



**YAKIT OLARAK AMONYAK VE KARIŞIMLARINI KULLANAN BİR
GAZ TÜRBNİ YANMA ODASININ YANMA VE EMİSYON
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Osman KÜMÜK

**DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Osman KÜMÜK

03/11/2023

YAKIT OLARAK AMONYAK VE KARIŞIMLARINI KULLANAN BİR GAZ TÜRBİNİ YANMA ODASININ YANMA VE EMİSYON ÖZELLİKLERİNİN

ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Osman KÜMÜK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2023

ÖZET

Küresel ısınma ile beraber enerji talebinin de artmasıyla enerji ve elektrik üretimi için yeni ve yenilenebilir yakıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için kimyasal yapısında hidrojen barındıran amonyak, enerji taşıyıcısı olması ve karbon içermemesinden dolayı gaz türbini yakıtı olarak gelecekteki sürdürülebilir enerji sistemlerinde önemli bir yer sahibi olabilir. Hidrojenin aksine, amonyağın taşınması ve depolanması daha kolay olup, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Amonyak temel bileşenlerine kısmen ayrıştırılarak uygun yanma özellikleri elde edilebilir. Amonyak yanması kimyasal yapısında azot barındırmasından dolayı önemli seviyelerde NO_x ve N_2O emisyonları oluşturmaktadır. Ancak, gaz türbini yanma işleminde sıcaklıktan kaynaklanan ısı NO_x emisyonlarının daha baskın olmasından dolayı geleneksel yakıtlara göre çok fazla değişmediği gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında, yüksek girdaplı amonyak yakıtlı bir gaz türbininin akış alanı ve alev özelliklerinde giriş geometrisi ve yanma parametrelerinin yanma performansı ve emisyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneysel doğrulama ile birlikte Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözümlenmeleriyle gaz türbini yakıtları olarak saf amonyak ve amonyak karışumlu farklı yakıt bileşimleri çalışılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre çalışılan yakıtlara amonyak ilaveleri ile maksimum sıcaklık seviyelerinde ortalama %4 civarında bir düşüş görülmüş, önemli miktarda değişim gözlenmemiştir. Bunun nedeni sağlanan toplam ısı gücün değişmemesi olarak açıklanmaktadır. Ayrıca alev bölgesinde amonyak içeriğindeki N'den dolayı yükselme görülmesine rağmen yanma odası çıkışında bu değer 1/4 oranında bastırılmış olduğu görülmüştür. Kullanılan yakıtlara amonyak ilavesi ile alev yanma odasının duvarlarına daha fazla yayılmış ve teğetsel hızlar daha yüksek çıkmıştır. Böylece daha homojen bir yanma gerçekleşmiştir. Sonuç olarak amonyak yakıtının alternatif bir yakıt olarak yanma performansını düşürmeden gaz türbinlerinde yardımcı yakıt olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. NO_x emisyon seviyeleri önünde bir sorun olarak görülse de ikincil ve seyreltme bölgesi etkileri nedeniyle yanma odası çıkışında, performans oranla büyük bir NO_x emisyonu artışı olmadığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91440

Anahtar Kelimeler : Yanma, emisyon, amonyak, kerosen, metan, hidrojen

Sayfa Adedi : 142

Danışman : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

RESEARCH ON COMBUSTION AND EMISSION CHARACTERISTICS OF A GAS
TURBINE COMBUSTOR USING AMMONIA AND ITS BLENDINGS AS FUEL

(Ph. D. Thesis)

Osman KÜMÜK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2023

ABSTRACT

With the increasing global warming and the growing energy demand, there is a need for new and renewable fuels for energy and electricity production. A substance that contains hydrogen in its chemical structure, such as ammonia, can play a significant role in future sustainable energy systems as a gas turbine fuel due to its energy-carrying capacity and lack of carbon content. Unlike hydrogen, the transportation and storage of ammonia are easier and it is widely used in the industry. Ammonia can be partially decomposed into its basic components to obtain suitable combustion properties. The combustion of ammonia, however, generates significant levels of NO_x and N₂O emissions due to its chemical structure containing nitrogen. Nevertheless, it has been shown that the thermal NO_x emissions, originating from temperature, are more dominant in the gas turbine combustion process, resulting in emissions not significantly different from conventional fuels. In this thesis, the effects of inlet geometry and combustion parameters on the combustion performance and emissions in a high-swirl ammonia-fueled gas turbine were investigated. Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses of pure ammonia and ammonia-blended fuel compositions were conducted alongside experimental validation. According to the research results, the addition of ammonia to the studied fuels led to an approximately 4% decrease in the maximum temperature levels, with no significant changes observed in the total thermal power provided. Moreover, while an increase in N content in the flame region was observed due to ammonia additions, it was found to be suppressed by a factor of 1/4 at the exit of the combustion chamber. The addition of ammonia to the fuels resulted in a more extensive spread along the combustion chamber walls and higher tangential velocities in the flame region, thereby achieving a more homogeneous combustion. As a result, it was concluded that ammonia fuel can be used as an auxiliary fuel in gas turbines without compromising combustion performance. Although NO_x emission levels may be a concern, it was determined that there is no significant increase in NO_x emissions at the exit of the combustion chamber, relative to performance, due to the effects of the secondary and dilution zones.

Science Code : 91440

Key Words : Combustion, emission, ammonia, kerosene, methane, hydrogen

Page Number : 142

Supervisor : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

TEŞEKKÜR

Tezimin fikir aşamasından sonuçlandırılmasına kadar geçen süreçte bilgi ve deneyimini benden hiç esirgemeyen, ayrıca her konuda desteğini gördüğüm, mesleki ve hayati anlamda görüşleri ile her zaman yoluma ışık tutan, örnek aldığım ve kendisinden her zaman baba sıcaklığını hissettiğim çok değerli büyüğüm ve tez danışmanım Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a yolumu aydınlattığı için sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Kendisine minnettarım. Doktora tezim süresince değerli katkı ve desteklerini benden esirgemeyen Tez İzleme Komitesi üyelerim Prof. Dr. Hakan Serhad SOYHAN ve aynı zamanda her türlü desteğini gördüğüm ağabeyim hocam Doç. Dr. Serhat KARYEYEN'e teşekkürü borç bilirim. Aynı zamanda tez kapsamındaki deneysel çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Yanma Araştırma Laboratuvarına ve deneylerde bana yardımcı olan uzun senelerin dostluğumuzun eskitemediği Dr. Öğr. Üyesi Buğrahan ALABAŞ'a teşekkür ederim. Arkadaşlarım ve sevdiğim Sayın Doç. Dr. Erdem ÇİFTÇİ ve Dr. Öğr. Üyesi Güven TUNÇ hocalarıma tanıştığımız günden bu yana maddi manevi desteklerinden dolayı teşekkür etmek istiyorum. Her zaman moral veren, beni motive eden ve bu zorlu süreçte yanımda olan insanlar oldunuz. Bütün ömrüm boyunca yaşadığım tüm başarılarda yanımda olan, zorlukları kolaylıkla aşmam için maddi ve manevi elinden geleni yapan çok sevgili babam Mehmet KÜMÜK, annem Sultan KÜMÜK ve kardeşim Fatma KÜMÜK'e sonsuz şükranlarımı sunarım. Aynı zamanda sevgili eşim Dr. Öğr. Üyesi Berre KÜMÜK ve biricik oğlum Mehmet Alp KÜMÜK'e bu zorlu süreçte yanımda oldukları, daima anlayış ve sabırla beni destekledikleri ve en güzel günlerimin sebebi oldukları için çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR.....	17
2.1. Genel Bilgiler	17
2.2. Yanma Süreci	18
2.3. Yakıt Besleme	20
2.4. Gaz Türbini Yanma Odası Türleri	21
2.4.1. Boru tip (can-tubular) yanma odası	21
2.4.2. Boru-halka tip (can-annular) yanma odası.....	23
2.4.3. Halka tip (annular) yanma odası	23
2.5. Yanma Odası Performansı	25
2.6. Yanma Yoğunluğu	25
2.7. Yanma Verimliliği	25
2.8. Yanma Stabilizesi.....	26
2.9. Yanma Sonucu Emisyonları.....	27
3. AMONYAK GAZI ELDE EDİLMESİ	29
3.1. Üretim Yöntemleri	29

	Sayfa
3.2. Konvansiyonel Amonyak Üretimi	30
3.3. Elektrokimyasal Amonyak Üretimi	32
3.4. Termokimyasal Döngü ile Amonyak Üretimi.....	34
4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI (HAD)	
MODELLEME.....	37
4.1. Giriş.....	37
4.2. HAD Çözüm Algoritması	37
4.3. Temel Denklemler.....	38
4.3.1. Kütle korunum denklemi	41
4.3.2. Momentum korunum denklemi.....	41
4.3.3. Enerji korunum denklemi.....	42
4.3.4. Kimyasal türlerin korunumu	42
4.4. Sayısal Modeller.....	42
4.4.1. Türbülans yanma modeli.....	43
4.4.2. Türbülanslı aksî-simetrik akış modeli.....	44
4.4.3. RNG k-ε türbülans modeli	45
4.4.4. P1 radyasyon modeli	46
4.4.5. Girdap ayrışma yanma modeli	47
4.5. Kullanılan Yakıtların Yanma Reaksiyonu	47
4.6. Azot Oksit (NO _x) Oluşum Mekanizması.....	48
4.6.1. Termal NO _x mekanizması	49
4.6.2. Ani NO _x mekanizması	51
4.6.3. Yakıt NO _x mekanizması	53
4.6.4. NO ₂ reaksiyon mekanizması.....	54
4.6.5. N ₂ O reaksiyon mekanizması.....	55
5. DENEYSEL SİSTEM VE SAYISAL MODELLEME	57

Sayfa

5.1. Deneysel Sistem Tanıtımı	57
5.2. Yanma Odası ve Amonyanın Yanma Modellemesi.....	59
5.2.1. Yanma odasının geometrisi ve boyutları.....	60
5.2.2. Sayısal model ağ (Grid) üretimi.....	65
5.2.3. Model sınır şartları	67
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	69
6.1. Model Doğrulaması.....	69
6.2. Deneysel Çalışma Sonuçları	72
6.3. Sayısal Modelleme Sonuçları.....	76
6.3.1. Amonyak/kerosen yakıt karışımlarının sayısal modelleme sonuçları.....	76
6.3.2. Amonyak/hidrojen yakıt karışımlarının sayısal modelleme sonuçları.....	93
6.3.3. Amonyak/metan yakıt karışımlarının sayısal modelleme sonuçları	117
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	125
7.1. Sonuçlar.....	125
7.2. Öneriler	128
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	141

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Amonyak ve hidrokarbon yakıtların termal özellikleri ve temel yanma özellikleri	36
Çizelge 4.1. RNG analiz sabitleri	46
Çizelge 5.1. Çözümlemelerde kullanılan ve literatürden elde edilen bilgilere göre hava ve kerosene ait değerler.....	67
Çizelge 6.1. Yakıt karışımı akış hızları ve özellikleri.....	73
Çizelge 6.2. Öngörülen çıkış sıcaklık değerleri	85
Çizelge 6.3. Farklı soğutma açıları ve farklı yakıt karışımları durumunda egzoz çıkışındaki NO _x değerlerinin karşılaştırılması.	117

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Gaz türbin yanma odası	17
Şekil 2.2. Yanma odası hava akış yüzdeleri	19
Şekil 2.3. Alev dengeleyici ve genel hava akışı.....	19
Şekil 2.4. Yakıt buharlaştırılması.....	21
Şekil 2.5. Tekil yanma odası.....	22
Şekil 2.6. Montajlı çoklu yanma odası.....	22
Şekil 2.7. Boru-Halka tip yanma odası	23
Şekil 2.8. Halka tipi yanma odası	24
Şekil 2.9. Yanma verimliliği ve hava/yakıt oranı grafiği.....	26
Şekil 2.10. Yanma stabil sınırları.....	27
Şekil 3.1. Geleneksel ve yenilenebilir kaynaklar yoluyla ana amonyak üretim yolları.....	29
Şekil 3.2. Haber–Bosch süreci ile doğal gazdan amonyak üretiminin şematik diyagramı.....	31
Şekil 3.3. Elektrokimyasal amonyak sentezinin şematik diyagramı.....	33
Şekil 3.4. Amonyak üretiminin termokimyasal döngüsünün şematik diyagramı	35
Şekil 3.5. Amonyak yanması için reaksiyon yolları	36
Şekil 4.1. Ayrılmış çözüm metodunun basamakları	38
Şekil 4.2. NO emisyon oluşum mekanizmaları	50
Şekil 4.3. Yakıt NO _x mekanizması.....	53
Şekil 5.1. Test teçhizatının tasarımı	58
Şekil 5.2. Referans geometri için yanma odasının önden görünümü	60
Şekil 5.3. Referans geometri için yanma odasının yandan görünümü.....	61
Şekil 5.4. Yanma odasına giren havanın yüzdesel olarak dağılımları	62
Şekil 5.5. Yanma odasının kesit görüntüsü ve katı modeli.....	63
Şekil 5.6. Yanma odasının iç çeper (üst) ve dış çeper (alt) kabuğu.....	64

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Annulus açıklıklarının yandan görünümü	64
Şekil 5.8. Yanma Odası Katı Model ve Boyutları	65
Şekil 5.9. Mesh sayısına bağlı yanma odası çıkış sıcaklık değerlerinin değişimi	66
Şekil 6.1. %100 CH ₄ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması	70
Şekil 6.2. %90 CH ₄ - %10 NH ₃ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması	70
Şekil 6.3. %80 CH ₄ - %20 NH ₃ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması	71
Şekil 6.4. %70 CH ₄ - %30 NH ₃ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması	71
Şekil 6.5. CH ₄ - NH ₃ karışımları yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması	72
Şekil 6.6. Amonyak ilavesi ile yanma odası sıcaklık dağılımları	74
Şekil 6.7. Amonyak ilavesinin alev görüntüsü üzerindeki etkisi.....	75
Şekil 6.8. Eksenel sıcaklık profillerinin karşılaştırılması tahmin ve elde edilen	77
Şekil 6.9. Tüm hava yanma analizleri için öngörülen eksenel sıcaklık profilleri.....	78
Şekil 6.10. Farklı yakıt karışımları ve farklı oksitleyiciler için eksenel sıcaklık profilleri	79
Şekil 6.11. Radyal sıcaklık hava altında farklı yakıt karışımları için konturlar	81
Şekil 6.12. Radyal sıcaklık oksijen yanma altında farklı yakıt karışımları için konturlar ..	82
Şekil 6.13. Kesit sıcaklık konturları hava yanma altında farklı yakıt karışımları için....	83
Şekil 6.14. Kesit sıcaklık konturları oksijen yanma altında farklı yakıt karışımları için	84
Şekil 6.15. Tüm hava yanma durumları için öngörülen NO _x profilleri.....	86
Şekil 6.16. Çeşitli yakıt karışımlarında hava ve oksijen yanması için öngörülen eksenel NO _x profilleri	87
Şekil 6.17. Hava için radyal NO _x dağılımı - çeşitli yakıt karışımları için yanma.....	89
Şekil 6.18. Oksijen için radyal NO _x dağılımı - çeşitli yakıt karışımları için yanma.....	90
Şekil 6.19. Farklı karışımlar için hava eksenel NO _x dağılımı.....	91
Şekil 6.20. Farklı karışımlar için oksijen yanmanın eksenel NO _x dağılımı.....	92
Şekil 6.21. Eksenel sıcaklık profillerinin sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması	94

Şekil	Sayfa
Şekil 6.22. Farklı hidrojen ilavelerinin eksenel sıcaklık profilleri üzerindeki etkileri a) 15° b) 30° c) 45°	95
Şekil 6.23. Eksenel sıcaklık profilleri üzerindeki farklı hava soğutma derecelerinin etkileri.....	97
Şekil 6.24. 15° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için sıcaklık konturları .	100
Şekil 6.25. 30° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için sıcaklık konturları.	101
Şekil 6.26. 45° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için sıcaklık konturları.	102
Şekil 6.27. 15° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.....	104
Şekil 6.28. 30° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.....	105
Şekil 6.29. 45° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.....	107
Şekil 6.30. Farklı hidrojen ilavelerinin a) 15° b) 30° c) 45° eksenel NOX profilleri üzerindeki etkileri.....	109
Şekil 6.31. Farklı hava soğutma derecelerinin eksenel NOX profilleri üzerindeki etkiler.....	111
Şekil 6.32. 15° hava soğutma açısında farklı yakıtlar için NO _x konturları	114
Şekil 6.33. 30° hava soğutma açısında farklı yakıtlar için NO _x konturları	115
Şekil 6.34. 45° hava soğutma açısında farklı yakıtlar için NO _x konturları	116
Şekil 6.35. Tüm yanma durumları için öngörülen eksenel sıcaklık profilleri	118
Şekil 6.36. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için eksenel sıcaklık konturları..	119
Şekil 6.37. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için radyal sıcaklık konturları....	120
Şekil 6.38. Tüm yanma durumları için öngörülen eksenel NO _x profilleri.....	121
Şekil 6.39. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için eksenel NO _x konturları.	122
Şekil 6.40. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için radyal NO _x konturları	123

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Deney sistemi ön görünüşü.....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Arrhenius faktörü
bar	Bar
CH₄	Metan
C₃H₈	Propan
C₁₂H₂₃	Kerosen
CH₄	Metan
cm	Santimetre
CO	Karbon monoksit
CO₂	Karbon dioksit
c_p	Özgül ısı
E	Aktivasyon enerjisi
h	Isı taşınım katsayısı
H	Entalpi
H₂	Hidrojen
H₂O	Su buharı
HNO	Nitroksil
k	Isı iletim katsayısı
K	Kelvin
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
m	Metre
MJ	Megajoule
MPa	Megapaskal
N₂	Azot
N₂O	Diazot oksit
NH₃	Amonyak
NO	Azot monoksit

Simgeler	Açıklamalar
NO₂	Azot dioksit
NO_x	Azot oksit
sn	Saniye
O₂	Oksijen
OH	Hidroksil
p	Basınç
ppm	Parts per million
rpm	Revolutions per Minute
Q	Isı transferi
Q	Yakıt debisi
R	Universal gaz sabiti
SO_x	Kükürt oksit
SO₂	Kükürt dioksit
T	Sıcaklık
u	Hız
v	Hız
°C	Santigrad
ρ	Yoğunluk
τ	Vizkoz kayma gerilmesi
Γ	Laminer değişim katsayısı
μ	Vizkozite
δ	Kroneker delta tensörü
ε	Yayılma oranı
σ	Prandtl sayısı
σ	Stefan-Boltzman sabiti
α	Emme ve saçılma katsayısı
Ø	Eşdeğerlilik oranı

Kısaltmalar

EDC

Açıklamalar

Eddy dağılımı konsepti

GRI

Gaz araştırma enstitüsü

Kısaltmalar**Açıklamalar****HAD**

Hesaplamaalı akışkanlar dinamiği

LES

Büyük girdap simülasyonu

LHV

Large eddy simulation

PIV

Parçacık sanal hız ölçümü

RNG

Yeniden normalleştirme grubu

SNCR

Seçici katalitik olmayan redüksiyon

1. GİRİŞ

Küresel ısınma, insanlığın karşı karşıya olduğu en büyük tehlikeler arasındadır. Küresel ısınmanın azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması ve ilk olarak CO₂ sera gazı emisyonlarının minimize edilmesi için çeşitli kombinasyonlarla stratejiler yapılmaktadır. Çevre dostu teknolojilerin yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak sera gazı emisyonlarında önemli bir azalma potansiyeli bulunmaktadır. Ancak yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen gücün, elektrik depolama potansiyeli [1] ile ilgili sorunlar henüz çözülememiştir. Bu nedenle, yenilenebilir enerjinin hidrojen enerjisine dönüştürülmesi yenilenebilir teknolojilerin [2] gelişmesinde önemli bir rol oynayabilir. Son yıllardaki araştırmalara göre yenilenebilir enerji üretiminin enerji tüketiminin yaklaşık %18'ini karşılayabildiği görülmektedir [3]. Fosil yakıtlar, en yüksek enerji ihtiyacını sağlamanın yanı sıra diğer kaynaklara göre daha fazla CO₂ emisyonu salgılamaktadır. 2015 yılında imzalanan Paris İklim Değişikliği anlaşmasına göre, sera gazı emisyonunu 2010 yılına kıyasla 2030 yılına kadar en az %45, sıfır emisyonunu ise 2050 yılına kadar azaltmayı amaçlamaktadır [4].

Hidrojen, hidrokarbonlara kıyasla düşük bir enerji yoğunluğuna sahiptir ve enerji kaynağı olarak depolanabilmesi için sıkıştırılmalı veya sıvılaştırılmalıdır. Bu da maliyet ve güvenlikle ilgili zorlukları beraberinde getirmektedir [5]. Bu dezavantajı minimum değere indirebilmek için hidrojen taşıyıcılar dikkate alınmalıdır. Mevcut seçenekler arasında, sıvı biçimindeki amonyak, uygun maliyetli depolamayı ve yenilenebilir enerjinin büyük miktarlarda dağıtılmasını destekleyen, ayrıca karbon içermeyen bir hidrojen taşıyıcısıdır. Bu tez çalışmasında, gaz türbinlerinin yanma yoluyla güç üretebilmesi için yenilenebilir enerji kaynaklarından olan amonyak gibi içeriğinde karbon içermeyen yakıt ile ilgilenilmektedir.

Hidrojen, amonyak gibi bir sıvı hidrojen taşıyıcısında kimyasal olarak depolanabilir. Ayrıca amonyağın hacimsel enerji yoğunluğu, etanolün yaklaşık yarısı büyüklüktedir. Amonyak oda sıcaklığı koşullarında ve 8 bar basınç altında kolayca sıvılaştırılabilir [6]. Amonyak, yenilenebilir enerjilerin kimyasal olarak depolanması için iyi bir tercih haline gelmektedir. Ayrıca, amonyağın güç üretimi için alternatif yakıt olarak önemli bir rol oynaması beklenmektedir. Bununla birlikte, amonyağın gerçek bir yanma odasında yakıt olarak kullanılmasıyla ilgili çalışmalar oldukça sınırlı olmasına rağmen yeni gelişen ve geliştirilmeye açık bir konudur.

Literatür araştırması

Bastani, Tabejamaat ve Ashini (2023), amonyağın yanma performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla gerçek bir mikro türbin yanma odasında deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Amonyak ile metan karışımının ve bu karışımın oranının yanma performansı üzerindeki etkilerini iki farklı termal güçte incelemiştir. Bulgular amonyak oranının artmasıyla alev sıcaklığının düştüğünü, alevin enjektörden uzaklaştığını ve NO_x emisyonlarının arttığını, ancak CO emisyonlarının önemli ölçüde azalmadığını göstermiştir. Ayrıca, yanma odası çıkış sıcaklığının neredeyse değişmediği ancak yanma verimliliğinin amonyak oranının artmasıyla azaldığı gösterilmiştir [7].

Wang, Liu, Wang, Fu ve Weng (2023), NH_3 'ün detaylı reaksiyon mekanizmalarını ve termodinamik verilerini incelemiştir. Ayrıca, mikro gaz türbininin türbülanslı bir yanma odasında CH_4 /hava ve NH_3 /hava karışımı kullanarak alevlerin yanması ve NO_x emisyon karakteristiklerini sayısal olarak karşılaştırmışlardır. NH_3 /hava alevinin yüksek sıcaklık bölgesinin ısı yük arttıkça yanma odasının çıkışına daha hızlı ilerlediğini göstermişlerdir. Ayrıca, NH_3 /hava alevinden kaynaklanan NO, N_2O ve NO_2 emisyon konsantrasyonlarının, CH_4 /hava alevinden kaynaklanan konsantrasyonlardan sırasıyla 6, 161 ve 3 kat daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca, bazı parametrelerin ısı yük değişikliği ile ilişkili olduğu ve parametrelerin ısı yük değişikliğinden sonra emisyon eğilimlerini tahmin etmek için izlenebileceğini gözlemlemiştir [8].

Kumuk ve Ilbas, farklı soğutma açıları (15, 30, 45) ile amonyak-hidrojen karışım yakıtlarının (%10 - %50) türbülanslı gaz türbini yanma odasındaki sayısal modellemesini hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Amonyak eklenmesiyle yanma odasındaki maksimum sıcaklık seviyelerinin azaldığını ve amonyağın yanma oranının daha düşük olduğu bölgelerde alevin egzoz yönüne kaydığını gözlemlemiştir. Yakıt olarak amonyak eklenmesinin alev çekirdeğinde NO_x seviyelerini hızla arttırdığı görmüşlerdir. 45° eğim açısı, çıkışta diğer koşullara göre daha homojen bir sıcaklık dağılımı sağladığı bulunmuştur. Sonuç olarak, amonyak-hidrojen karışım yakıtlarının yanma performansı açısından önemli bir seçenek ve sürdürülebilir bir yakıt olasılığı taşıdığı sonucuna varmışlardır [9].

Zhang ve diğeri (2023), girdaplı yanma odasına hava film soğutması tasarlamış ve NO_x emisyonundaki duvar ısı kaybı etkisini incelemek amacıyla alev yapısını ve NO üretimini OH-/NO-PLIF teknikleri ile ölçmüşlerdir. Deneysel bulguların anlaşılmasını genişletmek amacıyla çalışmalarını ayrıntılı kimyasal denklemler kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Mevcut yanma odası için soğutma hava debisi arttıkça daha fazla konveksiyon ısı kaybı elde etmişlerdir. Isı kaybı arttıkça NO emisyonu azalma eğilimi göstermiş ve güçlü duvar soğutması olan gaz türbin yanma odası tasarlarken NO_x üretimi üzerindeki ısı kaybı etkisinin tam olarak göz önüne alınması gerektiğini önermişlerdir [10].

İlbas, Kumuk ve Alabas (2023), deneysel çalışmalarında, amonyak eklemenin farklı zorlayıcı akustik frekanslar, dinamik basınç şiddeti ve ışık emisyon şiddeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Ayrıca, amonyak eklemenin metan yakıt gazının sıcaklığı ve emisyonları üzerindeki etkilerini de araştırmışlardır. Brülör gücü 5 kW olarak belirlenmiş ve yanma odasının uyarım frekansları 95, 160 ve 300 Hz olarak belirlenmiştir. Amonyak eklemesi arttıkça, özellikle en yüksek bozulma etkisinin meydana geldiği 95 Hz frekansta, alev istikrarsızlık değerlerinde bir artış görülmüştür. Amonyak eklemesiyle yanma performansında önemli bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir [11].

Medina ve diğeri (2015), 0,5 MPa basınca kadar laminer yanma hızı ve amonyak/hava önceden karıştırılmış alevlerin Markstein uzunluğunu ilk kez deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçlara göre laminer yanma hızlarının maksimum değerinin 7 cm/sn. 'den az olduğu ve hidrokarbon alevlerinden daha düşük olduğu gösterilmiştir. Markstein uzunluğunun eşdeğerlik oranındaki artışla arttığı, bunun hidrojen/hava alevleri ve metan/hava alevleri ile aynı oranda olduğu görülmüştür. 0,1 MPa'da yanmış gazın Markstein uzunluğunun 0,3 MPa ve 0,5 MPa 'da olanlardan daha yüksek olduğu bulunmuştur. Ancak, 0,3 MPa ve 0,5 MPa 'da yanmış gazın Markstein uzunluğu değerlerinin neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Ayrıca, amonyak/hava yanmasıyla ilgili CHEMKIN-PRO programı kullanarak sayısal simülasyonlar da gerçekleştirilmiştir [12].

Han ve diğeri (2019), NH_3 'ün yakıt olarak yanma özelliklerini anlamak için NH_3 /hava, NH_3/H_2 /hava, NH_3/CO /hava ve NH_3/CH_4 /hava ile önceden karıştırılmış alevlerin laminer yanma hızlarını araştırmışlardır. Ölçümler, çok çeşitli eşdeğerlik oranları ve karıştırma oranları için çalışılmıştır. Modellemeler GRI-Mech 3.0, Okafor ve San Diego mekanizmaları gibi kinetik mekanizmalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. NH_3 /hava alevleri için yapılan

deneysel sonuçlar iyi uyum sağladığı görülmüş ve NH_3 ile H_2 'nin karıştırılmasının, NH_3 bazlı yakıt karışımlarının yanma hızını artırmak için en etkili yöntem olduğu açıklanmıştır [13].

Kurata ve diğerleri (2017), alev dengesini artırmak için amonyak yakıtı ve difüzyon yanmasını çalışmışlardır. NH_3 – hava türbin güç üretim sistemi, sırasıyla 18,4 kW – 44,4 kW ve 70.000 dev/dak – 80.000 dev/dak gibi çeşitli güç ve dönüş devirlerinde çalıştırılmıştır. Türbininin yanma verimliliği 80.000 dev/dak'da %89 ile %96 arasında bir artış göstermiştir. Yanmamış NH_3 emisyonunun, yanıcı giriş sıcaklığına bağlı olduğu görülmüştür. Emisyon verileri, birincil yanma bölgesinde NH_3 yakıtla zengin ve fakir bölgeler olduğunu göstermiştir. NH_3 – hava yanmalı gaz türbinlerinde düşük NO_x yanması elde etmek için yüksek miktarda NH_3 yakıtı yakılması ve birincil yanma bölgesinde hem zengin hem de fakir yakıt karışımlarının oluşmasının gerekli olduğu görülmüştür [14].

Kurata ve diğerleri (2019), gaz türbin sisteminde düşük NO_x değeri elde edebilmek için NH_3 -hava ön karıştırmasız yakıcı geliştirmiş ve deneysel çalışma yapmışlardır. Birincil seyreltme deliklerinden geçen hava akışının ortadan kaldırılmasıyla, daha düşük yakıt akış hızına emisyonlar oluşmadan hareket ettiğini göstermişlerdir. NO emisyonları %16 O_2 değeri için 337 ppm'e düşürülmüştür. Bu değer temel sistemin yaklaşık üçte birine tekabül etmektedir. Aynı zamanda, yanmamış NH_3 önemli ölçüde azaltılmıştır [15].

Somarathne, Hatakeyama, Hayakawa ve Kobayashi (2017) mevcut çalışmada, silindirik yakıcı çıkışında çeşitli eşdeğerlik oranları ve 0,5 MPa basınca kadar alan ve zaman ortalaması emisyonları (STAE) elde ederek, yanmamış NH_3 ve H_2 emisyonlarının amonyak/hava ön karıştırılmış yanma üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Çalışmada, yüksek alev koşullarında yanmamış NH_3 emisyonunun basınç artışıyla azaldığı görülmüştür. 0,5 MPa çalışma basıncında %6 hacimsel egzoz çıkışında yanmamış bir H_2 emisyonu olmasına rağmen, 1,2 eşdeğer oranındaki hiçbir H_2 emisyonu görülmemiştir [16].

Okafor ve diğerleri (2019), çalışmalarında yakıt enjeksiyon açısı, yanıcı giriş sıcaklığı, eşdeğerlik oranı ve ortam basıncının alev stabilizasyonu ve emisyonlar üzerindeki etkilerini yüksek basınçlı bir yanma odasında incelemişlerdir. Egzoz gazlarının analizinde FTIR gaz analizörü kullanılmıştır. OpenFOAM programında yapılan sayısal modelleme ile deneysel sonuçların doğrulaması yapılmıştır. Bulgularda, yanıcı merkez eksenini boyunca dikey

enjeksiyonun aksine eğimli yakıt enjeksiyonunun alev dengesini iyileştirdiğini, NH_3 ve NO_x emisyonlarını azalttığını gösterilmiştir. Ayrıca, özellikle önceden karıştırılmış yanma için ortam basıncıyla birlikte emisyonda azalma olmadığı tespit edilmiştir [17].

Jojka ve Slefarski (2018), makalelerinde yakıt içeriği %1'den %5'e kadar NH_3 karışımı ile amonyak-metan alevlerinin yanma işlemi hakkında deneysel ve sayısal bir çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda, nitrik oksit emisyonunun eklenen yakıttaki NH_3 içeriğinin artmasıyla arttığı, ancak NH_3 'den NO 'ya geçişin doğrusal olmadığı gösterilmiştir. Yakıttaki amonyak içeriğinin %2,5'den %5'e çıkarılmasının, fakir karışımlar için emisyonda 946 ppm'den-1471ppm'e, stokiyometrik koşullar için ise 1451 ppm'den-2148 ppm'e bir artış meydana getirdiği gösterilmiştir. Sayısal analiz sonuçları ile incelenen tüm yanma modelleri ve kinetik reaksiyon mekanizmaları için fakir karışımlar ve %1'e kadar amonyak içeriği için deneysel sonuçlar üzerinde iyi bir uyum olduğu görülmüştür. 3B Ansys EDC modeli ve GRI 3.0 ile yapılan analizlerde, yakıtta NH_3 payının %2,5'ine kadar en doğru sonuçları sağladığı görülmüştür. Bu sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında ise bu pay %10'dan %24'e kadar çıkmıştır [18].

Medina ve diğerleri (2017), amonyak-metan karışımları kullanılarak farklı eşdeğerlik oranlarında üretilen alev dengesini ve emisyonları belirlemek için teğetsel türbülans tipi brülör kullanarak deneysel ve sayısal ayrıntılı çalışmalar yapmışlardır. Atmosfer ve orta basınçlı koşullar altında gaz analizi ve kimyasal ışıltama kullanılarak sırasıyla emisyon konsantrasyonlarını ve OH üretim bölgelerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Tamamen önceden karıştırılmış bir enjeksiyon stratejisinin optimum amonyak yanması için uygun olmadığı ve orta türbülans sayılarında yüksek alev dengesizlikleri üretilebildiği, dolayısıyla daha düşük türbülans ve amonyak yakıt karışımlarının kullanıldığı optimize güç üretimi için farklı bir enjeksiyon stratejisi gerektiği sonucuna varılmıştır [19].

Ichikawa ve diğerleri (2015), homojen dağılmamış laminar yanma hızı ve küresel olarak yayılmış laminar alevlerinin Markstein uzunluğunu deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, uzatılmamış laminar yakma hızının hidrojen oranında artış ile doğrusal olmayan bir şekilde arttığını göstermiştir. Markstein uzunluğunun hidrojen oranındaki artışla lineer olmayan bir şekilde değiştiği görülmüştür. Esnek olmayan laminer yakma hızı ve Markstein uzunluğu ilk karışım basıncındaki artışla azaldığı gösterilmiştir. İlk karışım basıncı 0,1 ila 0,3 MPa'dan arttığında Markstein uzunluğundaki azalma daha büyük olsa da 0.5 MPa'daki

Markstein uzunluklarının değerlerinin neredeyse 0,3 MPa'daki değerlerle aynı olduğu görülmüştür [20].

Medina, Pugh, Marsh, Bulat ve Bowen (2017), gaz türbini türbülans yakıcısındaki fakir n yanma için aynı yüzdesel oranlarda amonyak ve hidrojen karışımının kullanıldığı sayısal ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda eşdeğer laminer akış alev hızı özelliklerine sahip karıımla metana benzeyen bir alev hızı üretilbildiğini göstermişlerdir [21].

Medina ve diğerleri (2019) alımalarında OH kimyasal ııldaama ve NO_x-NH₃ gibi emisyonların yanma stabilizesi dahil olmak üzere %70 NH₃ - %30 H₂'e kadar karışım ile deneyler yapmışlardır. Sonuç olarak yanmamış amonyakın kimyasal reaktivitesi arttığı için karışımın yanma kararlılığı ve baypas havası olmayan durumlarda emisyonların önemli ölçüde azaltılmasıyla birlikte önemli bir potansiyele sahip olduğunu göstermişlerdir [22].

Somarathne, Hayakawa ve Kobayashi (2016) türbülanslı bir girdap brülöründe önceden karıtırılmı amonyak-hava alevinin yanma özellikleri hakkında sayısal araştırma yapmışlardır. Sayısal alıma, amonyak alevlerinin katkı maddeleri kullanılarak stabilize edilebileceğini göstermiştir. Ek olarak, sonuçlar, 500 K başlangıç sıcaklığının ve yaklaşık 1,2 eşdeğerlik oranının, test edilen alevlerden kaynaklanan minimum NO ve NH₃ emisyonlarını verdiğini göstermektedir. Bu alıma, bir gaz türbininde amonyak yakıtının güçlü bir potansiyel olduğunu göstermiştir [23].

Hayakawa ve diğerleri (2017) bir girdap brülöründe önceden karıtırılmı amonyak-hava alevinden gelen stabilite ve emisyonları araştırmak için deneyler yapmışlardır. Bu deneysel çalışma ile, amonyak-hava alevlerinin amonyak yanıcılık aralığına yakın bir aralıkta stabilize edilebileceğini gösterilmiştir. Zengin amonyak alevlerinde, NO ve NH₃ emisyonları makul derecede düşük olduğu grlmtir. Deneylelerden 1,05 ve tek boyutlu simülasyonlardan 1,2 civarında belirli bir eşdeğerlik oranı için değerler aynı sayılabileceği gösterilmiştir [6].

Xiao, Medina, Marsh ve Bowen (2017) gaz türbinlerinde amonyak-metan yakıtı kullanımı için çeşitli sayısal reaksiyon modellerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda Tian mekanizmasının NH₃-CH₄ yanması için en uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca,

basıncın emisyonları azaltma konusunda sıcaklıktan daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya çıkarmışlardır. Bu bulgu, gaz türbinlerinde yakıt olarak amonyak kullanılabileceğini göstermiştir [24].

Somarathne ve diğerleri (2017) basınç ve ikincil enjeksiyonun bir gaz türbininde amonyak-hava karışımının yanmasından kaynaklanan emisyonlar üzerindeki etkisini araştırmak için sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçların basınç arttıkça NO ve NH₃ emisyonlarının azalması konusunda literatür ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. En düşük NO emisyon değeri, 1,2 eşdeğerlik oranı için bulunmuştur [16].

Kurata ve diğerleri (2017), bir gaz türbini brülöründe amonyak-metan türbülans alevlerinden kaynaklanan performans ve emisyon konusunda iki aşamalı yanma stratejisini araştırmışlardır. Sayısal çalışmada, amonyak alevlerinden kaynaklanan emisyonları azaltmada ikinci aşama yanmanın güçlü bir potansiyeli olduğunu göstermişlerdir [25].

Medina ve diğerleri (2017), bir gaz türbini girdap brülöründe önceden karıştırılmış hidrojen ile amonyak yanması üzerine bir ön çalışma yapmışlardır. Hidrojen ilavelerinin, yüksek geri dönüş eğilimi nedeniyle dar bir çalışabilirlik penceresine yol açtığı gösterilmiştir. Ayrıca, saf %50 NH₃ ve %50 H₂'den iyi bir performans elde edilemediğini bulmuşlardır [21].

Somarathne ve diğerleri (2019), çeşitli termal sınır koşullarının ve yüksek basıncın türbülanslı önceden karıştırılmamış amonyak girdap alevlerinin emisyonları üzerindeki etkisini araştırmak için sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Amonyak yanmasından kaynaklanan emisyonun sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olmadığını ve üretiminin büyük ölçüde yerel OH konsantrasyonuna bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Sayısal sonuçlar ile, duvar ısı kayıplarıyla birlikte, emisyonun önemli ölçüde azaldığını göstermişlerdir [26].

Valera-Medina ve diğerleri (2019), amonyak-hidrojen karışımları ile ilgili çalışma yapmışlardır. Metan ile amonyak yanması durumunda alevi %70'den daha düşük amonyak konsantrasyonuyla stabilize etmelerinin zorlaştığı gösterilmiştir. Ayrıca NO ve yanmamış amonyak emisyonlarını azaltmak için yeni enjeksiyon teknikleri bulma ihtiyacı olduğunu söylemişlerdir [27].

Okafor ve diğeri (2020), mikro gaz türbini yanıcılarındaki amonyak-metan alevlerinden kaynaklanan NO ve diğeri emisyonları incelemişlerdir. Bu çalışma ile, 49 ppm gibi önemli ölçüde düşük emisyonları ve 2,5 bar'da yüksek yanma verimliliğini karşılamada tek aşamalı bir yanma üzerinde iki aşamalı yanmanın yararı açıkça gösterilmiştir. Eşdeğerlik oranı için uygun değer 1,30 ila 1,35 arasında değişirken, genel eşdeğerlik oranının 0,5 civarında olması gerektiğini göstermişlerdir [28].

Zuniga, Cueto, Santacruz, May ve Medina (2020), gaz türbini sistemlerinde amonyak-hidrojen karışımları üzerinde yüksek basınç ve giriş sıcaklığının potansiyel etkilerini değerlendirmek için sayısal bir çalışma yürütmüştür. Çalışma koşullarının NO emisyonlarının oluşumu üzerindeki etkisini gösteren ilk çalışma olduğu söylenmiştir. Sonuçlar, duvar ısı kayıplarının amonyak ve NO emisyonları üzerinde net bir etkiye sahip olan amonyak reaktifliğini artırmada çok önemli olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca, tam reaksiyonun daha yüksek bir sıcaklıkta büyük miktarlarda su ve azot ürettiği açıklanmıştır. Çalışma sonucunda, yüksek basınçlarda ve giriş sıcaklıklarında amonyak yanması ve NO emisyonlarını en aza indirmek için iki aşamalı yanma önerilmiştir [29].

Franco, Rocha, Costa ve Yehia (2020) amonyak yanması için yeni bir girdap brülörü tasarlamış ve alev stabilizesini test etmişlerdir. Homojen bir yanma ve makul bir alev stabilizesi aralığı sağlamak için küçük bir hidrojen ilavesi önermişlerdir. Çalışma sonucunda, basit ve ucuz sistemlerin bu yeni brülörü kullanabileceği ve alev kararlılığını ve NO emisyon kontrolünü sağlayabileceği sonucu açıklanmıştır [30].

Kurata ve diğeri (2019), alev kararlılığını artırmak için buhar-amonyak yakıt ve difüzyon yanması çalışmışlardır. NH₃-hava yanmalı gaz türbini odası, sırasıyla 18,4 kW ile 44,4 kW güçlerde ve 70.000 rpm ile 80.000 rpm olmak üzere farklı hızlarda çalıştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, NO ve yanmamış NH₃ emisyonları brülör giriş sıcaklığına bağlı olduğu, NH₃'ün yakıt hızındaki artışın, yakıt- NO_x mekanizması nedeniyle NO emisyonunu önemli ölçüde artırdığı ve NO dönüşüm oranını düşürdüğü görülmüştür. Amonyak yanması sırasında daha düşük NO_x seviyelerine ulaşmak için, daha fazla amonyak yakılması ve birincil bölgede yakıt karışımlarının üretilmesi önerilmiştir [31].

Somarathne ve diğeri (2019) yüksek basınçta çalışan bir gaz türbininin alev özelliklerini araştırmak için önceden karıştırılmamış amonyak-hava ve metan-hava yanması

gerçekleştirmişlerdir. Sayısal modellemeler Eddy simülasyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, amonyak-hava alevleri için eşdeğerlik oranı 1,1 olduğunda daha düşük NO emisyonunun elde edilebileceğini göstermiştir. Bu sonuçları deneysel olarak doğrulamak için NO ve OH-PLIF görüntüleri kullanılmıştır. Ek olarak, yanma duvarının duvar ısı kaybı soğutmasının NH_3 'ün oksidasyonunu büyük ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Daha düşük NO emisyonları meydana gelmesine rağmen, önemli yanmamış NH_3 emisyonlarına neden olduğu bulunmuştur. Emisyon sonuçları, gaz türbininin %30'a kadar amonyak konsantrasyonlarıyla çalıştırılabileceğini göstermektedir [32].

Okafor ve diğerleri (2020), metan-amonyak karışımlarını inceleyen mikro gaz türbininde NO_x emisyon kontrolü üzerine çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Düşük NO_x emisyonları için optimum eşdeğerlik oranı aralığı amonyak konsantrasyonuna göre 1,30-1,35 olarak belirlenmiş ve bu bölgede amonyak nedeniyle daha yüksek NO_x emisyonları elde edildiği gösterilmiştir [28].

Chen ve Li (2021), ayrıntılı bir reaksiyon mekanizmasını tek boyutlu OPPDIF programı kullanarak incelemişlerdir. $\text{N}_2\text{O}-\text{CH}_4$ alevlerinin, N_2O ayrışması nedeniyle $\text{N}_2-\text{O}_2-\text{CH}_4$ alevlerinden daha yüksek sıcaklık meydana getirdiği ayrıca ek olarak, NO oluşumunun termal NO_x nedeniyle artması beklenmesine rağmen azaldığı görülmüştür [33].

Yılmaz, Cam ve Ilbas (2018), model geometrisinde önceden karıştırılmış H_2 -hava karışımları üzerinde sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Re-Normalizasyon Grubu (RNG) türbülans modeli ve 19 aşamalı Eddy Dissipation Concept modeli (EDC) ile yanma reaksiyonu için k- ϵ türbülans modeli kullanmışlardır. Alevin uzunluğunun ve şeklinin yanı sıra yanma boyunca sıcaklık değerinin ve dağılımında değiştiğini görmüşlerdir. Son olarak, en yüksek sıcaklık değerinde de bir miktar artış olduğunu gözlemlemişlerdir [34].

Hayakawa ve diğerleri tarafından (2017), deneysel olarak vorteks stabilize olan önceden karıştırılmış amonyak/hava alevleri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda amonyak yakıtının, hidrojen ilavesi ile gaz türbinlerinde yardımcı yakıt olarak kullanılmak üzere kabul edildiğini ortaya koymuşlardır. Her iki yanma limiti, fakir ve zengin amonyak ile neredeyse aynı bulunmuştur. Ayrıca, emisyon seviyeleri bir FTIR gaz analizörü ile incelenmiştir. Zengin koşullar altında, incelenen sonuçlara göre, NO seviyelerinin azaldığı ve amonyak seviyelerinin arttığı görülmüştür [35].

Nozari ve Karabeyoğlu (2015), yüksek basınç ve fakir yanma koşullarında amonyak-hidrojen-hava karışımı yanması üzerinde çalışmışlardır. Modellemede yanma özellikleri, laminer, önceden karıştırılmış ve serbest yayılan alev modeli ile belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, Konnov mekanizmasına dayanan basınç, yakıt karışımı ve eşdeğerlik açısından iki indirgenmiş mekanizma geliştirmişlerdir. Bununla birlikte, yaklaşık beş kat daha az CPU zaman maliyeti tahmin edebildiğini göstermiştir [36].

Amani ve Akbari ve Shahpouri (2018), farklı optimizasyonlarla çeşitli yanma performans hedeflerini araştırmışlardır. Bir gaz türbini brülöründe, önceden karıştırılmamış bir vorteks stabilize alev simüle edilmiştir. Tasarım optimizasyonu süreci için daha uygun olan etkili bir model önerilmiştir [37].

Torkzadeh ve Bolourchifard ve Amani (2016), yaptıkları çalışmada sayısal modeli yanma verimliliği, model faktörü, kirletici (CO ve NO) emisyonu ve entropi üretimini en aza indirme hedeflerine dayanan gerçek bir brülörün çok amaçlı optimizasyonunu gerçekleştirmek için kullanmışlardır [38].

Adachi, Iwamoto, Hayashi, Yamada ve Kaneko (2007) tarafından yapılan çalışmada çok aşamalı yanma, daha düşük NO_x emisyonları ve çeşitli eşdeğerlik oranlarında daha yüksek yanma verimliliği açısından gerçekleştirilmiştir. Simüle edilmiş biyokütle gazındaki CO₂'nin, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında yanma reaksiyonunun ilerlemesini yavaşlatarak NO oluşumunu bastırdığı bulunmuştur [39].

Khalil ve Gupta (2013) eşitli yakıtlar kullanarak dağıtılmış rejimi ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Kirleticilerle ilgili bazı önemli sonuçlar ve bazı yakıtlar için çeşitli eşdeğerlik oranlarında OH * değerleri elde etmişlerdir. Daha yüksek eşdeğerlik oranları sağlanarak NO_x'in daha da azaltılacağını belirtmişlerdir [40].

Khalil ve Gupta (2017) alev akışı alan etkileşimini ve dağıtılmış yanma rejimini etkileyen miktarları araştırmışlardır. Parçacık görüntü hızı ölçümünü (PIV) hız alanı için kullanmışlardır. Alev kalınlığının ve laminer alev hızının önemli olduğunu ve oksijen konsantrasyonunun azaltılmasından önemli ölçüde etkilendiğini keşfetmişlerdir [41].

Arghode, Gupta ve Bryden (2012) gaz türbini yakıcılarında dağıtılmış rejim altında farklı yakıtların yanma özelliklerini araştırmışlardır. Egzoz emisyonları, küresel alev fotoğrafları, emisyonlar ve akış alanı üzerine deneysel çalışmalar, basitleştirilmiş geometri ile ters çapraz akış geometrisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sayısal simülasyonlar, yeni tasarım için deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, önceden karıştırılmış ve önceden karıştırılmamış brülörler için ultra düşük NO_x emisyonlarının sırasıyla yaklaşık 1 ppm ve yaklaşık 4 ppm olduğunu göstermişlerdir [42].

Roy ve Gupta (2020), propan ve metan yakıtlarını %20 ve %40 hidrojen ile zenginleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada alev şekli ve kirletici emisyon özellikleri üzerinde çalışmışlardır. Alev parlaklığında azalma, OH değerlerinin çeşitli seyreltme seviyelerinde görünmez olmaya başlamasıyla gözlenmiştir [43].

Fordoei, Mazaheri ve Mohammadpour (2021), ısı transferi, CO- NO_x emisyonları, alev rengi ve zenginleştirilmiş O₂ ve CH₄ karışım yanmasının yapısını araştırmışlardır. Karbondioksiti azot ile değiştirerek, görünür ışık emisyonunun önemli ölçüde azaldığını bulmuşlardır. Ayrıca, alevin fırının nozul şeklindeki kısmına ulaşana kadar maksimum sıcaklığın azaldığını ortaya koymuşlardır [44].

Cho ve Song (2020), referans deneysel sonuçlara dayanan ticari motor simülasyon yazılımı kullanarak modelleme yapmışlardır. Bulgular bir motorda hidrojen yakmak için modellenerek elde edilen sonuçlar ölçüm verileriyle doğrulanmıştır. Bu sonuçlar arasında tutarlılık gözlenmiş ve modelin doğruluğu ile çalışmalar yapılabileceğini göstermiştir [45].

Gutarevych ve diğerleri (2018), bir SI motoru ile deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Hidrojen içeren bir gazın eklenmesinin, motorun gösterge değerlerinde iyileşme ile birlikte yanmanın kısılmasıyla sonuçlandığı bulunmuştur. Benzinli bir motorda havaya hidrojen içeren bir gaz beslenmesi durumunda yakıt tükenme verimliliğinde ve enerji ve çevresel açıdan performans artışı olduğu görülmüştür [46].

Ahmadi ve Hosseini (2018) tarafından yapılan çalışmada, verimlilik, basınç değişiklikleri, karbon monoksit, ultra hidrokarbon, azot oksit ve karbondioksit emisyonları gibi farklı parametreler yanma odasına hidrojen eklenerek incelenmiştir. Tüm kirletici emisyonları CDC kapsamında H₂ ilavesinin tüm vakalarında artmıştır. RCCI yanmasında metan yanma

performansı iyileştirilmiş ve metana H₂ eklendiğinde azot oksit hariç emisyonların azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, bu motorda benzin, metan, dizel ve hidrojen farklı yüzde karışım yanmasının performansını ve istikrarsızlığını incelemek için karşılaştırmalar yapılmıştır [47].

Alabas, Tunç, Taştan ve Yılmaz (2021), önceden karıştırılmış yanma altında oksijen bakımından zenginleştirilmiş yakıt karışımının akustik davranış koşullarına odaklanmıştır. Yakıt olarak metan kullanılmış ve iki hidrojen konsantrasyonu (%0, %10, %20) eklenerek farklı oranlarda bir oksijen zenginleştirme işlemi (%21, %24, %26) uygulamışlardır [48].

Ariemma, Sorrentino, Ragucci, Joannon ve Sabia (2022), amonyak/metan yanma özelliklerini laboratuvar büyüklüğünde bir brülörün hafif yanma koşulları altında incelemiştir. NH₃/CH₄ karışımları, saf NH₃'e uygun olarak hem çalışma sıcaklıkları hem de eşdeğerlik oranları açısından istikrarlı çalışma aralığını genişlettiklerini göstermiştir. Ek olarak, karışımların hem saf NH₃ hem de CH₄ yakıtlarından daha yüksek NO_x emisyonları ürettikleri gözlemlenmiştir [49].

Dai ve diğerleri (2022) yaptıkları deneysel çalışmada silindirik yanma odasında %20 ile %60 arasında amonyak içeren yakıt ve 3 bar'a kadar fan karıştırma ile çalışmışlardır. Türbülanslı yanma oranının, incelenen yoğunluk ve basınçlarda laminer yanma oranının azalması nedeniyle amonyak içeriği ile birlikte azaldığı görülmüştür. Buna ek olarak, amonyak alevinin türbülanslı yanma oranının Karlovitz ve Damkohler'in korelasyonu ile belirtildiği doğrulanmıştır [50].

Sun, Yang, Zhao, Chen ve Zheng (2022) yaptıkları çalışmada, amonyak kütle oranı ve amonyak / metan yanma özelliklerini ve gaz türbinindeki hız alanını %70'e kadar sayısal olarak analiz etmişlerdir. Sayısal sonuçlar, yakıtın amonyak oranı 0,3'ün üzerinde olduğunda, alevin artık "V" olduğunu ve yakıttaki amonyak oranının artıktan daha uzun ve daha kalın olduğunu göstermiştir. Yakıttaki amonyak oranındaki artışla birlikte, HNO ve OH konsantrasyonlarında farklılıklar olmuştur. Bu durumun NO_x emisyonlarının düşüştüğü sonra artmasına neden olduğu gösterilmiştir [51].

Medina ve diğerleri (2017) amonyak türbülans yakıt enjeksiyonu ve yakıt olarak sıvı stabilizasyonunun optimizasyonu için deneysel ve sayısal olarak çalışmışlardır. Farklı

eşdeğerlik oranlarındaki alev özelliklerini ve emisyonlarını belirlemek için teğetsel türbülans brülörü kullanmışlardır. Sayısal hesaplamalarla deneysel bulguları karşılaştırmak için GASEQ ve CHEMKIN-PRO programları kullanılmıştır. Tamamen önceden karıştırılmış bir enjeksiyon stratejisinin optimum amonyak yanması için uygun olmadığı, ancak daha düşük bir türbülans enjeksiyon stratejisi gerektirdiğine karar verilmiştir [19].

Mikulčić ve diğerleri (2021) yaptıkları sayısal çalışmada deneysel olarak önceden karıştırılmış türbülans brülörünün performansını üç ayrı amonyak mekanizmasında değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Sonuç olarak, San Diego mekanizması en iyi emisyon yöntemi olduğunu kanıtlamıştır, ancak eşdeğer oran 0,81'i geçtikten sonra modellerin hiçbirinin gerçekleşmediği görülmüştür. Ayrıca oksijenin aşırı tüketildiği de gözlemlenmiştir [52].

Zhang ve diğerleri (2021) metan ve hidrojenin yanıcı bir amonyak / hava alevinin emisyon özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hava alevi için gaz türbini brülörünün emisyon tutumunun hesaplanan tek boyutlu alev paralel olduğunu göstermişlerdir [53].

Cellek (2022) yaptığı çalışmada 8,6 kW yanma test ünitesinde hidrojen, amonyak, propan ve metan yakıtlarının yanma ve NO_x emisyonlarını incelemiştir. Yakıtların yanma ve NO_x emisyonu hidrojen, propan, metan, amonyak oranları %5, %10, %20 ve %50 ile birlikte hava katsayıları 1, 2, 3 ve 4 için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar her yakıt için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, H₂'in yüksek kalorili değeri nedeniyle, en yüksek C₃H₈ minimum alev sıcaklığına sahiptir. Buna ek olarak, amonyak diğerlerine kıyasla minimum alev uzunluğuna sahiptir ve propan en geniş alev formuna sahiptir. Diğer bir sonuç, fazla hava katsayısının her yakıt için dörde yükselmesi ve NO_x emisyon seviyelerinin keskin bir şekilde azalması olarak görülmüştür [54].

Xiao, Medina ve Bowen (2017) yaptıkları çalışmada NO, CO₂ ve CO emisyonları ile çeşitli eşdeğer oranlar ve amonyak oranları ile çalışmışlardır. Basıncın sıcaklık üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve endüstriyel koşullarda istenmeyen emisyonların önemli ölçüde azaldığını göstermişlerdir [55].

Honzawa ve diğerleri (2019) , Large Eddy Simulation (LES) yöntemini kullanarak emisyonlar üzerine çalışmışlardır. LES tarafından tahmin edilen CO emisyonlarının,

adyabatik olmayan radyus tarafından oluşturulan bir manifold yaklaşımıyla, adyabatik radyus tarafından oluşturulan bir manifold yaklaşımıyla yapılan deneylerden çok daha iyi olduğunu göstermişlerdir [56].

Ni, Zhao, Wu ve Guan (2020) yaptıkları çalışmada akustik olarak açık ve çalışılmış NH_3 yakıtlarıyla yanıcı bir model modellemişlerdir. Yanmanın, 100 saniyelik aralıklı salınımlarla akustik rezonans yapısına 10–2 saniyelik bir zaman ölçeği ile uyumlu olduğunu ve hidrojenin kütle fraksiyonunun %45'den %15'e düştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca değişen sıcaklıkların NO_x üretimini etkilediği ve titreşim salınımlarının genlikte azaldığı da belirlenmiştir [57].

Hassan, Wu ve Saito (2013) yatay akustik uyarı tüpü ile dikey yanma tüpünden oluşan deneysel bir sistem üzerinde çalışmışlardır. NO_x üretimi, propan gazına amonyak eklenmesiyle ölçülmüştür. Bu çalışmada en iyi sonuçları elde etmek için, alev sonrası hava enjeksiyonu ile birlikte akustik simülasyon bulunmuştur [58].

Ji ve diğerleri (2021) deneysel olarak 61 kPa mutlak basınç ve hidrojen üzerinde çalışan bir içten yanmalı motorda farklı amonyak hacim oranları üzerinde çalışmışlardır. Amonyak ilavesi ile alev birikme süresi ve alev yayılma süresi uzatılırken NO_x emisyonları üzerinde çok az etkisi olduğu görülmüştür [59].

Yang, Dinesh, Luo ve Thevenin (2022) model bir motorda 0,9, 1,0 ve 1,1 gibi farklı eşdeğer oran değerlerini ve hacme göre %10 ve %15 hidrojen kapasitesine sahip amonyak-hidrojen yakıt karışımlarının türbülanslı önceden karıştırılmış alev konfigürasyonunu araştırmışlardır. Amonyaka hidrojen ekleyerek, alevin reaktivitesi artmış ve yanma süreci iyileştirilmiştir. Yanma oranı için en yüksek değeri gösteren amonyak ilavesinin %10 hidrojen olduğu görülmüştür [60].

