme sıklığına sahiptir. Veri kayıt cihazının kontrolü (kanalların konfigürasyonu; her bir kanalın örnekleme sıklığının ayarlanması, kanal giriş değerinin seçilmesi – akım, gerilim vb.) ProfiSignal Go yazılımı ile sağlanmıştır.

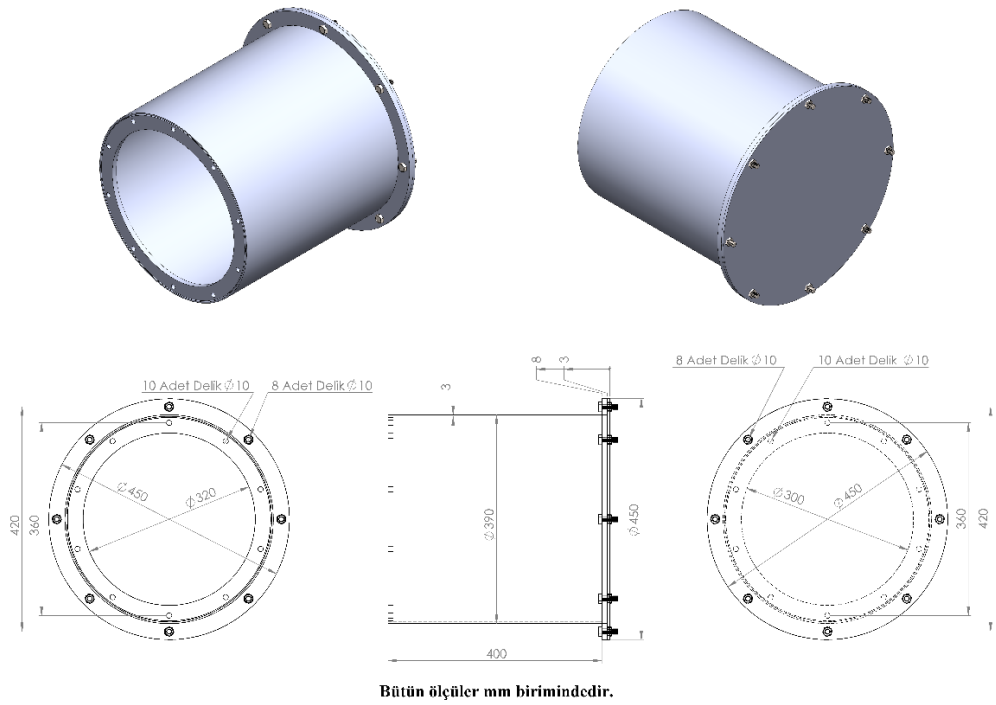
Şekil 3.9’da ölçüm ekipmanlarının deney sistemindeki yerleşimleri görülmektedir.



Şekil 3. 9. Deney sisteminde ölçüm ekipmanlarının yerleşimleri.

genişletilmesi için ek kulakçıklar tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Tasarlanan kulakçıkların teknik resim çizimleri ve katı modeli Şekil 3.11’de verilmiştir.

Üretilen kulakçıkların iç çapı 39 cm, uzunluğu 40 cm’dir. Uzunluk ve çap belirlenirken piyasada rahatlıkla bulunabilecek, seri olarak üretilen ve düşük frekans karakterli hoparlörlerin boyutları dikkate alınmıştır. Bu bağlamda iç çap, farklı boyutlarda hoplar kullanmaya müsaade edecek kadar geniş tutulmuştur. Hoparlörlerin dış kapağı gijon saplamalar ile tespit edilmesi düşünülmüş, montaj kolaylıkları dikkate alınarak dış kapak çapı 44 cm olarak belirlenmiştir. Kulakçık uzunluğu, ısı transfer şartları dikkate alınarak (yanma sonu gazlarının hoparlör çalışma sıcaklığına kadar ısı kaybederek soğuması) belirlenmiştir.



Şekil 3. 11. Kulakçıkların teknik resim çizimleri ve katı modeli.

Hoparlörlerin yanma odasına montajı (Şekil 3.12 ve 3.13), daha önce belirtildiği gibi gijon saplamalar kullanılarak dış kapak üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yanma odası malzemesinden hoparlörlere iletim yoluyla ısı transferi olmaması ve hoparlörün arka tarafından basınç dalgalarının dış kapağı çarparak yanma odasına tekrar dönmesi için dış kapak ile hoparlör arasında boşluk bırakılmıştır.



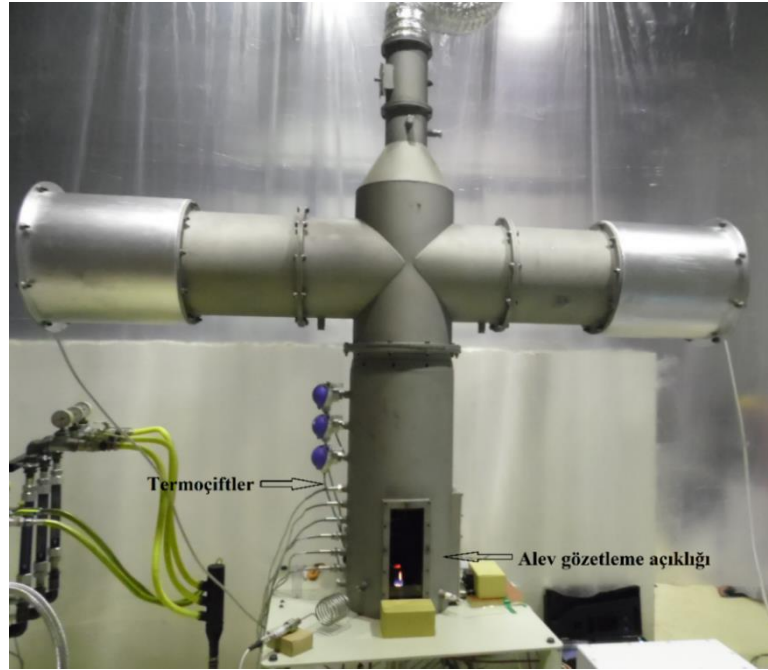
Şekil 3. 12. Dış kapağa montajlanmış hoparlör.

Dış kapak üzerinde 10 mm çapa sahip iki adet açıklık oluşturulmuştur. Bağlantı kabloları bu açıklıklardan geçirilerek amplifikatör ile hoparlörlerin bağlantısı sağlanmıştır.



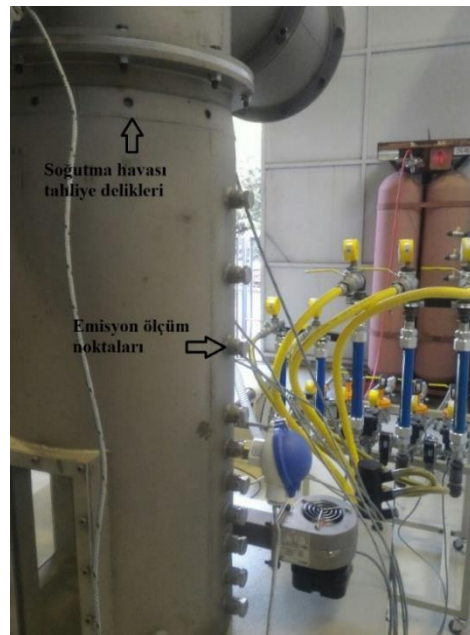
Şekil 3. 13. Hoparlörün yanma odası içerisinden görünüşü.

Yanma odası paslanmaz çelikten imal edilmiş ve kumlanmıştır (Şekil 3.14). Yanma odasının sol tarafında görülen girişler termoçiftlerin, bu girişlerin 90° ilerisinde yer alan girişler ise emisyon ölçüm probunun tespiti için oluşturulmuştur. Bu sayede hem radyal hem de eksenel yönde sıcaklık ve emisyon ölçümü yapılabilmiş, böylece farklı yakıtların yanma ve emisyon davranışları karşılaştırılabilmiştir. Bu ölçüm noktalarının dışında kalan girişler, yanma kararsızlığı analizlerinde kullanılan basınç sensörlerinin tespiti içindir. Yanma odası içerisinden alev görüntüsü almak, girdap üreteçlerini değiştirmek, iyonizasyon elektrotunun konumunu ayarlamak ve ayrıca yanma kararsızlığı analizlerinde kullanmak (foto diyot tespiti için) üzere yanma odasının alt kısmında 2 adet açıklık oluşturulmuş ve bu açıklıklar sıcaklığa dayanıklı temperli cam (sökülüp-takılabilir) ile kapatılmıştır.



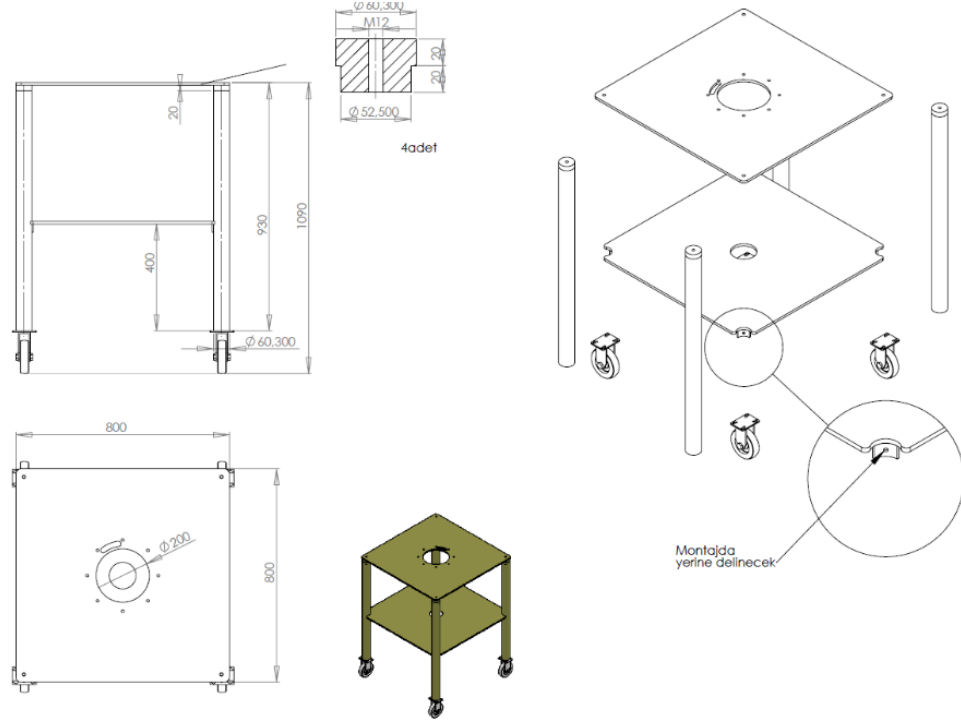
Şekil 3. 14. Yanma odasının ön cephe görünüşü.

Yanma odasının arka tarafında yer alan fan, yanma odası malzemesinin soğutulması için kullanılmıştır. Bu maksatla yanma odasının etrafında silindirik bir hava akış kanalı oluşturulmuştur. Fan tarafından sağlanan ortam sıcaklığındaki hava bu kısımlarda dolaşmakta, yanma odası ısısının bir kısmını alarak Şekil 3.15'te görülen deliklerden dışarıya atılmaktadır.



Şekil 3. 15. Yanma odasının yan-arka cephe görünüşü.

Şekil 3.16’da yanma odasının üzerinde bulunduğu tablaya ait teknik resim çizimleri ve tabla katı modeli görülmektedir. Bu tabla da paslanmaz çelikten imal edilmiş ve kumlanmıştır.



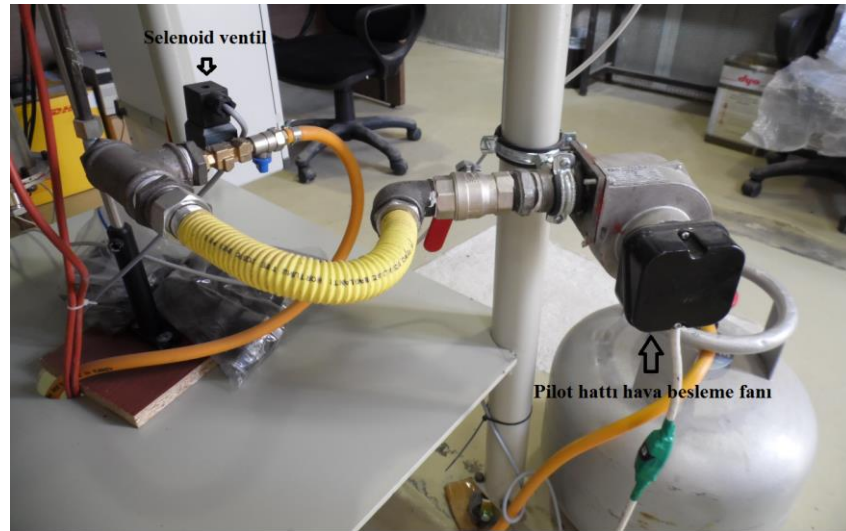
Şekil 3. 16. Taşıyıcı tablaya ait teknik resim çizimleri ve taşıyıcı tabla katı modeli (bütün ölçüler milimetre cinsindendir).

Tabla, yanma odası ve alev varlığına bağlı olarak (iyonizasyon elektrotu vasıtasıyla) gaz hatlarını açan veya kapayan selenoid ventillerin bağlı olduğu elektrik panosunu (Şekil 3.17) taşımakla birlikte gaz kolektörü, ön karıştırıcı ve pilot ateşleme hattına yataklık etmektedir.



Şekil 3. 17. Elektrik panosu.

Elektrik panosu üzerinde pilot ateşleme hattı, gaz hatları ve soğutma havası fanının kontrol edilebildiği ve ayrıca acil bir durumda tüm sistemin hızlıca kapatılabildiği butonlar yer almaktadır. Pilot ateşleme sistemi; LPG hattı, selenoid ventil, fan, brülör ve ateşleme elektrotlarından (ark oluşturarak yanmayı başlatır) oluşmaktadır (Şekil 3.18).



Şekil 3. 18. Pilot ateşleme hattı.

3.5 Gaz Akış Kanallarının İmalatı ve Montajı

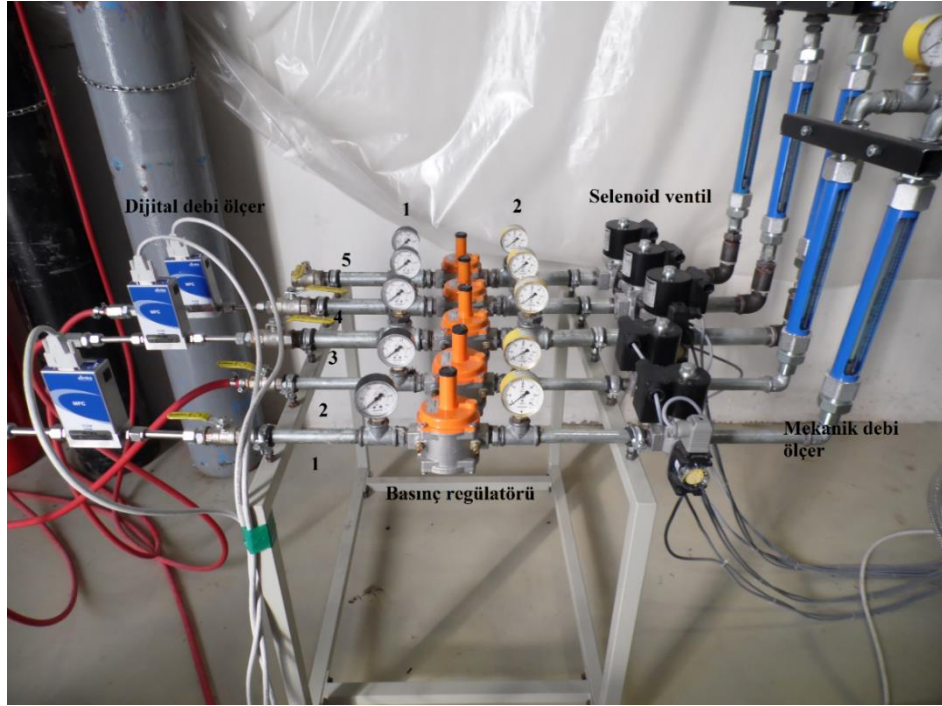
Gaz akış kanallarının imalatı, her bir gazın ısı değeri, yoğunluğu ve tasarlanan termal güce göre hesaplanan debi oranına bağlı olarak yapılmıştır. Brülör tasarımı sırasında çalışma basıncı 20 mbar olarak belirlenmiştir. Her bir gaz hattında yer alan basınç regülatörü ve vanalar basıncı istenen düzeye getirmek, manometreler ise basınç durumunu izlemek için yerleştirilmiştir. Mekanik debi ölçerler ise (havaya göre kalibre edilmişlerdir) debinin izlenmesi amacıyla (uygun gaz düzeltme faktörü kullanılarak) kontrol maksatlı yerleştirilmiştir.

$$\text{Gaz Düzeltme Faktörü} = k = \sqrt{\frac{\text{kalibrasyon akışkanının yoğunluğu}}{\text{çalışma akışkanının yoğunluğu}}} \quad (3.17)$$

$$Q_{\text{çalışma akışkanı}} = k \times Q_{\text{kalibrasyon akışkanı}} \quad (3.18)$$

Bu denklemlerde Q , hacimsel debiyi; kalibrasyon akışkanı, kullanılan debi ölçerin hangi akışkan için tasarlandığını; çalışma akışkanı ise kullanılan gazı ifade eder [85]. Şekil 3.19’da görülen gaz akış hatları; hidrojen (1), CNG (2), karbon monoksit (3) ve karbon

dioksit (4) gazları içindir. Sistemde fazladan yer alan hat (5) ileriki çalışmalarda kullanılmak üzere yerleştirilmiştir. Boru çaplarının birbirinden farklı olmasının nedeni, belirlenen termal güce uygun yakıt miktarının gazın ısıl değerine bağlı olması (aynı termal güç için düşük ısıl değerli gazın daha yüksek debide sağlanması gerekir) durumudur.



Şekil 3. 19. Gaz akış kanalları.

Gaz akış kanallarına yakıt, yaklaşık 200-300 bar basınca sahip yakıt tüplerinden sağlanmaktadır. Tüp çıkışında gaz basıncı bir regülatör vasıtasıyla 0-2.5 bar aralığına düşürülmekte daha sonra, istenen gaz debisi kendinden oransal vanalı (termal) debi ölçerler vasıtasıyla ayarlanmakta (kontrol istasyonu aracılığıyla) ve gaz sisteme verilmektedir. Dijital debi ölçerlerin, gaz tanklarının hemen sonrasına yerleştirilmesinin nedeni: bu ekipmanların arzu edilen debide gaz sağlayabilmeleri için (istenen debi miktarına bağlı olarak) basınç gerektirmeleridir. Örneğin; gaz hatlarına yerleştirilen debi ölçerlerin normal çalışma basıncı aralıkları (gerekli minimum gaz giriş basıncı): 10-5000 SCCM için 10-40 psi, 10000-20000 için 15-40 psi, 30000-50000 için 25-40 psi'dir. Termal debi ölçerlerin maksimum giriş basınçları: gaz hatları için 150 psi, hava hattı için 100 psi'dir. Debi ölçer çıkışında gaz basıncı ise giriş basıncından bağımsız olarak sistem basıncının 5-10 mbar üstündedir.

Gaz akış hattının giriş kısmında yer alan manometre (1) giriş basıncını ölçmek (maksimum 1bar), gaz regülatörü ise basıncı 40-60 mbar seviyesine düşürmek için kullanılmaktadır. Regülatörden sonra basıncı tekrar gözlemlemek için başka bir manometre (2), devamında da yukarıda kullanım maksadı açıklanan selenoid ventil yerleştirilmiştir. Ventilden sonra mekanik debi ölçer ve kolektör öncesinde basıncı tekrar gözlemlemek için son bir manometre (3) yer almaktadır. Bahsi geçen ekipmanların tamamı bütün gaz hatlarında aynı şekilde yer almaktadır.

Yanma için gereken hava bir kompresör vasıtasıyla sağlanmakta ve toplam hacmi 1500 m³ olan tanklarda depolanmaktadır (Şekil 3.20). Daha sonra, havanın basıncı istenen debi ve dijital debi ölçer gerekliliklerine bağlı olarak bir basınç regülatörü ile ayarlanmaktadır. Hava hattının sonraki ekipmanları sırasıyla; filtre, dijital debi ölçer, selenoid ventil, mekanik debi ölçer ve manometredir.



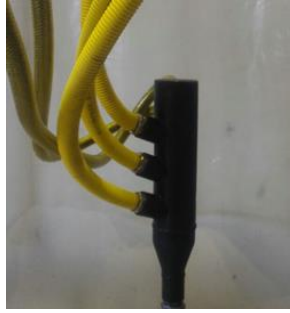
Şekil 3. 20. Kompresör, harici hava tankı, kompresör muhafazası için oluşturulmuş yapı.

Dijital debi ölçerin zaman içerisinde zarar görmemesi için kompresör havası içinde yer alan yağ, nem ve partiküllerin temizlenmesi gerekmektedir. Bu maksatla bir adet filtre hava sistemine eklenmiştir (Şekil 3.21).



Şekil 3. 21. Filtre ve basınç regülatörü.

Gaz hatlarından gelen yakıtlar öncelikli olarak bir kolektörde toplanmaktadır (Şekil 3.22).



Şekil 3. 22. Gaz Kolektörü.

Daha sonra, kolektörden gelen yakıt karışımı ve yanma havası, enjeksiyon kaynaklı akış düzensizliklerini elemine etmek, hava ve yakıtın düzgün bir şekilde karışmasını garantiye almak için statik bir ön karıştırıcıdan (Şekil 3.23) geçmektedir. Bu karıştırıcıya hava ve yakıt eksenel doğrultuda sağlanmaktadır. Karıştırıcı içerisinde alev geri tepmesi durumunda gaz beslemesini kesecek mekanik bir geri tepme önleyicisi de yer almaktadır.



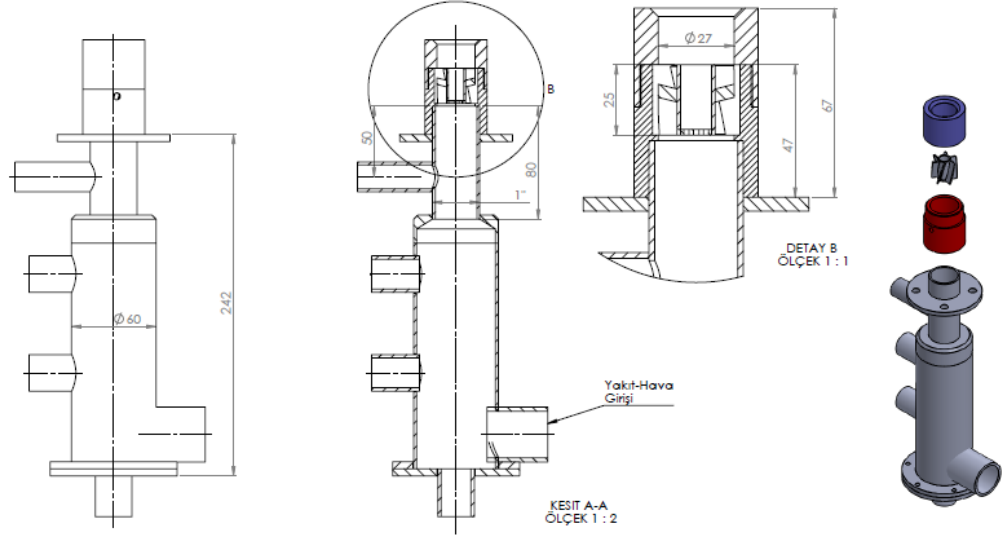
Şekil 3. 23. Hava/yakıt karıştırıcısı

3.6 Brülör Tasarımı ve İmalatı

Yakıtın verimli bir şekilde kullanılabilmesi açısından son derece önemli olan brülörler birlikte kullanılacakları yakma sistemleri ile uyumlu olmalıdırlar. Brülör seçiminde; yakıcı sisteminin ısıt kapasitesi, sistemin karşı basıncı, yakıcı ölçüleri, brülörün çalışma şekli (tek veya çok kademeli, oransal) ve kullanılacak olan yakıt veya yakıtların temel özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekir. Ayrıca, ideal bir brülör tüm çalışma aralığı boyunca mümkün olan en az hava ile tam yanmayı sağlamalı, egzoz gazı emisyonlarını azaltmalıdır. Son olarak, alev çapı ve boyunun yakıcı içerisinde düzgün bir ısı dağılımı sağlayacak şekilde olması gerekir [86].

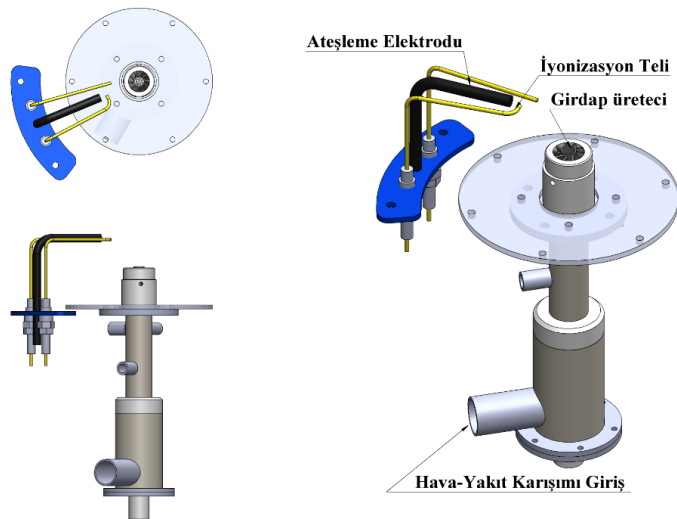
Az önce açıklanan gereklilikler ışığında, brülör ve yakıcı sistemi 10 kW'a kadar termal güç sağlayacak şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ancak, bu tez çalışması kapsamında yapılacak olan deneylerde yakıcı gücünün yakıt kompozisyonundan

bağımsız olarak 3 kW değerinde sabit tutulması kararlaştırılmıştır. Tek kademeli, ön karışımli brülöre ait teknik resim ve katı model çizimleri Şekil 3.24’de görülmektedir.



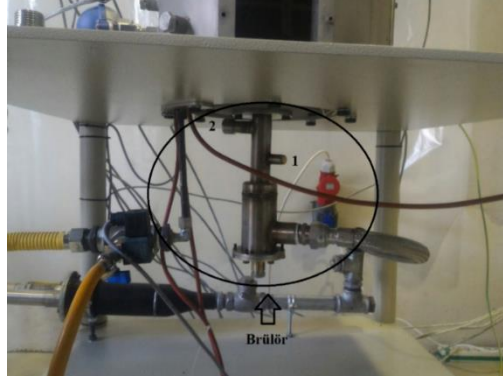
Şekil 3. 24. Tasarlanan brülöre ait teknik resim çizimleri.

Teknik resim çizimlerinde görülen ölçülerin tamamı milimetre cinsinden verilmiştir. Brülörün yakıt/hava girişinin karşı tarafında yer alan girişler, alev kararlılığı analizleri sırasında foto diyot ve basınç sensörlerinin tespiti için kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Üretim aşamasında bu açıklıkların konumu ve sayısı değiştirilmiştir. Şekil 3.24’de girdap üreteçlerinin muhafazası için oluşturulmuş yapı (kırmızı renkli kısım) da görülmektedir. Tasarımı kesinleştirilen brülörün katı model çizimi Şekil 3.25’de yer almaktadır.



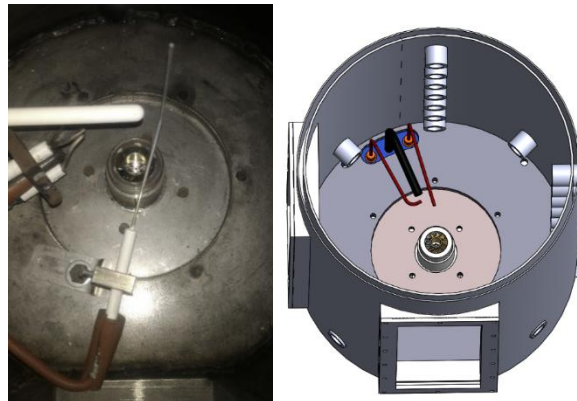
Şekil 3. 25. Brülör katı modeli.

Üretimi gerçekleştirilen brülör ve brülörün üst cephe görünüşü sırasıyla; Şekil 3.26 ve 3.27’de verilmiştir.



Şekil 3. 26. Brülör.

Brülör üzerindeki 1 ve 2 numaralı açıklıklar foto diyot ve basınç sensörü tespiti içindir.



Şekil 3. 27. Brülörün üst cephe görünüşü, iyonizasyon ve ateşleme elektrotları.

3.6 Girdap Üreteci Tasarımı ve İmalatı

Birçok yakıcıda akışı türbülanslı hale getirecek akış şartları yaratılır. Hemen hemen bütün hareketli ve sabit güç kaynakları, reaktantların kütle tüketim oranlarını artırdığından türbülanslı yanma şartlarında çalışırlar çünkü kütle tüketim hızları arttıkça kimyasal enerji salınım oranı artar ve böylece ilgili yakıcıdan elde edilecek güç de artar [60].

Girdaplı akışlar, alev kararlılığı, yanma yoğunluğu ve sonuç olarak yakıcı performansı üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı birçok yakma uygulamasında tercih edilmektedir [87]. Girdaplı akışları karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan parametre swirl

sayısıdır ve açılal momentumun aksenal akısının (G_φ) aksenal momentuma (G_x) oranı şeklinde ifade edilir.

$$Swirl\ Sayısı = \frac{G_\varphi}{G_x R} \quad (3.19)$$

$$G_\varphi = \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi r dr \quad (3.20)$$

$$G_x = \int_0^R U \rho U 2\pi r dr \quad (3.21)$$

Bu denklemlerde; U ve W hızın aksenal ve teğetsel komponentleri, R kesit düzleminin yarıçapı, r radyal koordinattır [88]. Pratik hesaplamalar için swirl sayısı yaklaşık olarak aşağıdaki denklem ile de hesaplanabilir.

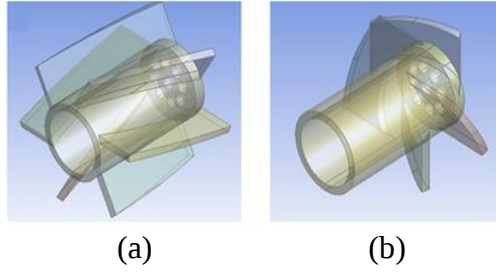
$$Swirl\ Sayısı = \frac{2}{3} \cdot \left[\frac{1 - (d_h/d_o)^3}{1 - (d_h/d_o)^2} \right] \cdot \tan(\theta) \quad (3.22)$$

d_h , girdap üretici merkez çapı; d_o , girdap üretici dış çapı; θ , girdap üretici kanatçık açısıdır [89]. Bu yaklaşık formülasyon birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır [90-95]. Bu araştırmacıların bir kısmı, d_h/d_o oranını değiştirmiş ve çap oranının ilgili yakıtların yanma ve emisyon performansına etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, bu oranı genellikle 0,3 veya 0,5 olarak belirlemişlerdir [87, 94-99]. Bu bağlamda d_h/d_o oranı 0,5, swirl sayısı 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4 ve 1,6 olan toplam 8 adet girdap üretici tasarlanmış ve üretilmiştir. Tablo 3.2’de üretilen girdap üreticilerinin bazı özellikleri verilmiştir.

Tablo 3. 2. Girdap üreticilerinin bazı özellikleri.

Swirl Sayısı	d_h/d_o	α
0,2	0,5	14,42°
0,4	0,5	27,2°
0,6	0,5	37,6°
0,8	0,5	45,8°
1,0	0,5	52,1°
1,2	0,5	57,05°
1,4	0,5	60,94 °
1,6	0,5	64,07 °

Girdap üreticilerinden bazılarının katı model çizimleri Şekil 3.28’de verilmiştir.



Şekil 3. 28. Girdap üreteçlerinden bazılarının katı model çizimleri: (a) Swirl sayısı=0,2, (b) Swirl sayısı=1,2.

Şekil 3.29’da üretilen girdap üreteçlerinden bazılarının resimleri yer almaktadır.



Şekil 3. 29. İmal edilen girdap üreteçlerinden bazıları.

Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan tüm sistem ve ekipmanlar Şekil 3.30’da verilmiştir.



Şekil 3. 30. Tüm deney sistemi.

3.7 Belirsizlik Analizi

Veri analizi, deneysel verilerin faydalı bilgiler elde etmek ve anlamlı sonuçlar çıkarmak maksadıyla sentezlendiği ve analiz edildiği bir süreçtir. Ancak, deneysel verilerden herhangi bir sonuç çıkarmadan önce deneyler sırasında elde edilen bilginin doğruluğunu kesinleştirmek gerekir. Bu nedenle bağımlı ve bağımsız değişkenlerdeki hataların düzgün bir şekilde tahmin edilmesi son derece önemlidir [54, 72]. Deneysel verilerin kalitesini değerlendirmek için ölçülen fiziksel değerlerin gerçek değerden ne şekilde saptığının belirlenmesi gerekir. Elde edilen verilerin tutarlılığı sağduyu ve var olan teoriler ile incelendikten sonra, özellikle deneyler birkaç kez tekrarlanırken (ölçümlerin güvenilirlik düzeyinin değerlendirilmesinde yardımcı olur) istatistiksel analizler gerçekleştirilmelidir. Sonrasında ise belirsizlik düzeyi belirlenir [54].

Ölçüm hatası, gerçek değer ile ölçülen değer arasındaki fark olarak tanımlanır. Bu tanım hatanın değerlendirilmesi için bir yol sağlasa da bir fiziksel büyüklüğün gerçek değerini ölçmeden elde edemeyeceğimiz için deneysel bir hatanın miktarını belirlemekte bize yardımcı olamayacaktır. Bu durum, deneysel hatanın miktarını belirleyemeyeceğimiz anlamına gelmez çünkü deneysel hatanın boyutu, belirsizlik seviyesi bakımından ifade edilebilir ve belirlenebilir. Bu deneysel belirsizlik, deneyler sırasında oluşan hataların muhtemel değeri olarak düşünülebilir. Deneyler sırasında oluşan hatalar birçok nedenden kaynaklanabilir. Örneğin; ölçüm aletlerinden, deneysel düzenden, hatalı deney prosedürlerinden veya insan faktöründen kaynaklanabilir. Bu nedenle deneyler sırasında oluşan hata türlerinin tanımlanması gerekir. Hatalar; sistematik (sabit – örneğin; bir termometrenin ısı kayıplarından dolayı sürekli gerçek sıcaklık değerinin altında ölçüm yapması) ve rastgele (hassasiyet – örneğin; aynı ölçüm aletinin tekrarlanan ölçümlerde sürekli farklı değerler vermesi, titreşim ortamında ölçüm vb.) olmak üzere ikiye ayrılır. Deneysel ölçümler sırasındaki belirsizlikler, bu iki basit hatadan kaynaklanır. Deneysel verilerdeki yanlışlıkların boyutu belirsizlik bakımından ifade edilebilir. Belirsizlik, ölçülen verinin ortalama değeri civarında belirli bir aralıkta değişebilen olası bir değerdir (hata sabit bir değerdir). İdeal olarak, bir deneydeki belirsizlik, tekrar eden verilerden tahmin edilir. Deneylerden elde edilen veriler, tek bir ölçü aleti kullanılarak elde edilmişse (tek örnek veri) ölçü aleti her seferinde aynı miktarda hata ile ölçüm yapacağından deney tekrar edilerek belirsizlik (kesin olarak) tanımlanamayabilir, veriler birden fazla ölçü aletinden elde edilmişse (çoklu örnek veri) aksi durum söz konusudur

ve ölçümlerdeki belirsizlikler tanımlanabilir. Çoklu örnek veri edinimi zaman ve maliyet dezavantajlarından dolayı fazla tercih edilmez. Bu nedenle tek örnek veri analizi incelenecektir. Bir deneydeki toplam hata;

$$\delta_i = \beta + \varepsilon_i \quad (3.23)$$

Burada alt indis i , kaçınıcı ölçüm olduğunu; β , sistematik hataları; ε , ise rastgele hataları gösterir [54]. Sistematik hatalar, ölçülen bütün değerlerin ortalaması ile gerçek değer arasındaki farktır. Rastgele hata ise ölçümlerin ortalama değer etrafında değişmesine neden olur.

$$X = X_m \mp U \quad (3.24)$$

X_m , N adet ölçümün ortalama değeri; U , X değerindeki belirsizliktir. Böyle bir ifade belirli bir deney birkaç defa tekrar edilerek yazılabilir [54]. $X_1, X_2, \dots, X_N$, deneysel ölçümlerdeki bağımsız değişkenler; $U_1, U_2, \dots, U_N$, bu bağımsız değişkenlerdeki belirsizlikler ise sonuçtaki belirsizlik;

$$U_R = \left[\left(\frac{\delta R}{\delta X_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta X_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta X_i} U_i \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta X_N} U_N \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.25)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

$\frac{\delta R}{\delta X_N}$; R bağıntısının N . bağımsız değişkene göre kısmi türevidir. R ;

$$R = f(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_N) \quad (3.26)$$

$$U_R = f(U_1 + U_2 + \dots + U_N) \quad (3.27)$$

şeklinde ifade edilebilir [54, 72].

Bu tez çalışması kapsamında emisyon, sıcaklık, basınç ve ışık şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Yapılan sıcaklık ölçümleri radyasyon kayıpları hesaba katılarak düzeltilmiştir (EK 1). Emisyon ölçümlerinin hassasiyeti: O_2 için $\pm \% 0,2$; CO için 0-4000 ppm arası $\pm \% 5$ (veya ± 10 ppm - hangisi büyükse), >4000 ppm $\pm \% 10$; NO için 0-1000 ppm arası $\pm \% 5$ (veya ± 5 ppm - hangisi büyükse), >1000 ppm $\pm \% 10$; NO_2 için 0-200 ppm arası $\pm \% 5$ (veya ± 5 ppm - hangisi büyükse), >200 ppm $\pm \% 10$; SO_2 için 0-2000 ppm arası $\pm \% 5$ (veya

± 10 ppm - hangisi büyükse), >2000 ppm % 10; CO₂ için $\pm$ % 0,3'tür. Basınç sensörlerinin hassasiyeti; tüm skalanın $\pm$ % 0,2'sidir (maksimum $\pm$ % 0,5'dir). Bu ölçümler dışında yakıcının termal gücüne uygun yakıt miktarının ölçümü ve ayarlanması dijital debi ölçerler tarafından gerçekleştirilmiştir. Dijital debi ölçerlerin hassasiyeti: gaz hatları, maksimum debinin % 20-100' ü için $\pm$ % 1 (% 2-20'si için $\pm$ % 0,2); hava hattı, tam ölçek için $\pm$ % 1'dir.

Örneğin; %60H₂-%30CO-%10CO₂ karışımı için (3 kW) toplam debideki belirsizlik:

$$U_{\dot{m}} = U_{CO} + U_{CO_2} + U_{H_2}$$

$$U_{\dot{m}} = 0,2 + 0,2 + 1,0$$

%1.4'tür. Aynı karışım için termal güçteki belirsizlik;

$$Q \times \dot{m} = \text{Termal Güç (TG)}$$

Q , sabit alınırsa;

$$U_{TG} = \left[\left(\frac{\delta TG}{\delta \dot{m}} U_{\dot{m}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

olur. Karışım alt ısı değeri, 16427,79 kJ/kg; 3 kW için gerekli yakıt akışı, 0,000182617430 kg/s (17448,12 SCCM)'dir. Üretici, belirsizliği dakikada standart santimetreküp cinsinden verdiği belirsizlik, 244,27368 SCCM olur. Buradan %60H₂-%30CO-%10CO₂ karışımı için termal güçteki belirsizlik;

$$U_{TG} = [(Q \times U_{\dot{m}})^2]^{1/2}$$

$$U_{TG} = \left[\left(16427,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 2,55552 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$U_{TG} = \pm 0,0419 \text{ kW}$$

hesaplanır. Termal güçteki belirsizlik, $\pm$ % 1,39 değerine karşılık gelir.

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Gaz Kompozisyonu ve CO₂ Seyreltiminin Kararlı Yanma Aralığına Etkisi

Sentetik gazlar, enerji talebini hem enerji yoğunluğu hem de emisyon gereklilikleri bakımından karşılayacak alternatif bir enerji kaynağıdır. Ancak, sentetik gazların ısıtma değerleri (4-15 MJ/kg [100]) ve Wobbe indeksleri, metan gibi geleneksel hidrokarbon yakıtlarına kıyasla çok düşüktür. Hem değişken gaz bileşimi hem de bu durum, geleneksel brülörlerde sentetik gazların alev kararlılığı (ateşleme ve sönme limitleri, alev hızı, alev geri tepmesi, alev sönmesi vb.) ve yanma verimliliği açısından sorunlu olmasını sağlar [68, 90, 101]. Dahası, sentetik gazların inert bileşenleri alev yayılma ve sönme karakteristikleri açısından bazı sorunlar oluştururlar [102, 103].

Bu bağlamda öncelikli olarak, test edilecek gaz karışımlarının fakir sönme ve alev geri tepme limitleri (kararlılık aralıkları) bütün gaz karışımlarının herhangi bir dinamik veya statik kararsızlığa uğramadan test edilebileceği ve birbirleri ile kıyaslanabileceği bir eşdeğerlik oranı belirlemek için araştırılmıştır çünkü statik kararsızlıklar gerçekleşmeden hemen önce alevin dinamik olarak kararsız hale geldiği bir çalışma aralığı rapor edilmiştir [104].

Verilen bir karışımın fakir sönme [105] ve alev geri tepme [106] limitleri belirlenirken hava akış hızı, kararlı bir alevin yakıcı çıkışında sabitlendiği belirli bir eşdeğerlik oranı değerinden itibaren kademeli olarak artırılmış/azaltılmış ve bu kararsızlıkların meydana geldiği eşdeğerlik oranı değerleri kayıt edilmiştir. Kademelendirme işlemi 0,2 SLPM aralıklarla yapılmış ve her bir adımda termal dengenin sağlanabilmesi için belirli bir süre

beklenmiştir. Bütün bu işlemler sırasında, bir yanma işleminin etkinliğini belirleyen diğer parametreler (hava/yakıt karışımı giriş sıcaklığı, yakıt akış oranı, swirl sayısı, karışma durumu vb.) sabit tutulmuştur. Test edilen bütün karışımların 0,2 swirl sayısında ve 3 kW termal güçte fakir sönme ve alev geri tepme eşdeğerlik oranları deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 4.1’de sunulmuştur. Daha önce de bahsedildiği gibi, test edilecek gaz karışımları belirlenirken birçok istasyondan elde edilen gazların bileşimi incelenmiş ve H_2/CO oranının düşük, orta ve yüksek ısı güç sağlayacak şekilde; 0,5, 1,0 veya 2,0 olması kararlaştırılmıştır. Bütün gaz karışımlarına hacimce % 20 CNG ilavesi, hem alev kararlılık gereklilikleri (üçlü $H_2/CO/CO_2$ karışımları geniş bir eşdeğerlik oranı ve yakıt kompozisyonu aralığında birçok statik ve dinamik alev kararsızlığı göstermiştir) hem de sentetik gazların yaygın bir bileşeni olan metanı temsil etmesi için yapılmıştır. Son olarak her bir üçlü gaz karışımına değişen oranlarda (% 0-20, % 5 artırılarak) CO_2 ilavesi, inert seyreltiminin yanma karakteristiklerine etkisini incelemek için yapılmıştır.