Xin ve diğerleri (2022), yaptıkları deneysel çalışma ile mutlak basıncı 61 kPa, motor devri 1300 rpm ve amonyak ve saf hidrojen yakıtının %2,2 hacim fraksiyonu arasındaki farkı analiz etmişlerdir. Amonyak ilavesi, ateşleme gecikmesi ve alev iyileştirme sürelerinin yanı sıra silindirdeki basınç artış oranının azalmasına neden olmuştur. Sonuç olarak amonyak yanma önleyici olarak kullanılabilirdiği böylece hidrojen yakıtlı motorların gelişimi için yeni bir referans olabileceği gösterilmiştir [61].

Goldman ve Dinkelacker (2022) yaptıkları deneysel çalışma ile atmosferik basınçta ve kısmen yüksek sıcaklıkta önceden karıştırılmış brülördeki vortekslerde çeşitli $H_2/NH_3/N_2/O_2$ /hava karışımları için alev geri tepmesi araştırmışlardır. Rebound eğiliminin azot içeriği arttıkça azaldığını ve artan amonyak içeriği ile arttığını bulmuşlardır. Mevcut makalede, gaz türbini model brülörü, yanma performansını ve yanma odasının NO_x emisyon seviyesi için hidrojen ile girişini araştırmak için önceden karıştırılmamış amonyak ve hidrojen destekli amonyak yakıtlarının tüketildiği bir yanıcı olarak seçilmiştir [62].

Tian ve diğerleri (2018) yaptıkları çalışmada halka yuvasını, gaz türbinlerindeki ikincil hava sayesinde kaplamanın istenen sıcaklık aralığında olmasını sağlamak için bir yöntem olarak kullanmışlardır. Gaz türbinleri, film soğutma teknolojisini yaygın ve etkili bir soğutma yöntemi olarak kullanır. Yanma odasına giren ikincil hava açları, yanma odasındaki yakıt-hava karışımını da etkilediğinden bu durumun daha homojen yanma, istikrarlı sıcaklık dağılımı ve NO_x üretimini etkilediği gösterilmiştir [63].

Andreini ve diğerleri (2017) bir yanma odasını deneysel ve sayısal olarak ve karşılaştırmalı olarak incelemiş ve basitleştirilmiş yuvalarda dönen akışı ve soğutma akışını analiz etmiştir. Sonuç olarak, oluklu soğutma akış hızı arttıkça ısı aktarım katsayısı azalmıştır [64].

Zhang, Yuan, Ji, Wei ve He (2017) yanma odasındaki soğutmaya etkileyen T tipi bir yapı üzerinde çalışmışlar ve hava kanalı yarığının azaltılmasıyla genel soğutma verimliliğinin arttığı sonucuna varmışlardır [65].

Vanga ve diğerleri (2019) çeşitli üfleme hızlarını, çıkış soğutmalı tarafın sıcak yan yüzeyiyle karşılaştırmışlardır. Ayrıca, ısı transfer katsayısının 3,3 ile 7,5 arasında arttığını göstermişlerdir [66].

Ren ve diğerleri (2017) aralıklı bir soğutma plakasına yeni ısı aktarım değerleri göstererek kanal akış davranışının besleme soğutucusundaki bir azalmadan kaynaklandığını bulmuşlardır [67].

Andreini, Facchini, Picchi, Tarchi ve Turrini (2013) deneysel olarak çok delikli düzlemsel plakanın soğutma verimliliğini incelemiş ve yoğunluk oranının yüksek bir değişime neden olduğunu bulmuşlardır [68].

Ali, Kriaa, Mhiri ve Bournot (2012), gerçek bir yanıcı modellemesi yapmışlardır. Ayrıca çıkış suyu soğutmasında soğutma performansı için k-e türbülans modeli ile sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir [69].

Mendiara ve Glarborg (2009) laminar akış reaktöründe deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. $\text{CH}_4 / \text{NH}_3$ 'ün oksijen-yakıt yanmasında 973 K ile 1773 K arasında bir sıcaklık aralığında amonyak oksidasyonu için kimyasal kinetik bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada 0,13 ile 0,55 arasında eşdeğerlik oranı kullanılmıştır. NO oluşumunun çoğunlukla birincil kaynağın $\text{NH}_2 + \text{O}$ 'dan olduğu tespit edilmiştir [70].

Mathieu ve Petersen (2015), amonyağın yüksek sıcaklık (1560-2455 K) ve yüksek basınç (yaklaşık 1.4, 11 ve 30 atm) koşulları altında oksidasyonunu incelemişlerdir. Deneyler için amonyak oksidasyonu ayrıntılı bir mekanizma modeli oluşturulmuştur. Ayrıca, çok çeşitli koşullar için kullanılabilen son teknoloji NO_x alt mekanizmasını da sağlamışlardır. Kurulan kimyasal mekanizma, birçok endüstriyel uygulama için daha uygun olan yüksek koşullar altında amonyak oksidasyonunun ateşleme gecikme sürelerini tahmin etmede tatmin edici doğruluk kanıtlamıştır [71].

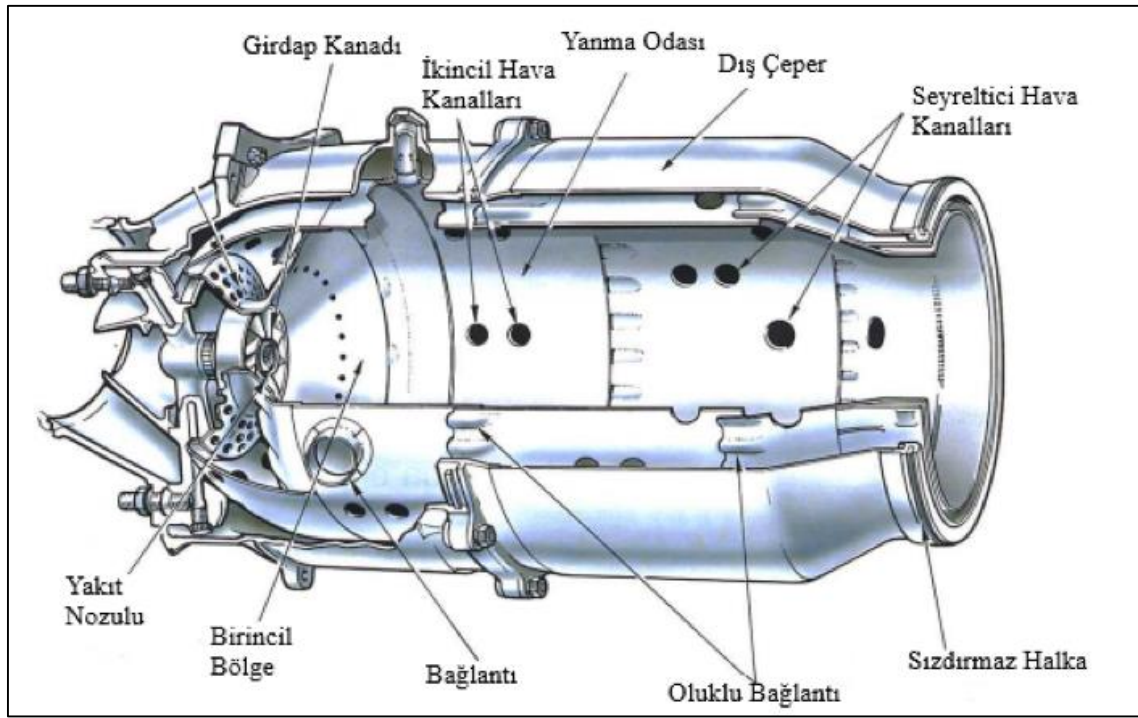
Meyer, Kumar, Li, Redfern ve Diaz (2011) tarafından amonyağın diğer moleküllerle kararlı yanması, Iowa State Üniversitesi'nde analiz edilmiştir. 40 kW brülörde, nozullar, türbülans stabilizatörleri ve kendi kendine devam eden bir ısı eşanjörü kullanılmıştır. Kararlılık, farklı amonyak, hidrojen ve metan konsantrasyonlarına sahip farklı girdap kullanılarak elde edildi. Amonyak ve hidrojenin karıştırıldığı deneylerde bir alev tutucunun kullanımının yanma verimliliğini arttırdığı ve NO_x emisyonlarında gözle görülür bir azalma olduğu bulunmuştur [72].

Somarathne ve diğerleri (2017), 0,5 MPa'ya kadar yüksek basınçlar altında bir gaz türbini girdap yanıcı içinde türbülanslı önceden karıştırılmış amonyak / hava alevlerinin emisyon özellikleri sayısal olarak incelemişlerdir. İkincil hava enjeksiyonu ile daha düşük azot oksit ve sıfır amonyak emisyonu elde etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir [16].

2. GAZ TÜRBİNLİ MOTORLAR

2.1. Genel Bilgiler

Gaz türbin yanma odası Şekil 2.1’de şematik olarak görülmektedir. Kompresör tarafından geniş hacimli havanın yanma odasına girmesi, yakıt püskürtme kanalları aracılığıyla yakıtın gerekli debi ile sistem içine sağlanması, yanma odasında hava yakıt karışımı ile gerekli ısının sağlanması, burada yüksek sıcaklıktan dolayı havanın genleşmesi ve basınç farklılığından oluşan itkinin hızlandırılacak şekilde zor bir tasarıma sahiptir. Bu tasarım, minimum basınç kaybı ve sınırlandırılmış alan için en yüksek ısı transferi ile yapılabilir.



Şekil 2.1. Gaz türbin yanma odası [73]

Gaz türbinlerinde hava miktarı ve yanma oluşabilmesi için karışabilecek yakıt miktarı, ihtiyaç duyulacak sıcaklık aralığına bağlı olmalıdır. Maksimum sıcaklık ortalamasının 850 ile 1700 derece aralığında malzeme dayanımı için sınırlı kalması gerekmektedir. Hesaplamalara göre hava, sıcaklığı 200 ile 550 derece arasında ısıtılmış olarak yanma odasına girmektedir. Türbinde gerekli olan gaz sıcaklığı motor itme gücüne göre değiştiğinden ve turbo pervaneli motor için gereken güç söz konusu olduğunda, yanma odası aynı zamanda çok çeşitli motor çalışma koşullarında istikrarlı ve verimli yanmayı sürdürebilmelidir.

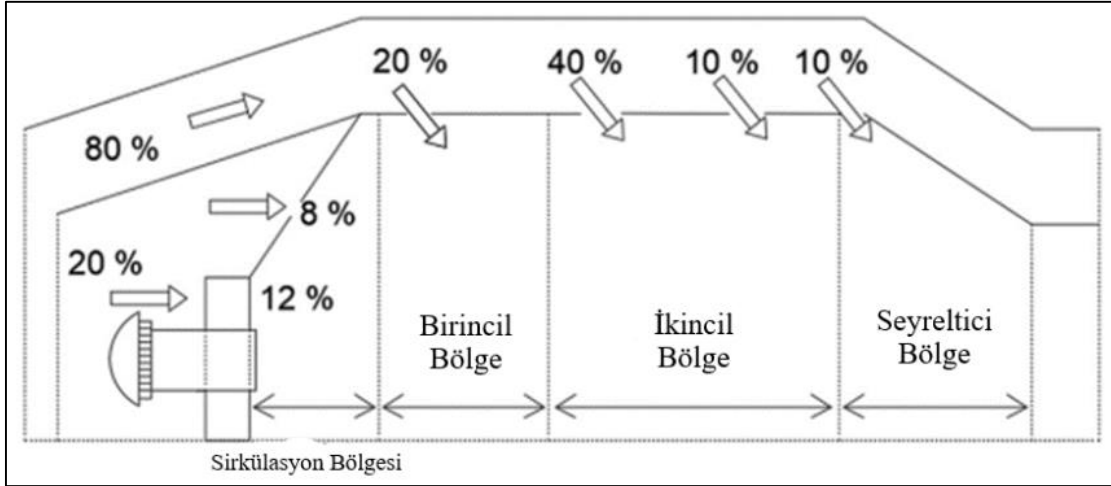
Verimli yanma ve emisyon azaltılması, hava araçları sayılarının hızla artması ve bunun sonucunda halk tarafından egzoz dumanı olarak tabir edilen atmosferik kirlilikteki artış nedeniyle giderek daha önemli hale gelmiştir.

2.2. Yanma Süreci

Gaz türbini kompresöründen alınan hava, yanma odasına ortalama 152 m/s'lik bir hızla girer, ancak hava hızı yanmanın oluşması için çok yüksek olduğundan dolayı hızı yavaşlatmak ve statik basıncını yükseltmek gerekir. Normalde kerosen yanma hızı saniyede ortalama 1-2 metre olduğu için yaklaşık 24 m/s hıza sahip olan dağınık hava akışında kerosen yakıtını yakmak zor olacaktır. Bu nedenle, odanın içinde düşük eksenel hıza sahip bir alana ihtiyaç vardır, böylece alevin gaz türbini çalışma aralığı boyunca yanmaya devam etmesi gerekmektedir.

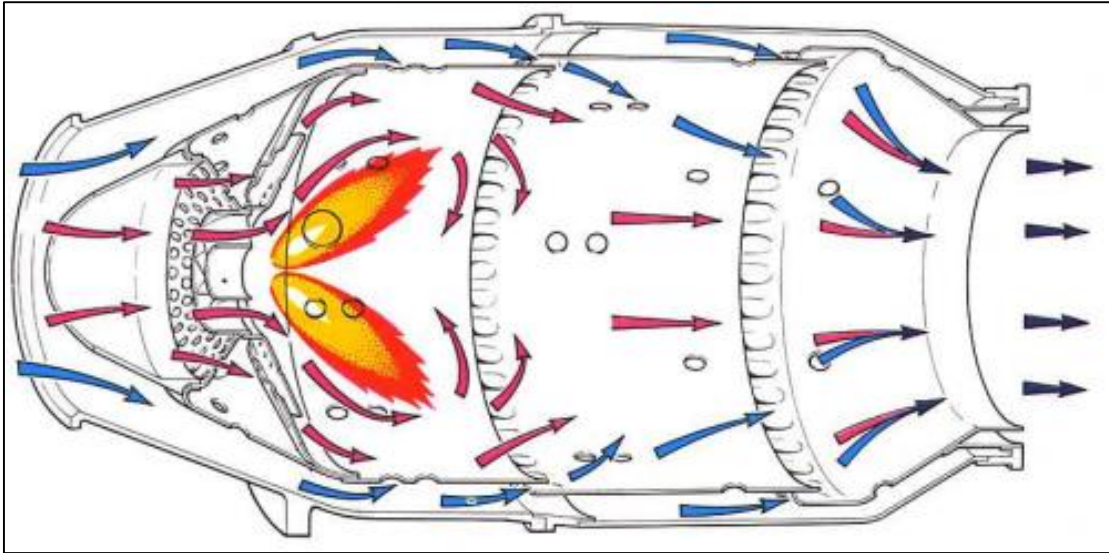
Normal şartlar altında yanma odasının genel hava-yakıt oranı, 1 birim yakıt için 45-130 arasında değişebilir. Bu nedenle yakıt, birincil yanma bölgesinde odaya giren havanın bir kısmı ile yakılmalıdır. Bu, hava akışı dağılımını ölçmek için bir alev tüpü cihazı ile elde edilmektedir.

Hava kütle akışının yaklaşık %20'si giriş bölümü tarafından alınır. Yanma odasındaki hava akış yüzdeleri Şekil 2.2'de gösterilmektedir. Giriş bölümünün hemen aşağısında türbülans kanatları ve havanın birincil yanma bölgesine geçtiği delikli bir bölge bulunmaktadır. Dönen hava, yanma odasının merkezinin yukarı akışına neden olur ve istenen döngü işlemini destekler. Burun tarafından alınmayan hava yani %80'lik kalan hava, yanma odasının dış kısmı ile hava muhafazası arasındaki dairesel boşluğa akar.



Şekil 2.2. Yanma odası hava akış yüzdeleri

Yanma odasının duvarı ile hava muhafazasının arasındaki %80'lik havanın geçtiği bölgeye annulus (halka) hava akışı denilmektedir. Türbülans kanatçıklarından ve ikincil hava deliklerinden gelen hava etkileşime girer ve düşük hızlı devridaim bölgesi oluşturur. Bu, alevi stabilize etme ve engelleme etkisine sahip bir duman halkasına benzer ve Şekil 2.3'de görüldüğü gibi bir girdap şeklini alır. Devridaim eden gazlar, yeni enjekte edilen yakıt damlacıklarının hızla ateşleme sıcaklığına getirilmesiyle yanmasını hızlandırır.



Şekil 2.3. Alev dengeleyici ve genel hava akışı [73]

Nozuldan gelen konik yakıt spreyi, merkezindeki çevrim vorteksiyle kesişecek şekilde düzenlenmiştir. Bu eylem, birincil bölgedeki türbülans ile birlikte, yanma odasına giren yakıtın püskürtülmesine ve içeri alınan hava ile karıştırılmasına yardımcı olur.

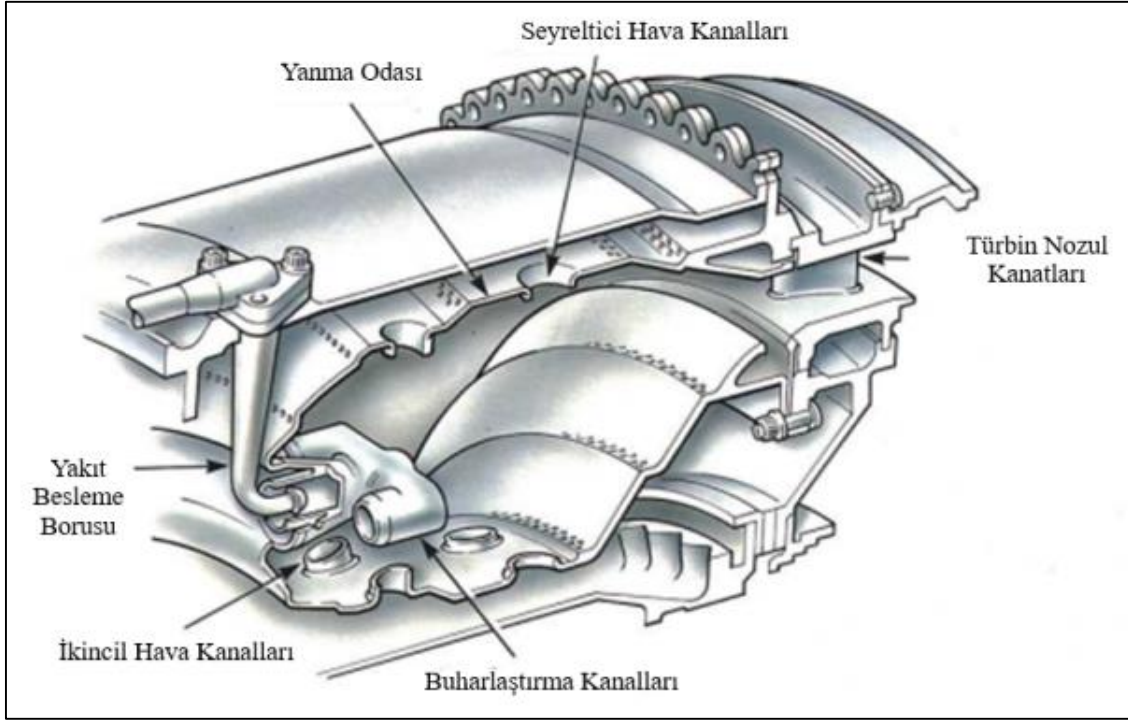
Yanma odasında alev oluşumu ile salınan gazların sıcaklığı yaklaşık 1.800-2.000 derecedir. Yanma için kullanılmayan hava, toplam hava akışının yaklaşık %60'ına eşittir, bu nedenle yanma odasına kademeli olarak sokulur. Bunun yaklaşık üçte biri, yanma odasına girmeden seyreltme bölgesindeki gazın sıcaklığını düşürmek amacıyla kullanılır ve geri kalanı yanma odası duvarlarını soğutmak için kullanılır. Bu, yanma odası duvarının iç yüzeyi boyunca akan ve sıcak yanma gazlarından yalıtılan bir soğutma havası filmi ile elde edilir. Son zamanlarda, soğutma havasının, yalıtımlı bir hava filmi oluşturmak amacıyla önce yanma odası duvarındaki kanala girilmesine izin verir. Gaz türbini yanma odasında, soğutma havası alev bölgesine girmeden tamamlanması gerekir, aksi halde içeri giren hava alevi soğutması nedeniyle eksik yanma meydana gelir.

Ateşleyici bujiden gelen bir elektrik kıvılcımı yanmayı başlatır ve alev daha sonra kendi kendine sürdürülür. Bir yanma odasının tasarımı ve yakıt ilave tarzı büyük oranda farklılaşabilir, ama yanmanın homojen şekilde devam edebilmesi için ihtiva edilen hava dağılımı her zaman Şekil 2.2'de ki dağılıma çok benzer olmak zorundadır.

2.3. Yakıt Besleme

Yakıt, hava akışına iki farklı yöntemden biriyle sağlanır. En yaygın olanı, püskürtme nozulları aracılığıyla devridaim hava akışına ince atomize bir sprey enjeksiyonudur. İkinci yöntem, yakıtın yanma bölgesine girmeden önce buharlaştırılmasına dayanır.

Şekil 2.4'de gösterildiği gibi buharlaştırma yönteminde yakıt, besleme tüplerinden yanma odasının içine yerleştirilmiş buharlaştırma tüplerine püskürtülür. Bu tüpler yakıtı 180 derece çevirir ve yanma ile ısıtıldıkça yakıt alev besleme borusuna yaklaştığında buharlaşır. Birincil hava akışı, yakıtla beraber buharlaştırma kanallarından ve ayrıca yanmayı zıt yöne doğru süpürmek amacıyla hava 'fanları' yanma odasına girdiği bölümden geçer.



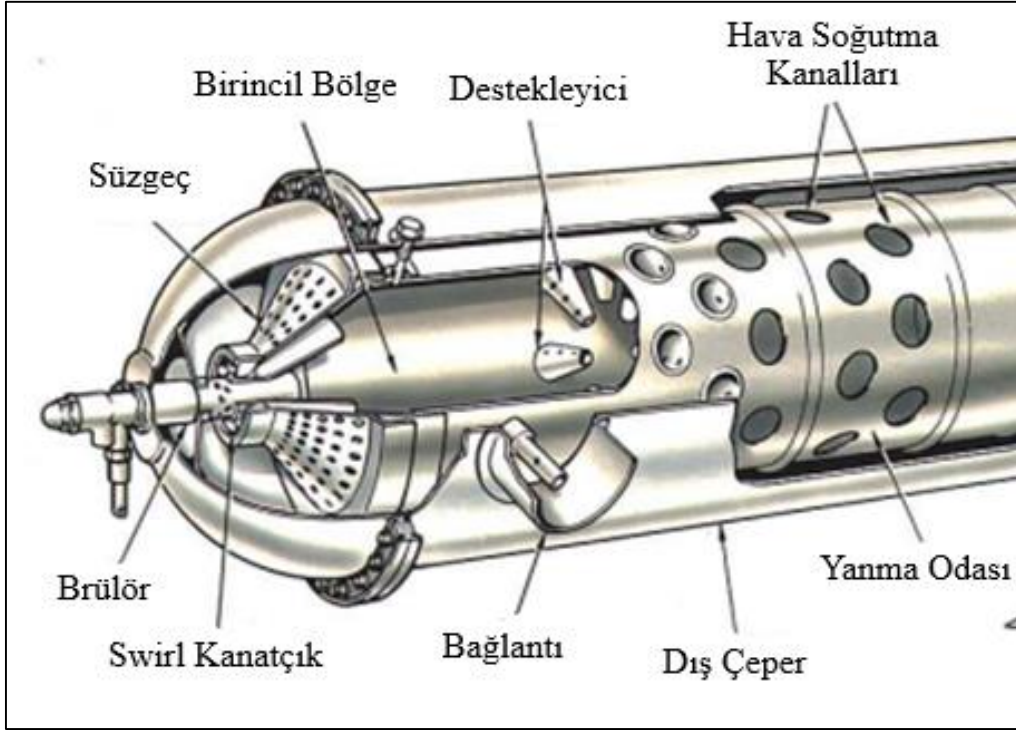
Şekil 2.4. Yakıt buharlaştırılması [73]

2.4. Gaz Türbini Yanma Odası Türleri

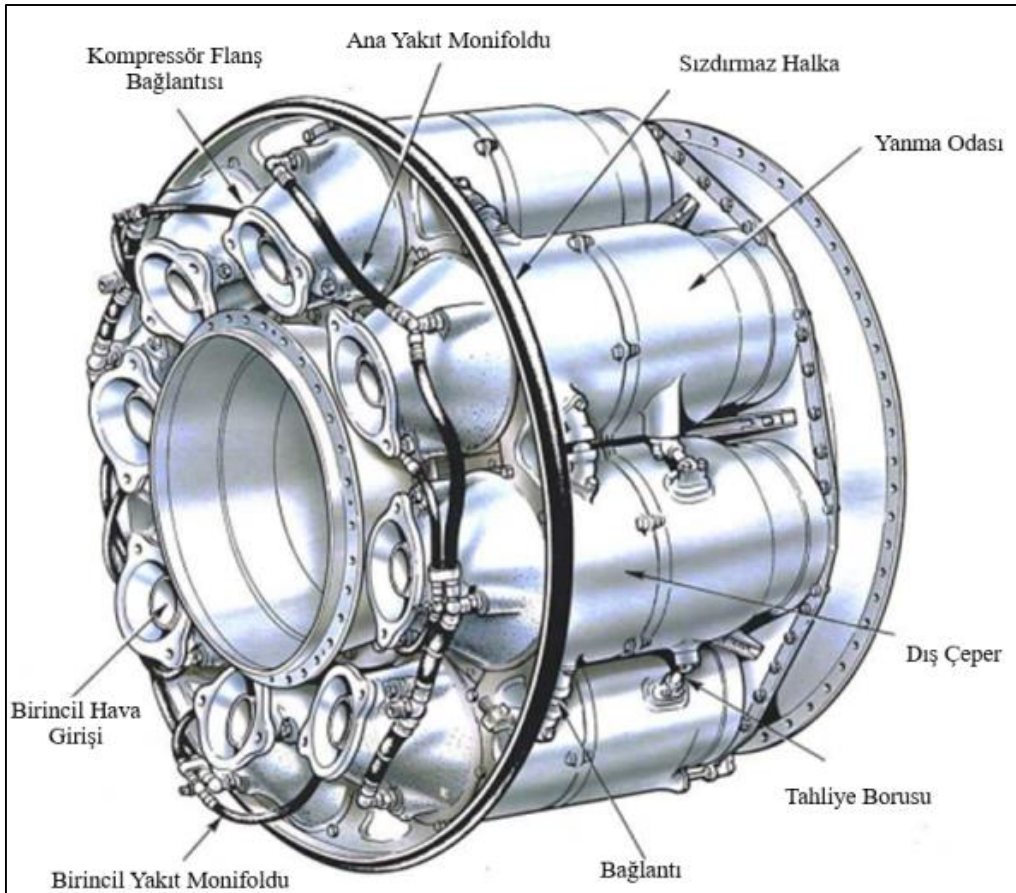
Gaz türbini motorları için 3 ana yanma odası türü vardır. Bunlar; Boru Tip Yanma Odası, Boru-Halka Tip Yanma Odası ve Halka Tip Yanma Odası'dır.

2.4.1. Boru tip (can-tubular) yanma odası

Bu tür yanma odası, santrifüj kompresör motorlarında ve daha önceki aksenal akışlı kompresör motorlarında kullanılır. En büyük fark, yanma odasının Şekil 2.5'de gösterildiği gibi ters bir akışa sahip olmasıdır. Boru tipi yanma odaları Şekil 2.6'da görüldüğü gibi motorun etrafından atılmaktadır. Kompresör dağıtım havası, ayrı odalara geçmek için kanallar vasıtasıyla yönelimi gerçekleştirilir. Odaların çevresinde bir hava muhafazası olan yanma odası vardır. Hava, yanma odası girişinden boru ile dış çeper arasından geçer. Alev tüplerinin hepsi birbirine bağlıdır. Bu, her bir tüpün aynı basınçta çalışmasına olanak tanır ve aynı zamanda motor çalıştırılırken yanmanın alev borularının etrafına yayılmasına izin verir.



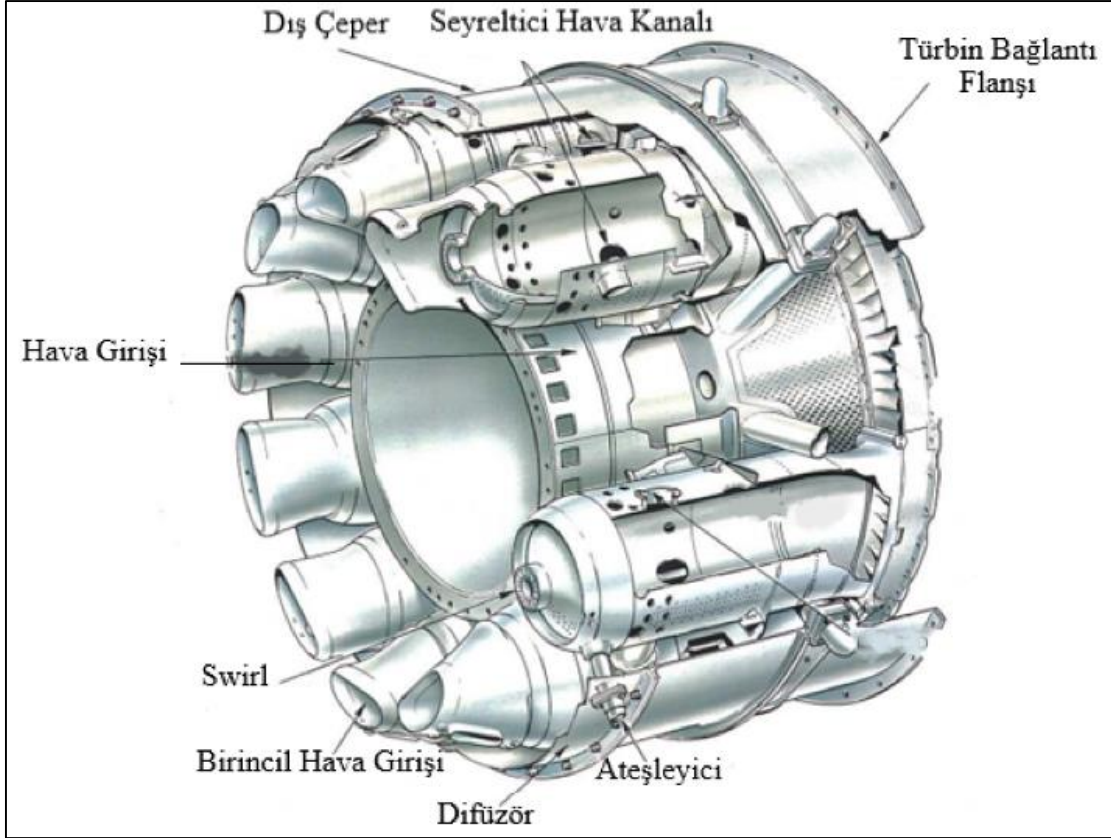
Şekil 2.5. Tekil yanma odası [73]



Şekil 2.6. Montajlı çoklu yanma odası [73]

2.4.2. Boru-halka tip (can-annular) yanma odası

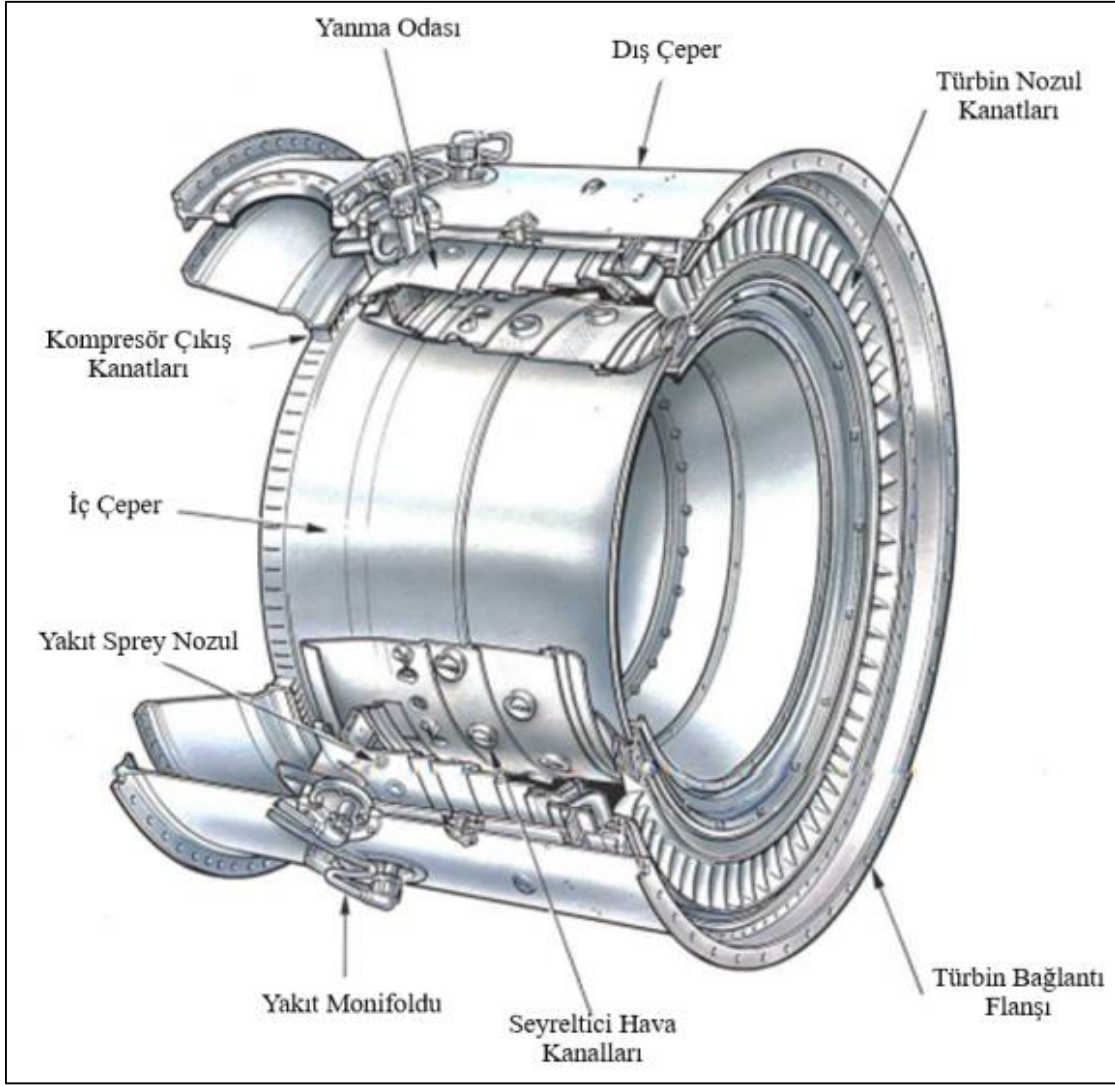
Boru-Halka türü yanma odası, Boru ve halka tipler arasındaki evrimsel boşluğu kapatır. Ortak hava muhafazasının içine bir dizi yanma odası Şekil 2.7’de ki gibi takılmıştır. Hava akımı boru tipi yanma odasına benzerdir. Bu düzenleme, boru tipi sistemin revizyon ve test kolaylığını, dairesel sistemin kompaktlığı ile birleştirir.



Şekil 2.7. Boru-Halka tip yanma odası [73]

2.4.3. Halka tip (annular) yanma odası

Halka tipi yanma odası, bir iç ve bir dış muhafazası olan, tamamen dairesel formda Şekil 2.8’de görüldüğü gibi tek bir yanma odasından oluşur. Alev borusundan geçen hava akışı önde kompresöre ve arkada türbin nozullarına açıktır.



Şekil 2.8. Halka tipi yanma odası [73]

Halka tipi odanın önemli bir avantajı, aynı güç üretimi için yanma odasının uzunluğunun benzer çaptaki dairesel sistemin sadece %75'i olması ile birlikte bunun da ağırlık ve üretim maliyetinden önemli ölçüde tasarruf sağlamasıdır. Bir diğer avantaj ise odadan odaya yanma yayılma problemlerinin ortadan kaldırılmasıdır.

Bir boru-halka yanma sistemi ile karşılaştırıldığında, dairesel yanma odasının duvar alanından oldukça az olmasıdır. Yanma odası duvarının aşırı sıcak olmasını önlemek için gerekli soğutma havası miktarı ortalama %15 oranında daha az olmalıdır. Soğutma havasındaki bu azalma, yanmamış yakıtı neredeyse tamamen ortadan kaldırmak için yanma verimliliğini artırır ve karbon monoksiti toksik olmayan karbondioksit oksitler, böylece hava kirliliğini azaltır.

2.5. Yanma Odası Performansı

Tasarlanan bir yanma odası yakıtın fazla bir basınç kaybına neden olmaksızın, çok çeşitli çalışma koşullarında verimli bir durumda yanmasına izin verebilmelidir. Ek olarak, alev sönmesi meydana gelirse, yeniden alevlenebilir olması mümkün olmalıdır. Bu işlevleri yerine getirirken, alev ve püskürtme nozulu atomizer bileşenleri mekanik olarak güvenilir olmalıdır.

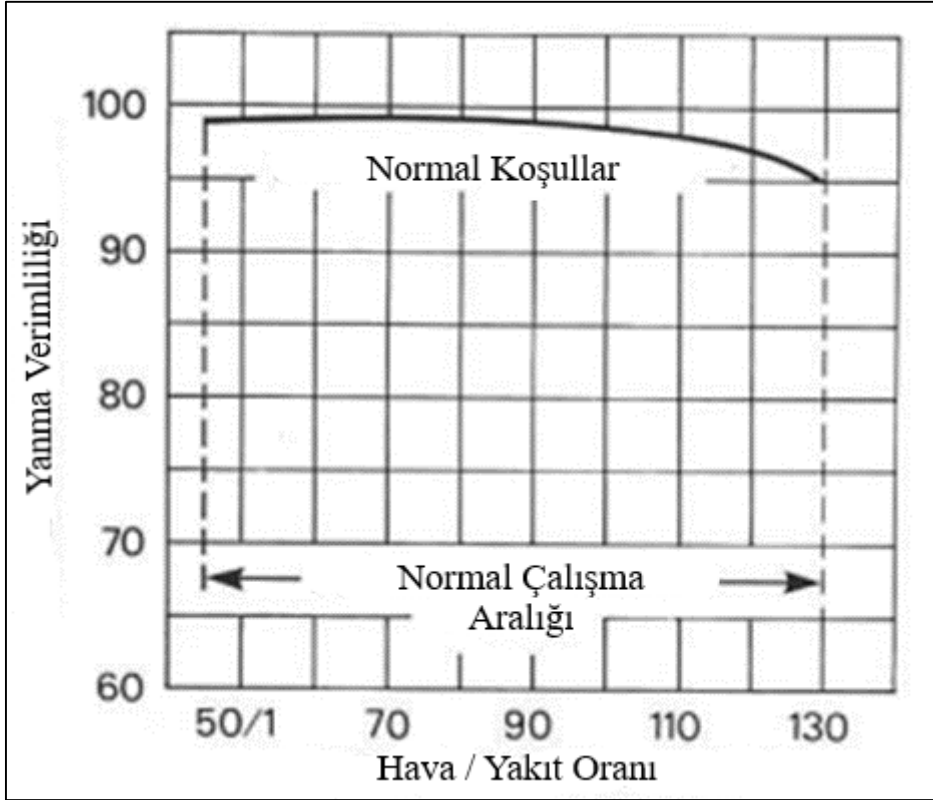
Gaz türbini motorunun sabit bir basınç döngüsünde çalışması gerekmektedir, bu nedenle yanma sırasında basınç kaybı minimum düzeyde olmalıdır. Yeterli swirl döngüsü ve karıştırma oluşturulurken, odaya giren hava basıncı ortalama %3 ile %8 arasında değişen toplam basınç kaybı meydana gelir.

2.6. Yanma Yoğunluğu

Bir gaz türbini yanma odası tarafından oluşan ısı, yanma odasının hacmine bağlıdır. Böylece, gerekli yüksek güç elde edebilmek amacıyla, ufak ve kompakt bir yanma odası, oluşan ısıyı yüksek oranlarda serbest bırakmalıdır.

2.7. Yanma Verimliliği

Deniz seviyesindeki kalkış koşullarında çoğu gaz türbini motorunun yanma verimliliği yaklaşık %100'dür ve Şekil 2.9'da gösterildiği gibi irtifa seyir koşullarında %98'e düşer.

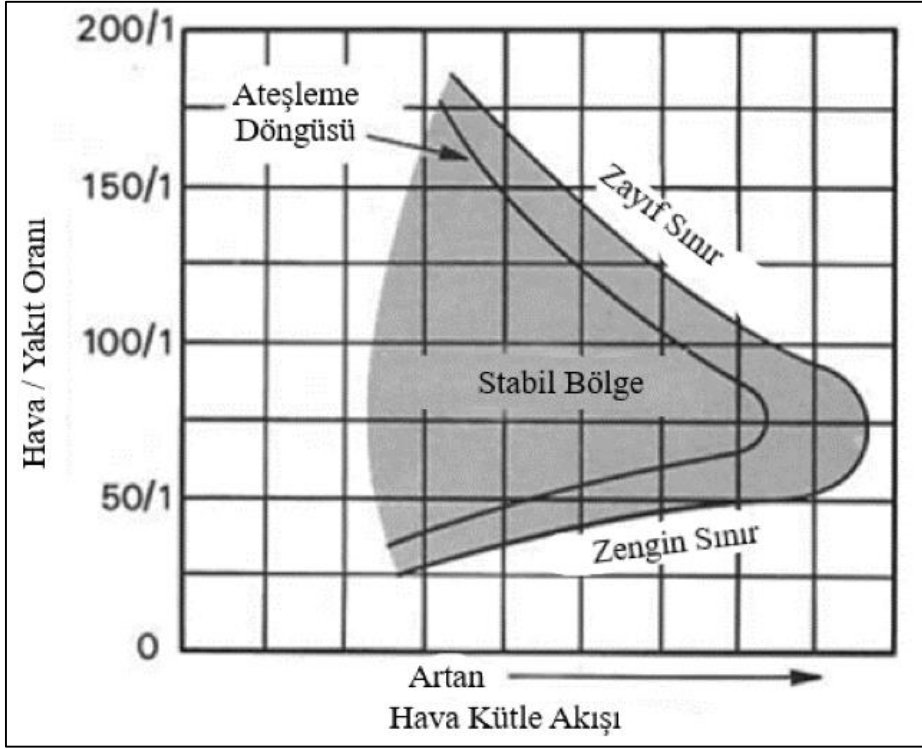


Şekil 2.9. Yanma verimliliği ve hava/yakıt oranı grafiği [73]

2.8. Yanma Stabilizesi

Yanma kararlılığı, homojen yanma ve alevin geniş çalışma skalasında olma kabiliyeti anlamına gelir. Herhangi bir yanma odası türü için, hava-yakıt oranı zengin ve fakir bir sınır olmalıdır aksi halde alev söner. Motor rölantideyken bir kayma veya dalış sırasında, yüksek basınçlı bir hava tedariki ve sadece düşük debide bir yakıt akışı, yani çok fakir bir yanma karışımı olduğunda, alevin sönmeye muhtemel bir durumdur.

Zengin ve fakir yanma sınırları arasındaki hava-yakıt oranı aralığında tedarik edilen hava hızının artmasıyla azaltılır ve hava kütle akışı belirli bir değerden yüksek olursa alev sönmeye meydana gelir. Tipik bir stabilite döngüsü Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Stabilite döngüsü tarafından tanımlanan çalışma aralığı, hava/yakıt oranlarını ve yanma odasının kütle akışını açıkça karşılamalıdır.



Şekil 2.10. Yanma stabil sınırları [73]

Ateşleme süreci, Şekil 2.10'da stabilite için gösterilenlere benzer fakir ve zengin sınırlara sahiptir. Bununla birlikte, ateşleme döngüsü stabilite döngüsü içinde yer alır, çünkü 'soğuk' koşullar altında yanma sağlamak normal yanmayı sürdürmekten daha zordur.

2.9. Yanma Sonucu Emisyonları

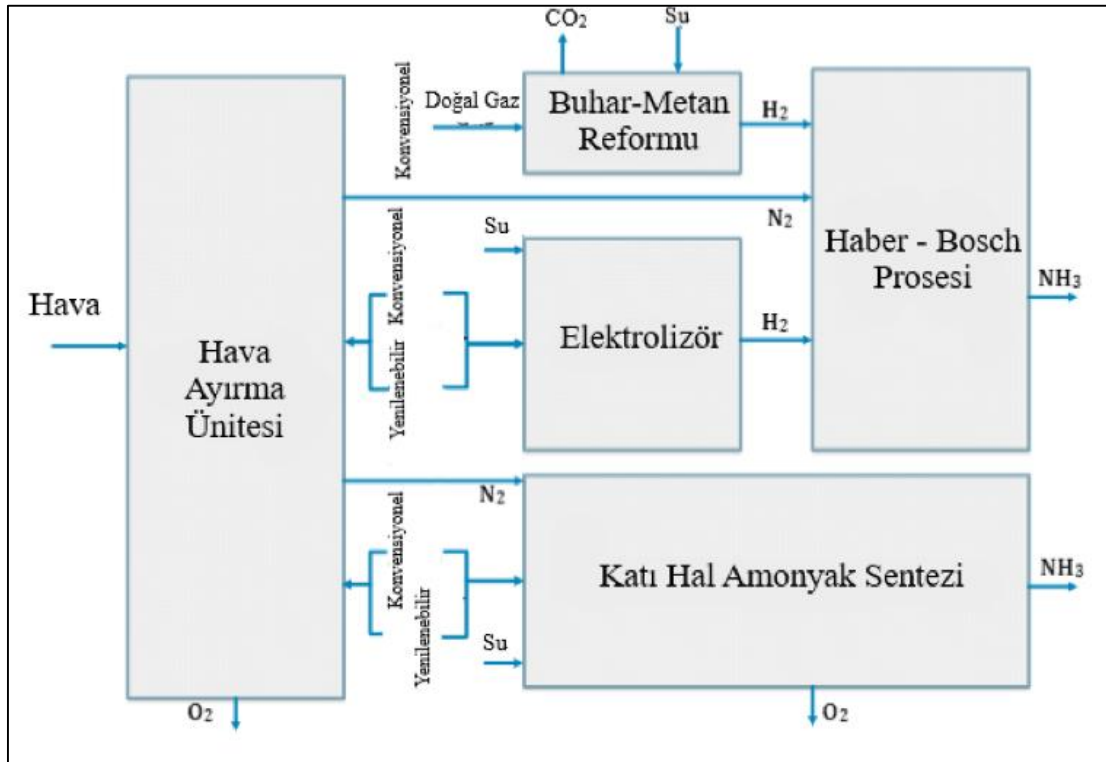
Yanma sonucu gerçekleşen egzoz gazlarında istenmeyen kirleticiler yanma odasında oluşur. Dünya genelinde kontrol edilen dört ana kirletici vardır; karbon parçacıkları (duman), karbon monoksit, yanmamış yakıt (yanmamış hidrokarbonlar) ve azot oksitler. Kirleticilerin oluşumunu etkileyen başlıca koşullar ise basınç, sıcaklık ve zaman faktörleridir.

Birincil bölgenin yakıt bakımından zengin bölgelerinde, HC, CO ve dumana dönüştürülür, taze soğutma havası, CO ve dumana seyreltme bölgesi içinde toksik olmayan karbondioksiti oksitlemek için kullanılabilir. Yanmamış HC'lar da stokiyometrik yanmayı sağlamak amacıyla yanma durumuna devam ederek bu bölgede minimuma indirgenebilir.

3. AMONYAK GAZI ELDE EDİLMESİ

3.1. Üretim Yöntemleri

NH_3 ; tarımsal gübre, gıda üretimi, endüstriyel malzemeler, soğutucular ve katkı maddeleri olarak kullanılan ikinci en büyük küresel kimyasal üründür. Son zamanlarda, enerji taşıyıcısı (ikincil enerji kaynağı) olarak amonyak kullanımı, yüksek hacimsel hidrojen yoğunluğu, düşük depolama basıncı, uzun süreli depolama için yüksek kararlılık, yüksek otomatik tutuşma sıcaklığı, düşük yoğunlaşma basıncı ve havadan daha düşük gaz yoğunluğu nedeniyle birçok alanda ilgi çekmiştir. Genel olarak, amonyak üretimi şu anda kabul edilen termokimyasal (Haber-Bosch), elektrokimyasal ve fotokimyasal döngü süreçlerinden oluşmaktadır. Hidrojene benzer şekilde, amonyak biyokütle, kömür, doğal gaz, güneş, rüzgâr, jeotermal, hidro ve nükleer kaynaklar gibi farklı birincil enerji kaynaklarından da üretilir. Amonyak farklı dönüşüm teknolojileri olan termokimyasal, elektrokimyasal, fotokimyasal ve plazma gibi teknolojilerle de üretilir.

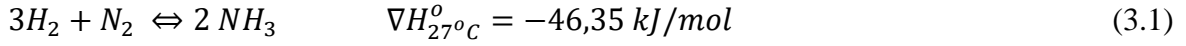


Şekil 3.1. Geleneksel ve yenilenebilir kaynaklar yoluyla ana amonyak üretim yolları [74]

Amonyak sentezi için birçok yöntem olmasına rağmen, dünyada yaygın olarak iki farklı amonyak üretim yöntemi mevcuttur. Bunlar Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Haber-Bosch süreci ve katı hal amonyak sentezi süreci olarak isimlendirilir.

3.2. Konvansiyonel Amonyak Üretimi

Şu anda benimsenen amonyak üretim sürecinde temel olarak Fritz Haber ve Carl Bosch tarafından yaklaşık 100 yıl önce icat edilen sistemi kullanılmaktadır [75]. Bu nedenle, bu sistem Haber-Bosch teknolojisi olarak bilinir. Dünya çapındaki toplam amonyak üretiminin yaklaşık %85'i bu işlemle gerçekleştirilmektedir [76]. Amonyak sentezi aşağıdaki reaksiyonla gerçekleşir:

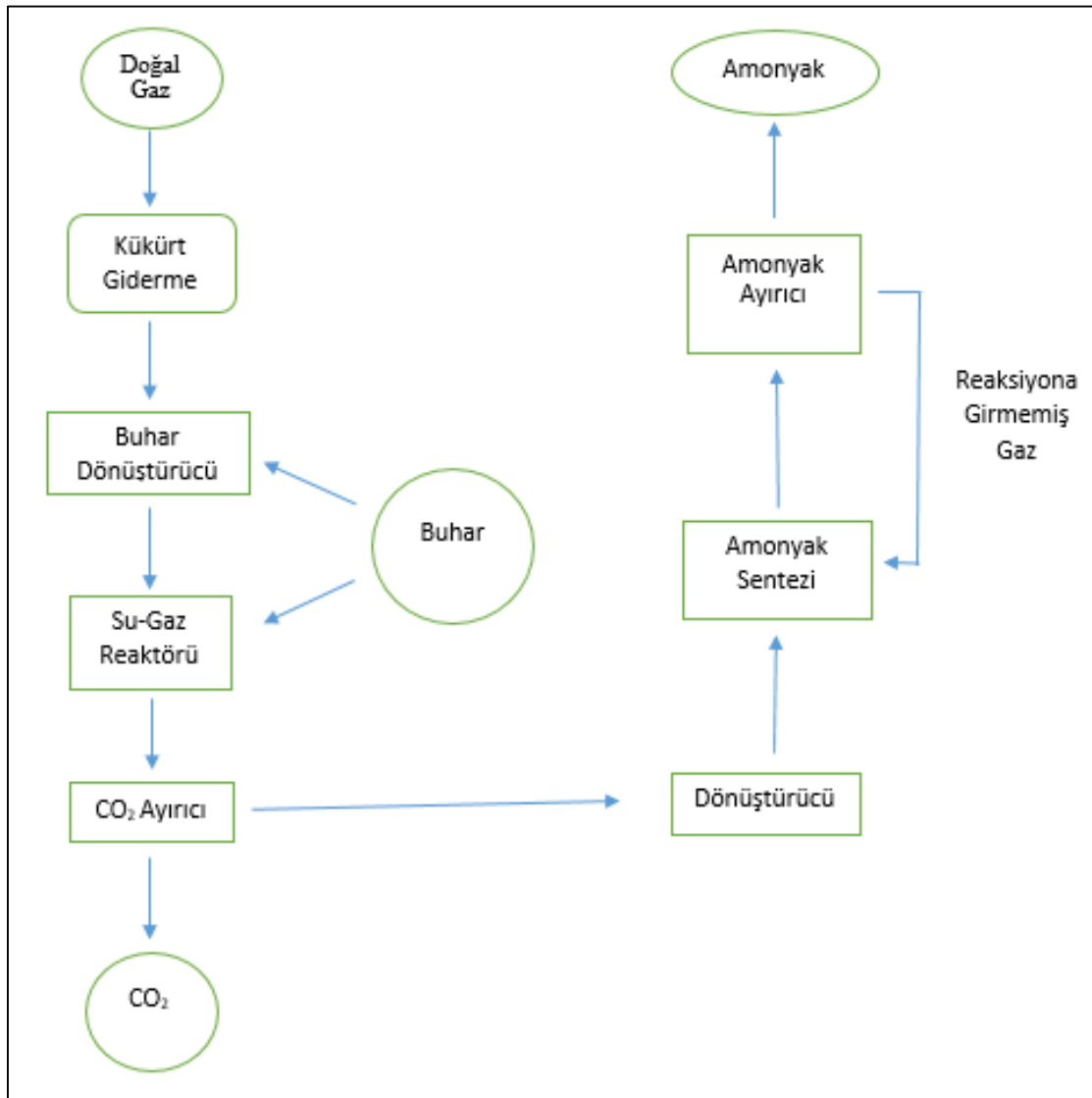


Amonyak sentezi ekzotermik bir reaksiyondur ve düşük sıcaklıklarda kendiliğinden oluşur. Oda sıcaklığında tercih edilmesine rağmen, reaksiyonun oda sıcaklığında meydana geldiği reaksiyon hızı endüstriyel ölçekte uygulanamayacak kadar yavaştır. Hedeflenen dönüşüm oranına ulaşmak ve reaksiyonun kinetiğini artırmak için yüksek basınç ve sıcaklık gereklidir. Ana bileşenlerinden (hidrojen ve azot) etkili bir şekilde amonyak sentezlemek için, reaksiyon demir bazlı bir katalizör yardımıyla sırasıyla 400–500°C sıcaklık ve 10–30 MPa'lık basınçta gerçekleştirilmelidir. Bu durum, üçlü bağlı azotun yüksek ayrışma enerjisi (941 kJ/mol) nedeniyle gerekmektedir. Bununla birlikte, reaksiyonu bu yüksek sıcaklık ve basınç altına getirmek için, yaklaşık 30 MJ / kg NH₃ enerji gereklidir [77].

Doğal gazdan amonyak üretimi, metanın (doğal gaz) buhar ve hava ile reaksiyona girerek, daha sonra su ve CO₂'nin giderilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlemin ürünleri, amonyak sentezi için hammadde olan hidrojen ve nitrojendir. İşlem sırasında, kükürt ve diğer safsızlıkların giderilmesi önemlidir, çünkü sentez sırasında katalizörün performansını azaltabilir ve zarar verebilirler. Amonyak sentezi sürecinde, hem azot hem de hidrojen, katalizörün içine daldırıldığı sentez reaktörüne beslenmek için nispeten yüksek basınca sıkıştırılır. Üretilen amonyak, reaksiyona girmemiş hidrojen, argon ve diğer safsızlıklarla birlikte, amonyağı diğer gazlardan ayırmak için amonyak yoğuşması için soğutulur. Reaksiyona girmeyen hidrojen ve azot daha sonra geri dönüştürülür ve yeni hammadde ile birlikte karıştırılır. Argon gibi yabancı maddelerin birikmesini önlemek için, gazların küçük

bir kısmı işlemden temizlenir. Amonyak sentezi sırasında, reaktörden az miktarda ısı salınır; bu nedenle, buhar ve enerji üretimi gibi diğer işlemler için geri kazanılabilir ve kullanılabilir. Genel olarak, hidrojenin kalorifik değerinin yaklaşık %88'i korunabilir [78].

Hidrojen su elektrolizi yoluyla üretildiğinde, nitrojen hava ayırma yoluyla sağlanabilir. Azot üretimi için hava ayırmaları membran, kriyojenik, absorpsiyon ve adsorpsiyon teknolojileri ile gerçekleştirilebilir. Büyük ölçekler için, kriyojenik ayırma diğer yöntemlerden daha ekonomik olarak kabul edilir. Ek olarak, kriyojenik hava ayırma yüksek saflıkta ürünler üretebilir [79].



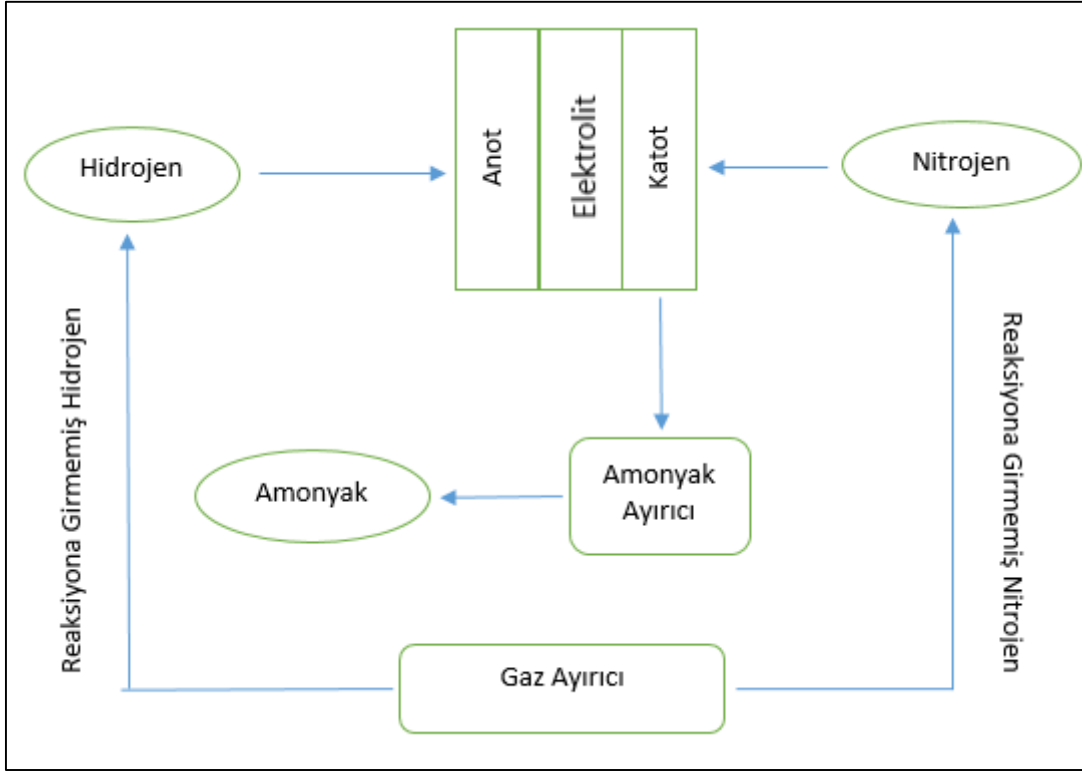
Şekil 3.2. Haber-Bosch süreci ile doğal gazdan amonyak üretiminin şematik diyagramı [76]

Amonyak üretimi sırasında tüketilen enerji, birincil kaynaklardan dönüşüm de dahil olmak üzere, tipik olarak yaklaşık 28 ile 37 GJ/t arasında değişmektedir [76]. Doğal gaz gibi herhangi bir birincil kaynaktan bir amonyak üretim sistemi, birçok kombine işlemi içerdiği için karmaşık olarak kabul edilir. Şekil 3.2, doğal gazdan geleneksel amonyak üretiminin şematik diyagramını göstermektedir. Sistem buhar reformasyonu, su-gaz kayma reaksiyonu, CO₂ giderme, sentez saflaştırması ve amonyak sentezi ve ayrımı gibi farklı süreçlerden oluşur. Bu nedenle, toplam enerji tüketimini azaltma çabaları, ilgili tüm sürecin iyileştirilmesini gerektirir.