Sentetik gaz alevinin kimyasal yapısı H_2 ve CO ’in farklı kinetik ve taşınım özelliklerinden dolayı yakıt karışımındaki H_2 miktarına bağlı olarak çok fazla değişiklik gösterir [2]. Sentetik gaz alev karakteristiklerini belirleyen parametrelerden birisi H_2/CO oranıdır çünkü sentetik gazların ateşleme özellikleri ve alev hızları bu orana bağlıdır [107]. Ayrıca bu oran, alev gerilmesine (şekil değiştirme) karşı duyarlılık ve sönme gerilme oranı gibi özellikler üzerinde çok fazla etkiye sahiptir [2]. Tablo 4.1’de açıkça görüldüğü gibi, H_2/CO oranının fakir sönme limiti üzerindeki etkisi alev geri tepme limiti üzerindeki etkisine kıyasla kısıtlıdır (özellikle %20 CO_2 ilavesi durumunda). H_2/CO oranı arttıkça fakir sönme eşdeğerlik oranı ve alev geri tepme limiti azalmıştır. Hidrojen yüksek ısı değeri ve alev hızı, iyi difüzyon kabiliyeti ve hızlı oksidasyon özellikleri ile karakterize edilir. Karışımındaki hidrojen içeriğinin artması, karışımın daha fakir şartlarda ateşlenebilmesine ve artan alev hızı sonucu daha düşük eşdeğerlik oranlarında geri tepmesine neden olmuştur. Başka bir ifadeyle, H_2/CO oranının azalması sonucu (düşük H_2 içeriği) alev hızı düşer ve böylece hava/yakıt karışımının yanma bölgesinde kalma zamanı (alevin uzunluğu, kalınlığı, açısı, konumu ve yoğunluğunu belirler [108]) azalır ve alev sönmeye karşı daha duyarlı hale gelir.

Şekil 4.1’den H_2/CO oranının CNG/ H_2/CO karışımlarının alev sönmesi ve alev geri tepmesi limitlerine etkisi daha net bir şekilde değerlendirilebilir. H_2/CO oranı arttıkça ilgili karışımların kararlı çalışma aralıkları daralmaktadır. Ancak, bu daralma 0,5-1,0

H₂/CO oranları aralığında 1,0-2,0 aralığına (lineer bir daralma söz konusudur) kıyasla daha belirgindir.

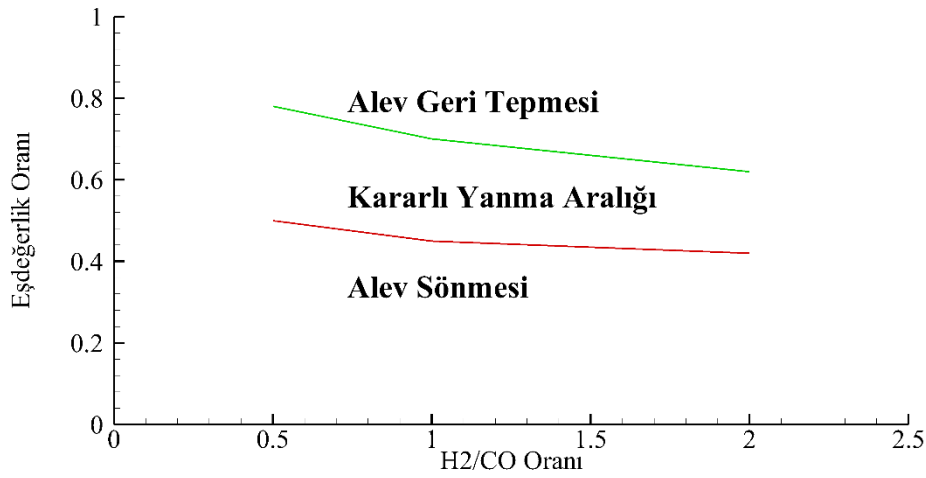
Tablo 4. 1. Test edilen gaz karışımlarının fakir sönme ve alev geri tepme eşdeğerlik oranları.

Gaz Karışımı	Karışım Yakıt	Fakir Sönme (ϕ)	Geri Tepme (ϕ)	H ₂ /CO
%20CNG-%26,7H ₂ -%53,3CO	KY1	0,5	0,78	0,5
%20CNG-%25H ₂ -%50CO-%05CO ₂	KY2	0,53	0,83	
%20CNG-%23,4H ₂ -%46,6CO-%10CO ₂	KY3	0,51	0,85	
%20CNG-%21,7H ₂ -%43,3CO-%15CO ₂	KY4	0,5	0,9	
%20CNG-%20H ₂ -%40CO-%20CO ₂	KY5	0,515	1,4	
%20CNG-%40H ₂ -%40CO	KY6	0,45	0,7	1,0
%20CNG-%37,5H ₂ -%37,5CO-%05CO ₂	KY7	0,48	0,72	
%20CNG-%35H ₂ -%35CO-%10CO ₂	KY8	0,478	0,73	
%20CNG-%32,5H ₂ -%32,5CO-%15CO ₂	KY9	0,48	0,8	
%20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂	KY10	0,495	1,45	
%20CNG-%53,3H ₂ -%26,7CO	KY11	0,42	0,62	2,0
%20CNG-%50H ₂ -%25CO-%05CO ₂	KY12	0,429	0,62	
%20CNG-%46,6H ₂ -%23,4CO-%10CO ₂	KY13	0,44	0,66	
%20CNG-%43,3H ₂ -%21,7CO-%15CO ₂	KY14	0,435	0,72	
%20CNG-%40H ₂ -%20CO-%20CO ₂	KY15	0,455	1,2	

Bu durum, %20 CO₂ ile seyreltilmiş karışımlar hariç test edilen bütün karışımlar için geçerlidir. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının (H₂/CO = 1,0) kararlı çalışma aralığı, %20 CO₂ ile seyreltilmiş diğer karışımlardan daha yüksektir. İlgili karışımın görece yüksek H₂ ve CO içeriği daha geniş kararlılık aralığının nedeni olabilir.

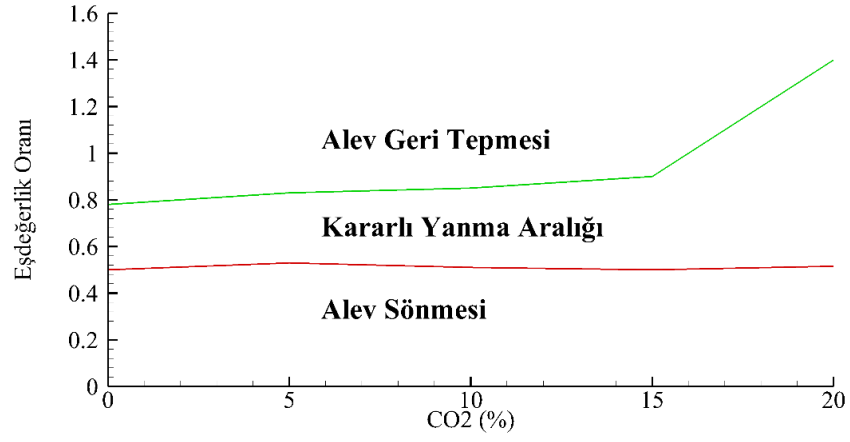
CO₂ ilavesinin test edilen tüm karışımların fakir sönme limitlerini etkilediği belirlenmiştir. CO₂ ilavesinin bu limitlere etkisi monoton değildir. %5 ve 20 CO₂ ilavesi, bütün H₂/CO oranlarında fakir sönme limitini beklenildiği gibi artırmıştır. Ancak, CO₂ içeriğinde bu değerlerin arasında kalan artışlar, bazı karışımların fakir sönme limitlerini artırırken bazı karışımların fakir sönme limitlerini azaltmıştır. İnert seyreltiminin alev geri tepme limitleri üzerindeki etkisi daha belirgin ve monotondur. Gaz karışımında CO₂

miktarı arttıkça alev geri tepme limiti, H_2/CO oranından bağımsız olarak artmıştır. %20 CO_2 ilavesi durumunda ise bu artış, en yüksek değerini almıştır. CO_2 'in seyreltici (yüksek kütle akış oranı, akış hızı ve yanma hızı arasındaki etkileşimi alev kararlılığı bakımından olumlu bir şekilde etkiler) ve kimyasal (düşük yanma hızı-düşük radikal konsantrasyonu ve yüksek rekombinasyon reaksiyonları) etkilerinin alev geri tepme limitlerini yükselten temel unsurlar olduğu düşünülmektedir [106].

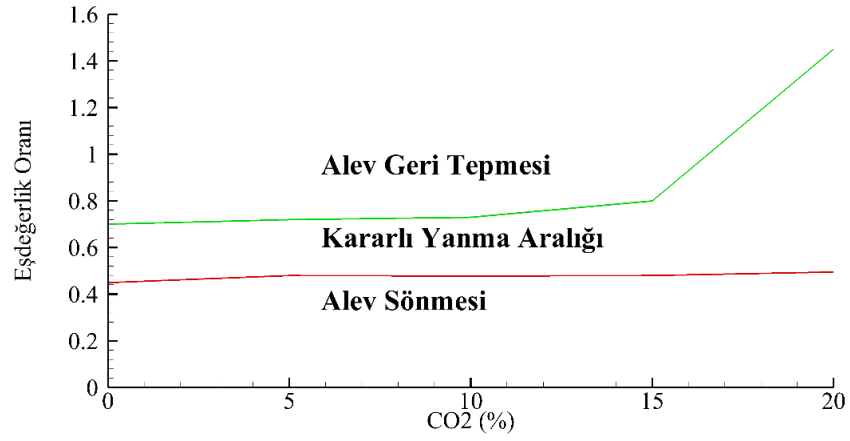


Şekil 4. 1. %20CNG-%53,3 H_2 -%26,7 CO , %20CNG-%40 H_2 -%40 CO ve %20CNG-%26,7 H_2 -%53,3 CO karışımı sentetik gazların H_2/CO oranı ile kararlılık aralıklarının değişimi.

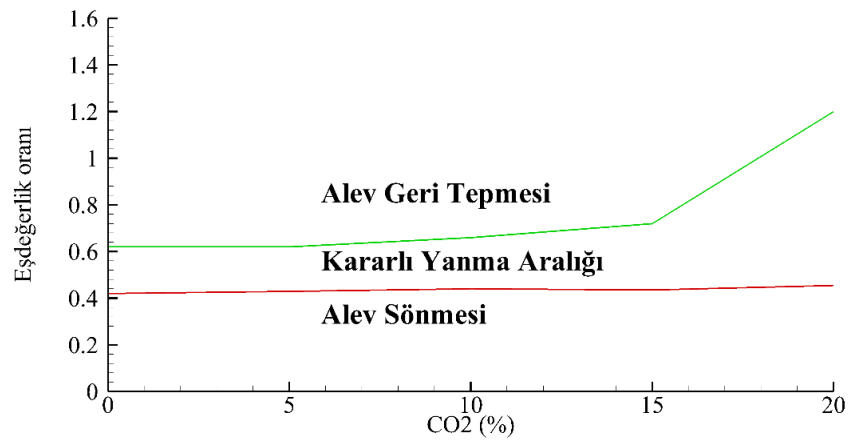
Şekil 4.2'de CO_2 ilavesinin farklı H_2/CO oranlarında, test edilen karışımların kararlı yanma aralıklarına etkisi görülebilir. H_2/CO oranından bağımsız olarak CO_2 miktarı arttıkça kararlılık aralığı genişlemiştir. Özellikle çok farklı yayılım özelliklerine sahip bileşenlerden oluşan gaz karışımlarının laminar alev hızları ve ısı salınım oranları alev gerilimine aşırı derecede bağlıdır. Alev gerilimi, alev yüzey alanının kısmi değişim hızı olarak ifade edilir ve yanmamış hava/yakıt karışımı hızı arttıkça artar. Bu durumda alev sıcaklığı ve karışımın sıcak bölgede kalma zamanı azalır (alev eksenel doğrultuda gerilir ve reaksiyon hızı düşer [108]) [2]. Karışım içeriğinde CO_2 miktarı arttıkça hava/yakıt karışımının ısı değeri düşer ve aynı miktarda termal güç sağlayabilmesi için yanmamış karışımın yanma odasına giriş hızının artması gerekir. Sonuç olarak, yukarıda da belirtildiği gibi, alev hızı ve buna bağlı olarak alev geri tepme eğilimi azalır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 2. CO₂ ilavesinin kararlı yanma aralığına etkisi. H₂/CO oranları: a) 0,5, b) 1,0, c) 2,0.

Test edilen bütün H_2/CO oranlarında, %0-15 CO_2 ilavesi aralığında alev geri tepmesi olayı, %20 CO_2 ilavesi durumunda ise zengin sönme durumu gözlenmiştir. Bu durum, %15'den %20'ye %5'lik CO_2 ilavesinin yakıt karışımının kimyasal ve fiziksel özelliklerini ne ölçüde değiştirdiğini göstermektedir. İlave olarak, Şekil 4.2'de kararlı yanma aralığının H_2/CO oranı ile değişimi de görülebilir. Daha önce de belirtildiği gibi, H_2/CO oranı arttıkça kararlı yanma aralığı daralmıştır.

Test edilecek sentetik gaz karışımlarının kararlı yanma aralıkları belirlendikten sonra, bütün karışımların 0,6 eşdeğerlik oranında test edilmesinin, hem alev kararlılık hem de yanma karakteristikleri bakımından uygun olduğu değerlendirilmiştir. Bu deneyler sırasında swirl sayısı ve termal güç sırasıyla; 0,2 ve 3 kW değerlerinde sabit tutulmuştur.

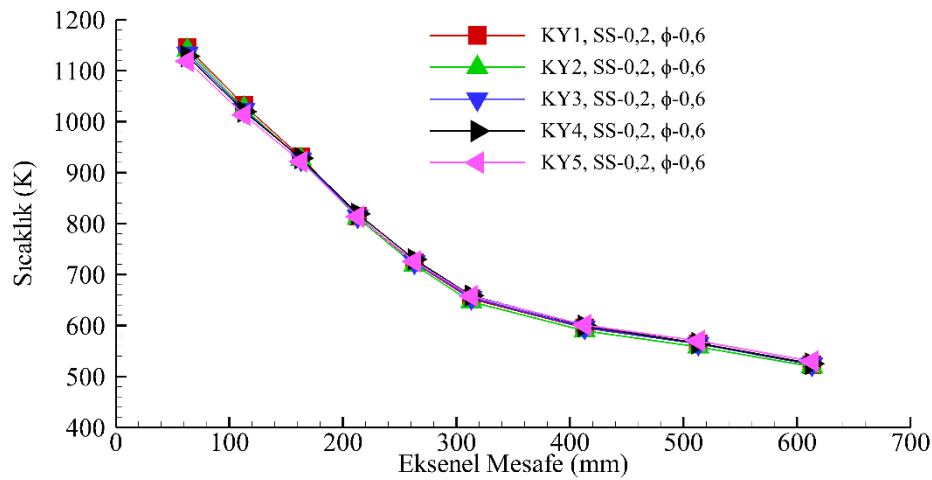
4.2 Gaz Kompozisyonu ve CO_2 Seyreltiminin Yanma Karakteristiklerine Etkisi

Bir yanma işleminin performansını belirleyen parametreler arasında alev sıcaklığı (esasen stokiyometri ve hava/yakıt karışımı tarafından kontrol edilir), yanma verimi, kirletici emisyonlar ve malzeme seçimi açısından son derece önemlidir. Bu nedenle tez çalışmasının bu bölümünde belirlenen sentetik gaz karışımlarının yanma odası boyunca emisyon ve sıcaklık profilleri (radyal ve eksenel) incelenecektir. Bütün eksenel sıcaklık ölçümleri tek bir radyal pozisyonda (yakıcı merkezinde) gerçekleştirilmiştir. B tipi termočiftler 2, 3 ve 4 numaralı; K tipi termočiftler ise diğer ölçüm portlarına yerleştirilmiştir (Şekil 3.6).

Şekil 4.3'te H_2/CO oranı 0,5 olan sentetik gaz karışımlarının eksenel sıcaklık profilleri görülmektedir. Sıcaklık profilleri hem değer hem de trend bakımından iyi bir uyum göstermektedir. Brülör çıkış (0-200 mm) ve yanma odası aşağı akım bölgelerinde (300-600 mm) sıcaklık profilleri çok az da olsa farklılık göstermekteyken, yanma odasının orta bölgelerinde (200-300 mm) hemen hemen aynılaşmaktadır. Gaz kompozisyonundan bağımsız olarak maksimum sıcaklık değerleri alev bölgesindedir ve yanma odası çıkışına doğru sıcaklık değerleri, çevreye verilen ısı kayıplarına ve yanma odası duvar yüzeyi ile ısı transferine bağlı olarak azalmaktadır. %20CNG-%26,7 H_2 -%53,3 CO , %20CNG-%25 H_2 -%50 CO -%05 CO_2 , %20CNG-%23,4 H_2 -%46,6 CO -%10 CO_2 , %20CNG-%21,7 H_2 -%43,3 CO -%15 CO_2 , %20CNG-%20 H_2 -%40 CO -%20 CO_2 karışımları için maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla; 1145,71, 1139,9, 1133,72, 1128,28 ve 1118,56 K'dir. %20CNG-%26,7 H_2 -%53,3 CO karışımı yüksek ısı değerinden dolayı brülör

çıkışında en yüksek sıcaklık değerini oluşturmuş, karışım içeriğinde CO₂ miktarı arttıkça maksimum sıcaklık değeri azalmıştır.

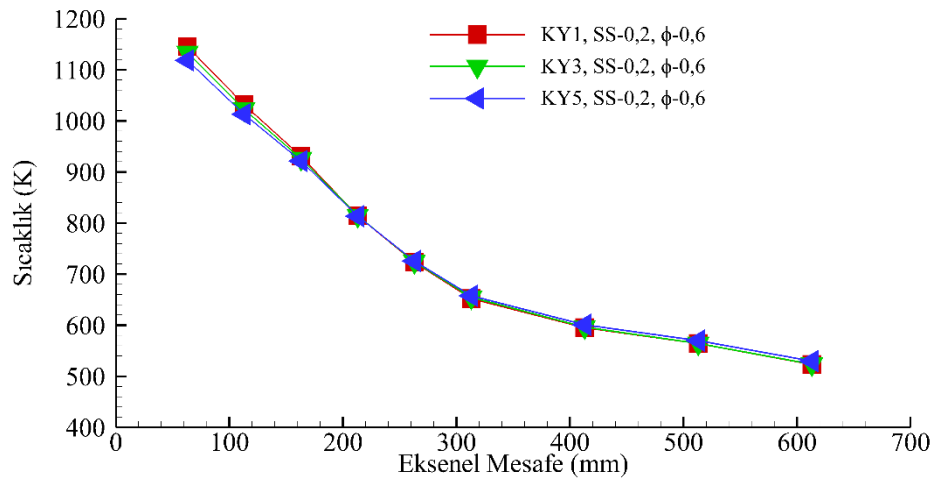
CO₂ seyreltiminin alev davranışı üzerindeki etkileri dört ana kategoride incelenebilir: (1) ısı kapasitesini (CO₂'nin ısı kapasitesi, N₂'den 1,68 kat daha yüksektir) ve adyabatik alev sıcaklığını düşürür, (2) kimyasal kinetikleri değiştirir (yüksek CO₂ seviyesi geri tepkime hızlarını yükseltir ve böylece H atomu kazancı azalır), (3) radyasyonla ısı kaybı yükselir (CO₂ kızıl ötesi aralıkta aktif bir molekül olduğundan), (4) yakıt karışımının difüzyon kabiliyeti değişir (CO₂, N₂'den daha yavaş yayılır) [2, 107, 109]. CO₂ ilavesinin bütün etkilerinin [109], alev sıcaklığını düşürdüğü düşünülmektedir fakat bu düşüş o kadar belirgin değildir. %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO ve %20CNG-%20H₂-%40CO-%20CO₂ karışımlarının maksimum sıcaklık değerleri arasındaki fark 27,15 K'dir.



Şekil 4. 3. Eksenel sıcaklık dağılımları (H₂/CO=0,5).

%20CNG-%26,7H₂-%53,3CO, %20CNG-%25H₂-%50CO-%05CO₂, %20CNG-%23,4H₂-%46,6CO-%10CO₂, %20CNG-%21,7H₂-%43,3CO-%15CO₂, %20CNG-%20H₂-%40CO-%20CO₂ karışımlarının yanma odası çıkış sıcaklık değerleri sırasıyla 523,4, 519,64, 523,65, 525,17, 529,65 K'dir. %20CNG-%25H₂-%50CO-%05CO₂ karışımı hariç, CO₂ miktarı arttıkça yanma odası çıkış sıcaklığı yükselmiştir. Karışım içeriğinde CO₂ varlığı, CO₂ + H → CO + H tepkimesinin hızını yükseltir ve H + O₂ → O + OH (zincir dallanma reaksiyonu) reaksiyonu baskılanır. Sonuç olarak, O, OH ve H radikal konsantrasyonları azalır ve düşük yanma yoğunluklu uzun (alev hem eksenel hem de radyal doğrultuda uzar) alevler oluşur [102]. CO₂ ile seyreltilmiş karışımların yüksek

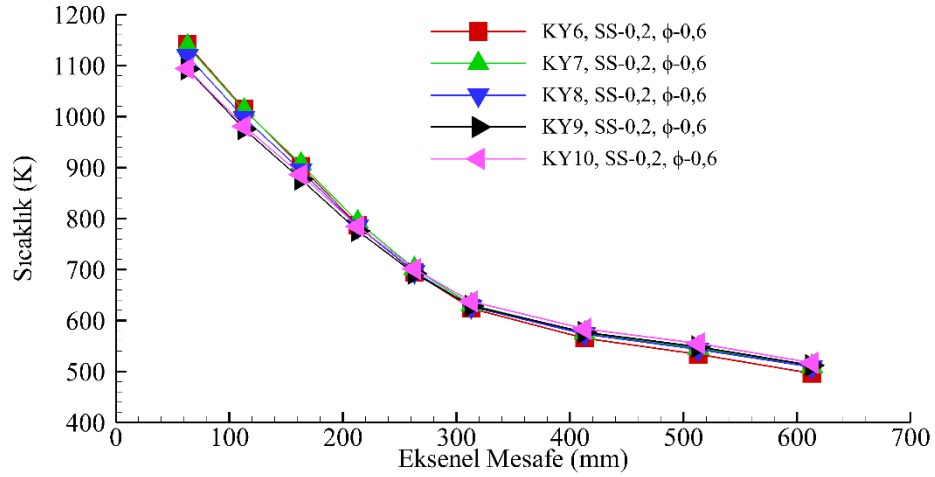
çıkış sıcaklıkları bu duruma dayandırılmıştır. %20CNG-%25H₂-%50CO-%05CO₂ karışımında ise görece yüksek hidrojen içeriği (ısı transfer karakteristiklerini iyileştirir) ile birlikte %5 CO₂ (artan radyasyonla ısı kaybı) içeriği bu karışımın yanma odası çıkış bölgesinde en düşük sıcaklık değerini oluşturmaya neden olmuştur. CO₂ seyreltiminin etkisini daha hassas bir şekilde incelemek için %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO, %20CNG-%23,4H₂-%46,6CO-%10CO₂ ve %20CNG-%20H₂-%40CO-%20CO₂ karışımlarının aksel sıcaklık profilleri Şekil 4.4'te görselleştirilmiştir. Brülör çıkış bölgesinde CO₂ seyreltiminin termal etkisinden dolayı düşük CO₂ içerikli yakıtlar daha yüksek sıcaklık dağılımı oluşturmuş, yanma odası aşağı akımında ise ilgili yakıtlar CO₂ ilavesinin kimyasal etkisinden dolayı (uzun alev boyu) tam tersi bir davranış sergilemişlerdir.



Şekil 4. 4. Aksel sıcaklık dağılımları (H₂/CO=0,5).

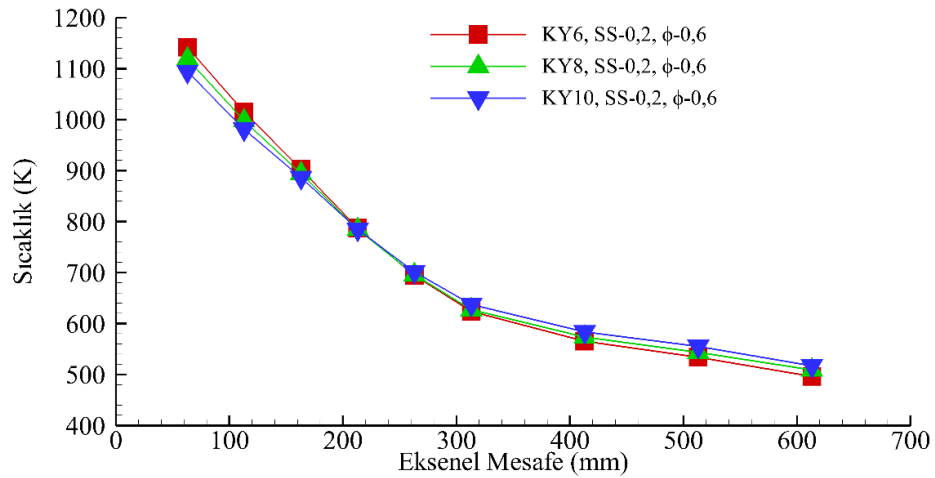
%20CNG-%40H₂-%40CO, %20CNG-%37,5H₂-%37,5CO-%05CO₂, %20CNG-%35H₂-%35CO-%10CO₂, %20CNG-%32,5H₂-%32,5CO-%15CO₂ ve %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımları (H₂/CO=1,0) için maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla 1142,02, 1138,15, 1119,3, 1093,14 ve 1094,03 K'dir (Şekil 4.5). H₂/CO oranı 0.5 olan karışımlara kıyasla alev bölgesinde maksimum sıcaklık değerleri çok fazla değişmemiş, alev sonrası bölgede ise (263-600 mm) bir miktar düşüş gözlenmiştir. H₂/CO oranı 0,5 olan karışımlarda alev bölgesinde daha yüksek sıcaklık değerleri, karbon monoksitin hidrojene kıyasla daha yüksek molar ısıtma ve adyabatik alev sıcaklığı değerlerinden, alev sonrası bölgede ise yüksek CO içerikli yakıtların (CO oksitlenmesi yavaşır) daha uzun alevler oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. Aynı şartlar, H₂/CO oranı 1,0 olan

karışımların yanma odası çıkış sıcaklık değerlerinin, H_2/CO oranı 0,5 olan karışımlara kıyasla düşmesine de neden olmuştur. Bu düşüş, CO_2 içermeyen yakıt karışımında (yaklaşık 27 K) dörtlü yakıt karışımlarına kıyasla (10 K civarı) çok daha yüksektir.



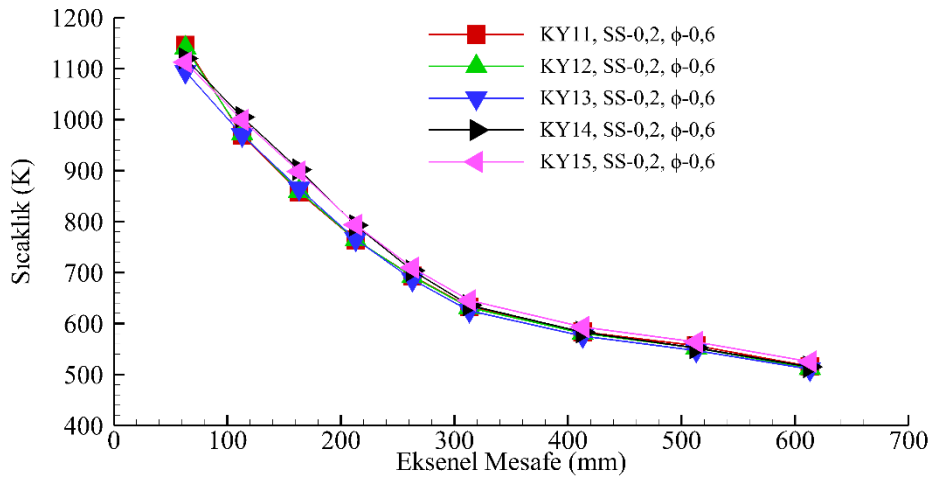
Şekil 4. 5. Eksenel sıcaklık dağılımları ($H_2/CO=1,0$).

H_2/CO oranının artması, CO_2 ilavesi ile sıcaklık profillerinde meydana gelen değişikliklerin belirginleşmesini sağlamıştır (Şekil 4.6). H_2/CO oranı 0,5 olan karışımlarda olduğu gibi en yüksek CO_2 içeriğine sahip karışım, yanma odası çıkışında en yüksek sıcaklık değerlerini oluşturmuştur. Bahsi geçen karışımlardan farklı olarak CO_2 içermeyen yakıt karışımı, aynı bölgede en düşük sıcaklık değerlerini oluşturmuştur.



Şekil 4. 6. Eksenel sıcaklık dağılımları ($H_2/CO=1,0$).

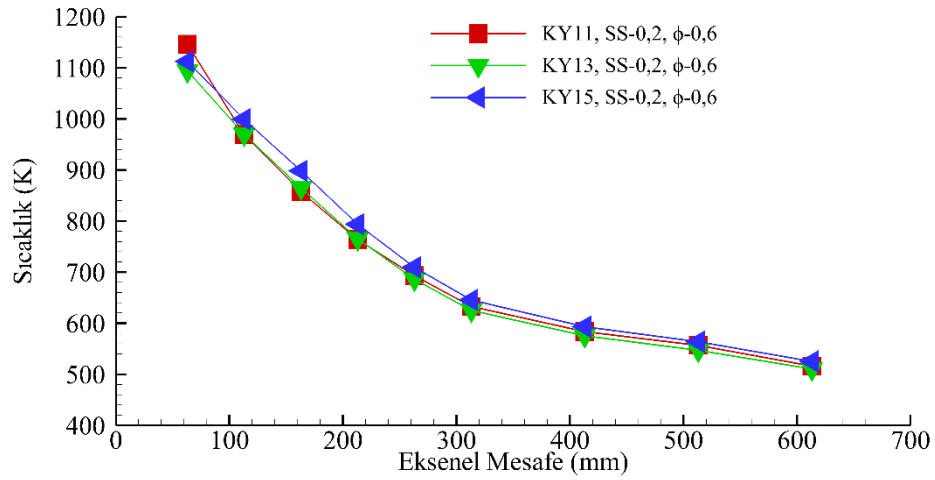
%20CNG-%53,3H₂-%26,7CO, %20CNG-%50H₂-%25CO-%05CO₂, %20CNG-%46,6H₂-%23,4CO-%10CO₂, %20CNG-%43,3H₂-%21,7CO-%15CO₂ ve %20CNG-%40H₂-%20CO-%20CO₂ karışımlarının maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla; 1146,8, 1140,73, 1094,37, 1119,91 ve 1112,55 K'dir. Bu değerler, H₂/CO oranı 0,5 olan karışımlara kıyasla brülör çıkış bölgesinde daha yüksek, yanma odası çıkış bölgesinde ise daha düşüktür (Şekil 4.7). Alev sıcaklığındaki yükselme, ilgili karışımların diğer H₂/CO oranlarındaki karışımlara kıyasla daha yüksek ısı değerlerinden kaynaklanmaktadır. Çıkış bölgesindeki azalma ise tamamen alev boyu ile alakalıdır (alev boyunun kısalması çıkış sıcaklık değerlerinin azalmasına neden olmuştur).



Şekil 4. 7. Eksenel sıcaklık dağılımları (H₂/CO=2,0).

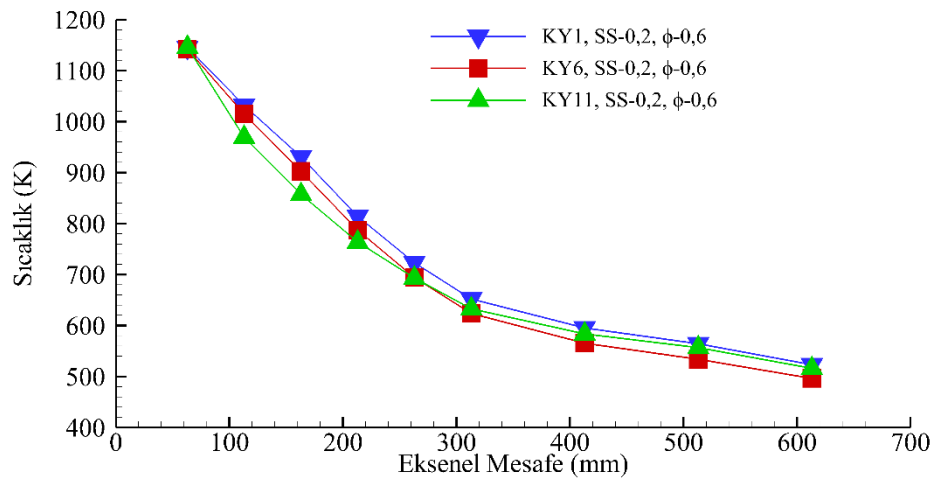
H₂/CO oranının 1,0'den 2,0'ye artması, CO₂ ilavesinin sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisini daha da belirgin hale getirmiştir (Şekil 4.8). H₂/CO oranı arttıkça, CO₂ ilavesi ile sıcaklık profilleri birbirlerinden uzaklaşmıştır.

Ref. [20], H₂/CO oranının alev sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmediğini ancak yakıt çeşitliliği ile değişen kimyasal, termal ve taşınım özelliklerinin; reaksiyon hızı, yanma hızı, ısı salınımı ve alev şeklini önemli ölçüde değiştirdiğini belirtmiştir. Sıcaklık üzerinde benzer bir durum mevcut çalışmada da gözlemlenmiştir. Bu oranın alev şekli üzerindeki etkisi ise anlık alev görüntüleri incelenirken değerlendirilecektir. Son olarak, %20 CO₂ ile seyreltilmiş karışımlar, H₂/CO oranından bağımsız olarak alev sonrası bölgede en yüksek ve en üniform sıcaklık dağılımlarını oluşturmuşlardır.



Şekil 4. 8. Eksenel sıcaklık dağılımları (H₂/CO=2,0).

CO₂ seyreltiminin, eksenel sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi değerlendirildikten sonra sentetik gaz kompozisyonunun yanma karakteristiklerine etkisi incelenecektir. Bu amaçla; %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO, %20CNG-%40H₂-%40CO ve %20CNG-%53,3H₂-%26,7CO karışımlarının ve CO₂ içeriklerinden dolayı sentetik gazları daha iyi temsil etmeleri sebebiyle %20CNG-%20H₂-%40CO-%20CO₂, %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ ve %20CNG-%40H₂-%20CO-%20CO₂ karışımlarının alev davranışları ayrıca değerlendirilecektir. Şekil 4.9'da %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO, %20CNG-%40H₂-%40CO ve %20CNG-%53,3H₂-%26,7CO karışımlarının 0,2 swirl sayısında ve 0,6 eşdeğerlik oranında eksenel sıcaklık dağılımları görülmektedir.

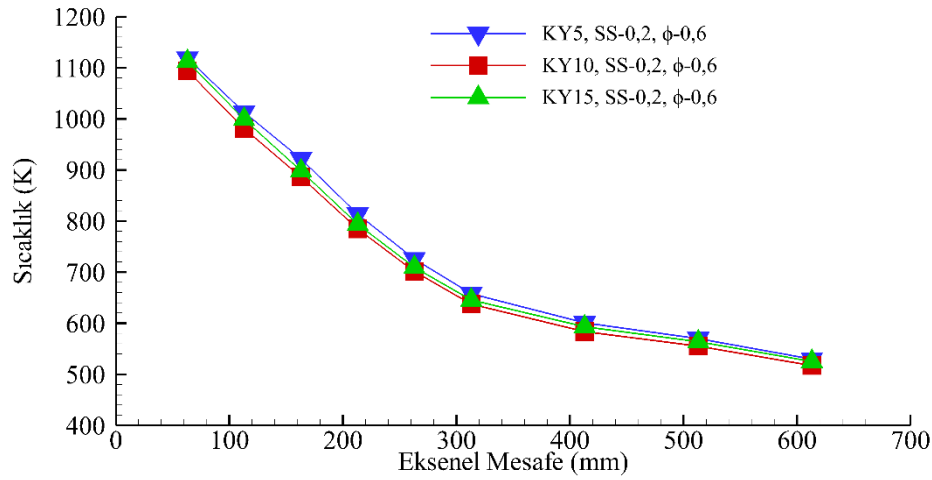


Şekil 4. 9. Eksenel sıcaklık dağılımları.

Gaz karışımından bağımsız olarak maksimum sıcaklık değerleri birbirlerine çok yakındır. Bu durum, daha önce de belirtildiği gibi H_2/CO oranının alev sıcaklığını çok fazla değiştirmedeğini göstermektedir. Alev sonrası bölgede sıcaklık değerleri azalmış (0-300 mm) ve azalma miktarı, %20CNG-%53,3 H_2 -%26,7CO karışımı için en yüksek değerini almıştır. Gaz karışımlarında hidrojen içeriği azaldıkça bu miktar düşmüştür. Yanma odasının ileriki bölümlerinde (300-600 mm) sıcaklık değerleri daha da azalmış ve bu azalma diğer karışımlara kıyasla bahsi geçen karışım için en düşük değeri almıştır.

Ref. [103], birçok sentetik gaz karışımının H_2/CO oranı 0,25'den daha yüksek olduğu için sentetik gaz yanmasının kimyasal kinetik ve taşınım yönlerinin hidrojen tarafından kontrol edildiğini belirtmiştir. Karışım içeriğinde H_2 varlığı, hidrojenin yüksek alev hızı ve iyi difüzyon kabiliyetinden dolayı kimyasal reaksiyonları hızlandırır ve türbülanslı zaman skalalarını kısaltır. Aksine, karbon monoksit oksidasyon kinetikleri ise hidrojene kıyasla çok daha yavaştır. Bütün bu hususlar göz önünde bulundurulduğunda, alev içinde öncelikli olarak hidrojenin, daha sonra sentetik gaz karışımının diğer yanabilir bileşenlerinin tüketildiği sonucuna ulaşılabilir. Karışım içeriğinde hidrojen miktarı arttıkça alev önü yukarı akıma doğru ilerler (hidrojenin yüksek reaksiyon kinetiklerinden dolayı-yüksek yanma yoğunluğu) ve kısa alevler oluşur. Yüksek CO içerikli karışım durumunda ise düşük yanma yoğunluklu uzun alevler oluşur. Hidrojence zengin karışımların yanma odasının orta bölgelerinde daha düşük, çıkış bölgesinde ise daha yüksek sıcaklık dağılımları oluşturmalarının bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. %20CNG-%26,7 H_2 -%53,3CO karışımının yanma odası aşağı akımında farklı davranışı, ilgili karışımın yüksek CO içeriğinden kaynaklanan yüksek alev uzunluğundandır.

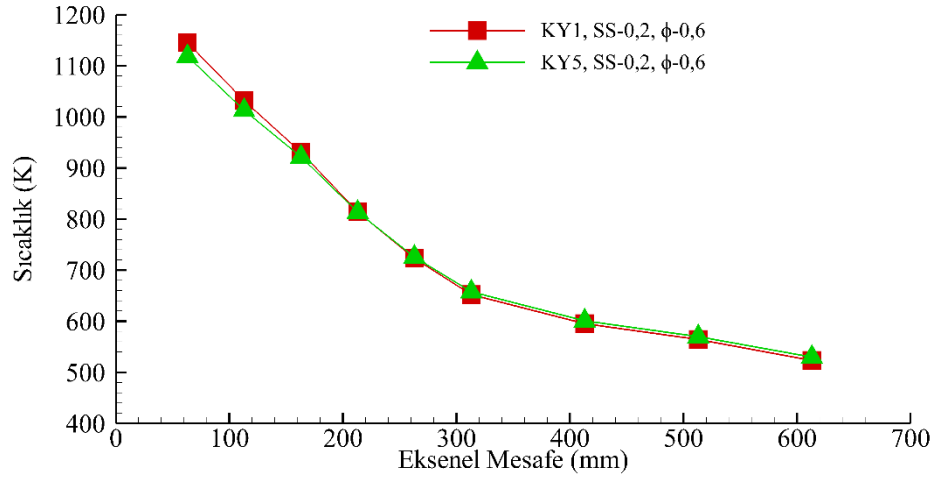
%20 CO_2 ilavesi, maksimum sıcaklık değerlerini birbirlerinden az da olsa uzaklaştırmıştır (Şekil 4.10). %20CNG-%20 H_2 -%40CO-%20 CO_2 karışımı, en düşük ısı değere sahip olmasına rağmen en yüksek sıcaklık dağılımını oluşturmuştur. Bu durum, daha önce de belirtildiği gibi CO'in yüksek adyabatik alev sıcaklığından kaynaklanmaktadır. Dahası, hidrojen ve karbon monoksitin tam yanma için ihtiyaç duydukları oksijen miktarları aynıdır (aynı miktar nitrojen ile seyreltilme anlamına gelir). CO_2 içermeyen karışımlardan farklı olarak, CO_2 içeren karışımların yanma odası boyunca sıcaklık düşüşleri aynı trendi izlemektedir. CO_2 ilavesi ile artan kütle akış oranları, karışımın kimyasal ve taşınım özelliklerindeki değişiklikler (yavaş reaksiyonlar) bu duruma sebep olmuş olabilir.



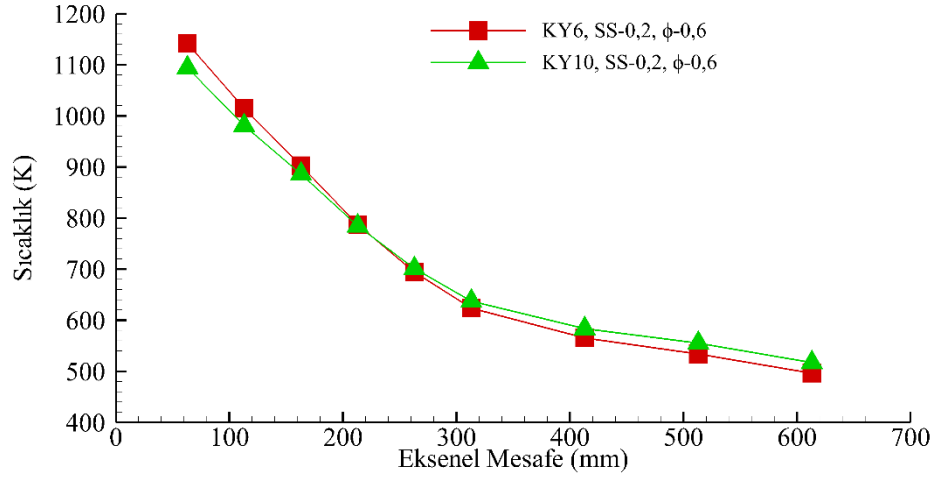
Şekil 4. 10. Eksenel sıcaklık dağılımları.

Yakıt kompozisyonu etkisini daha iyi incelemek için CO_2 içeren ve içermeyen karışımların sıcaklık profilleri, aynı H_2/CO oranında, ayrı ayrı çizilmiştir (Şekil 4.11). Test edilen bütün karışımların sıcaklık profilleri hem değer hem de trend bakımından iyi bir tutarlılık göstermiş ve bu tutarlılık, H_2/CO oranı azaldıkça artmıştır (H_2/CO oranı 0,5 olan karışımların sıcaklık profilleri hemen hemen çakışmaktadır). Bununla birlikte, CO_2 içermeyen karışımların sıcaklık değerleri aşağı akımda daha hızlı azalmış ve bu azalma H_2/CO oranı arttıkça daha belirgin hale gelmiştir. Bu sonuçlar ışığında, yakıt kompozisyonundaki değişimlerin alev davranışını, sadece yanma sıcaklığı bakımından önemli ölçüde değiştirmediği sonucu çıkarılabilir. Ancak, yakıcı termal gücü 3 kW değerinde sabit tutulduğundan, alev uzunluğu yakıcı boyu ile kıyaslandığında çok düşüktür ve sonuçta sadece ilk termoçift aleve maruz kalmaktadır. Bu nedenle yakıt kompozisyonunun alev sıcaklığına etkisi, alev içerisinde hassas sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilerek daha iyi anlaşılabilir. Ayrıca, yakıt kompozisyonunun kirletici emisyonlara, dinamik ve statik alev davranışlarına etkisinin de incelenmesi yakıt kompozisyonu etkisinin daha iyi anlaşılması açısından son derece önemlidir.

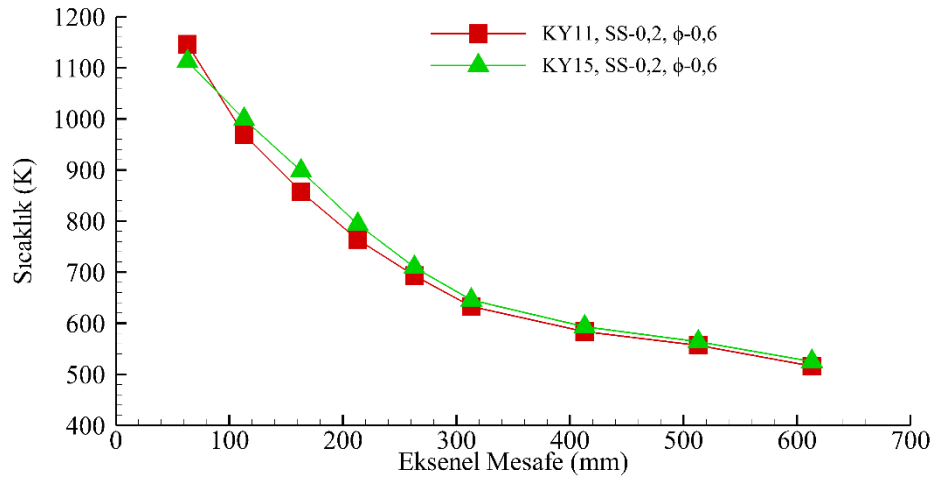
Yakıt kompozisyonundaki değişiklikler, tepkiyen bir akıştaki kimyasal ve fiziksel süreçleri önemli ölçüde etkileyerek alev şeklinin, alev hızının ve kütle tüketim hızlarının değişmesine neden olur [29, 108]. CO_2 ilavesinin alev şekli üzerindeki etkisini incelemek için H_2/CO oranı 2,0 olan karışımların anlık alev görüntüleri incelenmiştir. Bütün alev görüntüleri, aynı pozlama süresinde ve aynı odak uzaklığından alınmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 11. Eksenel sıcaklık dağılımları. H_2/CO : (a) 0,5, (b) 1,0, (c) 2,0.

Bütün alevler girdap üreticinin hem iç hem de dış halkasına sıkıca tutunmuş ve sabitlenmiştir. CO₂ ilavesi, alev stabilizasyon noktasını değiştirmemiştir (Şekil 4.12).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4. 12. H₂/CO oranı 2,0 olan karışımların anlık alev görüntüleri. CO₂ içeriği: a) 0, b) % 5, c) %10, d) %15, e) %20.

Karışım içeriğinde CO₂ miktarı arttıkça alev hem eksenel doğrultuda uzamış hem de brülör çıkışından itibaren artan eksenel mesafeye bağlı olarak radyal olarak dışa doğru yayılmıştır. Ref. [109]'in çalışmasına benzer bir şekilde alev çapı artmıştır (CO₂ varlığı, oksijenin difüzyon kabiliyetini azaltır ve bu durum tam yanma için daha fazla alev yüzey alanı gerektirir). OH, geniş ölçekte yanma yoğunluğunu belirleyen önemli bir ara türdür. Yüksek OH konsantrasyonu, yüksek yanma yoğunluğunun ve kısa alevlerin göstergesidir. Aksine, CO₂ ilavesi $H + O_2 = O + OH$ ve $O + H_2O = 2OH$ reaksiyonlarını baskılayarak yanma yoğunluğunun azalmasına ve daha uzun alevlerin oluşmasına neden olur [102, 109]. Yüksek CO₂ içerikli yakıtların daha uzun alevler oluşturması bu durumdan kaynaklanmaktadır.

Hidrojenin düşük molekül ağırlığı, yanmamış yakıt/hava karışımının difüzyon kabiliyetini artırır ve böylece hidrojenin alev önüne konvektif taşınım süresi kısalmır. Bu durumda yanma yoğunluğu artar, daha kısa ve kompakt alevler oluşur [2, 90]. Yüksek hidrojen içeriğinin bir sonucu olarak %20CNG-%53,3H₂-%26,7CO karışımı, en kısa alevi oluşturmuştur (Şekil 4.13). Karışım içeriğinde CO miktarı arttıkça görünür alev uzunluğu (CO'nun yavaş oksidasyon karakteristiklerinden dolayı-yanma aşağı akımda tamamlanır) artmıştır. H₂/CO oranı 0,5 ve 1,0 olan karışım alevleri, artan eksenel mesafe ile radyal olarak dışa doğru açılmış, H₂/CO oranı 2,0 olan karışım alevi ise aynı aralıkta brülör merkezine doğru toplanmıştır.

Düşük eşdeğerlik oranının bir sonucu olarak, bir başka ifadeyle kurum oluşumu için yanmamış hidrokarbon bırakmayan yeterli oksijenle yanma şartlarında mavimsi alevler gözlenmiştir [90]. Karışım içeriğinde CO₂ miktarı azaldıkça görece artan CO içeriğinden dolayı (azalan alev boyuna rağmen) daha parlak alevler gözlemlenmiştir (Şekil 4.12). CO₂ ise mavimsi alevler oluşturma eğilimindedir. Sentetik gazlardaki hidrojen içeriği sağladığı yüksek sıcaklıklar nedeniyle diğer yakıt bileşenlerinin oksidasyonunu kolaylaştırır. Ayrıca, yakıtta bulunan karbon monoksit ve hidrojenin tam oksidasyonunun mavimsi alevler oluşturduğu rapor edilmiştir [102]. 2,0 H₂/CO oranına sahip yakıt karışımının diğer karışımlara kıyasla daha mavimsi alevler oluşturması bu yüzdendir (Şekil 4.13). Son olarak, yüksek hidrojen içerikli sentetik gazlar alev sonrası bölgede daha az parlaklık gösterirler. Bu durum azalan C radikallerinden dolayı kurum oluşumu eğiliminin azaldığı anlamına gelir [90]. Test edilen bütün H₂/CO oranlarında CO₂

ilavesinin alev yapısına etkisi benzer olduğundan H_2/CO oranı 0,5 ve 1,0 olan karışımlara ait alev görüntülerine yer verilmemiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4. 13. CNG/ H_2 /CO karışımlarının anlık alev görüntüleri. H_2/CO oranı: a) 2,0, b) 1,0, c) 0,5.

Radyal sıcaklık ölçümleri üç farklı eksenel (6,3, 16,3 ve 26,3 cm) ve dört farklı radyal (yanma odası merkezinden itibaren 0, 5, 10 ve 16 cm) pozisyonda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14, 4.15 ve 4.16'da H_2/CO oranı sırasıyla; 0,5, 1,0 ve 2,0 olan sentetik gaz karışımlarına ait radyal sıcaklık profilleri görülmektedir. H_2/CO oranından, radyal ve eksenel mesafeden bağımsız olarak test edilen tüm sentetik gaz karışımları hem değer hem de eğilim bakımından benzer bir davranış göstermiştir.

Eksenel sıcaklık dağılımlarından farklı olarak radyal sıcaklık değerleri, artan eksenel mesafeyle artmıştır (alev merkezi hariç). Beklenildiği gibi, alev merkezinden radyal olarak yakıcı duvarına doğru uzaklaşıldıkça sıcaklık değerleri azalmıştır. Alev merkezi

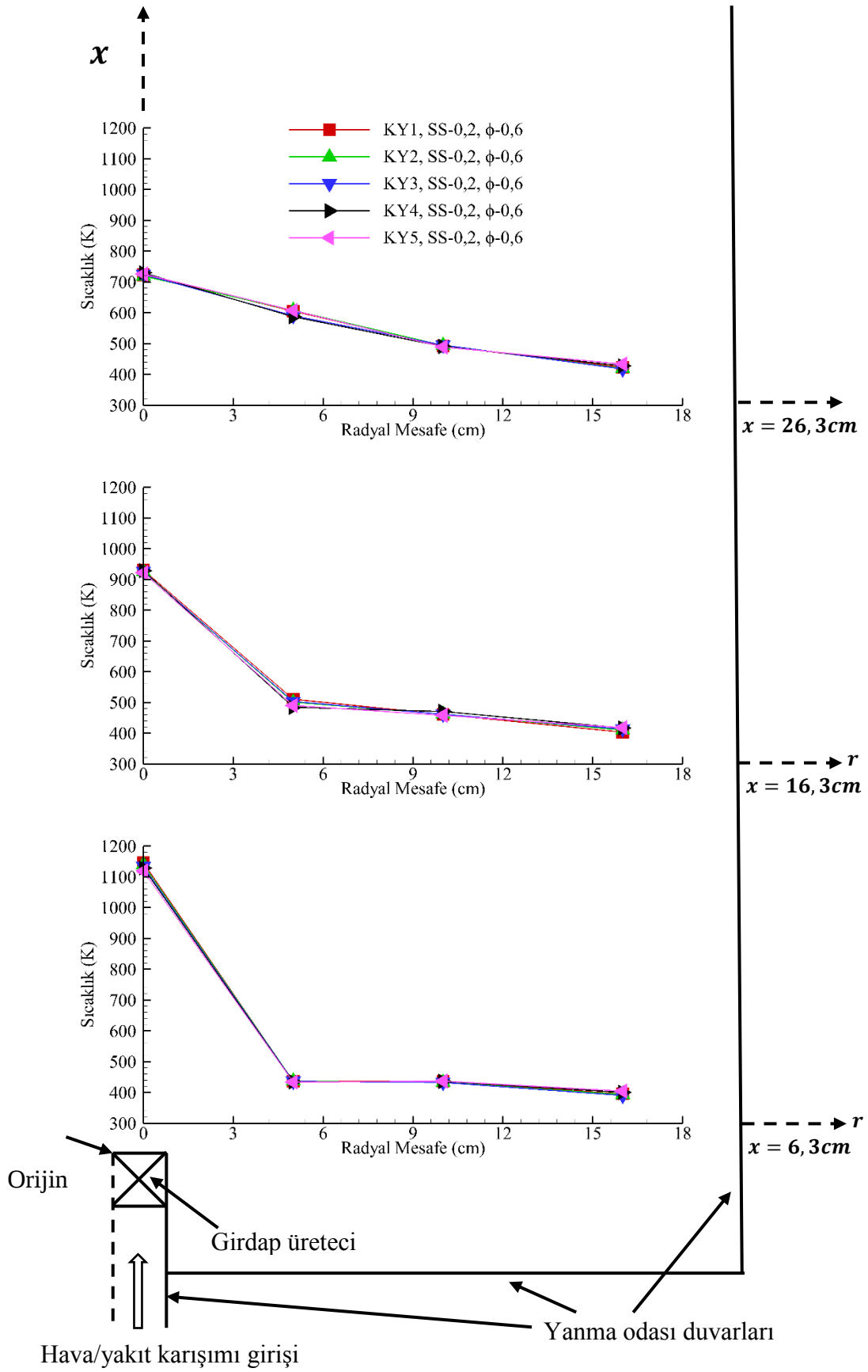
ile 5 cm radyal mesafe arasında sıcaklık değerleri (6,3 cm eksenel mesafede), yakıt bileşiminden bağımsız olarak hızlı bir şekilde düşmüştür. Eksenel mesafe arttıkça bu azalma gecikmiş ve 26,3 cm’de, sıcaklık değerleri hemen hemen lineer bir düşüş göstermiştir.

6,3 cm eksenel mesafede, 5-10 cm radyal mesafeler arasında sıcaklık değerlerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Bu noktalar arasında sıcaklık değerleri hemen hemen aynıdır. Yakıt kompozisyonuna bağlı olarak çok az miktarda artış ve düşüşler gözlemlenmiştir (en kötü durumda 10 K’den fazla değildir). Daha önce belirtildiği gibi CO₂ ilavesi, yakıt karışımının ısı kapasitesini artırır ve adyabatik alev sıcaklığını düşürür. Bahsi geçen artışlar, CO₂ ilavesi ile genişleyen alev çapından kaynaklanmaktadır. Aynı radyal aralıkta eksenel mesafenin artması, yakıt kompozisyonundan bağımsız olarak sıcaklık değerlerinin sürekli düşmesine neden olmuş ve 26,3 cm eksenel mesafede bu düşüş, en yüksek değerini almıştır. 10-16 cm radyal uzaklıklar arasında sıcaklık değerleri test edilen bütün eksenel mesafelerde düşmüştür. Eksenel sıcaklık değerlerinde olduğu gibi CO₂ ilavesi, H₂/CO oranı 0,5 ve 1,0 olan karışımların radyal sıcaklık değerlerini çok fazla değiştirmemiştir. Ancak, H₂/CO oranı 2,0 olan karışımların sıcaklık profillerinde görece belirgin değişiklikler oluşturmuştur.

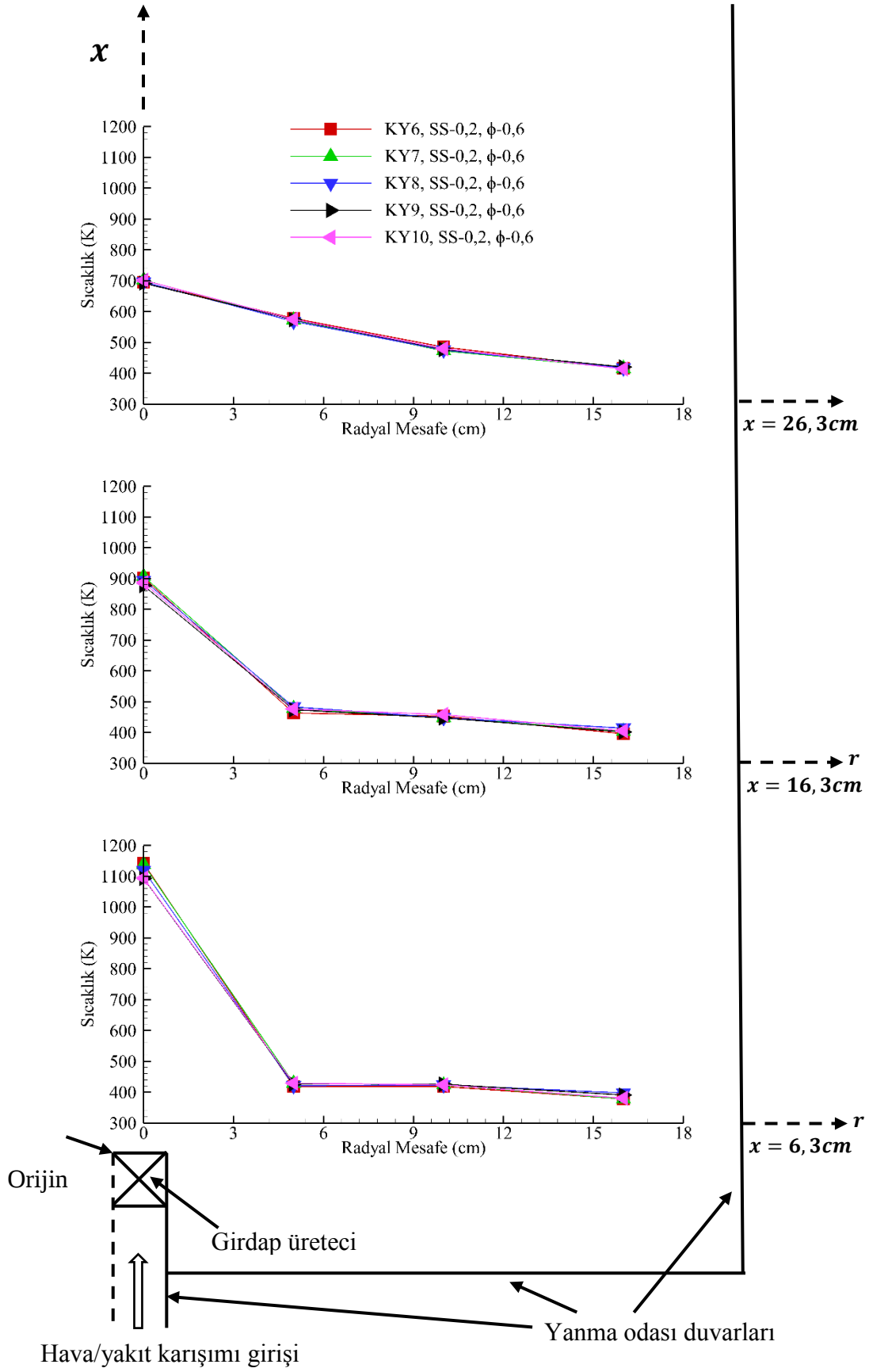
H₂/CO oranının radyal sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisini incelemek için %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO, %20CNG-%40H₂-%40CO ve %20CNG-%53,3H₂-%26,7CO karışımlarının radyal sıcaklık profilleri Şekil 4.17’de verilmiştir.

Test edilen bütün eksenel mesafelerde, %20CNG-%40H₂-%40CO karışımı 0-16 cm radyal uzaklıklar arasında en düşük, %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO karışımı ise en yüksek sıcaklık dağılımı oluşturmuştur. Bu durum, hidrojen ve karbon monoksitin birbirine zıt reaksiyon kinetiklerinden kaynaklanmaktadır (farklı taşınım ve kimyasal özelliklerinden). 0-5 cm radyal mesafeler arasında, bütün sıcaklık profilleri (6,3 cm eksenel mesafede) iyi bir uyum içerisinde. Eksenel mesafe arttıkça bu uyum azalmıştır.

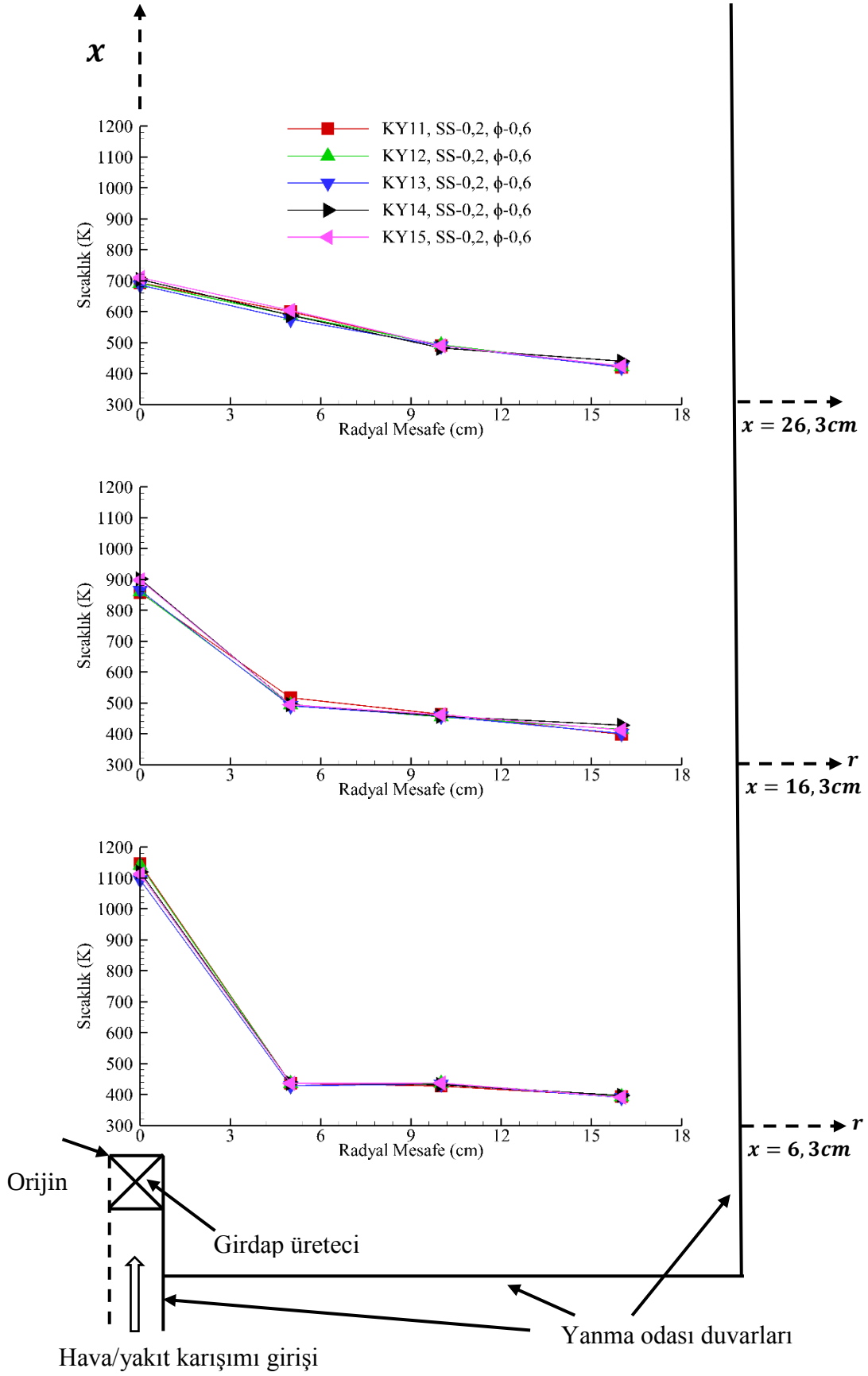
5-10 cm radyal mesafeler arasında (6.3 cm eksenel mesafede) alev varlığından dolayı sıcaklık değerleri çok fazla değişmemiştir. Yanma odası aşağı akımında sıcaklık değerleri (aynı aralıkta), daha belirgin bir şekilde azalmıştır. Radyal uzaklığın daha da artması durumunda eksenel mesafeden bağımsız olarak sıcaklık değerleri azalmıştır.



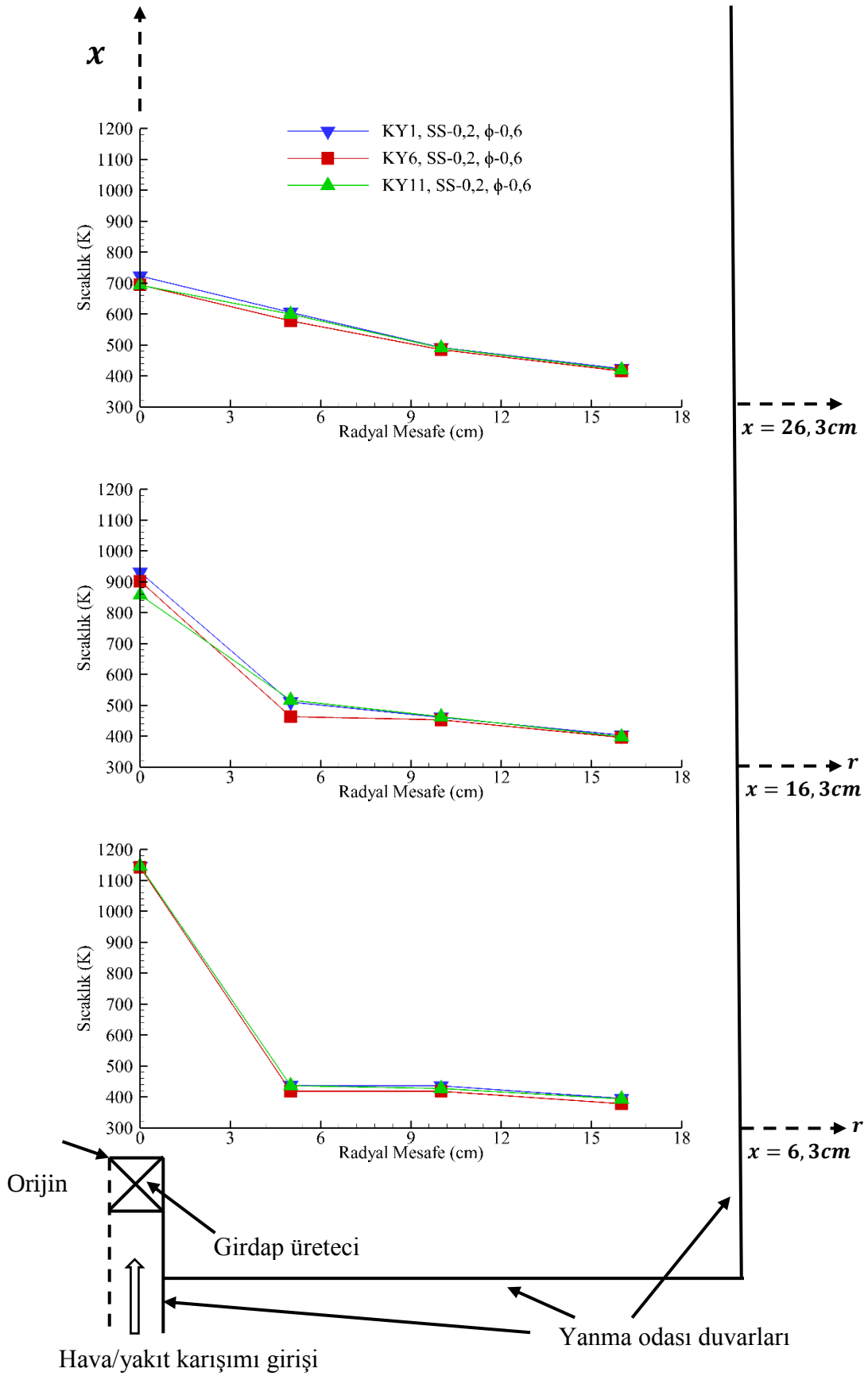
Şekil 4. 14. Radyal sıcaklık dağılımları ($H_2/CO=0,5$).



Şekil 4. 15. Radyal sıcaklık dağılımları ($H_2/CO=1,0$).



Şekil 4. 16. Radyal sıcaklık dağılımları ($H_2/CO=2,0$).



Şekil 4. 17. Radyal sıcaklık dağılımları.

Yanma sonu gazlarının numunelendirilmesi üç farklı radyal (yanma odası merkezinden 5, 10 ve 16 cm uzakta) ve eksenel (6,3, 16,3 ve 26,3 cm) pozisyonda (ayrıca yanma odası çıkışında), her ölçüm noktasında en az bir dakika bekleyerek gerçekleştirilmiştir.

Alev bölgesindeki yüksek sıcaklıklar nedeniyle kimyasal türler bu bölgede son derece reaktiftir ve kimyasal reaksiyonlar ilerlemeye devam etmektedir. Bu gerekçeyle alev bölgesinde kararlı emisyon ölçüm değerleri elde edilememiş ve radyal emisyon ölçümleri alev merkezinden başlatılamamıştır.

CO₂ emisyonlarına katkı sağlayan sentetik gaz bileşenleri karbon monoksit, hidrokarbonlar ve karbon dioksittir. Şekil 4.18’de toplam egzoz gazlarının yüzdesi olarak H₂/CO oranı 0,5 olan sentetik gaz karışımlarının radyal CO₂ profilleri görülmektedir. 6,3 ve 16,3 cm eksenel mesafelerde, H₂/CO oranı 0,5 olan karışımların CO₂ emisyonları, 5-10 cm radyal uzaklıklar arasında artmış, radyal uzaklık arttıkça (10-16 cm) emisyon değerleri azalmıştır. Ancak, bu azalma 6,3 cm eksenel mesafede daha belirgindir. 26,3 cm eksenel mesafede ise CO₂ emisyonları, artan radyal mesafe ile sürekli azalmıştır. Eksenel mesafeden bağımsız olarak, %20CNG-%21,7H₂-%43,3CO-%15CO₂ ve %20CNG-%20H₂-%40CO-%20CO₂ karışımları, azalan CO içeriklerine rağmen en yüksek CO₂ emisyonu dağılımlarını oluşturmuştur. Bu durum, ilgili karışımların yüksek CO₂ içeriklerinden kaynaklanmaktadır. Karışım içeriğinde CO₂ miktarı arttıkça çevreye salınan CO₂ miktarı da artmıştır.

H₂/CO oranı 0,5’den 1,0’e yükseldiğinde (Şekil 4.19) CO₂ ilavesinin CO₂ emisyonlarına etkisi farklılaşmıştır. 16,3 cm eksenel mesafe hariç %20CNG-%40H₂-%40CO karışımı, 5-10 cm radyal mesafeler arasında en yüksek CO₂ emisyonlarını oluşturmuştur. Artan hidrojen içeriği reaksiyon kinetiklerini iyileştirmiş ve CO’nun CO₂’e dönüşme oranı yükselmiştir. Hidroksil radikali ile reaksiyonların aktivasyon enerjisi, atomik veya moleküler oksijenli reaksiyonlarınkinden çok daha düşüktür. Bu nedenle hidroksil, yanma sürecinin tamamlanma derecesinin belirlenmesinde önemli bir ara türdür. Belirli bir karışımın H₂ kesrindeki bir artış dolaylı olarak net reaksiyon hızını arttıracaktır (artan OH kesri ile) [68].

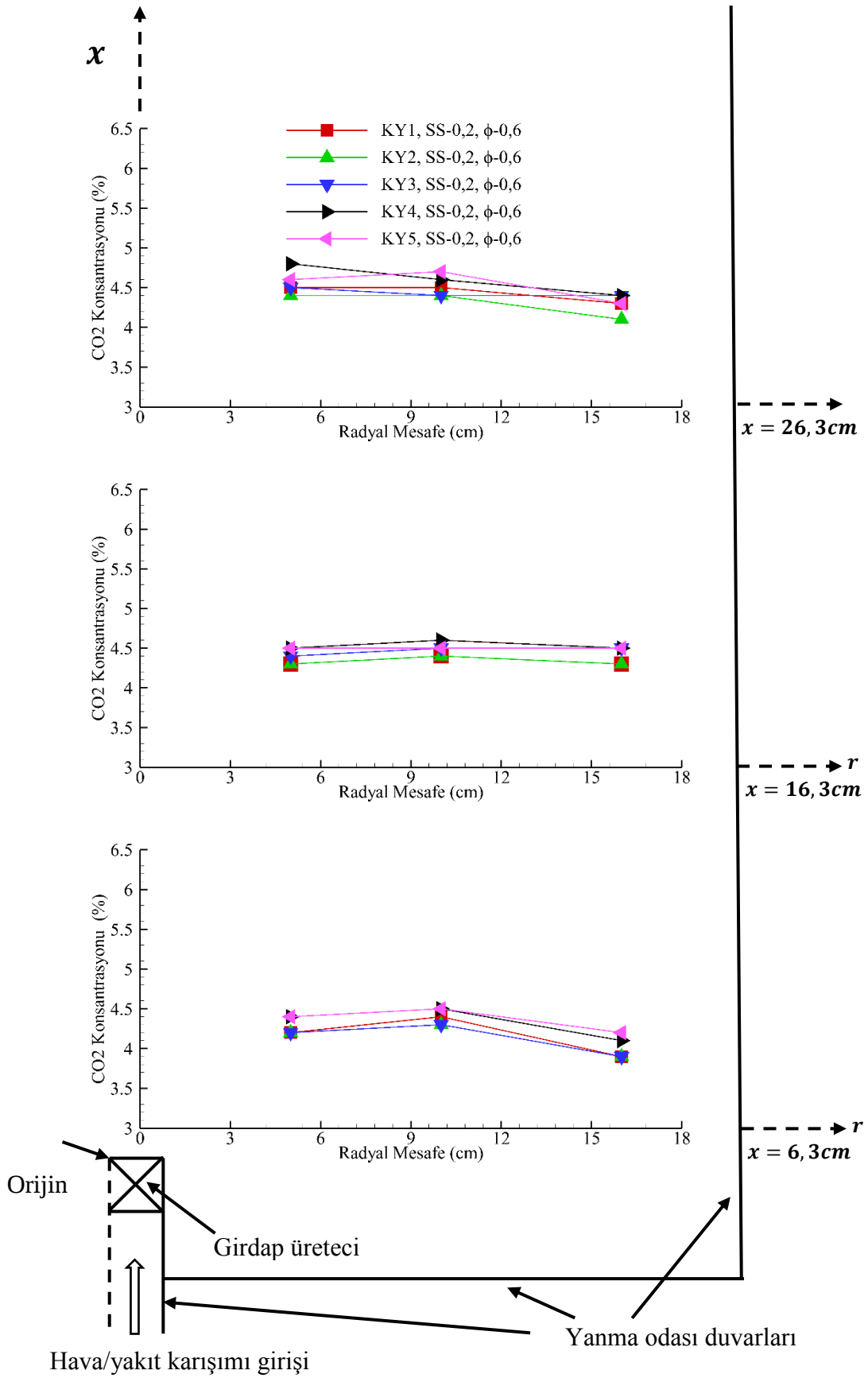
Sentetik gaz karışımındaki hidrojen miktarı (dolaylı olarak, H atomu içeren radikaller) CO’nun hızlı oksidasyon yollarını (OH radikalini gerektirir) modifiye ederek CO’nun CO₂’ye dönüşüm oranını olumlu şekilde etkiler [90, 107, 108, 110].

CO₂ ilavesi, daha önce belirtildiği gibi, OH konsantrasyonunu azaltarak yanma yoğunluğunun azalmasına neden olur. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımı, düşük yanma yoğunluğuna rağmen yüksek CO₂ içeriğinden dolayı daha az CO₂ içeren gaz karışımlarına kıyasla daha fazla CO₂ salınımına neden olmuştur.

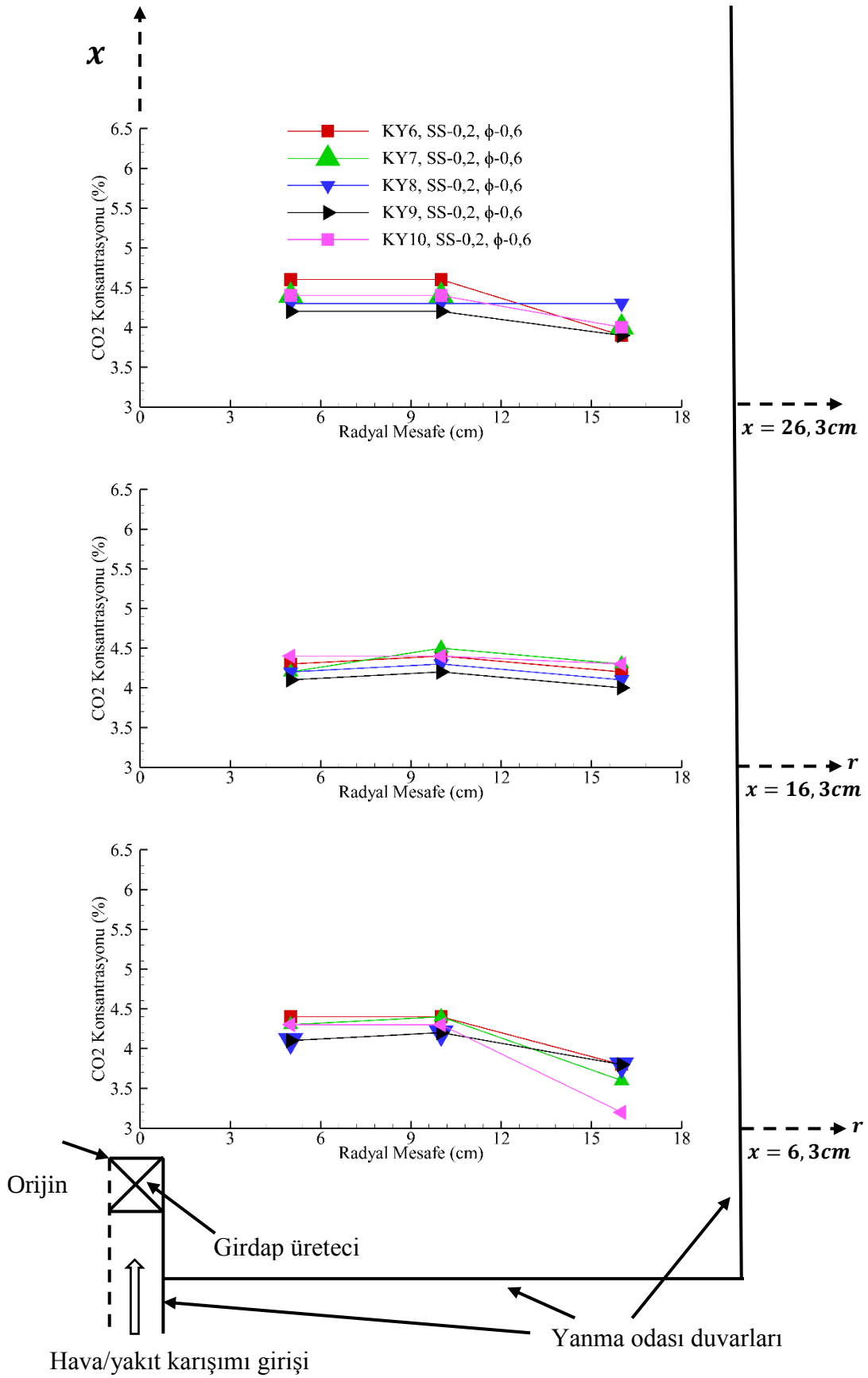
H₂/CO oranı 0,5 olan karışımlara kıyasla (tüm eksenel mesafelerde) H₂/CO oranı 1,0 olan karışımların CO₂ emisyonu değerleri, 5-10 cm radyal mesafeler arasında çok fazla değişmemiştir. Bu husus dışında, emisyon profilleri her iki H₂/CO oranında benzer bir eğilim göstermiştir. 26,3 cm eksenel mesafede %20CNG-%35H₂-%35CO-%10CO₂ karışımı, tüm radyal ölçüm noktalarında aynı trendi göstermiştir.

H₂/CO oranı 2,0 olan karışımlarda hidrojen miktarı artmış fakat karbon monoksit miktarı azalmıştır. Başka bir deyişle, reaksiyon kinetikleri daha da iyileşmiştir. %20CNG-%40H₂-%20CO-%20CO₂ karışımı, test edilen bütün eksenel ve radyal mesafelerde en yüksek CO₂ dağılımını oluşturmuştur (Şekil 4.20). Ref. [102], sentetik gaz karışımının reaktif CO bileşimindeki artışın oksidasyon hızını, $\text{CO} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ reaksiyonu vasıtasıyla artırdığını rapor etmiştir (düşük eşdeğerlik oranlarında CO, H₂'den daha baskındır). İlgili karışımın yüksek CO₂ emisyonu değerleri, içeriğindeki CO₂'den kaynaklanmaktadır.

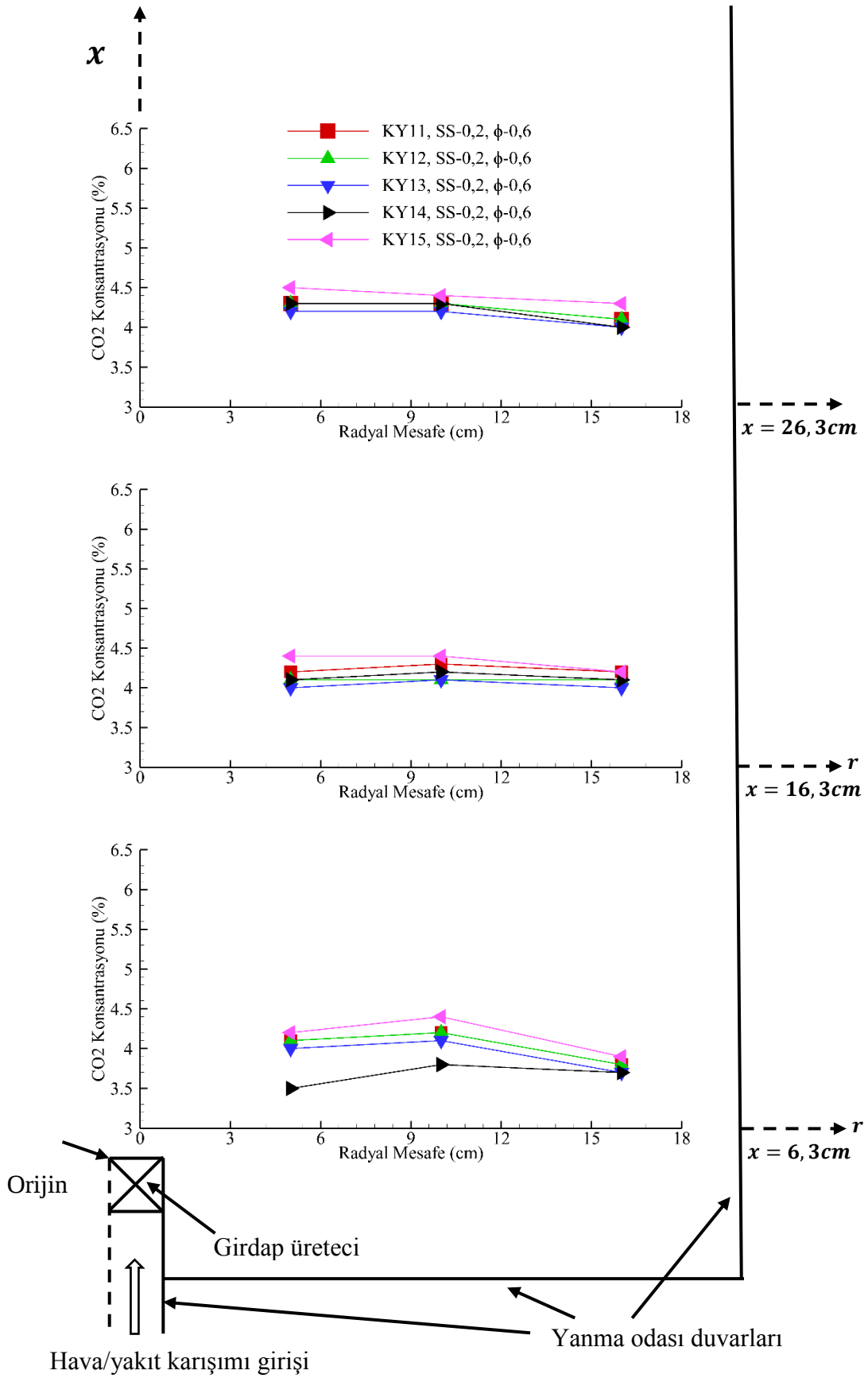
Yakıt kompozisyonunun CO₂ emisyonlarına etkisini değerlendirmek için %20CNG-%53,3H₂-%26,7CO, %20CNG-%40H₂-%40CO ve %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO karışımlarının radyal CO₂ profilleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.21). Eksenel mesafeden bağımsız olarak %20CNG-%40H₂-%40CO karışımı, 5-10 cm radyal uzaklıklar arasında en yüksek CO₂ dağılımını oluşturmuştur. Bu durum, %20CNG-%40H₂-%40CO karışımının görece yüksek CO ve H₂ içeriklerinden kaynaklanmaktadır. Aynı radyal aralıkta test edilen bütün karışımların CO₂ emisyonları çok az değişmiştir (artar veya belirli bir değerde sabitlenir). Radyal uzaklığın daha da artması ile emisyon değerleri önemli ölçüde azalmıştır. Eksenel mesafenin CO₂ emisyon profillerini değer bakımından pek fazla etkilemediği tespit edilmiştir. Karbon monoksitin karbon dioksit'e dönüşme oranı tam yanma için yeterli miktarda hava olduğunda, yüksek sıcaklıkların varlığında ve yakıt/hava arasında iyi bir karışma durumu olduğunda artar. Bütün bu şartlar test edilen tüm karışımlar için aynı olduğundan, sentetik gaz bileşenlerinin farklı kimyasal ve taşınım özelliklerinin CO₂ oluşumunu domine ettiği düşünülmektedir.