Haber-Bosch sürecine odaklanarak, aşırı koşullarını azaltmak için birçok aşamadan geçilir. RU bazlı katalizörler, demir bazlı katalizörler için gerekli koşullardan önemli ölçüde daha düşük olan hafif koşullar altında (300–450°C sıcaklıkta ve 4–15 MPa basınçta) amonyak sentezini temel olarak kolaylaştırabilir. Kawamura ve Taniguchi [20] amonyak sentezi için bir katalizör olarak sodyum eritmesini test etmişlerdir. Bu tip katalizör kullanılarak, sentez 500–590°C'lik reaksiyon sıcaklıklarında ve atmosferik basınçta gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, bu yöntemi uygulanabilir seviyeye getirmek için daha fazla analiz ve deney yapılması gerekmektedir.

3.3. Elektrokimyasal Amonyak Üretimi

Elektrokimyasal üretim Haber-Bosch prosesine kıyasla önemli ölçüde az gelişmiş olsa da, daha yüksek enerji performansı gerçekleştirilmesi beklenmektedir. Bu süreçte tüketilen enerji Haber-Bosch sürecinden yaklaşık %20 daha düşüktür [80]. Şekil 3.3, elektrokimyasal amonyak sentezinin şematik akış diyagramını göstermektedir. Süreç basit kabul edilir; bu nedenle, uygulama potansiyel olarak sistem yapılandırmasını azaltmak ve karmaşıklığı kontrol etmek için kabul edilir. Buna ek olarak, yatırım maliyeti şu anda kabul edilen amonyak sentezi sistemlerine kıyasla daha düşük olabilir.



Şekil 3.3. Elektrokimyasal amonyak sentezinin şematik diyagramı [80]

Proton ileten hücrelerdeki hem katot hem de anottaki reaksiyonlar sırasıyla reaksiyonlarda Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 gösterilmiştir. Her katot ve anottaki reaksiyonlar temelde geri dönüşümlüdür.

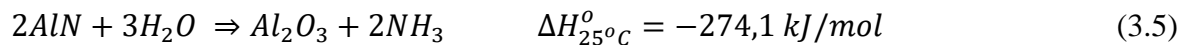
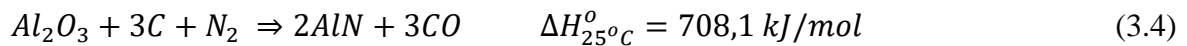


Şu anda dört farklı elektrolit türü mevcuttur: (a) sıvı elektrolitler, (b) erimiş tuz, (c) kompozit membranlar ve (d) katı hal elektrolitler. Sıvı elektrolitler atmosferik sıcaklık ve basınç altında çalışabilir. Tetrahidrofuranda $LiClO_4$ (0.2 M), iyonik sıvıda $LiClO_4$, H_2SO_4 'te $LiClO_4$ ve H_2SO_4 'te Li_2SO_4 dahil olmak üzere bazı potansiyel sıvı elektrolitler vardır. 3.68×10^{-10} mol/cm²·s amonyak üretimi elde edilebilirken, sistem verimliliği yaklaşık %58'e ulaşabilir, bu da sisteme sağlanan akımın yaklaşık %58'inin amonyak haline dönüştürüldüğünü gösterir. Bununla birlikte, bu konuyla ilgili araştırmalar hala az sayıda ve sınırlı çalışma sürelerinde laboratuvar deneyleri ile sınırlıdır [81].

Erimiş tuz tipi elektrolit genellikle 300–500°C sıcaklık aralığında çalıştırılır. Çözünmüş Li₃N ile LiCl, KCl ve CsCl gibi elektrolit olarak kullanılmak üzere bazı potansiyel kimyasallar bulunmaktadır. Bildirilen amonyak üretim oranı $3,3 \times 10^{-9}$ mol/cm²·s ve verimlilik yaklaşık %72'dir. Ayrıca, kompozit elektrolitli sistem, düşük erime tuzuyla birleştirilen ve 300–700°C çalışma sıcaklığına sahip katı elektrolitler de içerir. Elektrolitler, ana iyonik iletim fazını ve elektriksel, mekanik ve termal özellikleri iyileştirmek için ana faza bağlı ek bir fazı içerir. Kompozit elektrolitlerin temsilcisi olarak, alkali metal karbonat (LiCO₃ gibi) ve oksit (LiAlO₂ gibi) ve Sm₂O₃ ile katkılı CeO₂, oksijen iyonu, karbonat iyonu ve proton iletkenliği de dahil olmak üzere beklenen özellikleri gösterirler. Ayrıca, bir çalışmada [82] karışık Na, K ve Li karbonatları, LiO₂'ye ek olarak elektrolit olarak test ettiler. Çalışmada yaklaşık 2.32°C'lik bir sıcaklıkta 400×10^{-10} mol / cm²'lik bir amonyak üretim oranı elde ettiler. Katı elektrolitli sistem genellikle oda sıcaklığından yaklaşık 800°C'ye kadar çok geniş çalışma sıcaklıklarında çalışır. Bu tür elektrolit içine dahil edilebilecek farklı malzemeler vardır. Bunlar arasında perovskitler (cerat ve zirkonat gibi), floritler (katkılı zirkonya, serya ve torya gibi), piroklorlar (kalsiyum katkılı lantan zirkonat gibi) ve diğer malzemeler (brownmillerit, eulytite ve monazit dahil) yer almaktadır. Bu tip elektrolitin zorlukları, yapısal kararlılıkları ve yüksek bir yoğunluğa ulaşmak için gerekli olan yüksek sinterleme sıcaklığını (1700°C'ye kadar) içerir. Bu tür katı hal elektroliti kullanılarak, $3,1 \times 10^{-9}$ mol / cm²'lik amonyak üretim oranı, yaklaşık %75'lik bir verimle 570°C'lik bir sıcaklık altında elde edilebilir [82].

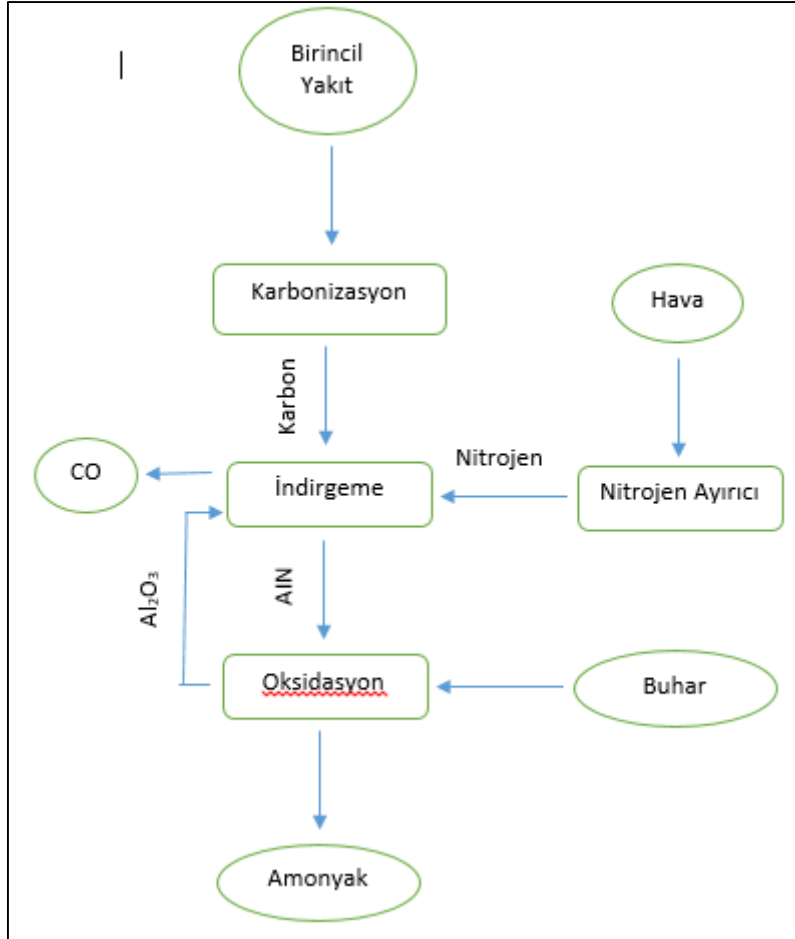
3.4. Termokimyasal Döngü ile Amonyak Üretimi

Amonyak üretimi için alternatif bir süreç olarak, termokimyasal döngüyü kullanan bir süreç geliştirilmiştir [83]. Sistem iki aşamadan oluşur: Azaltma (azot aktivasyonu) ve buhar-hidroliz (amonyak oluşumu). Her iki reaksiyon da şu şekilde özetlenmiştir:



Şekil 3.4, amonyak üretiminin termokimyasal döngüsünün şematik diyagramını göstermektedir. Birincil enerji kaynakları, termokimyasal döngü işlemine beslenmeden önce önceden işlenir ve karbona dönüştürülür. İlk indirgeme işleminde yani Eş.3.4'de görüldüğü

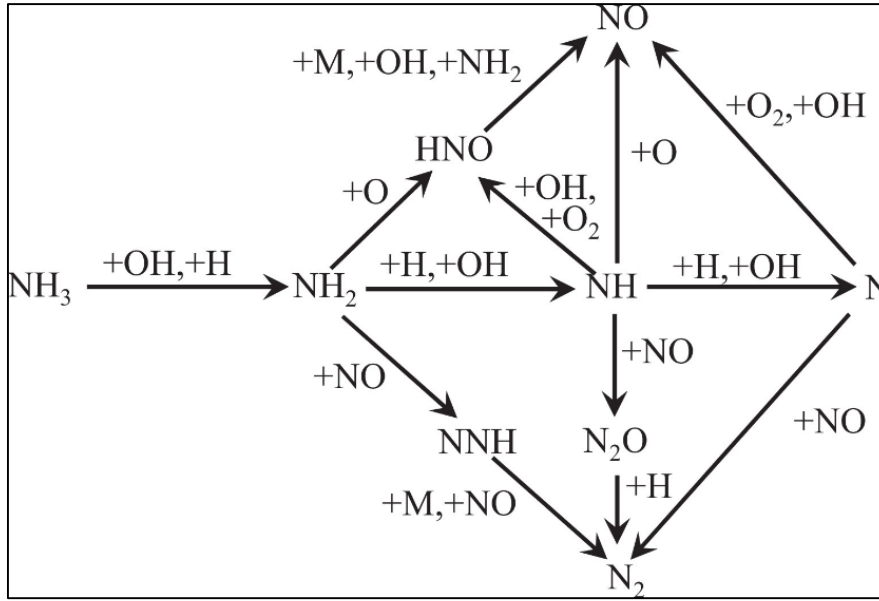
gibi, AlN, Al₂O₃ ve azotun karbotermal indirgemesiyle üretilir. Bu reaksiyon endotermiktir ve yaklaşık 1500°C'lik bir reaksiyon sıcaklığı altında gerçekleşir. Ayrıca, buhar-hidrolyz yani Eş. 3.5'de olan ikinci reaksiyonda, ilk indirgeme işleminde üretilen AlN, Al₂O₃ üreten buhar (H₂O) ile reaksiyona girer. Bu ikinci reaksiyondan üretilen Al₂O₃ daha sonra ilk indirgeme işlemine sirküle edilir. Reaksiyon kinetiği detaylı olarak incelenmiştir.



Şekil 3.4. Amonyak üretiminin termokimyasal döngüsünün şematik diyagramı [83]

Haber-Bosch prosesinden farklı olarak, bu termokimyasal döngü atmosferik basınçta ve katalizör olmadan gerçekleştirilebilir. Süreç, azot aktivasyonu ve amonyak oluşumu için bağımsız reaksiyon kontrolüne izin verir. Ayrıca sistem saf hidrojen yerine karbonize malzemeden doğrudan amonyak üretebilir. Bu nedenle, bu sistemin amonyak üretimi sırasında enerji tüketimini azaltması beklenmektedir. Bununla birlikte, bu sistem çok yüksek çalışma sıcaklığıyla ilgili en büyük zorluğa sahiptir ve bu da sınırlı ısı kaynaklarına ve malzemelere yol açar. Konsantre güneş ısısının kullanımı da dahil olmak üzere ısı temini için çeşitli fikirler önerilmiştir.

Juangsa ve Aziz [84], nitrojen üretimi, termokimyasal çevrimi kullanan amonyak üretimi ve güç üretiminden oluşan entegre bir sistem geliştirmişlerdir. Sistemlerinde, azaltma için gereken ısı, temel olarak amonyak üretimi sırasında üretilen yakıt gazlarının yanmasıyla üretilen ısı ile kaplanmıştır. Sistem, yaklaşık %69 oranında yüksek bir toplam teorik enerji verimliliği elde edebilirken ayrıca, oksidasyon sıcaklığının sistemin performansında önemli bir rol oynadığını da gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Amonyak yanması için reaksiyon yolları [85].

Çizelge 3.1. Amonyak ve hidrokarbon yakıtların termal özellikleri ve temel yanma özellikleri [75]

Yakıt	NH ₃	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
1 atm'deki Kaynama Sıcaklığı (°C)	-33,4	-253	-161	-42,1
25°C'deki Yoğuşma Basıncı (atm)	9,90	---	---	9,40
Alt Isıl Değer, AID (MJ/Kg)	18,6	120	50	46,4
Alevlenebilirlik Limiti (Eşdeğerlik Oranı)	0,63~1,40	0,10~7,1	0,50~1,7	0,51~2,5
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°C)	1800	2110	1950	2000
Maksimum Yanma Hızı (m/s)	0,07	2,91	0,37	0,43
Tutuşma Sıcaklığı (°C)	650	520	630	450

4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI (HAD) MODELLEME

4.1. Giriş

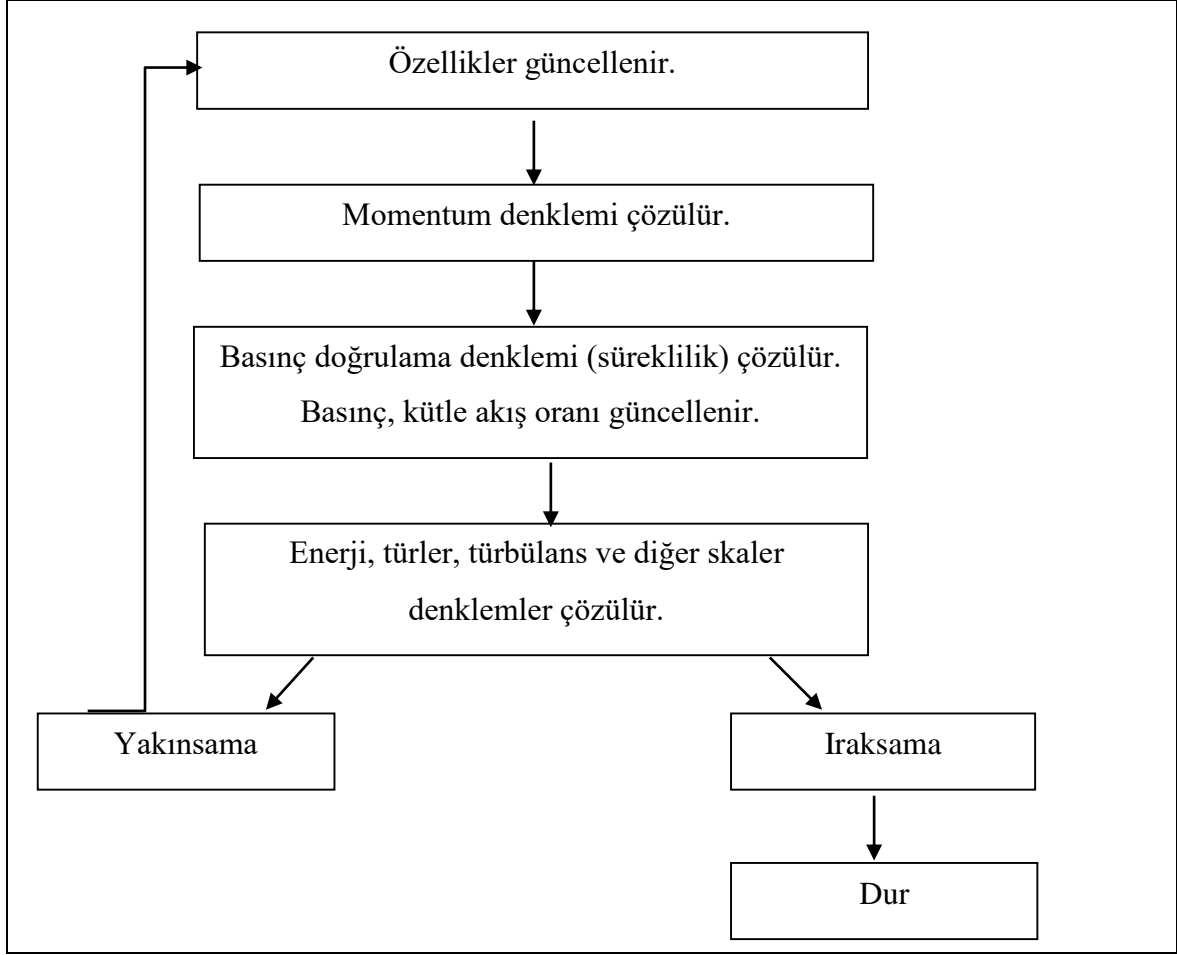
Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile analiz yapmanın en temel sebebi, herhangi bir geometri ve mühendislik hesabı yapılarak ortaya konan bir ürün veya analiz yapılmadan bir program sayesinde bilgisayar simülasyonu ile alınan verileri kullanarak ürün geliştirme, inovasyon hazırlığı, verim artırma ya da ürüne yönelik problemlerin imalat aşaması veya deney safhasına gelmeden minimum zaman aralığında ve minimum maliyetle çözülebilmesidir. Ek olarak, HAD ile yapılan çalışmalar farklı fikirler geliştirilebilmesi açısından araştırma-geliştirme safhalarında çok değerli katkılar sağladığından dolayı tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar esnasında karmaşık geometri içerisindeki değişiklikler daha kolay ve daha hızlı şekilde yapılabilmektedir. Bu avantajlar sayesinde yapılan bu çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği bilgisayar simülasyonu kullanılarak, çok pahalı ve zaman gerektiren deneysel araçları kullanmadan, amonyak, kerosen, metan ve hidrojen yakıtlarını kullanarak yanma odasına ait performans ve emisyon değerlerinin karşılaştırılması ile değerlendirilmesi için zaman ve maliyet kazancı sağlanması amaçlanmıştır. Bu bölümde sayısal simülasyonda kullanılan temel korunum denklemleri, türbülanslı akışın ve yanmanın modellenmesi, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde model üretimi ve çözüm metodu ile ilgili bilgiler sunulmuştur.

4.2. HAD Çözüm Algoritması

Ansys Fluent programı sayısal çözümlerinde segregated veya coupled çözücü metodlarından birini kullanmaktadır. Ansys Fluent programı kütle, momentum, enerji, kimyasal tür ve türbülans gibi korunum denklemlerini kontrol hacim metodu kullanarak çözmektedir. Başlangıçta hesaplanacak alan genel bir hesaplama ağı kullanılarak segregated kontrol hacimlerine bölünmektedir. Ardından korunum denklemleri ile segregated bilinmeyenler olan hız, basınç ve diğer büyükler vb. için cebir denklemleri oluşturularak ayrı ayrı bölünmüş kontrol hacimleri üzerinde bütünleştirilir. Nihai olarak, ayrıklaştırılmış denklemler çözülür.

Ayrılmış ve birleşik yaklaşımlar süreklilik, momentum, enerji ve tür denklemlerinin çözülmesi sırasında farklılık gösterirler. Çözüm döngüsünde birden fazla iterasyon yapılarak

yakınsama beklenmektedir. Ayrılmış çözüm metodunun basamakları Şekil 4.1’de belirtildiği şekilde olmalıdır.



Şekil 4.1. Ayrılmış çözüm metodunun basamakları [94]

4.3. Temel Denklemler

HAD, bir döngüden diğer bir döngüye geçiş esnasında akış dinamiği ile temel denklemlerini kullanır. Simülasyonda kullanılan matematiksel model; süreklilik, momentum, enerji ve skaler değişkenler için taşınım denklemlerinin sayısal çözümüne dayanmaktadır. Yanma odası içerisinde yakıtın yanma olayını karakterize eden kısmi diferansiyel denklemler aşağıda sunulmuştur.

Reaksiyon kinetiği temel yanma süreçlerinin ana temelini oluşturmaktadır. Çünkü reaksiyon kinetiği yanmada kimyasal türlerin reaksiyona girme yönelimini belirler. Birçok yanma durumunda, kimyasal reaksiyon oranlarının yanma sürecini, emisyon oluşumunu, ayrışmayı

vb. belirleyebilir. Genel olarak, K kimyasal türlerini içeren temel geri dönüşümlü veya geri dönüşümsüz reaksiyonlar şeklinde yazılabilir.

$$\sum_{k=1}^K v'_{ki} \chi_k \Leftrightarrow \sum_{k=1}^K v''_{ki} \chi_k \quad (i = 1, \dots, I) \quad (4.1)$$

Stokiyometrik katsayı olan v_{ki} bir tamsayıdır. χ_k herhangi bir K değerinin bir kimyasal sembolüdür. (‘) simgesi ileri yönlü (‘‘) simgesi ise geri yönlü stokiyometrik katsayıları göstermektedir. Genelde, temel bir reaksiyon sadece üç veya dört tür içerir.

k_{th} türlerinin net üretim oranı $\dot{\omega}_k$ ile gösterilir, k_{th} türlerini içeren tüm reaksiyonlar için ilerleme hızı değişkenlerinin bir toplamı olarak temsil edilebilir:

$$\dot{\omega}_k = \sum_{i=1}^I v_{ki} q_i \quad (k = 1, \dots, K) \quad , \quad v_{ki} = v''_{ki} - v'_{ki} \quad (4.2)$$

i_{th} reaksiyonu için q_i ilerleme hızı değişkeni, ileri ve geri hızların farkıyla aşağıdaki denklemlerle tanımlanabilir:

$$q_i = k_{f_i} \prod_{k=1}^K [X_k]^{v'_{ki}} - k_{r_i} \prod_{k=1}^K [X_k]^{v''_{ki}} \quad (4.3)$$

X_k , k_{th} türlerinin molar konsantrasyonu olduğunda k_{f_i} ileri oran sabiti ve k_{r_i} reaksiyonunun ters oran sabitidir.

Eş. 4.3'de belirtildiği gibi, bir reaksiyonun ilerleme hızı, varsayılan olarak, stokiyometrik katsayısının gücüne yükseltelen her reaktant veya ürün türünün konsantrasyonu kullanılarak değerlendirilir. Örneğin, 2 katsayısı olan A türünü içeren bir reaksiyonun ilerleme hızı, A'nın konsantrasyonuna göre ikinci derecedir. Eş. 4.3, kütle-hareket kinetiğine uyulduğunda ve mekanizma temel reaksiyonlar açısından yazıldığında her zaman geçerlidir.

Reaksiyonlar için oran sabitlerinin genellikle Arrhenius formuna sahip olduğu varsayılır:

$$k_{f_i} = A_i \exp\left(\frac{-E_i}{R_c T}\right) \quad (4.4)$$

A_i exponansiyel faktördür, T sıcaklığı ifade eder, E_i reaksiyon aktivasyon enerjisidir, R_c evrensel gaz sabitidir. Bu formülde, tür konsantrasyonları dışındaki çarpışma sıklığını

etkileyen faktörler, exponansiyel faktör olarak dikkate alınır. Bununla birlikte, daha yaygın olarak, hız sabitinin modifiye edilmiş bir Arrhenius formu, exponansiyel terimin sıcaklık bağımlılığını dikkate almak için kullanılır:

$$k_{f_i} = A_i T^{\beta_i} \exp\left(\frac{-E_i}{R_c T}\right) \quad (4.5)$$

β_i , i_{th} reaksiyonunun sıcaklık üssüdür. Genel olarak, reaksiyonun özellikleri olarak, A_i , β_i ve E_i değerleri deneysel olarak belirlenir. Bu denklem aynı zamanda sıcaklık arttıkça reaksiyon hızının arttığını gösterir.

Çoğu yanma tepkimesi için, ters hız sabiti k_{r_i} , denge sabitleri boyunca ileri hız sabitlerinden aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$k_{r_i} = \frac{k_{f_i}}{K_{c_i}} \quad (4.6)$$

K_{c_i} , i_{th} reaksiyonunun denge sabitidir. Bununla birlikte, elektronları veya bazı yavaş reaksiyonları içeren bazı reaksiyonlar için, bu denklemin kullanımı genellikle geçerli değildir, daha sonra ters oranların sabit olarak belirlenmesi için belirtilmelidir.

Temel reaksiyon teorisine dayanarak, yanma gibi karmaşık bir reaksiyon sistemini tanımlamak için, tüm türlerin, temel reaksiyonların ve reaksiyon hızı parametrelerinin bir derlemesi ile yanma sürecinde mevcut olan tüm reaksiyonları tanımlayan bir kimyasal kinetik mekanizması geliştirilebilir. Önceki yanma çalışmalarda [86,87] kanıtlandığı gibi, ayrıntılı kimyasal kinetik mekanizmalar temel reaksiyon teorisine dayanır, yanma gibi karmaşık bir reaksiyon sistemini tanımlamak için kimyasal bir kinetik mekanizma geliştirilebilir, bu yanma sürecinde mevcut olan tüm reaksiyonları, tüm türlerin, temel reaksiyonların ve reaksiyon hızı parametrelerinin bir derlemesi ile açıklanır. Aynı çalışmalarda gösterildiği gibi, ayrıntılı kimyasal kinetik mekanizmalar, reaktanların moleküler düzeyde ürünlere dönüşümünü çok sayıda temel adımla tanımlamak için karakteristik olarak kullanılmaktadır. Her türün oluşum ve yok olma oranlarını tanımlayan diferansiyel denklemler kümeleri daha sonra sayısal olarak bütünleştirilir ve reaktanların, ara maddelerin ve ürünlerin hesaplanan konsantrasyonları deneylerle karşılaştırılır. Ayrıca, reaksiyonları, hız parametrelerini ve türlerin termodinamik ve taşıma özelliklerini açıklayan

kinetik modelleme, farklı geometriler, sıcaklık ve basınç koşulları gibi farklı ortamlarda gerçekleştirilebilecek özellikleri sağlar.

4.3.1. Kütle korunum denklemi

Üç boyutlu aksi-simetrik modellemeler için kullanılacak kütle korunum denklemi Eş. 4.7 numaralı eşitlikte gösterilmektedir. Eşitlik, bir zamana bağlı olarak sıkıştırılabilir bir akışta, belirli bir noktada üç boyutlu kütlenin korunumu veya sürekliliğini ifade eder. İlk ifade, yoğunluğun zaman içinde nasıl değiştiğini gösterir. Ancak bu çalışmanın temelinde, zamanla değişmeyen koşullar altında yapılan modellemeler bulunduğu için, bu ilk ifade genellikle sıfıra eşittir. İkinci ifade ise, akışkanın belirli bir noktadan geçen net kütle akışını temsil eder ve aynı zamanda konvektif terim olarak adlandırılır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (4.7)$$

Bu denklemde bulunan x: aksel ve r: radyal koordinatları simgelerken, v_x aksel ve v_r radyal hızları simgelemektedir. Ayrıca ρ akışkan yoğunluğunu, S_m ise kaynak terimini göstermektedir [88,89].

4.3.2. Momentum korunum denklemi

Genel olarak üç boyutlu akışlarda bir akışkan x, y ve z yönlerinde momentum korunum denklemi aşağıda gösterildiği gibi verilebilir [90]:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (4.8)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (4.9)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4.10)$$

4.3.3. Enerji korunum denklemi

Enerjinin korunumu ile eşitlik ise, bu program kapsamında statik entalpinin korunumu yönünden çözülmektedir. Basınç ve dış kuvvetlerin neden olduğu türlerin difüzyonunun ihmal edildiği kabul edilecek olursa, enerji denklemi Eş. 4.11’de ki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j^1} h_{j^1} J_{j^1} + u_j (\tau_{i,j})_{eff} \right] + S_h \quad (4.11)$$

Burada, J_j^1 ; j^1 ‘nin akma difüzyonu ve S_h volümetrik ısı kaynaklarını veya kimyasal reaksiyon ısısını ifade etmektedir.

4.3.4. Kimyasal türlerin korunumu

Analizi sadeleştirmek amacıyla, zaman eşitliğinin dışında tutulacak olduğundan her bir tür j ’nin kütle oranı m_j için denklem aşağıda gösterildiği şekliyle tanımlanır [89]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i m_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_{mj} \frac{\partial m_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u' m_j'}) + R_j + S_j \quad (4.12)$$

ş. 4.12’de R_j , üretimin veya tüketimin gaz fazında kütle oranını, S_j , üretim oranını ve Γ_{mj} laminer değişim katsayısını ifade etmektedir [89].

4.4. Sayısal Modeller

HAD sayısal çözümlemesinde analizi yapılan gaz türbinli yanma odası türbülansa sahip olduğundan, akış modeli olarak aksi-simetrik türbülanslı akış modeli tercih edilmiştir. Ek olarak akış, türbülanslı ve yanma reaksiyonları içermesi sebebiyle türbülans modeli olarak RNG k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Yanma reaksiyonlarında, ışınlam ile ısı transferinin sıcaklık dağılımına etkisi fazla olduğundan, ve optik kalınlık yanma odası çapı ile yanma odası uzunluğu hesabı yapıldığından P1 radyasyon modeli seçilmiştir. Yanma modelinde ise türlerin taşınım modeli ile beraber girdap ayrışma türbülans kimyasal etkileşimi tercih edilmiştir. Ayrıca Amonyak, Hidrojen, Metan ve Kerosen yakıtları yanması bu çalışmada gerçek gaz türbini koşulları göz önüne alınarak aşağıdaki kabuller varsayım sayılmıştır:

- Akış üç boyutlu, eksenel simetrik ve türbülanslıdır.
- Hava akışının basıncı ve sıcaklığı, kompresör tarafından belirli sıkıştırma oranlarında sıkıştırılarak artırıldığı varsayılmıştır.
- Hava yakıt karışımlarının ideal gaz özellikleri gösterdiği kabul edilmiştir.
- Amonyak, Hidrojen, Metan ve Kerosen yakıtlarının ön ısıtma yapılarak sıcaklığın artırıldığı ve bir yakıt pompası tarafından basınçlandırıldığı kabul edilmiştir.
- Bir türbülans elemanı tarafından yakıt ve birincil havanın türbülans oluşturularak swirler sayesinde yanma odasına gönderildiği varsayılmıştır.

4.4.1. Türbülans yanma modeli

Gaz türbini, içten yanmalı motorlar gibi en pratik yanma ekipmanlarında yanma, türbülanslı reaksiyon akışları şeklinde gerçekleşir. Hız ve skalaların değer açısından iyi tanımlanabildiği laminar akışların aksine, türbülanslı akışlar hız dalgalanması ile karakterize edilir ve bu da sıcaklık, yoğunluk, kompozisyon gibi dalgalanmalara neden olur. Dalgalanma genellikle akış içindeki hareketleri tarafından üretilen girdapların bir sonucu olarak kabul edilir. Sonuç olarak, türbülanslı akışta karıştırma büyük ölçüde geliştirilmiştir. Türbülanslı yanarken, türbülans kimyasal reaksiyonu artırabilir veya ısı salınımı ile indüklenen alev cephesinden gelen güçlü akış ivmelerinin bir sonucu olarak alevi söndürebilir.

Türbülanslı alev, enerji üretimi için gaz türbinlerinin yanmasında ana etken olduğundan, türbülanslı yanma için sayısal modelleme teknikleri, bu alanda yeni yanma cihazları geliştiren araştırmacılar veya mühendisler için değerli araçlardır. Bununla birlikte, pratik yanıcılarda türbülanslı yanma işleminin zorluğu, yanmayı yöneten çeşitli süreçler ve bu süreçler arasındaki tüm ölçekler arasındaki bağlanma derecesi tarafından yayılan geniş bir uzunluk ve kimyasal zaman ölçeklerden oluşmaktadır.

Türbülanslı yanma modellemesinde, hem türbülanslı sıvı akışı hem de karışımın bileşimi çözümlenmelidir. Türbülanslı yanma akışı için geçerli denklemler normal olarak, karışımın termodinamik durumunu uzamsal ve geçici olarak çözmek için kullanılabilir türbülansa bağlı olarak tüm süreklilik, momentum, türler ve enerji olarak temsil edilir.

Süreklilik Denklemi

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * \rho u = 0 \quad (4.13)$$

-Momentum Denklemi

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u * \nabla u = -\nabla p + \nabla * \tau + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_k \quad (4.14)$$

-Türler Denklemi

$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \rho u * \nabla Y_k = \nabla * (-\rho V_k Y_k) + \dot{\omega}_k \quad (k = 1, \dots, N) \quad (4.15)$$

-Enerji Denklemi

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho u * \nabla e = -\nabla * q - p \nabla * u + \tau : \nabla u + \rho \sum_{k=1}^N Y_k f_k * V_k \quad (4.16)$$

Yukarıdaki denklemlerde ρ kütle yoğunluğudur, u hız vektörüdür, p basınçtır, τ viskoz gerilim tensörüdür, f_k birim kütle başına k 'nın türü ile ilişkili kuvvettir, V_k k türlerinin hızıdır, $u+V_k$ kütle ağırlıklı hız ve dağılık hız toplamı olarak ifade edilebilir, k türlerinin dağılık hızıdır; q ısı iletimini, radyasyonu ve tür gradyanları ve Soret etkisi yoluyla taşınmayı temsil eden ısı akışıdır.

4.4.2. Türbülanslı aksi-simetrik akış modeli

Aksi-simetrik türbülans akış modeli için açısız momentum Eş. 4.17 numaralı denklemde gösterilmiştir. Eş. 4.17'de aksel ve radial momentum denklemleri aynı yere yazılmıştır.

Bu denklemde

x aksel koordinat, r radyal koordinat, v_x aksel hız, v_r radyal hız, w açısız (swirl) hız, ρ akışkan yoğunluğu, μ akışkan viskozitesini temsil edilmektedir [88,89].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r w) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{w}{r} \right) \right] - \rho \frac{v w}{r} \quad (4.17)$$

4.4.3. RNG k-ε türbülans modeli

RNG k-ε türbülans metodu yeniden normalleştirme grup metodu olarak isimlendirilir. Matematiksel denklemlerin kullanılmasıyla Navier-Stokes denklemlerinden türetilmektedir. Bu modelin diğer bir türbülans modeli olan standart k-ε türbülans modeline göre ilave terimler içerdiği ve düşük Reynolds sayısının etkilerini de göz önüne aldığından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. RNG k-ε türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi (k) ve dağılım oranı (ε) sırasıyla aşağıdaki Eş. 4.18 ile Eş. 4.19 numaralı taşınım denklemleri kullanılarak belirlenir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (4.19)$$

G_k ortalama hız gradyanı ile türbülans kinetik enerji üretimini, G_b kaldırma kuvveti ile türbülans kinetik enerji üretimini, $C_{1\varepsilon}$, ve $C_{2\varepsilon}$ deney sistem sabitleri, σ_k ve σ_ε Prandtl sayılarını ifade etmektedir. Sabitler Çizelge 4.1’de verilmektedir. $C_{3\varepsilon}$ ise dikey ve paralel ağırlık vektörlerine ait bir sabit Eş. 4.20 numaralı denklemde gösterilmektedir. Ek olarak Eş. 4.21 numaralı denklem ile elde edilen Y_M , sıkıştırılabilir ve türbülanslı akışlar için yayılım oranını temsil etmektedir [88].

$$C_{3\varepsilon} = \tan h \left| \frac{v}{u} \right| \quad (4.20)$$

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^2 \quad (4.21)$$

M_t türbülans mach sayısını ifade eder. Eş. 4.18 ve Eş. 4.19 numaralı denklemlerde bulunan S_k ve S_ε kaynak terimlerini ifade etmektedir. R_ε ise, ε eşitliğine bağlı bir terimdir ve Eş. 4.22 numaralı denklemde gösterildiği gibi hesaplanır.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad (4.22)$$

Bu denklemde bulunan η , Eş. 4.22 numaralı denklemde ifade edilen k kaynak teriminin ε 'a oranı ile hesaplanmaktadır. Ek olarak, η_0 ve β sabit olup Çizelge 4.1'de gösterilmektedir [88].

Çizelge 4.1. RNG analiz sabitleri

Sabit	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_k	σ_ε	η_0	B
Değer	0,0845	1,42	1,68	0,72	0,72	4,38	0,012

4.4.4. P1 radyasyon modeli

Yanma odalarında yüksek sıcaklıkların meydana gelmesi ile en etkili ısı transfer mekanizması radyasyonla ısı transferidir. Bu sebeple, radyasyon; sıcaklık dağılımını ve gaz emisyonlarını etkin bir biçimde etkilemektedir. Gaz türbin yanma odası içerisindeki radyasyon P1 radyasyon modeli kullanılarak hesaplanır. Ansys Fluent programı P1 radyasyon modelinde q_r ile ifade edilen radyasyon Eş. 4.23 numaralı denklem vasıtasıyla hesaplanmaktadır.

$$q_r = -\frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (4.23)$$

Yukarıdaki denklemde α emme katsayısı, σ_s saçılma katsayısı, G yüzeye gelen radyasyon ve C eş yönlü olmayan doğrusal faz fonksiyon katsayısı olarak ifade edilmektedir.

$$\Gamma = \frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (4.24)$$

Eş. 4.23 numaralı denklemde verilen radyasyon akısı (q_r);

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (4.25)$$

Yüzeye gelen radyasyon (G) hesaplama yapıldığında;

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - \alpha G + 4\alpha \sigma T^4 = S_G \quad (4.26)$$

Yukarıdaki denklemde σ Stefan-Boltzmann sabitini, S_G ise radyasyon kaynağını göstermektedir [88].

4.4.5. Girdap ayrışma yanma modeli

Türbülans vortexi yavaş olan ön karışimli ve ön karışimsız gaz türbin yanmalarında, kimyasal etkileşim alanında yakıt ve hava hızlı şekilde reaksiyona girmektedir. Bu durumda yanma oranı karışım özelliklerine bağlıdır. Ayrıca kimyasal etkileşim oranları göz ardı edilebilir. Ansys Fluent programı türbülans kimyasal etkileşimi ile girdap ayrışma modeli dikkate alır. Girdap ayrışma modelinde reaksiyondan dolayı net üretim oranı ($R_{i,r}$) Eş. 4.27 ve Eş. 4.28 numaralı denklemler ile bulunabilir [88].

$$R_{i,r} = w_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left(\frac{Y_R}{w_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (4.27)$$

$$R_{i,r} = w_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N \hat{w}_{j,r} M_{w,j}} \quad (4.28)$$

Yukarıdaki denklemlerde Y_P reaksiyondan çıkanların kütle oranı, Y_R reaksiyona girenlerin kütle oranı, A değeri 1,0 olan bir model sabiti, B değeri 0,5 olan bir model sabiti, N sistem kimyasal türlerin numarası, $w_{i,r}$ reaksiyona giren i türünün stokiometrik katsayısı, $\hat{w}_{j,r}$ reaksiyondan çıkan i türünün stokiometrik katsayısı, $M_{w,i}$ türünün molekül ağırlığı ve ρ akışkanın yoğunluğunu ifade etmektedir [88].

4.5. Kullanılan Yakıtların Yanma Reaksiyonu

Hava araçları yakıtı olan kerosen, uçakların güç sistemini oluşturan turbojet, turboshaft, turboprop ve turbofan gibi gaz türbinli motorlarda kullanılmaktadır. Sivil hava araçlarının çoğunluğunda kullanılan kerosen yakıtının yanması sonucu karbondioksit, su ve enerji ortaya çıkar. Kerosen yakıtının oksijenle olan tek kademeli reaksiyonu Eş. 4.29 numaralı denklemde verilmektedir.



Kerosenin yanma reaksiyonuna 1 mol $C_{12}H_{23}$ yanması için 17,75 mol O_2 gerekmektedir. Ürün olarak bu denklemden 12 mol CO_2 ve 11,5 mol H_2O ürün ortaya çıkmaktadır.

Doğal gaz, enerji çevrim santrallerinde gaz türbinli motorların büyük bir kısmında kullanılmaktadır. Ek olarak gaz türbinli motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılması amacıyla bilimsel ve sektörel çalışmalar yapılmaktadır. Çevrim santrallerinde yakıtın yanması ile enerji elde edilen doğal gazın çoğunluğu metan gazından oluşmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada doğal gazın %100 metandan oluştuğu varsayımı yapılmıştır. Eş. 4.30 numaralı denklemde metanın oksijenle yanma reaksiyonu gösterilmektedir.



Eş. 4.30'da verilen denklemde metanın oksijenle yanma reaksiyonuna 1 mol CH_4 girerken buna karşılık 2 mol O_2 girmektedir. Reaksiyon sonunda 1 mol CO_2 ve 2 mol H_2O meydana gelmektedir.

Amonyakın oksijenle yanma reaksiyonu Eş. 4.31 ve Hidrojenin oksijenle yanma reaksiyonu Eş. 4.32 numaralı denklemlerle gösterilmektedir.



Amonyakın yanma reaksiyonuna 1 mol NH_3 için 0,75 mol O_2 girmektedir. 0,5 mol N_2 ve 1,5 mol H_2O meydana gelmektedir. Ayrıca H_2 yanma reaksiyonuna 1 mol H_2 karşılık 0,5 mol O_2 girmektedir ve 1 mol H_2O meydana gelmektedir.

4.6. Azot Oksit (NO_x) Oluşum Mekanizması

Azot oksit emisyonları olarak, azot monoksit (NO), azot dioksit (NO₂), diazot oksit (N₂O), diazot trioksit (N₂O₃) ve diazot pentaoksit (N₂O₅) olmak üzere beş çeşitli emisyon oluşmaktadır. Fakat, bu emisyonlardan NO, NO₂ ve N₂O hava kirliliği açısından en zararlı emisyon değerini salgırlar. NO, renksiz ve insan sağlığını tehdit eden yanma sonu ürünüdür. NO emisyon gazı fotokimyasal duman oluşumunda etkin rol oynamaktadır. Gaz türbin yanma işleminde toplam NO_x emisyon oluşumunun minimum %96'sının NO emisyon olduğu kabul görmektedir. Yakıt-hava kimyasal yanma denklemlerinde azot oksit (NO_x) oluşumunu etkileyen önemli iki kaynak bulunmaktadır. İlk olan kaynak, hacimsel

oranda %79 N içeren hava ve ikinci olan kaynak yapısında N bulunduran yakıt olarak bilinir. Bu sebeple, havadaki azotun yanı sıra NO_x oluşumuna amonyak gazında bulunan azotun katkı yapacağı öngörülmektedir.

4.6.1. Termal NO_x mekanizması

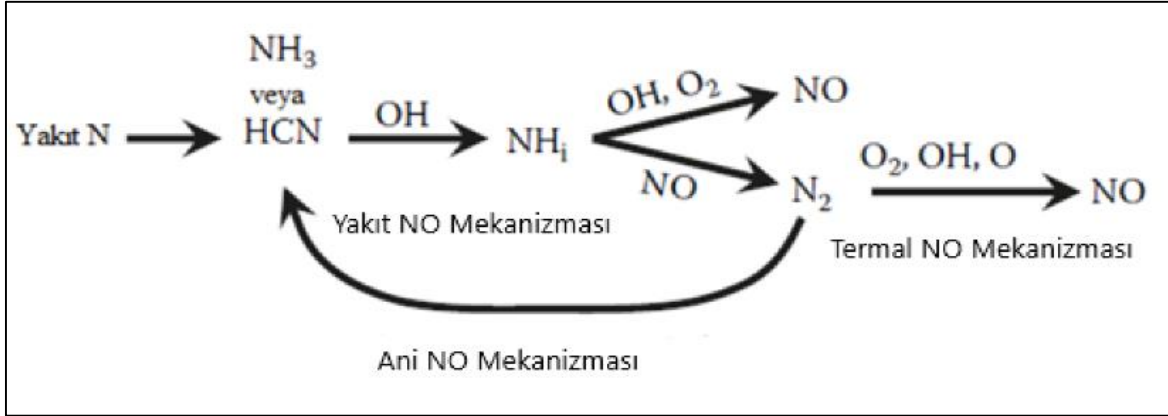
Termal NO_x oluşumu yanma havasındaki azotun oksidasyonu ile oluşmaktadır. Oluşan oksidasyon sürecindeki temel denklemler genişletilmiş Zeldovich mekanizması olarak bilinen yüksek sıcaklığa bağlı kimyasal reaksiyonlar ile hesaplanır. Azot gazının oksitlenerek termal NO_x oluşumu aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır [91].



Serbest azotun oksidasyonu Termal NO_x (Zeldovich) mekanizması ile aşağıdaki gibi oluşur:



Zeldovich mekanizmasında N₂ bağlarının parçalanması zor bir adım olmasından dolayı Eş. 4.35 genel olarak oran kontrollü gerçekleşmektedir. Reaksiyon Eş. 4.35 ve Eş. 4.36'nın her ikisi de fakir ve az zengin yanma şartlarında ($\phi > 0,85$) NO oluşum için önem arz eden bir durumdur. Eş. 4.35 ve Eş. 4.36 fakir ve orta zengin yanma durumunda NO oluşum için önem arz eden bir durumdur. Ek olarak, Lavoie ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada 3. reaksiyonun Eş.4.37 termal-NO_x oluşumuna stokiyometrik yanma koşullarında ve yakıt bakımından zengin alevlerde ($\phi > 1,8$) her 90 Kelvin sıcaklık artışı NO emisyon seviyesi ortalama 2 katı artış gösterdiği için önem arz etmektedir [89].



Şekil 4.2. NO emisyon oluşum mekanizmaları [91]

N_2 molekülünün kararlılığı sebebiyle, diazot bağlarının parçalanması çok zor olması sebebiyle N_2 'yi oksitlemek için yüksek derecede enerji gerekmektedir. Bu nedenle termal-NO yüksek alev sıcaklıklarında ($>1370^\circ\text{C}$, 2500°F) oluşmaktadır. Temelde oksijenle yanma durumlarında termal-NO'nun oluşumu azalabilir. Bunun sonucu N_2 brülörün üst tarafında bulunan hava ayırma cihazı ile yanma odasından çıkarılmaktadır. Pratik uygulamalarda maddi nedenlerden dolayı nadir olmakla birlikte tamamen oksijen kullanılması sebebiyle sistemde az miktarda (ortalama %2 - %5) N_2 kalmaktadır [91].

Termal- NO_x modelinde kullanılacak Eş. 4.35, Eş. 4.36 ve Eş. 4.37 denklemleri için oran katsayısına ilişkin denklemler Eş. 4.38, Eş. 4.39 ve Eş. 4.40'da gösterilmiştir. Bu denklemler Hanson ve Salimian'ın çalışmalarına dayandırılarak gösterilebilir [92].

$$k_1 = 1,8 \times 10^8 \exp\left(-\frac{38370}{T}\right) \quad (4.38)$$

$$k_{-1} = 3,8 \times 10^7 \exp\left(-\frac{425}{T}\right) \quad (4.39)$$

$$k_2 = 1,8 \times 10^4 T \exp\left(-\frac{4680}{T}\right) \quad (4.40)$$

$$k_{-2} = 3,8 \times 10^3 T \exp\left(-\frac{20820}{T}\right) \quad (4.41)$$

$$k_3 = 7,1 \times 10^7 \exp\left(-\frac{450}{T}\right) \quad (4.42)$$

$$k_{-3} = 1,7 \times 10^8 \exp\left(-\frac{24560}{T}\right) \quad (4.43)$$

Yukarıdaki denklemlerde reaksiyon k_1 , k_2 ve k_3 , ileri oran sabitlerini ve k_{-1} , k_{-2} ve k_{-3} ters oran sabitlerini vermektedir.

Isıl-NO emisyon mekanizması sayesinde NO emisyon oluşum oranı Eş. 4.44'de gösterilmektedir [89].

$$\frac{d[NO]_T}{dt} = \frac{2[O]\{k_1 k_2 [O_2][N_2] - k_{-1} k_{-2} [NO]^2\}}{k_2 [O_2] + k_{-1} [NO]} \quad (4.44)$$

O_2 ile N_2 konsantrasyonları yanma çözümünde hesaplanabilir. O atom konsantrasyonu Eş. 4.45'de verildiği gibi bulunabilir [89]:

$$[O] = 36,64 T^{1/2} [O_2]^{1/2} \exp\left(-\frac{27123}{T}\right) \quad (4.45)$$

Isıl-NO emisyon oluşumu için birden fazla NO modeli önerilmiştir. N atomu için daimi durum yaklaşımı alınır ve O atomunun konsantrasyonu denge göz önüne alınarak hesaplanabileceği kabul edilirse en yüksek NO oluşum oranı Eş. 4.46'da ki gibi hesaplanabilir [89]:

$$\frac{d[NO]}{dt} = 1,45 \times 10^{17} T^{-1/2} \exp\left(-\frac{69460}{T(K)}\right) (O_2)_{eq}^{1/2} (N_2)_{eq} \quad (4.46)$$

Denklemlerde NO emisyon oluşum oranlarının yanmış gaz sıcaklığına bağlı olduğu ve yanmış gazlarda O_2 konsantrasyonu ile basınca daha az bağımlı olduğu söylenebilir [89].

4.6.2. Ani NO_x mekanizması

Fenimore tarafından önerilen ani-NO_x mekanizması, devam eden NO oksidasyonundan veya yakıt-NO_x ile olduğu gibi N_2 'nin azaltılmasından hidrokarbon yakıtı parçalanmasıyla atmosferik azot reaksiyonu tanımlanır [93]. Yakıt-NO_x'in aksine, ani-NO_x oluşumu hidrokarbon yakıt parçalanmasının fazla olduğu yakıtın zengin alanlarında önem arz etmektedir. Yanma sonucu oluşan ani-NO_x miktarının termal ve ısıl emisyon mekanizması ile karşılaştırıldığında düşük kaldığı görülmektedir. Düşük sıcaklıktaki gaz alevlerde oluşan

NO miktarının çok önemli bir kısmını ani-NO oluşturmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ($T < 1800$ K), ısı-NO mekanizması ile oluşan NO, toplam NO oluşumu ile karşılaştırıldığında oldukça azdır. N_2 - O_2 -NO bilinen hidrokarbonlar tüketilmesinden sonra yanma sonrası gazlarda NO oluşumu tanımlanır. Genel olarak ani-NO oluşum aşağıdaki eşitliklerde gösterilmiştir [89]:



CH, ani- NO_x oluşumunun ana kaynağı olarak gösterilmektedir. Ayrıca, ani- NO_x kaynağı yakıt parçalanması vasıtasıyla oluşan çok sayıda kimyasal türlere (CH, CH_2 , C, C_2 , C_2H) katkı sağlamaktadır [89].

Hidrokarbon yakıt yanmasında ani NO_2 'nin üç kaynağı gösterilebilir. İlk olarak yanma alanında, yanmış gazlarda ısı-NO mekanizması oranını hızlandıran ve OH konsantrasyonudur. İkinci olarak moleküler azot ile yanma alanında ve yakınlarında olan HC radikal reaksiyonlarıyla başlayan Fenimore ani-NO mekanizmasıdır. Son olarak da N_2 ve O atomlarının reaksiyonu sonucu oluşan N_2O olarak gösterilebilir [89].



NO oluşumu ani-NO'nun toplam miktarında oluşan yanma odasındaki şartlara bağlıdır. Dengede olmayan radikal konsantrasyonu ile NO oluşumunun hızlanması ön-karışimsız yanmalarda ve düşük basınçlı ön-karışimli yanmalarda toplam NO oluşumunun %80'den fazlasını oluşturduğu söylenebilmektedir. HC radikali moleküler N mekanizmasıyla ani-NO oluşumu, toplam NO oluşumunun %50'den fazlasını oluşturan yakıt zengin ön-karışimli HC yanmasında ve ön-karışimsız HC alevlerinde önceliklidir. N_2O mekanizması ile NO oluşumu, yakıt-hava oranı ve yanmış gaz sıcaklığı azalırken veya basıncı artarken ciddi

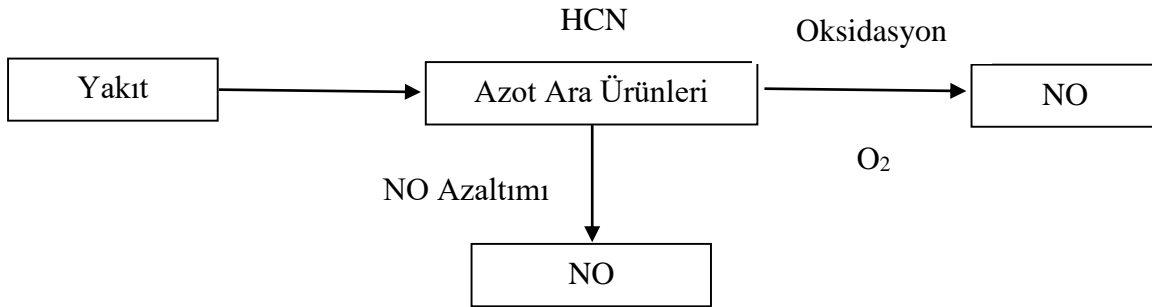
oranda artmaktadır. HC yanması birçok karmaşık reaksiyon ve kimyasal türleri içermektedir ve sayısal olarak bunları belirlemek oldukça zordur. Bu nedenle birçok araştırmacı, ani-NO oluşumunu hesaplamak için tahmin edici genel modeller göstermişlerdir [94].

$$\frac{d[NO]_{pr}}{dt} = 1,2 \times 10^7 [N_2][O][CH_4] \exp\left(-\frac{60000}{T}\right) \quad (4.53)$$

Yukarıdaki eşitlikteki formül 2000 K civarındaki sıcaklıklarda elde edilen deneysel bilgilerin analizinden türetilmektedir.

4.6.3. Yakıt NO_x mekanizması

Yakıt-NO_x mekanizması, yakıt moleküllerindeki N bağlarının oksidasyonunu tanımlamaktadır. Bu tepkimenin ortaya çıktığı alanlar oksijenin bulunan ve ara radikal tepkimenin N₂'ye veya NO'ya dönüştüğü alanlardır. Ek olarak HC radikalleri ile N molekülünün yerine NO moleküllerinin azalmasını içermektedir. Bu sebeple, yakıt azotunun NO'ya dönüşümü yerel azot stokiyometrisine son derece bağlıdır. HCN, N, CN ve NH gibi azot ara ürünleri, bileşenlerin ısıl ayrışması sonucu meydana gelir ve NO_x'e dönüşebilir [89]. Genel olarak yakıt-NO_x mekanizması Şekil 4.3'de verilmektedir.



Şekil 4.3. Yakıt NO_x mekanizması [94]

HCN, yakıtta bulunan N'den oluşmaktadır ve üretim oranı yakıt buharlaşması süresince gaz fazında yakıtın serbest kalma oranına eşittir. HCN, 2 reaksiyon ile tüketilebilmektedir. İlk olarak üretilen NO'ya oksitlenmesidir. Son olarak, N₂'yi azaltmak için NO ile reaksiyona girmesidir. Bu 2 reaksiyondan HCN'nin tüketim oranı Eş. 4.54 ve Eş. 4.55'de görülebilmektedir [94]:

$$R_1 = A_1 X_{HCN} X_{O_2}^a \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) \quad (4.54)$$

$$R_2 = A_2 X_{HCN} X_{NO} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad (4.55)$$

Yukarıdaki denklemlerde R_1 ve R_2 HCN'nin dönüşüm oranı (1/s), T anlık sıcaklık (K), X mol kesri, a oksijenin reaksiyon üssü olarak ifade edilmektedir.

$A_1 = 3,5 \times 10^{10}$ (1/s), $A_2 = 3 \times 10^{12}$ (1/s), $E_1 = 67000$ cal/mol, $E_2 = 60000$ cal/mol [94].

4.6.4. NO₂ reaksiyon mekanizması

Yanma boyunca oluşan NO'un azot içeren ara ürünler ile N₂ oluşturmak için sonradan reaksiyona girebileceği bilinmektedir. İlave olarak, bu reaksiyonlarda NO, değişik oksijen içeren kimyasal türler ile NO₂ oluşumu için reaksiyona girebilir. Temel NO₂ oluşum reaksiyonu [89]:



Temel çıkarılma adımı hidrojen radikalleri ile aşağıdaki reaksiyondur.

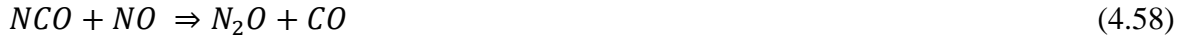


Alevin düşük sıcaklık bölgelerinde HO₂ kısmen kararlıdır. Yüksek sıcaklık bölgesinde oluşan NO ile reaksiyona girebilir ve düşük sıcaklık bölgesine difüzyon ile taşınır. Yüksek radikal konsantrasyonundan dolayı NO₂ taşınması hızlıdır ve NO₂'ye geri dönüşebilmektedir. NO₂'nin miktarı sisteme bağlı olarak fazlasıyla değişebilir. Fakat genellikle toplam NO_x'un yaklaşık %5'i kadardır [89].

Kimyasal denge göz önüne alındığında 1500 K'den daha yüksek, tipik alev sıcaklıkları için NO₂/NO oranı ihmal edilebilir derecede azdır. Bu dönüşümde NO₂ ömrü, tipik olarak 10 m/s'den daha azdır. Yanmada, azot oksit oluşumu için bazı kinetik modeller NO₂ emisyonunun sadece düşük sıcaklıkta çalıştırılan cihazlarda ya da NO₂ taşıma işleminde soğuk ısı transfer yüzeyleri ile yok edilebildiğini önermektedir [89].