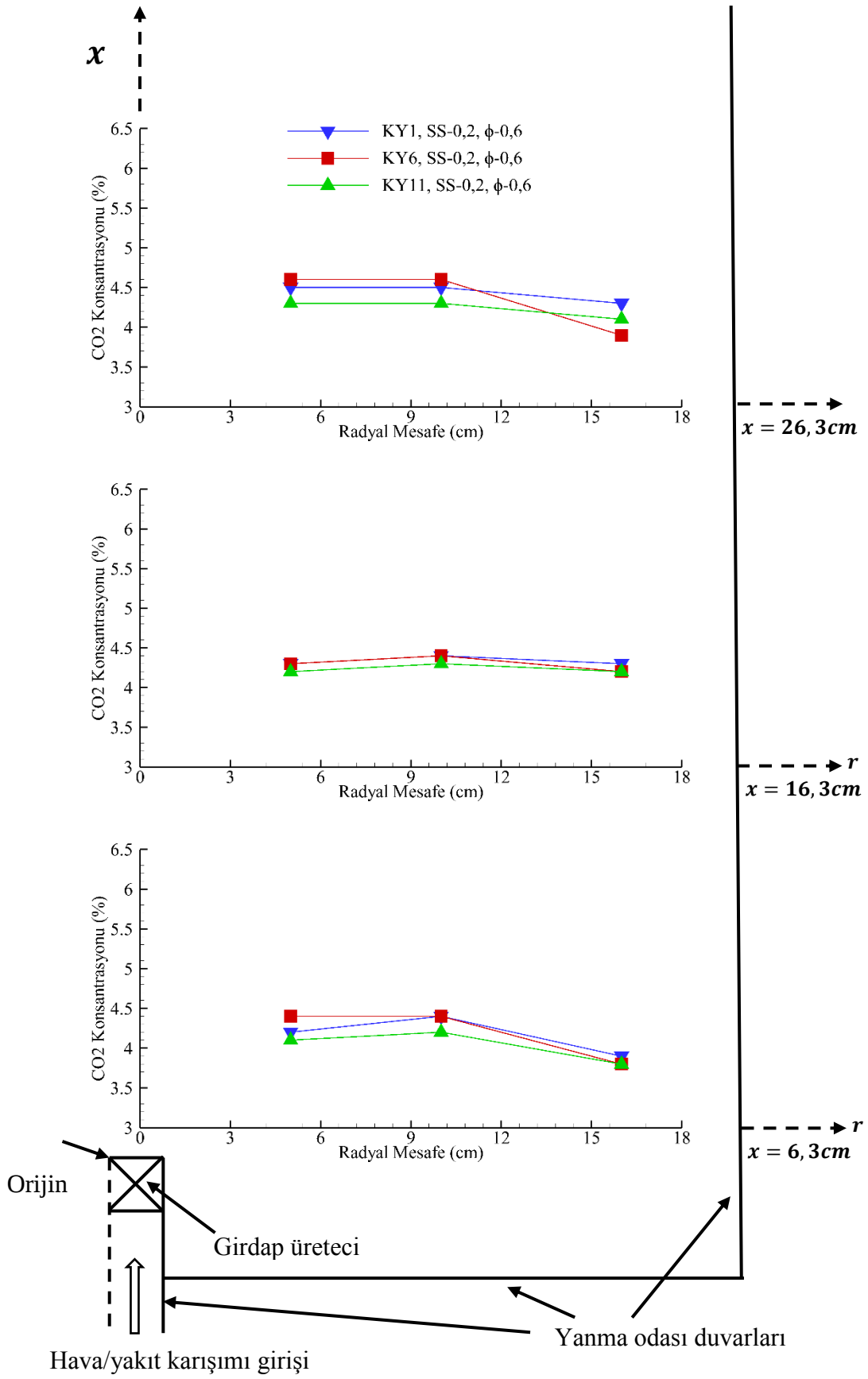
Şekil 4. 18. Radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları ($H_2/CO=0,5$).



Şekil 4. 19. Radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları ($H_2/CO=1,0$).



Şekil 4. 20. Radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları ($H_2/CO=2,0$).



Şekil 4. 21. Radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları.

%20 CO₂ ilavesinin, CO₂ emisyonlarına etkisi, Şekil 4.22 incelenerek daha iyi bir şekilde değerlendirilebilir. %20 CO₂ ilavesi, test edilen karışımların CO₂ emisyonu davranışlarını hem değer hem de trend bakımından büyük ölçüde değiştirmiştir. %20CNG-%20H₂-%40CO-%20CO₂ karışımı, radyal ve eksenel mesafeden bağımsız olarak en yüksek CO₂ dağılımını oluşturmuştur. Bu davranış, ilgili karışımın yüksek CO içeriğinden ve düşük ısı değerinden kaynaklanmaktadır. Ref. [102], CO₂ oluşumunun yakıt karışımının enerji içeriği ile ters orantılı olarak ilişkilendirilebileceğini belirtmiştir (karbon/enerji içeriği oranı). Seyreltilmemiş halde en yüksek CO₂ salınımına neden olan karışım (H₂/CO=1,0), %20 CO₂ ilavesi durumunda en düşük CO₂ dağılımını oluşturmuştur.

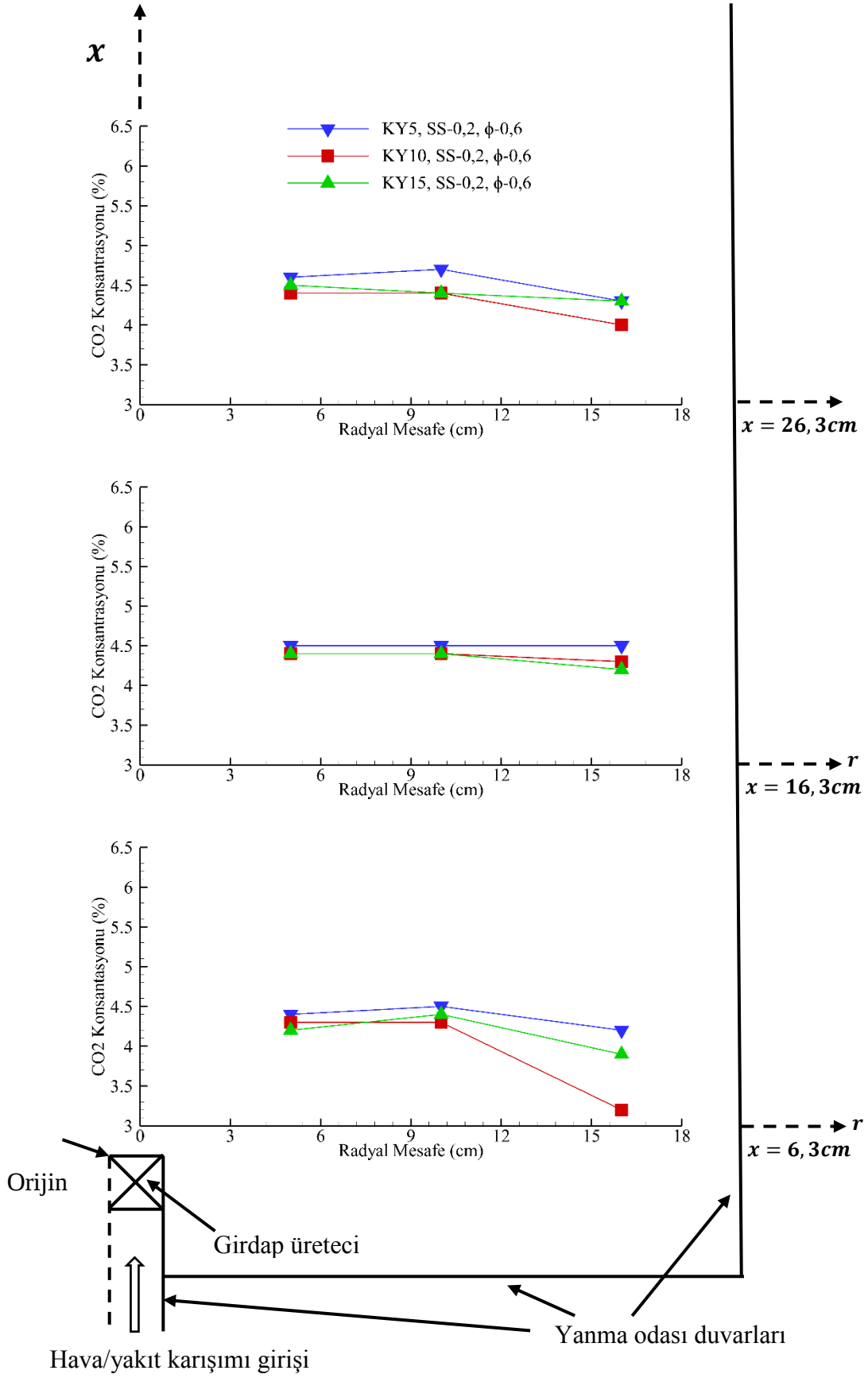
H₂/CO oranı 0,5, 1,0 ve 2,0 olan karışımların toplam egzoz gazlarının yüzdesi olarak O₂ emisyonları Şekil 4.23'te verilmiştir. CO₂ emisyon profilleri ile tutarlı bir şekilde %20CNG-%53,3H₂-%26,7CO-%20CO₂ karışımı tüm radyal ve eksenel mesafelerde en yüksek O₂ dağılımına (en düşük CO₂ dağılımı-Şekil 4.21) sahiptir. Tüm karışımlar için yanma odası içerisinde CO₂ oluşumunun arttığı bölgelerde O₂ miktarı azalmış, azaldığı bölgelerde ise artmıştır. Başka bir ifadeyle CO₂ oluşumu, O₂ tüketimi ile eşleştirilmiştir. CO₂ seyreltimi, test edilen tüm H₂/CO oranlarında O₂ emisyonlarını benzer şekilde etkilediğinden CO₂ seyreltiminin O₂ emisyonlarına etkisine bu tez çalışması kapsamında değinilmemiştir.

CO eksik yanma ürünüdür ve NO_x gibi alev sıcaklığına son derece duyarlıdır (CO salınımı yüksek sıcaklıklarda azalır). Oluşan CO miktarı, hava/yakıt karışımının yanma bölgesinde kalma zamanı ve oksijen kullanılabilirliği ile de kontrol edilebilir [68, 108]. Tüm deneyler yakıt fakir şartlarda gerçekleştirildiğinden yayılan CO seviyeleri görece yüksektir ve karışım içeriğinde CO₂ miktarı arttıkça (karışımın tepkinirliği düşer) H₂/CO oranından bağımsız olarak yükselmiştir. CO₂ ilavesi test edilen tüm H₂/CO oranlarında yanma sıcaklıklarını ve CO₂ emisyonlarını çok fazla etkilemediği halde CO emisyonlarını önemli ölçüde değiştirmiştir. H₂/CO oranı 0,5 olan karışımlarda %0-15 aralığında CO₂ ilavesi, CO emisyonlarını test edilen tüm radyal ve eksenel mesafelerde monoton bir şekilde artırmış, %20 CO₂ ilavesi durumunda ise artış miktarı yükselmiştir. Aynı şekilde radyal mesafe, %0-15 CO₂ içeren karışımların CO emisyonu değerlerini pek fazla etkilememiş, %20 CO₂ içeren karışımların CO emisyonu değerleri radyal mesafeye bağlı olarak belirgin yükseliş ve düşüşler göstermiştir. Eksenel mesafe arttıkça emisyon değerleri artmış ve bu artışlar CO₂ ilavesiyle belirginleşmiştir (Şekil 4.24).

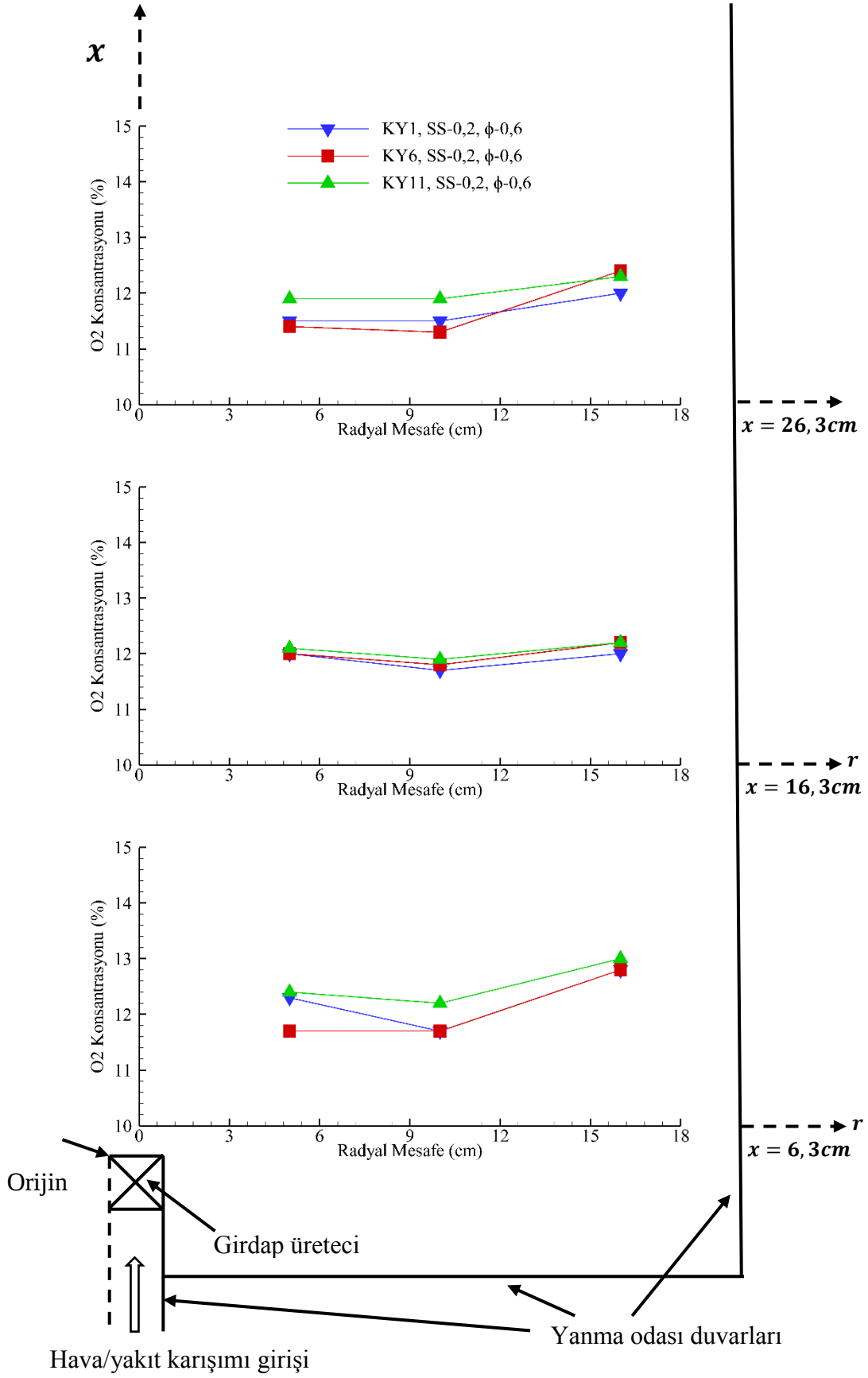
H₂/CO oranı 0,5’den 1,0’e yükseldiğinde CO emisyonu dağılımları, radyal ve eksenel mesafeye bağlı olarak benzer bir davranış sergilemiştir. %20CNG-%40H₂-%40CO ve %20CNG-%37,5H₂-%37,5CO-%05CO₂ karışımları test edilen tüm eksenel ve radyal mesafelerde hemen hemen aynı CO değerlerini oluşturmuşlardır. Yüksek H₂/CO oranından dolayı %5 CO₂ ilavesi, reaksiyon kinetiklerini önemli ölçüde değiştirememiştir. CO₂ ilavesi %10’a yükseldiğinde ise CO emisyonlarında bir miktar artış gözlenmiştir. H₂/CO oranı 1,0 olan karışımların CO emisyonu değerlerinde en belirgin artışlar, %15 ve %20 CO₂ ilavesi durumunda gözlenmiştir (Şekil 4.25).

H₂/CO oranı 2,0 olan karışımlarda CO₂ ilavesi, beklenildiği gibi CO emisyonlarını yükseltmiştir. Ancak, bu ilave CO emisyonlarına monoton bir şekilde etki etmemiştir. %0-5 CO₂ ilavesi içeren karışımlar, test edilen tüm radyal ve eksenel mesafelerde hemen hemen aynı CO dağılımlarını oluşturmuştur. Diğer H₂/CO oranlarındaki karışımlara kıyasla %10 ve %15 CO₂ içeren karışımların emisyon profilleri birbirlerine yaklaşmıştır. Bahsi geçen karışımların yüksek hidrojen içeriği, CO₂ ilavesinin reaksiyon kinetiklerine olumsuz etkisini azaltarak bu duruma neden olmuştur (Şekil 4.26).

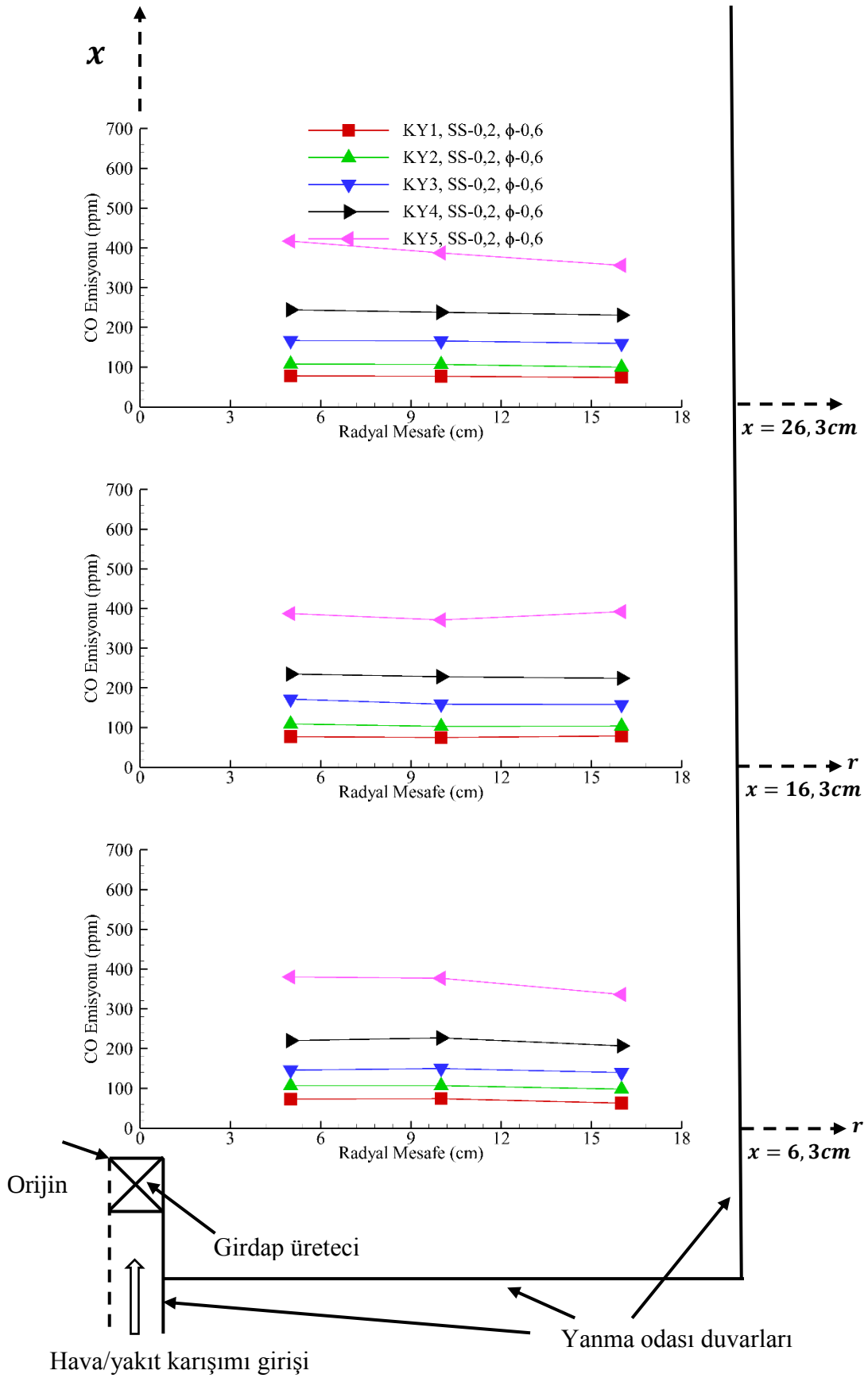
H₂/CO oranının CO emisyonlarına etkisi daha öncede belirtildiği gibi diğer yanma karakteristiklerine etkisine kıyasla daha belirgindir. Bu durum Şekil 4.27’de açıkça görülebilir. %20CNG-%53,3H₂-%26,7CO karışımının CO emisyonu değerleri, %20CNG-%40H₂-%40CO ve %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO karışımlarına kıyasla yaklaşık 2-3 kat daha düşüktür. Bu durum, ilgili karışımın yüksek H₂ ve düşük CO içeriğinden kaynaklanmakta ve hidrojenin karbon monoksit oksitlenme kinetiklerini iyileştirdiğini göstermektedir. Beklenmedik bir şekilde %20CNG-%40H₂-%40CO karışımı (görece yüksek H₂ ve görece düşük CO içeriklerine rağmen), radyal ve eksenel mesafeden bağımsız olarak en yüksek CO dağılımını oluşturmuştur. Şekil 4.9 incelendiğinde aynı karışımın alev sonrası bölgede en düşük sıcaklık dağılımını oluşturduğu görülebilir. Yüksek CO emisyonu değerleri düşük yanma sıcaklığından kaynaklanmaktadır. %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO ve %20CNG-%40H₂-%40CO karışımlarının CO emisyonu değerleri artan radyal ve eksenel mesafe ile birbirlerine yaklaşmıştır. %20CNG-%26,7H₂-%53,3CO karışımının CO emisyonu değerleri aynı aralıkta belirli belirsiz artmış, %20CNG-%40H₂-%40CO karışımı için bu değerler azalmıştır.



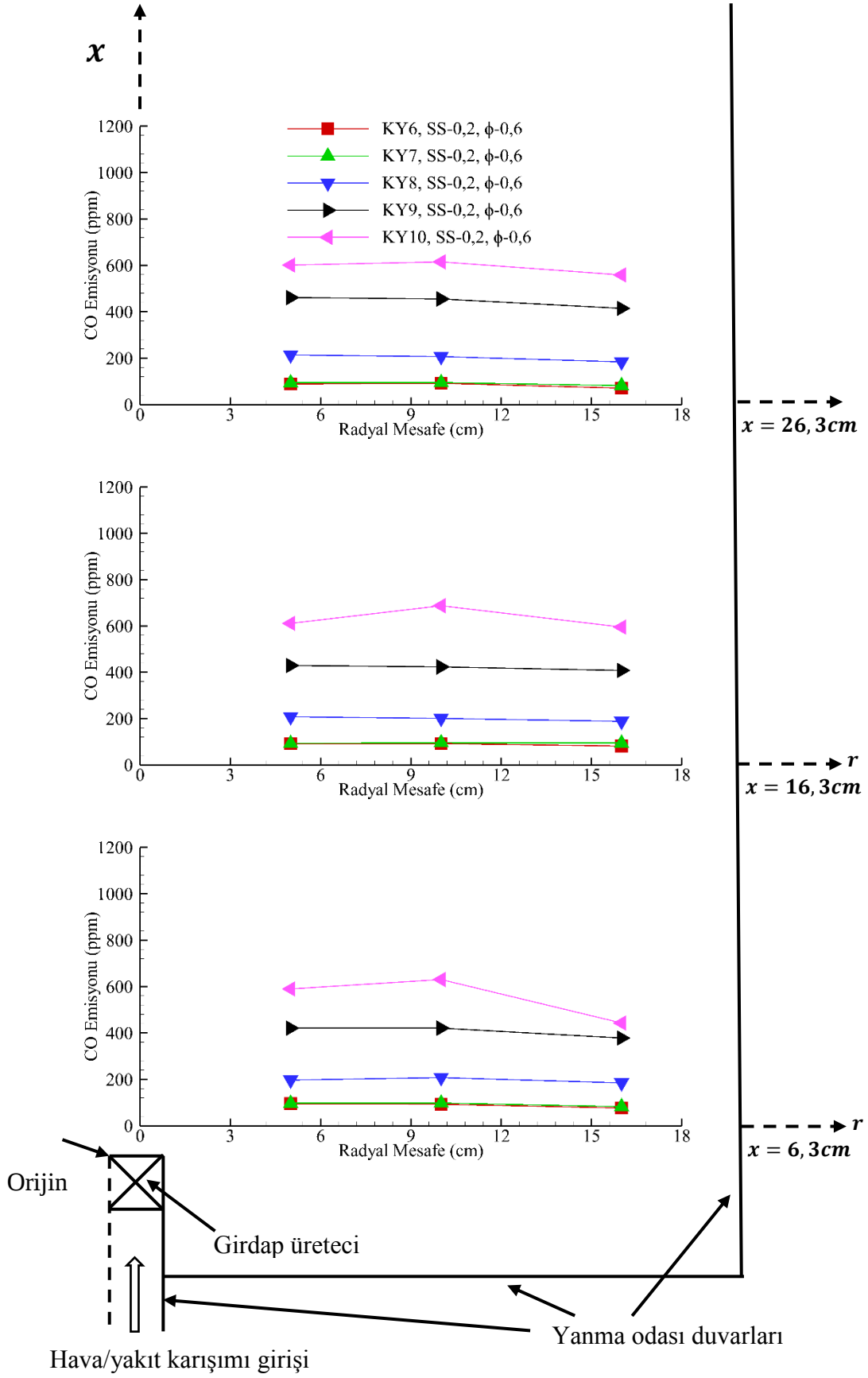
Şekil 4. 22. Radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları.



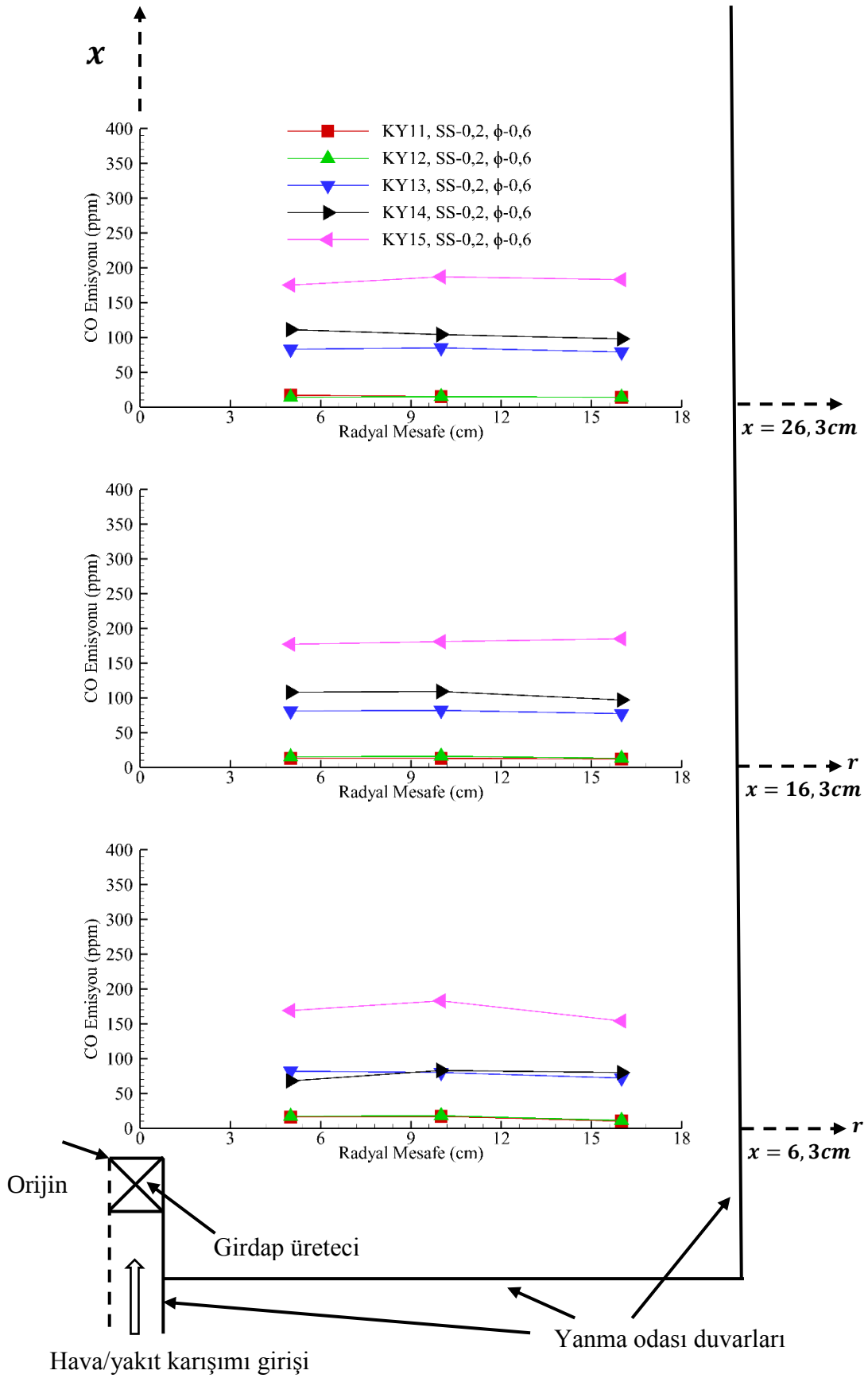
Şekil 4. 23. Radyal O₂ konsantrasyon dağılımları.



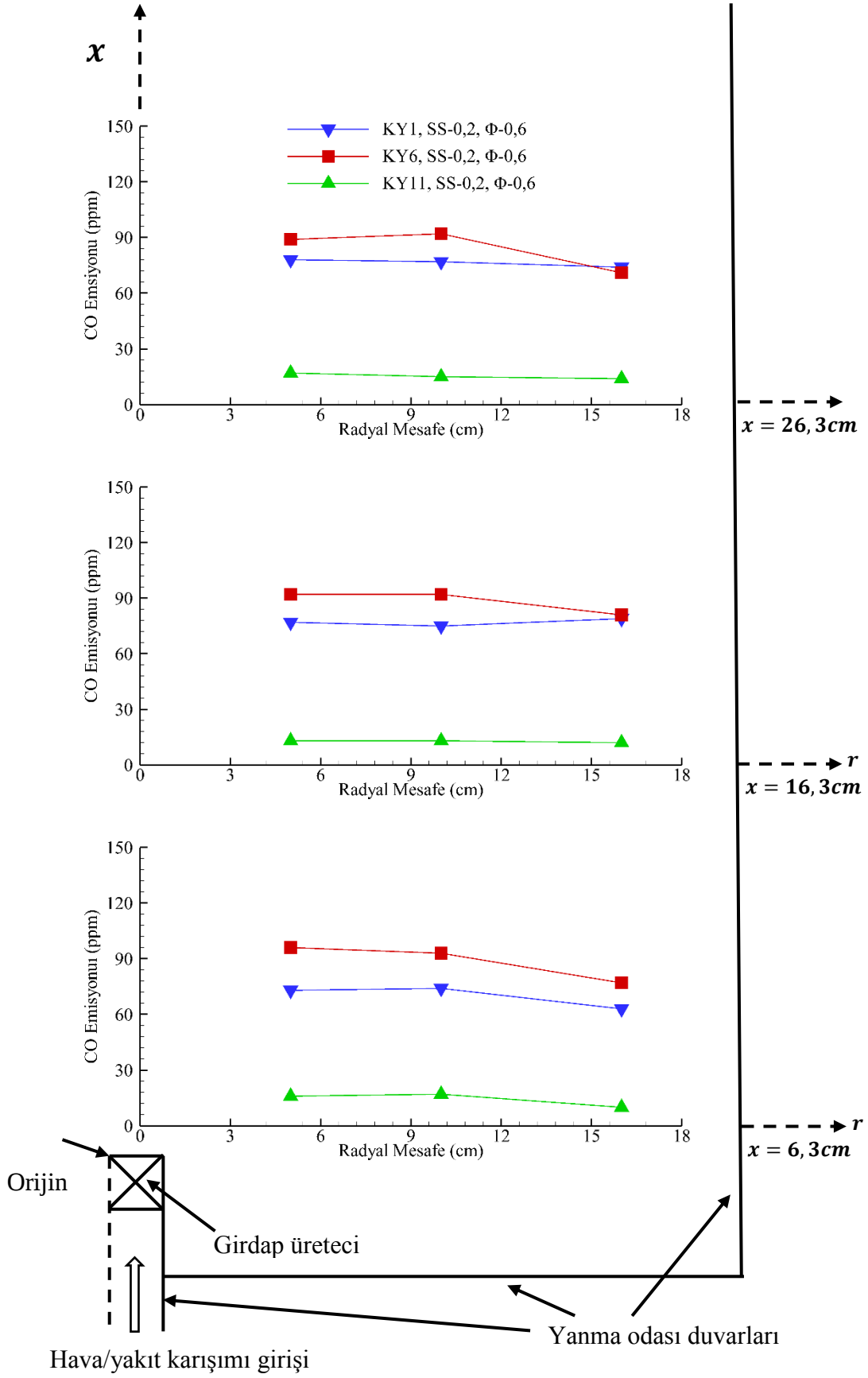
Şekil 4. 24. Radyal CO emisyonu dağılımları ($H_2/CO=0,5$).



Şekil 4. 25. Radyal CO emisyonu dağılımları ($H_2/CO=1,0$).



Şekil 4. 26. Radyal CO emisyonu dağılımları ($H_2/CO=2,0$).



Şekil 4. 27. Radyal CO emisyonu dağılımları.

Deneysel çalışmalar sırasında, 0,2 swirl sayısında ve 0,6 eşdeğerlik oranında test edilen tüm sentetik gaz karışımları için yanma odası çıkış bölgesinde sabit bir noktada emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiş ve ölçülen CO, CO₂, O₂ ve NO_x emisyon değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Yakıt fakir şartların bir sonucu olarak düşük yanma sıcaklıkları, yakıt bağlı nitrojenin ve geleneksel olmayan yanma şartlarının (oksijenli yanma veya yüksek basınç vb.) bulunmaması sonucu yayılan NO_x seviyeleri yakıt bileşiminden bağımsız olarak 1-3 ppm aralığındadır. H₂/CO oranı 0,5 olan karışımlar, yüksek yanma sıcaklıklarından dolayı görece yüksek NO_x salınımlarına neden olmuştur. CO₂ ilavesi, salınan NO_x miktarını belirli belirsiz azaltmıştır.

Tablo 4. 2. Yanma odası çıkışında ölçülen egzoz emisyonları.

Gaz karışımı	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	H ₂ /CO
%20CNG-%26,7H ₂ -%53,3CO	11,6	4,5	74	3	0,5
%20CNG-%25H ₂ -%50CO-%05CO ₂	11,7	4,4	101	3	
%20CNG-%23,4H ₂ -%46,6CO-%10CO ₂	11,5	4,5	158	3	
%20CNG-%21,7H ₂ -%43,3CO-%15CO ₂	11,1	4,8	235	3	
%20CNG-%20H ₂ -%40CO-%20CO ₂	11,1	4,7	359	2	
%20CNG-%40H ₂ -%40CO	11,4	4,6	82	3	1,0
%20CNG-%37,5H ₂ -%37,5CO-%05CO ₂	11,5	4,5	94	2	
%20CNG-%35H ₂ -%35CO-%10CO ₂	11,6	4,5	211	2	
%20CNG-%32,5H ₂ -%32,5CO-%15CO ₂	12,1	4,2	447	1	
%20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂	11,5	4,5	604	1	
%20CNG-%53,3H ₂ -%26,7CO	11,7	4,4	15	2	2,0
%20CNG-%50H ₂ -%25CO-%05CO ₂	11,7	4,4	15	2	
%20CNG-%46,6H ₂ -%23,4CO-%10CO ₂	11,9	4,3	82	2	
%20CNG-%43,3H ₂ -%21,7CO-%15CO ₂	11,5	4,5	105	1	
%20CNG-%40H ₂ -%20CO-%20CO ₂	11,5	4,5	174	1	

O₂ ve CO₂ emisyonları test edilen tüm H₂/CO oranlarında çok yakın değerlere sahiptir ve CO₂ ilavesi ile pek fazla değişmemiştir. Yakıt karışımının ve CO₂ ilavesinin CO emisyonlarına etkisi ise çok daha belirgindir. CO₂ ilavesi ile brülör çıkışında artan hava/yakıt karışımı akış hızı, yanma odası aşağı akımında alev gerilmesine neden olur ve

CO oksidasyonunu inhibe eder [108]. Yüksek alev gerilmesinden kaynaklanan düşük sıcaklık değerleri ve karışımın artan ısı kapasitesi ile adiabatik alev sıcaklığı düşüşü nedenleriyle test edilen tüm yakıt karışımları için CO emisyonları, CO₂ ilavesi ile tüm H₂/CO oranlarında monoton bir şekilde artmıştır. Eş molar H₂ ve CO içeriklerine sahip karışımlar düşük yanma sıcaklıklarından dolayı en yüksek CO salınımına neden olmuştur.

Deneyler sırasında H₂/CO oranı 1,0 olan karışımların diğer karışımlara kıyasla daha kararlı yandığı tespit edilmiştir. Geniş kararlı çalışma aralığı da göz önünde bulundurulduğunda, swirl sayısı ve eşdeğerlik oranının yanma karakteristiklerine (sıcaklık ve emisyon dağılımları) etkileri, %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımı kullanılarak incelemiştir.

4.3 Swirl Sayısının Kararlı Yanma Aralığına Etkisi

Alevi, yakıcı çıkışında veya istenilen bölgede sabitlemek için kullanılan yöntemlerden en etkili ve en basiti girdaplı akış kullanmaktadır. Girdaplı akışlar; akışa teğetsel bileşen kazandırılarak, eksenel-halka şekilli girdap üreteçleri, spiral biçimli kanatçıklara sahip girdap üreteçleri veya mekanik çeviriciler kullanılarak oluşturulabilir. Girdaplı akışlar, hava/yakıt karışma durumunu iyileştirmelerinin yanında yakıt tüketimini ve egzoz emisyonlarını da azaltırlar. Girdap yoğunluğu belirli bir değere geldikten sonra eksenel akışın (alev boyunca) tersine döndüğü kritik bir durum ile karşılaşılabilir. Akış içerisinde oluşan bu bölge iç resirkülasyon (yanma odası duvarı ve alev arasında dış resirkülasyon bölgeleri de oluşabilir) bölgesi olarak adlandırılır ve alevin radyal olarak dışa doğru yayılmasına neden olur. Resirkülasyon bölgesinin varlığı swirl sayısı (Denklem 3.19) tarafından belirlenir (pratik yakıcılarda 0-2 aralığındadır). İç resirkülasyon bölgesinde sıcak yanma sonu gazlarının geri akışı, tepkimeye girecek maddelerin karışma durumunu iyileştirir, bir ısı haznesi gibi davranarak aerodinamik alev tutucu oluşturur ve kararlı yanma aralığını genişletir. Ancak, ısı salınım oranındaki değişiklikler, bu bölgenin yapısını değiştirerek girdaplı akışların avantajlarını elemine edebilir [104].

Swirl sayısındaki değişiklikler; akış alanını, resirkülasyon bölgesinin boyutunu ve yerleşimini, alev sıcaklığını, tür konsantrasyon dağılımlarını ve türbülans yoğunluğunu ve sonuçta yanma karakteristiklerini etkiler. Bu etkilerden hangisinin baskın gelerek yanma özelliklerinde ne gibi değişiklikler meydana getireceği belirli değildir. Başka bir ifadeyle swirl sayısındaki artışların türbülans yoğunluğunu artıracak ya da azaltacağı

belirli değildir [111]. Bu bağlamda, öncelikli olarak %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının fakir sönme ve alev geri tepme eşdeğerlik oranı aralıkları, farklı swirl sayılarında belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4. 3. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının fakir sönme ve alev geri tepme eşdeğerlik oranları.

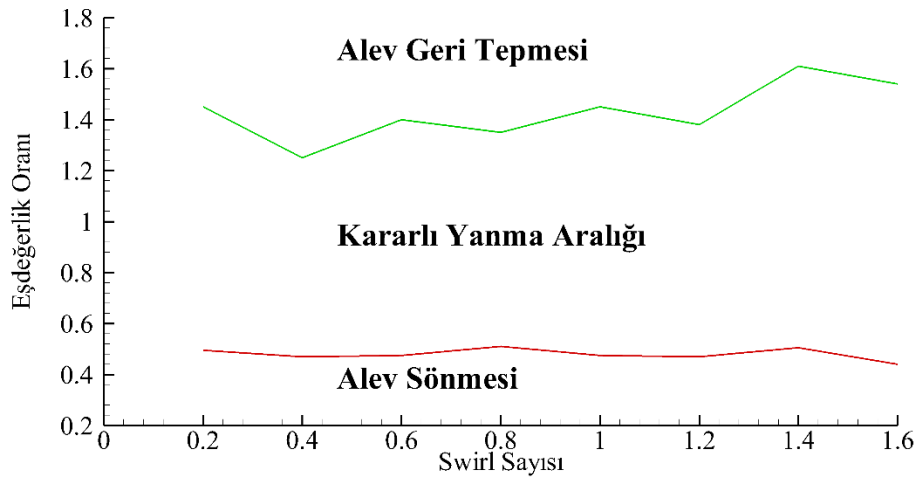
Swirl Sayısı	Fakir Sönme (ϕ)	Geri Tepme (ϕ)
0,2	0,495	1,45
0,4	0,47	1,25
0,6	0,475	1,4
0,8	0,51	1,35
1,0	0,475	1,45
1,2	0,47	1,38
1,4	0,505	1,61
1,6	0,44	1,54

Swirl sayısı, 0,2'den 1,6' ya kadar 0,2 aralıklarla kademeli olarak artırılmış ve swirl sayısındaki artışların fakir sönme ve alev geri tepme limitlerine tek düze bir şekilde etki etmediği tespit edilmiştir. Swirl sayısındaki 0,2'lik artışlar, periyodik olarak bahsi geçen limitleri önce azaltmış daha sonra artırmıştır (1,0 ve 1,2 swirl sayısında fakir sönme limiti hariç). Swirl sayısı, sadece değişim (artma/azalma) miktarını belirlemiştir (0,6-0,8-0,1 swirl sayılarında fakir sönme limitinde artma ve azalma miktarları aynıdır). Yakıt kompozisyonu etkisiyle benzer şekilde swirl sayısı, test edilen gaz karışımının fakir sönme limitini çok fazla değiştirememiştir. 0,2 ve 1,6 swirl sayılarındaki fakir sönme eşdeğerlik oranları arasında 0,055'lik bir fark vardır. 1,6 swirl sayısında iyileşen hava/yakıt karışma durumu ile birlikte resirkülasyon bölgesi tarafından akış içerisinde oluşturulan düşük hız bölgesi, hava/yakıt karışımının sıcak bölgede kalma zamanını yükseltmiş (tam yanma için daha uzun süre) ve karışımın daha fakir şartlarda ateşlenebilmesine imkân sağlamıştır.

Swirl sayısının alev geri tepme limitine etkisi daha belirgindir. Swirl sayısına bağlı olarak bu limitte meydana gelen artış ve düşüşler daha yüksektir. 0,2 ve 0,4 swirl sayılarında yükselen eşdeğerlik oranı (azalan kütle akış hızı) ile artan alev hızı sonucu alev geri tepmesi oluşmuş, 0,6 (kritik swirl sayısı [104])-1,6 swirl sayısı aralığında ise zengin sönme gerçekleşmiştir. Yüksek swirl sayılarında, girdap üretici ucunda yoğun bir

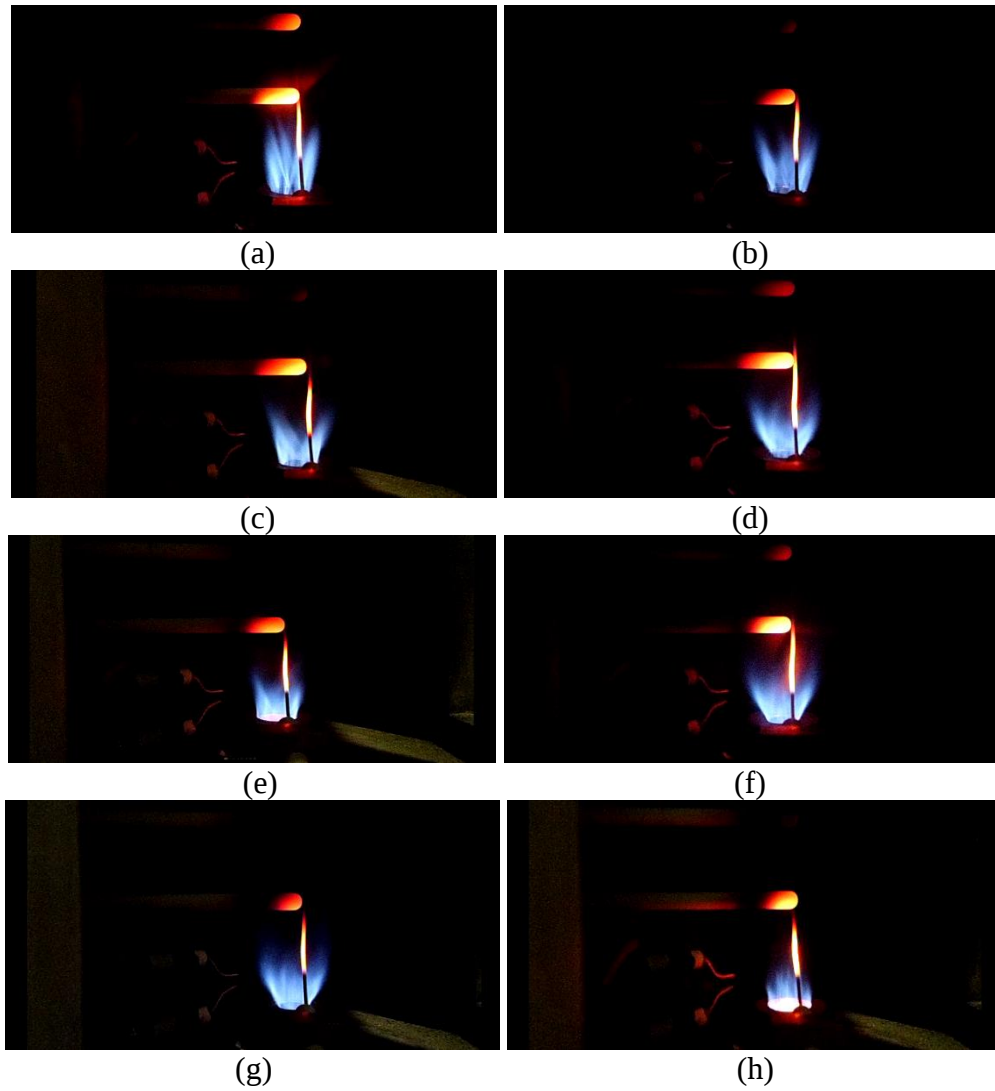
resirkülasyon bölgesi oluşur ve bu bölge akış alanını daha kararlı hale getirerek alev geri tepme eğilimini azaltır [106]. Yüksek swirl sayılarında gerçekleşen zengin sönmenin bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Swirl sayısının test edilen gaz karışımının kararlılık aralığına etkisi, Şekil 4.28’de görülebilir. 0,2 swirl sayısına kıyasla ilgili karışımın kararlılık aralığı 0,4-1,2 swirl sayısı aralığında düşmüş, 1,4 ve 1,6 swirl sayılarında yükselmiştir. En geniş kararlılık aralığı, 1,4 swirl sayısında elde edilmiştir.