4.6.5. N₂O reaksiyon mekanizması

N₂O (diazot oksit), ozon tabakasının delinmesine neden olan ve asit yağmurlarına katkı sağlayan bir kirletici türüdür. Yanma gazlarında N₂O'nun ardışık reaksiyonlarla oluşumu ve tahribi iyi bilinmektedir. Gaz fazında, yanma sırasında esas olarak NCO ve NH ile NO'nun reaksiyonu ile oluşmaktadır Yakıt yanmasında temel gaz fazında N₂O oluşturan reaksiyonlar [94]:



NO yakıt azotundan oluştuğu zaman, radikal türler NCO ve NH, alevin oksidasyon bölgesinde onların en yüksek konsantrasyonuna ulaşır. Bundan dolayı, N₂O alev önündeki bölgeye ya da içerisine yerleşmiştir [94]. Birincil N₂O taşıma adımı Eş. 4.60'da yazıldığı üzere hidrojen radikalleri ile N₂O'nun reaksiyonudur.



1500 K'den daha yüksek sıcaklıklarda N₂O'nun ömrü 10 m/s'den daha azdır. Genel kabul, N₂O emisyonunun akışkan yataklı yanma odalarında olduğu üzere düşük sıcaklık yanmasının dışında önemli olmadığıdır [89].

5. DENEYSEL SİSTEM VE SAYISAL MODELLEME

5.1. Deneysel Sistem Tanıtımı

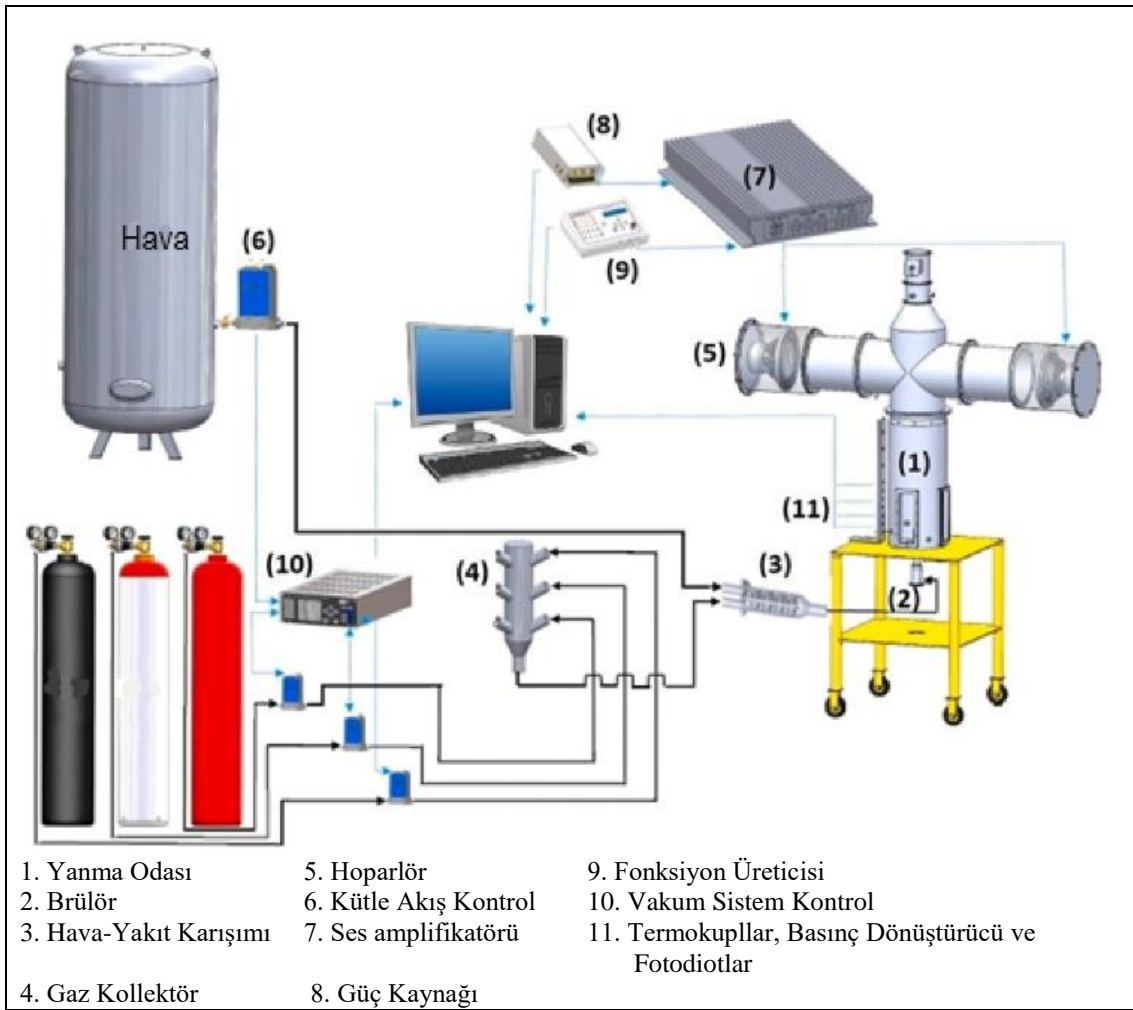
Deneysel çalışmanın yürütüldüğü Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Yanma Laboratuvarı'ndaki test teçhizatının tasarımı Şekil 5.1'de görülmektedir. Deneyleerin yapılabilmesi için gaz yakıtlar (NH_3 ve CH_4) tüplerden sağlanmaktadır. Hava ise kompresör aracılığıyla sağlanmıştır. Tüplerden geçen yanıcı gaz ve hava, gaz tesisatı sayesinde kütle akış kontrolcülerine gelmektedir. Kütle akış kontrolcülerinden sonra (8) numaralı vakum sistemi kontrolcüsüne bağlanmaktadır. Stokiyometrik yanma denklemi temel alınarak istenilen ısı gücü yakalamak için yanma odasına gönderilmesi gereken gaz hacimleri hesaplama yapılarak belirlenmiştir. Belirlenen gaz hacimleri vakum sistem kontrolcüsüne manuel olarak girilmektedir ve böylece kütle akış kontrolcülerini tanktaki yakıtların deney sistemine giriş miktarını anlık olarak göstermekte ve düzenleyebilmektedir.

Kütle akış kontrolcülerinden çıkan gazlar (10) numara ile gösterilen kollektörde toplanmaktadır. Yanıcı yakıt ve hava (6) numara ile gösterilen kompresörle beraber kütle akış kontrolcüsü sayesinde belirlenen sabit bir hacimde sisteme gönderilmektedir. Kompresörün çalışması esnasında düzenli bir hava akışını yanma odasına gönderebilmek için bir hava tankı kullanılmıştır. Kollektörden çıkan gaz karışımı ve kompresörden gelen hava (11) numaralı karıştırıcıda karışmaktadır. Bu eleman yakıt ve havanın ön karışımını sağlamaktadır. Ön karıştırıcıdan çıkan yakıt-hava karışımı (12) numara ile gösterilen brülöre girerek yanma işlemi gerçekleşmektedir. Yanma işlemi (13) numaralı yanma odasında meydana gelmektedir. Yanma odasının değişik kısımlarına yerleştirilen ölçüm ekipmanları ile basınç, sıcaklık ve benzeri değerleri anlık olarak ölçülüp bilgisayara aktarılmaktadır.

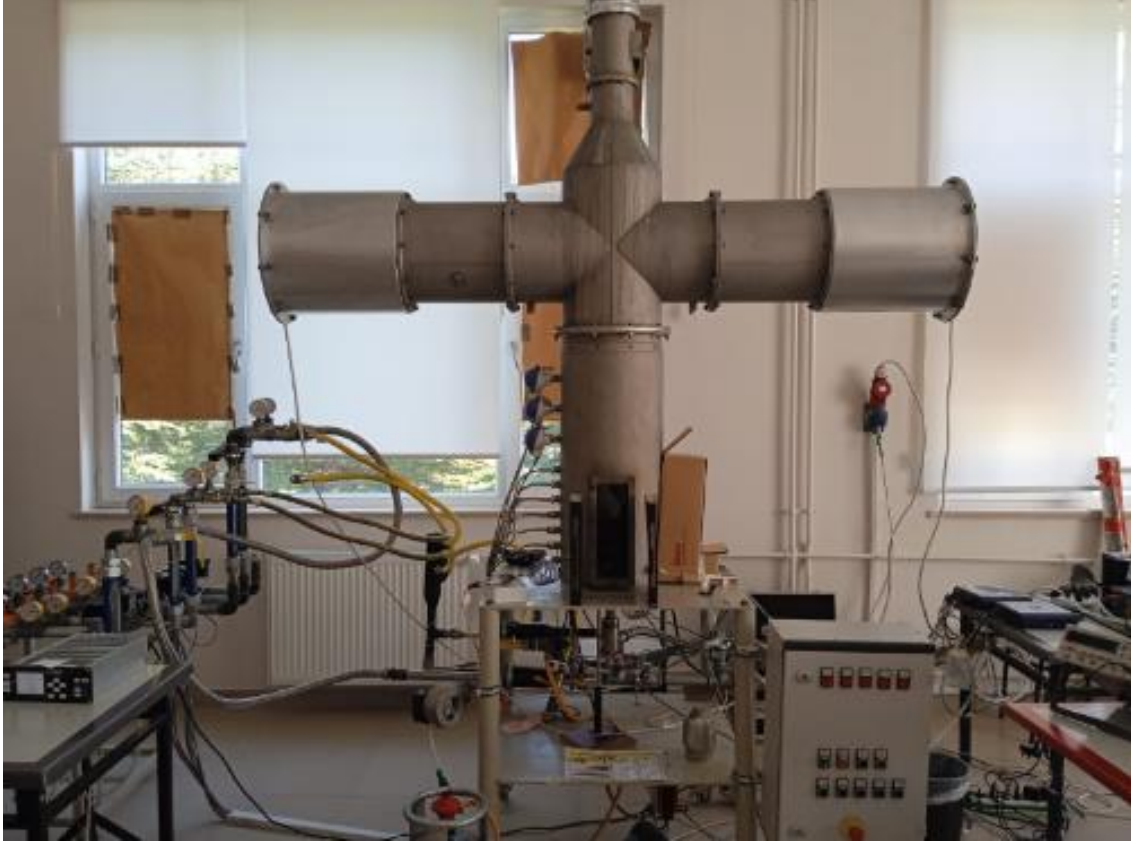
Şekil 5.1'de, yanma test sisteminin ana parçalarıyla şematik temsili sunulmuştur. Deneyleerde kullanılacak yakıtlar çelik yakıt tanklarında depolanır. Bu tanklar basınçlı tanklar düzenlemesine uygun olarak kontrol edilir. Tanklardan çıkan gazların basınçları regülatörler tarafından ayarlanır ve yakıt besleme hatlarına beslenir. Yakıt besleme hatlarında %0,2 hata payıyla ölçüm ve kontrol yapabilen kütle akış kontrol cihazları bulunur. Stokiyometrik yanma denklemine göre hesaplanan yakıt akış hızları, yanma odasına kesintisiz ve hassas bir şekilde sağlanabilir. Kütle akışı kontrol cihazlarından geçen yakıtlar yakıt toplayıcıda toplanır. Yanma için gereken hava bir kompresörden beslenir ve ön karıştırıcıdaki yakıt

karışımıyla homojen olarak karıştırılır ve tekrar kütle akışı kontrol cihazından geçer. Bu aşama nedeniyle, sistem önceden karıştırılmış brülör olarak adlandırılır.

Ön karıştırıcıdan sonra, yakıt ve hava karışımı yanıcıya birlikte girer ve ilk ateşleme pilot alev tarafından sağlandıktan sonra istikrarlı bir yanma oluşur. Yanma odasının etrafındaki brülör çıkışının 5 cm yukarisından başlayarak farklı aksenal mesafelerde termokupllar bulunmaktadır. Bu cihazlar sayesinde yanma odasının sıcaklık dağılımı aksenal olarak belirlenebilir.



Şekil 5.1. Test teçhizatının tasarımı [11]



Resim 5.1. Deney sistemi ön görünüşü [11]

5.2. Yanma Odası ve Amonyanın Yanma Modellemesi

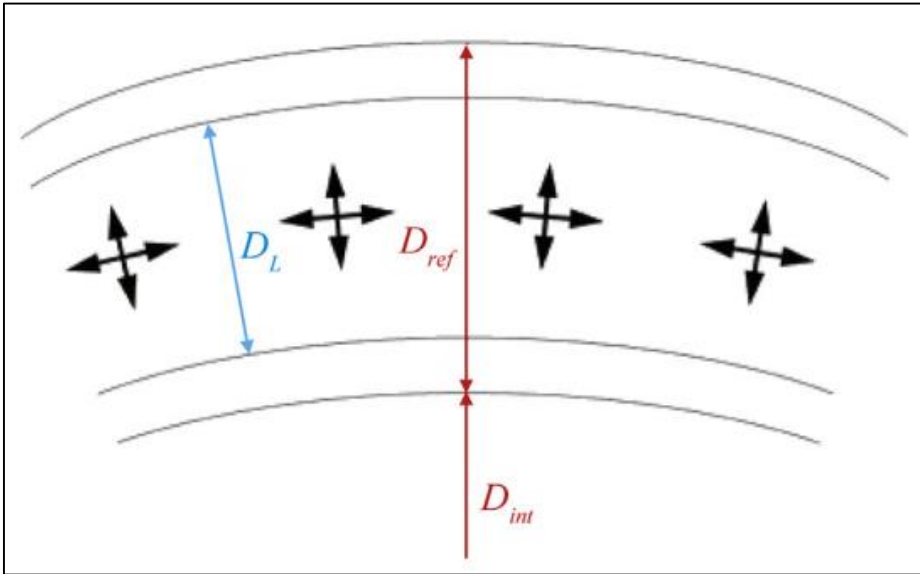
Yanma odasının geometrik modeli Solidworks 3B CAD ile modellenmiş olup, akış alanları ve modellemeden kaynaklanan hatalar Autocad 2016 programı ile iyileştirilmiştir. Yanma odasının geometrisi simetrik olduğundan modelleme 3B aksi-simetrik geometrik model kullanılarak hazırlanmıştır. 3B modeli oluşturulan ve 160 mm uzunluğunda olan yanma odası 20 derecelik kesimi alınarak 18 adet simetri olarak kabul edilmektedir. Yanma odasının modellemesinde soğutma işlemini yapabilmek için kullanılacak havanın yanma odasına girmesi ve yanmanın gerçekleşmesi için gereken türbülansın oluşturulması için girdap ve seyreltme delikleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada iki tür hava tedariki sağlanmaktadır. Gaz türbin yanma odasının ilk kısmına yönelen birincil hava (primary) girişinde yakıt ile kimyasal tepkimeye girmektedir. Dış kısımdan geçen ikincil hava (sekondary) ise, yanma sonucu oluşan yüksek sıcaklıktaki alev akışının türbin kanatçıklarına ve yanma odası duvarlarına zarar vermemesi amacıyla, soğutma havası olarak kullanılmaktadır. Ek olarak dış kısımdan geçen havanın ortalama

yarısı yanmamış HC'ların yanması amacıyla ikincil hava girişinden yanma odasına girmektedir. Kubbe kısımdan geçen hava miktarı dış kısımdan geçen hava miktarının %20'si kadar olmalıdır [73]. Model üzerinde yanmanın verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için türbülansın oluşturulması gerekmektedir. Bu da türbülans elemanları (swirl kanatçıkları) sayesinde gerçekleşmektedir.

5.2.1. Yanma odasının geometrisi ve boyutları

Şekil 5.2'de referans çapı gösterilen referans geometri için yanma odasının önden görünümü görülmektedir.



Şekil 5.2. Referans geometri için yanma odasının önden görünümü [95]

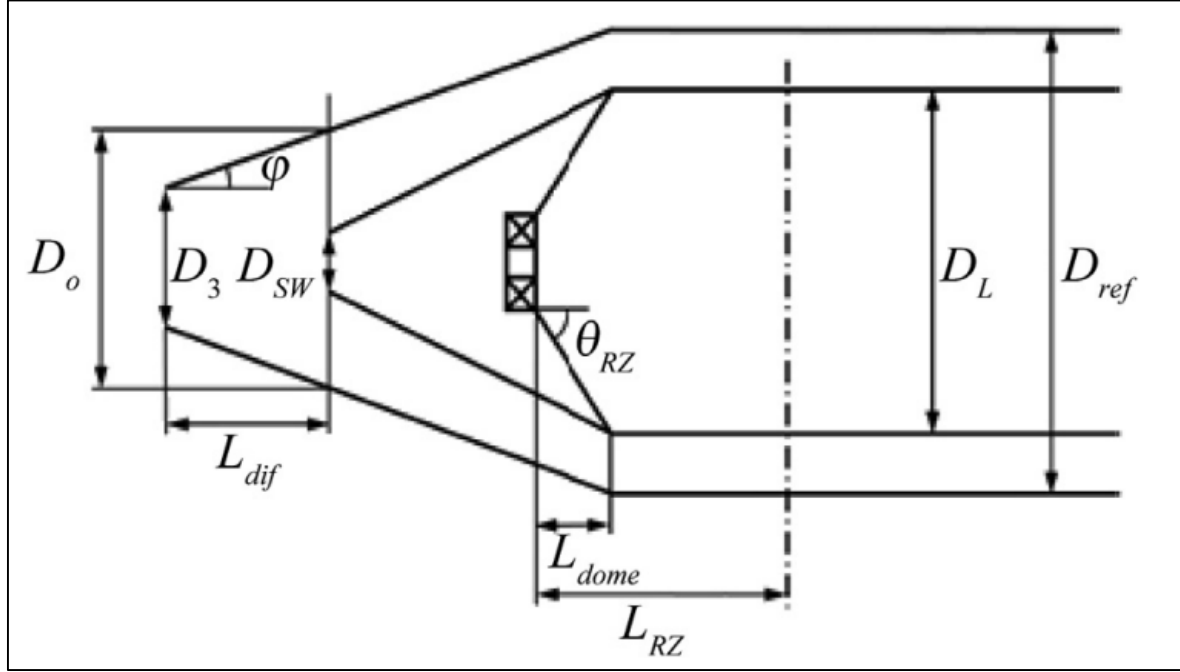
Referans alan (A_{ref}) Eş. 5.1 ile hesaplanır [95].

$$A_{ref} = \left[\frac{R}{2} \left(\frac{\dot{m}_3 T_3^{0,5}}{P_3} \right)^2 \frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}} \left(\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3} \right)^{-1} \right]^{0,5} \quad (5.1)$$

Bu denklemde \dot{m}_3 giriş havası debisi, T_3 giriş sıcaklığı, $\frac{\Delta P_{3-4}}{q_{ref}}$ yanma odası basınç kaybı faktörü ve $\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3}$ yanma odası basınç kaybı olarak tanımlanır. Yanma alanı kesit uzunluğu ise Eş. 5.2'de verilen denklem aracılığıyla hesaplanır.

$$A_L = 0,66A_{ref} \quad (5.2)$$

Şekil 5.3’de referans geometrinin yandan görüntüsü verilmiştir. İlgili ölçüler ise aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır.



Şekil 5.3. Referans geometri için yanma odasının yandan görünümü [95]

Yanma odası lineer uzunluğu ölçüleri Eş 5.3-5.6’de verilen denklemler ile hesaplanır [95].

$$L_L = \frac{-D_L}{0.05 \frac{\Delta P_L}{q_{ref}} \ln(1-PF)} \quad (5.3)$$

Yukarıdaki denklemde, D_L lineer çap, $\frac{\Delta P_L}{q_{ref}}$ lineer basınç kaybı faktörü ve PF model faktörüdür. Birincil yanma odası uzunluğu Eş. 5.4’de verilmiştir.

$$L_{PZ} = \frac{3}{4} D_L \quad (5.4)$$

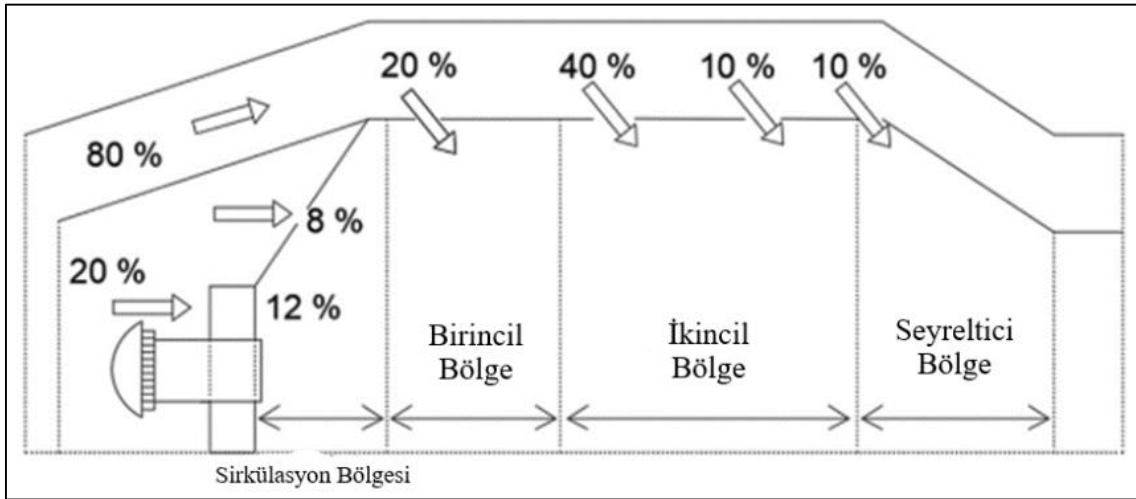
İkincil yanma odası uzunluğu Eş. 5.5’teki gibi hesaplanmaktadır.

$$L_{SZ} = \frac{1}{2} D_L \quad (5.5)$$

Seyreltme bölgesi uzunluğu ise Eş. 5.6'daki gibi bulunmaktadır.

$$L_{DZ} = D_L(3,83 - 11,83PF + 13,4PF^2) \quad (5.6)$$

Şekil 5.4'te yanma odasına giren havanın yüzdesel olarak dağılımları gösterilmektedir. İlk başta havanın %20'si swirllerden geçmek için ve %80'i dış katmandan soğutma ve yanmanın seyreltilmesi amacıyla ayrılmaktadırlar. Daha sonra ihtiyaca göre birincil yanma odası bölgesine %20, ikincil yanma odası bölgesine %50 ve kalan %10 oranında hava ise seyreltme bölgesine verilerek verimli bir yanmanın sağlanması amaçlanmıştır. Egzoz gazlarındaki duman, karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbonları (UHC) en aza indirmek için birincil bölgedeki denklik oranı 1,5'tan az olmamalıdır. Azot oksitleri (NO_x) ve termal ayrışmaya bağlı diğer kirleticileri önlemek için, denklik oranı maksimum 0.6 değerinde sınırlandırılmıştır. İkincil bölgenin denklik oranı 0,8'den yüksek olmamalıdır.



Şekil 5.4. Yanma odasına giren havanın yüzdesel olarak dağılımları [95]

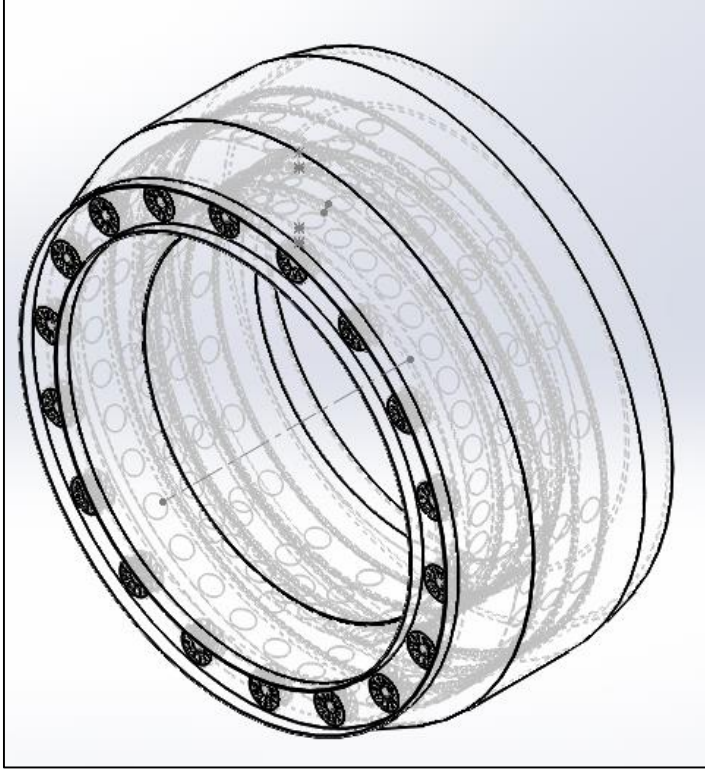
Swirl dizaynı için gerekli olan hesaplamalar Eş. 5.7 ve Eş. 5.8'de verilmiştir.

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{\Delta P_{dif}}{P_3} A_3^2 P_3^2}{502,4 \left(1 - \frac{A_3}{A_0}\right)^2 m_3^2 T_3} \right]^{1/1,22} \quad (5.7)$$

$$L_{dif} = \frac{(R_0 - R_3)}{\tan \varphi} \quad (5.8)$$

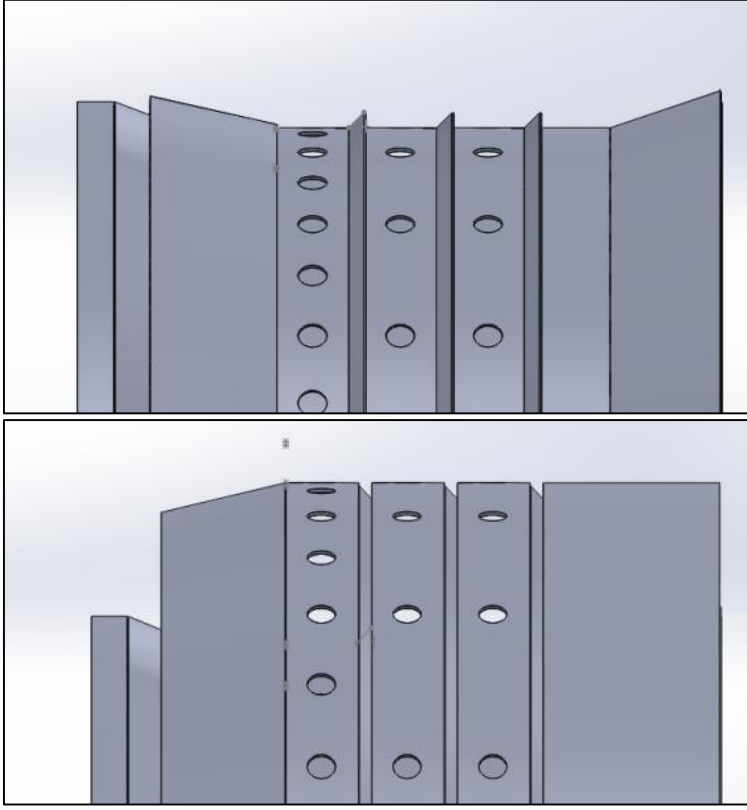
Yukarıdaki denklemlerde φ difüzör açısı, $\frac{\Delta P_{dif}}{P_3}$ difüzör basınç kaybı, A_3 kompresör çıkış alanı, P_3 giriş basıncı, R_0 giriş çapı ve R_3 dış çapı ifade etmektedir.

Yukarıda verilen ölçülendirmeler yardımıyla yapılan yanma odasının kesit görüntüsü ve katı modeli Şekil 5.5’de verilmiştir.



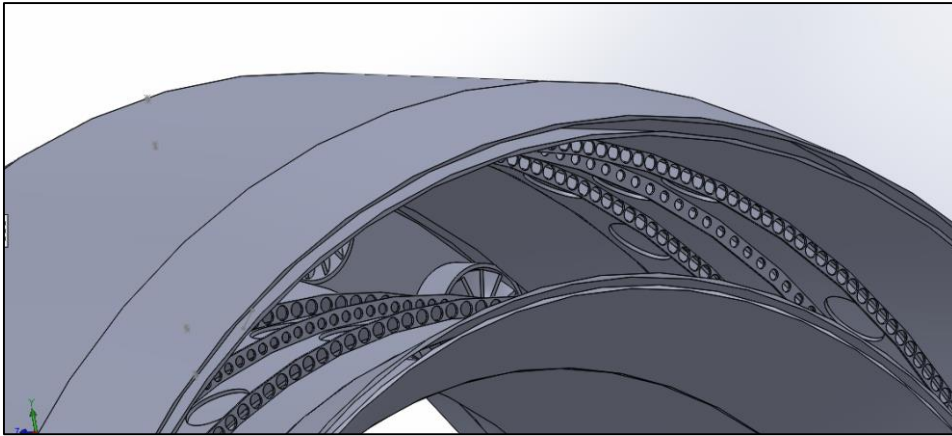
Şekil 5.5. Yanma odasının kesit görüntüsü ve katı modeli

Tasarımı yapılan yanma odasının Şekil 5.6’da (a) iç çeper ve (b) dış çeper kabuğu görülmektedir.



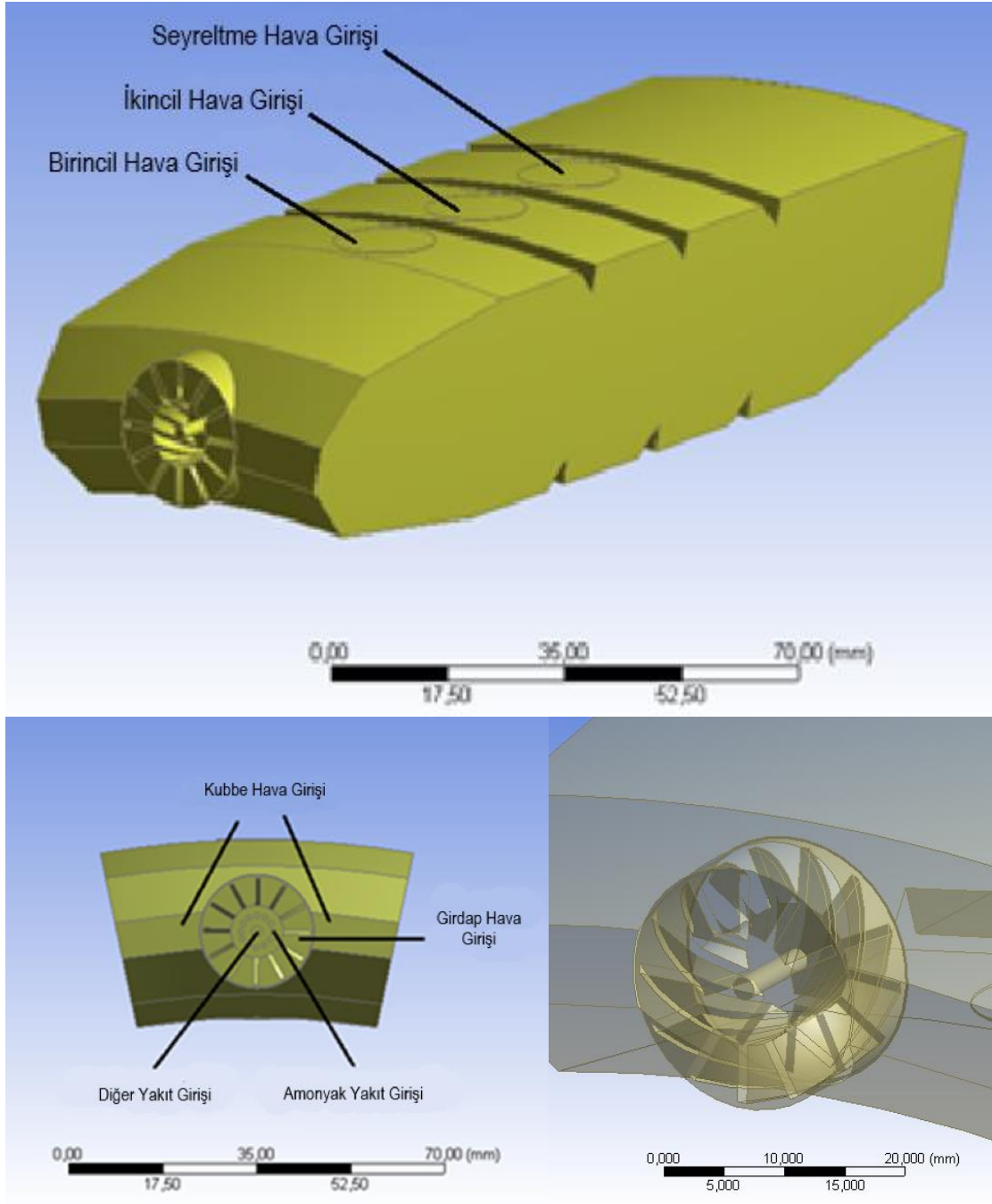
Şekil 5.6. Yanma odasının iç çeper (üst) ve dış çeper (alt) kabuğu

Şekil 5.7’de annulus açıklıklarının yandan görünümü verilmiştir.



Şekil 5.7. Annulus açıklıklarının yandan görünümü

Amonyak yakıtının gaz türbini yanma odasında yakılabilmesi amacıyla oluşturulan akış hacmi Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Şekil 5.8’de, akış hacmi üzerindeki yakıt ve hava girişleri, yanma odasının duvarları ve yanma odası swirler de gösterilmektedir.

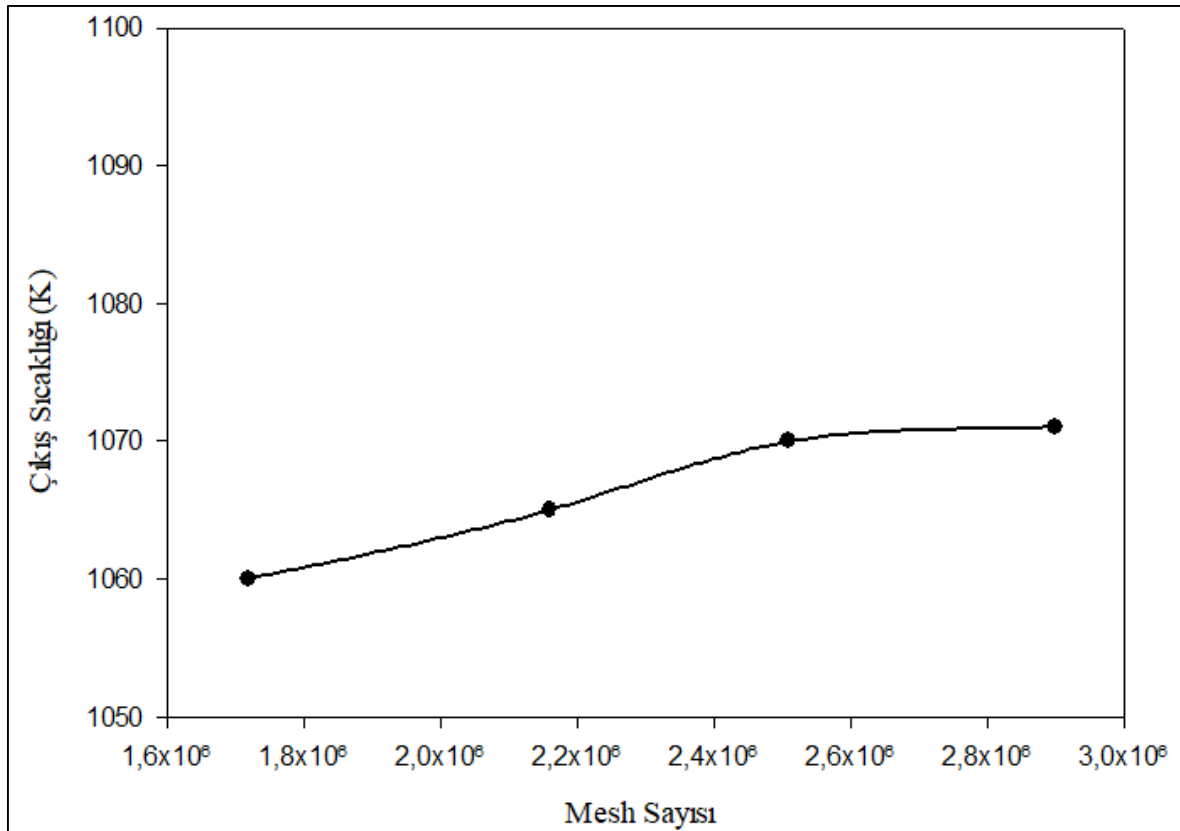


Şekil 5.8. Yanma Odası Katı Model ve Boyutları

5.2.2. Sayısal model ağ (Grid) üretimi

Bu tez çalışmasında amonyak yakıtının farklı yanma parametrelerinde sayısal ve deneysel olarak sonuçları irdelenmiştir. Sayısal modellemede tüm amonyak yakıt karışımlarının yakılması, 617 kW ısı gücü ve $\phi = 0,13$ eşdeğerlilik oranında, yakıt ve hava basınçları 2 MPa olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. ANSYS Fluent programında, bu sınır şartları girilerek sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

Analizi tasarlanan ve hesaplanan gaz türbini yanma odası 3B model referans makale ölçülerinde tasarlanmıştır [95]. Çalışmalarda ortogonal mesh değerinin 0,1'in üzerinde ve skewness değerinin 0,9'un altında olmasına dikkat edilerek 1720000, 2160000, 2510000, 2900000 olmak üzere grid sayıları ile meshlemeler yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda yanma odası çıkış sıcaklığında mesh sayısının artırılması ile sonuçlarda büyük farklılıklar görülmemekle birlikte 2510000 grid sayısından sonra değerlerde önemsiz değişimler görülmüştür. Optimum değer ve zaman dikkate alınarak 2510000 grid sayısındaki mesh yapısı sayısal çözümlerinde kullanılmıştır. Farklı grid sayılarındaki çözümlerden elde edilmiş kerosen yakıtı kullanılarak yanma odası çıkış sıcaklık değerlerinin değişimi Şekil 5.9'da gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Mesh sayısına bağlı yanma odası çıkış sıcaklık değerlerinin değişimi

Amonyak yakıtının sayısal modellemelerine geçilmeden önce yapılması gereken diğer bir işlem de amonyak yanması amacıyla uygun türbülans modelini belirlemektir. Bu aşama için, üç farklı türbülans modeli ile sayısal modelleme yapılmış ve çalışmanın deneysel kısmında amonyak yanması için elde edilen aksenal sıcaklık ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Farklı türbülans modelleri için yapılan sayısal modellemeler sonucunda aksenal sıcaklık

dağılımlarına bakıldığında, yanma odası eksenine boyunca çok önemli farklılıklar bulunmamakla beraber genel olarak standard k- ϵ türbülans modeli ile yapılan sayısal modelleme sonuçlarının deneysel ölçümlerle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle, amonyak yanması için türbülans modeli olarak standard k- ϵ türbülans modeli seçilmiştir.

5.2.3. Model sınır şartları

Kerosen-amonyak yakıtının sıcaklığı ön ısıtma işleminin uygulandığını 350 K kabul ederek standart deniz seviyesi şartlarında çözümleme yapılmıştır. Kompresör tarafından 20 ile 35 atm basınca sıkıştırıldığı varsayılarak değerler verilmiştir. Deniz seviyesi ortam basıncı 1 atm, ortam sıcaklığı 288 K kabul edilmiştir. Yakıt ve havanın türbülans yoğunluğu %10 olarak alınmıştır.

Sınır şartları tanımlanırken yanma odası duvarları için herhangi bir tanımlama yapılmamıştır. Yanma odası giriş bölgesi ve çıkış bölgesi için hidrolik çap girilmiş ve mm olarak alınmıştır. Modelleme çözümlerinde kullanılan ve literatürden alınan bilgilere göre hava ve kerosen yakıtına ait referans değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Çözümlerinde kullanılan ve literatürden elde edilen bilgilere göre hava ve kerosene ait değerler

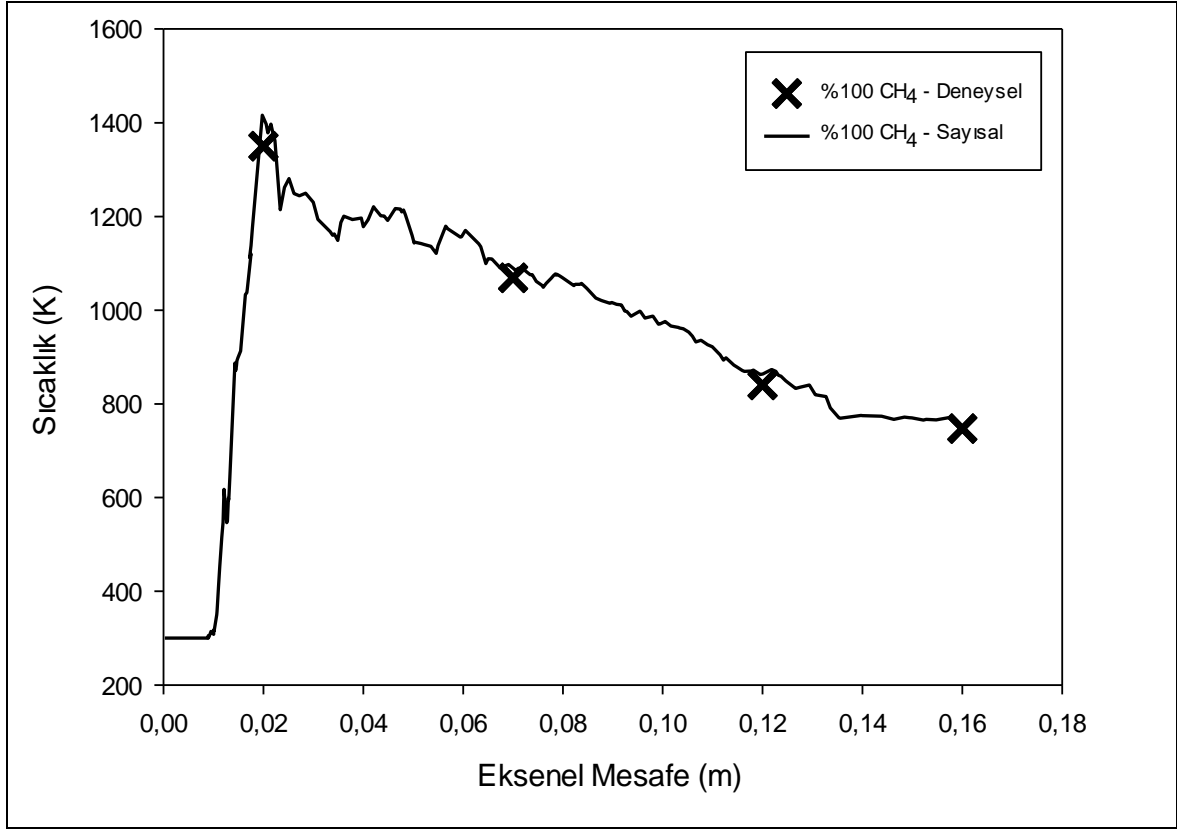
	Kütlesel Akış Oranı (Kg/s)			Toplam Basınç (MP)	Toplam Sıcaklık (K)
Kerosen	0,01434			2,08	300
Hava	1.Akış Oranı	2.Akış Oranı	Swirl Akış Oranı		
İkincil Akış Oranı (%)					
50	0,49111	0,79750	0,30639	2,08	743
60	0,39289	0,95700	0,24511		
70	0,29467	1,11650	0,18383		
80	0,19645	1,27600	0,12255		
90	0,09822	1,43550	0,06128		

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

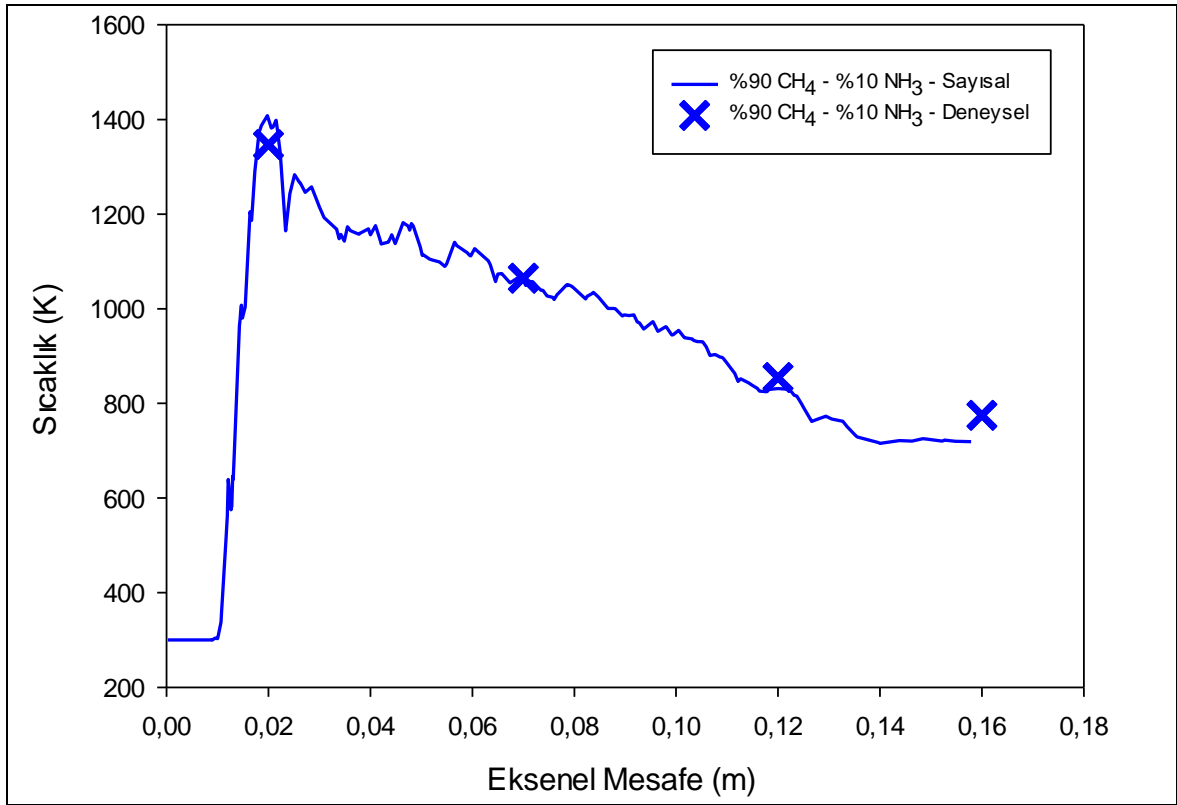
6.1. Model Doğrulaması

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile yapılan sayısal analizlerden elde edilen aksel mesafe – sıcaklık için elde edilen değerler karşılaştırılarak model doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Model doğrulaması için %100 saf metan gazı verileri kullanılmıştır.

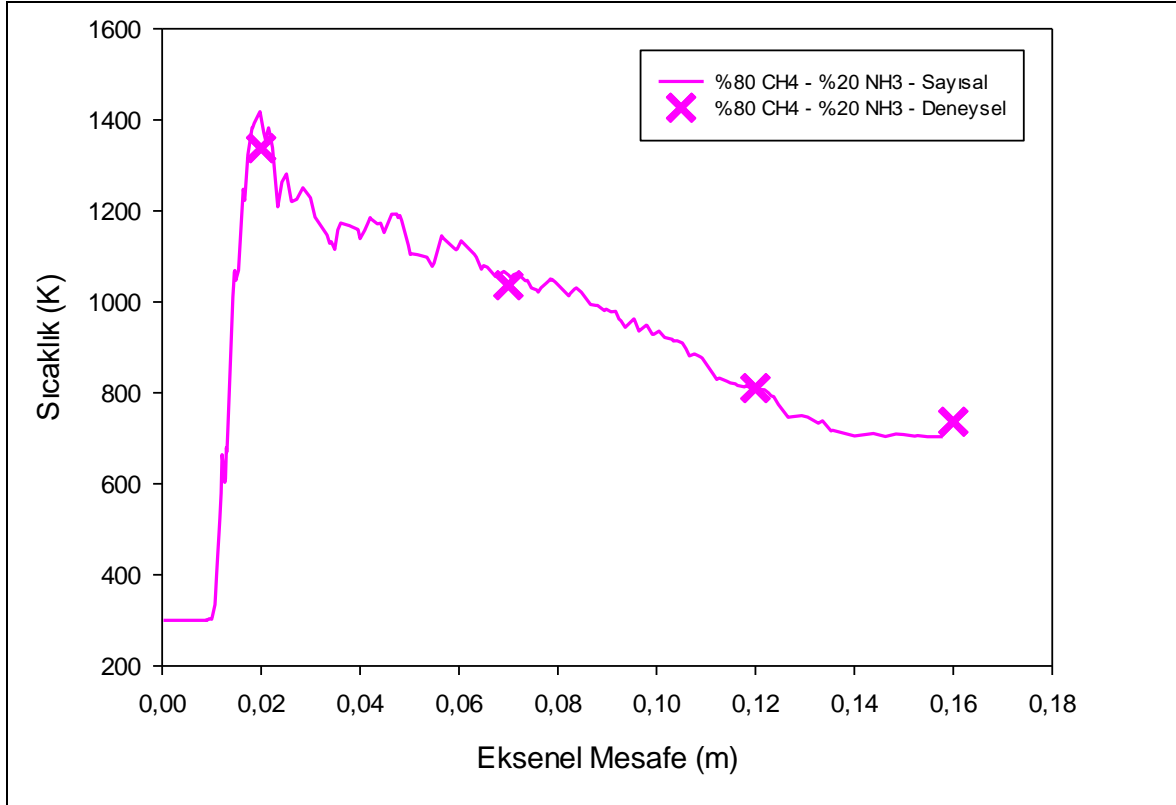
Bu çalışmada, metan-amonyak karışım yakıtların yanma kararsızlığı özelliklerini incelemek için deneysel analizler yapılmıştır. Amonyak ilavesinin metan yakıt gazına sıcaklık üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Saf metan ve üç farklı metan-amonyak karışımları yakıt olarak 0,7 eşdeğeri ve brülör gücü 5 kW olarak belirlenmiştir. Metan yakıtına amonyak eklenmesiyle yanma performansında önemli bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları ile deneysel verilerinin karşılaştırılması Şekil 6.1. %100 CH₄, Şekil 6.2. %90 CH₄ - %10 NH₃, Şekil 6.3. %80 CH₄ - %20 NH₃, Şekil 6.4. %70 CH₄ - %30 NH₃ ve Şekil 6.5. çeşitli oranlarda metan yakıtına amonyak eklenmesi gösterilmiştir.



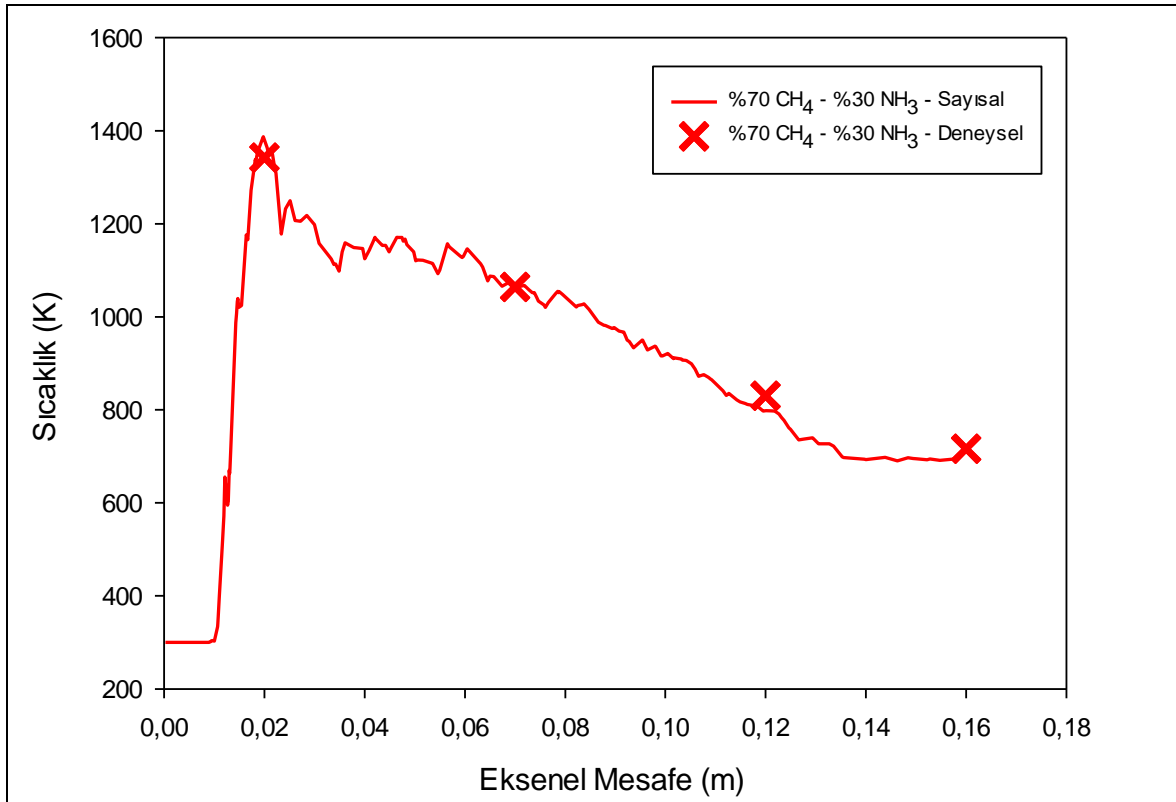
Şekil 6.1. %100 CH₄ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması



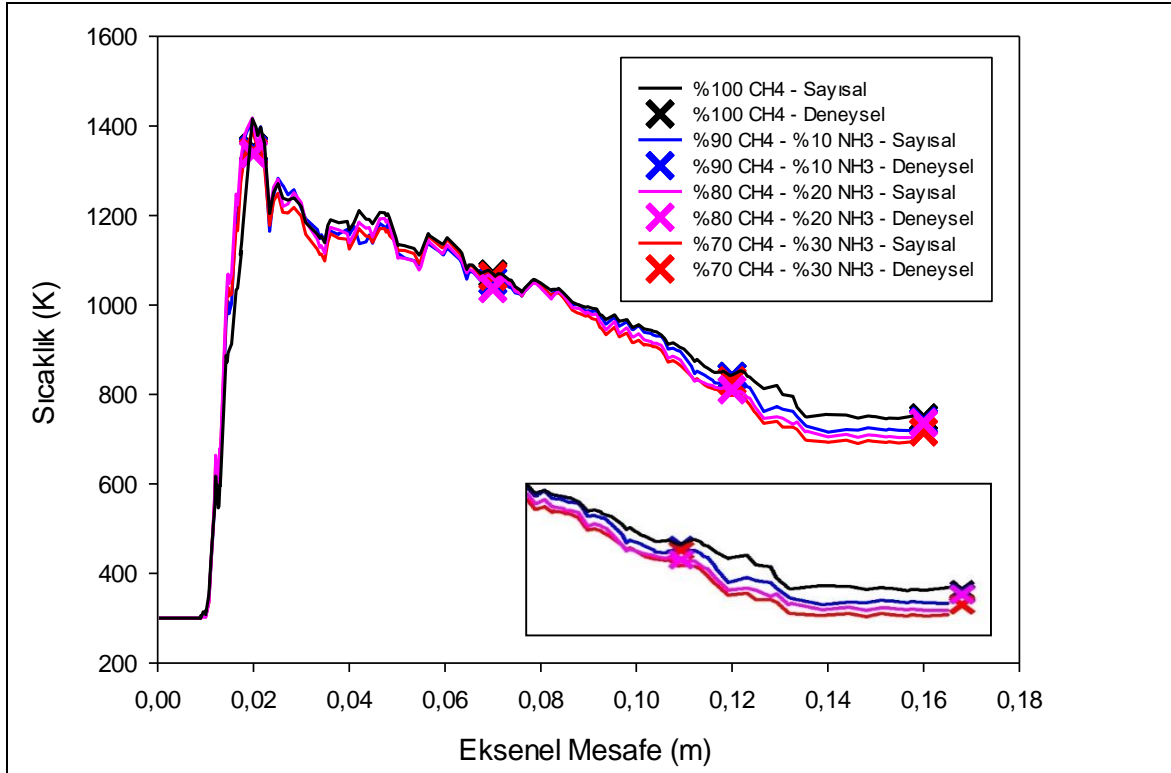
Şekil 6.2. %90 CH₄ - %10 NH₃ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 6.3. %80 CH₄ - %20 NH₃ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 6.4. %70 CH₄ - %30 NH₃ yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması



Şekil 6.5. CH₄ - NH₃ karışımları yanma deneysel ve sayısal karşılaştırması

Yapılan karşılaştırma sonucunda deneysel veriler ile sayısal modellemenin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

6.2. Deneysel Çalışma Sonuçları

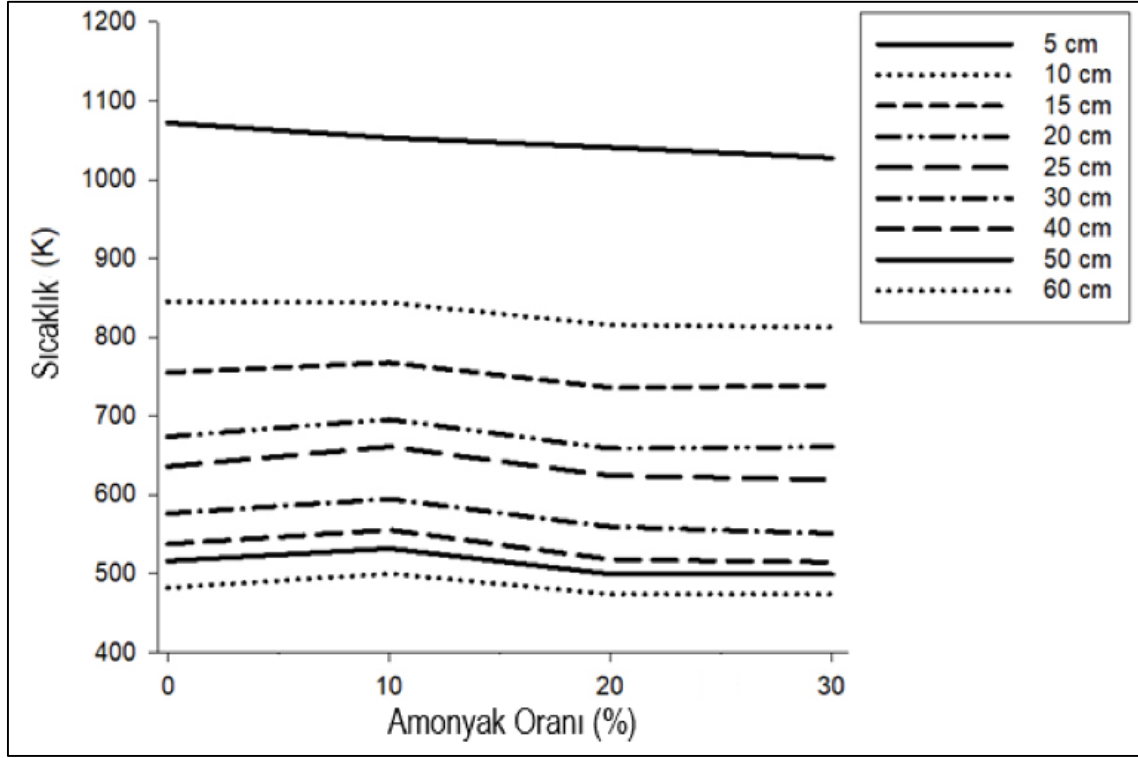
Deneysel çalışmada, metan-amonyak karışım yakıtların premix brülörde yanma kararsızlığı özelliklerini incelemek için analizler yapılmıştır. Metan yakıt gazına amonyak ilavesinin sıcaklık üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Saf metan ve üç farklı metan-amonyak karışımı (%100 CH₄, %90 CH₄- %10 NH₃, %80 CH₄- %20 NH₃ ve %70 CH₄- %30 NH₃ hacmine göre) yakıt olarak 0,7 eşdeğeri ve brülör gücü 5 kW olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, amonyak ilavesi arttıkça, %30 NH₃'e kadar alev kararsızlığı değerlerinde bozulmaların arttığı görülmektedir. Metan yakıtına amonyak eklenmesiyle yanma performansında önemli bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Metan gazına %30'dan fazla amonyak verildiğinde alevde sönme oluşmaktadır. Bu durum diğer araştırmacıların yapmış olduğu deneysel çalışmalarda da görülebilmektedir [22,26].

Yanma deneyleri saf metan yanması ile başlarken, amonyak ekleme testleri hacimce %10, %20 ve %30 oranında gerçekleştirilmiştir. Amonyak ilavesinin etkisini daha doğru görmek için, çalışmada bazı parametreler sabit tutulmuştur. Tüm deney koşullarında termal güç 5 kW olarak belirlenmiştir. Gaz türbini brülörlerinde yarattığı türbülans etkisi ile yanma verimliliğine katkıda bulunduğu bilinen türbülans geometrisi, brülör çıkışına yerleştirilmiştir. Girdap sayısı ise 1'de sabit tutulmuştur. Yanma deneylerine başlamadan önce, bu koşullar altında saf metan alevinin geri dönüş limiti 0,97 ve üfleme limiti 0,52 olarak belirlenmiştir. 0,7 eşdeğerlik oranı, tüm deneylerde sabit bir metan alevi elde edildiği bir değer olarak sabit tutulmuştur.

Çizelge 6.1. Yakıt karışımı akış hızları ve özellikleri

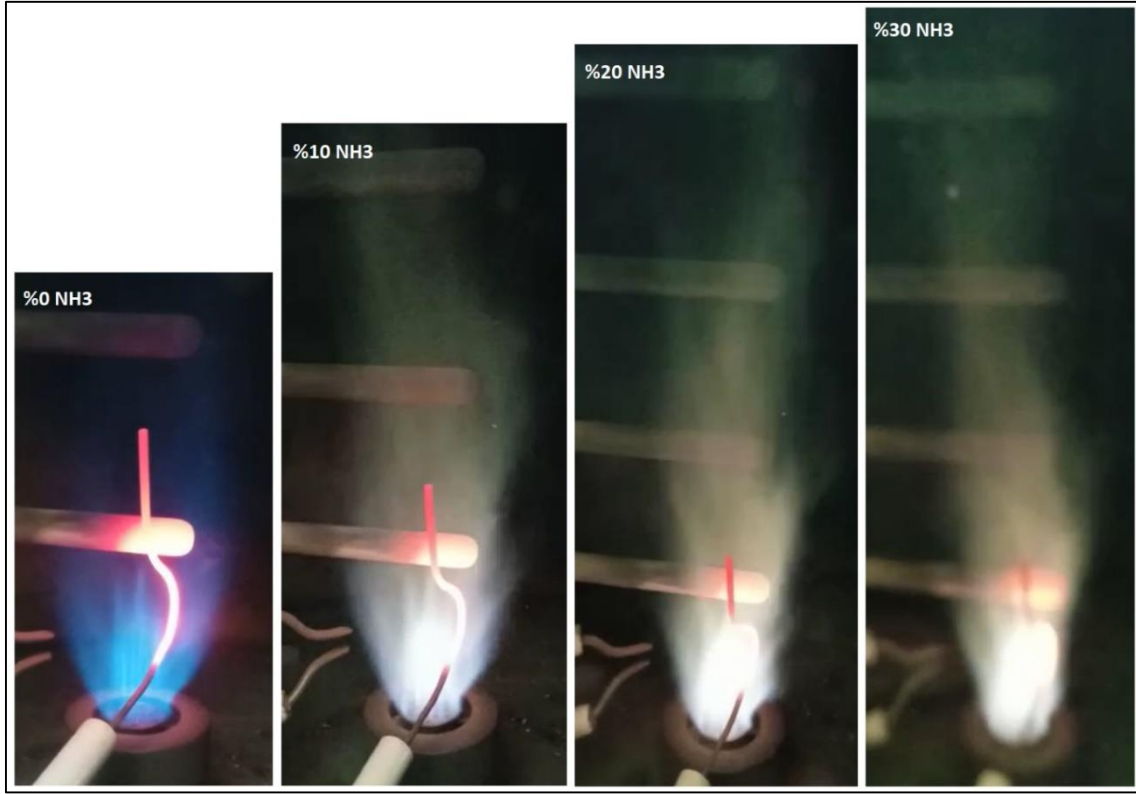
Yakıt Karışımı	CH ₄ (sccm)	NH ₃ (sccm)	Hava (sccm)	Alt Isıl Değer (kJ/kg)	Yakıt Akış Debisi (kg/h)
100CH ₄	8344	0	113480	50144	0,359
90CH ₄ – 10NH ₃	8040	894	113897	46817	0,384
80CH ₄ – 20NH ₃	7682	1920	114278	43532	0,413
70CH ₄ – 30NH ₃	7261	3112	114615	40286	0,447

Çalışmada, amonyak ilavesinin gaz türbini yanma odası sıcaklık dağılımına etkisi de araştırılmıştır. Şekil 6.6, amonyak ilavesinin bir sonucu olarak gaz türbini yanma odasındaki sıcaklık dağılımının değişimini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde, amonyak ilavesi oranı arttıkça brülör çıkış sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Brülör çıkışının 5 cm üzerindeki termokupludan elde edilen sıcaklık verilerine göre, saf metan alevindeki 1072 K sıcaklık değeri, amonyak ekleme oranı arttıkça sırasıyla 1053 K, 1041 K ve 1027 K olarak ölçülmüştür. Bu durumun adyabatik alev sıcaklığı ve amonyakın daha düşük kalorifik değer azaltma etkisinden kaynaklandığı söylenebilir [96]. Brülörün çıkış bölgesindeki sıcaklık düşüşüne rağmen, yanma odasının aksel sıcaklık dağılımında, özellikle %10 NH₃ oranında bir artış gözlenmiştir. Min ve diğerleri farklı seyrelticilerin metan alevi üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalarında, seyreltme gazlarının alev boyutunda bir uzamaya neden olurken, brülör çıkışında parlaklık ve sıcaklıkta bir düşüşe neden olduklarını belirtti. Amonyak eklenmesiyle, alev aksel olarak uzar ve brülör çıkışından daha yüksek aksel mesafelerde sıcaklıkta bir artış olur [97]. Alevdeki değişimi daha net yorumlamak için, alev görüntüleri amonyak ilavelerinin farklı oranlarında sunulmuştur.



Şekil 6.6. Amonyak ilavesi ile yanma odası sıcaklık dağılımları

Şekil 6.7’de, saf metan alevinin ve farklı oranlarda amonyak içeren yakıt karışımlarının alev görsellerinin önden görünümü sunulmaktadır. Görüntüler incelendiğinde, saf metan alevinin diğerlerinden daha kısa ve daha kalın olduğu görülmektedir. Özellikle ateşten elde edilen ve brülörden 5 cm eksenel mesafe uzakta olan termokupl üzerindeki alev oluşturduğu iz incelendiğinde, daha yüksek bir ışık yayımı olduğu açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, NH_3 yakıt karışımına eklendiğinde, alev uzunluğunun uzadığı ve kalınlığını kaybettiği görülmektedir. %30 NH_3 içeren yakıt karışımının oluşturduğu alev göz önüne alındığında, brülörde tutmakta zorlandığı söylenebilir. Saf metan alevinde, alevin türbülans jeneratöründen çıktığı noktadaki net ve kararlı yanma görüntüsü, amonyak ekleme oranı arttıkça daha bulanık ve kararsız hale geldi. Öte yandan, amonyak ekleme oranı arttıkça, alev uzunluğu, brülör çıkışının 20 cm üzerindeki termokuplda eksenel olarak artmıştır. Literatürde, oksijen ve hidrojen gibi katkı maddeleriyle zenginleştirilmiş yakıt karışımlarının alev parlaklığının arttığı, seyreltme etkisine sahip gazların alev parlaklığını azalttığı ve alevin uzamasına neden olduğu görülmektedir. Amonyak, ısıtma değeri nedeniyle yakıt olarak kullanılabilmesine rağmen, içindeki azot elementi nedeniyle de oldukça seyreltici bir etkiye sahiptir [48,98].



Şekil 6.7. Amonyak ilavesinin alev görüntüsü üzerindeki etkisi

Deneysel çalışmada, sıfır emisyon hedefleri açısından büyük avantajlar vaat eden amonyağın, yakıt olarak saf metana eklenmesi araştırılmıştır. Hacimsel oranlarda saf metana amonyak eklenerek, alev kararsızlığı etkisi de araştırılmıştır. Sonuçlar aşağıdaki gibidir;

- Amonyak ilavesi oranı %20 ve üstüne çıktıkça, üfleme sınırına yaklaşmış ve alev kararsızlığı artmıştır.
- Amonyak ilavesi seyreltme etkisine neden olduğundan alev sıcaklığını ve parlaklığını azaltırken alev uzunluğunun uzatılmasına neden olmuştur.
- Metan karışımının yanmasındaki maksimum sıcaklık seviyesinin, yakıt karışımına amonyak eklenmesiyle ortalama 100 K sıcaklık değişimi görülmüştür. Bunun nedeni, sağlanan toplam sıcaklığın ısı yüküne göre hesaplanmasıdır.
- Metan/amonyak karışımında alev konumu, saf metana kıyasla daha düşük yanma oranı nedeniyle yanma odasında daha da ileri düzeydedir.

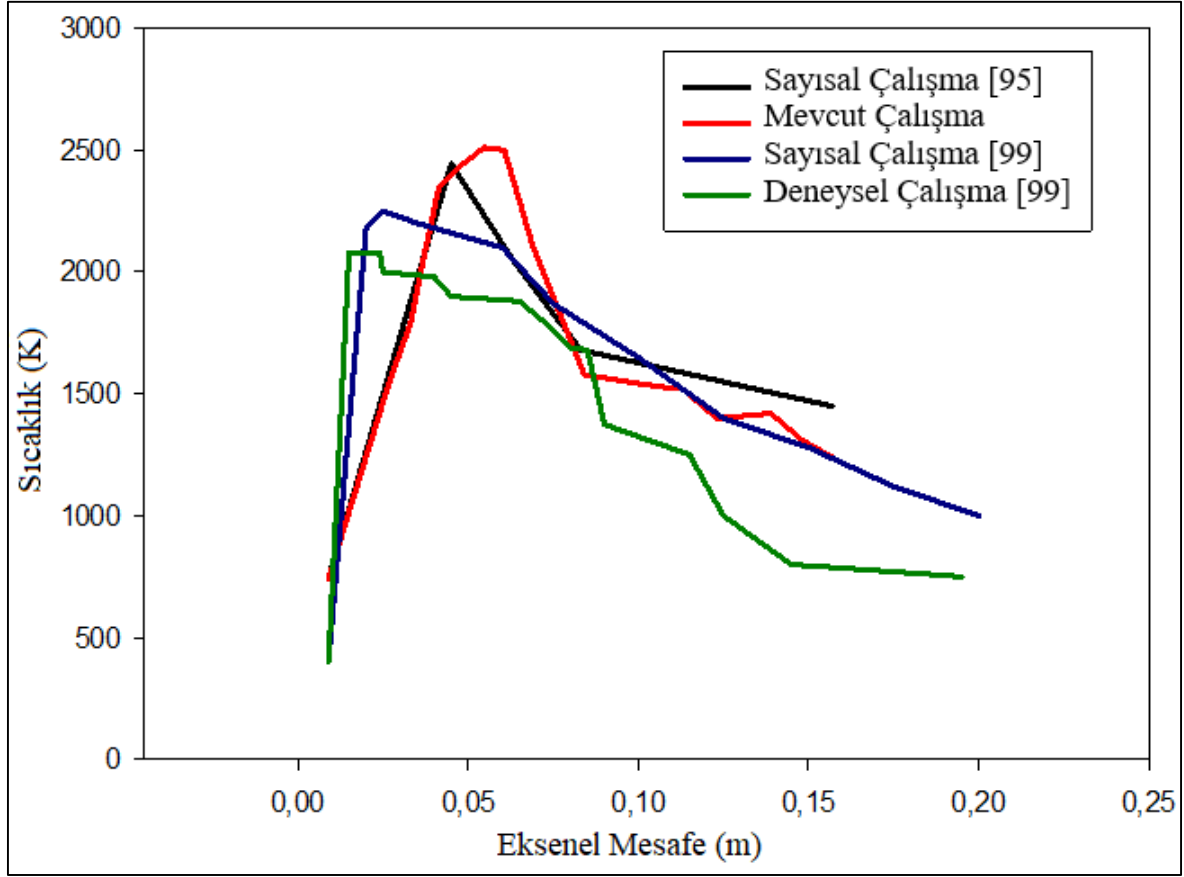
6.3. Sayısal Modelleme Sonuçları

Deneysel çalışma ile birlikte katı modeli oluşturulan gaz türbinli yanma odasının doğruluğu sağlanmıştır. Ayrıca çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar ile de validasyon yapılmış olup Şekil.6.8'de gösterilmiştir. Sayısal çalışmada Kerosen, Hidrojen ve Metan gazları için Amonyak ilaveleri çalışılmıştır. Ayrıca çeşitli açılardan analizleri yapılarak sıcaklık ve emisyon sonuçları tez kapsamında sunulmuştur.

6.3.1. Amonyak/kerosen yakıt karışımlarının sayısal modelleme sonuçları

Bu çalışma da türbülanslı yanma amonyak destekli kerosen yakıtlarını, bir model gaz türbini yanma odasında hava ve saf oksijen yanma koşullarıyla araştırma yapılması amaçlanmıştır. Amonyak, farklı girişlerden yanma odasına gönderilmiştir. Amonyak bileşimi, 151 fraksiyonu ile %10'luk bir aralıkta %70 kerosen - %30 amonyak karışımına kadar belirlenmiştir. Bu ekleme sırasında, sağlanan toplam ısı yükü sabit tutulmuştur. Sonuçlar, kerosenin yanma performansında önemli bir değişiklik olmadığını göstermiştir. Bununla birlikte, maksimum sıcaklık seviyeleri ve konumları, yanma odasına amonyak ilavesi ile bir miktar değişmiştir. Kerosen ve amonyak-kerosen yakıtlarının sıcaklık dağılımlarına ek olarak, bu sayısal çalışmada NO_x emisyon seviyeleri de incelenmiştir. Öngörülen NO_x seviyelerine göre, öngörülen NO_x emisyon seviyelerinin amonyak içindeki bağlı azot (yakıt-NO_x mekanizması) nedeniyle yüksek sıcaklık alev bölgesinde önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Ancak, öngörülen NO_x emisyon seviyeleri yanma odasının çıkışında çok yüksek olmamıştır. Bu nedenle, amonyak-kerosen yakıtlarının yeni ve yenilenebilir bir yakıt olarak yanma performansı açısından önemli bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varılabilir.

Herhangi bir sayısal çalışmada bir sonraki modelleme adımına devam etmek için, tahmin edilen sonuçlar önce literatürden elde edilen referans değerle karşılaştırılmalı ve doğrulanmalıdır. Bu amaçla, bu çalışmada öngörülen ve literatürden elde edilen [95,99] %100 kerosen aksel sıcaklık profilleri Şekil 6.8'de görüldüğü gibi doğrulanmıştır. Şekil 6.8'e göre, öngörülen aksel sıcaklık profillerinin, sıcaklık profilleri açısından literatürden elde edilen sonuçlarla tatmin edici derecede iyi bir uyum içinde olduğu söylenebilir. Böylece, sayısal analizlere devam edilebileceği sonucuna varılmıştır.

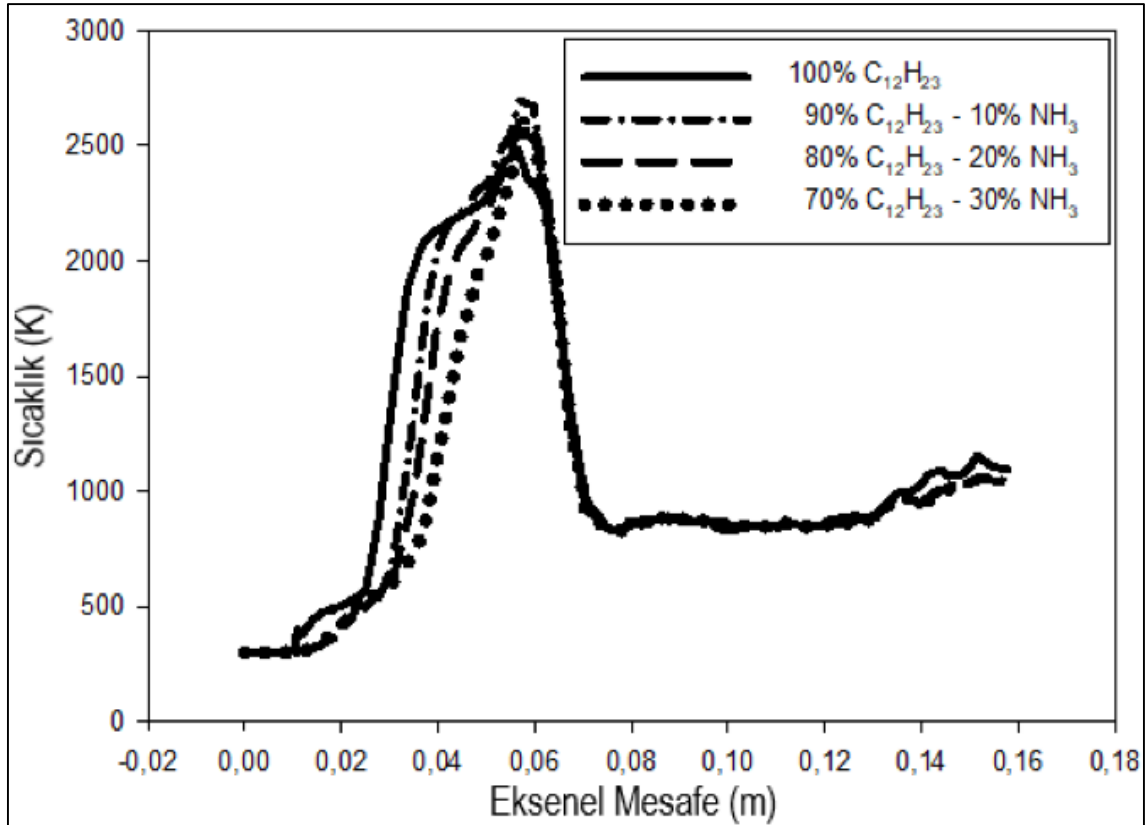


Şekil 6.8. Eksenel sıcaklık profillerinin karşılaştırılması tahmin ve elde edilen [95,99]

Referans çalışmada [99], Bunsen brülöründe kerosen yakılmıştır. Tüm analizler için eksenel sıcaklık profilleri (mevcut modelleme, deneysel ve sayısal sonuçlar rapor edilmiştir) bu çalışmada sunulmuştur. Sonuçlar, aynı yakıt kullanıldığında bile eksenel profiller arasında bazı farklılıklar olduğunu göstermektedir. Bu, her iki çalışma için de kullanılan farklı brülör ve yanma odası nedeniyle açıklanır.

Şekil 6.9'da incelenen tüm durumlar için eksenel sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Şekil 6.9'da görüldüğü gibi, alevdeki hızlı reaksiyon nedeniyle primer bölgede tüm analizler için sıcaklık seviyeleri hızla artmıştır. Daha sonra, tüm analizler için sıcaklık seviyeleri, alevler ikincil ve seyreltme hava akışları nedeniyle ikincil bölgedeki yanıcıya yayıldığında büyük ölçüde azalmıştır. Ayrıca, sıcaklık seviyelerinin, gaz türbinlerindeki yanma odası içindeki sıcaklık seviyelerini kontrol etmek için kullanılan ikincil ve seyreltme hava girişleri nedeniyle yanma odası çıkışına doğru neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Kerosen alev sıcaklığının, amonyak yanma odasına sokulduğu için %5 kadar düşük bir oranda değiştiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tüm amonyak yakıtlı analizlerde alevlerin yanma odası

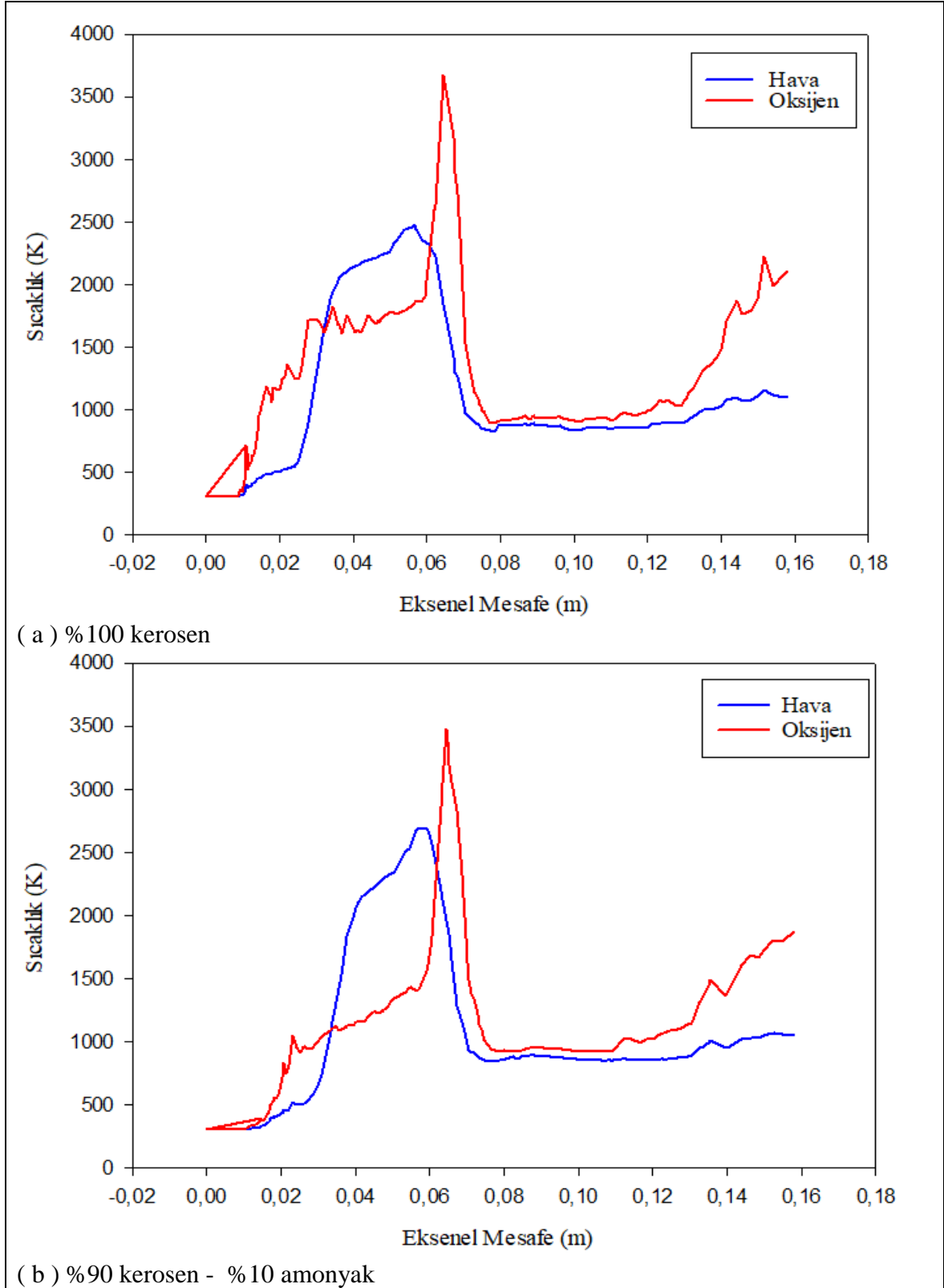
çıkışına yayıldığı söylenebilir. Bu, hidrokarbona kıyasla amonyağın daha düşük yanma hızına sahip olmasıyla açıklanır [100]. Başka bir deyişle, karışımın toplam hızı yanma hızından daha yüksektir. Kerosen ve amonyak-kerosen yakıtlarının maksimum sıcaklık değerleri sırasıyla %100 kerosen, %90 kerosen - %10 amonyak, %80 kerosen - %20 amonyak ve %70 kerosen - %30 amonyak için 2475 K, 2587 K, 2613 K ve 2655 K değerindedir.



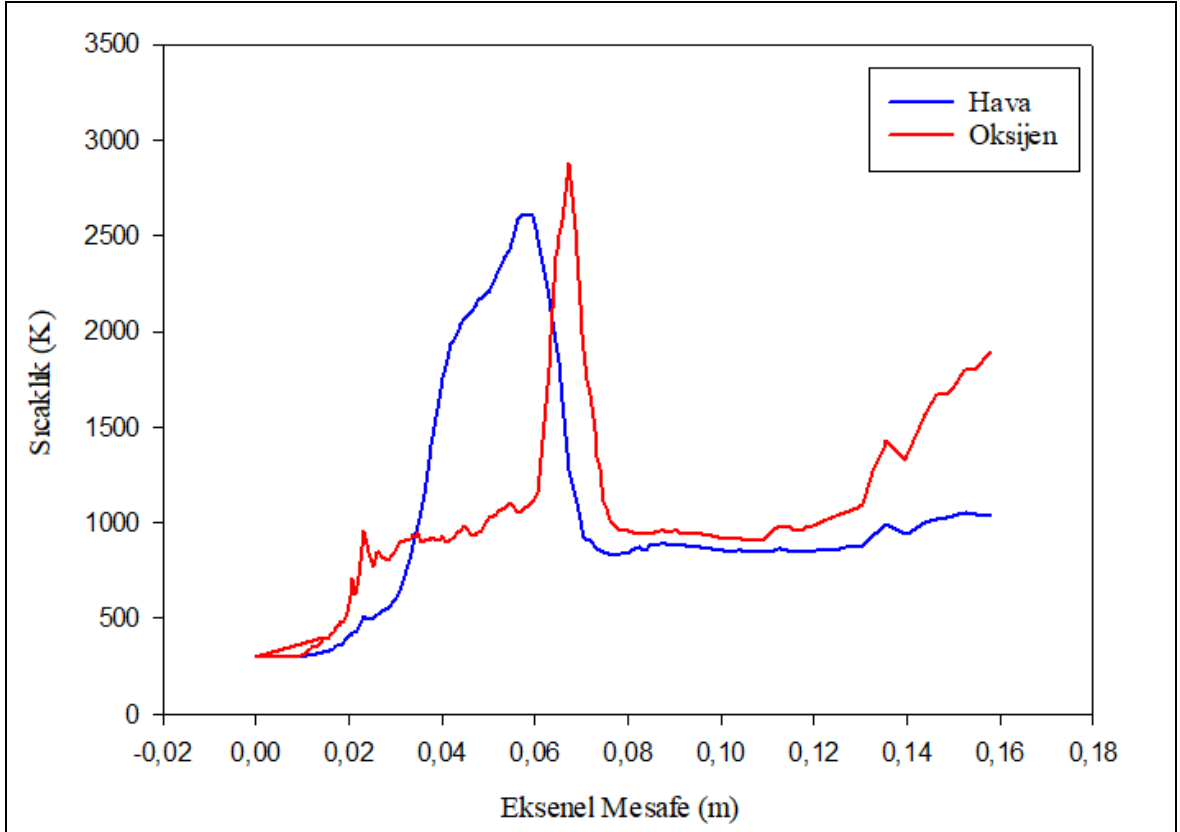
Şekil 6.9. Tüm hava yanma analizleri için öngörülen aksenal sıcaklık profilleri

Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 sıcaklık profillerini ve % 100 kerosen, %90 kerosen - %10 amonyak, %80 kerosen - %20 amonyak ve %70 kerosen - %30 amonyak yakıtlarının sıcaklık konturlarını göstermektedir. Şekil 6.10 aksenal profilleri temsil ederken, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12 hava ve saf oksijen yanma koşulları altında radyal ve kesit konturlarını verir. Rakamlar incelendiğinde, kerosenin maksimum sıcaklık seviyesinin, yanma odası içindeki amonyak ilavesi ile fazla değişmediği görülmektedir. Aksine, alevin yeri, düşük yanma hızı nedeniyle daha da ileri taşınmıştır. İkincil ve seyreltme hava akışlarının yanma odasına sokulduğu ikincil bölgeden sonra, incelenen tüm durumlar için sıcaklık dağılımlarının

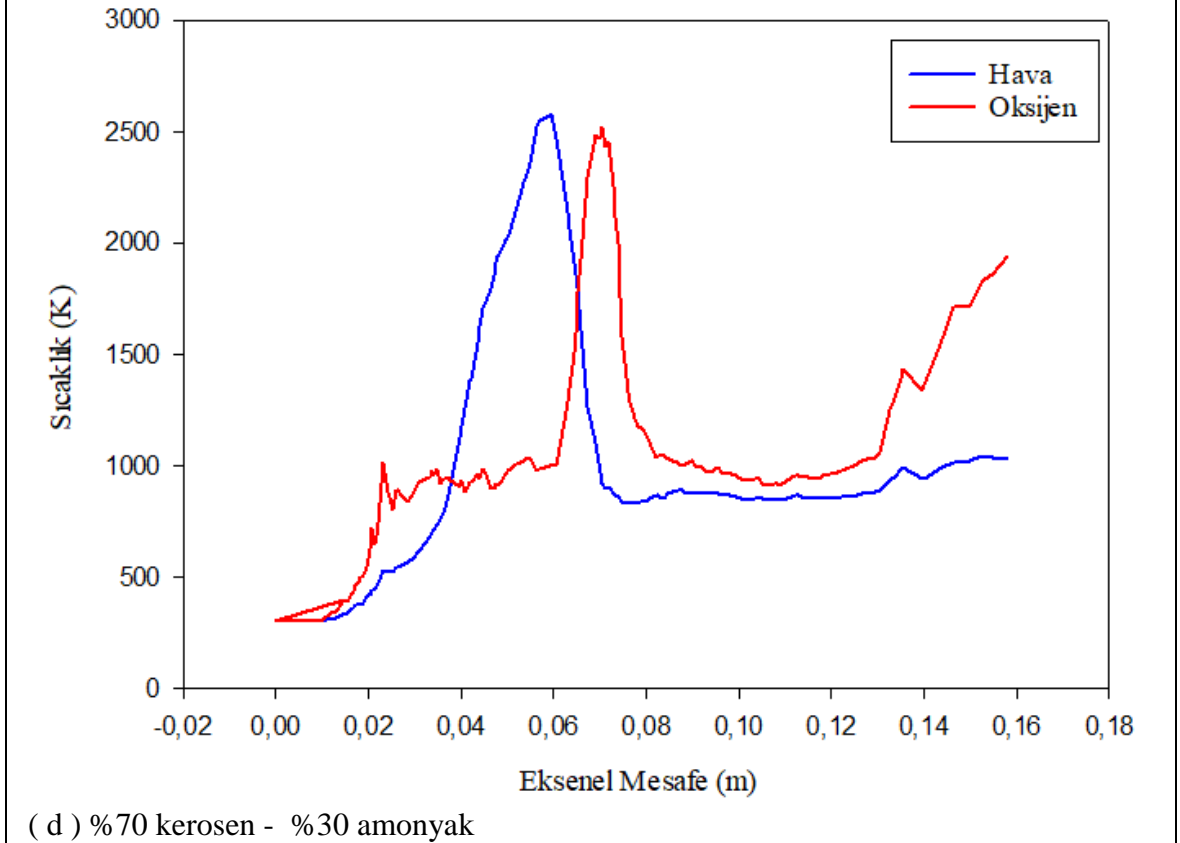
neredeyse aynı olduğu söylenebilir. Çıkış sıcaklığı değerlerinin değerlendirilmesine gelince, oksijen kullanılırken çıkış sıcaklıklarında önemli bir değişiklik olmadığı söylenebilir.



Şekil 6.10. Farklı yakıt karışımları ve farklı oksitleyiciler için aksenal sıcaklık profilleri

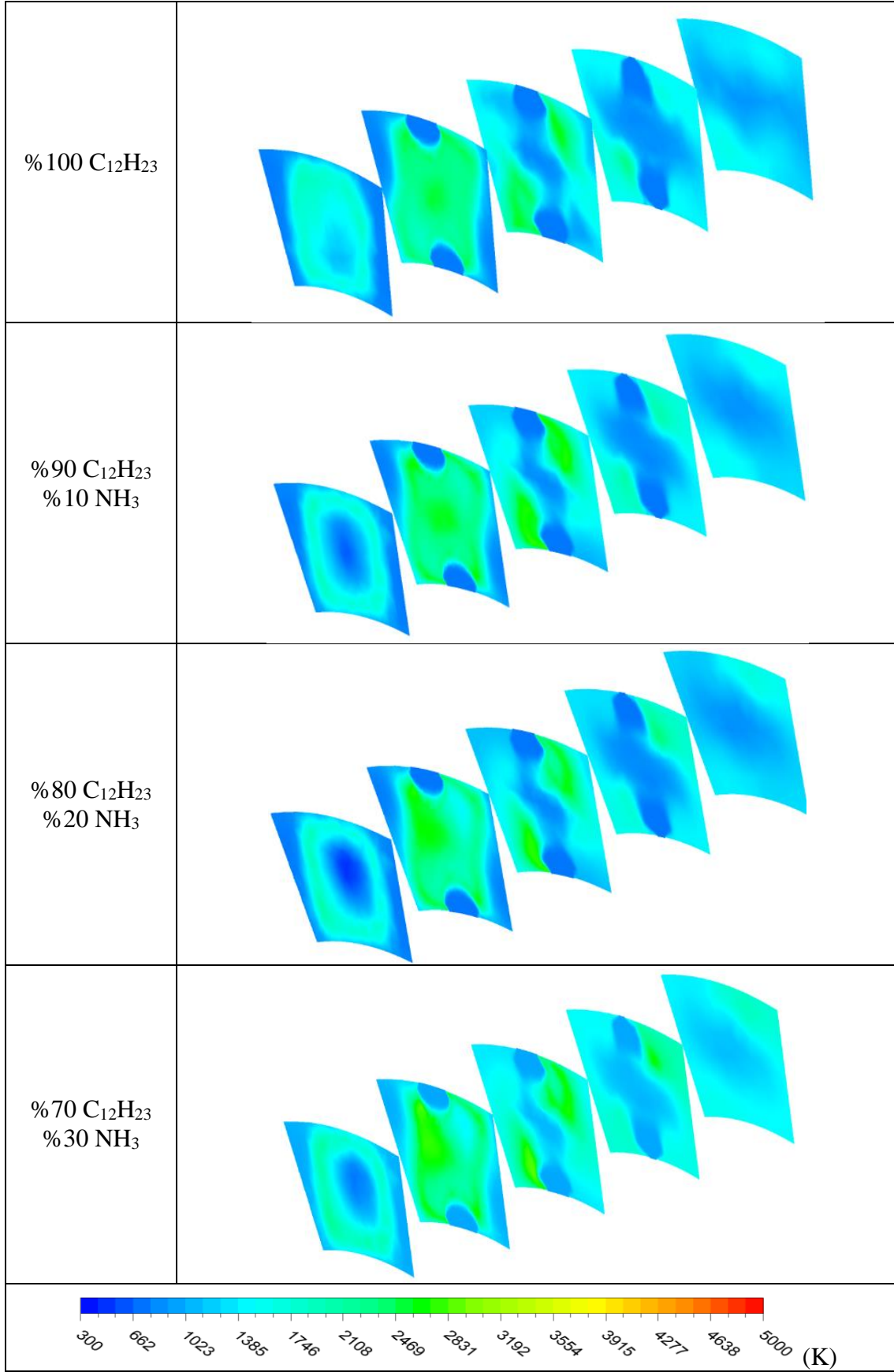


(c) %80 kerosen - %20 amonyak

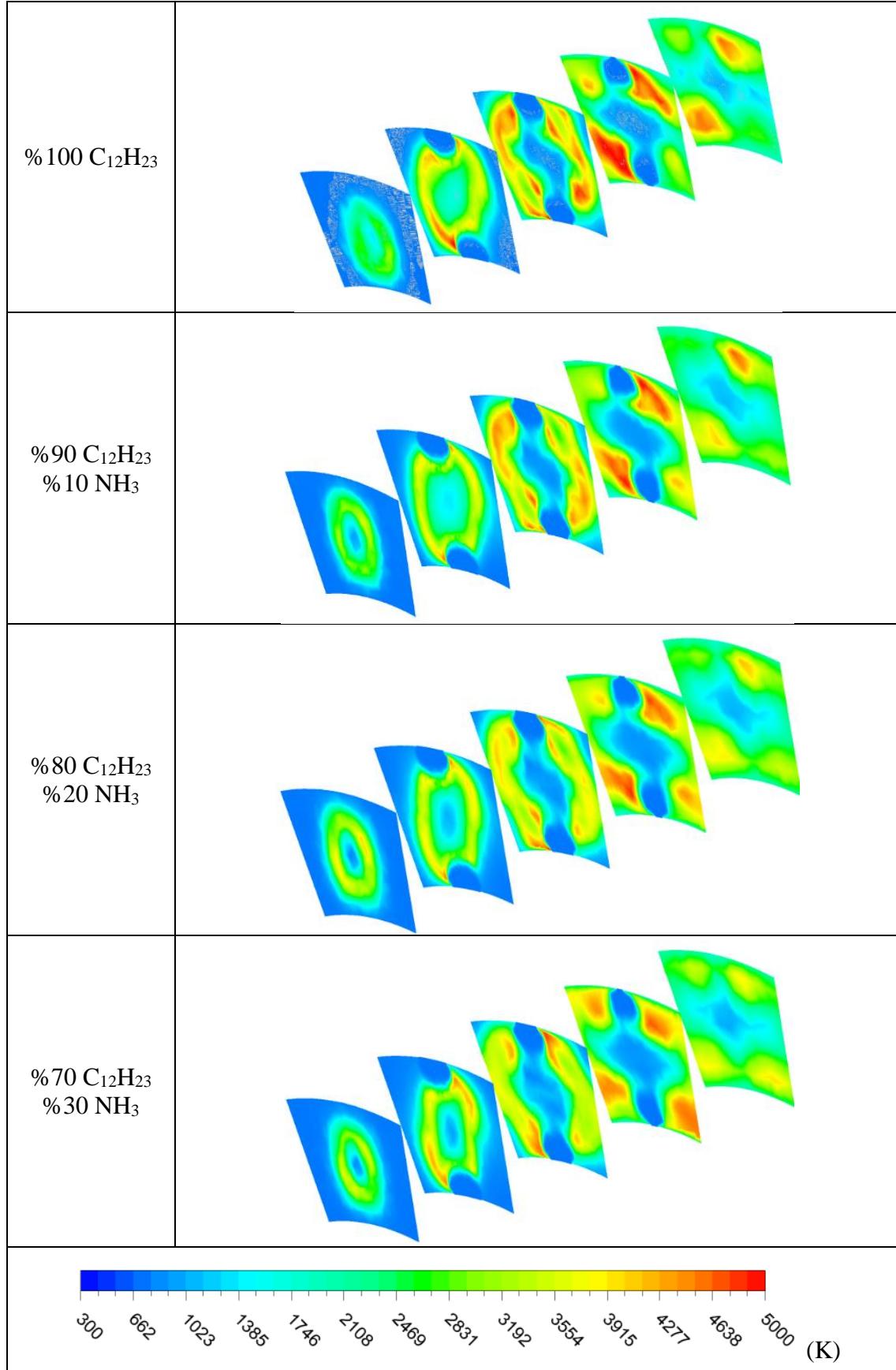


(d) %70 kerosen - %30 amonyak

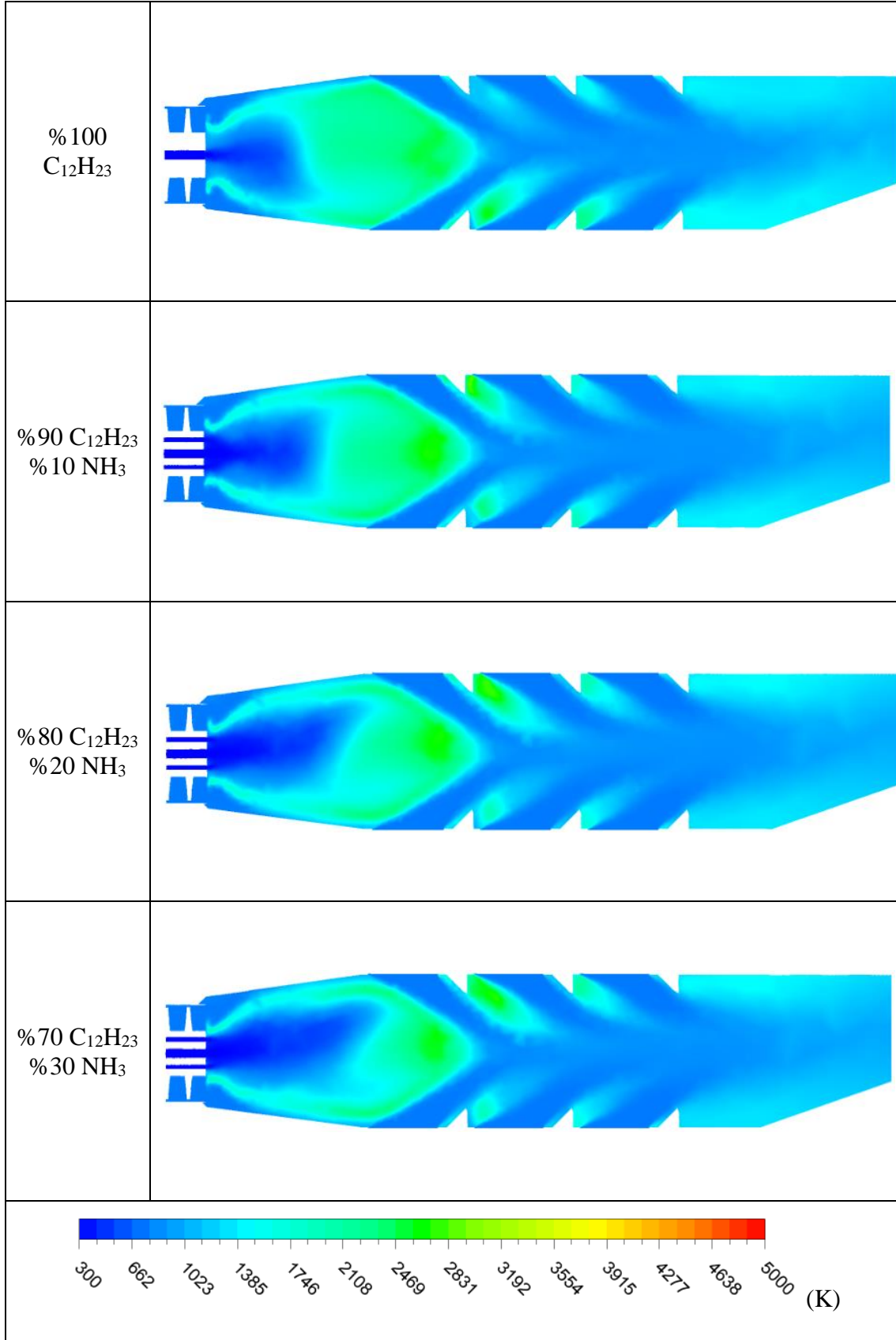
Şekil 6.10. (devam) Farklı yakıt karışımları ve farklı oksitleyiciler için eksenel sıcaklık profilleri



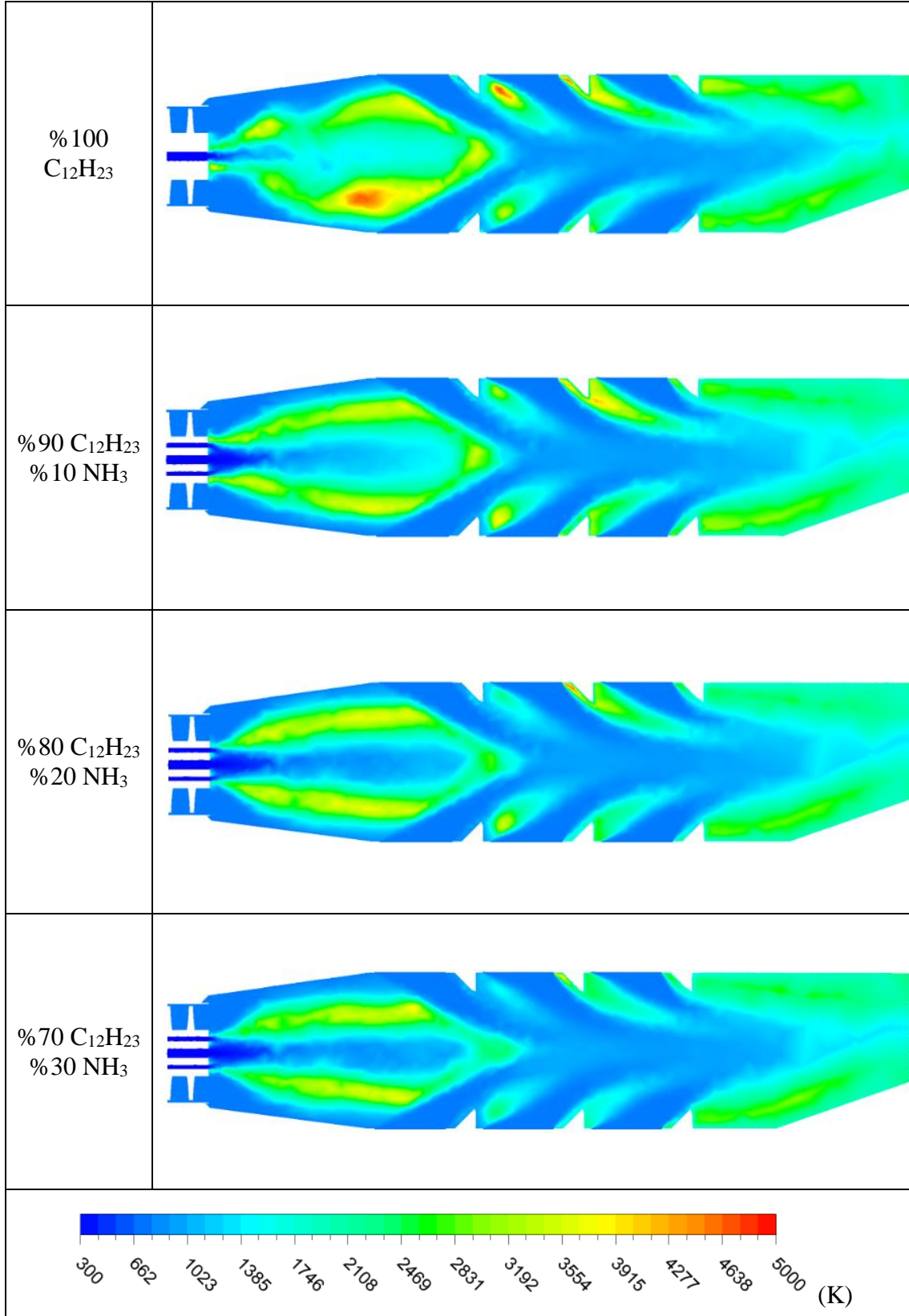
Şekil 6.11. Radyal sıcaklık hava altında farklı yakıt karışımları için konturlar



Şekil 6.12. Radyal sıcaklık oksî-yanma altında farklı yakıt karışımları için konturlar



Şekil 6.13. Kesit sıcaklık konturları hava yanma altında farklı yakıt karışımları için

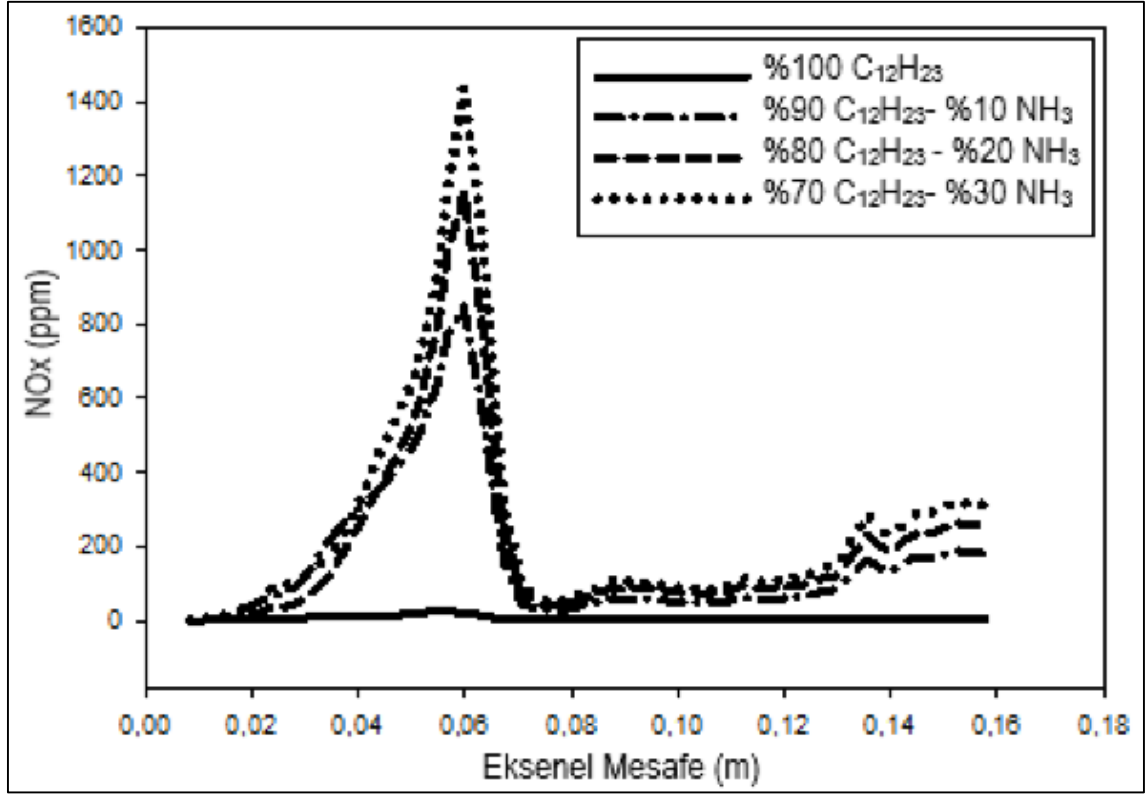


Şekil 6.14. Kesit sıcaklık konturları oksji yanma altında farklı yakıt karışımları için

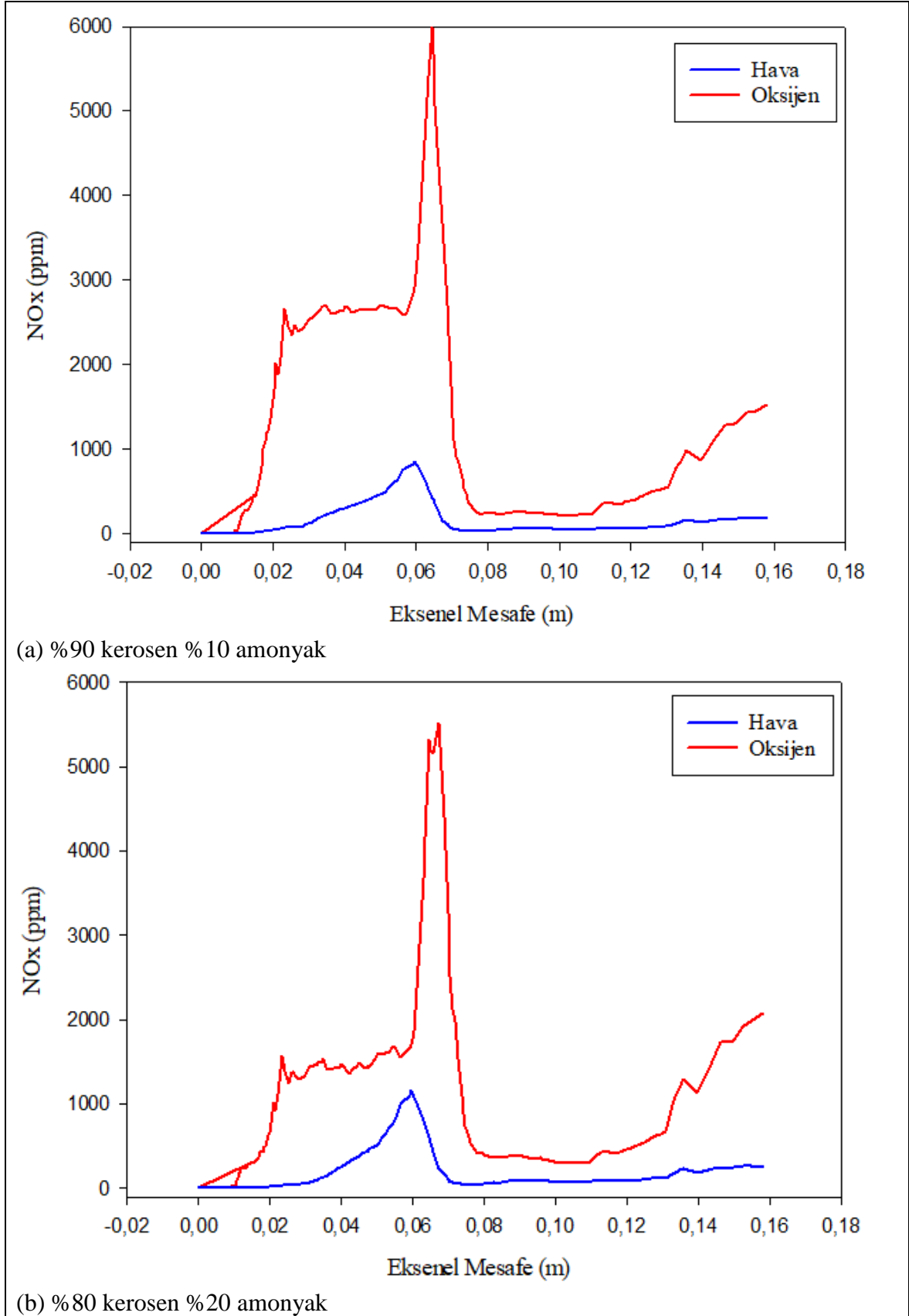
Amonyak ilavesinin etkisini anlamının diğeri yolu, yanma odası boyunca radyal sıcaklık konturlarını incelemektir. İncelenen tüm durumlar için radyal sıcaklık konturları farklı aksenal mesafelerde (3 cm, 5,5 cm, 8 cm, 10,5 cm ve 13 cm'de) elde edilir. Tüm sonuçlar için sıcaklık konturları Şekil 6'da her bir durum için sunulmaktadır. Şekil 6'da da görüldüğü gibi, yanma odasına amonyak verildiğinde sıcaklık seviyeleri hemen hemen aynı olmuştur. Bununla birlikte, Şekil 6'dan, amonyak ekleyerek daha da ileri taşınan yüksek sıcaklık bölgelerini anlamak mümkündür. Özellikle, %80 kerosen - %20 amonyak ve %70 kerosen - %30 amonyak yakıtları için, yeni aksenal konumda (10,5 cm aksenal mesafe) yeni yüksek sıcaklık bölgeleri ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, daha yüksek karışım akış hızı ile birlikte amonyağın daha düşük yanma hızıdır. Swirlerin sıcaklık dağılımları üzerindeki etkisi, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12.'de sunulan radyal sıcaklık konturlarından da görülebilir. Böylece, alevin, karışımın teğet hızı nedeniyle yanma odası duvarlarına çok daha fazla yayıldığı söylenebilir. Sıcaklık alanları üzerindeki oksijen-yanma etkisinin incelenmesine gelince, alevin yanma odasının merkezine yerleştirildiği görülebilir. Bu, daha düşük karışım akış hızı (sadece hava yerine oksijen kullanarak) ve daha yüksek sıcaklık seviyesi ile (daha yüksek alev hızı) açıklanabilir.