Şekil 4. 28. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının farklı swirl sayılarında kararlılık aralıkları.

%20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 0,6 eşdeğerlik oranındaki anlık alev görüntüleri incelendiğinde swirl sayısının alev şekli üzerindeki büyük etkisi görülebilir (Şekil 4.29). %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımı, test edilen tüm swirl sayılarında girdap üreticinin iç ve dış halkasına sıkıca tutunmuş, kararlı bir şekilde yanmış ve alev stabilizasyon noktasında önemli bir değişiklik olmamıştır. 0,2 swirl sayısında yanma aşağı akımda tamamlanmıştır. Alev (diğerlerine kıyasla) ince ve uzun bir yapıya sahiptir. 0,2-0,8 swirl sayısı aralığında girdap yoğunluğunun artması, görünür alev boyunun kısalmasına ve brülör çıkışından itibaren artan aksenal mesafeye bağlı olarak alevin radyal olarak dışa doğru yayılmasına neden olmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi, yüksek girdap yoğunluklarında yakıt ve havanın karışma durumu iyileşir, karışımın yüksek sıcaklık bölgesinde kalma süresi uzar ve ısı radyal olarak daha iyi yayılır. Alev radyal olarak dışa doğru genişler, daha kararlı ve yoğun yanar.



Şekil 4. 29. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının anlık alev görüntüleri.

Swirl Sayısı: (a) 0,2, (b) 0.4, (c) 0,6, (d) 0,8, (e) 1,0, (f) 1,2, (g) 1,4, (h) 1,6.

Swirl sayısı 1,0'de yoğun kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bölge yukarı akıma ilerlemiş (brülör içine) ve alev şekli (reaksiyon bölgesi dağılımı) tamamen değişmiştir. Görünür alev yüksekliği daha da kısalmıştır. Yüksek swirl sayılarında, resirküle edilen sıcak yanma ürünleri hava/yakıt karışımının kolayca ateşlenebilmesini sağlayarak (ateşleme kaynağı gibi davranır), reaksiyon bölgesinin yukarı akımında alev yüzeyinin genişlemesine neden olur [112]. 1,0 swirl sayısında %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının brülör içinde yanmaya başlamasının bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Son olarak, yüksek reaksiyon yoğunluğunun bir sonucu olarak parlak bir alev gözlenmiştir.

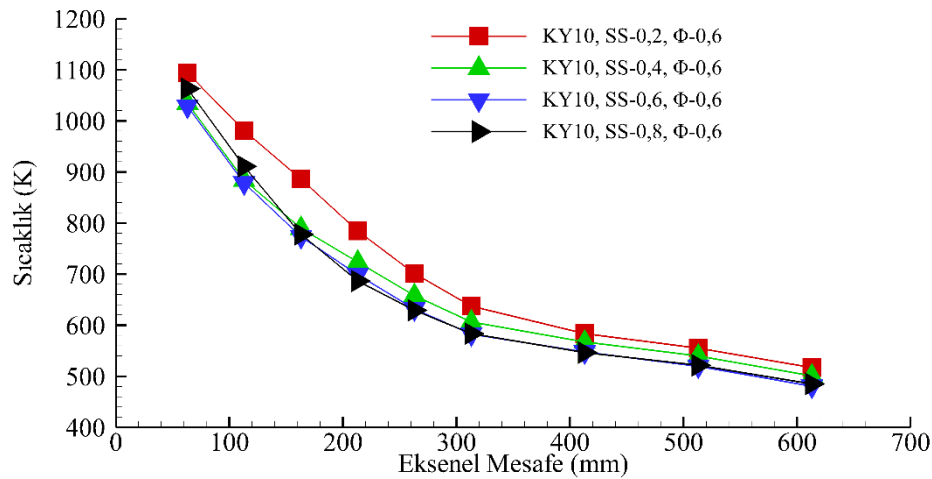
Swirl sayısı 1,0'den 1,2' ye yükseldiğinde görünür alev yüksekliği ve alev yüzey alanı artmıştır (alev parlaklığı azalmıştır). 0,8 swirl sayısındaki aleve benzer (artan eksenel mesafede radyal olarak genişleyen) bir alev oluşmuştur. Ref. [112], artan girdap yoğunluklarında yükselen merkezkaç kuvvetlerinden dolayı resirkülasyon bölgesinin alev yüzeyini aşağı akımda da artırdığını rapor etmiştir. 1,0 ve 1,2 swirl sayılarında alev yapıları arasındaki farkın bu iki olgu arasındaki rekabete bağlı olduğu düşünülmektedir. 1,4 swirl sayısında %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımı, 1,2 swirl sayısına kıyasla daha geniş ve kısa bir alev oluşturmuş, alev parlaklığı ise artmıştır. Kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bölge daha türbülanslı bir yapı göstermiştir. 1,6 swirl sayısında alev, brülör yukarı akımına ilerlemiş ve görünür alev yüksekliği en küçük değerini almıştır. Yüksek reaksiyon yoğunluğuna bağlı olarak parlak bir alev oluşmuştur. Şekil 4.29, reaksiyon bölgesi dağılımı ve swirl sayısı arasındaki güçlü ilişkiyi açık bir şekilde göstermektedir.

4.4 Swirl Sayısının Yanma Karakteristiklerine Etkisi

Şekil 4.30'da %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının farklı swirl sayılarında ve 0,6 eşdeğerlik oranında eksenel sıcaklık profilleri yer almaktadır. Alev yapılarındaki farklılıklar, başka bir ifadeyle swirl sayısının yanma karakteristikleri üzerinde monoton olmayan etkisi göz önünde bulundurularak eksenel sıcaklık profilleri ayrı ayrı çizilmiştir. 0,2, 0,4, 0,6 ve 0,8 swirl sayılarında maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla; 1094,03, 1035,03, 1028,95 ve 1063,43 K'dir. 0,2-0,8 aralığında swirl sayısının artması, maksimum (0,8 swirl sayısındaki artış hariç) ve eksenel sıcaklık değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Swirl sayısı arttıkça kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği yer iç halkadan (girdap üretici göbeği) dışa doğru radyal olarak kayar ve alevin orta bölgesindeki OH kütle kesri, esasen girdaplı akışların karakteristik özelliklerinden (ters basınç gradyeni ve yüksek alev gerilmesi) kaynaklanan düşük sıcaklıklar nedeniyle azalır [30]. Düşük swirl sayılarındaki yüksek sıcaklık değerlerinin bu durumdan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sıcaklık profilleri trend bakımından benzerdir ancak değer bakımından farklılıklar vardır. Sıcaklık profilleri arasındaki fark, 0,2 ve 0,4 swirl sayılarında daha belirgindir. Her iki swirl sayısında maksimum sıcaklık değerleri arasındaki fark 59 K'dir. Bu fark, 63-300 mm eksenel mesafeler arasında artmış, 300-600 mm aralığında ise azalarak 16,17 K değerine düşmüştür. 0,4 değerinden sonra swirl sayısının artması, yanma odası boyunca

eksenel sıcaklık dağılımlarını pek fazla değiştirmemiş ve sıcaklık profilleri birbirlerine yaklaşmıştır. 0,6 ve 0,8 swirl sayılarında eksenel sıcaklık değerleri, brülör çıkış bölgesi hariç hemen hemen aynıdır. Yakıcı gücü çok düşük tutulduğu için görece kısa alevler oluşmuştur. Bu nedenle swirl sayısı, alev ve yanma odası çıkış bölgelerindeki sıcaklık değerlerini çok fazla etkilemiştir.

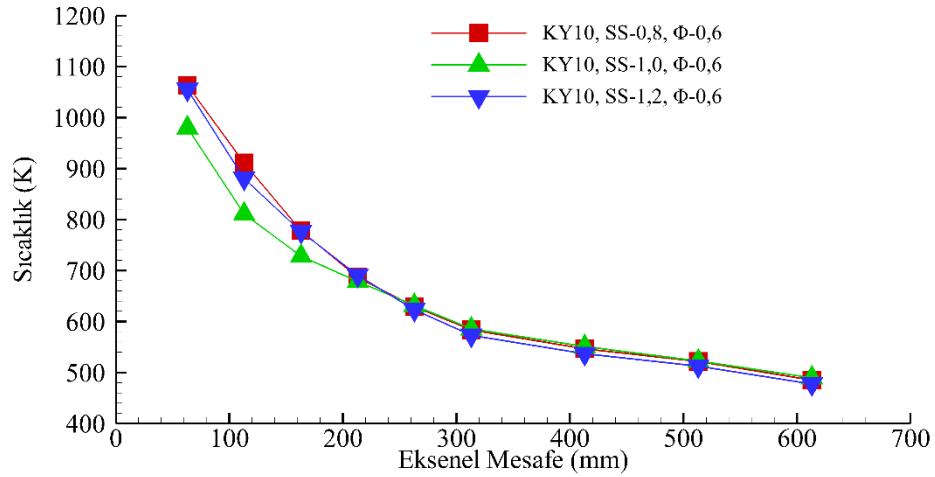


Şekil 4.30. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.

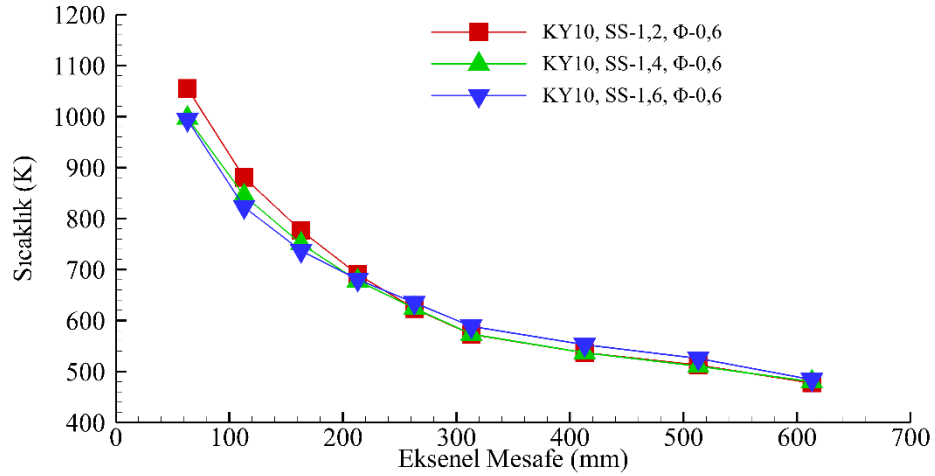
Daha önce ifade edildiği gibi, swirl sayısı 1,0'de yoğun kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bölge brülör yukarı akımına ilerlemiş ve hava/yakıt karışımı brülör içinden yanmaya başlamıştır (Şekil 4.29). Sonuç olarak, alev bölgesinde sıcaklık değerleri (maksimum sıcaklık değeri 980 K) azalan alev boyuna bağlı olarak düşmüştür (Şekil 4.31). Yanma odası aşağı akım sıcaklık değerleri ise 0,8 swirl sayısındaki değerlerle hemen hemen aynıdır (1,2 swirl sayısındaki değerlerden daha yüksektir). Test edilen tüm swirl sayıları içinde en üniform sıcaklık dağılımı 1,0 swirl sayısında elde edilmiştir. Swirl sayısı 1,2'ye yükseldiğinde, alev tekrar eski yapısına döndüğünden sıcaklık profili, 0,8 swirl sayısındaki yapısına dönmüş ve sıcaklık değerlerinde yanma odası boyunca (yaklaşık 150-250 mm arası hariç) çok az düşüşler gözlenmiştir.

1,2, 1,4 ve 1,6 swirl sayılarında maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla; 1055, 997,4 ve 993,66 K'dir. Bu swirl sayısı aralığında swirl sayısının artması, maksimum sıcaklık değerinin azalmasına neden olmuştur (Şekil 4.32). Yanma odası içerisinde 0-300 mm eksenel mesafeler arasında sıcaklık değerleri, artan swirl sayısı ile azalmıştır. Alev

sonrası bölgede sıcaklık değerleri, 1,2 ve 1,4 swirl sayılarında hemen hemen aynı, 1,6 swirl sayısında ise daha yüksektir (0,6 swirl sayısından daha yüksektir).



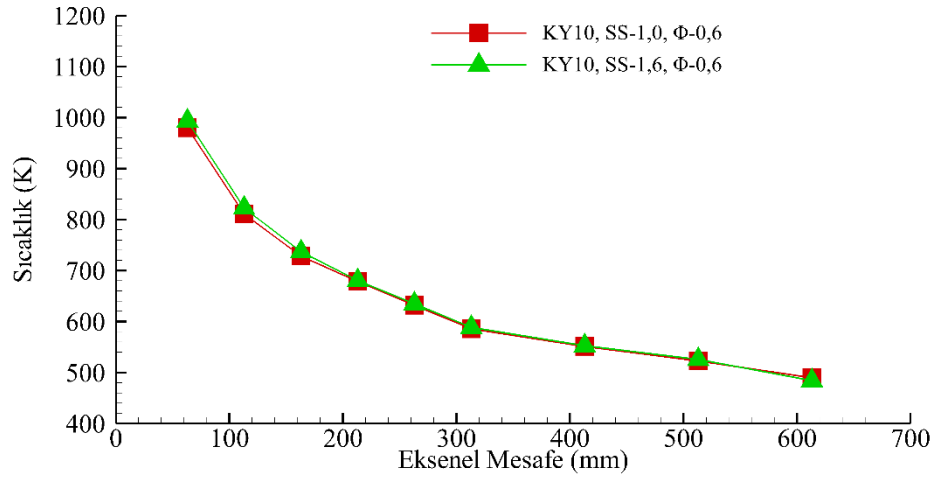
Şekil 4. 31. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.



Şekil 4. 32. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.

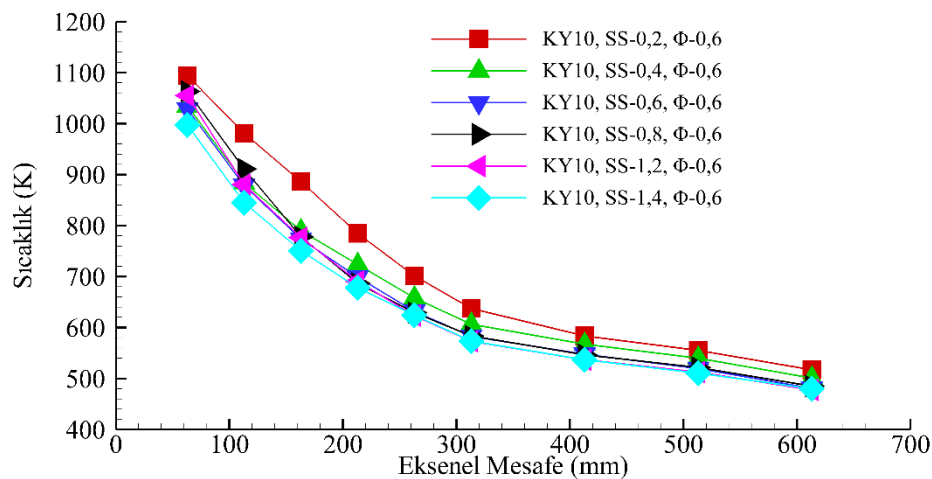
1,0 ve 1,6 swirl sayılarında alev yapıları hemen hemen aynıdır. Her iki alevde de yoğun kimyasal reaksiyonlar brülör içinde gerçekleşmiştir. 1,6 swirl sayısında alev boyu daha kısa ve alev daha parlaktır. Bu durum, girdaplı akışların akış alanı üzerindeki pozitif etkilerinden dolayı (artan ateşleme enerjisi kullanılabilirliği vb.) alevin brülör yukarı akımına daha da ilerlediğini göstermektedir. Her iki swirl sayısında da yanma odası boyunca sıcaklık dağılımları çok iyi bir uyum göstermektedir ancak 1,6 swirl sayısında

maksimum sıcaklık ve yanma odası boyunca sıcaklık değerleri biraz daha yüksektir (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.

Sonuç olarak, 1,0 ve 1,6 swirl sayıları hariç, 0,2-1,4 aralığında swirl sayısının artması monoton bir şekilde alev bölgesinde (0-300 mm) sıcaklık değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Alev sonrası bölgede ise sıcaklık dağılımlarında bazı uyumlar (0,6-0,8 ve 1,2-1,4) gözlenmiştir (Şekil 4.34).

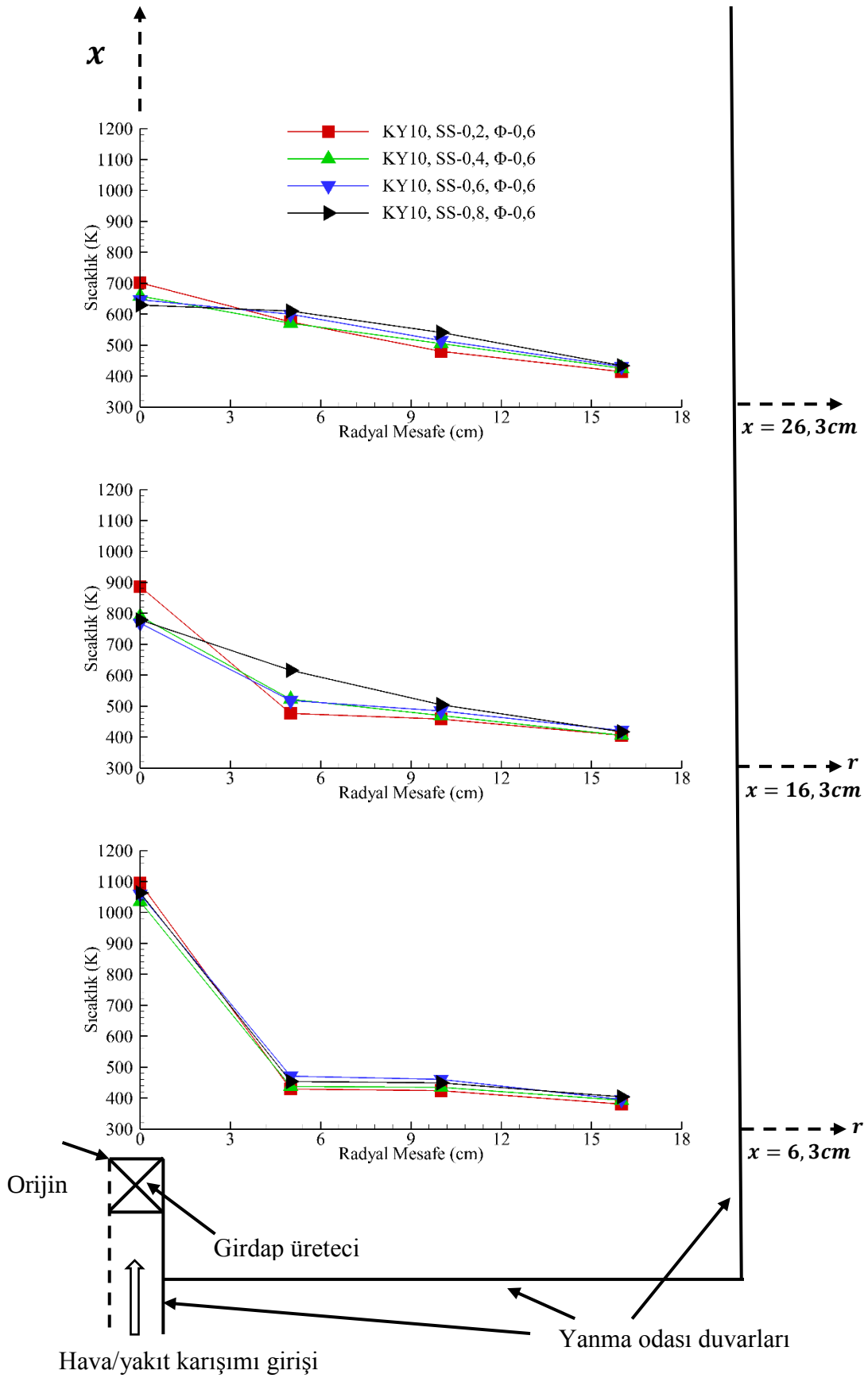


Şekil 4.34. Farklı swirl sayılarında eksenel sıcaklık dağılımları.

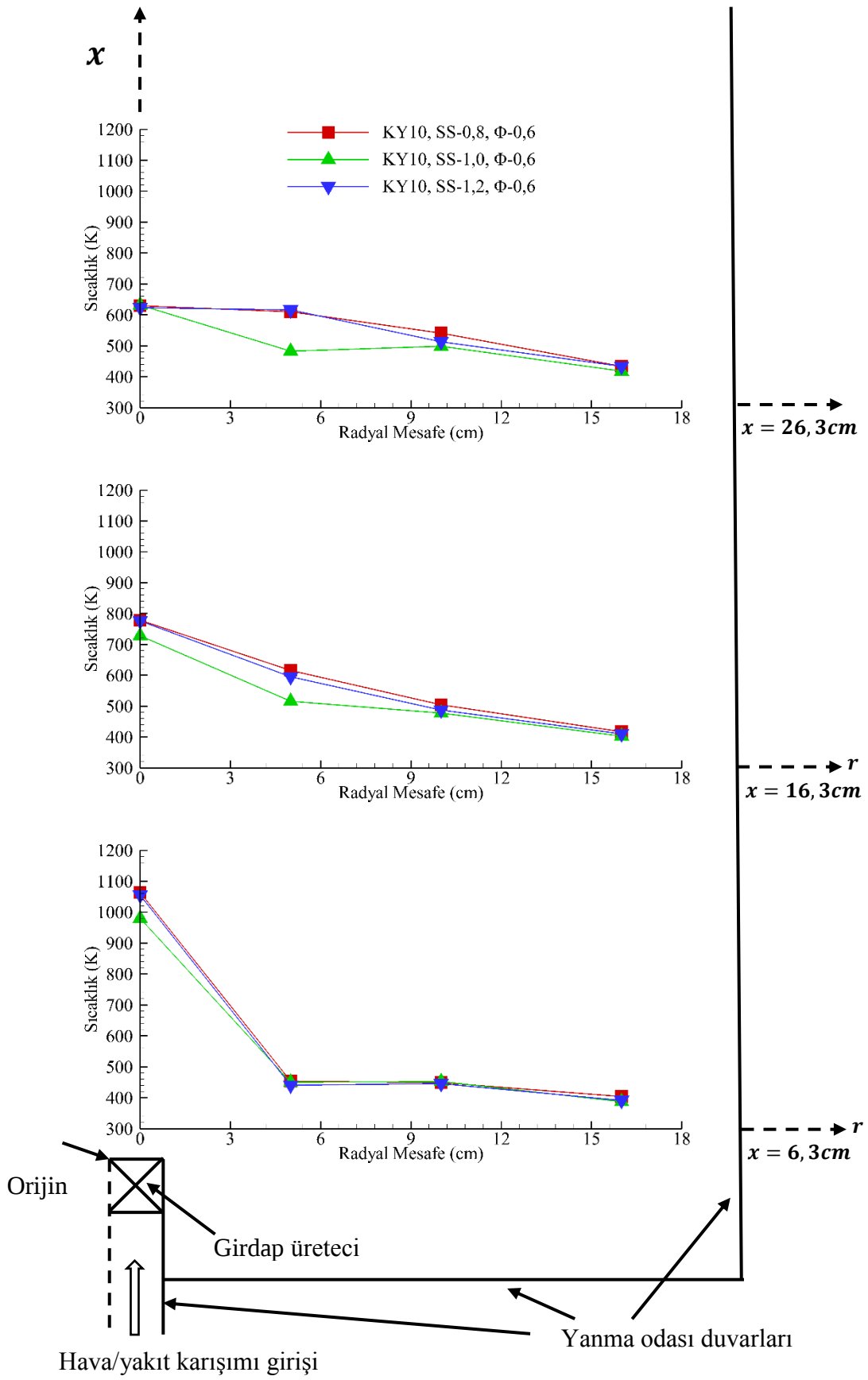
Eksenel sıcaklık grafiklerinde olduğu gibi, radyal sıcaklık dağılımları 0,2-0,8, 0,8-1,2 ve 1,2-1,6 swirl sayısı aralıklarında ayrı ayrı çizilmiş ve incelenmiştir. 0,6 eşdeğerlik

oranında test edilen tüm eksenel mesafelerde radyal uzaklığın artması ile sıcaklık değerleri azalmış, eksenel mesafe arttıkça ise sıcaklık değerleri yükselmiştir (Şekil 4.35). Artan eksenel mesafede sıcaklık artışı, yanma sonu gazlarının yanma odası içerisinde homojen bir şekilde yayılmasından kaynaklanmaktadır. 0-5 cm radyal mesafeler arasında, brülör çıkışından itibaren eksenel mesafenin artması sıcaklık değerlerinin lineer bir şekilde azalmasına neden olmuştur. Eksenel mesafeden bağımsız olarak swirl sayısının 0,2-0,8 aralığında artması, kademeli olarak radyal sıcaklık değerlerinin yükselmesine neden olmuştur (6,3 cm eksenel mesafede 5-10 cm radyal mesafeler arasında 0,8 swirl sayısındaki sıcaklık değerleri hariç). Daha önce belirtildiği gibi, girdap yoğunluğu arttıkça alev radyal olarak alev merkezinden dışarı doğru yayılır ve çapı genişler. Alev merkezindeki reaktif radikal tür (O, H, OH) konsantrasyonları azalır ve sonuç olarak eksenel sıcaklık değerleri azalır, radyal sıcaklık değerleri ise artan alev çapından dolayı yükselir. Girdap yoğunluğu artışı ile radyal sıcaklık değerleri arasındaki en büyük artış, 16,3 cm eksenel mesafede 5-10 cm radyal uzaklıklar arasında gerçekleşmiştir. 26,3 cm eksenel mesafede (alev bölgesinde 0-5 cm hariç), tüm radyal sıcaklık profilleri eğilim bakımından iyi bir uyum göstermiştir fakat artan girdap yoğunluğunun radyal sıcaklık değerleri üzerindeki pozitif etkisi hâlâ belirgindir.

Swirl sayısı 0,8'den 1,0'e yükseldiğinde, radyal sıcaklık dağılımında (6,3 cm eksenel mesafede) çok fazla değişiklik olmamıştır. 6,3 cm eksenel mesafede sıcaklık değerleri, 0-5 cm radyal uzaklıklar arasında değişen alev yapısına bağlı olarak azalmıştır. 5-10 cm aralığında hemen hemen aynı sıcaklık değerleri oluşmuş ve radyal mesafenin daha da artması sonucu sıcaklık değerleri bir miktar azalmıştır (Şekil 4.36). Eksenel mesafe arttıkça (0-10 cm radyal mesafeler arasında) her iki swirl sayısındaki sıcaklık değerleri birbirinden uzaklaşmıştır. 1,2 swirl sayısında alev bölgesi civarındaki sıcaklık değerleri, 0,8 swirl sayısındaki değerlere kıyasla yükselmiş ve artan radyal mesafede her iki swirl sayısındaki sıcaklık profilleri hemen hemen aynı doğrultuyu izlemiştir (0,8 swirl sayısındaki sıcaklık değerlerinden çok az daha düşüktür). Aynı eksenel mesafede 10-16 cm radyal uzaklıklar arasında tüm sıcaklık profilleri birbirlerine yaklaşmıştır (artan eksenel mesafede bu uyum azalmıştır). Eksenel mesafe arttıkça, 1,0 swirl sayısındaki sıcaklık düşüşü (0,8'e kıyasla) daha belirgin bir hale gelmiştir. 0,8 ve 1,2 swirl sayılarındaki sıcaklık dağılımları, test edilen tüm eksenel ve radyal mesafelerde iyi bir uyum göstermiştir (Şekil 4.36).



Şekil 4. 35. Radyal sıcaklık dağılımları.



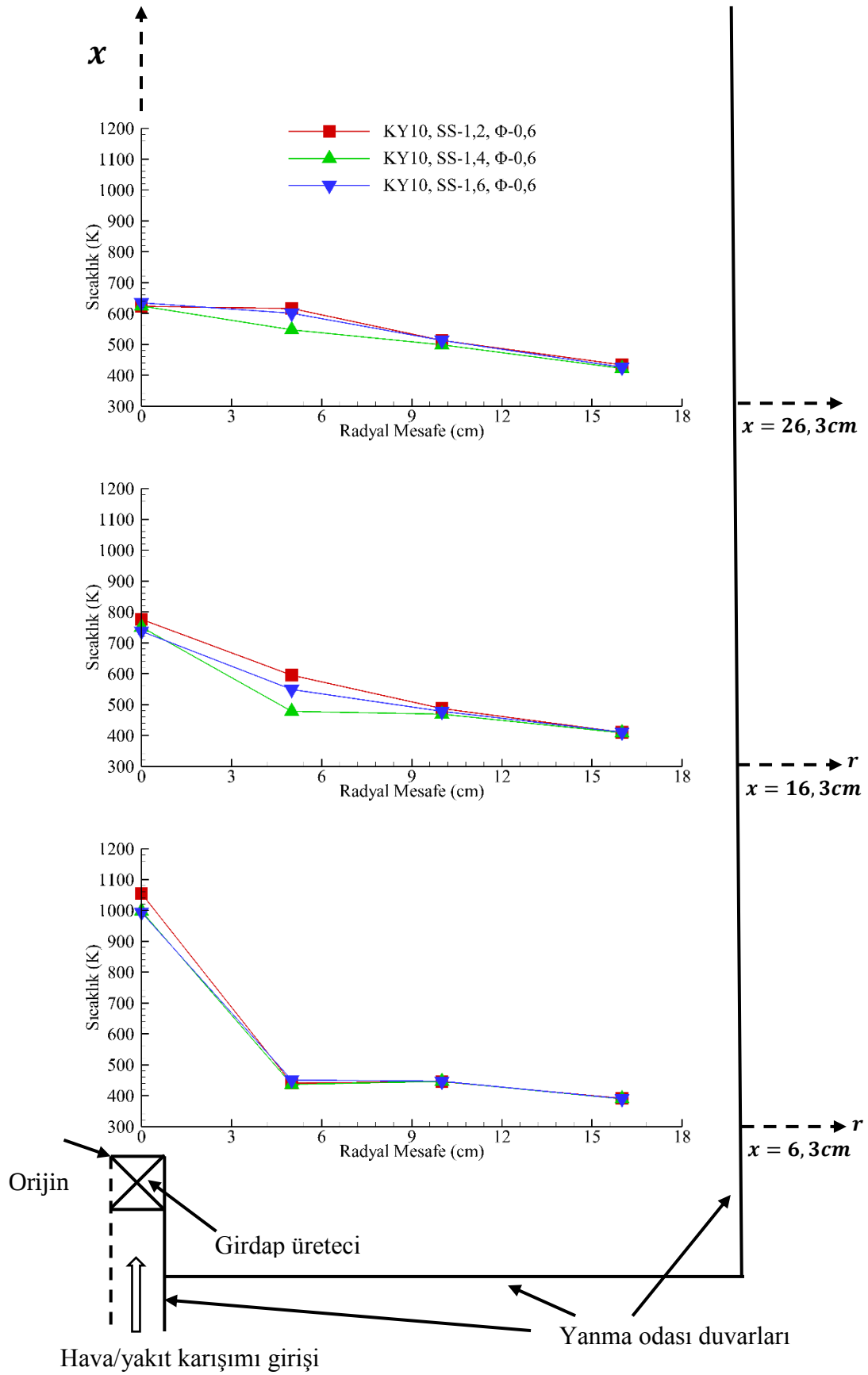
Şekil 4. 36. Radyal sıcaklık dağılımları.

1,2-1,4 swirl sayısı aralığında, 6,3 cm eksenel mesafede tüm sıcaklık profilleri hem değer hem de eğilim bakımından benzerdir (Şekil 4.37). 16,3 cm eksenel mesafede 0-10 cm radyal uzaklıklar arasında swirl sayısının sıcaklık dağılımına etkisi monoton değildir. En düşük sıcaklık dağılımı 1,4 swirl sayısında oluşmuştur. Aynı radyal aralıkta eksenel mesafenin daha da artması sonucu sıcaklık değerleri birbirlerine yaklaşmıştır (1,2 ve 1,6 swirl sayılarında iyi bir uyum). 1,6 swirl sayısında değişen alev yapısı, 1,0 swirl sayısına benzer şekilde radyal sıcaklık dağılımını, alev bölgesinde değiştirmemiştir (artan eksenel mesafede değiştirmiştir-16,3 ve 26,3 cm eksenel mesafelerde sıcaklık değerleri 1,4 swirl sayısındaki sıcaklık değerlerinden daha yüksektir). Sadece radyal sıcaklık dağılımları göz önünde bulundurulduğunda, 0,8 değerinden sonra swirl sayısını artırmanın yanma karakteristiklerine pozitif bir etkisi yoktur.

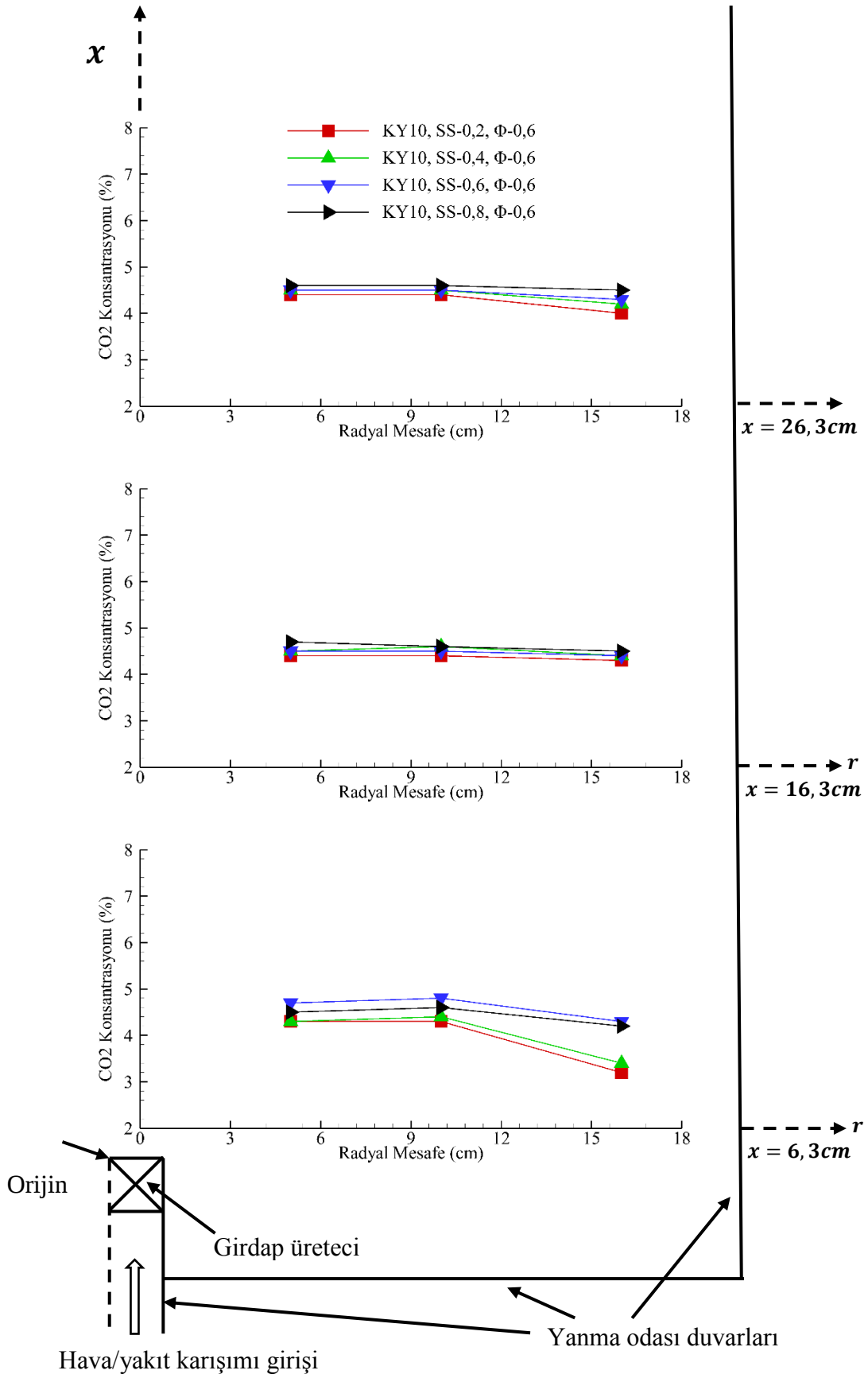
Radyal sıcaklık profilleri ile tutarlı bir şekilde (0,2-0,8 aralığında) girdap yoğunluğu arttıkça (artan radyal sıcaklık değerlerine ve aynı zamanda iyileşen hava/yakıt karışma durumuna bağlı olarak) radyal CO₂ konsantrasyon değerleri de artmıştır. 6,3 cm eksenel mesafe hariç test edilen tüm radyal ve eksenel mesafelerde swirl sayısı arttıkça CO₂ emisyonları artmıştır (Şekil 4.38).

Test edilen tüm swirl sayılarında CO₂ konsantrasyon profilleri radyal sıcaklık profilleri ile ilişkilendirilmiş ve iyi bir uyum elde edilmiştir. 6,3 cm eksenel mesafede 0,8, 1,0 ve 1,2 swirl sayılarındaki sıcaklık profilleri birbirlerine çok yakın olmasına rağmen aynı swirl sayılarında ölçülen CO₂ değerleri nispeten farklıdır (Şekil 4.39). Benzer bir durum, 1,2-1,6 swirl sayısı aralığında da tespit edilmiştir (Şekil 4.40).

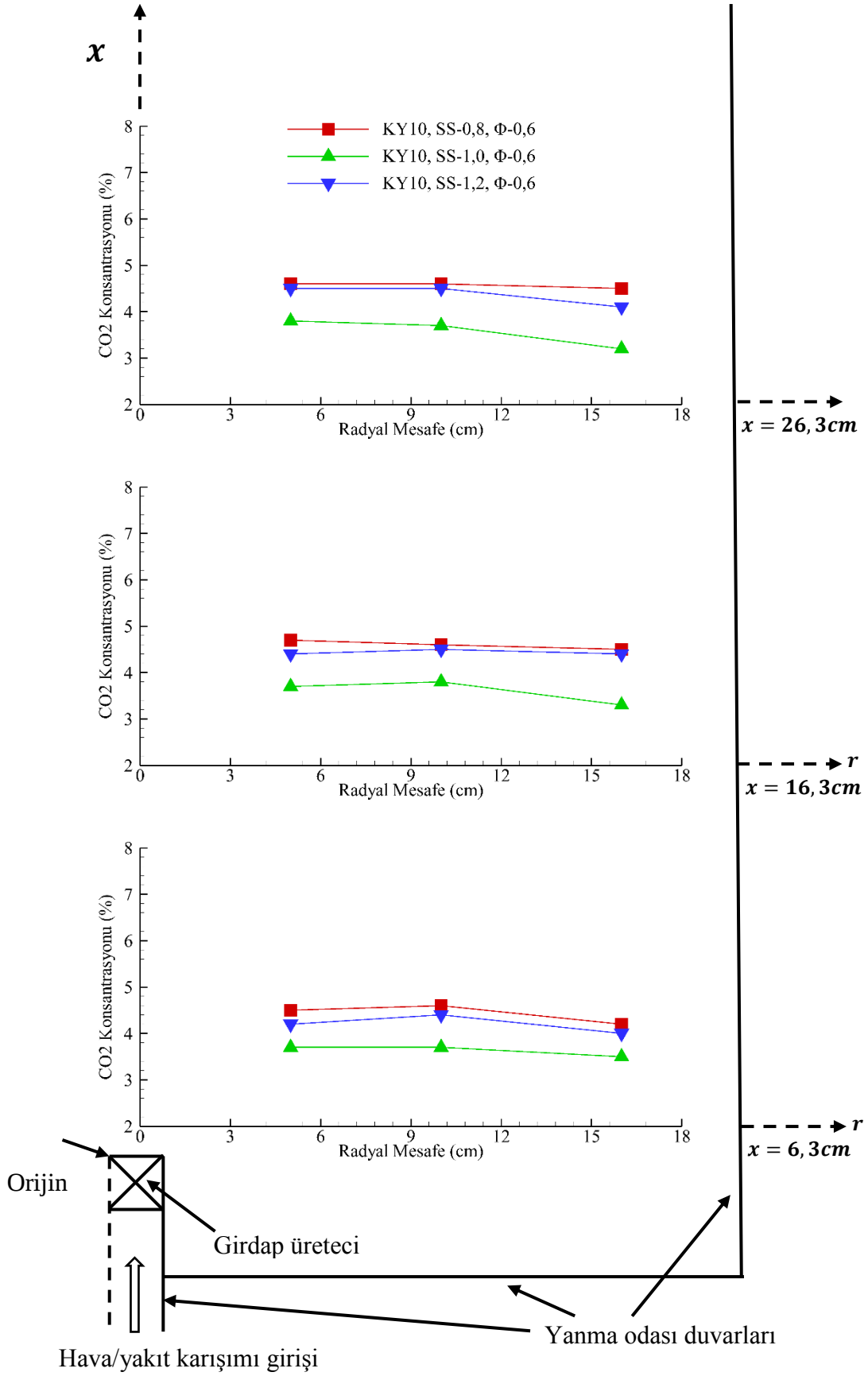
Swirl sayısının CO emisyonlarına etkisi çok fazla değişiklik gösterdiğinden radyal CO emisyon profilleri test edilen tüm swirl sayılarında tek bir grafik üzerinde incelenmiştir (Şekil 4.41). Eksenel mesafeden bağımsız olarak CO emisyonları, test edilen tüm radyal aralıkta pek fazla değişmemiştir. 6,3 cm eksenel mesafede swirl sayısının 0,2'den 0,4'e yükselmesi durumunda CO emisyonları aşırı derece de artmıştır. Bu durum, CO emisyonlarının radyal doğrultuda artan sıcaklık değerlerinden ziyade (sıcaklık artışı, CO emisyonlarını azaltır) girdap yoğunluğu artışı ile akış alanı değişimlerine çok fazla duyarlı olduğunu göstermektedir. 0,6 swirl sayısında CO emisyonu değerleri, 0,4 swirl sayısına kıyasla belirli belirsiz azalmış, 0,8 swirl sayısında tekrar artmıştır. Her üç swirl sayısında (0,4, 0,6 ve 0,8) emisyon değerleri birbirlerine çok yakındır.