Çizelge 6.2. Öngörülen çıkış sıcaklık değerleri

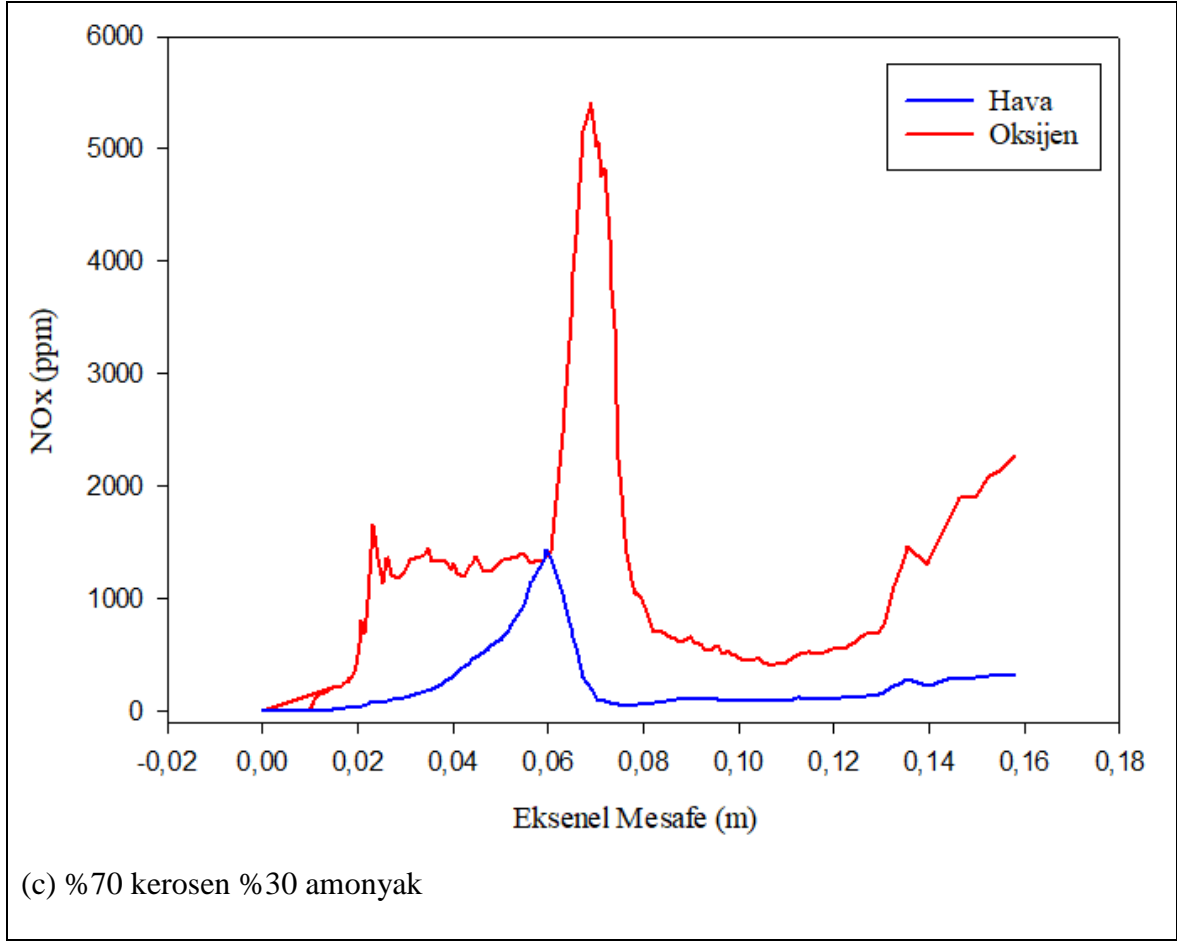
	Oksijen	Hava
% 100 C ₁₂ H ₂₃	2105,12 K	1095,04 K
% 90 C ₁₂ H ₂₃ - % 10 NH ₃	1965,37 K	1044,55 K
% 80 C ₁₂ H ₂₃ - % 20 NH ₃	1889,40 K	1034,99 K
% 70 C ₁₂ H ₂₃ - % 30 NH ₃	1835,00 K	1024,14 K



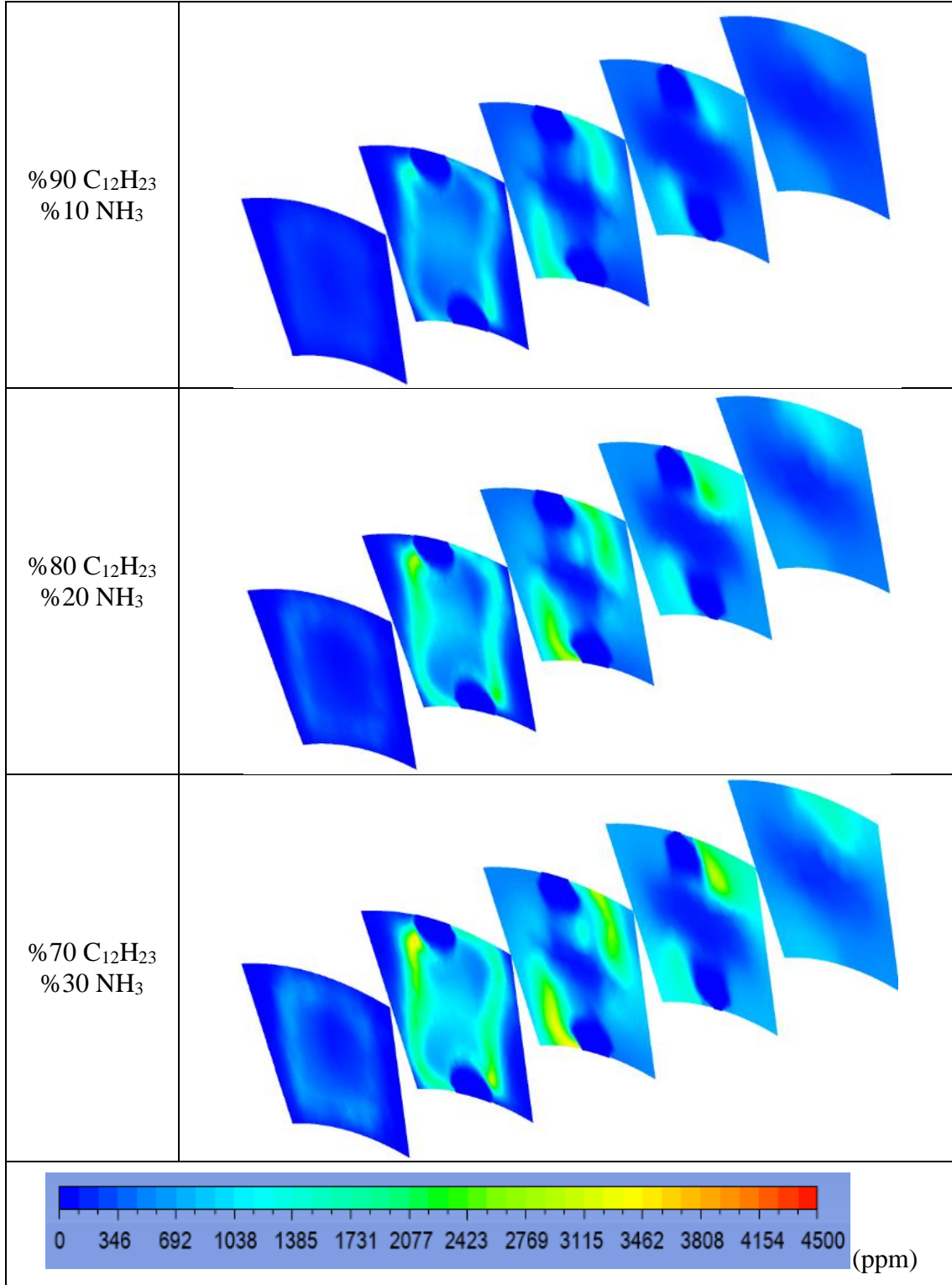
Şekil 6.15. Tüm hava yanma durumları için öngörülen NO_x profilleri



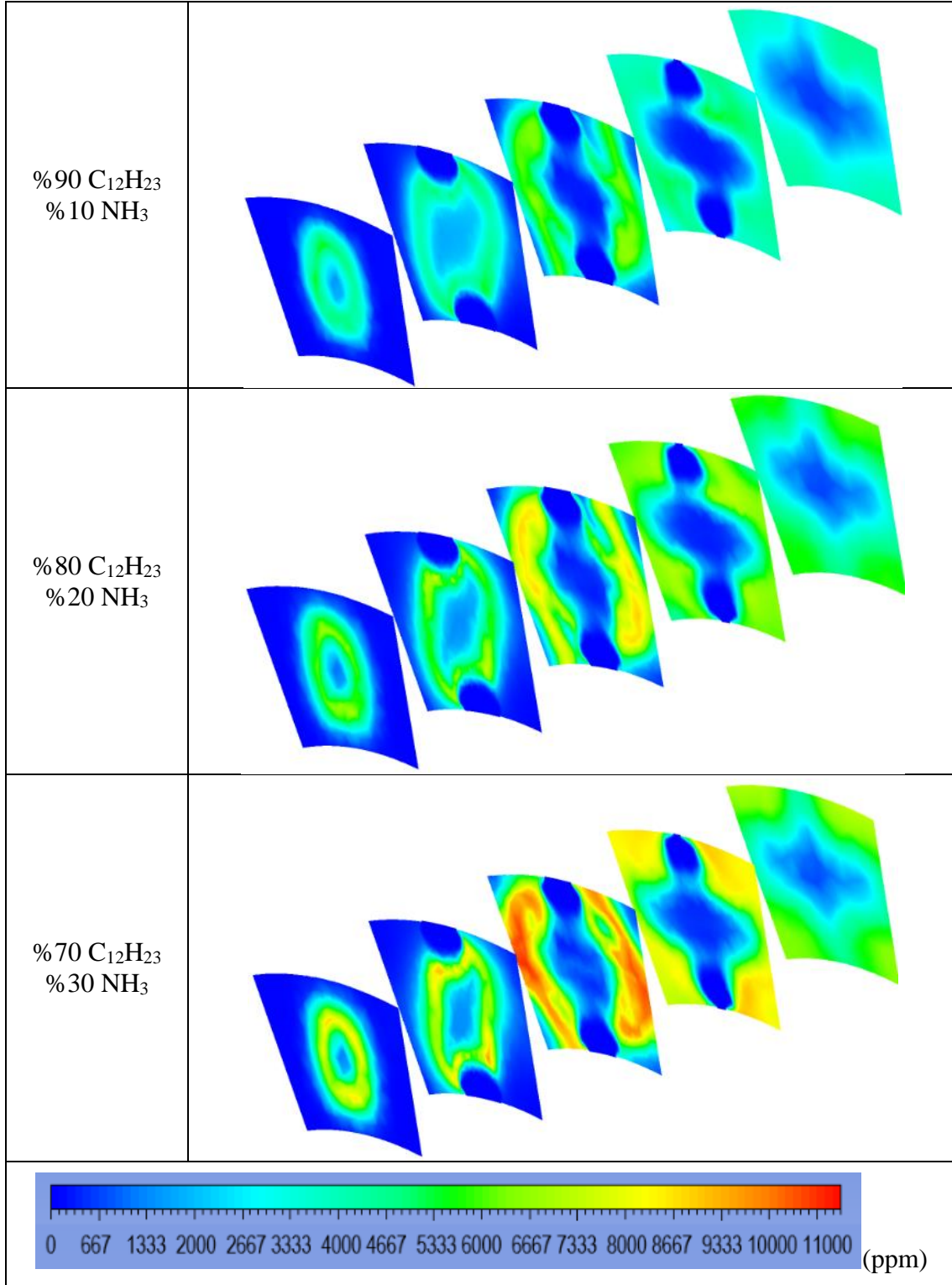
Şekil 6.16. Çeşitli yakıt karışımlarında hava ve oksijen yanması için öngörülen aksenal NO_x profilleri



Şekil 6.16. (devam) Çeşitli yakıt karışımlarında hava ve oksijen yanması için öngörülen eksenel NO_x profilleri



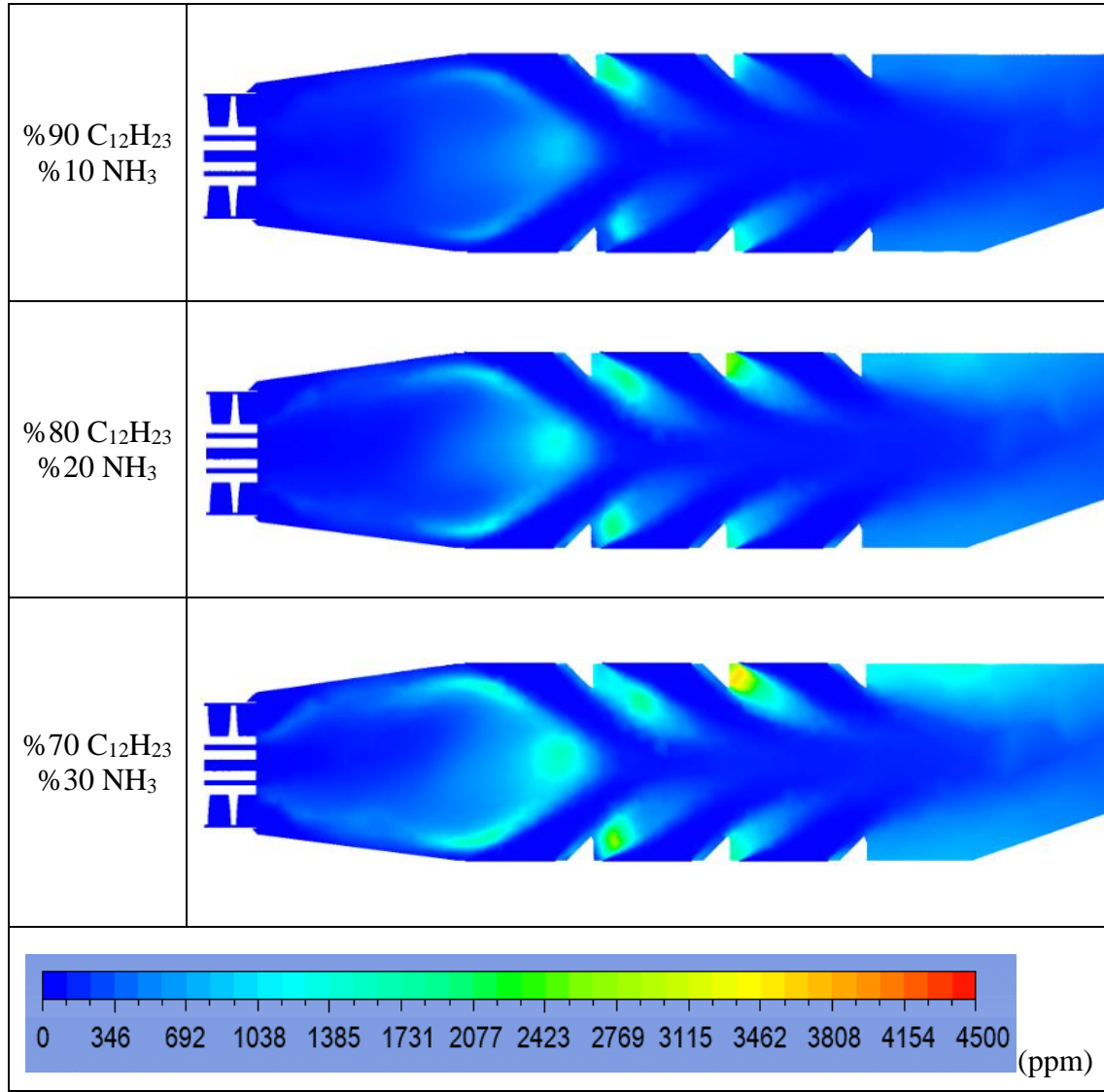
Şekil 6.17. Hava için radyal NO_x dağılımı - çeşitli yakıt karışımları için yanma



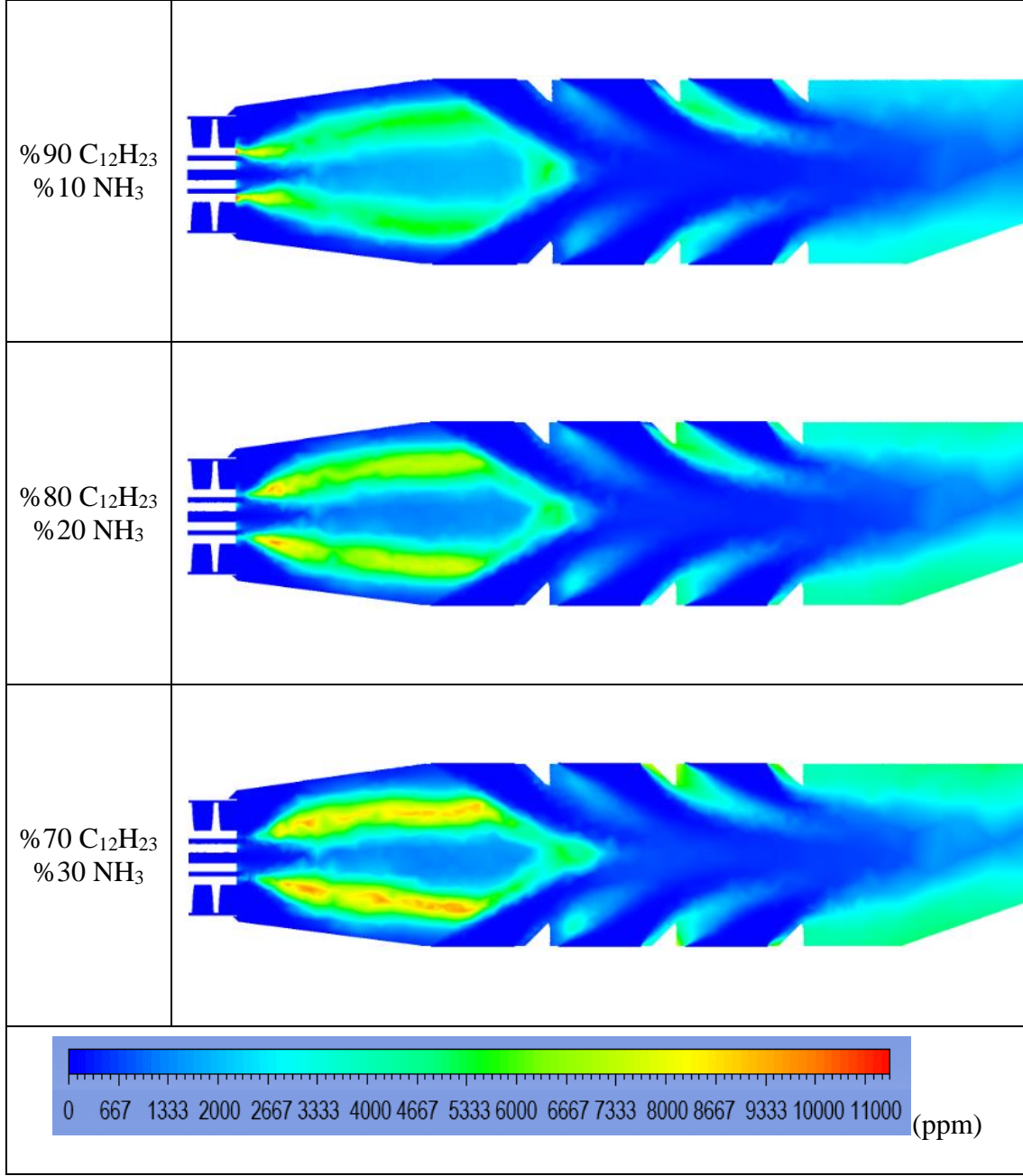
Şekil 6.18. Oksijen için radyal NO_x dağılımı - çeşitli yakıt karışımları için yanma

İncelenecek diğer önemli yanma parametresi NO_x emisyonudur. Bu kirletici emisyonu termal, hızlı ve yakıt NO_x mekanizmalarından kaynaklanır. Şekil 6.19, incelenen tüm durumlar için aksenal NO_x profillerini gösterir. NO_x seviyesi, amonyak destekli yakıtlara kıyasla %100 kerosen yanma durumunda ihmal edilebilir. Bununla birlikte, öngörülen NO_x

seviyeleri, özellikle birincil bölgede yakıt NO_x mekanizması nedeniyle amonyak girişi ile yükselmiştir. Şekil 6.20, hava yerine oksijen kullanımının, öngörülen NO_x seviyeleri üzerinde bir oksitleyici olarak etkisini vermektedir. Yüksek sıcaklık bölgelerinde oksijen yanma sırasında termal NO_x mekanizması nedeniyle yüksek NO_x oluşumunu belirler. Amonyak ilavesi ve oksijen kullanımı ile ortaya çıkan aynı sonuçlar Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'den de görülebilir. Bu sonuçlara göre oksijenin oksitleyici olarak kullanılmasının çok daha fazla NO_x kirlenici seviyesine yol açtığı ortaya çıkarılabilir. Ayrıca, amonyak ilavesi ile, amonyakta yakıtla bağlı azot varlığı nedeniyle daha fazla NO_x oluşumunun ortaya çıktığı gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Farklı karışımlar için hava eksenel NO_x dağılımı



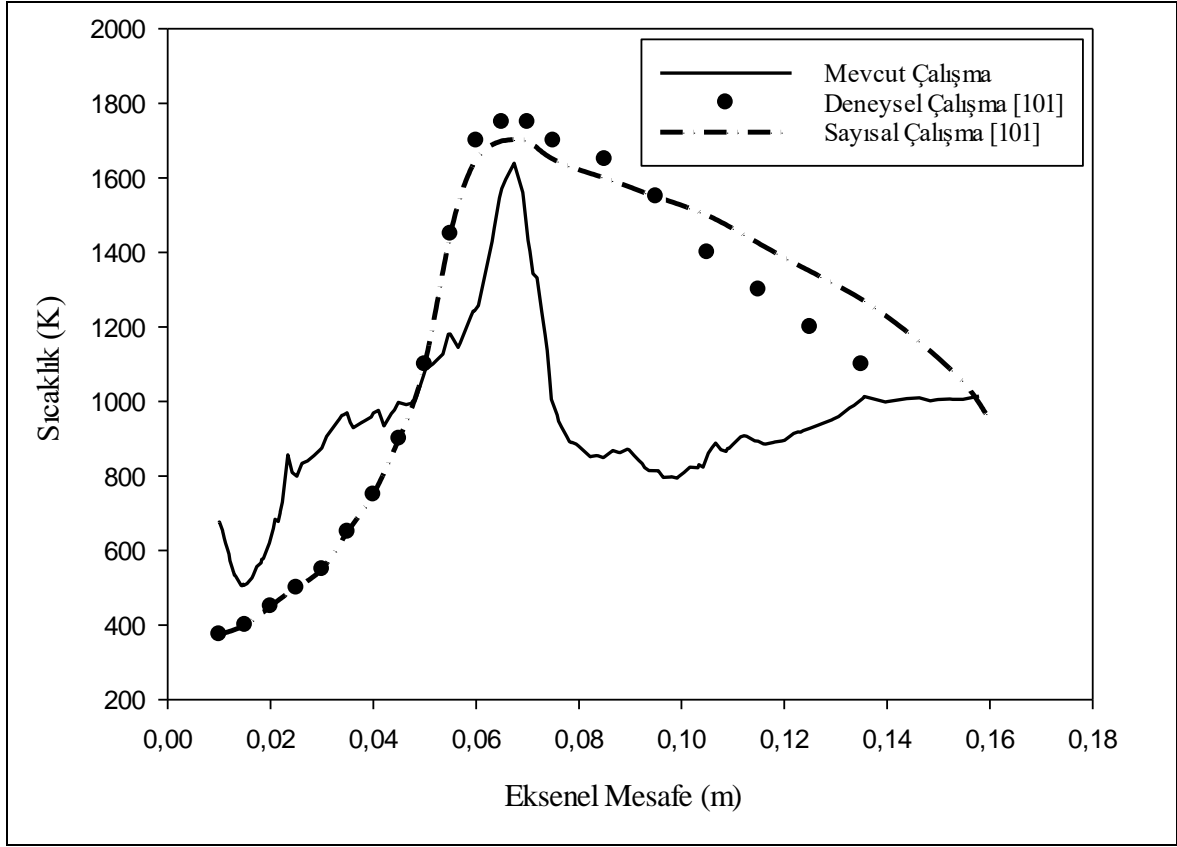
Şekil 6.20. Farklı karışımlar için oksijen-yanmanın aksel NO_x dağılımı

Her durum için NO emisyon indeksleri, yanma odasındaki maksimum NO değeri dikkate alınarak belirlenmiştir. %100 kerosen, %90 kerosen- %10 amonyak, %80 kerosen- %20 amonyak ve %70 kerosen- %30 amonyak yakıtları için NO emisyon indeksleri sırasıyla 0,358 g/kg, 9,58 g/kg, 14,26 g/kg ve 19,99 g/kg olarak hesaplanmıştır. İncelenen tüm durumlar için hesaplanan NO emisyon indekslerinden de anlaşılacağı üzere yanma odasına amonyak ilavesi ile NO emisyon indeksleri artmıştır.

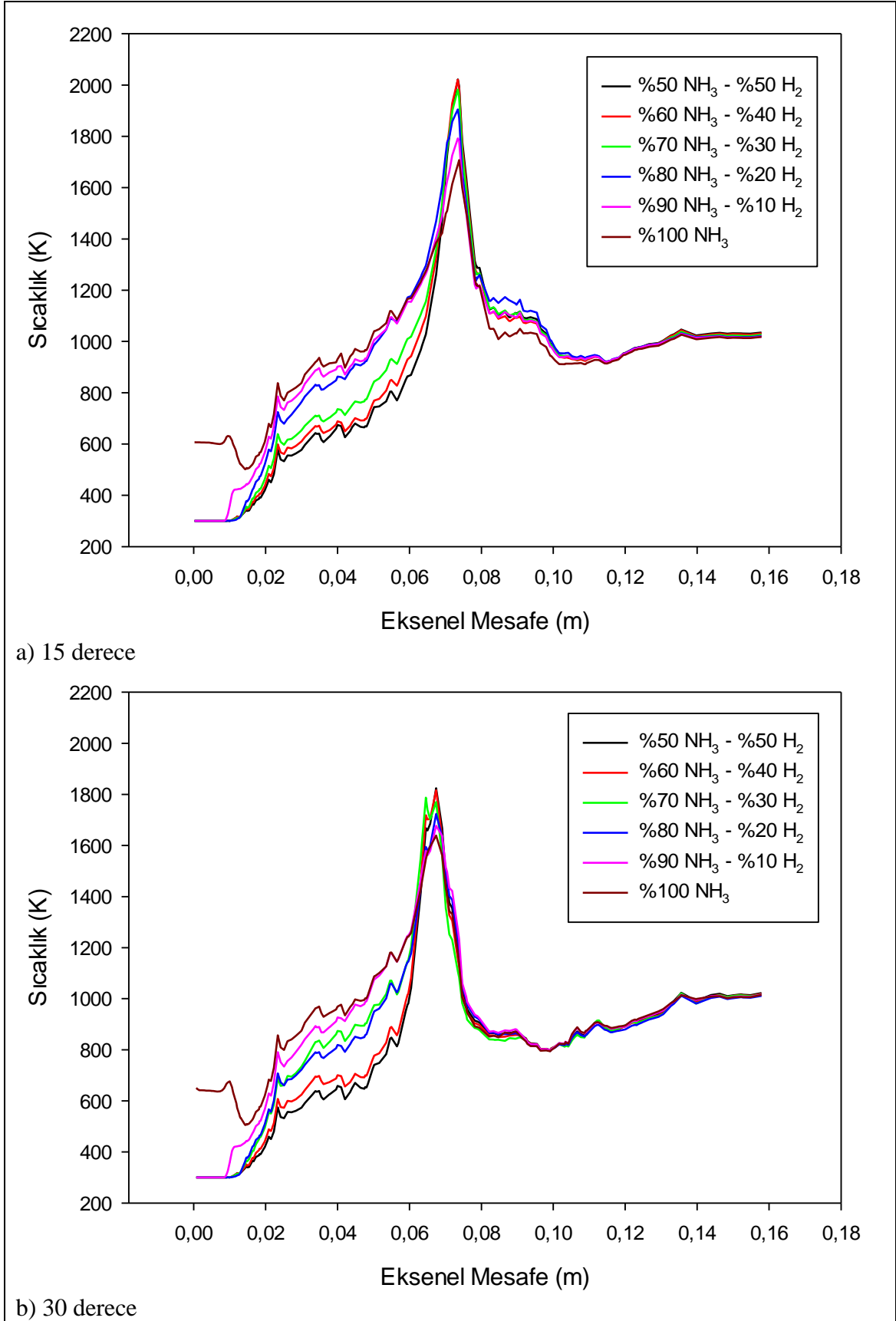
6.3.2. Amonyak/hidrojen yakıt karışımlarının sayısal modelleme sonuçları

Bu çalışmada, farklı soğutma açlarına sahip (15 derece, 30 derece ve 45 derece) türbülanslı bir girdap gaz türbini yanma odasındaki amonyak-hidrojen yakıtlarının (%10'dan %50'ye) hesaplamalı akışkanlar dinamiği kodu kullanılarak sayısal modellemesi yapılmıştır. Amonyak ilavesiyle yanma odasındaki maksimum sıcaklık seviyelerinin düştüğü ve alevin olduğu bölgelerde amonyağın yanma hızının daha düşük olması nedeniyle alevin yanma odası egzozuna doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Yanma odasına amonyak eklenmesi, amonyak yakıtındaki bağlı nitrojen nedeniyle alev çekirdeğindeki NO_x seviyelerini hızla arttırsa da, çıkışta tahmin edilen NO_x seviyeleri tüm durumlar için yakın gibi görünmektedir. Sonuç olarak, amonyak-hidrojen karışimli yakıtların, gaz türbini yanma odaları için yanma performansı açısından önemli bir seçenek ve sürdürülebilir yakıt olarak önemli bir olasılığa sahip olduğu sonucuna varılabilir.

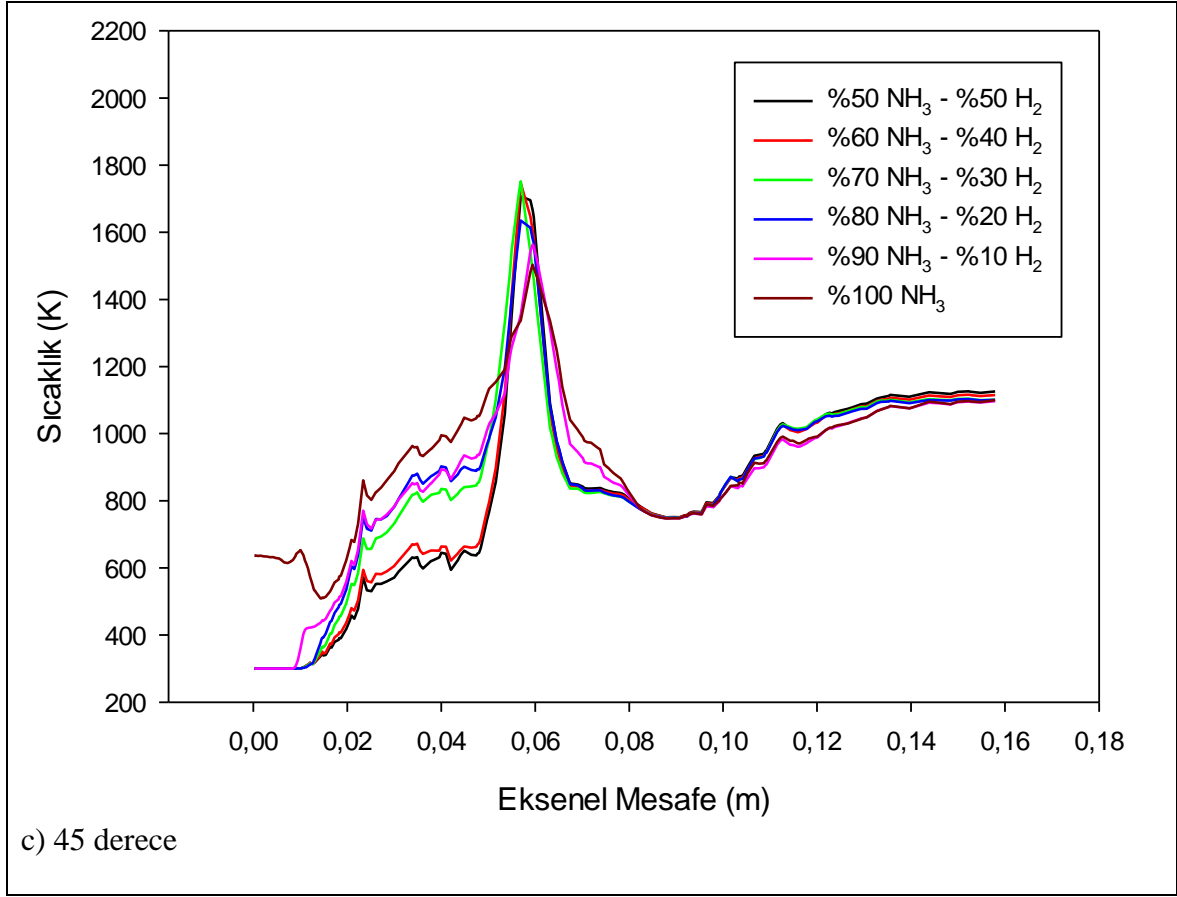
Analiz modelleme adımında, herhangi bir hesaplama başlamadan önce, tahmin edilen sonuçların literatürden alınan çalışma değerleri ile karşılaştırılması ve doğrulanması gerekir. Şekil 6.8'de gösterildiği gibi %100 amonyak aksenal sıcaklık değerleri (her ikisi de mevcut çalışmada tahmin edilen ve literatürden [95,99] elde edilen) farklı çalışmalarla doğrulanmıştır. Başka bir karşılaştırma da Şekil 6.21'de gösterilmektedir. Aynı yakıt kullanıldığında aksenal profiller arasında sonuçlarda bazı farklılıklar olduğunu görülmektedir.



Şekil 6.21. Eksenel sıcaklık profillerinin sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması [101]

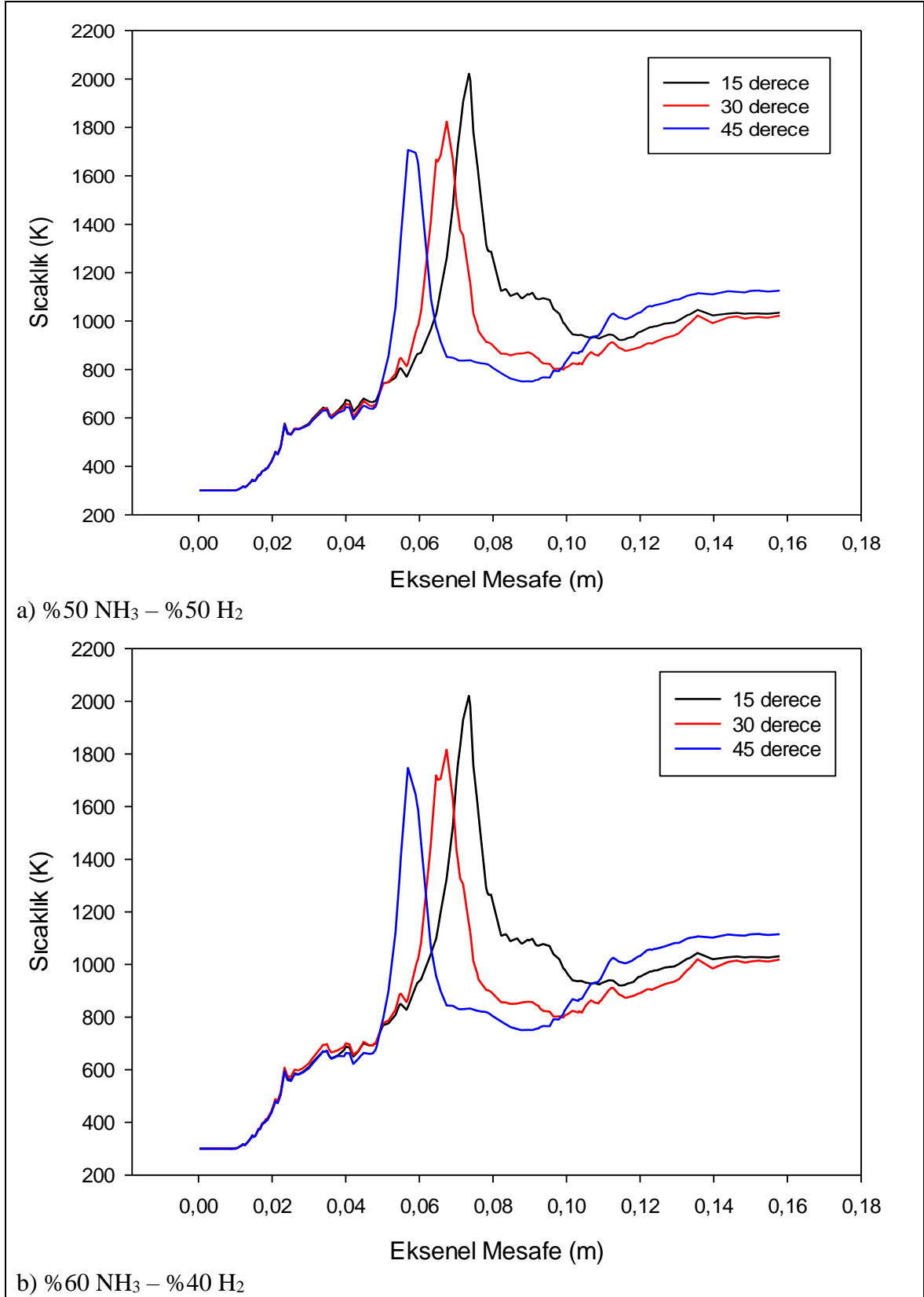


Şekil 6.22. Farklı hidrojen ilavelerinin aksel sıcaklık profilleri üzerindeki etkileri a) 15° b) 30° c) 45°

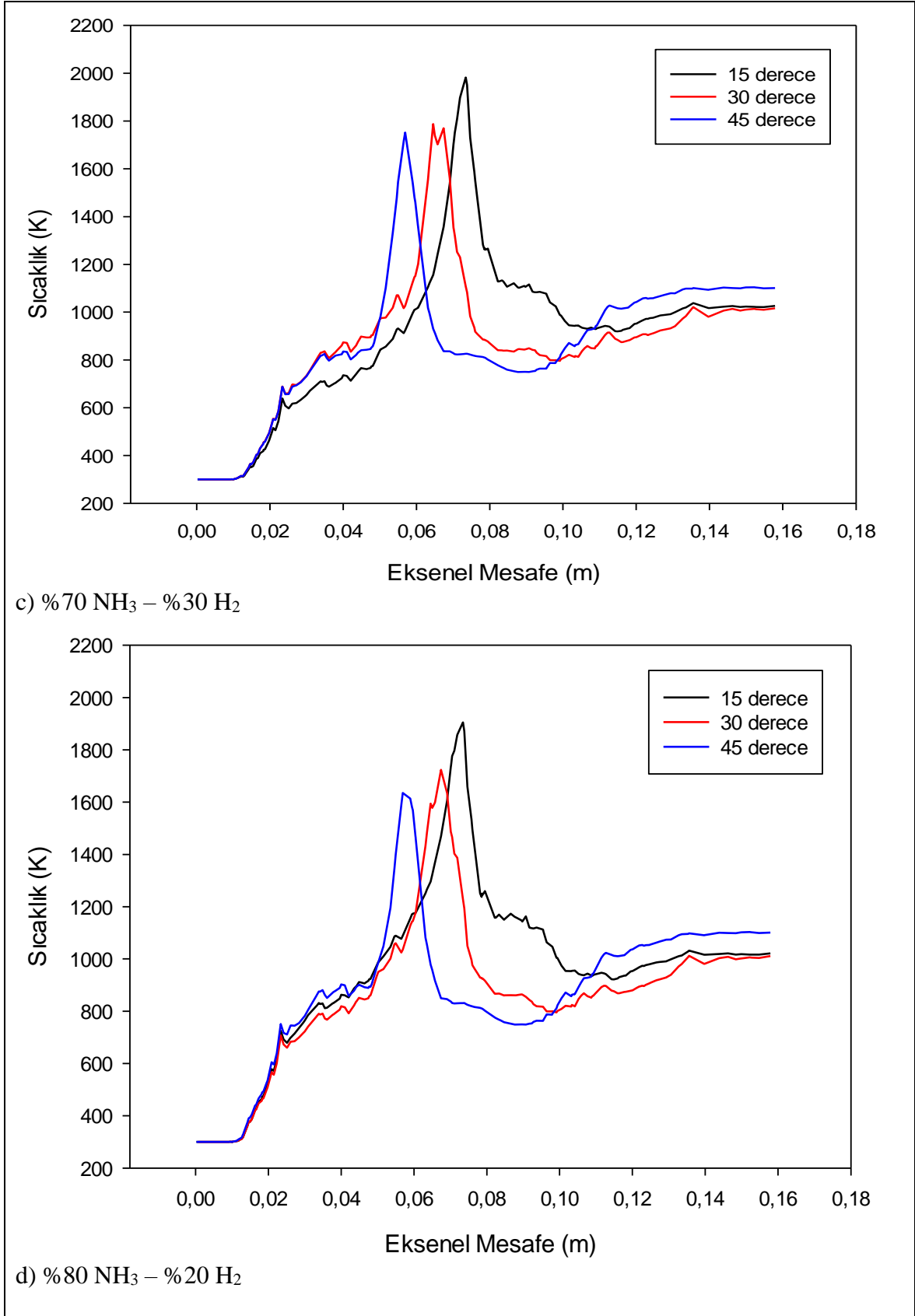


Şekil 6.22. (devam) Farklı hidrojen ilavelerinin aksenel sıcaklık profilleri üzerindeki etkileri
a) 15° b) 30° c) 45°

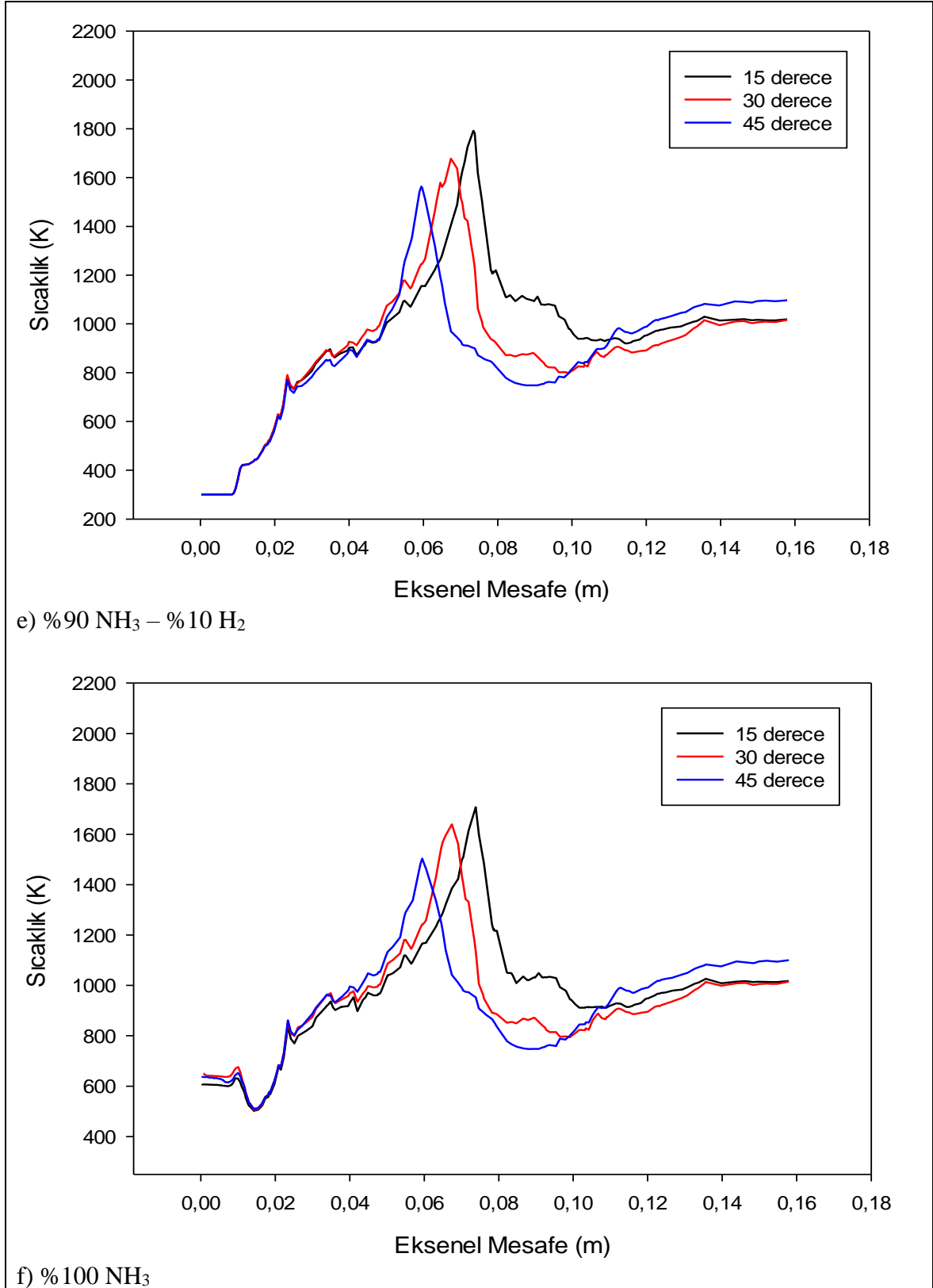
Şekil 6.22, farklı hidrojen ilavelerinin farklı açılarda aksenel sıcaklık profilleri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Şekil 6.22, incelenen tüm durumların sıcaklık seviyeleri, ince konsantre bir alev nedeniyle alevin önünde hızla artmıştır. Daha sonra alevler yanma brülörü üzerindeki ikincil bölgeye yayıldıkça sıcaklık seviyeleri önemli ölçüde düşmüştür. Bunun yanma odasına ikincil ve seyreltilmiş hava akışlarının eklenmesi olduğu söylenebilir. Soğutma havasının farklı açılardan etkisinin değerlendirilmesinde, Şekil 6.23'deki açı değerleri arttıkça amonyak alev sıcaklığı düşmüştür. %100 amonyak için 15°, 30° ve 45° için tahmini maksimum alev sıcaklığı sırasıyla, 1700 K, 1633 K ve 1497 K'dir. Hidrojenle zenginleştirilmiş yakıt (%20 durumu) için 15 derece, 30 derece ve 45 derecelik farklı açılarda sıcaklık değerleri 1897 K, 1720 K ve 1633 K'dir. Sonraki değerler, %50 hidrojen ekleme durumu için 2017 K, 1821 K ve 1706 K olarak görülmüştür.



Şekil 6.23. Eksenel sıcaklık profilleri üzerindeki farklı hava soğutma derecelerinin etkileri
 a) %50 NH₃ – %50 H₂ b) 60 % NH₃ – %40 H₂ c) %70 NH₃ – %30 H₂ d) %80 NH₃ – %20 H₂ e) %90 NH₃ – %10 H₂ f) %100 NH₃

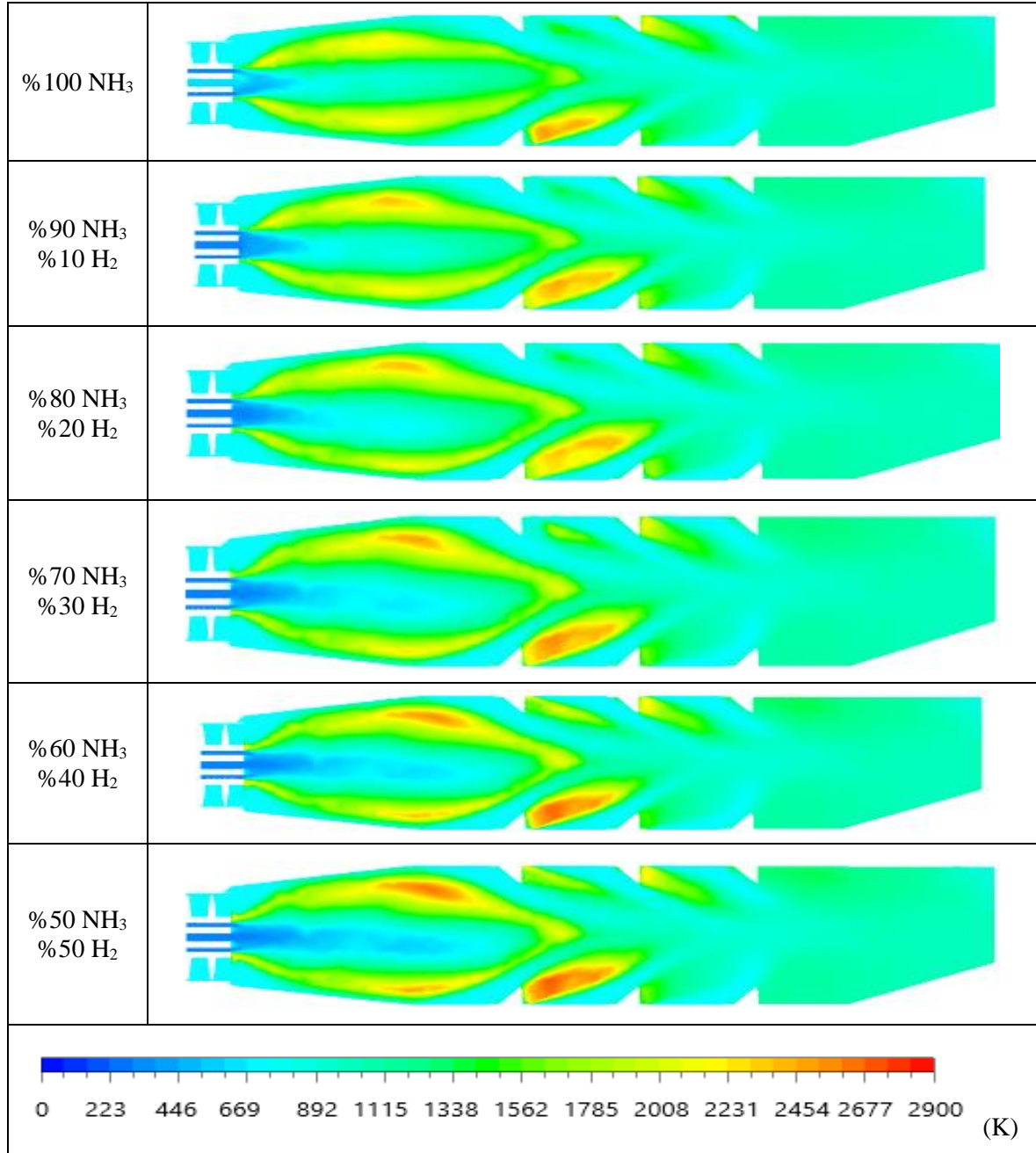


Şekil 6.23. (devam) Eksenel sıcaklık profilleri üzerindeki farklı hava soğutma derecelerinin etkileri a) %50 NH₃ – %50 H₂ b) 60 % NH₃ – %40 H₂ c) %70 NH₃ – %30 H₂ d) %80 NH₃ – %20 H₂ e) %90 NH₃ – %10 H₂ f) %100 NH₃

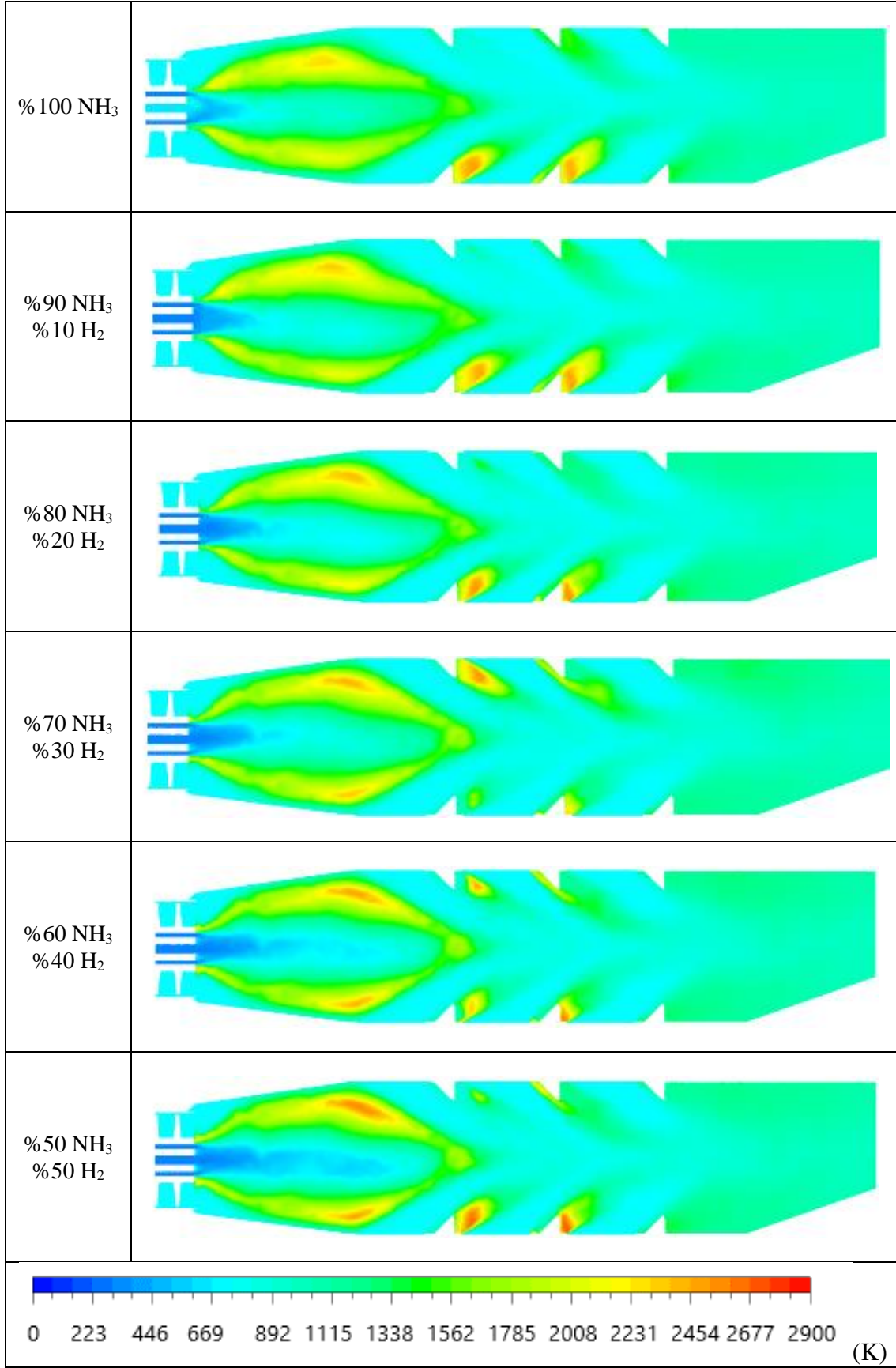


Şekil 6.23. (devam) Eksenel sıcaklık profilleri üzerindeki farklı hava soğutma derecelerinin etkileri a) %50 NH₃ – %50 H₂ b) 60 % NH₃ – %40 H₂ c) %70 NH₃ – %30 H₂ d) %80 NH₃ – %20 H₂ e) %90 NH₃ – %10 H₂ f) %100 NH₃

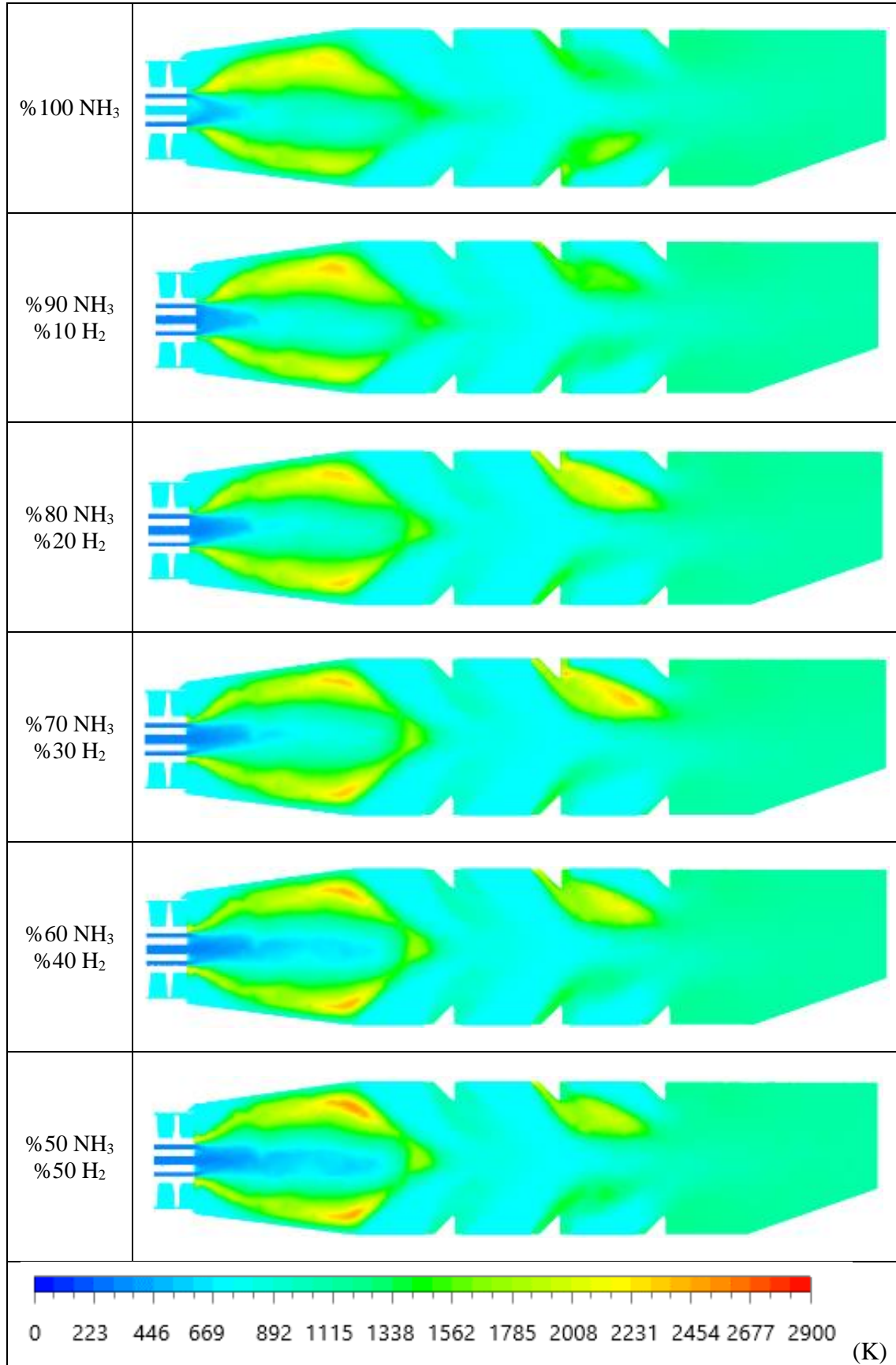
Şekil 6.23'de farklı soğutma havası açıları arttıkça tüm durumların sıcaklık değerlerinin düştüğü ve reaksiyon hızının yavaşladığı ortaya çıkmıştır. Yanmada 45 derecelik bir soğutma havası açısı olması durumunda egzoz gazı sıcaklık değeri diğer durumlardaki açılara göre yükselmiştir.



Şekil 6.24. 15° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için sıcaklık konturları.