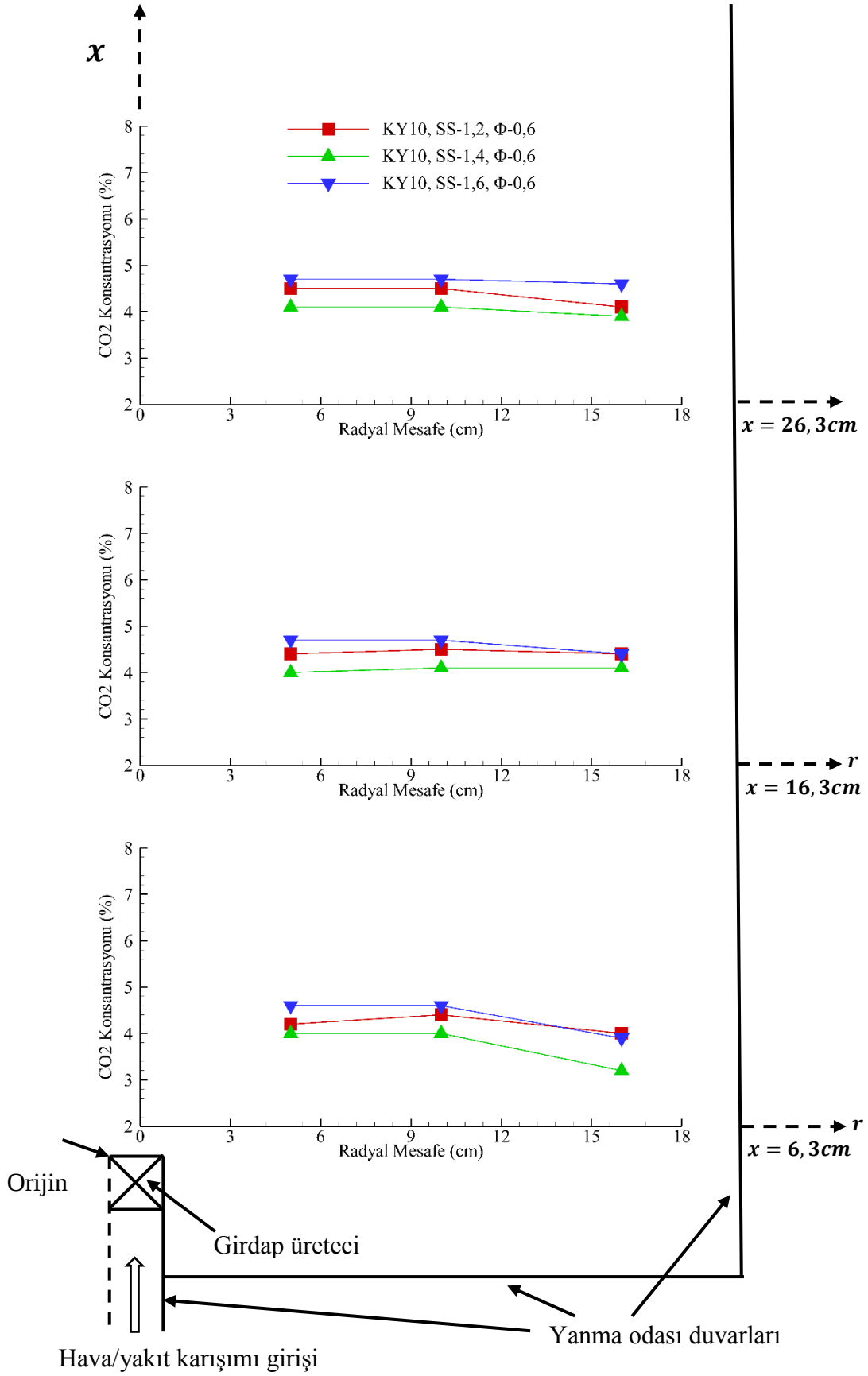
Şekil 4. 37. Radyal sıcaklık dağılımları.

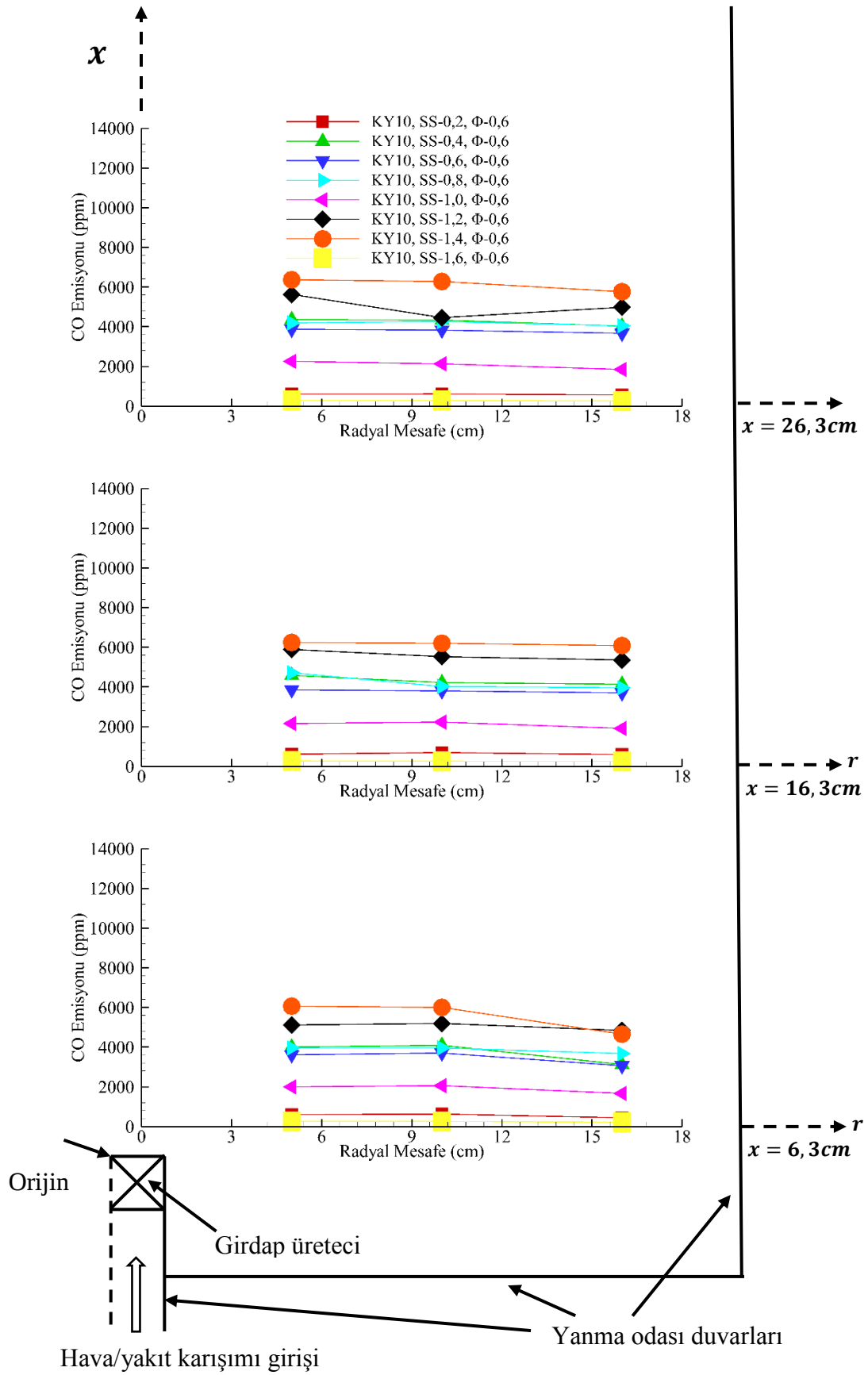


Şekil 4. 38. Radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları.



Şekil 4. 39. Radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları.





Şekil 4. 41. Radyal CO emisyonu dağılımları.

1,0 swirl sayısında CO emisyonu değerleri artan yanma yoğunluğuna bağlı olarak azalmış fakat 0,2 swirl sayısındaki değerlere gerilememiştir. 1,2 ve 1,4 swirl sayılarında CO emisyonları, swirl sayısı arttıkça yükselmiştir. 1,6 swirl sayısında (daha da artan yanma yoğunluğundan dolayı) CO emisyonu değerleri, 0,2 swirl sayısındaki değerlerin altına düşmüştür. 16,3 cm eksenel mesafede swirl sayısının 0,2-0,8 değerleri arasında değişimi, CO emisyonlarına 6,3 cm eksenel mesafedekine benzer bir etki yapmıştır. 0,2-0,4 swirl sayısı aralığında CO emisyonları çok fazla artmış, 0,4-0,8 aralığında pek fazla değişmemiş, 1,0'da azalmış, 1,2-1,4 aralığında tekrar artmış ve son olarak 1,6 swirl sayısında 0,2'deki değerlerin altına düşmüştür. 26,3 cm eksenel mesafede de aynı durum söz konusudur.

Tablo 4.4'te, %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının farklı swirl sayılarında yanma odası çıkışında tek bir noktadan alınan emisyon değerleri yer almaktadır. 0,2-0,8 swirl sayısı aralığında yayılan O₂ ve CO₂ seviyeleri birbirlerine çok yakındır. 1,0 swirl sayısında alev yapısındaki köklü değişiklik sonucu O₂ emisyonları artmış, CO ve CO₂ emisyonları azalmıştır. Bu noktadan sonra swirl sayısının artması (1,4'e kadar), O₂ ve CO₂ emisyonlarını farklı şekillerde etkilemiş, CO emisyonları ise sürekli artmıştır. 1,6 swirl sayısında CO emisyonu, 0,2 swirl sayısındaki değerlerin altına düşmüş, O₂ ve CO₂ emisyonları çok fazla değişmemiştir. Yakıt fakir şartlarda çalışıldığından, test edilen tüm swirl sayılarında yayılan NO_x değerleri 0-2 ppm aralığındadır.

Tablo 4. 4. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının farklı swirl sayılarında yanma odası çıkışında ölçülen egzoz emisyonları.

Swirl Sayısı	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
0,2	11,5	4,5	604	1
0,4	11,3	4,6	4214	1
0,6	11,5	4,5	3707	0
0,8	11,4	4,6	4055	0
1,0	13	3,8	2155	0
1,2	11,9	4,3	5208	1
1,4	12,3	4,1	6055	1
1,6	11,1	4,7	284	2

Sadece CO emisyonları bakımından swirl sayısının 0,4-1,4 değerleri arasında (başlangıç ve bitiş değerleri dahil) değiştirilmesi, yanma verimini olumsuz etkilemektedir. Swirl

sayısının yanma karakteristiklerinin (sıcaklık ve emsiyon) tamamına etkileri göz önünde bulundurulduğunda ilgili yakıcının 0,2 swirl sayısında çalıştırılması gerektiği sonucu çıkarılabilir ancak alev davranışının da incelenmesi gerekmektedir.

4.5 Eşdeğerlik Oranının Yanma Karakteristiklerine Etkisi

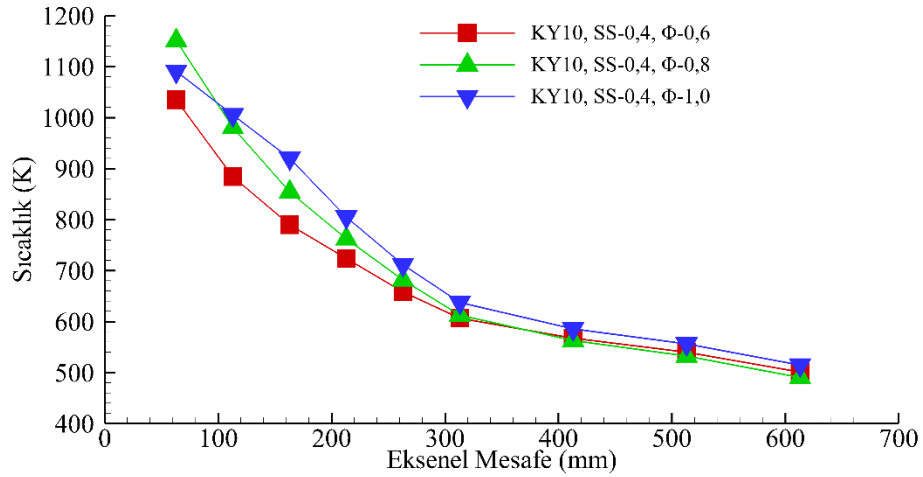
Eşdeğerlik oranına bağlı yanmamış karışımın yanma odasına giriş hızı, akış alanını (örneğin, türbülans yoğunluğunu) ve buna bağlı olarak yanma karakteristiklerini değiştirir [29]. Eşdeğerlik oranı alev kararlılığı, sıcaklık dağılımı, radyasyon verimi ve emisyonlar üzerinde büyük bir etkiye sahiptir çünkü eşdeğerlik oranı adyabatik alev sıcaklığını, laminar alev hızını ve ortalama akış hızını doğrudan etkiler [68]. Bütün bu parametreler de yakıcı performansını belirler. Bu bağlamda, %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımı, farklı swirl sayılarında (0,2-1,6) ve eşdeğerlik oranlarında (0,6, 0,8, 1,0) test edilmiş ve eşdeğerlik oranının yanma karakteristiklerine etkileri incelenmiştir.

Eşdeğerlik oranının eksenel sıcaklık dağılımına etkisi test edilen bazı swirl sayılarında benzer, bazılarında farklıdır. Bu nedenle benzer olanlardan sadece bir tanesi incelenmiştir. 0,2 ve 0,4 swirl sayılarında eşdeğerlik oranının 0,6-1,0 değerleri arasında değişmesi, eksenel sıcaklık dağılımlarını benzer şekilde etkilemiştir. 0,4 swirl sayısında en yüksek sıcaklık değeri (1151,19 K) 0,8 eşdeğerlik oranında elde edilmiştir. Bu noktadan sonra eşdeğerlik oranını artırmak veya azaltmak maksimum sıcaklık değerinin azalmasına neden olmuştur. Azalma miktarı, 0,6 eşdeğerlik oranında daha yüksektir (Şekil 4.42).

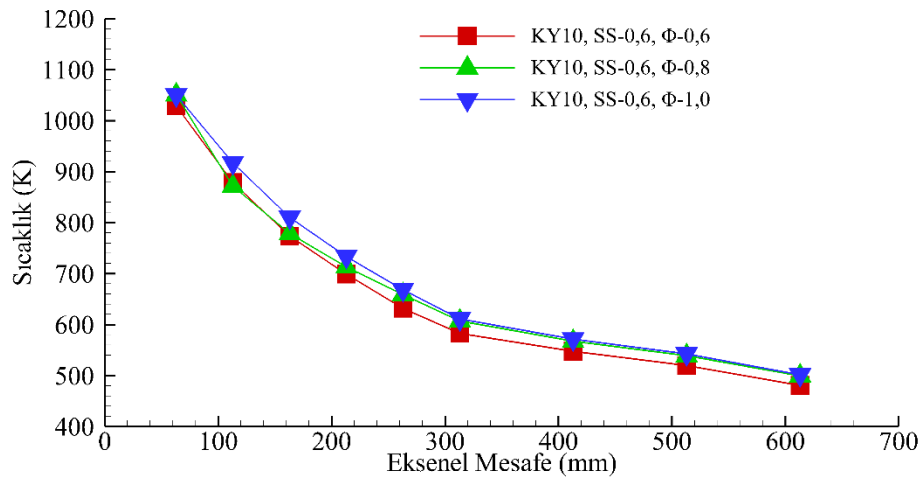
Brülör çıkışından itibaren artan eksenel mesafeyle birlikte sıcaklık değerleri azalmıştır. 0,8 eşdeğerlik oranında sıcaklık değerleri hızlı bir şekilde düşmüş ve yanma odası boyunca (yaklaşık 100 mm eksenel mesafeden başlayarak) en yüksek sıcaklık dağılımı 1,0 eşdeğerlik oranında oluşmuştur. Eşdeğerlik oranının sıcaklık dağılımına etkisi, 0-300 mm eksenel mesafeler arasında belirgindir fakat 300-600 mm aralığında sıcaklık profilleri birbirlerine yaklaşmaktadır (0,6 ve 0,8 eşdeğerlik oranlarında neredeyse aynıdır).

0,6 ve 0,8 swirl sayılarında sıcaklık dağılımları, 0,4 ve 0,2 swirl sayılarındakine benzer bir davranış sergilemiş ve sıcaklık profilleri eğilim bakımından iyi bir uyum göstermiştir. Yanma odası boyunca sıcaklık değerleri test edilen tüm eşdeğerlik oranlarında

birbirlerine yaklaştırmıştır. 0,4 swirl sayısından farklı olarak, yanma odası aşağı akımında 0.8 ve 1,0 eşdeğerlik oranlarındaki sıcaklık profilleri örtüşmüştür (Şekil 4.43).

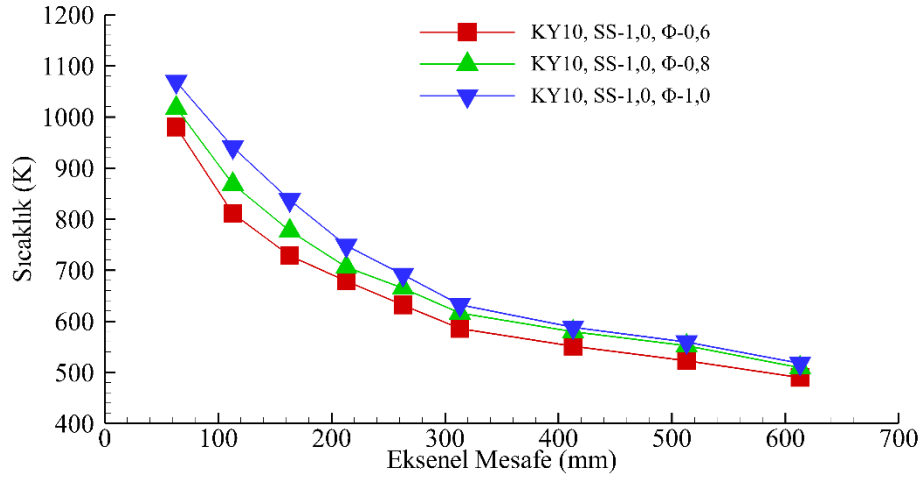


Şekil 4. 42. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 0,4 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında aksel sıcaklık dağılımları.



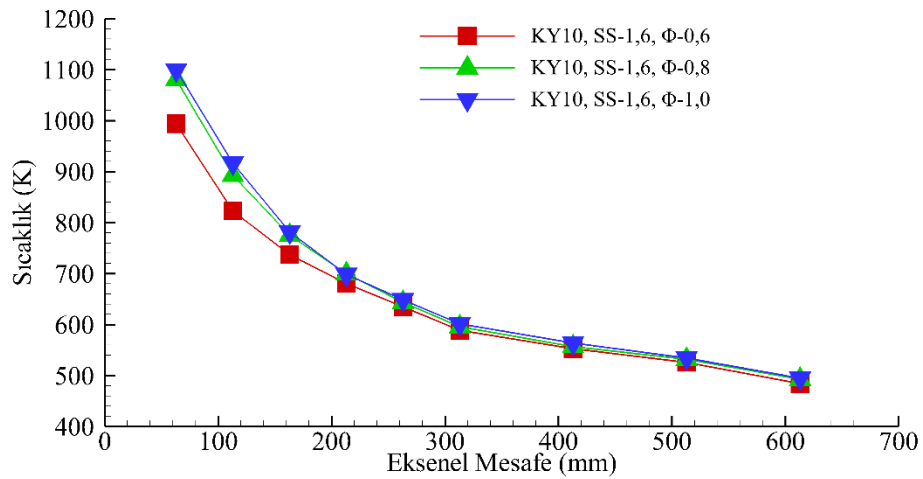
Şekil 4. 43. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 0,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında aksel sıcaklık dağılımları.

Swirl sayısı 1,0-1,4 aralığında en yüksek sıcaklık değerleri 1,0 eşdeğerlik oranında oluşmuştur. Bu husus dışında eşdeğerlik oranının sıcaklık dağılımlarına etkisi, diğer swirl sayılarıyla benzerdir. Eşdeğerlik oranı, yanma odası boyunca sıcaklık dağılımlarını en belirgin şekilde 1,0 swirl sayısında etkilemiştir (Şekil 4.44).



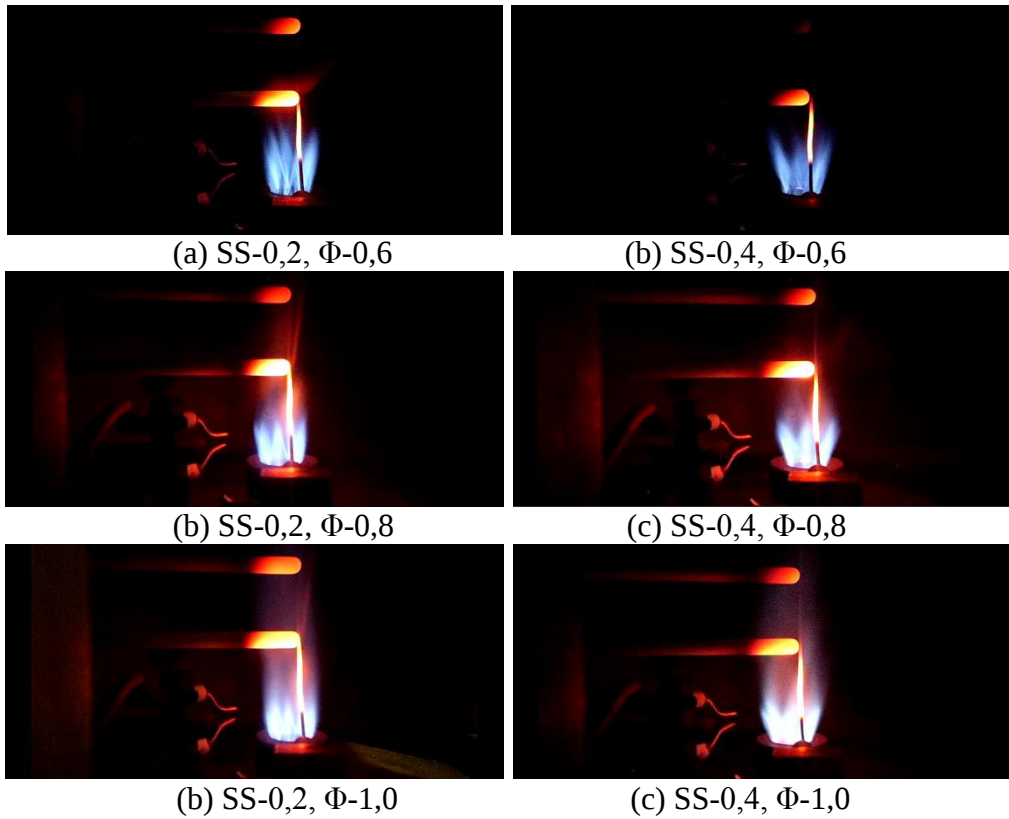
Şekil 4. 44. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 1,0 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında eksenel sıcaklık dağılımları.

1,6 swirl sayısında 0,8 ve 1,0 eşdeğerlik oranlarındaki eksenel sıcaklık değerleri tüm yanma odası boyunca hemen hemen (alev bölgesindeki çok az fark hariç) aynıdır. 300-600 mm eksenel mesafeler arasında ise her üç eşdeğerlik oranındaki sıcaklık değerleri birbirlerine yaklaştırmışlardır. Bu durum, yüksek girdap yoğunluklarının yanma karakteristikleri üzerindeki pozitif etkilerinden kaynaklanmaktadır (Şekil 4.45).



Şekil 4. 45. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında eksenel sıcaklık dağılımları.

Eşdeğerlik oranı, alev yapısını test edilen tüm swirl sayılarında hemen hemen benzer şekilde etkilemiştir. 0,2 ve 0,4 swirl sayılarında eşdeğerlik oranının 0,6-1,0 değerleri arasında yükselmesi, alev yapısını pek fazla değiştirmemiş fakat daha az oksijen şartlarında yanmanın bir sonucu olarak alev parlaklığının artmasına neden olmuştur. Görece düşük oksijen kullanılabilirliğinden dolayı eşdeğerlik oranı arttıkça yanma aşağı akımda tamamlanmış ve uzun alevler oluşmuştur. Azalan kütle akış hızı sonucu, hava/yakıt karışma durumu kötüleşmiş ve düşük reaksiyon yoğunluğuna sahip alevler gözlenmiştir (Şekil 4.46).

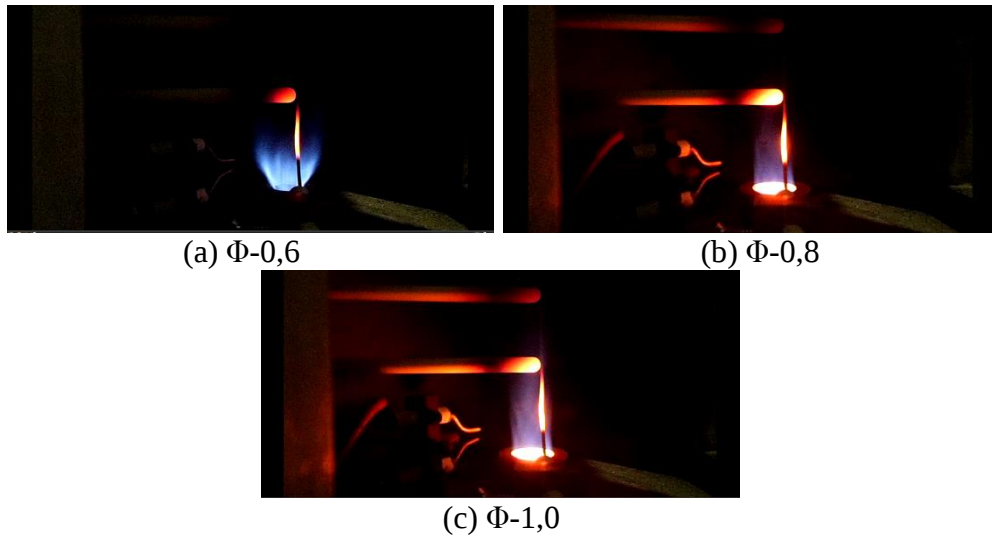


Şekil 4. 46. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının farklı swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında anlık alev görüntüleri.

0,6-1,6 swirl sayısı aralığında eşdeğerlik oranının 0,6'dan 0,8'e yükselmesi alev uzunluğu ve parlaklığı yanında alev şeklinin de değişmesine neden olmuştur. 0,6 swirl sayısından sonra 0,8 eşdeğerlik oranından bir önceki eşdeğerlik oranındaki alev şekli nasıl olursa olsun ince ve uzun alevler oluşmuştur (Şekil 4.47).

Eşdeğerlik oranı, radyal sıcaklık değerlerini test edilen tüm swirl sayılarında hem değer hem de eğilim bakımından (tüm eksenel ve radyal mesafelerde) aynı şekilde etkilemiştir.

0,6-1,0 aralığında eşdeğerlik oranı artışı, radyal sıcaklık değerlerini artırmıştır (bazı swirl sayılarında ve bazı bölgelerde 1,0 eşdeğerlik oranında belirgin olmayan düşüler tespit edilmiştir) ancak artış (veya düşüş) miktarı çok düşüktür. En belirgin artışlar, 1,4 ve 1,6 swirl sayılarında görülmüştür. Bu nedenle eşdeğerlik oranının radyal sıcaklık değerlerine etkisi, 1,6 swirl sayısında incelenmiştir. Eşdeğerlik oranı, radyal sıcaklık değerlerini test edilen tüm eksenel mesafelerde 5-16 cm radyal uzaklıklar arasında çok fazla değiştirmemiştir (Şekil 4.48). En yüksek radyal sıcaklık değerleri, 0,8 veya 1,0 eşdeğerlik oranındadır ancak belirgin bir fark yoktur.



Şekil 4. 47. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 1,4 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında anlık alev görüntüleri.

Eşdeğerlik oranı, CO₂ emisyonlarını da 0,2-1,6 swirl sayısı aralığında aynı şekilde etkilemiştir. Eşdeğerlik oranı arttıkça artan yanma sıcaklıklarına bağlı olarak CO'nin CO₂'e dönüşme oranı yükselmiştir. CO₂ emisyonları bakımından test edilen swirl sayıları arasındaki tek fark, artış miktarıdır. Şekil 4.49'da 1,6 swirl sayısında radyal CO₂ konsantrasyon profilleri yer almaktadır. Eksenel ve radyal uzaklığa bağlı olarak CO₂ konsantrasyonunda artış ve düşüşler gözlenmiştir.

CO emisyonları, eşdeğerlik oranı değişimlerine swirl sayısından bağımsız olarak benzer bir tepki vermiştir. Eşdeğerlik oranının 0,6'dan 0,8'e yükselmesi durumunda CO emisyonları azalmıştır. Stokiyometrik şartlarda ise CO emisyonları bir miktar yükselmiştir (Şekil 4.50). Tam yanma için gereken minimum hava şartlarında (nispeten düşük oksijen kullanılabilirliği) CO oksitlenmesi tamamlanamamıştır. Bu durum, yanma

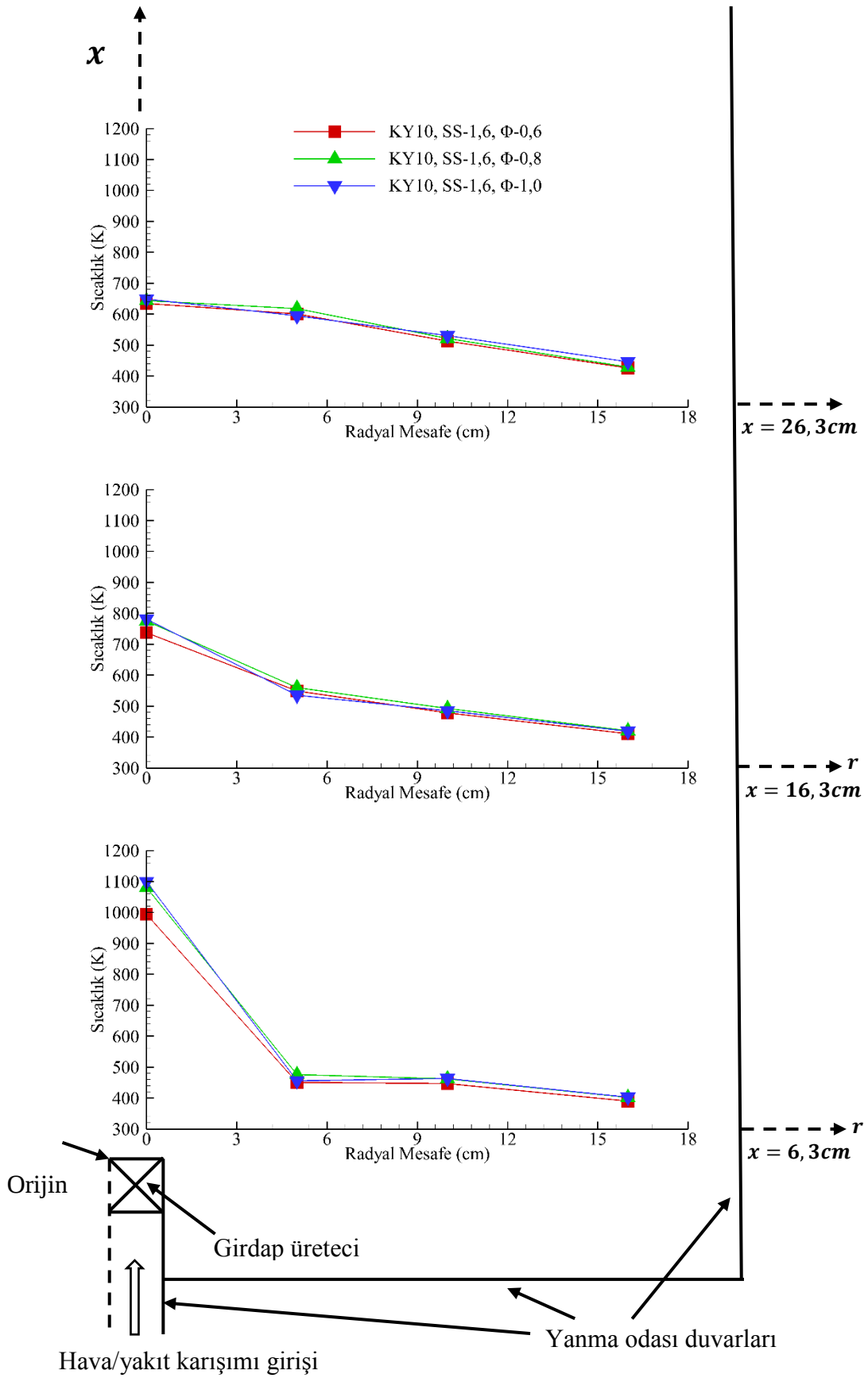
verimi açısından ilgili yakıcıda yakıt fakir şartlarda çalışması gerektiğini göstermektedir. Eksenel mesafe arttıkça CO emisyonları yükselmiştir.

Eşdeğerlik oranı artışıyla yükselen sıcaklık değerleri, NO_x emisyonlarının artmasına neden olmuştur. Bu nedenle tez çalışmasının bu bölümünde eşdeğerlik oranının NO_x emisyonlarına etkisi, radyal NO_x profilleri incelenerek, araştırılmıştır. Yanma sıcaklığına bağlı NO_x artışı, NO_x oluşumunda termal Zeldovich mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir. Eşdeğerlik oranı, NO_x emisyonlarını test edilen tüm swirl sayılarında benzer şekilde etkilemiştir. Eşdeğerlik oranı arttıkça, NO_x emisyonları da kademeli bir şekilde yükselmiştir. Swirl sayıları arasındaki fark, artış miktarı ile alakalıdır. En belirgin artışlar 0,2 swirl sayısında gerçekleştiğinden radyal NO_x profilleri bu swirl sayısında çizilmiştir (Şekil 4.51). 0,6 ve 1,0 eşdeğerlik oranlarında NO_x emisyonu değerleri nerdeyse eksenel mesafeye duyarlıdır ancak 0,8 eşdeğerlik oranında NO_x emisyonları eksenel mesafe arttıkça artmıştır.

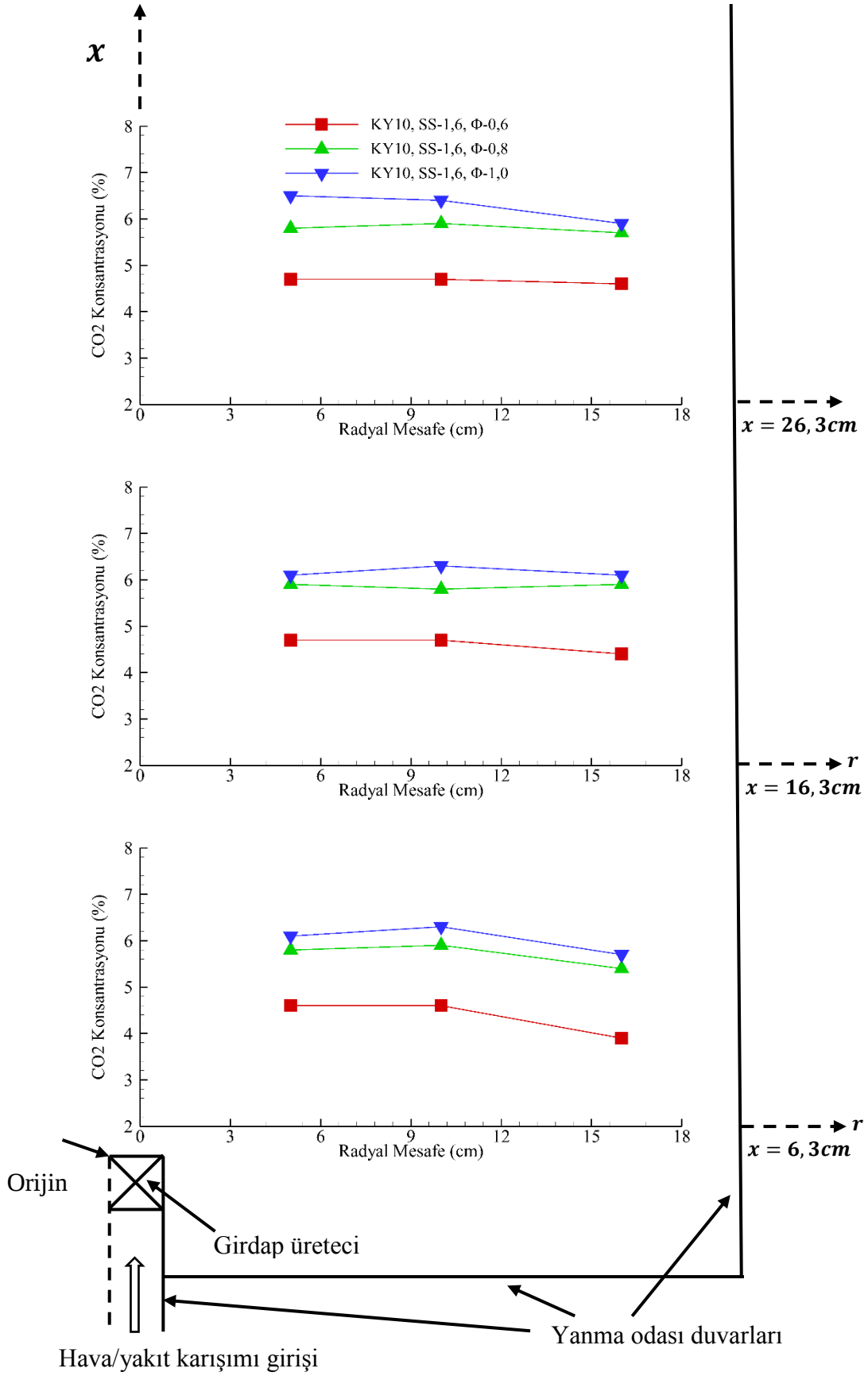
Test edilen tüm swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında yanma odası çıkışında ölçülen egzoz emisyonu değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir. Eşdeğerlik oranı 0,6'dan 0,8'e yükseldiğinde, O_2 ve CO emisyonları azalmıştır ancak CO emisyonlarındaki azalma miktarı çok yüksektir. Bu durum, CO emisyonlarının yanma sıcaklığına yüksek bağlılığından kaynaklanmaktadır. 0,8-1,0 eşdeğerlik oranı aralığında ise CO_2 ve CO (0,4 swirl sayısı hariç) emisyonları artmış, O_2 emisyonları azalmıştır.

Tablo 4. 5. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının farklı swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında yanma odası çıkışında ölçülen egzoz emisyonları.

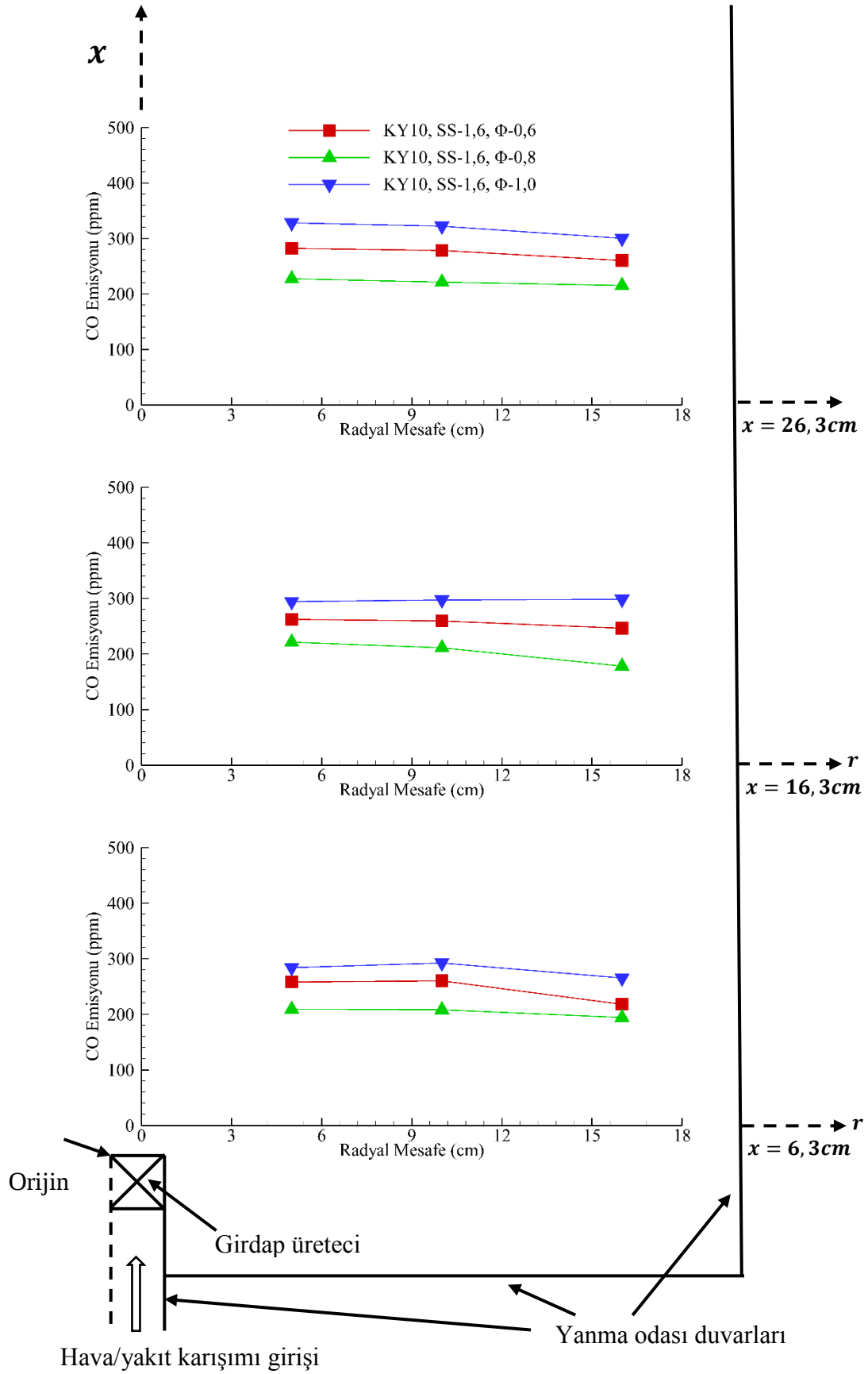
Swirl Sayısı	Eşdeğerlik Oranı											
	0,6				0,8				1,0			
	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
0,2	11,5	4,5	604	1	9,3	5,6	32	12	7,4	6,5	95	16
0,4	11,3	4,6	4214	1	8,0	6,2	137	15	6,3	7,0	123	13
0,6	11,5	4,5	3707	0	8,6	5,9	264	5	6,1	7,1	367	6
0,8	11,4	4,6	4055	0	8,8	5,8	136	10	7,3	6,5	315	8
1,0	13	3,8	2155	0	8,6	5,9	164	9	6,4	7,0	352	9
1,2	11,9	4,3	5208	1	8,8	5,8	258	9	7,2	6,6	381	9
1,4	12,3	4,1	6055	1	9,3	5,5	164	6	7,8	6,3	301	9
1,6	11,1	4,7	284	2	8,9	5,7	212	10	7,4	6,5	321	10



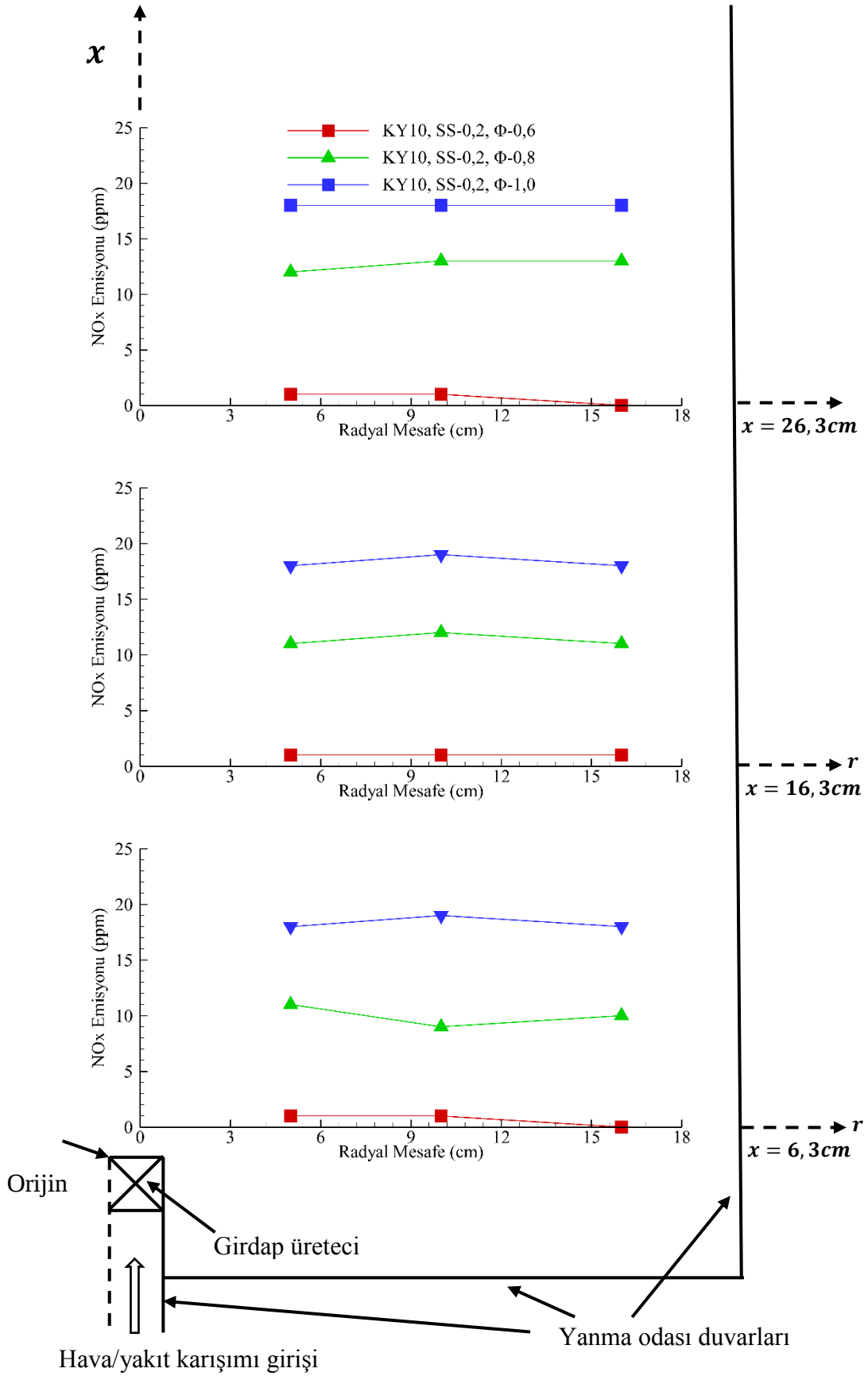
Şekil 4. 48. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal sıcaklık dağılımları.