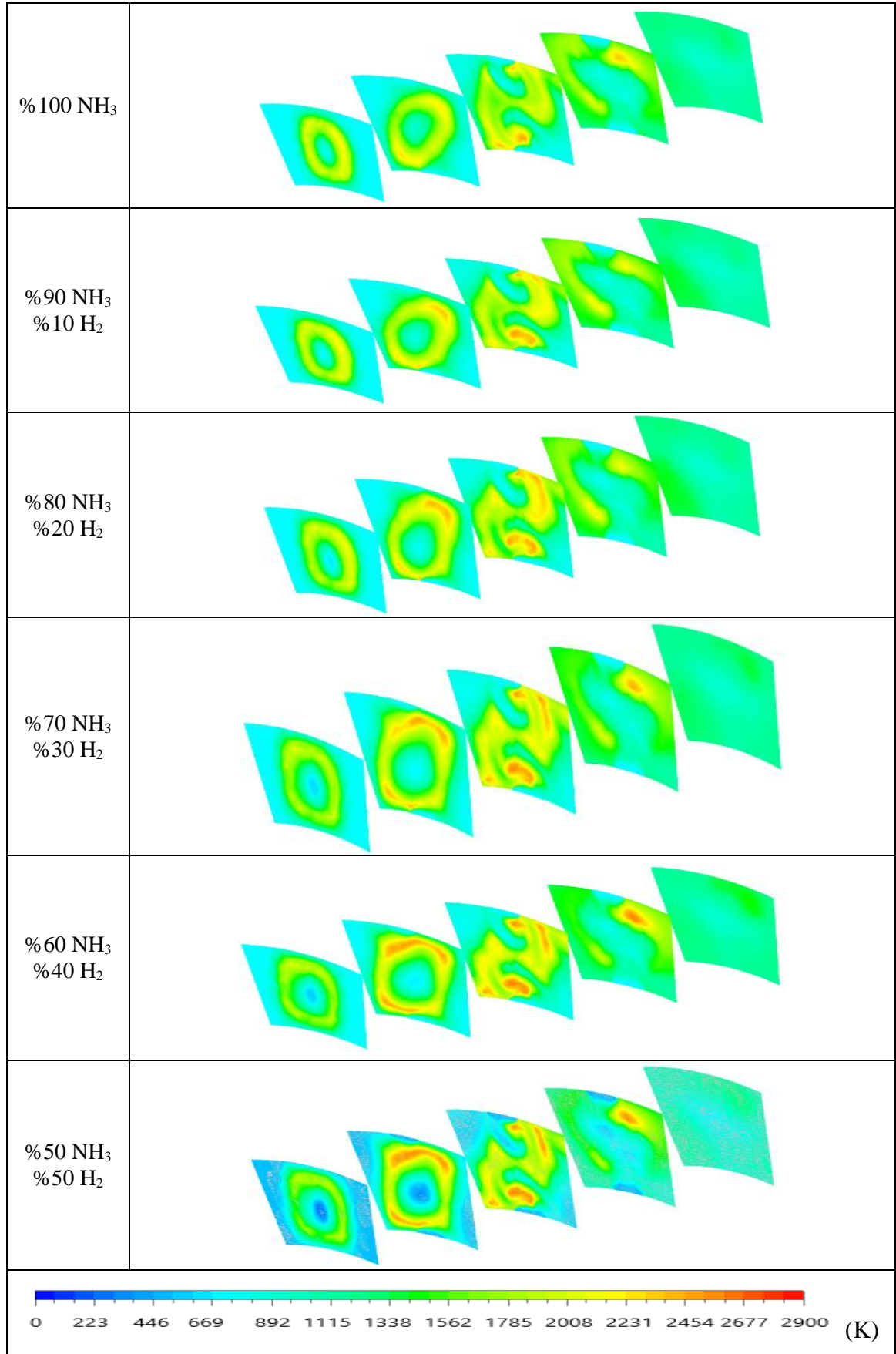
Şekil 6.25. 30° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için sıcaklık konturları.



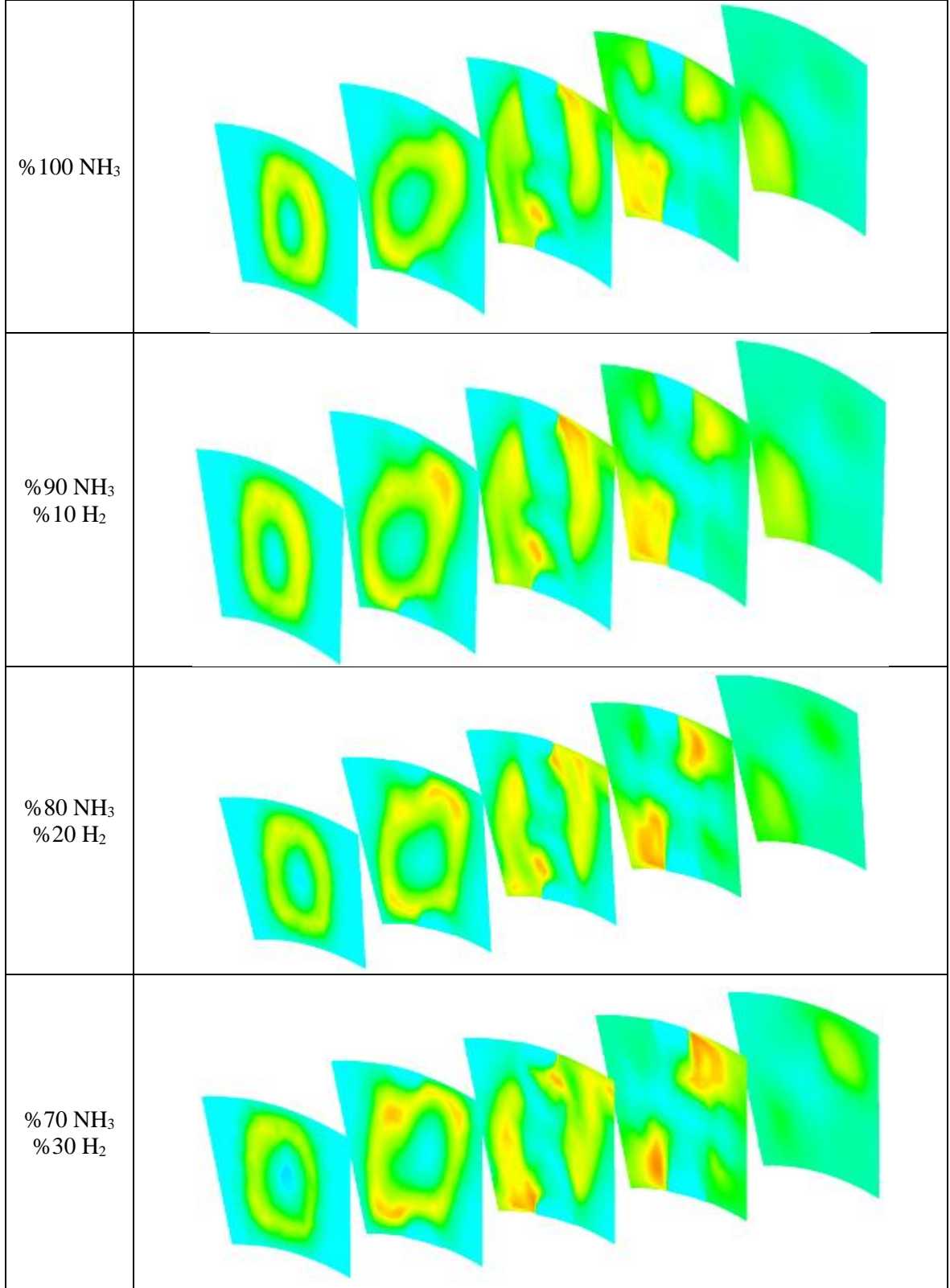
Şekil 6.26. 45° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için sıcaklık konturları.

Halka tipi yanma odalarındaki hava akışı sayesinde yüksek sıcaklık bölgesi merkezi alana sıkıştırılır. Soğutma deliğinin eğimi arttıkça, bu eğilim yavaş yavaş artarak yanma odası duvarının ısı emilimini azaltır. Soğutma deliği açısı arttıkça, yanma odası merkez eksenindeki sıcaklık tepe noktası merkeze doğru hareket eder. Bu, soğutma deliği açısı arttıkça ve yüksek sıcaklık bölgesi duvar yüzeyinden yanma merkezine doğru hareket ettikçe artan dikey momentumdan kaynaklanabilir. Soğutma deliğinin eğim açısı arttıkça duvara yakın sıcaklık gradyanı azalır. Bunun nedeni, hava soğutma açısının dikey momentumu arttırmasıdır.

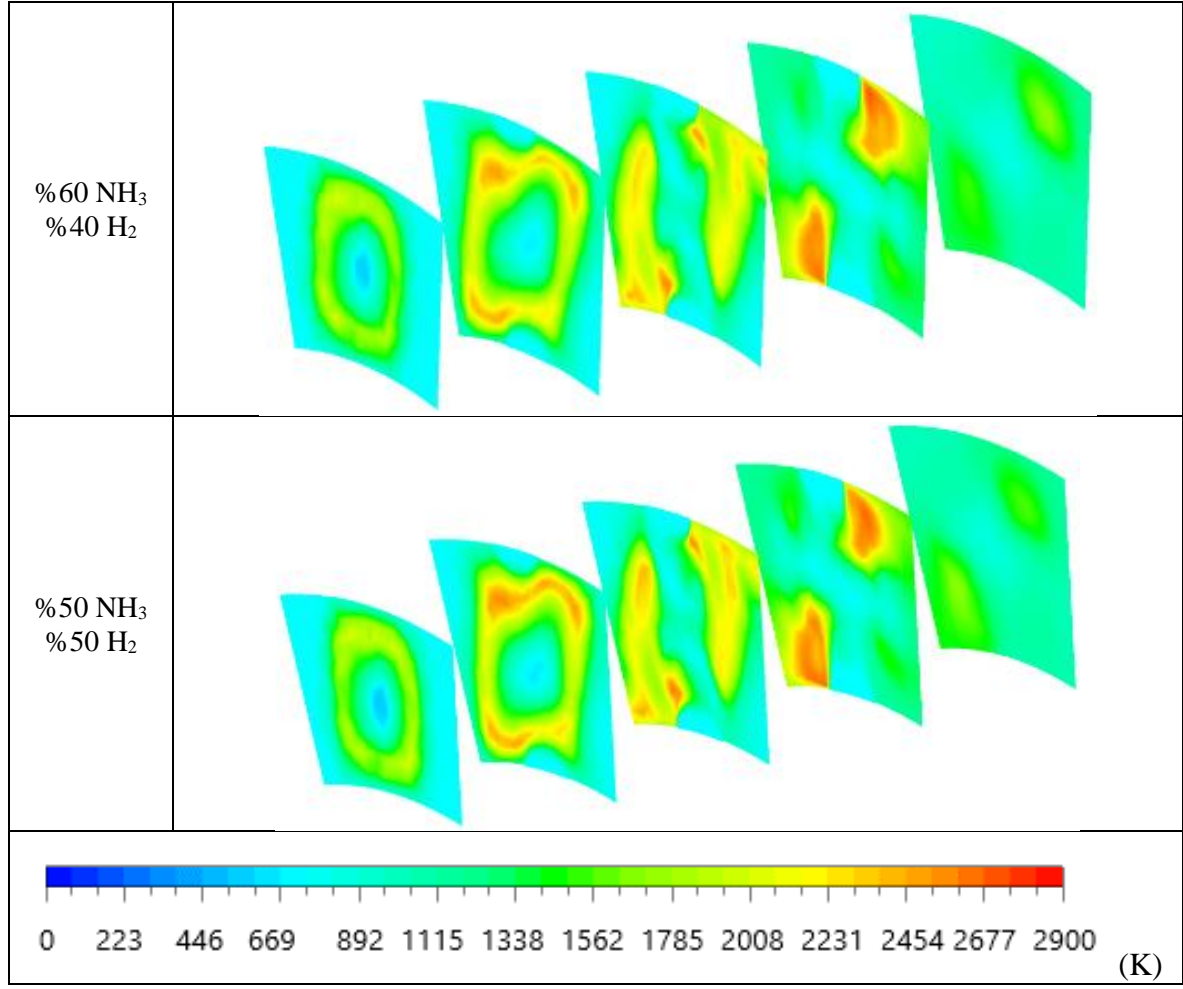
Şekil 6.24, Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da çeşitli soğutma havası açılarında tüm yakıt karışımları için radyal sıcaklık konturları gösterilmektedir. Sonuçlar analiz edildiğinde, yanma odasına hidrojen yakıtı eklenerek maksimum alev sıcaklık seviyeleri bir miktar artırılmıştır. Ayrıca alevin konumu, hidrojen yakıtı eklenerek artan birincil bölgeye yaklaşmıştır. Bu akış hızı hidrojen konumundan kaynaklanabilir (amonyak girişi çevresinde olabilir). Bu nedenle, hidrojen konsantrasyonu arttıkça, hidrojen akış hızı artar ve alev konumu, brülör giriş bölgesinden uzağa taşınır. Ancak soğutma havası açısı 15° ’den 45° ’ye çıkarıldığında alevler yanma odası doğrultusunda yeni bir konuma gelmiştir. Bu sonucun ana nedeni, alevin ilerlemesini engellemek ve yakıtın ihtiyaç duyduğu hava ihtiyacını hızlı bir şekilde karşılamaktır. Bu, alevin başka bir konuma hareket etmesini önler ve gaz türbini brülörü girişinin yakınındaki hava akış hızını azaltır. Ayrıca soğutma havasındaki hızın artması girdap etkisine neden olmuş ve alev yanma odası içinde hacimsel olarak dağılmıştır.



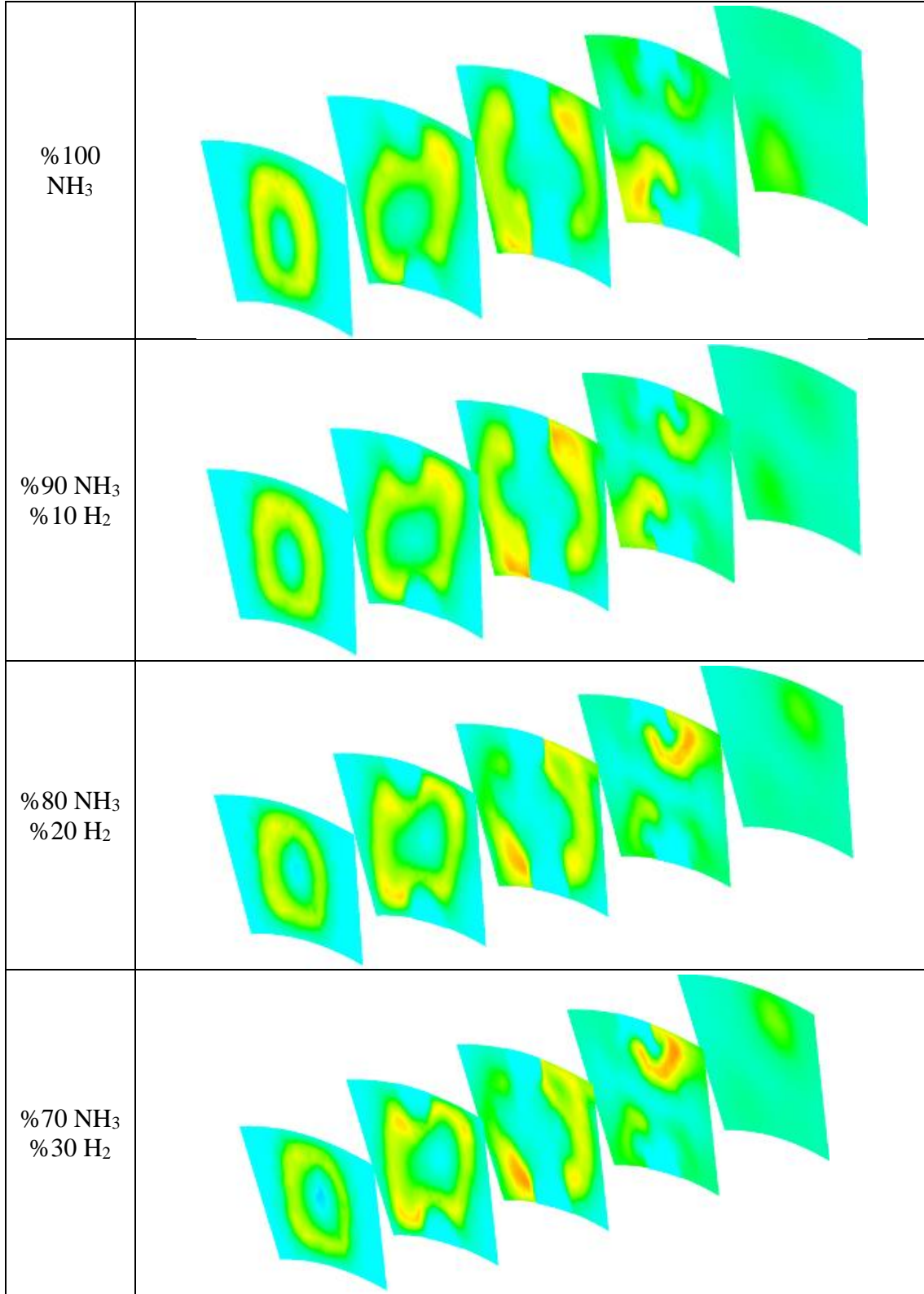
Şekil 6.27. 15° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.



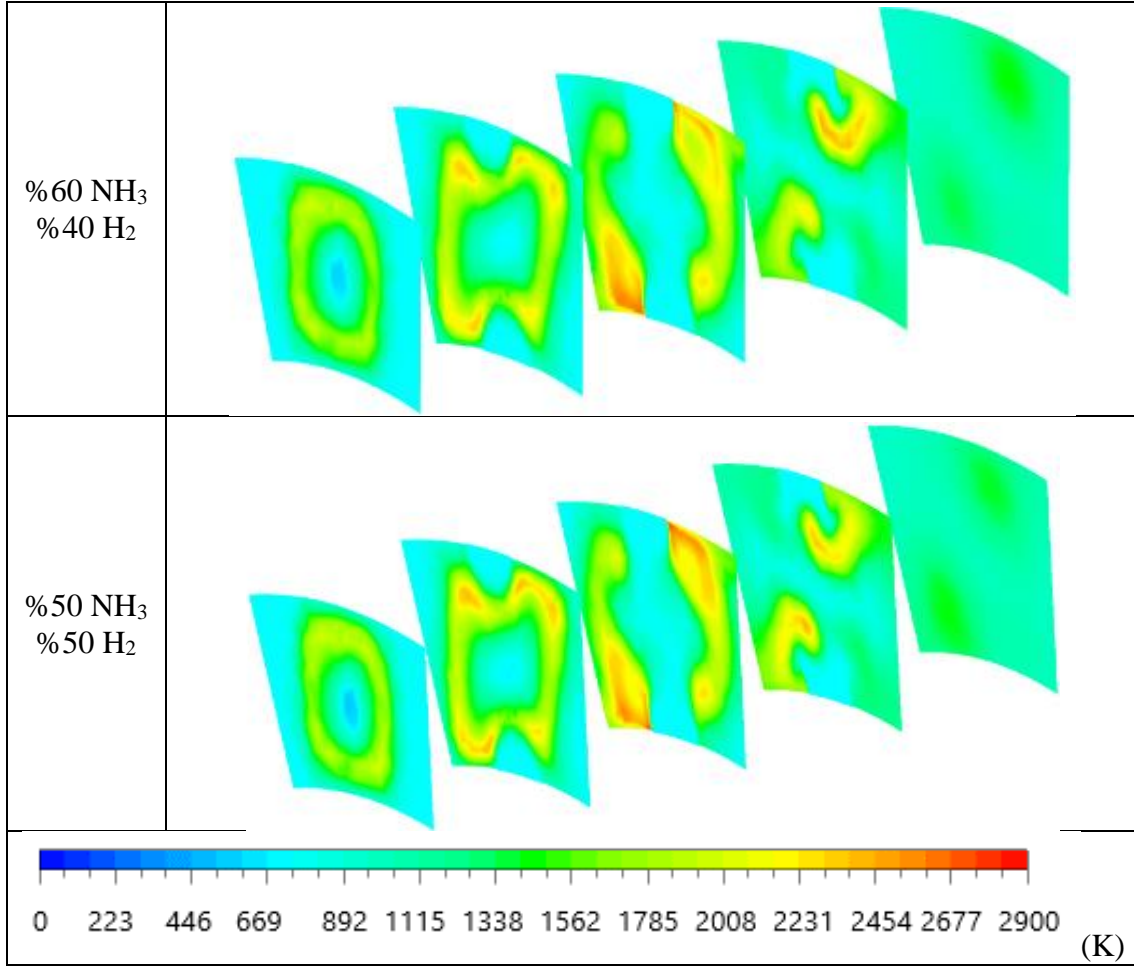
Şekil 6.28. 30° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.



Şekil 6.28. (devam) 30° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.

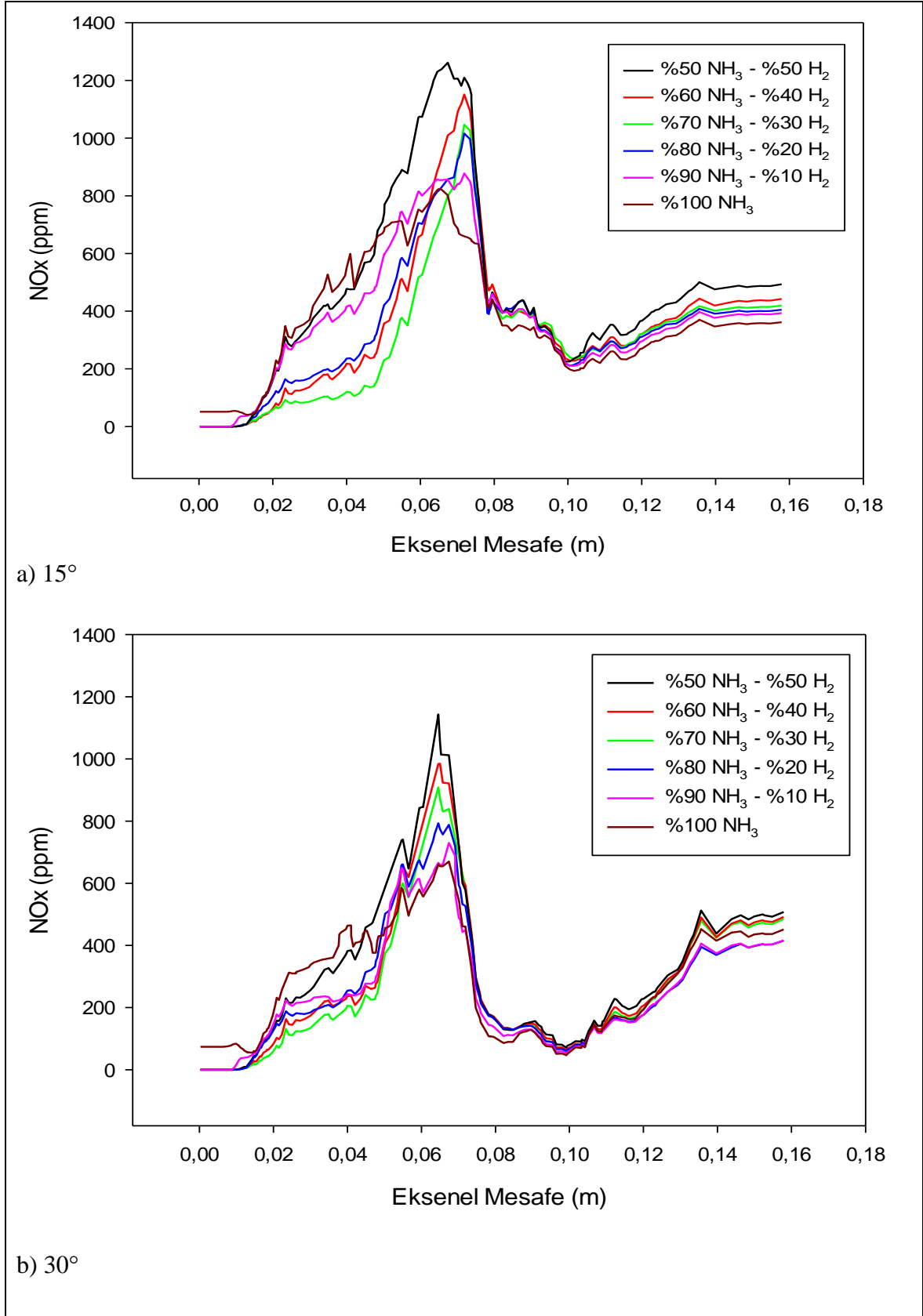


Şekil 6.29. 45° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.

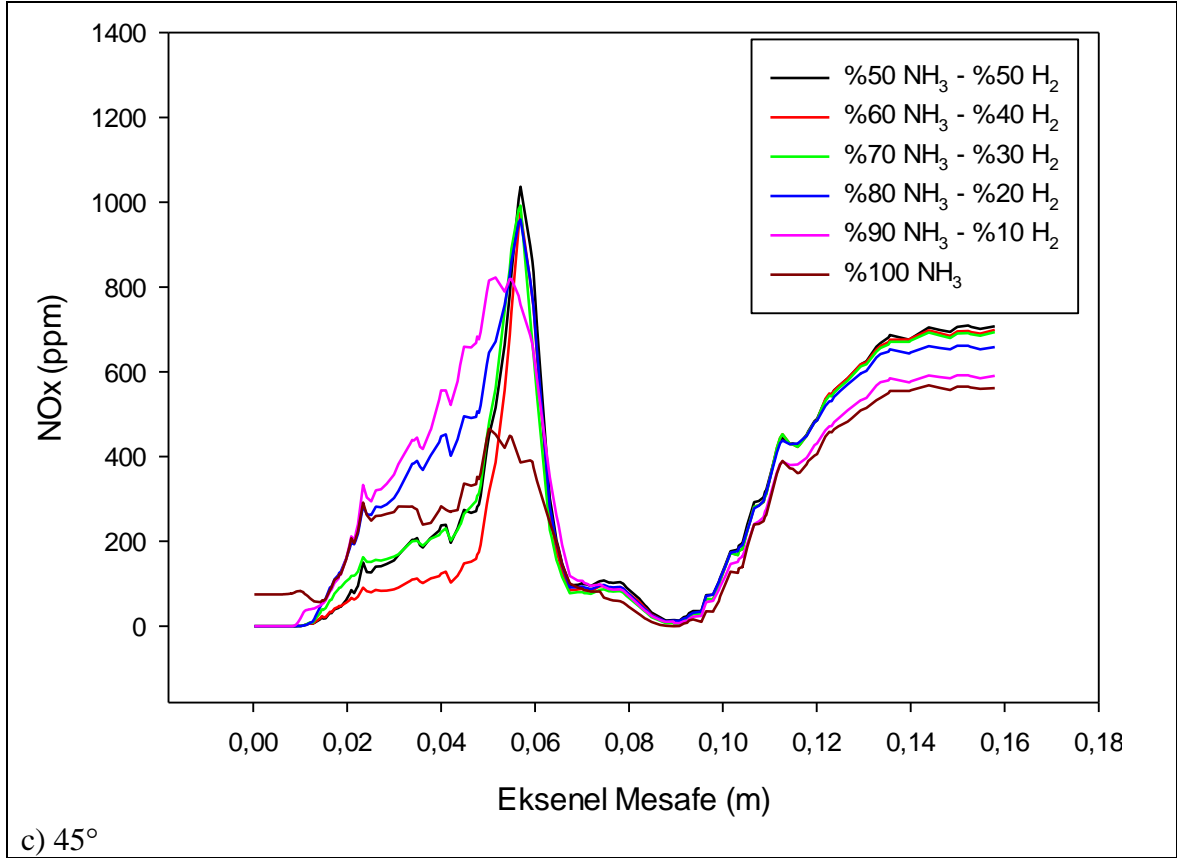


Şekil 6.29. (devam) 45° hava soğutma derecesinde farklı yakıt karışım için radyal sıcaklık konturları.

Soğutma havasının farklı açılarını daha iyi anlamak için radyal sıcaklık konturları Şekil 6.27, Şekil 6.28 ve Şekil 6.29'da kullanılan tüm yakıtların sıcaklık alanlarına hidrojen eklenmesinin etkileri incelenmiştir. Bu, yanmaya eklenen hidrojen ile radyal konturlarda kırmızı alanın artması, hem alevin sıcaklığının artması hem de alev konumlarının brülörden yukarı doğru hareket etmesi anlamına gelir. Soğutma havasının açısının arttığı, kırmızı renkli alanların azaldığı görülmektedir. Böylece daha eşit termal alanlar elde edilerek büyük ve hacimsel dağılmış bir alev elde edilir.

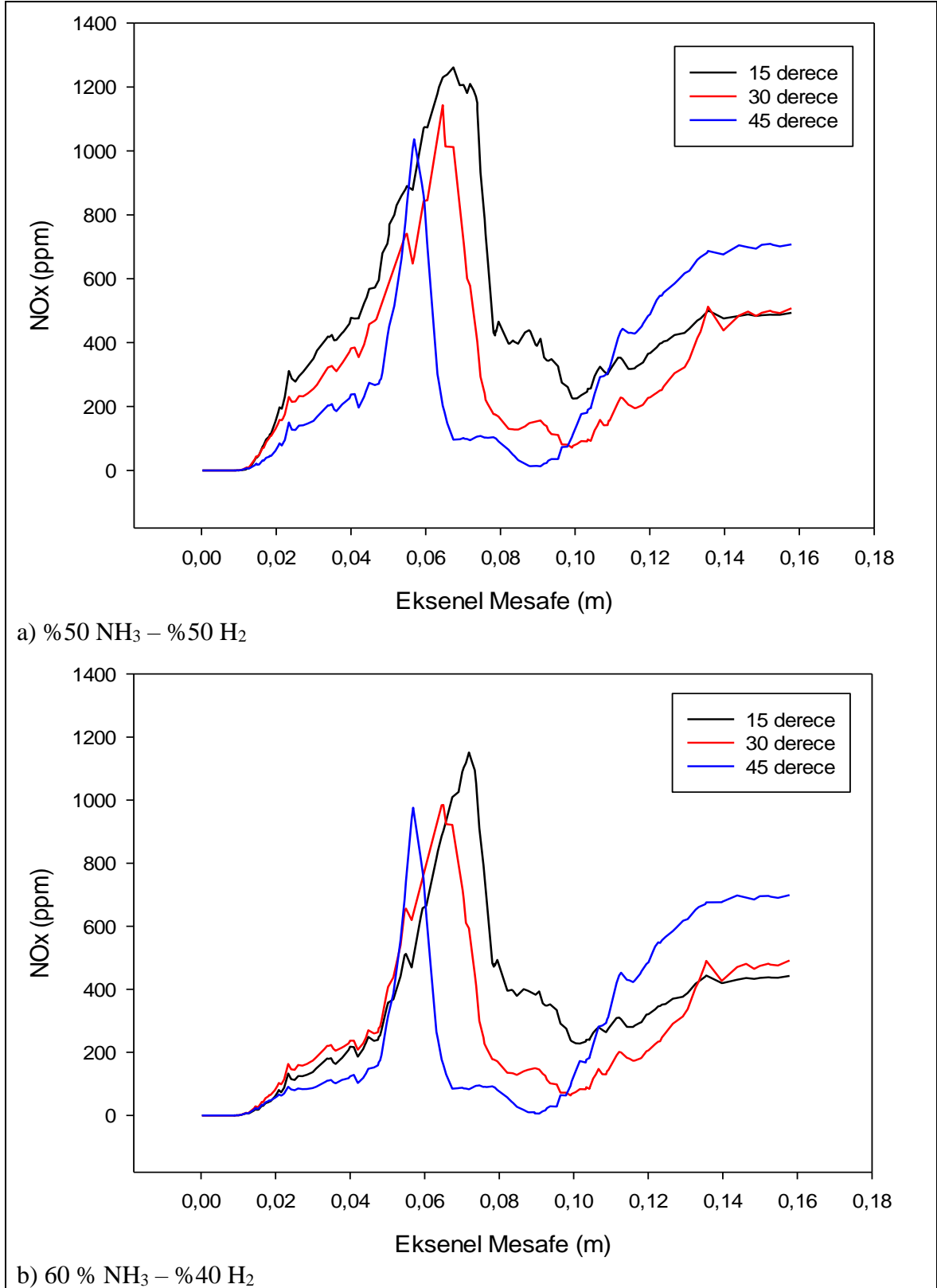


Şekil 6.30. Farklı hidrojen ilavelerinin a) 15° b) 30° c) 45° aksenal NOX profilleri üzerindeki etkileri

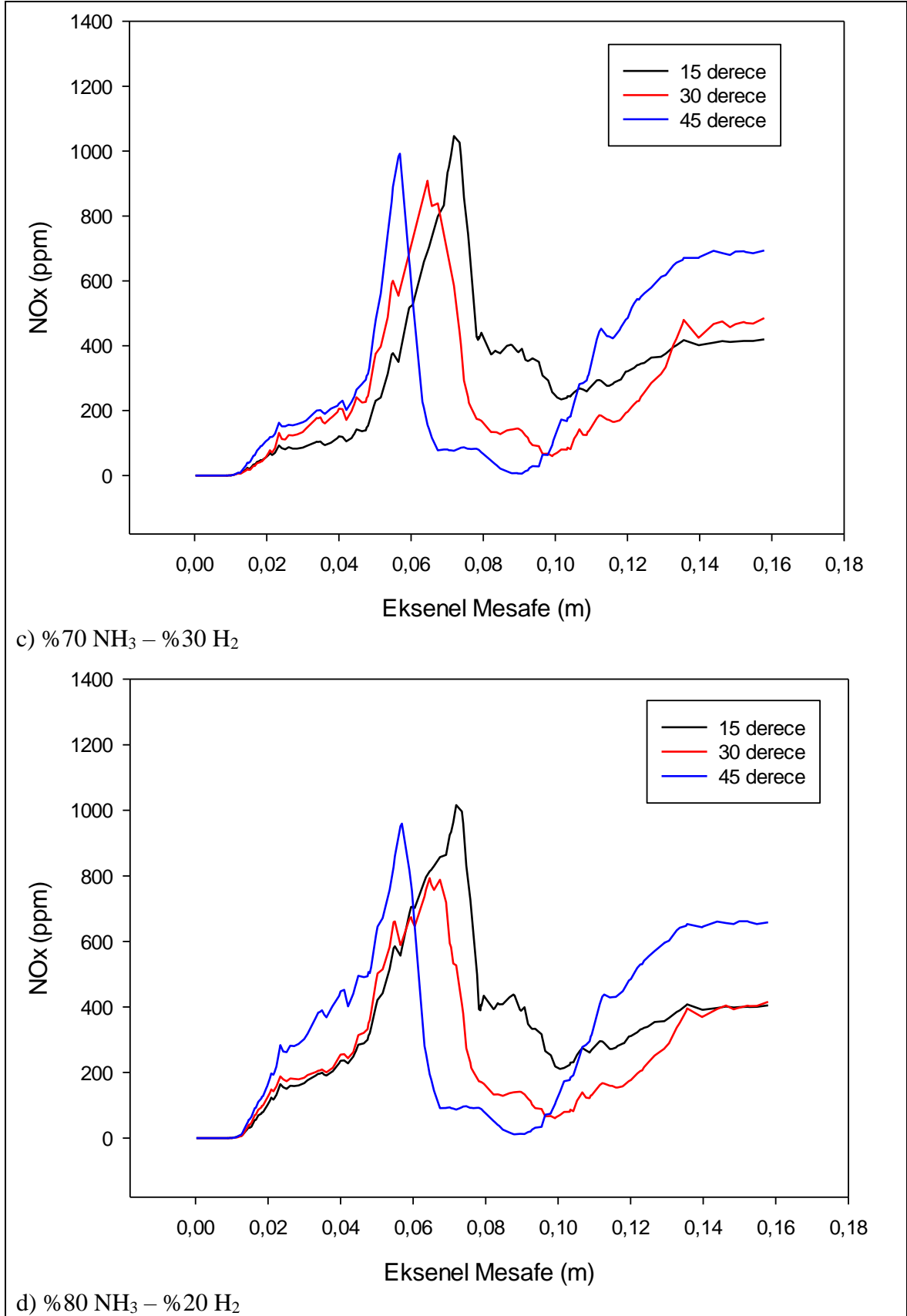


Şekil 6.30 (devam) Farklı hidrojen ilavelerinin a) 15° b) 30° c) 45° aksenel NO_x profilleri üzerindeki etkileri

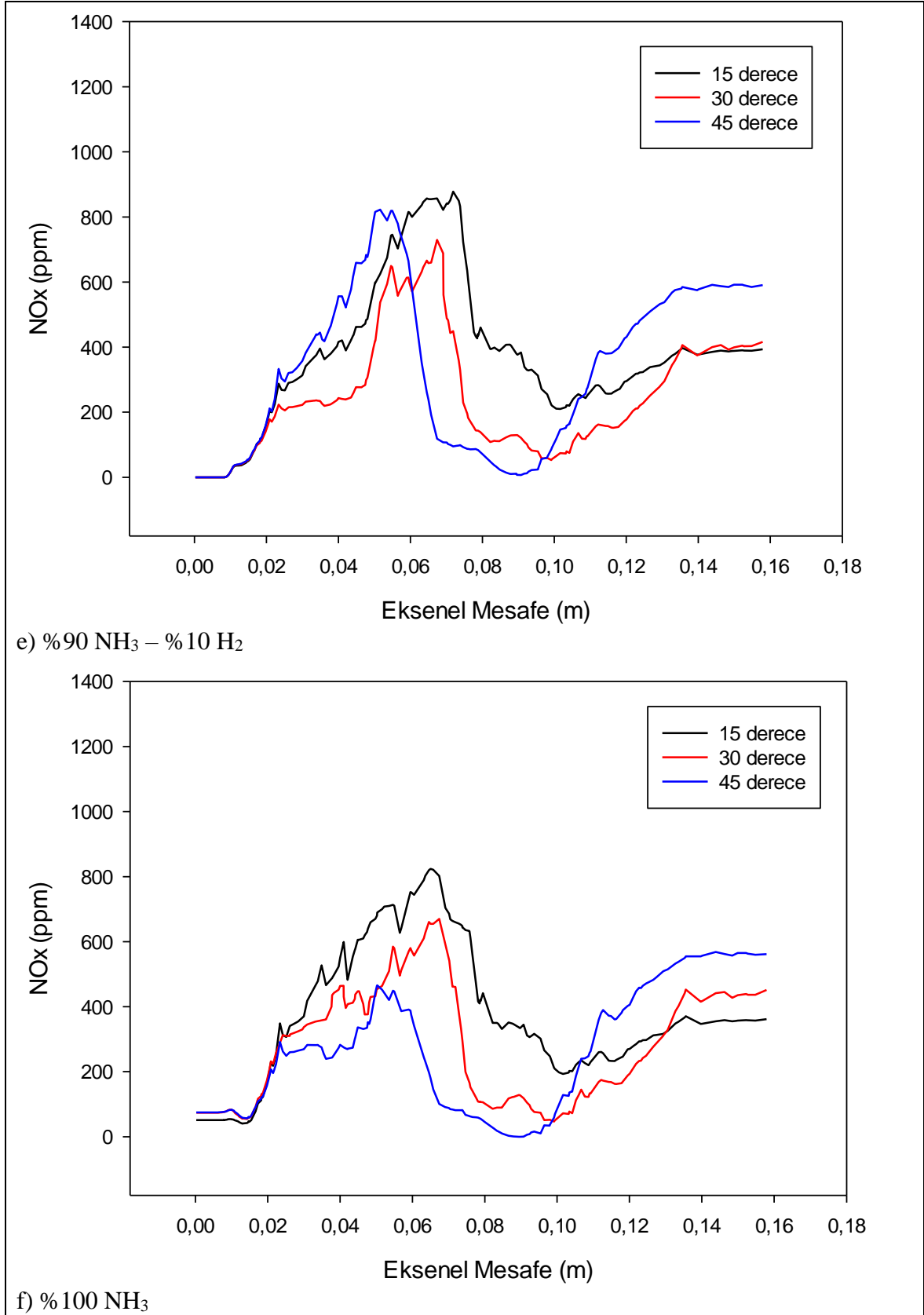
Araştırılacak bir diğer önemli yanma özelliği NO_x emisyonlarıdır. Bu tehlikeli emisyon termal, ani ve yakıt NO_x mekanizmalarından oluşur. Tahmini aksenel NO_x profilleri ve konturları Şekil 6.30, Şekil 6.31, Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'te yakıt karışımı ve soğutma havası sırasıyla farklı açılarla oluşturulmuştur. Tahmini NO_x seviyeleri, özellikle birincil bölgedeki yoğunlaştırılmış ince alev bastırma nedeniyle önemli ölçüde azaltılmıştır. Başka bir deyişle, reaksiyon hızı yavaşladığından ve genişleyen bir alev oluştuğundan, termal NO_x nedeniyle NO_x üretim seviyeleri önemli ölçüde azalmıştır.



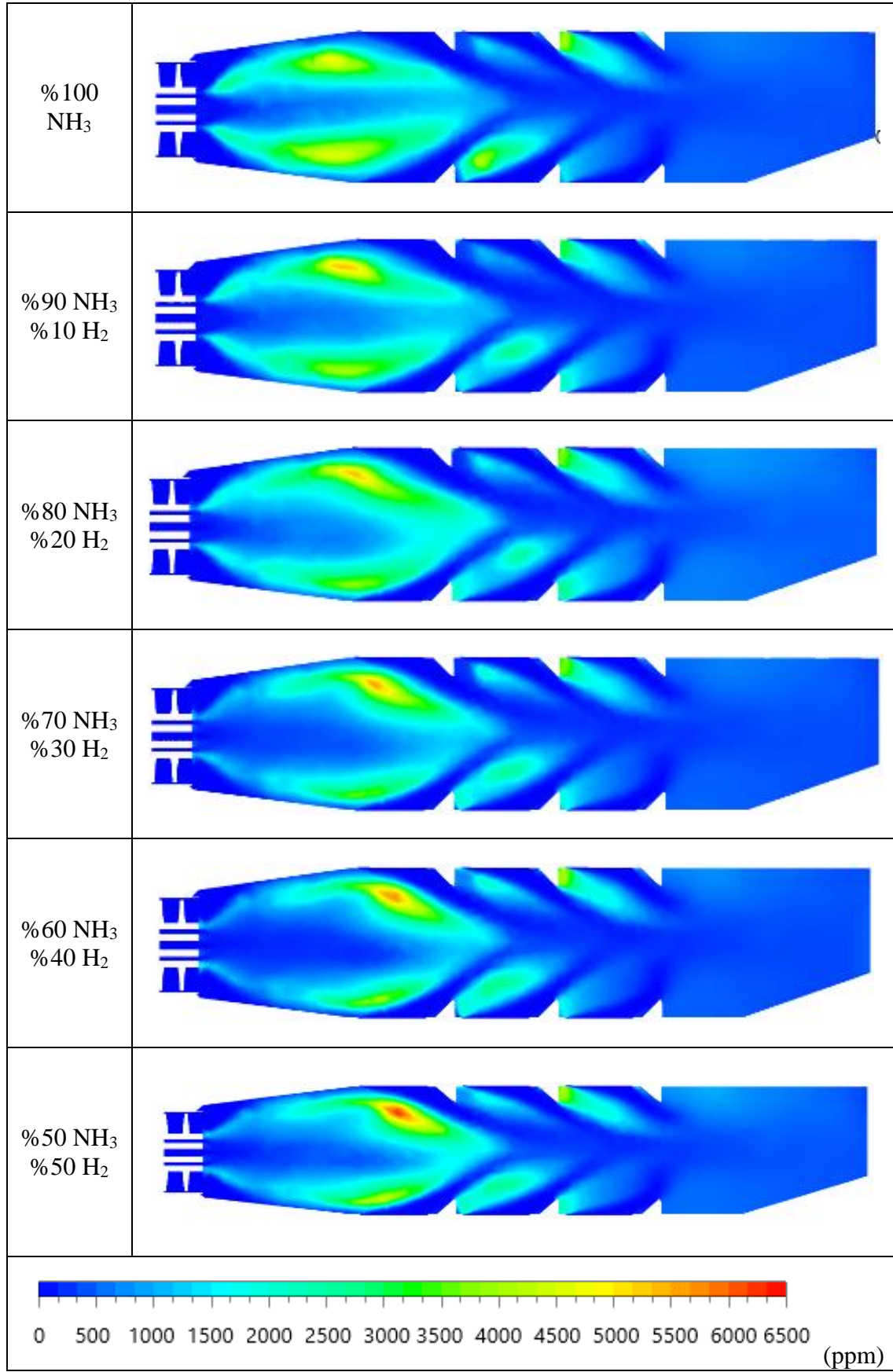
Şekil 6.31. Farklı hava soğutma derecelerinin aksenel NOX profilleri üzerindeki etkileri a) %50 NH₃ – %50 H₂ b) %60 NH₃ – %40 H₂ c) %70 NH₃ – %30 H₂ d) %80 NH₃ – %20 H₂ e) %90 NH₃ – %10 H₂ f) %100 NH₃



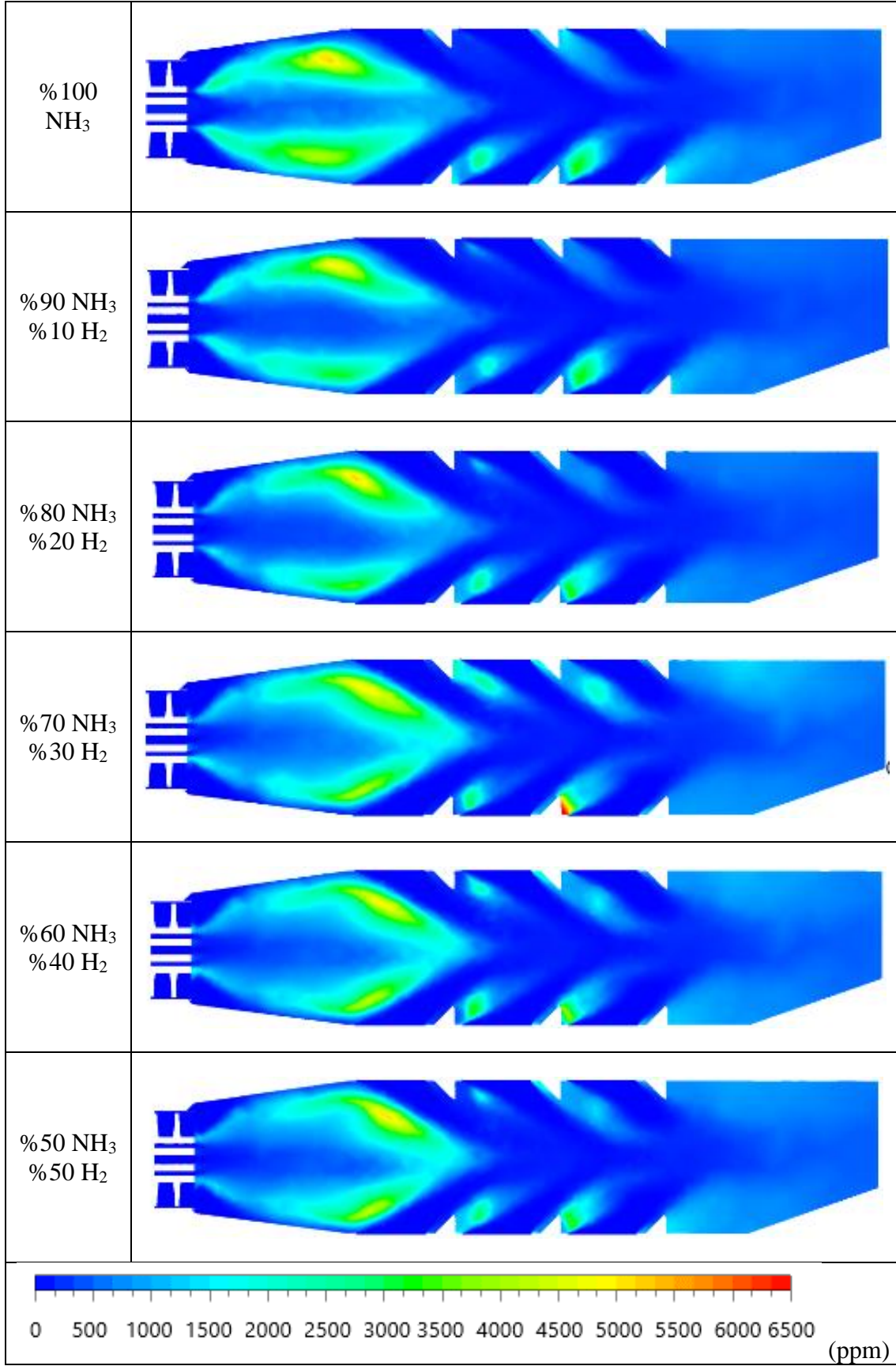
Şekil 6.31. (devam) Farklı hava soğutma derecelerinin eksnel NO_x profilleri üzerindeki etkileri a) %50 NH₃ – %50 H₂ b) 60 % NH₃ – %40 H₂ c) %70 NH₃ – %30 H₂ d) %80 NH₃ – %20 H₂e) %90 NH₃ – %10 H₂ f) %100 NH₃



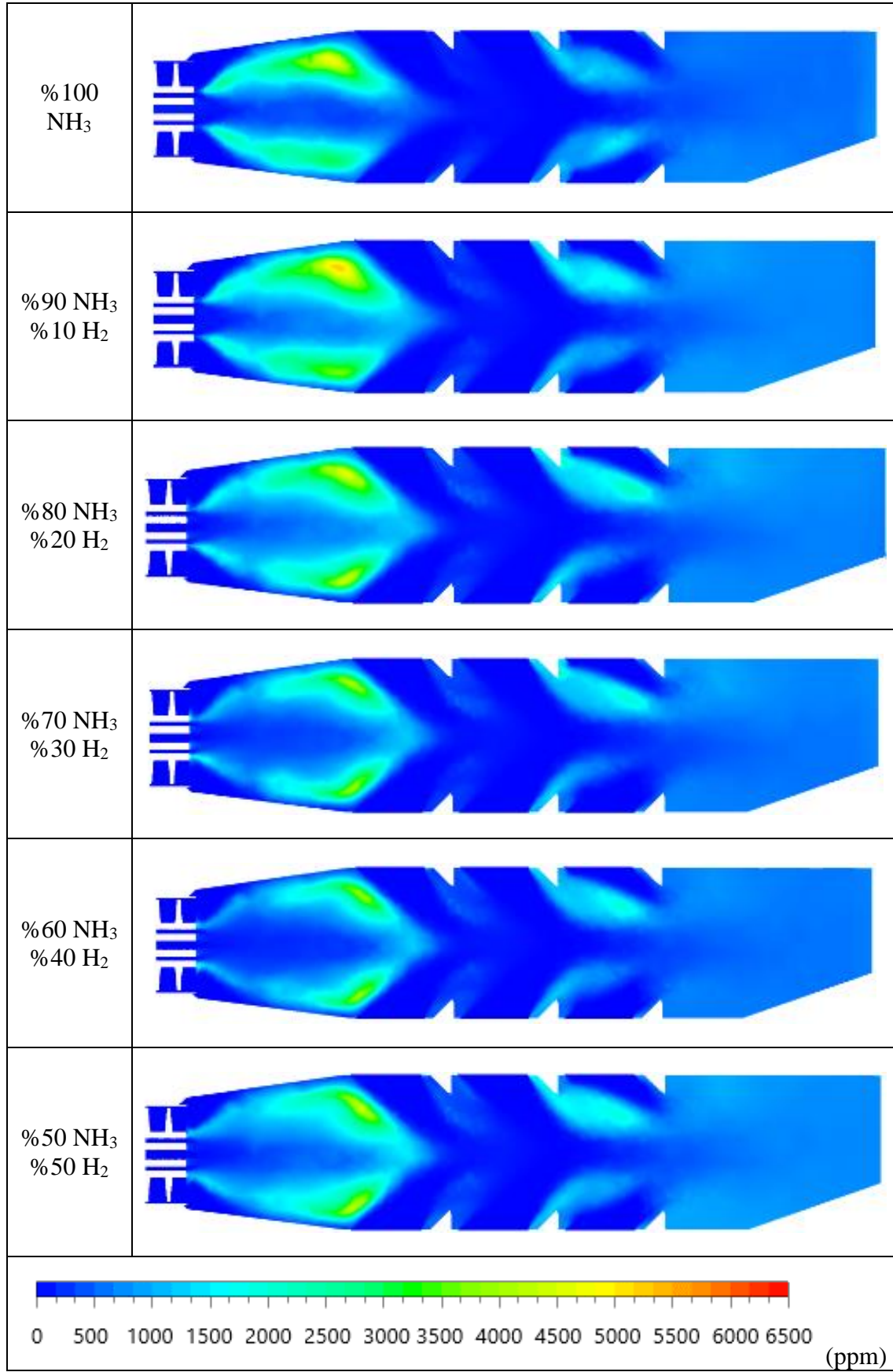
Şekil 6.31. (devam) Farklı hava soğutma derecelerinin eksenel NO_x profilleri üzerindeki etkileri a) %50 NH₃ – %50 H₂ b) 60 % NH₃ – %40 H₂ c) %70 NH₃ – %30 H₂ d) %80 NH₃ – %20 H₂ e) %90 NH₃ – %10 H₂ f) %100 NH₃



Şekil 6.32. 15° hava soğutma açısında farklı yakıtlar için NO_x konturları



Şekil 6.33. 30° hava soğutma açısında farklı yakıtlar için NO_x konturları



Şekil 6.34. 45° hava soğutma açısında farklı yakıtlar için NO_x konturları

Yanma odasında karışım yakıtta hidrojen ilave edildiğinde alev sıcaklığında artış olması beklenir ve buna bağlı olarak NO_x emisyonunda da artış olur. 30° 'de NO_x seviyelerinin %100 amonyak, %90 amonyak- %10 hidrojen, %80 amonyak - %20 hidrojen, %70 amonyak - %30 hidrojen, %60 amonyak - %40 hidrojen ve %50 amonyak - %50 hidrojen için ikincil bölgede sırasıyla, 668 ppm, 725 ppm, 793 ppm, 906 ppm, 991 ppm ve 1145 ppm. olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3. Farklı soğutma açıları ve farklı yakıt karışımları durumunda egzoz çıkışındaki NO_x değerlerinin karşılaştırılması.

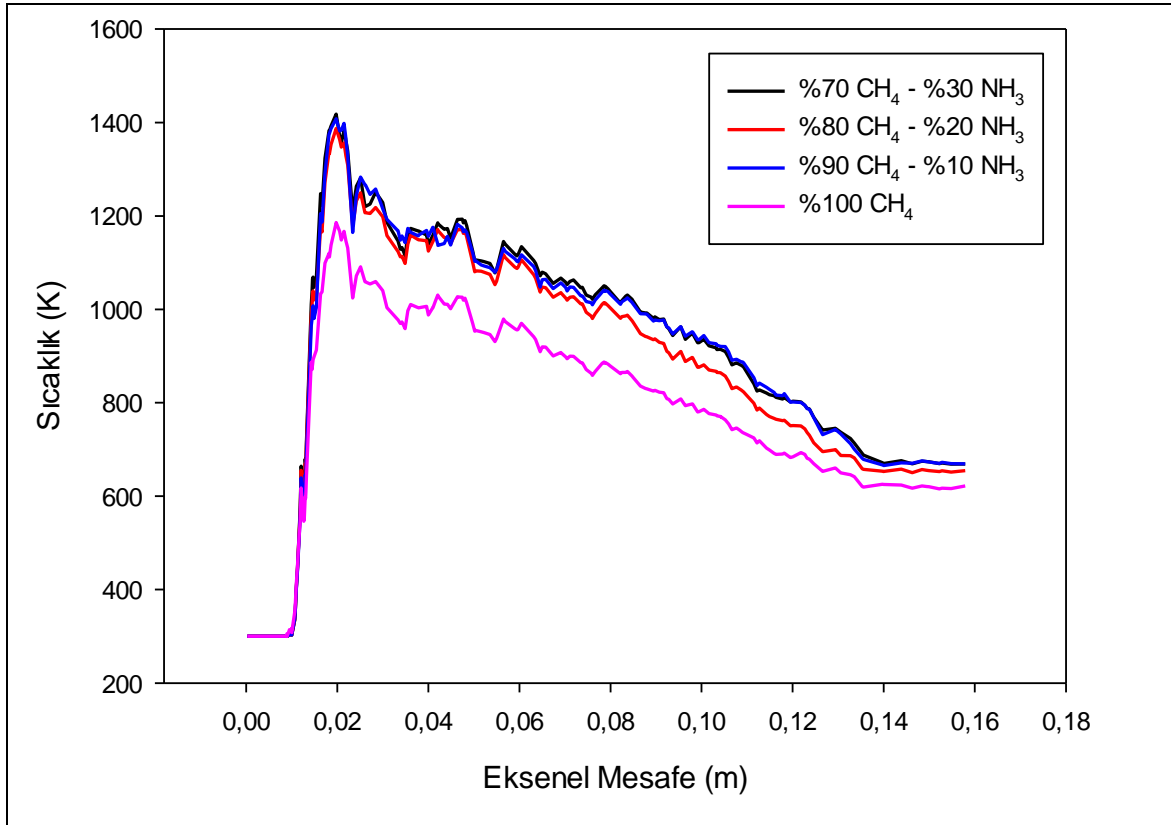
	15°	30°	45°
%100 NH_3	368	408	556
%90 NH_3 %10 H_2	393	414	589
%80 NH_3 %20 H_2	407	458	658
%70 NH_3 %30 H_2	419	482	691
%60 NH_3 %40 H_2	449	492	698
%50 NH_3 %50 H_2	492	504	711

Çizelge 6.3, farklı soğutma açıları ve farklı yakıt karışımları durumunda egzoz çıkışındaki NO_x değerlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Burada da görüldüğü gibi hidrojen ilavesiyle sıcaklığın artması sonucu NO_x değerleri yükselmiştir. Ayrıca artan soğuma açıları ve egzozu doğru uzanan alev uzunluğu nedeniyle NO_x değerleri yükselmiştir. Bu artışların ana nedenlerinden biri girdap etkisidir. 15° ve 30° soğuma açılarındaki NO_x değerleri birbirine yakın olduğunda, 45° soğuma açısında bu değer daha yüksektir. Bunun sonucunda soğuma açısına 15° daha yakın olduğu için egzoz NO_x değeri ortalama yanma odası sıcaklığını etkilemeden düşecektir.