Şekil 4. 49. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal CO₂ konsantrasyon dağılımları.



Şekil 4. 50. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 1,6 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal CO emisyonu dağılımları.



Şekil 4. 51. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının 0,2 swirl sayısında ve farklı eşdeğerlik oranlarında radyal NO_x emisyonu dağılımları.

NO_x emisyonları, eşdeğerlik oranı arttıkça (0,6-0,8 eşdeğerlik oranı aralığında) yükselmiştir ancak 0,8-1,0 eşdeğerlik oranı aralığında bazı swirl sayılarında aynı değerde kalmıştır. 0,4 ve 0,8 swirl sayılarında, aynı eşdeğerlik oranı aralığında NO_x emisyonları 2 ppm azalmıştır. Swirl sayısının CO₂, CO, O₂ ve NO_x emisyonlarına etkisi monoton değildir. Bahsi geçen kirletici emisyonlar, swirl sayısına bağlı olarak artmış veya azalmıştır. Sadece egzoz emisyonları bakımından, test edilen tüm eşdeğerlik oranlarında yüksek yanma verimi sağlayan tek bir swirl sayısı tespit edilememiştir. Örneğin; 1,6 swirl sayısı 0,6 eşdeğerlik oranında yüksek yanma verimi sağlarken, 0,8 eşdeğerlik oranında en yüksek verim 0,2 swirl sayısındadır.

4.6 Yakıt Kompozisyonu, Swirl Sayısı ve Eşdeğerlik Oranın Termo-akustik Zorlama Altında Alev Davranışına Etkisi

Sürekli yakma sistemlerinde (özellikle yakıt fakir şartlarda çalışmak için dizayn edilmiş ön karışımli sistemler) termo-akustik kararsızlıklar ısı salınımı dinamikleri ve akustik salınımlar (basınç dalgalanmaları) arasındaki iki yöllü etkileşimden kaynaklanır. Genel olarak kararsızlıklar yakıcının doğal akustik modları ile ilişkili frekanslarda gerçekleşirler. Akış hızı veya diğer termodinamik durum değişkenlerindeki dalgalanmalar, ısı salınım oranının dalgalanmasına neden olur. Isı salınımındaki dalgalanmalar da akustik salınımları indükler ve akustik salınımlar, hız ve termodinamik durum değişkenleri dalgalanmalarına neden olur. Akustik salınımlardan eklenen veya çıkarılan enerjinin görece büyüklüğüne bağlı olarak; salınımların genliği azalabilir, sabit kalabilir veya her çevrim boyunca artabilir. Yanma kararsızlığı sadece, yanma süreci tarafından akustik moda sağlanan enerji, yanma modunun enerji kayıplarını (örneğin; radyasyon ve taşınım yoluyla akustik enerjinin dışarı atılması, viskoz yitimi ve ısı transferi) aştığında gerçekleşir. Bu durumda akustik modun enerjisi zamanla artar ve salınımların (titreşimlerin) genliği belirli bir değere kadar üstel olarak yükselir [113, 114]. Genel olarak kararsızlıkların ortaya çıkışı, yüksek genlikli basınç ve hız salınımları oluşturdukları için (gaz türbinlerde itici güç dalgalanmalarına neden olur, şiddetli titreşimler sistemin kontrolünü zorlaştırır, ısı transferi ve yakıcı duvarlarındaki termal gerilmeler artar, salınımlı mekanik yükler sistem komponentlerinde metal yorgunluğuna neden olur, alev sönmesi ve geri tepmesi görülebilir) problemlidir [113]. Bazı şartlar altında kararsızlıkların baskılanması veya sönümlenmesi mümkündür. Pasif kontrol yaklaşımları; sistemin işletme şartlarının veya termo-akustik karakteristiklerinin

değiştirilmesini, alevin bir engel veya akustik sönümleyicilerle kontrol altına alınmasını, alev stabilizasyon metodunun veya pozisyonunun değiştirilmesini içerir. Bu yaklaşımlar değişen işletme şartlarına uyum sağlayamadığından kullanımları kısıtlıdır. Aynı zamanda, pasif kontrol yöntemleri yüksek frekanslı kararsızlıkları baskılamada etkiliyken düşük frekanslı kararsızlıkları sönümlemede yeterli değildirler. Aktif kontrol stratejileri ise yanma dinamiklerini kontrol eden mekanizmaların doğru bir şekilde modellenmesini, akustikler ve yanma dinamikleri arasındaki belirgin olmayan ilişkinin iyi bir şekilde anlaşılmasını gerektirir [114, 115].

Tez çalışmasının bu bölümünde yakıcı içerisindeki akustik alan, yanma odası kollarına yerleştirilmiş olan hoparlörler vasıtasıyla 0-300 Hz aralığında ses dalgaları oluşturularak değiştirilmiş ve böylece alev dinamik olarak kararsız hale getirilmiştir. Bu şartlar altında alev davranışı; anlık alev görüntüleri, ışık yoğunluğu ve basınç profilleri incelenerek değerlendirilmiştir.

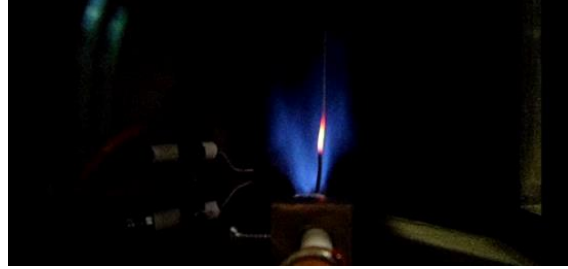
Birçok güç üretimi, tahrik ve ısıtma sistemi fakir (sönme limitine yakın eşdeğerlik oranlarında)-ön karışımli-sürekli yanma şartlarında çalışırlar ve bu tür sistemler alev geri tepmesine, vurutuya ve yanma dinamiklerine aşırı derecede duyarlıdırlar [2]. Bu bağlamda, öncelikli olarak %100CNG ve %80CNG-%20H₂ karışımının farklı swirl sayılarındaki (0,2, 0,6 ve 1,0) fakir ve zengin tutuşma limitleri (mevcut yakıcı düzeneğinde) belirlenmiştir. Daha sonra %100CNG ve %80CNG-%20H₂ alevleri, tutuşma limiti değerlerinde akustik olarak zorlanmış ve zorlama altında alev davranışları incelenmiştir. Bu deneyler sırasında yakıcı gücü 3 kW değerinde sabit tutulmuştur. İlgili yakıtların test edilen swirl sayılarındaki fakir ve zengin tutuşma eşdeğerlik oranları Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4. 6. %100CNG ve %80CNG-%20H₂ karışımının farklı swirl sayılarında fakir ve zengin tutuşma limitleri.

Yakıt	Swirl Sayısı		
	0,2	0,6	1,0
%100CNG	$\Phi = 0,48-0,90$	$\Phi = 0,44-0,95$	$\Phi = 0,48-0,90$
%80CNG-%20H ₂	$\Phi = 0,45-0,96$	$\Phi = 0,43-0,98$	$\Phi = 0,44-0,95$

Fakir ve zengin tutuşma limitlerinde ilgili yakıt alevleri, 0-300 Hz aralığında frekansa sahip ses (basınç) dalgaları ile akustik olarak zorlanmıştır. Fakir ve zengin tutuşma

limitlerinde, (0,2 swirl sayısında) %100CNG alevlerinde 95 Hz değerinde alev sönmesi gerçekleşmiştir. 0-90 Hz aralığında her iki alevde de çok az salınım görülmüş, 90 Hz değerinde ise alevler şiddetli bir şekilde salınım yapmaya başlamıştır. Yakıt fakir sönme limitinde %100CNG alevi, akustik zorlama altında yakıcı iç halkasından aşağı akıma doğru hareket etmiş (alev kopması) ve daha sonra sönmüştür (Şekil 4.52).



(a)



(b)

Şekil 4. 52. Yakıt fakir sönme limitinde %100 CNG alevi: a) Alev kopması başlangıcı- alev son derece salınımlı, b) Alev sönmeden hemen önce.

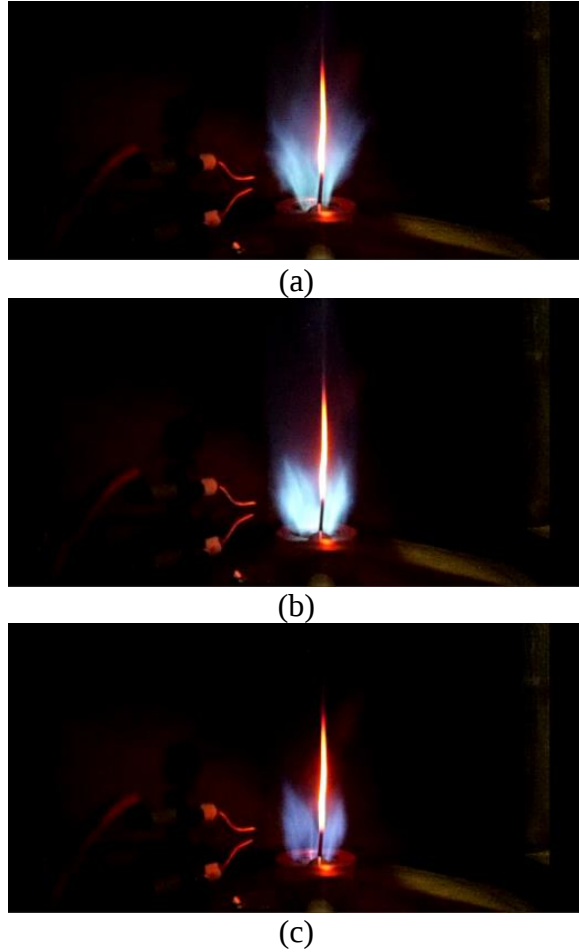
Yakıt zengin sönme limitinde %100 CNG alevi ise tam tersi bir davranış sergilemiştir. Alev sönmeden önce brülör yukarı akımına doğru hareket etmiş, girdap üreticinin iç ve dış halkasına tutunmuş daha sonra sönmüştür (Şekil 4.53). Yakıt zengin ve fakir %100CNG alevlerinin akustik zorlama altında birbirlerine tamamen zıt davranışları, artan eşdeğerlik oranıyla azalan brülör çıkış hızı ile açıklanabilir.



Şekil 4. 53. Yakıt zengin sönme limitinde %100 CNG alevi (sönmeden hemen önce, SS-0,2).

%20 hidrojen ilavesi, %80CNG-%20H₂ alevini (SS-0,2) termo-akustik kararsızlıklara karşı daha dirençli hale getirmiştir. Yakıt fakir sönme limitinde %80CNG-%20H₂ alevi, 90 Hz değerinde salınım yapmaya başlamış, 95 Hz değerinde bu salınım maksimum değerine ulaşmıştır. %100 CNG alevinde olduğu gibi alev kopması görülmemiştir. Alev girdap üretici iç halkasına sıkı bir şekilde tutunmuş ve kararlı bir şekilde (çok az salınım yaparak) yanmaya devam etmiştir.

Yakıt zengin sönme limitinde %80CNG-%20H₂ alevi, 90 Hz değerinde şiddetli bir şekilde salınım yapmaya başlamış, 93 Hz değerinde yukarı akıma ilerleyerek (alev geri tepmesine sebebiyet vermeden) sönmüştür (Şekil 4.54).



Şekil 4. 54. Yakıt zengin sönme limitinde %80CNG-%20H₂ alevi: a) Alev salınım yapmaya başlamış, b) Sönmeye yakın, c) Sönmeden hemen önce (SS-0,2).

Swirl sayısı 0,2'den 0,6'ya yükseldiğinde %100CNG alevi (yakıt fakir sönme limitinde), termo-akustik kararsızlıklara karşı daha dirençli hale gelmiştir. Alev radyal olarak dışa

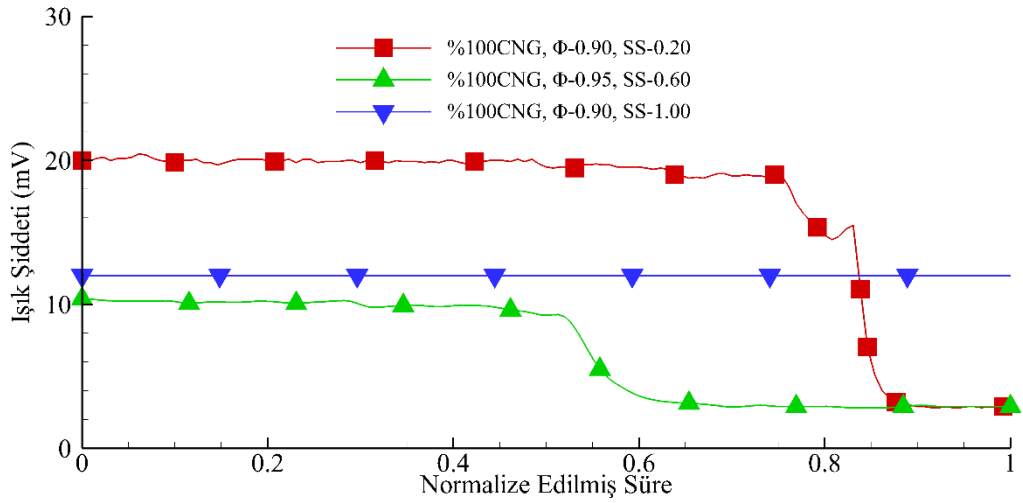
doğru açıldığından uzunlamasına salınımlar alevi çok fazla etkilememiştir. 95 Hz değerinde alev kopmadan sönmüştür. Yakıt zengin sönme limitinde ise %100CNG alevi, 60 Hz değerinde salınım yapmaya başlamış, 90 Hz’de kısa bir süre için girdap üretici iç halkasından kopmuş ve yukarı akıma ilerleyerek sönmüştür.

0,6 swirl sayısında %80CNG-%20H₂ karışımı, hem hidrojenin hem de yüksek girdap yoğunluğunun alev kararlılığı üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı alev kararsızlıklarına daha dirençli hale gelmiştir (hem zengin hem de fakir sönme limitinde). Yakıt zengin sönme limitinde %80CNG-%20H₂ karışımı, artan alev uzunluğuna (görece düşük oksijen kullanılabilirliğinden dolayı) ve azalan brülör çıkış hızına bağlı olarak eksenel salınımlara daha duyarlı hale gelmiş ve 95 Hz değerinde sönmüştür.

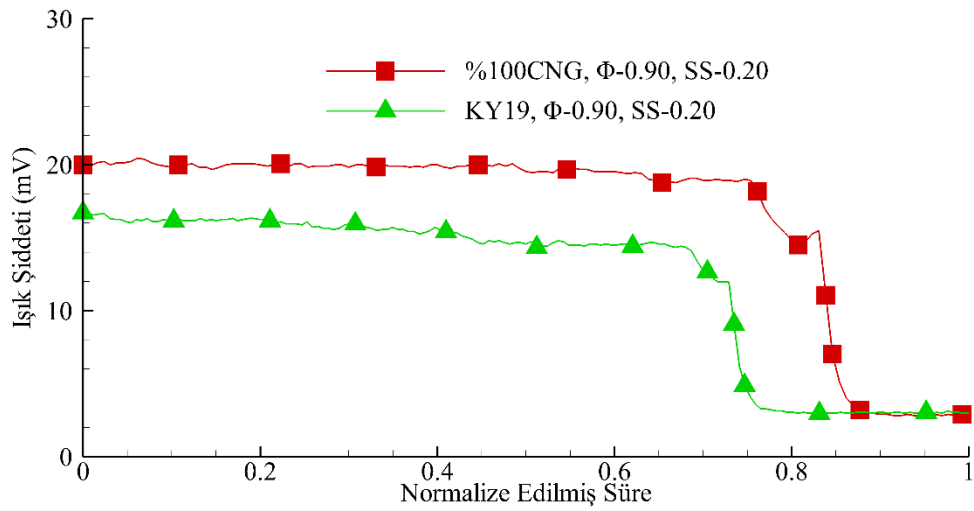
1,0 swirl sayısında yakıt zengin ve fakir sönme limitlerinde %100CNG alevleri daha kararlı yanmışlar ve 0-300 Hz arasında alev sönmesi gerçekleşmemiştir. Aynı swirl sayısında %20 hidrojen ilavesiyle alev (fakir) çok daha kararlı hale gelmiştir. Akustik zorlama altında alev çok az salınım yapmıştır. Her iki durumda da görece yakıt zengin alevler daha fazla salınım yapmıştır. Eşdeğerlik oranının artması termal difüzyon kararsızlıkları artan Lewis numarasından (ısı yayınlabilirliğinin kütle yayınlabilirliğine oranı) dolayı azaltır, hidrodinamik kararsızlıkları ise artırır çünkü zengin karışımlarda alev kalınlığı ve termal genleşme oranı (yanmamış gaz yoğunluğunun yanmış gaz yoğunluğuna oranı) artar [90].

Şekil 4.55’te %100CNG alevinin farklı swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarındaki ölçülen ışık yoğunluğu profilleri görülmektedir. Bütün ölçümler akustik zorlama başlangıcından itibaren alınmış ve geçen süre, 0-1 aralığında normalize edilmiştir. 0,2 swirl sayısındaki yüksek ışık yoğunluğu, yüksek alev uzunluğundan kaynaklanmaktadır. Swirl sayısı arttıkça alevin daha kararlı yandığı ve akustik salınımlara daha dirençli hale geldiği daha önce belirtilmişti. Bu durum, bahsi geçen grafikte açıkça görülmektedir. 0,2 swirl sayısında alev salınımlarına bağlı olarak ışık şiddetindeki değişim miktarı (dalgalanmalar) yüksektir. Swirl sayısı arttıkça değişim miktarı azalmıştır. Işık şiddetindeki sert düşüşler, alev sönme anını göstermektedir.

Hidrojen, kendine özgü özelliklerinden dolayı kısa ve geniş alevler oluşturur. Aynı eşdeğerlik oranı ve swirl sayısındaki %80CNG-%20H₂ alevinin %100CNG alevine kıyasla daha düşük ışık yoğunluğuna sahip alevler oluşturması bu nedenledir (Şekil 4.56).



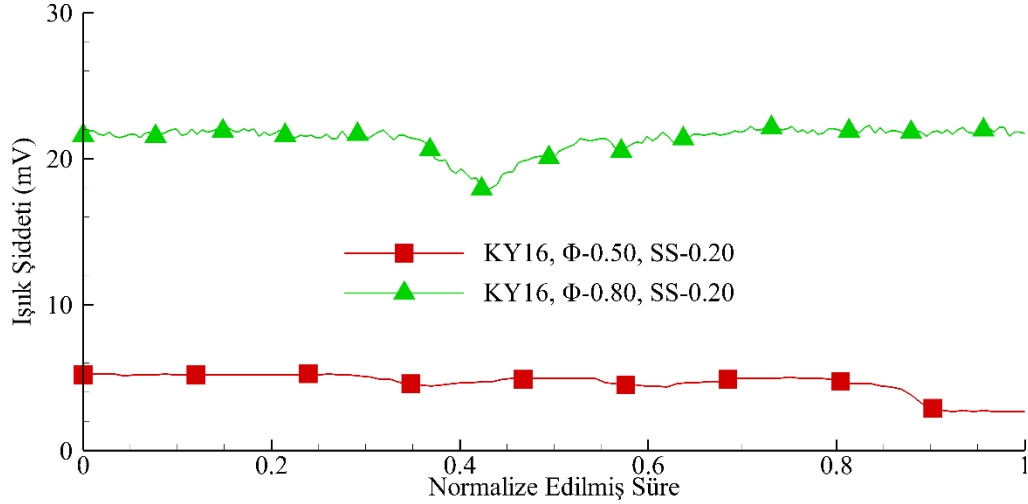
Şekil 4. 55. %100CNG alevinin farklı swirl sayılarında (yakıt zengin sönme limitinde) ışık yoğunluğu dağılımları.



Şekil 4. 56. %100CNG ve %80CNG-%20H₂ karışımının ışık yoğunluğu dağılımları.

Sentetik gazları daha iyi temsil ettikleri için %40-CNG-%10H₂-%50CO, %40-CNG-%30H₂-%30CO ve %40-CNG-%40H₂-%20CO karışımları (H₂/CO oranı sırasıyla; 0,2, 1,0 ve 2,0), 0,2 swirl sayısında; 0,5 ve 0,8 eşdeğerlik oranlarında akustik zorlama altında test edilmiştir. %40-CNG-%10H₂-%50CO alevi, 0,5 eşdeğerlik oranında (SS-0,2) 15 Hz değerinde salınım yapmaya başlamış, 50 Hz değerinde tamamen salınımlı hale gelmiş ve 95 Hz değerinde sönmüştür. Salınım yapmaya başladığı bölgeler ışık şiddetindeki azalma ile ilişkilendirilebilir (Şekil 4.57). Aynı karışım, 0,8 eşdeğerlik oranında 20-90 Hz

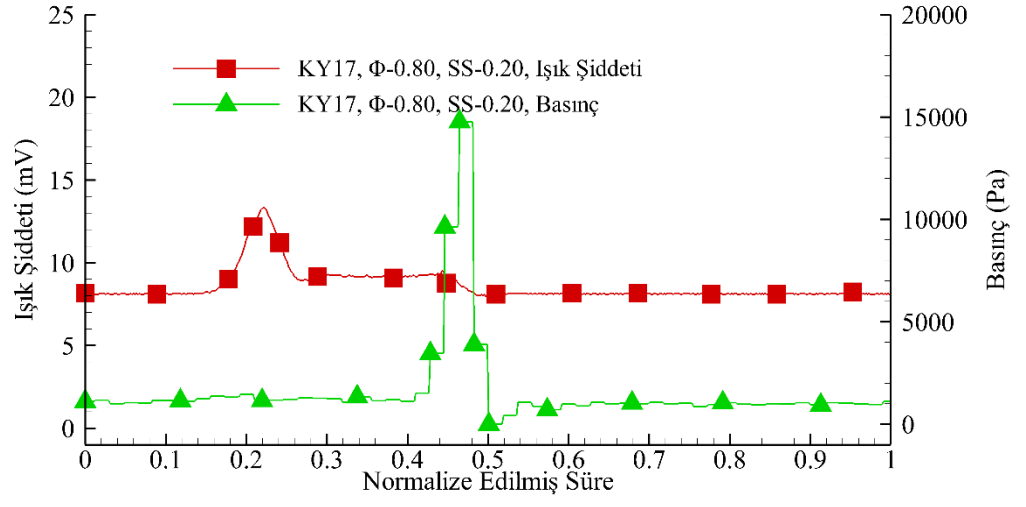
aralığında salınım yapmıştır (ayrıca 150 Hz değerinde). Bu aralıkta ışık yoğunluğu azalmış, 90-300 Hz aralığında tekrar artmıştır. Alev sönmesi gerçekleşmemiştir.



Şekil 4. 57. %40-CNG-%10H₂-%50CO alevinin 0,5 ve 0,8 eşdeğerlik oranlarındaki ışık yoğunluğu dağılımları (SS-0,2).

%40-CNG-%30H₂-%30CO alevi, 0,5 eşdeğerlik oranında (SS-0,2) akustik zorlama altında 90 Hz değerine kadar herhangi bir salınım yapmamış, 95 Hz değerinde sönüştür. Aynı karışım, 0,8 eşdeğerlik oranında 20 Hz değerinde salınım yapmaya başlamış, 60 Hz değerinde (alev herhangi bir dinamik kararsızlık göstermeden) alev geri tepmesi gerçekleşmiştir (Şekil 4.58). Alev geri tepmesi durumu, brülör üzerine yerleştirilmiş olan basınç sensörü ve foto diyotlar vasıtasıyla tespit edilmiştir. Alev geri tepmesi durumunda brülör içerisindeki basınç ve ışık yoğunluğu, alev varlığına bağlı olarak artmıştır. Profillerdeki ani artışların aynı zamana denk gelmemesinin nedeni, basınç ve ışık dalgaları arasındaki hız farkıdır.

%40-CNG-%40H₂-%20CO alevi, 0,2 swirl sayısı ve 0,5 eşdeğerlik oranında akustik zorlama altında 0-95 Hz arasında artan hidrojen miktarından dolayı (alev girdap üretici iç ve dış halkasına sıkı bir şekilde tutunmuş ve iyice kısalmıştır) herhangi bir değişiklik (dinamik) göstermemiştir. 95 Hz değerinde belirli belirsiz salınım yapmış, 100-300 Hz aralığında başka bir değişiklik gözlenmemiştir. Aynı karışım 0,8 eşdeğerlik oranında akustik zorlama başlamadan geri tepmiştir.



Şekil 4. 58. %40-CNG-%30H₂-%30CO karışımının basınç ve ışık yoğunluğu dağılımları.

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında CNG/H₂/CO/CO₂ karışımı sentetik gazların yanma karakteristikleri ve alev davranışları laboratuvar ölçekli bir yakıcıda farklı swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında deneysel olarak incelenmiştir. Sentetik gazların yanma özellikleri, yanma odası boyunca (eksenel ve radyal) sıcaklık ve emisyon dağılımları (CO, CO₂, O₂ ve NO_x); alev davranışları ise anlık alev görüntüleri, ışık yoğunluğu ve basınç dağılımları incelenerek belirlenmiştir. Deneyler sırasında öncelikli olarak, test edilecek sentetik gaz karışımlarının herhangi bir alev kararsızlığına maruz kalmadan test edilebileceği sabit bir eşdeğerlik oranı belirlemek için kararlı çalışma (fakir sönme ve alev geri tepme limitleri) aralıkları belirlenmiştir. Yakıt kompozisyonunun yanma özelliklerine etkisi, H₂/CO oranı 0,5, 1,0 ve 2,0 değerleri arasında değiştirilerek; inert seyreltiminin etkisi ise her bir gaz karışımına hacimce %0-20 aralığında (%5 artırılarak) CO₂ ilavesi yapılarak değerlendirilmiştir. Değişken gaz kompozisyonu sabit bir eşdeğerlik oranının belirlenmesini zorunlu kılmıştır çünkü Lefebvre [61], Wobbe indeksinin sistemin (brülörün) tasarlandığı değerden % 5'den fazla değişmemesi gerektiğini belirtmiştir. Yakıt kompozisyonu ve inert seyreltiminin yanma özelliklerine etkileri incelendikten sonra deneyler sırasında kararlı bir şekilde yandığı tespit edilen %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımı, eşdeğerlik oranı (kararlı çalışma aralığı en geniş olan karışım seçilmiştir) ve swirl sayısının alev karakteristiklerine etkisini incelemek için kullanılmıştır. Son olarak, yanma odası içerisindeki akustik sınır şartlar, yanma odası kollarına yerleştirilmiş hoparlörler vasıtasıyla 0-300 Hz aralığında frekansa sahip ses dalgaları oluşturularak değiştirilmiş ve %100CNG, %80CNG-%20H₂, %40CNG-%10H₂-%50CO, %40CNG-%40H₂-%20CO ve %40CNG-%30H₂-%30CO

karışımlarının akustik zorlama altında alev davranışları incelenmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Sentetik gaz karışımının H_2/CO oranı arttıkça (bir başka ifadeyle karışımda H_2 içeriği arttıkça) fakir sönme ve alev geri tepme limitleri azalmıştır. Ref. [106], hidrokarbon karışımlarının alev geri tepme eğilimlerinin alev hızı ve yakıt karışımı stokiometrisi tarafından kontrol edildiğini, sentetik gazların alev geri tepme karakteristiklerinin ise hidrojen kinetikleri tarafından belirlendiğini rapor etmiştir. Hidrojen, yüksek alev hızından dolayı [29, 40, 90, 102, 103, 105, 106] yakıcı çalışma şartlarını alev geri tepme rejimine doğru kaydırmıştır. Aynı şekilde, hidrojenin yüksek alev hızı (tam yanma için daha az kalma zamanı gerektirir [40]) karışımın daha fakir şartlarda ateşlenebilmesini sağlamıştır.
- CO_2 ilavesi, fakir sönme limitine monoton bir şekilde etki etmemiştir. Ref. [90]'ın çalışmalarına benzer olarak, %5 ve 20 CO_2 ilavesi test edilen bütün H_2/CO oranlarında fakir sönme limitini artırmıştır. Bu değerlerin arasında kalan artışlar, bazı karışımların fakir sönme limitlerini artırırken, bazı karışımların fakir sönme limitlerini azaltmıştır. Ref. [102], uzun alevlerden radyasyonla salınan ısı enerjisinin alev bölgesinin yukarı akımında absorbe edilerek hava/yakıt karışımının ön ısıtılmasını sağladığını ve bu durumun fakir sönme limitini olumlu yönde etkileyebileceğini belirtmiştir. CO_2 ilavesi ile fakir sönme limitinde meydana gelen düşüşlerin bu durumdan kaynaklandığı değerlendirilmiştir.
- İnert seyreltiminin alev geri tepme limitleri üzerindeki etkisi, fakir sönme limitine kıyasla daha belirgin ve monotondur. Gaz karışımında CO_2 miktarı arttıkça alev geri tepme limiti H_2/CO oranından bağımsız olarak artmıştır [29, 106]. %20 CO_2 ilavesi durumunda ise bu artış en yüksek değerini almıştır [29]. CO_2 , kimyasal reaksiyonlarda $CO + OH = CO_2 + H$ reaksiyonu vasıtasıyla aktif bir şekilde rol alır [109] ve hava\yakıt karışımının reaktivitesi düşer [20, 102, 113]. CO_2 ilavesi, adyabatik alev sıcaklığını da düşürür [90] ve aynı miktarda termal güç elde edilebilmesi için hava/yakıt karışımının daha yüksek hızda sağlanması gerekir. Bu iki durum, yakıt karışımının alev geri tepme eğilimini azaltmıştır.
- H_2/CO oranından bağımsız olarak karışım içeriğinde CO_2 miktarı arttıkça alev bölgesindeki maksimum sıcaklık değeri azalmış [90, 102, 108, 109, 113], yanma odası çıkış sıcaklık değerleri ise yükselmiştir. CO_2 ilavesi ile artan alev boyunun çıkış sıcaklık

değerlerini yükselttiği düşünülmektedir. Ref. [109], alev uzunluğunun aşağı akım sıcaklık dağılımını etkilediğini belirtmiştir.

- %0-20 CO₂ ilavesi test edilen tüm H₂/CO oranlarında yanma odası boyunca sıcaklık dağılımlarını çok fazla etkilememiştir ancak H₂/CO oranı arttıkça CO₂ ilavesinin sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi belirginleşmiştir.

- Sentetik gaz yanması, hidrojenin reaksiyon kinetikleri tarafından kontrol edilir [4, 90] ve H₂/CO oranı, alev sıcaklığını önemli ölçüde değiştirmez (CO'nin yüksek molar ısıtma değerinden dolayı H₂ ve CO zengin karışımların maksimum sıcaklık değerleri birbirlerine yakındır) [20]. Mevcut çalışmada da H₂/CO oranı maksimum sıcaklık değerini pek fazla değiştirememiş fakat yanma odası boyunca sıcaklık dağılımını nispeten değiştirebilmiştir. H₂/CO oranı en düşük olan karışım yanma odası boyunca en yüksek sıcaklık dağılımını oluşturmuştur. CO oksidasyon kinetikleri yavaştır ve CO zengin karışımlar, uzun alevler oluştururlar. İlgili karışımın yüksek sıcaklık dağılımı bu durumdan kaynaklanmaktadır.

- %20 CO₂ ilavesi durumunda, H₂/CO oranı 1,0 olan karışım (görece yüksek ısı değerine rağmen) en düşük sıcaklık dağılımını oluşturmuştur. Ref. [103], bazı durumlarda yüksek H₂ ve yüksek CO içeren H₂/CO/CH₄ karışımlarının yanma oranlarının görece düşük miktarda H₂ ve CO içeren karışımlara kıyasla daha düşük (H₂'nin CO ve CH₄ tarafından inhibe edildiği bir durum) olabileceğini belirtmiştir. Bahsi geçen karışımın düşük sıcaklık dağılımı bu olguya dayandırılmıştır.

- CO₂ ilavesi, alev stabilizasyon noktasını etkilememiş (alev brülör çıkışında girdap üretici kanatçık açısında sabitlenmiştir) fakat alev şeklini ve uzunluğunu önemli ölçüde değiştirmiştir. Karışım içeriğinde CO₂ arttıkça; uzun (CO₂'nin taşınım etkisi alev uzunluğunu artırma eğilimindedir), geniş [107, 109] ve düşen reaktiviteden dolayı mavimsi alevler gözlenmiştir. Yüksek H₂ içeriğine sahip karışımlar, kısa ve kompakt [102, 107, 109, 110, 112] alevler oluştururken, yüksek CO içeren karışımlar daha parlak ve uzun [102, 107, 108] alevler oluşturmuşlardır. H₂ ve O₂ tüketimi, radikal (O, H ve OH) konsantrasyonlarını artırdığından (CO tüketimi, azaltır) [105] görece daha fazla hidrojen içeren sentetik gazlar, yüksek yanma yoğunluklu alevler oluşturmuşlardır.

- Eksenel sıcaklık dağılımlarından farklı olarak radyal sıcaklık değerleri, yanma sonu gazlarının yanma odası içerisinde homojen bir şekilde dağılması sonucunda artan eksenel mesafeyle artmıştır (alev merkezi hariç). Artan radyal mesafede ise sıcaklık değerleri azalmıştır. Bu azalma, alev bölgesinde en yüksektir ve artan eksenel mesafeyle

azalmıştır. CO₂ ilavesiyle artan alev çapına bağlı olarak radyal sıcaklık değerleri yükselmiştir [20]. H₂/CO oranından bağımsız olarak, CO₂ ilavesi radyal sıcaklık değerlerini çok az değiştirmiştir.

- CO₂ emisyonları, hem karışım içeriğindeki CO₂ miktarına hem de karışımın H₂/CO oranına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Karışım içeriğinde CO'nun artması, hem yanmamış CO miktarını hem de egzoz gazlarında yanmış CO₂ miktarını etkilemiştir [20]. CO₂ oluşumunda yanma sıcaklığı yanında yakıt kompozisyonu çeşitliliği sonucu karışımın kimyasal ve termo-fiziksel özelliklerde meydana gelen değişikliklerin de baskın olduğu tespit edilmiştir.

- Karışım içeriğinde CO₂ miktarı arttıkça (karışımın tepkinirliği düşer) H₂/CO oranından bağımsız olarak CO emisyonları yükselmiştir [90, 108]. CO₂ ilavesi, test edilen tüm H₂/CO oranlarında yanma sıcaklıklarını ve CO₂ emisyonlarını çok fazla etkilemediği halde CO emisyonlarını önemli ölçüde değiştirmiştir. Bu durum, CO oluşumunun sıcaklık bağımlılığını (düşük sıcaklık-düşük oksitlenme oranı) göstermektedir [100, 116]. Aynı zamanda, düşük eşdeğerlik oranlarında az miktarda CO₂ ilavesinin bile CO emisyonlarını büyük ölçüde artırdığı rapor edilmiştir [102]. Karışım içeriğinde H₂ arttıkça CO emisyonları, artan tepkinirlikten (H atomu konsantrasyonu, CO'nun hızlı oksidasyon yollarını önemli ölçüde etkiler) dolayı azalmıştır [90, 107, 112].

- 0,2-1,6 aralığında swirl sayısının değişmesi, fakir sönme ve alev geri tepme limitlerini tek düze bir şekilde etkilememiştir. Swirl sayısına bağlı olarak yükseliş ve düşüşler tespit edilmiştir. Swirl sayısının yanma karakteristiklerine tek düze olmayan etkisi, Ref. [30, 111] tarafından da rapor edilmiştir.

- Swirl sayısının alev geri tepme limitine etkisi, fakir sönme limitine kıyasla [117] daha belirgindir.

- En geniş kararlı çalışma aralığı, 1,4 swirl sayısında tespit edilmiştir.

- 0,2-0,4 swirl sayısı aralığında alev geri tepmesi gerçekleşmiş, 0,6-1,6 aralığında ise zengin sönme gerçeklemiştir. Alev geri tepme ve fakir sönme limitlerini belirleyen parametreler; yakıt türü, eşdeğerlik oranı, akış hızı ve yakıcı geometrisidir ve bu parametreler girdap yoğunluğundan ziyade yakıt kompozisyonuna bağlıdır (düşük swirl sayılarında) [40, 106]. Yüksek swirl sayılarında oluşan resirkülasyon bölgesi, akış alanını daha kararlı hale getirerek alev geri tepme eğilimini azaltmıştır.

- Swirl sayısının alev şekli üzerindeki etkisi çok büyüktür [30]. 0,2-0,8 ve 1,2-1,4 değerleri aralığında swirl sayısının artması, alev boyunun kısılmasına ve alevin radyal

olarak merkezden dışarı doğru yayılmasına neden olmuştur [30, 106, 112]. 1,0 ve 1,6 swirl sayılarında ise karışım, brülör içinden yanmaya başlamış ve diğer swirl sayılarına kıyasla farklı yapıda alevler oluşmuştur.

- Swirl sayısının artması, yoğun kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği bölgeyi alev merkezinden radyal olarak dışarı doğru kaydırıldığından swirl sayısı arttıkça alev bölgesindeki eksenel sıcaklık değerleri düşmüştür [111]. Alev çapının artmasına bağlı olarak radyal sıcaklık değerleri ise yükselmiştir.
- Swirl sayısı, yanma odasından salınan O_2 , CO_2 ve NO_x emisyonu seviyelerini çok fazla değiştirmemiş fakat CO emisyonlarının 0,4-1,4 swirl sayısı aralığında çok fazla artmasına neden olmuştur. En az CO salınımı 1,6 swirl sayısında gerçekleşmiştir.
- Swirl sayısından bağımsız olarak, 0,6-1,0 aralığında eşdeğerlik oranının artması, yanma odası boyunca eksenel sıcaklık değerlerinin yükselmesine neden olmuştur.
- Farklı swirl sayılarında akış alanı, eşdeğerlik oranına bağlı olarak farklı davranış göstermiş [40] ve buna bağlı olarak alev şekli de farklı biçimlerde etkilenmiştir.
- Düşük eşdeğerlik oranlarındaki yüksek alev gerilimi, yanmamış CO miktarını artırır çünkü CO oksitlenmesi yavaş olduğundan yüksek kalma zamanı gerektirir [68, 100, 116]. Eşdeğerlik oranı 0,6'dan 0,8'e yükseldiğinde, test edilen tüm swirl sayılarında O_2 ve CO emisyonları azalmış, NO_x ve CO_2 emisyonları artmıştır. CO emisyonlarındaki azalma ve NO_x emisyonlarındaki artış miktarı çok fazladır. Yüksek eşdeğerlik oranlarında alev uzunluğu ve alev parlaklığı arttıkça sıcaklık etkileri galip gelir ve sonuçta, NO_x oluşumu ve ısı salınımı artar [60]. 1,0 eşdeğerlik oranında CO emisyonları artmış; NO_x emisyonları ise bazı swirl sayılarında artmış, bazılarında azalmış veya aynı değerde kalmıştır. O_2 emisyonları sürekli azalmış, CO_2 emisyonları ise artmıştır [102].
- Termo-akustik salınımlar alev geri tepme eğilimini artırır [104] ancak girdap yoğunluğu arttıkça alev, salınımlara karşı daha dirençli hale gelir [30, 104]. Girdaplı akışlarda oluşan merkezi resirkülasyon bölgesi, yanma ürünleri ve reaksiyona giren maddeler arasındaki ısı transferini geliştiren düşük hız bölgeleri yaratır (aynı zamanda kalma zamanını da yükseltir) ve böylece alev kararlılığı artar. Yüksek alev geri tepme eğiliminin akustik zorlama altında artan alev yüzey alanından kaynaklandığı rapor edilmiştir [106].
- Karışım içeriğinde hidrojen miktarının artması, alevi ısı kayıplarına ve gerilmelere karşı daha dirençli hale getirerek dinamik kararlılığı artırır [112]. Akustik zorlama altında hidrokarbon karışımları düşük eşdeğerlik oranlarında alev geri tepmesine

maruz kalırken, %5’den fazla H_2 içeriğine sahip H_2 -CO karışımları daha yüksek eşdeğerlik oranlarında geri tepeler [106]. H_2 ’nin volumetrik ısı değeri, metandan 3,5 kat daha düşüktür. Bu da verilen bir yakıcı gücünde daha yüksek volumetrik yakıt akış hızı demektir. Bu ek yakıt momentumu da akış alanını değiştirir ve alev kararlılığını olumlu yönde etkiler [117]. Bütün bu bulgulara benzer bir şekilde, mevcut çalışmada da hidrojen ilavesinin alev kararlılığını geliştirdiği tespit edilmiştir.

- Karışımın difüzivitesi, H_2 /CO oranına bağlı olarak değişir ve bu durum farklı ısı salınım paternleri meydana getirir [20]. Bu nedenle H_2 /CO oranı alev kararlılık karakteristiklerini belirlemede önemli bir role sahiptir. H_2 /CO oranının artması (0,5 eşdeğerlik oranında) sentetik gaz alevini dinamik kararsızlıklara karşı daha dirençli hale getirir ancak yüksek eşdeğerlik oranlarında (basınç ve ısı salınım oranı dalgalanmalarının frekansı artar [106, 118]) alev geri tepme ihtimalini artırır. Benzer şekilde, %40-CNG-%40 H_2 -%20CO alevi 0,8 eşdeğerlik oranında akustik zorlama başlamadan geri tepmiştir (yüksek adyabatik alev sıcaklığına sahip yakıtların geri tepme eğilimleri yüksektir [104]).
- Ref. [104], düşük H_2 /CO oranına (yüksek CO) sahip karışımların alev geri tepmesine karşı dirençli ancak alev sönmesine duyarlı olduklarını belirtmiştir. %40-CNG-%10 H_2 -%50CO ve %40-CNG-%30 H_2 -%30CO alevleri akustik zorlama altında sönerken, %40-CNG-%40 H_2 -%20CO alevi aynı şartlar altında kararlı bir şekilde yanmaya devam etmiştir.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışması sonucunda elde edilen bilgi ve beceriler ışığında aşağıda listelenen önerilerin dikkate alınmasının bundan sonraki çalışmalara fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

- Yakıt kompozisyonunun yanma karakteristiklerine etkisi daha yüksek ısı güçlerinde incelenebilir veya alev içerisinde, alev yapısını bozmadan, sıcaklık ölçümüne imkân tanıyan ekipmanlar (örneğin; termal kamera) kullanılabilir.
- Yakıt kompozisyonu etkisi daha geniş aralıkta detaylı bir şekilde incelenebilir.
- N_2 seyreltiminin yanma özelliklerine ve alev kararsızlıklarına etkileri incelenebilir.
- Yapılan deneysel çalışmalar, sayısal simülasyonlarla desteklenerek yanma özellikleri ve reaksiyon kinetikleri hakkında daha fazla bilgi elde edilebilir.