6.3.3. Amonyak/metan yakıt karışımlarının sayısal modelleme sonuçları

Amonyak – Metan yakıt karışımlarının sayısal modelleme sonuçları Şekil 6.35'de incelenen tüm durumlar için aksenal sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Şekil 6.35'de görüldüğü üzere, alevdeki hızlı reaksiyon nedeniyle birincil bölgede tüm durumlar için sıcaklık seviyeleri hızla artmıştır. Ardından, tüm durumlar için sıcaklık seviyeleri, alevler ikincil ve seyreltme hava akışları nedeniyle ikincil bölgedeki yanma odasına yayıldığında büyük ölçüde azalma göstermiştir. Ek olarak, sıcaklık seviyeleri, gaz türbinlerindeki yanma odası

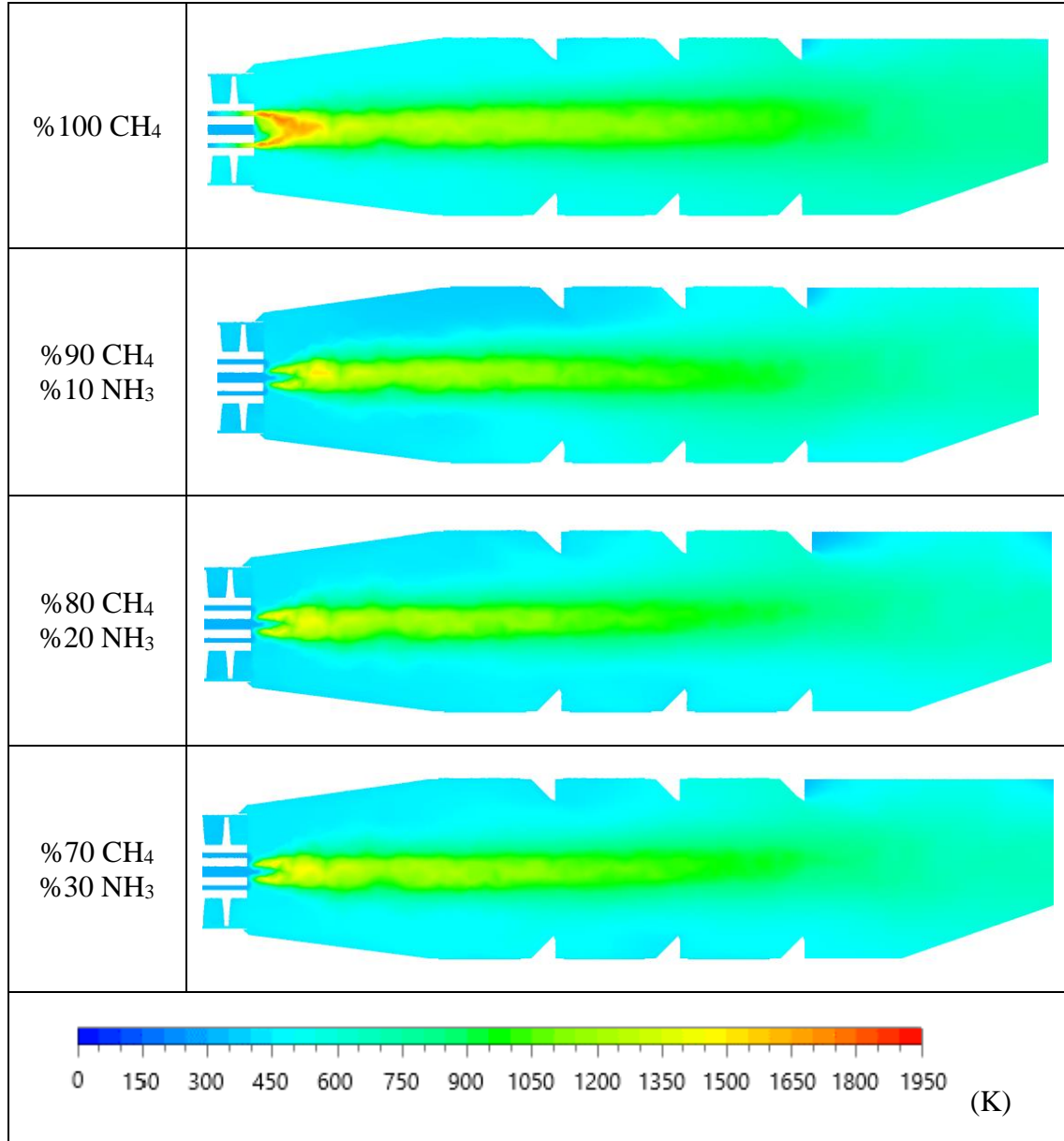
içindeki sıcaklık seviyelerini kontrol edebilmek için kullanılan ikincil ve seyreltme hava girişleri nedeniyle yanma odası çıkışına doğru hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Metan yakıtı alev sıcaklığının, amonyak yanma odasına sokulduğu için ortalama 100 K sıcaklık farkı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tüm amonyak durumları için alevlerin yanma odası çıkışına yayıldığı söylenebilir. Bu, hidrokarbonlara kıyasla amonyağın daha düşük yanma hızından kaynaklanmaktadır [100]. Diğer bir deyişle, karışımın toplam hızı yanma hızından daha yüksektir. Metan ve amonyak destekli metan yakıtlarının maksimum sıcaklık değerleri %100 metan için 1190 K, %90 metan - %10 amonyak için 1376 K, %80 metan - %20 amonyak için 1396 K ve %70 metan - %30 amonyak için 1421 K değerindedir.



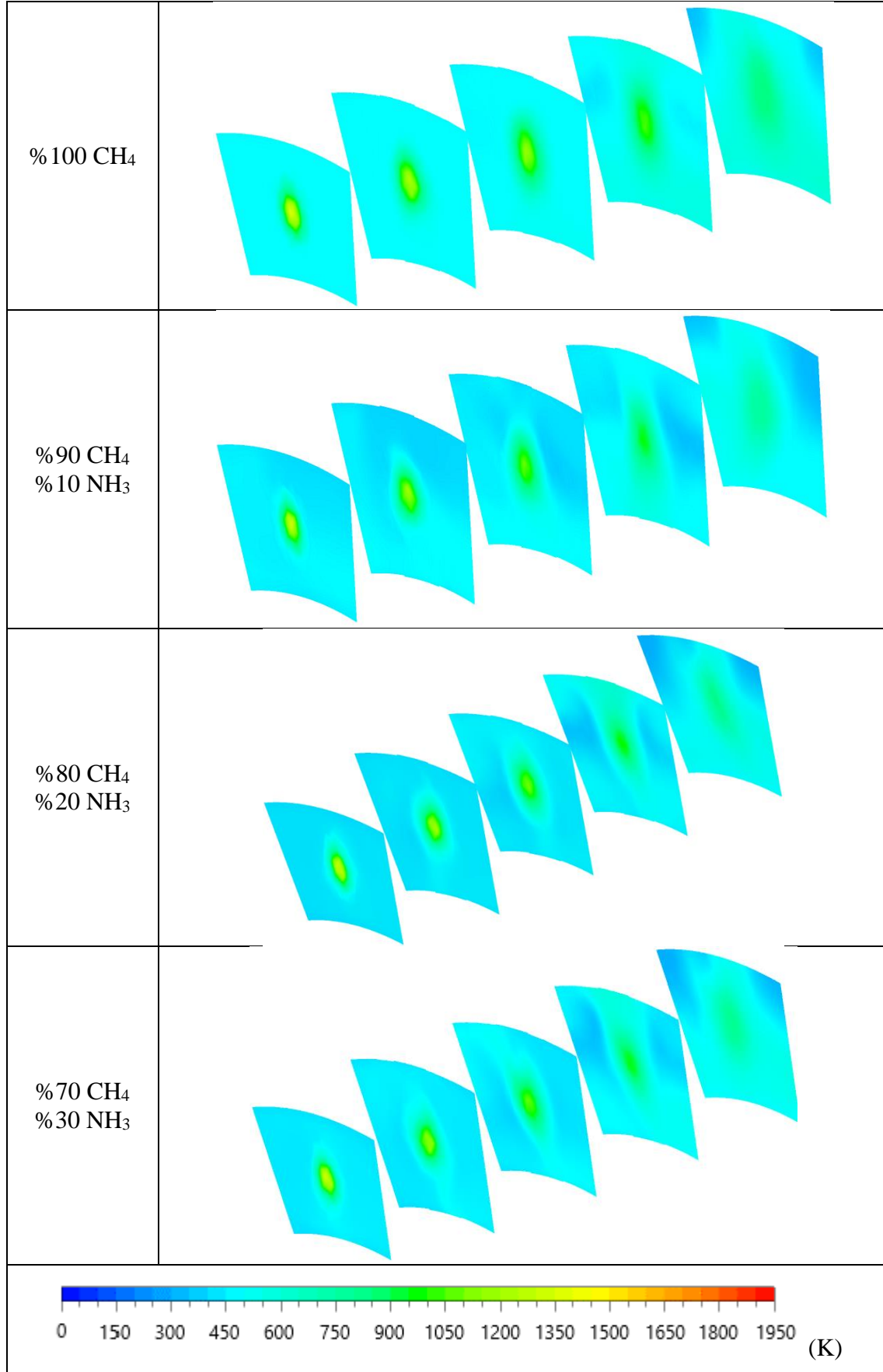
Şekil 6.35. Tüm yanma durumları için öngörülen aksel sıcaklık profilleri

Şekil 6.36'da farklı metan – amonyak yakıt karışımları %100 metan, %90 metan - %10 amonyak, %80 metan - %20 amonyak ve %70 metan - %30 amonyak için sıcaklık konturları gösterilmektedir. Şekil 6.36 aksel profilleri temsil ederken, Şekil 6.37 farklı metan – amonyak yakıt karışımları için radyal sıcaklık konturlarını vermektedir. Rakamlar incelendiğinde, metan yakıtı maksimum sıcaklık seviyesinin, yanma odası içindeki amonyak

ilavesi ile bir miktar arttığı ancak daha fazla değişmediği görülmektedir. Aksine, alevin yeri, düşük yanma hızı nedeniyle daha da ileri taşınmıştır. İkincil ve seyreltme hava akışlarının yanma odasına sokulduğu ikincil bölgeden sonra, incelenen tüm vakalar için sıcaklık dağılımlarının neredeyse aynı olduğu söylenebilir.

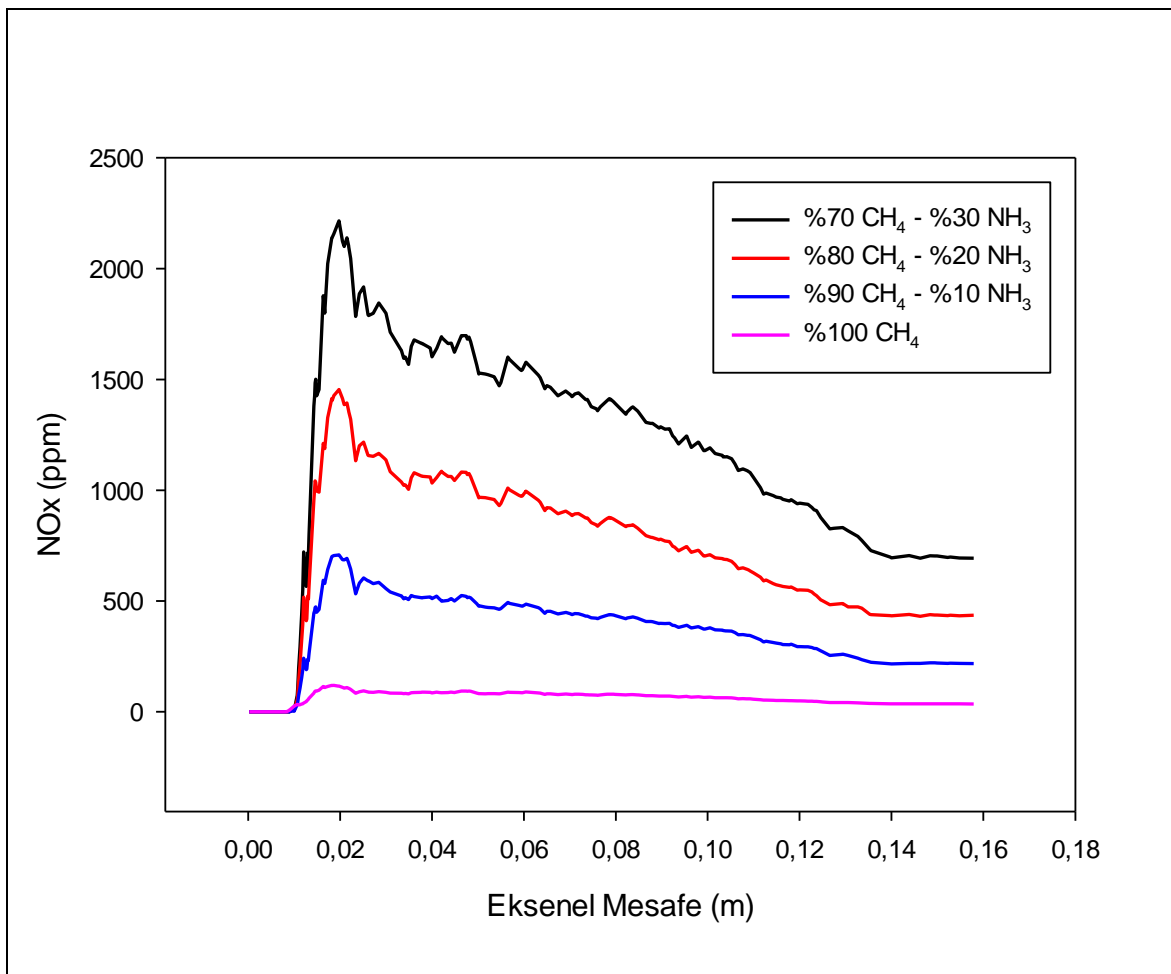


Şekil 6.36. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için aksel sıcaklık konturları



Şekil 6.37. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için radyal sıcaklık konturları.

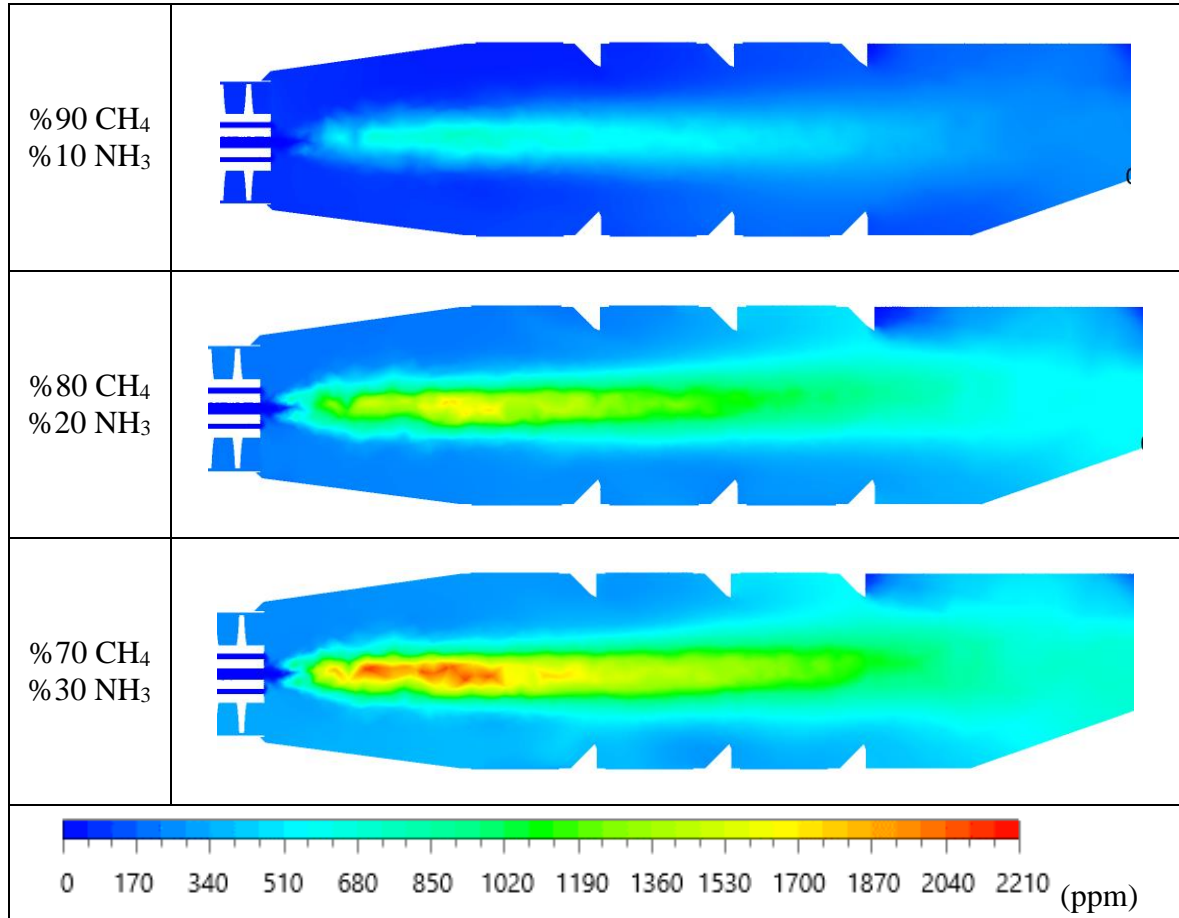
Amonyak ilavesinin etkisini anlamının diğeri bir yolu, yanma odası boyunca radyal sıcaklık konturlarını incelemektir. İncelenen tüm durumlar için radyal sıcaklık konturları farklı aksel mesafelerde (3 cm, 5,5 cm, 8 cm, 10,5 cm ve 13 cm'de) elde edilir. Sıcaklık konturları Şekil 6.37'de her bir durum için sunulmaktadır. Şekil 6.37'de de görüldüğü gibi, yanma odasına amonyak verildiğinde sıcaklık seviyeleri hemen hemen aynı olmuştur. Bununla birlikte, Şekil 6.37'den, amonyak ekleyerek daha da ileri taşınan yüksek sıcaklık bölgelerini anlamak mümkündür. Alevin, karışımın teğet hızı nedeniyle yanma odası duvarlarına çok daha fazla yayıldığı söylenebilir.



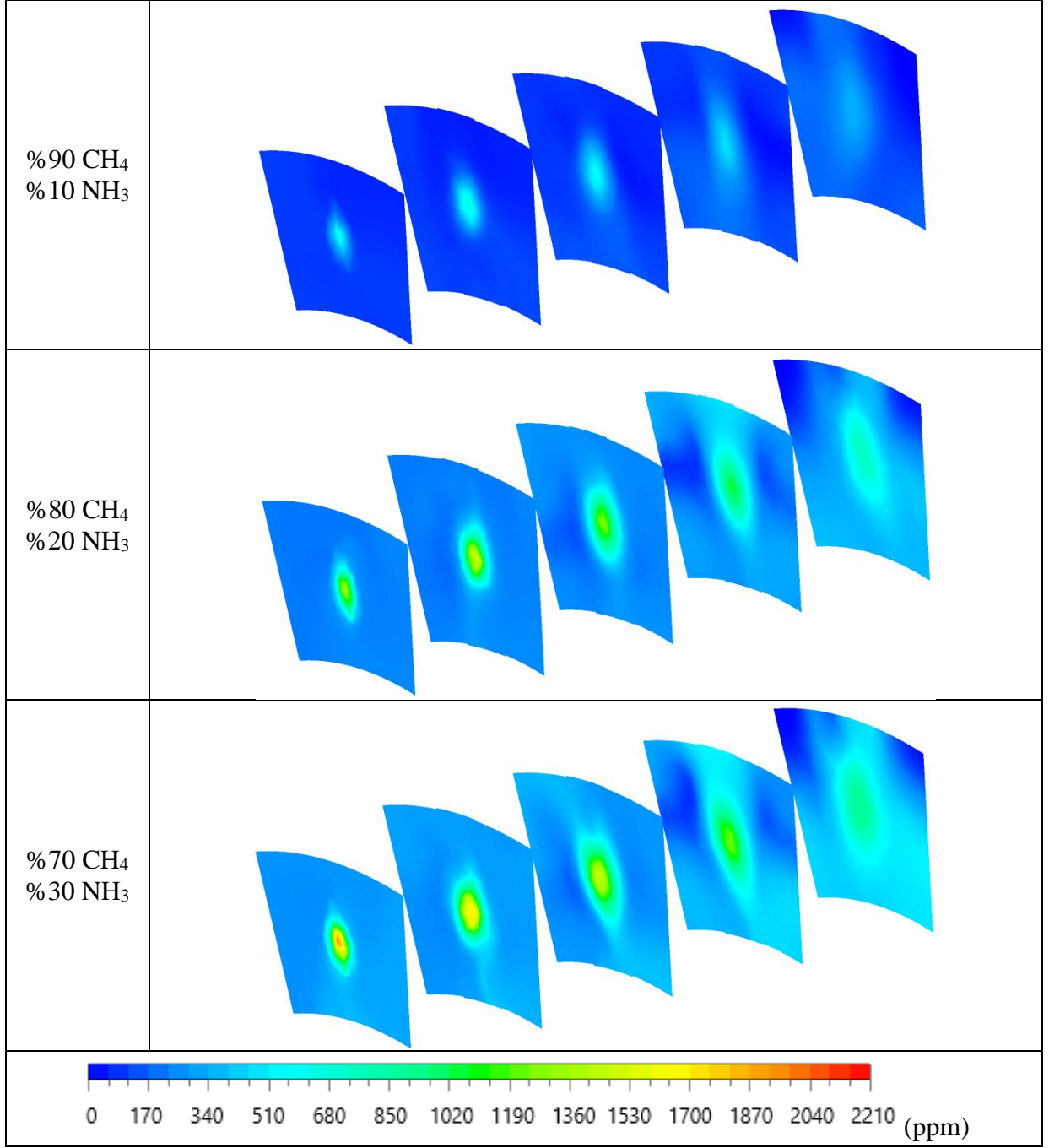
Şekil 6.38. Tüm yanma durumları için öngörülen aksel NO_x profilleri

İncelenecek diğeri önemli yanma parametresi NO_x emisyonudur. Bu kirletici emisyonu termal, hızlı ve yakıt NO_x mekanizmalarından kaynaklanır. Şekil 6.38, incelenen tüm durumlar için aksel NO_x profillerini gösterir. NO_x seviyesi, amonyak destekli vakalara kıyasla %100 metan yakıtının yanma durumunda ihmal edilebilir. Bununla birlikte, öngörülen NO_x seviyeleri, özellikle birincil bölgede yakıt NO_x mekanizması nedeniyle

amonyak girişi ile yükselmiştir. NO_x seviyelerinin %90 metan - %10 amonyak için 712 ppm, %80 metan - %20 amonyak için 1445 ppm ve %70 metan - %30 amonyak için 2210 ppm olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık bölgeleri yanma sırasında termal NO_x mekanizması nedeniyle yüksek NO_x oluşumunu belirler. Amonyak ilavesi ile ortaya çıkan sonuçlar Şekil 6.39 ve Şekil 6.40'da görülebilir. Ayrıca, amonyak ilavesi ile, amonyakta yakıtta bağı azot varlığı nedeniyle daha fazla NO_x oluşumunun ortaya çıktığı gösterilmiştir.



Şekil 6.39. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için aksenal NO_x konturları.



Şekil 6.40. Farklı metan – amonyak yakıt karışımları için radyal NO_x konturları

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, amonyak yakıt ve karışımlarının (Amonyak-Hidrojen, Amonyak-Metan ve Amonyak-Kerosen) yanma performansları ve emisyon parametreleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışma Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Yanma Laboratuvarı'nda bulunan deney sisteminde kütlece %100 CH₄, %90 CH₄ - %10 NH₃, %80 CH₄ - %20 NH₃ ve %70 CH₄ - %30 NH₃ içeren yakıt için gerçekleştirilmiştir. Böylece model bir yanma odasında amonyak yakıt karışımlarının alev yapıları ve yanma odası boyunca meydana gelen aksel sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ek olarak, elde edilen deneysel çalışma sonuçları, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen sayısal modellemenin doğrulaması amacıyla kullanılmıştır. Gazi Üniversitesi'nde lisanslı bulunan ANSYS Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile akış ve yanma modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu modellemelerde, karışım yakıtların modellenmesi kullanmış olup, P-1 radyasyon modeli ve farklı türbülans modelleri ile denemeler yapılarak her bir yakıt grubu için uygun türbülans modelinin seçilmesi de sağlanmıştır. Yapılan sayısal modellemeler ile deneysel ölçüm sonuçları çalışmanın son bölümünde karşılaştırılmış ve sayısal modellemelerin amonyak yakıt karışımları için oldukça iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Çalışma, başarılı bir şekilde sonuçlandırılmış olup, çalışma neticesinde elde edilen önemli bulgular sonuçlar kısmında sunulmuştur.

7.1. Sonuçlar

Yanma odasında amonyak, kerosen, metan ve hidrojen yakıtlarının hava ile yanma reaksiyonunun gaz türbin yanma odası performansına etkilerinin incelendiği sayısal ve deneysel çalışmalarda, toplam ısıl yük sabit tutularak farklı yakıt karışımları oranlarında çözümlenmeler yapılmıştır. Yanma odasında meydana gelen sıcaklık, emisyon ve performans parametrelerinin analiz edildiği bu çalışmada belirli sonuçlar elde edilmiştir. Yanma odasında meydana gelen olaylar sonunda performans özellikleri hakkında elde edilen sonuçlar özetlenirse;

- Çalışmanın sayısal çalışma sayesinde deneysel bölümde ölçüm yapılamayan hız dağılımları, tüm yakıtlar için yanma sonu ürünlerinin hangi bölgelere ve yönlere doğru hareket ettiklerinin saptanmasında yol gösterici olmuştur. Verilere göre, yanma odası

girişinin duvara yakın bölgelerinin resirkülasyon bölgeleri olduğu tespit ve teyit edilmiştir.

- Çalışmanın deneysel kısmında yapılan emisyon ölçümleri irdelenecek olursa, amonyak yakıtının bünyesinde bulunan N'nin yanma sonu ürünlerini doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Hidrojence zengin amonyak yakıtının NO_x emisyonları bünyelerinde bulunan serbest azotun da ısıl NO_x'a katkı yapmasıyla özellikle alev bölgesinde saf metan 82 ppm ve %30 amonyak durumunda 2200 ppm olduğu görülmektedir. Buna rağmen, yanma odası egzoz çıkışında ise saf metan 32 ppm ve 682 ppm çok yüksek seviyelerde NO_x'e rastlanmamıştır. NO_x kirletici emisyonları, yanma odasında ve gaz türbini brülöründe bulunan ikincil ve seyreltme bölgelerindeki soğutma havası ile bastırılır.
- Deneysel esnasında, yanma odasında bulunan gözetleme camı ile yapılan gözlemlerde, metan, hidrojence zengin amonyak yakıtının alevleri sürekli izlenmiş ve herhangi bir alev kopması gibi bir alev kararsızlığına rastlanmamıştır. Ancak %30'dan fazla metan yakıtına amonyak ilavesi sonrası alev kararsızlığı görülmüştür ve geri tepme gerçekleşmiştir. Bu sonucun diğer deneysel çalışmalarda da literatür taraması sonucu aynı şekilde olduğu görülmektedir [22,26]. Diğer taraftan, bahsi geçen yakıt bileşimleri için elde edilen alev renginin turuncuya yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu alev rengi, N H₂α bandı ve aşırı sıcak olan H₂O spektrumunun etkisiyle meydana gelmiştir.
- Sayısal model doğrulama işlemlerinin tümünde, özellikle alev bölgesi için, farklı türbülans modellerinin birbirlerinden farklı sıcaklık profilleri sağladığı tespit edilmiştir. Bu durumun, alev bölgesinde mevcut olan yüksek türbülans şiddeti nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Ayrıca, yanma odası çıkışına doğru gidildikçe, her bir türbülans modeli için tahmin edilen sıcaklık profillerinin birbirlerine yaklaştığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan, model doğrulama işlemlerinde elde edilen tahmin sonuçları ve deneysel çalışma sonuçları birbirleri ile karşılaştırıldığında, en tutarlı sonuçların yüksek girdap tepkime denklemleri göz önünde bulundurularak RNG k-ε türbülans modeli ile elde edildiği görülmüştür.
- NH₃-H₂ yakıt karışımları için yapılan sıcaklık tahminlerine göre, yakıt karışımı içerisindeki H₂ miktarının artmasıyla, alev bölgesinde ve yanma odası boyunca daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşılmıştır. Saf amonyak yanması sonucu en yüksek ortalama sıcaklık 1690 K iken %50 amonyak - %50 hidrojen yakıt karışımında en yüksek sıcaklık 2012 K olduğu görülmektedir. Ek olarak, tahmin edilen eksenel sıcaklık profilleri değerlendirildiğinde, daha yüksek oranda H₂ içeren yakıt karışımı alevinin, yanma odası

girişine daha yakın olduğu söylenebilir. Bu durum, NH₃-hava karışımına yapılan H₂ ilavesinin, yanma hızlarında olumlu bir etki meydana getirdiğinin göstergesidir.

- NH₃-H₂ yakıt karışımları için tahmin edilen NO_x emisyonları değerlendirilecek olursa, NH₃-hava karışımına yapılan H₂ ilavesinin yanma odası boyunca meydana gelen NO_x emisyonlarını arttırdığı rahatlıkla söylenebilir. Saf amonyak yanması sonucu en yüksek ortalama NO_x 809 ppm iken %50 amonyak - %50 hidrojen yakıt karışımında en yüksek NO_x 1255 ppm olduğu görülmektedir. NO_x emisyonlarında gözlemlenen yükselişin, yakıt karışımı içerisindeki artan hidrojen miktarı ile tutarlı olduğu söylenebilir. Yakıt karışımı içerisindeki NH₃ miktarının azalmasına rağmen, NO_x emisyonlarında meydana gelen yükselme, NH₃- H₂ yakıt karışımları için termal-NO mekanizmasının daha baskın olmasının bir sonucudur.
- NH₃-hava karışımına yapılan H₂ ilavesinin etkileri genel olarak değerlendirildiğinde, yakıt karışımı içerisindeki H₂ konsantrasyonunun artması, NH₃-hava karışımının reaktivitesi, alev sıcaklığı ve yanma hızı gibi özellikleri üzerinde pozitif etkiler meydana getirmiştir. Buna karşın, H₂ miktarının artmasıyla, yanma odası boyunca meydana gelen NO_x emisyonları yükselmiştir. Yanma odası boyunca tahmin edilen hız dağılımları, yanma odası içerisinde meydana gelen yanma sonu ürünlerinin dağılımları hakkında önemli bulgular sağlamıştır. Özellikle alev bölgesi için tahmin edilen sıcaklık profillerinin göstermiş olduğu ani düşüş trendi ile bu bölgedeki yanma sonu ürünlerinin hareketi arasında bir tutarlılık olduğu tespit edilmiştir.
- Amonyak-kerosen karışımı alev konumunun, saf kerosene kıyasla daha düşük yanma hızı nedeniyle yanma odasına amonyak eklenmesiyle daha da ileri gittiği görülmektedir.
- Yanma odası içerisine amonyak ilavesi ile gaz türbini yanma odası içindeki ikincil ve seyreltme bölgelerinde yakıt- NO_x 'a katkıda bulunan amonyaktaki bağlı nitrojen nedeniyle alev bölgesinde NO_x seviyeleri artmasına rağmen, tahmin edilen NO_x seviyelerinin yanma odası çıkışında onları bastırarak en fazla farkın ortalama 90 ppm olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle, amonyak içinde hidrojen bulunması nedeniyle yüksek enerji içeriğinden dolayı amonyak, gaz türbini yanma odası için yeni ve yardımcı bir yakıt gibi görünmektedir.
- Hava yerine saf oksijen kullanılarak yanma odasında daha yüksek sıcaklık değerleri gözlenmiştir. Ayrıca alevin, havayla yanmaya kıyasla yanma odasının merkezine çok daha fazla yerleştiği tahmin edilmektedir. Bu, daha düşük karışım debisi (hava yerine sadece oksijen kullanılması) ve yüksek sıcaklık seviyesi ile alev hızıyla açıklanabilir. Bu

durum, havayla yanma koşullarına kıyasla alev bölgesinde %10 amonyak için ortalama 6000 ppm, %20 amonyak için 5400 ppm ve %30 amonyak için 5200 ppm NO_x oluşumunu zorunlu kılmaktadır. Böylece amonyağın alternatif bir yakıt olarak yanma performansını düşürmeden gaz türbinlerinde yardımcı yakıt olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. NO_x seviyeleri önünde bir sorun olarak görölse de ikincil ve seyreltme bölgesi etkileri ile yanma odası çıkışında %10 amonyak için ortalama 180 ppm, %20 amonyak için 200 ppm ve %30 amonyak için 210 ppm NO_x seviyesi olmadığı anlaşılmaktadır.

- Soğutma havası açısı seviyesi 15 dereceden 45 dereceye arttığında, ikincil alanda daha düşük sıcaklık seviyeleri gözlenirken, egzoz çıkışı nispeten yüksektir. Bu, hava açısı nedeniyle homojen bir karışım ile açıklanabilir. Soğutma delikleri, yanma duvarının eşit sıcaklıkta işlenmesine yardımcı olur.
- Yanma odasının egzoz bölgesindeki sıcaklık dağılımının, soğutma yuvalarının eğiminden önemli ölçüde etkilendiği tespit edilmiştir. Model faktörü tarafından alınan karara bağlı olarak, soğutma yuvalarının 45 derecelik gradyan açısı, çıkışta 15 ile 30 derecelik eğim açılara sahip diğer koşullara göre daha çapraz kontrollü homojen bir sıcaklık dağılımı sağlar. Bunun sonucu soğuma açısına 15 derece daha yakın olduğu için %100 amonyak için 390 ppm egzoz emisyon NO_x değeri ortalama yanma odası sıcaklığını etkilemeden düştüğü görülmektedir.

Sonuç olarak amonyak destekli hidrojen, metan ve kerosen yakıt karışımları gaz türbinli yanma odalarında sıcaklık, emisyon ve performans bakımından incelenmiştir. Böylece endüstride ve uygulamalarında amonyak yakıtının yardımcı bir yakıt olarak kullanılabilceği yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda görülmektedir.

7.2. Öneriler

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda elde edilen tecrübeler ışığında, aşağıda sunulan önerilerin, NH₃ gazının yanma performansının yükseltilmesi ve başarılı bir şekilde yakılmasına ilişkin gelecekte yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

- Emisyon problemini çözmek için yüksek amonyağı kararlı bir şekilde yakabilen bir brülör geliştirilmesi veya mevcut brülöre hidrojen eklenmesi önerilir.

- Hidrojence zengin amonyak yakıtının yanması neticesinde yüksek miktarda oluşan NO_x emisyonlarının azaltılmasına yönelik kademeli yakma tekniği kullanılarak deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilebilir.
- Çalışmada kullanılan amonyak yakıtlarının, daha farklı basınçlarda, farklı gaz türbini modellerinde ve farklı yanma şartlarında yakılabilir. Ayrıca farklı türbülator açlarına sahip brülörlerde de çalışmalar yapılarak sıcaklık, emisyon ve hız profilleri incelenebilir.
- Çalışma kapsamında kullanılan yakıtların yakılmasında, yanma odasında içerisinde meydana gelen akış alanının incelenmesi ile ilgili sayısal ve deneysel çalışmalar yapılabilir. Bu kapsamda, akış alanındaki hız vektörleri ve türbülans şiddeti gibi parametrelerin incelenmesiyle, söz konusu yakıtları daha verimli bir şekilde yakabilecek brülör ve yanma odalarına ilişkin tasarım çalışmalarına ışık tutan bilgiler sağlanabilir.
- Alev kararsızlığının sayısal çalışmalarla Markstein uzunluğu, Levis sayısı, Zel'dovich sayısı, laminar yanma hızı, geri tepme genliği gibi parametrelerin ölçülebilmesi için yüksek hızlara sahip PIV vb. yüksek teknolojik cihazların kullanımı ile incelenebilir.
- Orta veya yoğun düşük oksijen seyreltme (MILD), katalitik yanma, plazma destekli yanma, vb. gibi amonyak bazlı yakıtların NO_x 'ini azaltmak için yeni yakma teknolojileri keşfedilebilir.

KAYNAKLAR

1. Lefebvre, D. and Tezel, F.H. (2017). A Review of Energy Storage Technologies with a Focus on Adsorption Thermal Energy Storage Processes for Heating Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 116–125.
2. Wang, S., Tarroja, B., Schell, L.S., Shaffer, B. and Samuelson, S. (2019). Prioritizing among the End Uses of Excess Renewable Energy for Cost-Effective Greenhouse Gas Emission Reductions. *Applied Energy*, 235, 284–298.
3. Nemitallah, M.A., Abdelhafez, A.A. and Habib, M.A. (2020). *Approaches for Clean Combustion in Gas Turbines*. Cambridge: Yayinevi Springer International Publishing, 122.
4. İnternet: UN Climate Change Annual Report 2018. URL: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HqnaiOucWCMJ:https://unfccc.int/sites/default/files/resource/UN-Climate-Change-Annual-Report-2018.pdf&cd=1&hl=tr&ct=clnk&gl=tr>. Son Erişim Tarihi:28.09.2023.
5. Klerke, A., Christensen, C.H., Nørskov, J.K. and Vegge, T. (2008). Ammonia for Hydrogen Storage: Challenges and Opportunities. *Journal of Materials Chemistry*, 18, 2304–2310.
6. Hayakawa, A., Arakawa, Y., Mimoto, R., Somarathne, K.D.K.A., Kudo, T. and Kobayashi, H. (2017). Experimental Investigation of Stabilization and Emission Characteristics of Ammonia/Air Premixed Flames in a Swirl Combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 14010–14018.
7. Bastani, M., Tabejamaat, S. and Ashini, H. (2023). Numerical and Experimental Study of Combustion and Emission Characteristics of Ammonia/Methane Fuel Mixture in Micro Gas Turbine Combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, Baskıda.
8. Wang, Y., Liu, J., Wang, L., Fu, Z. and Weng, P. (2023). Non-Premixed Combustion and NO_x Emission Characteristics in a Micro Gas Turbine Swirl Combustor Fueled by Methane and Ammonia at Various Heat Loads. *Heliyon*, Baskıda.
9. Kumuk, O. and Ilbas, M. (2023). Comparative Analysis of Ammonia/Hydrogen Fuel Blends Combustion in a High Swirl Gas Turbine Combustor with Different Cooling Angles. *International Journal of Hydrogen Energy*, Baskıda.
10. Zhang, M., Xu, W., Wang, R., Wei, X., Wang, J., Huang, Z. and Tan, H. (2023). Wall Heat Loss Effect on the Emission Characteristics of Ammonia Swirling Flames in a Model Gas Turbine Combustor. *Combustion and Flame*, 256, 112955.
11. Ilbas, M., Kumuk, O. and Alabas, B. (2023). Experimental Investigation of the Combustion Instability Behaviors and NO_x Emissions in an Ammonia/Methane Fueled Low Eddy Premixed Burner. *Journal of the Energy Institute*, 108, 101241.
12. Valera-Medina, A., Morris, S., Runyon, J., Pugh, D.G., Marsh, R., Beasley, P. and Hughes, T. (2015). Ammonia, Methane and Hydrogen for Gas Turbines. *Energy Procedia*, 118–123.

13. Han, X., Wang, Z., Costa, M., Sun, Z., He, Y. and Cen, K. (2019). Experimental and Kinetic Modeling Study of Laminar Burning Velocities of NH_3/Air , $\text{NH}_3/\text{H}_2/\text{Air}$, $\text{NH}_3/\text{CO}/\text{Air}$ and $\text{NH}_3/\text{CH}_4/\text{Air}$ Premixed Flames. *Combustion and Flame*, 206, 214–226.
14. Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Inoue, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kobayashi, H. and Hayakawa, A. (2017). Performances and Emission Characteristics of NH_3 –Air and NH_3 – CH_4 –Air Combustion Gas-Turbine Power Generations. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, 3351–3359.
15. Kurata, O., Iki, N., Inoue, T., Matsunuma, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kawano, M., Arai, K., Okafor, E.C., Hayakawa, A. and Kobayashi, H. (2019). Development of a Wide Range-Operable, Rich-Lean Low- NO_x Combustor for NH_3 Fuel Gas-Turbine Power Generation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 4587–
16. Somarathne, K.D.K.A., Hatakeyama, S., Hayakawa, A. and Kobayashi, H. (2017). Numerical Study of a Low Emission Gas Turbine like Combustor for Turbulent Ammonia/Air Premixed Swirl Flames with a Secondary Air Injection at High Pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 27388–27399.
17. Okafor, E.C., Somarathne, K.D.K.A., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N. and Kobayashi, H. (2019). Towards the Development of an Efficient Low- NO_x Ammonia Combustor for a Micro Gas Turbine. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 4597–4606.
18. Jójka, J. and Ślefarski, R. (2018). Dimensionally Reduced Modeling of Nitric Oxide Formation for Premixed Methane-Air Flames with Ammonia Content. *Fuel*, 217, 98–105.
19. Valera-Medina, A., Marsh, R., Runyon, J., Pugh, D., Beasley, P., Hughes, T. and Bowen, P. (2017). Ammonia–Methane Combustion in Tangential Swirl Burners for Gas Turbine Power Generation. *Applied Energy*, 185, 1362–1371.
20. Ichikawa, A., Hayakawa, A., Kitagawa, Y., Kunkuma Amila Somarathne, K.D., Kudo, T. and Kobayashi, H. (2015). Laminar Burning Velocity and Markstein Length of Ammonia/Hydrogen/Air Premixed Flames at Elevated Pressures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 9570–9578.
21. Valera-Medina, A., Pugh, D.G., Marsh, P., Bulat, G. and Bowen, P. (2017). Preliminary Study on Lean Premixed Combustion of Ammonia-Hydrogen for Swirling Gas Turbine Combustors. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 24495–24503.
22. Valera-Medina, A., Gutesa, M., Xiao, H., Pugh, D., Giles, A., Goktepe, B., Marsh, R. and Bowen, P. (2019). Premixed Ammonia/Hydrogen Swirl Combustion under Rich Fuel Conditions for Gas Turbines Operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 8615–8626.
23. Somarathne, K.D.K.A., Hayakawa, A. and Kobayashi, H. (2016). Numerical Investigation on the Combustion Characteristics of Turbulent Premixed Ammonia/Air Flames Stabilized by a Swirl Burner. *Journal of Fluid Science and Technology*, 11, 26.
24. Xiao, H., Valera-Medina, A., Marsh, R. and Bowen, P.J. (2017). Numerical Study

- Assessing Various Ammonia/Methane Reaction Models for Use under Gas Turbine Conditions. *Fuel*, 196, 344–351.
25. Kurata, O., Iki, N., Matsunuma, T., Inoue, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kobayashi, H. and Hayakawa, A. (2017). Performances and Emission Characteristics of NH₃-Air and NH₃-CH₄-Air Combustion Gas-Turbine Power Generations. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, 3351–3359.
 26. Somarathne, K.D.K.A., C. Okafor, E., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N. and Kobayashi, H. (2019). Emission Characteristics of Turbulent Non-Premixed Ammonia/Air and Methane/Air Swirl Flames through a Rich-Lean Combustor under Various Wall Thermal Boundary Conditions at High Pressure. *Combustion and Flame*, 210, 247–261.
 27. Valera-Medina, A., Gutesa, M., Xiao, H., Pugh, D., Giles, A., Goktepe, B., Marsh, R. and Bowen, P. (2019). Premixed Ammonia/Hydrogen Swirl Combustion under Rich Fuel Conditions for Gas Turbines Operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 8615–8626.
 28. Okafor, E.C., Somarathne, K.D.K.A., Ratthanan, R., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N., Tsujimura, T., Furutani, H. and Kobayashi, H. (2020). Control of NO_x and Other Emissions in Micro Gas Turbine Combustors Fuelled with Mixtures of Methane and Ammonia. *Combustion and Flame*, 211, 406–416.
 29. Viguera-Zuniga, M.O., Tejada-Del-Cueto, M.E., Vasquez-Santacruz, J.A., Herrera-May, A.L. and Valera-Medina, A. (2020). Numerical Predictions of a Swirl Combustor Using Complex Chemistry Fueled with Ammonia/Hydrogen Blends. *Energies*, 13, 288.
 30. Franco, M.C., Rocha, R.C., Costa, M. and Yehia, M. (2021). Characteristics of NH₃/H₂/Air Flames in a Combustor Fired by a Swirl and Bluff-Body Stabilized Burner. *Proceedings of the Combustion Institute*, 38, 5129–5138.
 31. Kurata, O., Iki, N., Inoue, T., Matsunuma, T., Tsujimura, T., Furutani, H., Kawano, M., Arai, K., Okafor, E.C., Hayakawa, A. and Kobayashi, H. (2019). Development of a Wide Range-Operable, Rich-Lean Low-NO_x Combustor for NH₃ Fuel Gas-Turbine Power Generation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 4587–4595.
 32. Somarathne, K.D.K.A., C. Okafor, E., Hayakawa, A., Kudo, T., Kurata, O., Iki, N. and Kobayashi, H. (2019). Emission Characteristics of Turbulent Non-Premixed Ammonia/Air and Methane/Air Swirl Flames through a Rich-Lean Combustor under Various Wall Thermal Boundary Conditions at High Pressure. *Combustion and Flame*, 210, 247–261.
 33. Chen, C.H. and Li, Y.H. (2021). Role of N₂O and Equivalence Ratio on NO_x Formation of Methane/Nitrous Oxide Premixed Flames. *Combustion and Flame*, 223, 42–54.
 34. Yilmaz, I., Yilmaz, H., Cam, O. and Ilbas, M. (2018). Combustion Characteristics of Premixed Hydrogen/Air Flames in a Geometrically Modified Micro Combustor. *Fuel*, 217, 536–543.

35. Hayakawa, A., Arakawa, Y., Mimoto, R., Somarathne, K.D.K.A., Kudo, T. and Kobayashi, H. (2017). Experimental Investigation of Stabilization and Emission Characteristics of Ammonia/Air Premixed Flames in a Swirl Combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 14010–14018.
36. Nozari, H. and Karabeyoğlu, A. (2015). Numerical Study of Combustion Characteristics of Ammonia as a Renewable Fuel and Establishment of Reduced Reaction Mechanisms. *Fuel*, 159, 223–233.
37. Amani, E., Akbari, M.R. and Shahpouri, S. (2018). Multi-Objective CFD Optimizations of Water Spray Injection in Gas-Turbine Combustors. *Fuel*, 227, 267–278.
38. Torkzadeh, M.M., Bolourchifard, F. and Amani, E. (2016). An Investigation of Air-Swirl Design Criteria for Gas Turbine Combustors through a Multi-Objective CFD Optimization. *Fuel*, 186, 734–749.
39. Adachi, S., Iwamoto, A., Hayashi, S., Yamada, H. and Kaneko, S. (2007). Emissions in Combustion of Lean Methane-Air and Biomass-Air Mixtures Supported by Primary Hot Burned Gas in a Multi-Stage Gas Turbine Combustor. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 3131–3138.
40. Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2013). Fuel Flexible Distributed Combustion for Efficient and Clean Gas Turbine Engines. *Applied Energy*, 109, 267–274.
41. Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2017). Towards Colorless Distributed Combustion Regime. *Fuel*, 195, 113–122.
42. Arghode, V.K., Gupta, A.K. and Bryden, K.M. (2012). High Intensity Colorless Distributed Combustion for Ultra Low Emissions and Enhanced Performance. *Applied Energy*, 92, 822–830.
43. Roy, R. and Gupta, A.K. (2020). Flame Structure and Emission Signature in Distributed Combustion. *Fuel*, 262, 116460.
44. Fordoei, E.E., Mazaheri, K. and Mohammadpour, A. (2021). Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics, Flame Structure, and Pollutants Emission in the MILD Methane-Air, Oxygen-Enriched and Oxy-Methane Combustion. *Energy*, 218, 119524.
45. Cho, J. and Song, S. (2020). Prediction of Hydrogen-Added Combustion Process in T-GDI Engine Using Artificial Neural Network. *Applied Thermal Engineering*, 181, 115974.
46. Gutarevych, Y., Shuba, Y., Matijošius, J., Karev, S., Sokolovskij, E. and Rimkus, A. (2018). Intensification of the Combustion Process in a Gasoline Engine by Adding a Hydrogen-Containing Gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 16334–16343.
47. Ahmadi, R. and Hosseini, S.M. (2018). Numerical Investigation on Adding/Substituting Hydrogen in the CDC and RCCI Combustion in a Heavy Duty Engine. *Applied Energy*, 213, 450–468.

48. Alabaş, B., Tunç, G., Taştan, M. and Yilmaz, I. (2021). Experimental Investigation of the Emission Behaviour and Flame Stability of the Oxygen and Hydrogen Enriched Methane under Acoustic Enforcement. *Fuel*, 290, 120047.
49. Ariemma, G.B., Sorrentino, G., Ragucci, R., de Joannon, M. and Sabia, P. (2022). Ammonia/Methane Combustion: Stability and NO_x Emissions. *Combustion and Flame*, 241, 112071.
50. Dai, H., Wang, J., Cai, X., Su, S., Zhao, H. and Huang, Z. (2022). Measurement and Scaling of Turbulent Burning Velocity of Ammonia/Methane/Air Propagating Spherical Flames at Elevated Pressure. *Combustion and Flame*, 242, 112183.
51. Sun, J., Yang, Q., Zhao, N., Chen, M. and Zheng, H. (2022). Numerically Study of CH₄/NH₃ Combustion Characteristics in an Industrial Gas Turbine Combustor Based on a Reduced Mechanism. *Fuel*, 327, 124897.
52. Mikulčić, H., Baleta, J., Wang, X., Wang, J., Qi, F. and Wang, F. (2021). Numerical Simulation of Ammonia/Methane/Air Combustion Using Reduced Chemical Kinetics Models. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 23548–23563.
53. Zhang, M., An, Z., Wang, L., Wei, X., Jianayihan, B., Wang, J., Huang, Z. and Tan, H. (2021). The Regulation Effect of Methane and Hydrogen on the Emission Characteristics of Ammonia/Air Combustion in a Model Combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 21013–21025.
54. Celtek, M.S. (2022). The Decreasing Effect of Ammonia Enrichment on the Combustion Emission of Hydrogen, Methane, and Propane Fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 19916–19934.
55. Xiao, H., Valera-Medina, A. and Bowen, P.J. (2017). Study on Premixed Combustion Characteristics of Co-Firing Ammonia/Methane Fuels. *Energy*, 140, 125–135.
56. Honzawa, T., Kai, R., Okada, A., Valera-Medina, A., Bowen, P.J. and Kurose, R. (2019). Predictions of NO and CO Emissions in Ammonia/Methane/Air Combustion by LES Using a Non-Adiabatic Flamelet Generated Manifold. *Energy*, 186, 115771.
57. Ni, S., Zhao, D., Wu, W.W. and Guan, Y. (2020). NO_x Emission Reduction Reaction of Ammonia-Hydrogen with Self-Sustained Pulsating Oscillations. *Thermal Science and Engineering Progress*, 19, 100615.
58. Hassan, M.I., Wu, T.W. and Saito, K. (2013). A Combination Effect of Reburn, Post-Flame Air and Acoustic Excitation on NO_x Reduction. *Fuel*, 108, 231–237.
59. Ji, C., Xin, G., Wang, S., Cong, X., Meng, H., Chang, K. and Yang, J. (2021). Effect of Ammonia Addition on Combustion and Emissions Performance of a Hydrogen Engine at Part Load and Stoichiometric Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 40143–40153.
60. Yang, W., Ranga Dinesh, K.K.J., Luo, K.H. and Thevenin, D. (2022). Direct Numerical Simulation of Turbulent Premixed Ammonia and Ammonia-Hydrogen Combustion under Engine-Relevant Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 11083–11100.

61. Xin, G., Ji, C., Wang, S., Meng, H., Chang, K. and Yang, J. (2022). Effect of Different Volume Fractions of Ammonia on the Combustion and Emission Characteristics of the Hydrogen-Fueled Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 16297-16308
62. Goldmann, A. and Dinkelacker, F. (2022). Investigation of Boundary Layer Flashback for Non-Swirling Premixed Hydrogen/Ammonia/Nitrogen/Oxygen/Air Flames. *Combustion and Flame*, 238, 111927.
63. Tian, K., Wang, J., Liu, C., Baleta, J., Yang, L. and Sunden, B. (2018). Effect of Combined Hole Configuration on Film Cooling with and without Mist Injection. *Thermal Science*, 22, 1923–1931.
64. Andreini, A., Becchi, R., Facchini, B., Mazzei, L., Picchi, A., Vitale, I. and Tolpadi, A. (2017). Experimental and Numerical Investigation of the Mutual Interaction Between Liner Film Cooling and Combustor Swirl Flow. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 5C-2017.
65. Zhang, J., Yuan, C., Ji, P., Wei, J. and He, X. (2018). Experimental Investigation on the Overall Cooling Effectiveness of T-Type Impinging-Film Cooling. *Applied Thermal Engineering*, 128, 595–603.
66. Vanga, S.R., Ritchie, D., Click, A., Ren, Z., Ligrani, P., Liberatore, F., Patel, R. and Srinivasan, R. (2019). Double Wall Cooling of a Full- Coverage Effusion Plate with Main Flow Pressure Gradient, Including Internal Impingement Array Cooling. *Journal of Turbomachinery*, 141.
67. Ren, Z., Vanga, S.R., Rogers, N., Ligrani, P., Hollingsworth, K., Liberatore, F., Patel, R., Srinivasan, R. and Ho, Y. hsiang. (2018). Internal and External Cooling of a Full Coverage Effusion Cooling Plate: Effects of Double Wall Configuration and Conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 124, 36–49.
68. Andreini, A., Facchini, B., Picchi, A., Tarchi, L. and Turrini, F. (2013). Experimental and Theoretical Investigation of Thermal Effectiveness in Multi-Perforated Plates for Combustor Liner Effusion Cooling. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 3 C.
69. Ben Sik Ali, A., Kriaa, W., Mhiri, H. and Bournot, P. (2012). Numerical Investigations of Cooling Holes System Role in the Protection of the Walls of a Gas Turbine Combustion Chamber. *Heat and Mass Transfer*, 48, 779–788.
70. Mendiara, T. and Glarborg, P. (2009). Ammonia Chemistry in Oxy-Fuel Combustion of Methane. *Combustion and Flame*, 156, 1937–1949.
71. Mathieu, O. and Petersen, E.L. (2015). Experimental and Modeling Study on the High-Temperature Oxidation of Ammonia and Related NO_x Chemistry. *Combustion and Flame*, 162, 554–570.
72. İnternet: Ammonia Combustion with Near-Zero Pollutant Emissions. URL: https://nh3fuelassociation.org/wp-content/uploads/2012/05/near_zero.pdf. Son Erişim Tarihi: 29.09.2023.
73. İnternet: Rolls Royce. The Jet Engine 5th Edition. URL: <https://dokumen.tips/documents/rolls-royce-the-jet-engine-5th-edition.html?page=6>,

Son Erişim Tarihi:29.09.2023.

74. Yapicioglu, A. and Dincer, I. (2019). A Review on Clean Ammonia as a Potential Fuel for Power Generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 103, 96–108.
75. Kobayashi, H., Hayakawa, A., Somarathne, K.D.K.A. and Okafor, E.C. (2019). Science and Technology of Ammonia Combustion. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 109–133.
76. Rafiqul, I., Weber, C., Lehmann, B. and Voss, A. (2005). Energy Efficiency Improvements in Ammonia Production—Perspectives and Uncertainties. *Energy*, 30, 2487–2504.
77. Wang, L., Xia, M., Wang, H., Huang, K., Qian, C., Maravelias, C.T. and Ozin, G.A. (2018). Greening Ammonia toward the Solar Ammonia Refinery. *Joule*, 2, 1055–1074.
78. Avery, W.H. (1988). A Role for Ammonia in the Hydrogen Economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13, 761–773.
79. Smith, A.R. and Klosek, J. (2001). A Review of Air Separation Technologies and Their Integration with Energy Conversion Processes. *Fuel Processing Technology*, 70, 115–134.
80. İnternet: UC Berkeley Recent Work Title Ammonia as an Alternative Energy Storage Medium for Hydrogen Fuel Cells: Scientific and Technical Review for Near-Term Stationary Power Demonstration Projects, Final Report Permalink URL: <https://Escholarship.Org/Uc/Item/7z69v4wp>. Son Erişim Tarihi: 28.09.2023.
81. Li, C., Wang, T. and Gong, J. (2020). Alternative Strategies Toward Sustainable Ammonia Synthesis. *Transactions of Tianjin University*, 26, 67–91.
82. Amar, I.A., Lan, R., Petit, C.T.G., Arrighi, V. and Tao, S. (2011). Electrochemical Synthesis of Ammonia Based on a Carbonate-Oxide Composite Electrolyte. *Solid State Ionics*, 182, 133–138.
83. Gálvez, M.E., Halmann, M. and Steinfeld, A. (2007). Ammonia Production via a Two-Step $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlN}$ Thermochemical Cycle. 1. Thermodynamic, Environmental, and Economic Analyses. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46, 2042–2046.
84. Juangsa, F.B. and Aziz, M. (2019). Integrated System of Thermochemical Cycle of Ammonia, Nitrogen Production, and Power Generation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 17525–17534.
85. Kurien, C. and Mittal, M. (2022). Review on the Production and Utilization of Green Ammonia as an Alternate Fuel in Dual-Fuel Compression Ignition Engines. *Energy Conversion and Management*, 251, 114990.
86. Simmie, J.M. (2003). Detailed Chemical Kinetic Models for the Combustion of Hydrocarbon Fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 599–634.

87. K romn s, A., Metcalfe, W.K., Heufer, K.A., Donohoe, N., Das, A.K., Sung, C.J., Herzler, J., Naumann, C., Griebel, P., Mathieu, O., Krejci, M.C., Petersen, E.L., Pitz, W.J. and Curran, H.J. (2013). An Experimental and Detailed Chemical Kinetic Modeling Study of Hydrogen and Syngas Mixture Oxidation at Elevated Pressures. *Combustion and Flame*, 160, 995–1011.
88. Fluent 6.1 User’s Guide (2003). Lebanon, NH. - References - Scientific Research Publishing. URL: <https://www.scirp.org/%28S%28lz5mqp453edsnp55rrgict55%29%29/reference/refere ncespapers.aspx?referenceid=2327439>. Son Erişim Tarihi: 29.09.2023.
89. Iibas, M. (1997). *Studies of Ultra Low NO_x Burners*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Cardiff University, England.
90. İnternet: An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd Ed. URL: <https://www.odtuden.com.tr/an-introduction-to-computational-fluid-dynamics-the-finite-volume-method-2nd-ed.-1458>, Son Erişim Tarihi: 29.09.2023
91. Liewen, T., Yang V. and Yetter R. (2009). *Synthesis Gas Combustion : Fundamentals and Applications*. Cardiff: Synthesis Gas Combustion, CRC Press.
92. Hanson, R.K. and Salimian, S. (1984). *Survey of Rate Constants in the N/H/O System*. Combustion Chemistry, NY, Springer, 361–421.
93. Fenimore, C.P. (1971). Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames. *Symposium (International) on Combustion*, 13, 373–380.
94. Karyeyen, S. (2016). *Geliştirilen Bir Yakıcıda K m r Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstit s , Ankara, 23-28.
95. Mark, C.P. and Selwyn, A. (2016). Design and Analysis of Annular Combustion Chamber of a Low Bypass Turbofan Engine in a Jet Trainer Aircraft. *Propulsion and Power Research*, 5, 97–107.
96. Zhang, X., Wang, J., Chen, Y. and Li, C. (2021). Effect of CH₄, Pressure, and Initial Temperature on the Laminar Flame Speed of an NH₃-Air Mixture. *ACS Omega*, 6, 11857–11868.
97. Min, J., Baillet, F., Guo, H., Domingues, E., Talbaut, M. and Patte-Rouland, B. (2011). Impact of CO₂, N₂ or Ar Diluted in Air on the Length and Lifting Behavior of a Laminar Diffusion Flame. *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 1071–1078.
98. Yilmaz, I., Cam, Y. and Alabas, B. (2022). Effect of N₂ Dilution on Combustion Instabilities and Emissions in Biogas Flame. *Fuel*, 308, 121943.
99. Yan, Y., Liu, Y., Fang, W., Liu, Y. and Li, J. (2018). A Simplified Chemical Reaction Mechanism for Two-Component RP-3 Kerosene Surrogate Fuel and Its Verification. *Fuel*, 227, 127–134.

100. Hayakawa, A., Goto, T., Mimoto, R., Arakawa, Y., Kudo, T. and Kobayashi, H. (2015). Laminar Burning Velocity and Markstein Length of Ammonia/Air Premixed Flames at Various Pressures. *Fuel*, 159, 98–106.
101. Brackmann, C., Alekseev, V.A., Zhou, B., Nordström, E., Bengtsson, P.E., Li, Z., Aldén, M. and Konnov, A.A. (2016). Structure of Premixed Ammonia + Air Flames at Atmospheric Pressure: Laser Diagnostics and Kinetic Modeling. *Combustion and Flame*, 163, 370–381.



Gazili olmak ayrıcalıktır