- Yakıt kompozisyonunun alev yapısına etkisi ve alev geri tepme mekanizması, gelişmiş alev görüntüleme yöntemleri (OH-PLIF, kimyasal ışıldama teknikleri vb.) kullanılarak incelenebilir.
- Girdap üreteçlerinin malzeme işleme tezgâhlarında (örneğin, CNC tezgâhında) tek parça olarak üretilmesi, daha hassas sonuçlar elde edilebilmesini sağlayabilir.
- Mevcut yanma odası Basınçlı Ekipmanlar Yönetmeliği'ne uygun hale getirilip, deneyler yüksek basınç şartlarında gerçekleştirilerek gaz türbin işletme şartları için detaylı bilgiler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Miller, B. G., 2010. Clean Coal Engineering Technology. Elsevier., London, 637 pp.
2. Lieuwen, T., Yang, V., Yetter, R., 2009. Synthesis Gas Combustion: Fundamentals and Applications. CRC Press., USA, 403 pp.
3. Lieuwen, T., McDonell, V., Petersen, E., Santavicca, D., 2008. Fuel flexibility influences on premixed combustor blowout, flashback, autoignition, and stability. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, **130**(1): 011506.
4. Rezaian, J., Cheremisinoff, N. P., 2005. Gasification Technologies: A Primer for Engineers And Scientists. CRC press., USA, 330 pp.
5. Lee, M. C., Seo, S. B., Chung, J. H., Kim, S. M., Joo, Y. J., Ahn, D. H., 2010. Gas turbine combustion performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas. **Fuel**, **89**(7): 1485-1491.
6. İlbaş, M., Karyeyen, S., 2015. A numerical study on combustion behaviours of hydrogen-enriched low calorific value coal gases. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**(44): 15218-15226.
7. Ghenai, C., 2015. Combustion and emissions performance of syngas fuels derived from palm kernel shell and polyethylene (pe) waste via catalytic steam gasification. **Combustion**, **1**: 31944.
8. Bouziane, A., Cozzi, F., Lahcene, A., Aminallah, M., Khalfi, A., Coghe, A., 2011. Experimental results on Swirl-stabilized Syngas flames by transverse fuel injection.
9. Joo, S., Yoon, J., Kim, J., Lee, M., Yoon, Y., 2015. NO_x emissions characteristics of the partially premixed combustion of H₂/CO/CH₄ syngas using artificial neural networks. **Applied Thermal Engineering**, **80**: 436-444.
10. Baina, F., Malmquist, A., Alejo, L., Fransson, T. H., 2015. Extended operability of a commercial air-staged burner using a synthetic mixture of biomass derived gas for application in an externally fired micro gas turbine. **Fuel**, **150**: 664-671.
11. Van Huynh, C., Kong, S. C., 2013. Combustion and NO_x emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam. **Fuel**, **107**: 455-464.

12. Martinez, D. M., Jiang, X., Moulinec, C., Emerson, D. R., 2013. Numerical simulations of turbulent jet flames with non-premixed combustion of hydrogen-enriched fuels. **Computers & Fluids**, **88**: 688-701.
13. Cameretti, M. C., Tuccillo, R., 2015. Combustion features of a bio-fuelled micro-gas turbine. **Applied Thermal Engineering**, **89**: 280-290.
14. Krieger, G. C., Campos, A. P. V., Takehara, M. D. B., da Cunha, F. A., Veras, C. G., 2015. Numerical simulation of oxy-fuel combustion for gas turbine applications. **Applied Thermal Engineering**, **78**: 471-481.
15. Habib, M. A., Mokheimer, E. M., Sanusi, S. Y., Nemitallah, M. A., 2014. Numerical investigations of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200MW package boiler. **Energy Conversion and Management**, **83**: 296-305.
16. Safer, K., Tabet, F., Safer, M., 2016. A numerical investigation of structure and NO emissions of turbulent syngas diffusion flame in counter-flow configuration. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(4): 3208-3221.
17. Safer, M., Tabet, F., Ouadha, A., Safer, K., 2015. A numerical investigation of structure and emissions of oxygen-enriched syngas flame in counter-flow configuration. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**(6): 2890-2898.
18. Dinesh, K. R., van Oijen, J. A., Luo, K. H., Jiang, X., 2015. Nitric oxide pollutant formation in high hydrogen content (HHC) syngas flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**(39): 13621-13634.
19. Dinesh, K. R., Luo, K. H., Kirkpatrick, M. P., Malalasekera, W., 2013. Burning syngas in a high swirl burner: Effects of fuel composition. **International Journal of Hydrogen Energy**, **38**(21): 9028-9042.
20. Dinesh, K. R., Jiang, X., Kirkpatrick, M. P., Malalasekera, W., 2012. Combustion characteristics of H₂/N₂ and H₂/CO syngas nonpremixed flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **37**(21): 16186-16200.
21. Cipriani, F., 2013. Numerical Analysis of Use of Syngas for Combustion Systems and in Solid Oxide Fuel Cells. University of Illinois, Yüksek Lisans Tezi, Chicago, 177s.
22. Zhang, Y., Zhang, H., Tian, L., Ji, P., Ma, S., 2015. Temperature and emissions characteristics of a micro-mixing injection hydrogen-rich syngas flame diluted with N₂. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**(36): 12550-12559.

23. de la Torre, M., Chowdhury, A. A., Love, N., Choudhuri, A., 2016. Radiative heat release from premixed oxy-syngas and oxy-methane flames. **Fuel**, **166**: 567-573.
24. Goswami, M., van Griensven, J. G. H., Bastiaans, R. J. M., Konnov, A. A., de Goey, L. P. H., 2015. Experimental and modeling study of the effect of elevated pressure on lean high-hydrogen syngas flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, **35**(1): 655-662.
25. Kobayashi, H., Otawara, Y., Wang, J., Matsuno, F., Ogami, Y., Okuyama, M., Kadowaki, S., 2013. Turbulent premixed flame characteristics of a CO/H₂/O₂ mixture highly diluted with CO₂ in a high-pressure environment. **Proceedings of the Combustion Institute**, **34**(1): 1437-1445.
26. Venkateswaran, P., Marshall, A., Shin, D. H., Noble, D., Seitzman, J., Lieuwen, T., 2011. Measurements and analysis of turbulent consumption speeds of H₂/CO mixtures. **Combustion and Flame**, **158**(8): 1602-1614.
27. Ge, B., Zang, S. S., Guo, P. Q., 2013. Experimental study on flow structure of a swirling non-premixed syngas flame. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, **18**: 92-100.
28. Li, H., Li, G., Sun, Z., Zi, Z., Li, Y., Yuan, Y., 2016. Effect of dilution on laminar burning characteristics of H₂/CO/CO₂/air premixed flames with various hydrogen fractions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **74**: 160–168.
29. Taamallah, S., Vogiatzaki, K., Alzahrani, F. M., Mokheimer, E. M. A., Habib, M. A., Ghoniem, A. F., 2015. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations. **Applied Energy**, **154**: 1020-1047.
30. Shao, W., Xiong, Y., Mu, K., Zhang, Z., Wang, Y., Xiao, Y., 2010. The influence of fuel-air swirl intensity on flame structures of syngas swirl-stabilized diffusion flame. **Journal of Thermal Science**, **Vol.19**: 276–283.
31. De, A., Acharya, S., 2012. Parametric study of upstream flame propagation in hydrogen-enriched premixed combustion: Effects of swirl, geometry and premixedness. **International Journal of Hydrogen Energy**, **37**(19): 14649-14668.
32. Fan, Q., Hui, S., Zhou, Q., Zhao, Q., Xu, T., 2010. Experimental investigations on combustion characteristics of syngas composed of CH₄, CO, and H₂. **Frontiers of Chemical Engineering in China**, **4**(4): 404-410.

33. Chun, K. W., Chung, H. J., Chung, S. H., Choi, J. H., 2011. A numerical study on extinction and NO_x formation in nonpremixed flames with syngas fuel. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 25(11): 2943-2949.
34. Delattin, F., Di Lorenzo, G., Rizzo, S., Bram, S., De Ruyck, J., 2010. Combustion of syngas in a pressurized microturbine-like combustor: Experimental results. **Applied Energy**, 87(4): 1441-1452.
35. Littlejohn, D., Cheng, R. K., 2007. Fuel effects on a low-swirl injector for lean premixed gas turbines. **Proceedings of the Combustion Institute**, 31(2): 3155-3162.
36. Zhou, Z., Tao, Z. Q., Lin, B. Y., Kong, W. J., 2013. Numerical investigation on effects of high initial temperatures and pressures on flame behavior of CO/H₂/Air mixtures near the dilution limit. **International Journal of Hydrogen Energy**, 38(1): 274-281.
37. Brambilla, A., Schultze, M., Frouzakis, C. E., Mantzaras, J., Bombach, R., Boulouchos, K., 2015. An experimental and numerical investigation of premixed syngas combustion dynamics in mesoscale channels with controlled wall temperature profiles. **Proceedings of the Combustion Institute**, 35(3): 3429-3437.
38. Domenico, M. D., Kutne, P., 2010. Numerical and experimental investigation of syngas combustion in a semitechnical scale burner, pp. 2010-1147. *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, January 4-7, 2010, Orlando: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc.
39. Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, JH., 2009. Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, 34: 496-506.
40. Sayad, P., Schönborn, A., Klingmann, J., 2016. Experimental investigation of the stability limits of premixed syngas-air flames at two moderate swirl numbers. **Combustion and Flame**, 164: 270-282.
41. Zhang, Y., Shen, W., Zhang, H., Wu, Y., Lu, J., 2015. Effects of inert dilution on the propagation and extinction of lean premixed syngas/air flames. **Fuel**, 157: 115-121.

42. García-Armingol, T., Ballester, J., 2015. Operational issues in premixed combustion of hydrogen-enriched and syngas fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**(2): 1229-1243.
43. Lee, M. C., Seo, S. B., Yoon, J., Kim, M., Yoon, Y., 2012. Experimental study on the effect of N₂, CO₂, and steam dilution on the combustion performance of H₂ and CO synthetic gas in an industrial gas turbine. **Fuel**, **102**: 431-438.
44. Lee, M. C., Yoon, J., Joo, S., Yoon, Y., 2015. Gas turbine combustion characteristics of H₂/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, **40**: 11032-11045.
45. Lee, C., Kil, H. G., 2009. Effects of nitrogen dilution for coal synthetic gas fuel on the flame stability and NO_x formation. **Korean Journal of Chemical Engineering**, **26**(3): 862-866.
46. Burbano, H. J., Pareja, J., Amell, A. A., 2011. Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂. **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**(4): 3232-3242.
47. Huang, Y., Yang, V., 2005. Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor. **Proceedings of the Combustion Institute**, **30**(2): 1775-1782.
48. Yoon, J., Lee, M. C., Joo, S., Kim, J., Yoon, Y., 2015. Instability mode and flame structure analysis of various fuel compositions in a model gas turbine combustor. **Journal of Mechanical Science and Technology**, **29**(3): 899-907.
49. Emadi, M., Karkow, D., Melendez, A., Ratner, A., 2013. Parameter variations and the effects of hydrogen: An experimental investigation in a lean premixed low swirl combustor. **International Journal of Hydrogen Energy**, **38**: 5401-5408.
50. Mansfield, A. B., Wooldridge, M. S., 2015. The effect of impurities on syngas combustion. **Combustion and Flame**, **162**(5): 2286-2295.
51. Ding, N., Arora, R., Norconk, M., Lee, S. Y., 2011. Numerical investigation of diluent influence on flame extinction limits and emission characteristic of lean-premixed H₂-CO (syngas) flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **36**(4): 3222-3231.
52. Turns, S. R., 1996. An Introduction to Combustion (Vol. 287). McGraw-Hill, New York, 676 pp.

53. Strehlow, R. A., 1984. Combustion Fundamentals. McGraw-Hill College, USA, 554 pp.
54. Mishra, D. P., 2014. Experimental Combustion: An Introduction. Crc Press, New York, 342 pp.
55. Andwari, A. M., Aziz, A. A., Farid, M., Said, M., Zulkarnain, A. L., 2013. Controlled auto-ignition combustion in a two-stroke cycle engine using hot burned gases. **Applied Mechanics and Materials**, **388**: 201-205.
56. Law, C. K., 2010. Combustion Physics. Cambridge University Press, USA, 722 pp.
57. Lackner, M., Palotas, A.B., Winter, F., 2013. Combustion: From Basics to Applications. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 269 pp.
58. Griffiths, J. F., Barnard, J. A., 1995. Flame and Combustion, Third Edition. CRC Press, UK, 309 pp.
59. Yunus, A. C., Michael, A. B., 2006. Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill, New York, 867 pp.
60. Glassman, I., Yetter, R. A., Glumac, N. G., 2014. Combustion, Fourth Edition. Elsevier, USA, 773 pp.
61. Lefebvre, A. H., 2010. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions, Third Edition. CRC Press, USA, 537 pp.
62. Beer, J. M., 2000. Combustion technology developments in power generation in response to environmental challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, **26**(4): 301-327.
63. Seaton, A., Godden, D., MacNee, W., Donaldson, K., 1995. Particulate air pollution and acute health effects. **The Lancet**, **345**(8943): 176-178.
64. Lackner, M., Winter, F., Agarwal, A. K., 2010. Handbook of Combustion Vol.1: Fundamentals and Safety. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 583 pp.
65. Tsuji, H., Gupta, A. K., Hasegawa, T., Katsuki, M., Kishimoto, K., Morita, M., 2003. High Temperature Air Combustion: From Energy Conservation to Pollution Reduction. CRC Press, USA, 405 pp.
66. Warnatz, J., Maas, U., Dibble, R. W. 2006. Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, Fourth Edition. Springer, Germany, 378 pp.

67. Wobbe Index. (Web sayfası: <https://neutrium.net/properties/wobbe-index/>), (Erişim tarihi: Aralık 2017).
68. Arrieta, C. E., García, A. M., Amell, A. A., 2017. Experimental study of the combustion of natural gas and high-hydrogen content syngases in a radiant porous media burner. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**(17): 12669-12680.
69. McDonnell, V., 2006. Key combustion issues associated with syngas and high-hydrogen fuels. *The Gas Turbine Handbook*, Gulf Professional Publishing, Oxford, UK.
70. Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., Lienhard, J. H., 2007. *Mechanical Measurements*, Sixth Edition. Pearson, USA, 768 pp.
71. Lemaire, R., Menanteau, S., 2017. Assessment of radiation correction methods for bare bead thermocouples in a combustion environment. **International Journal of Thermal Sciences**, **122**: 186-200.
72. Brady, K. B., Hui, X., Sung, C. J., Niemeyer, K. E., 2015. Counterflow ignition of n-butanol at atmospheric and elevated pressures. **Combustion and Flame**, **162**(10): 3596-3611.
73. Brohez, S., Delvosalle, C., Marlair, G., 2004. A two-thermocouples probe for radiation corrections of measured temperatures in compartment fires. **Fire Safety Journal**, **39**(5): 399-411.
74. Roberts, I. L., Coney, J. E. R., Gibbs, B. M., 2011. Estimation of radiation losses from sheathed thermocouples. **Applied Thermal Engineering**, **31**(14): 2262-2270.
75. Ali, F., Lu, L., 2007. A method to eliminate the effect of radiation on thermocouple performance. **Nuclear Engineering and Design**, **237**(14): 1522-1525.
76. Shaddix, C. R., 1999. Correcting thermocouple measurements for radiation loss: a critical review. *33rd National Heat Transfer Conference NHTC'99*, August 15-17, 1999, Albuquerque, NM (US).
77. Krishnan, S., 2014. *An Approach to Thermocouple Temperature Measurements that Reduces Uncertainties Associated with Radiative Corrections*. Washington University, Yüksek Lisans Tezi, ST. Louis, 41s.
78. Collis, D. C., Williams, M. J., 1959. Two-dimensional convection from heated wires at low reynolds numbers. **Journal of Fluid Mechanics**, **6**(3): 357-384.

79. Hibshman, R. J. I., 1998. An Experimental Study of Soot Formation in Dual Mode Laminar Wolfhard-Parker Flames. Virginia Tech, Yüksek Lisans Tezi, Virginia, 158s.
80. Lewis, A. D., 2011. Sawdust Pyrolysis and Petroleum Coke CO₂ Gasification at High Heating Rates. Brigham Young University, Yüksek Lisans Tezi, Birmingham, 189s.
81. Yılmaz, İ., 2006. Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri, 202s.
82. Hinze, J. O., 1975. Turbulence. McGraw-Hill, New York, 218 pp.
83. Bradley, D., Matthews, K. J., 1968. Measurement of high gas temperatures with fine wire thermocouples. **Journal of Mechanical Engineering Science**, **10**(4): 299-305.
84. Martins, C. A., Pimenta, A. P., Carvalho Jr, J. A., Ferreira, M. A., Caldeira-Pires, A. D. A., 2005. CH and C₂ radicals characterization in natural gas turbulent diffusion flames. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, **27**(2): 110-118.
85. Karyeyen, S., 2016. Geliştirilen Bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara, 162s.
86. Bozacı, R. K., 1993. Endüstriyel kazanlarda brülör seçimi. (Web sayfası: <https://www.termodinamik.info/makale/endustriyel-kazanlarda-brulor-sistemi-secimi>), (Erişim tarihi: Aralık 2017).
87. Cheng, R. K., 2006. Low swirl combustion, pp 241-255. *In: The Gas Turbine Handbook* (Eds. R. Dennis). National Energy Technology Laboratory, USA.
88. Abdel-Al, M. A., Yehia, M. A., Taha, M. R., Abou-Arab, T. W., 2013. Effect of fuel and air injection pattern on combustion dynamics in confined and free diffusion flame. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, **1**(3): 928-938.
89. Linck, M. B., 2006. Underwater propulsion. (Web sayfası: http://www.enme.umd.edu/combustion/underwater_propulsion.htm), (Erişim tarihi: Aralık 2017).

90. Samiran, N. A., Ng, J. H., Jaafar, M. N. M., Valera-Medina, A., Chong, C. T., 2016. H₂-rich syngas strategy to reduce NO_x and CO emissions and improve stability limits under premixed swirl combustion mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(42): 19243-19255.
91. Fiskum, A., 2008. Calculation of NO_x Formation in a Swirl Burner. Norwegian University of Science and Technology, Yüksek Lisans Tezi, Trondheim, 64s.
92. Aliyu, M., Nemitallah, A. M., Said, A. S., Habib, A. M., 2016. Characteristics of H₂-enriched CH₄-O₂ diffusion flames in a swirl-stabilized gas turbine combustor: Experimental and numerical study. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(44): 20418–20432.
93. Bharani, S., Singh, S. N., Agrawal, D. P., 2001. Effect of swirl on the flow characteristics in the outer annulus of a prototype reverse-flow gas turbine combustor. **Experimental Thermal and Fluid Science**, **25**(6): 337-347.
94. İlbaş, M., Karyeyen, S., Yilmaz, İ., 2016. Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(17): 7185-7191.
95. Yılmaz, I., 2013. Effect of swirl number on combustion characteristics in a natural gas diffusion flame. **Journal of Energy Resources Technology**, **135**(4), 042204.
96. Khandelwal, B., Lili, D., Sethi, V., 2014. Design and study on performance of axial swirler for annular combustor by changing different design parameters. **Journal of the Energy Institute**, **87**(4): 372-382.
97. Mohamad Shaiful, A. I., Nazri, M., 2014. Effect of velocity variation at high swirl on axial flow development inside a can combustor. **Jurnal Teknologi**, **vol.71**(2): 19-24.
98. Altgeld, H., Jones, W. P., Wilhelmi, J., 1983. Velocity measurements in a confined swirl driven recirculating flow. **Experiments in Fluids**, **1**(2): 73-78.
99. Raj, R., Ganesan, V., 2009. Experimental study of recirculating flows induced by vane swirler. **IJEMS Vol.16**(1): 14-22.
100. Renzi, M., Patuzzi, F., Baratieri, M., 2017. Syngas feed of micro gas turbines with steam injection: Effects on performance, combustion and pollutants formation. **Applied Energy**, **206**: 697-707.

101. Park, S., Kim, Y., 2017. Effects of nitrogen dilution on the NO_x formation characteristics of CH₄/CO/H₂ syngas counterflow non-premixed flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**(16): 11945-11961.
102. Samiran, N. A., Ng, J. H., Jaafar, M. N. M., Valera-Medina, A., Chong, C. T., 2017. Swirl stability and emission characteristics of CO-enriched syngas/air flame in a premixed swirl burner. **Process Safety and Environmental Protection**. **112**: 315-326.
103. Valera-Medina, A., Viguera-Zuniga, M. O., Baej, H., Syred, N., Chong, C. T., Bowen, P. J., 2017. Outlet geometrical impacts on blowoff effects when using various syngas mixtures in swirling flows. **Applied Energy**.
104. Jerzak, W., Kuźnia, M., 2016. Experimental study of impact of swirl number as well as oxygen and carbon dioxide content in natural gas combustion air on flame flashback and blow-off. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, **29**: 46-54.
105. Amin, V., Katzlinger, G., Saxena, P., Pucher, E., Seshadri, K., 2015. The influence of carbon monoxide and hydrogen on the structure and extinction of nonpremixed and premixed methane flames. **Proceedings of the Combustion Institute**, **35**(1): 955-963.
106. Dam, B., Corona, G., Hayder, M., Choudhuri, A., 2011. Effects of syngas composition on combustion induced vortex breakdown (CIVB) flashback in a swirl stabilized combustor. **Fuel**, **90**(11), 3274-3284.
107. Williams, T. C., Shaddix*, C. R., Schefer, R. W., 2007. Effect of syngas composition and CO₂-diluted oxygen on performance of a premixed swirl-stabilized combustor. **Combustion Science and Technology**, **180**(1): 64-88.
108. Lee, I. B., Woo, I. S., Lee, M. C., 2016. Effects of nitrogen dilution on the NO_x and CO emission of H₂/CO/CH₄ syngases in a partially-premixed gas turbine model combustor. **International Journal of Hydrogen Energy**, **41**(35): 15841-15851.
109. Xu, H., Liu, F., Sun, S., Zhao, Y., Meng, S., Tang, W., 2017. Effects of H₂O and CO₂ diluted oxidizer on the structure and shape of laminar coflow syngas diffusion flames. **Combustion and Flame**, **177**: 67-78.
110. Karyeyen, S., Ilbas, M., 2017. Turbulent diffusion flames of coal derived-hydrogen supplied low calorific value syngas mixtures in a new type of burner: An

- experimental study. **International Journal of Hydrogen Energy**, 42(4): 2411-2423.
111. Zhou, L. X., Chen, X. L., Zhang, J., 2002. Studies on the effect of swirl on NO formation in methane/air turbulent combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, 29(2): 2235-2242.
 112. Mansouri, Z., Aouissi, M., Boushaki, T., 2016. Numerical computations of premixed propane flame in a swirl-stabilized burner: Effects of hydrogen enrichment, swirl number and equivalence ratio on flame characteristics. **International Journal of Hydrogen Energy**, 41(22): 9664-9678.
 113. Lieuwen, T. C., Yang, V., 2005. Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines (Operational Experience, Fundamental Mechanisms and Modeling). American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA, 634 pp.
 114. Hathout, J. P., Fleifel, M., Rumsey, J. W., Annaswamy, A. M., Ghoniem, A. F., 1997. Model-based analysis and design of active control of thermoacoustic instability. *Control Applications, 1997., Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on*, October 5-7, 1997, Hartford, USA.
 115. Caifen, F., Wen, T., Jizhen, L., 2008. IMC control of combustion instability. *Proceedings of the 27th Chinese Control Conference*. July 16-18, 2008, Kunming, Yunnan, China.
 116. Ning, D., Fan, A., Yao, H., 2017. Effects of fuel composition and strain rate on NO emission of premixed counter-flow H₂/CO/air flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, 42(15): 10466-10474.
 117. Reichel, T. G., Paschereit, C. O., 2017. Interaction mechanisms of fuel momentum with flashback limits in lean-premixed combustion of hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, 42(7): 4518-4529.
 118. Yilmaz, I., Ratner, A., Ilbas, M., Huang, Y., 2010. Experimental investigation of thermoacoustic coupling using blended hydrogen–methane fuels in a low swirl burner. **International Journal of Hydrogen Energy**, 35(1): 329-336.

EKLER

EK 1. Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri

Deneyler sırasında ölçülen sıcaklık değerleri, radyasyon kayıpları hesaba katılarak yeniden hesaplanmıştır. Düzeltilmiş sıcaklık değerleri farklı yakıt kompozisyonları için tek bir eşdeğerlik oranı ve swirl sayısında, %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımı için ise farklı swirl sayılarında ve eşdeğerlik oranlarında verilmiştir. Yalnızca, brülör çıkışından itibaren 63, 163 ve 263 mm eksenel mesafelerde ölçülen sıcaklık değerleri düzeltilmiştir.

Tablo EK 1. 1. H₂/CO oranı 0,5, 1,0 ve 2,0 olan sentetik gaz karışımlarının düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.

Gaz karışımı	Ölçülen Sıcaklık Değerleri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri (K)
%20CNG-%26,7H ₂ -%53,3CO	1145,71	36,00	1181,71
%20CNG-%25H ₂ -%50CO-%05CO ₂	1139,90	34,93	1174,83
%20CNG-%23,4H ₂ -%46,6CO-%10CO ₂	1133,72	33,82	1167,54
%20CNG-%21,7H ₂ -%43,3CO-%15CO ₂	1128,28	32,78	1161,06
%20CNG-%20H ₂ -%40CO-%20CO ₂	1118,56	31,17	1149,73
%20CNG-%40H ₂ -%40CO	1142,02	35,28	1177,30
%20CNG-%37,5H ₂ -%37,5CO-%05CO ₂	1138,15	34,52	1172,67
%20CNG-%35H ₂ -%35CO-%10CO ₂	1119,30	31,50	1150,80
%20CNG-%32,5H ₂ -%32,5CO-%15CO ₂	1093,14	27,85	1120,99
%20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂	1094,03	27,84	1121,87
%20CNG-%53,3H ₂ -%26,7CO	1146,18	35,62	1181,80
%20CNG-%50H ₂ -%25CO-%05CO ₂	1140,73	34,62	1175,35
%20CNG-%46,6H ₂ -%23,4CO-%10CO ₂	1094,37	27,99	1122,36
%20CNG-%43,3H ₂ -%21,7CO-%15CO ₂	1119,91	31,23	1151,14
%20CNG-%40H ₂ -%20CO-%20CO ₂	1112,55	30,07	1142,62

(a)

Gaz karışımı	Ölçülen Sıcaklık Değerleri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri (K)
%20CNG-%26,7H ₂ -%53,3CO	930,87	12,42	943,29
%20CNG-%25H ₂ -%50CO-%05CO ₂	925,49	11,95	937,44
%20CNG-%23,4H ₂ -%46,6CO-%10CO ₂	926,21	11,92	938,13
%20CNG-%21,7H ₂ -%43,3CO-%15CO ₂	928,45	11,99	940,44
%20CNG-%20H ₂ -%40CO-%20CO ₂	921,76	11,46	933,22
%20CNG-%40H ₂ -%40CO	902,38	10,50	912,88
%20CNG-%37,5H ₂ -%37,5CO-%05CO ₂	906,77	10,69	917,46
%20CNG-%35H ₂ -%35CO-%10CO ₂	894,12	9,81	903,93
%20CNG-%32,5H ₂ -%32,5CO-%15CO ₂	877,23	8,85	886,08
%20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂	886,30	9,29	895,59
%20CNG-%53,3H ₂ -%26,7CO	857,31	7,90	865,21
%20CNG-%50H ₂ -%25CO-%05CO ₂	859,76	7,92	867,68
%20CNG-%46,6H ₂ -%23,4CO-%10CO ₂	864,63	8,18	872,81
%20CNG-%43,3H ₂ -%21,7CO-%15CO ₂	901,90	10,10	912,00
%20CNG-%40H ₂ -%20CO-%20CO ₂	898,40	9,90	908,30

(b)

Gaz karışımı	Ölçülen Sıcaklık Değerleri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri (K)
%20CNG-%26,7H ₂ -%53,3CO	723,09	2,72	725,81
%20CNG-%25H ₂ -%50CO-%05CO ₂	718,81	2,62	721,43
%20CNG-%23,4H ₂ -%46,6CO-%10CO ₂	724,33	2,74	727,07
%20CNG-%21,7H ₂ -%43,3CO-%15CO ₂	729,59	2,82	732,41
%20CNG-%20H ₂ -%40CO-%20CO ₂	726,01	2,69	728,70
%20CNG-%40H ₂ -%40CO	694,54	2,11	696,65
%20CNG-%37,5H ₂ -%37,5CO-%05CO ₂	701,92	2,25	704,17
%20CNG-%35H ₂ -%35CO-%10CO ₂	695,86	2,11	697,97
%20CNG-%32,5H ₂ -%32,5CO-%15CO ₂	692,28	2,02	694,30
%20CNG-%30H ₂ -%30CO-%20CO ₂	701,44	2,21	703,65
%20CNG-%53,3H ₂ -%26,7CO	693,15	2,06	695,21
%20CNG-%50H ₂ -%25CO-%05CO ₂	692,14	2,02	694,16
%20CNG-%46,6H ₂ -%23,4CO-%10CO ₂	685,92	1,90	687,82
%20CNG-%43,3H ₂ -%21,7CO-%15CO ₂	704,14	2,18	706,32
%20CNG-%40H ₂ -%20CO-%20CO ₂	709,64	2,33	711,97

(c)

Tablo EK 1. 2. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının ($\Phi=0,6$) farklı swirl sayılarında düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değerleri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri (K)
0,2	1094,03	27,84	1121,87
0,4	1035,03	20,98	1056,01
0,6	1028,95	20,36	1049,31
0,8	1063,43	24,02	1087,45
1,0	980,21	15,89	996,10
1,2	1055	23,13	1078,13
1,4	997,40	17,37	1014,77
1,6	993,66	17,03	1010,69

(a)

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değerleri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri (K)
0,2	886,30	9,29	895,59
0,4	789,58	4,89	794,47
0,6	773,41	4,34	777,75
0,8	778,27	4,46	782,73
1,0	728,07	3,03	731,10
1,2	776,3	4,42	780,72
1,4	750,71	3,63	754,34
1,6	737,15	3,24	470,39

(b)

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değerleri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değerleri (K)
0,2	701,44	2,21	703,65
0,4	658,41	1,41	659,82
0,6	632,11	1,06	633,17
0,8	629,52	0,98	630,50
1,0	631,77	1,04	632,81
1,2	623,07	0,90	623,97
1,4	624,13	0,94	625,07
1,6	634,73	1,06	635,79

(c)

Tablo EK 1. 3. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının ($\Phi=0,8$) farklı swirl sayılarında düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değeri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değeri (K)
0,2	1137,81	33,84	1171,65
0,4	1151,19	35,85	1187,04
0,6	1050,63	22,63	1073,26
0,8	1139,38	34,00	1173,38
1,0	1017,59	19,18	1036,77
1,2	1021,05	19,59	1040,64
1,4	1056,25	23,17	1079,42
1,6	1080,30	26,02	1106,32

(a)

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değeri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değeri (K)
0,2	831,69	6,52	838,21
0,4	854,04	7,61	861,65
0,6	778,68	4,48	783,16
0,8	813,97	5,74	819,71
1,0	777,19	4,27	781,46
1,2	862,06	7,97	870,03
1,4	761,70	3,85	765,55
1,6	774,95	4,33	779,28

(b)

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değeri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değeri (K)
0,2	678,35	1,75	680,10
0,4	681,37	1,79	683,16
0,6	658,76	1,38	660,14
0,8	681,10	1,68	682,78
1,0	664,78	1,46	666,24
1,2	654,10	1,34	655,44
1,4	641,81	1,14	642,95
1,6	643,61	1,18	644,79

(c)

Tablo EK 1. 4. %20CNG-%30H₂-%30CO-%20CO₂ karışımının ($\Phi=1,0$) farklı swirl sayılarında düzeltilmiş sıcaklık değerleri: a) 63 mm, b) 163 mm, c) 263 mm.

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değeri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değeri (K)
0,2	1131,96	32,90	1164,86
0,4	1090,77	27,37	1118,14
0,6	1049,92	22,51	1072,43
0,8	1124,63	31,83	1156,46
1,0	1068,93	24,55	1093,48
1,2	1064,29	24,15	1088,44
1,4	1099,41	28,42	1127,83
1,6	1099,25	28,41	1127,66

(a)

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değeri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değeri (K)
0,2	896,04	9,86	905,90
0,4	920,26	11,30	931,56
0,6	809,85	5,60	815,45
0,8	844,10	7,08	851,18
1,0	837,39	6,60	843,99
1,2	807,81	5,52	813,33
1,4	785,40	4,68	790,08
1,6	781,37	4,55	785,92

(b)

Swirl Sayısı	Ölçülen Sıcaklık Değeri (K)	Radyasyon Kaybı (K)	Düzeltilmiş Sıcaklık Değeri (K)
0,2	695,23	2,03	697,26
0,4	711,55	2,32	713,87
0,6	668,22	1,52	669,74
0,8	679,46	1,74	681,20
1,0	691,42	1,84	693,26
1,2	677,48	1,72	679,20
1,4	638,41	1,09	639,50
1,6	648,50	1,20	649,70

(c)

EK 2. Ölçüm Ekipmanlarının Kalibrasyon Sertifikaları

MRU BACA GAZI VE EMİSYON ÖLÇÜM CİHAZLARI LTD. ŞTİ.



KALİBRASYON SERTİFİKASI

FİRMA ADI : GAZİ ÜNİVERSİTESİ

CİHAZ MODELİ : NOVAplus Analizör NOVAplus RCU

CİHAZ SERİ NO : 014297 014253

TARİH : 10.04.2017

SERTİFİKA NO: KS.BG.17.027

Bacagazı Analiz Cihazlarının Kalibrasyon ve ayarı sertifikalı test gazları ile yapılmaktadır.

Sertifikalı Test Gazları Listesi :

CO/O2 Silindir no : 530044	SO2 Silindir no : 01330
CO/H2/O2 Silindir no : 530065	NO Silindir no : 01333
NO2 Silindir no : 01233	

Ölçüm Sonuçları :

	Silindir Değeri	İlk Okuma	Ayarlanan Değer
O2 %	0,0	0,0	0,0
O2 %	10,2	10,3	10,2
CO ppm	507	N/A	507
CO/H2 ppm	812	N/A	812
NO ppm	80	82	80
NO2 ppm	64	48	64
SO2 ppm	509	476	509

MRU BACA GAZI VE EMİSYON ÖLÇÜM
CİHAZLARI LIMITED ŞİRKETİ
Şeyhli Mah. Seyit Ali Sok. No:6-2
Pendik/İST. Tel: 0216 378 91 33
Fonidik V.D. 6230367992

MRU BACA GAZI VE EMİSYON ÖLÇÜM CİHAZLARI LTD. ŞTİ.
Şeyhli Mah. Seyit Ali sok. no:6/2 Kurtköy Pendik İstanbul
Tel : 0216 378 91 33 – 34 PBX
Faks : 0216 378 91 35
Mobil : 0541 234 1 678
info@mru.eu

Şekil EK 2. 1. Baca gazı analizörü kalibrasyon sertifikası.



Certificate of Calibration

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

UUT Model Number:	GI-50A007304K3V020	STD Model Number:	P4B013304R600AA
UUT Serial Number:	022184902	STD Serial Number:	021884724
User Range:	30000 (sccm)	Calibration By:	MKS-FLOWTEST-10
User Gas:	H ₂	Checked By:	bazulto
User Max. Min. Full Scale:	30000 20001 (sccm)	Calibration Date:	12 January, 2017
Calibration Bin ID:	12	Calibration Time:	7:42:36 PM
Calibration Gas:	N ₂	Calibration Attitude:	HBD
As Found:	[X]	In Tolerance:	[X]
As Left:	[X]	Out of Tolerance:	[]

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

Notes:

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

MKS Instruments, Inc.
6 Shattuck Road
Andover, MA 01810-0001
Phone: (978) 775-2350
Fax: (978) 775-0093

End of Report
Page 1 of 1

1/12/2017 7:42:36 PM
www.mksinst.com

(a)



Certificate of Calibration

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

UUT Model Number:	GE-S0A009301KBV020	STD Model Number:	P4B013304R600AA
UUT Serial Number:	022184903	STD Serial Number:	021884724
User Range:	30000 (sccm)	Calibration By:	MKS-FLOWTEST-10
User Gas:	CO	Checked By:	bazulto
User Max. (Min. Full Scale)	30000 (20001 (sccm)	Calibration Date:	11 January, 2017
Calibration Bin ID:	12	Calibration Time:	10:25:29 PM
Calibration Gas:	N2	Calibration Altitude:	HBD
As Found:	1.1	In Tolerance:	[X]
As Shipped:	1.5	Out of Tolerance:	

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

Notes:

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

MKS Instruments, Inc.
6 Shattuck Road
Andover, MA 01810-0093
Tel: (978) 975-2350 Fax: (978) 975-0093

End of Report
Page 1 of 1

1/11/2017 10:25:29 PM
www.mksinst.com

(b)



Certificate of Calibration

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

UUT Model Number:	GI-50A025304KBV020	STD Model Number:	P4B013504R600AA
UUT Serial Number:	022181911	STD Serial Number:	021886654
User Range:	30000 (sccm)	Calibration By:	GMFC-CAL-02
User Gas:	CO2	Checked By:	bazulto
User Max. Min. Full Scale:	38000 22800 (sccm)	Calibration Date:	13 January, 2017
Calibration Bin ID:	13	Calibration Time:	10:26:51 PM
Calibration Gas:	N2	Calibration Attitude:	HBD
As Found:	[]	In Tolerance:	[X]
As Left:	[X]	Out of Tolerance:	[]

Setpoint (sccm)	UUT (sccm)	STD (sccm)	Error (%rdg)
5000.0	5001.0	4998.0	0.060
12500	12503	12498	0.040
25000	25000	25004	-0.016
37500	37500	37596	-0.255
50000	49999	50068	-0.138

Notes:

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

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

End of Report
Page 1 of 1

1/13/2017 10:26:51 PM
www.mksinst.com



CALIBRATION RECORD SHEET

DUT

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

Calibration

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

Calibration Conditions

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

Reference

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

In Tolerance:	yes	As Found:	no
Out of Tolerance:	no	As Left:	yes
Process Date:	2017-01-11	Data by:	nevareza
Print Date:		Checked by:	469

This calibration was performed with a reference which was calibrated against DryCal ML-600 (traceable to NIST). The Device Under Test (DUT) was warmed and stabilized for the recommended time specified by manufacturer before check/adjustment to zero. Units scfm/slm are referenced to 0 °C and 1013.25 mbar.

MKS Instruments Inc. / Ave. Libre Comercio esq. con Calzada Industrial #1 / Parque Industrial Nuevo Nogales / Nogales, Sonora 84000 Mexico / Tel: +52 631 311 2500

Document No.: FRM_QW44

Revision: 2014-02-19

(d)

Şekil EK 2. 2. Dijital debi ölçerlerin kalibrasyon sertifikaları: a) H₂, b) CO, c) CO₂, d) Hava.

EK 3. CNG Bileşimi

CNG bileşiminde yer alan gazların hacimsel yüzdeleri ve CNG'nin bazı özellikleri, Tablo EK 3.1'de verilmiştir.

Tablo EK 3. 1. CNG bileşimi ve bazı özellikleri.

Metan	91,5243
Etan	3,3592
Propan	1,0077
İ-Bütan	0,1795
N-Bütan	0,2449
İ-Pentan	0,0603
N-Pentan	0,0422
Hekzan	0,0474
Nitrojen	3,0111
CO₂	0,5235
Alt Isıl Değer (kcal/Nm³)	8300,7978
Üst Isıl Değer (kcal/Nm³)	9201,6904

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Harun YILMAZ
Uyruğu: Türkiye (T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri: 10.08.1984 - Sivas
Medeni Durum: Evli
e-mail: hyilmaz@erzincan.edu.tr
Yazışma Adresi: Ali Cavit Çelebioğlu Sivil Havacılık Yüksekokulu, Yalnızbağ Yerleşkesi, Erzincan.

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde Motor	2007
Lise	Erdemli Anadolu Lisesi, Mersin	2002

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2016-Halen	Erzincan Üniversitesi	Arş. Gör.
2009-2016	Gümüşhane Üniversitesi	Okutman

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

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

1. Yilmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, I., 2017. Effect of different turbulence models on combustion and emission characteristics of hydrogen/air flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, 42(40): 25744-25755.

2. Yilmaz, H., Cam, O., Yilmaz, I., 2017. Effect of micro combustor geometry on combustion and emission behavior of premixed hydrogen/air flames. **Energy**, **135**: 585-597.
3. Cam, O., Yilmaz, H., Tangoz, S., Yilmaz, I., 2017. A numerical study on combustion and emission characteristics of premixed hydrogen air flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, **42**(40): 25801-25811.
4. Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O., Ilbas, M., 2018. Combustion characteristics of premixed hydrogen/air flames in a geometrically modified micro combustor. **Fuel**, **217**: 536-543.
5. Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O., 2018. An experimental study on premixed CNG/H₂/CO₂ mixture flames. **Open Engineering**, (Kabul Edildi).

Hakemli konferans/sempozyumların bildiri kitaplarında yer alan yayınlar

1. Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O., 2017. Combustion and Emission Behavior of Premixed CNG/H₂/CO₂ Mixture Flames: Effect of Swirl Number and Gas Composition, pp. 144-150. *International Research Conference on Sustainable Energy, Engineering, Materials and Environment*, July 26-28, 2017, Newcastle, England.
2. Yilmaz, H., Cam, O., Ilbas, M., Yilmaz, I., 2017. Numerical Investigation on Combustion Behavior of Premixed Hydrogen/Air Flames in a Micro Combustor with Varying Geometric Properties: Part - I: Effect of Backward Facing Step and Cavity, pp. 212-224. *6th International Conference on Renewable Fuels Combustion and Fire*, May 18-21, 2017, Nevşehir, Turkey.
3. Yilmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, I., 2017. Numerical Investigation on Combustion Behavior of Premixed Hydrogen/Air Flames in a Micro Combustor with Varying Geometric Properties: Part - II: Effect of Multi-Channel Arrangement, pp. 225-236. *6th International Conference on Renewable Fuels Combustion and Fire*, May 18-21, 2017, Nevşehir, Turkey.

4. Yilmaz, H., Yilmaz, I., Cam, O., 2017. Investigation of Effects of Equivalence Ratio and Thermal Power on Combustion and Emission Behavior of Premixed Hydrogen Air Mixtures in a Micro Combustor, pp. 183-191. *International Exergy, Energy and Environment Symposium*, May 14-17, 2017, Split, Croatia.
5. Yilmaz, H., Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, I., 2016. The effects of different turbulence models on the flame and emission characteristics of hydrogen/air flames, pp. 200-207. *9th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection*, September 22-25, 2016, Kayseri, Turkey.
6. Cam, O., Tangoz, S., Yilmaz, H., Yilmaz, I., 2016. Numerical Investigation of NO_x Emissions in a Micro-Cylindrical Combustor with Premixed Hydrogen-Air Mixture, pp. 324-330. *9th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection*, September 22-25, 2016, Kayseri, Turkey.