T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA KULLANILAN MODEL BİR YAKICIDA DOĞAL GAZ YANMASININ SAYISAL ANALİZİ

Tezi Hazırlayan
Selim TANGÖZ

Tezi Yöneten
Doç. Dr. Nafiz KAHRAMAN

Sivil Havacılık Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Mayıs 2009
KAYSERİ

Doç. Dr. Nafiz KAHRAMAN danışmanlığında **Selim TANGÖZ** tarafından hazırlanan **"Gaz Türbinli Motorlarda Kullanılan Model Bir Yakıcıda Doğal Gaz Yanmasının Sayısal Analizi"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

28 / 05 / 2009

JÜRİ:

Başkan: Prof. Dr. Hüseyin YAPICI

Üye : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Üye : Doç. Dr. Nafiz KAHRAMAN

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 23/06/2009 tarih ve 2009/120-07 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

23. /06 / 2009

Prof.Dr. Sebahattin Ünalan

Enstitü Müdürü V.

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlama ve yürütme aşamasında her türlü desteği sağlayan değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. Nafiz KAHRAMAN'a ve tez hazırlama esnasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. S. Orhan AKANSU'ya çok teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tez çalışması öncesinde, beni akademik çalışmalara sevk eden saygıdeğer aileme, özellikle babam Mustafa TANGÖZ'e ve sıra yoldaşım Salim ARSLAN'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Son olarak, bu tez çalışması sırasında verdiği destek ve gösterdiği sabırdan dolayı sevgili eşim Zekiye TANGÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA KULLANILAN MODEL BİR YAKICIDA DOĞAL GAZ YANMASININ SAYISAL ANALİZİ

Selim TANGÖZ
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2009
Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nafiz KAHRAMAN

ÖZET

Uçaklar, güvenli ve hızlı olmalarından dolayı ulaşım sektöründe sık sık tercih edilmektedirler. Ulaşım aracı olarak kullanılan bir uçağın en önemli parçası itme kuvvetini sağlayan güç sistemleridir. Güç sistemleri yakıtın kimyasal enerjisinin itki kuvvetine dönüştürüldüğü kısımlardır. Bu dönüşüm motorlar içerisinde yer alan yanma odalarında başlamaktadır. Yanma odalarının performansı uçakların verimliliğini doğrudan etkiler. Bu sebepten, yanma odası performansını belirleyen yanma verimi, yanma odası çıkış sıcaklığı, basınç kayıpları, yanma stabilizesi, özgül yakıt tüketimi ve emisyon analizleri çok önemlidir. Bunun yanında, standart uçak yakıtlarının hızla tükenmesi ve ekonomik olmaması alternatif yakıt türlerini önemli hale getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, standart uçak yakıtı olan kerozin ve kullanımı hızla artan doğal gaz, Rolls-Royce Nene turbojet motorunun yanma odasında hava ile tepkimeye sokularak, yanma odası performans analizleri sayısal olarak incelendi. Çözümlemeler, aksi-simetrik geometrili yanma odası oluşturularak Fluent 6.1.22 programında yapıldı. Bu çözümlemeler, farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) ve yanma odasına 1480, 2290 ve 2980 kW güç verilen 10000, 11000 ve 12000 rpm motor devirlerinde incelendi. Elde edilen sonuçlar, grafikler ile birlikte bu çalışmada sunulmuştur.

Yapılan analizlerde, H/Y oranı artarken, basınç kayıplarının arttığı, yanma odası çıkış sıcaklığının azaldığı, yanma veriminin ve yanma odası çıkış hızının önce arttığı sonra sabit kaldığı gözlendi. Ayrıca, doğal gazın kerozine göre avantajlı olduğu tespit edildi.

Anahtar kelimeler: Yanma, kerozin, doğal gaz, gaz türbin yanma odası, HAD

NUMERICAL ANALYSIS OF NATURAL GAS COMBUSTION IN A MODEL COMBUSTION CHAMBER OF GAS TURBINE ENGINE

Selim TANGÖZ
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M. Sc. Thesis, June 2009
Thesis Supervisor: Assos. Prof. Dr. Nafiz KAHRAMAN

ABSTRACT

Aircrafts are often preferred in the transportation sector due to the fact that they are quickly and safely. The most important components of an aircraft used as the transportation vehicle are power systems. Power systems are converted chemical energy of fuel to thrust. This transformation starts in the combustion chamber inside the engine. The performance of the combustion chamber affects the efficiency of the aircrafts. So, the combustion efficiencies, the temperature of the combustion chamber outlet, the pressure drop of the combustion chamber, combustion stability, specific fuel consumption and emissions determine the performance of the combustion chamber, are important. Furthermore, that the conventional fuels of aircrafts run rapidly out of and not became economically, alternative fuels makes important.

In this study, the kerosene the conventional fuels of aircrafts and natural gas rapidly increasing the use of it react with the air in the combustion chamber of Rolls-Royce Nene turbojet engine and the performance of the combustion chamber is numerically investigated. The analyses were realized in the axis-symmetric geometry, using Fluent 6.1.22 program. The analyses were in the rates of the air-fuel ($40 \leq H/Y \leq 200$) and the combustion chamber has the power of 1480, 2290 and 2980 kW and the revolution of 10000, 11000 and 12000 rpm. The results obtained were graphically presented in this study.

In these analyses, it is obtained that while H/Y is increasing, the pressure drop increase, the temperatures of combustion chamber outlet decrease, the combustion efficiencies and the exhaust velocity of the combustion chamber firstly increase than became constant. Moreover, it is showed that the natural gas have more advantages according to kerosene.

Key words: Combustion, kerosene, natural gas, gas turbine combustion chamber, CFD

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY i

TEŞEKKÜR ii

ÖZET iii

ABSTRACT iv

İÇİNDEKİLER v

SEMBOLLER VE KISALTMALAR viii

ŞEKİLLER LİSTESİ x

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Giriş 1
1.2. Tezin Amacı ve Önemi 2
1.3. Literatür Araştırması 3

2. BÖLÜM

GAZ TÜRBİN YANMA ODALARI VE YAKITLARI

2.1. Gaz Türbinlerinde Yanma Odalarının Yapısı 6
2.2. Yanma İşlemi 8
2.3. Yanma Odası Tipleri 10
2.3.1. Boru (Can / Tubular) Tipi Yanma Odası 10
2.3.2. Boru - Halka (Can - Annular) Tipi Yanma Odası 10
2.3.3. Halka (Annular) Tipi Yanma Odası 11
2.4. Yanma Odasından İstenen Özellikler 12
2.5. Yanma Odasının Dizaynını Etkileyen Faktörler 13

2.6. Yanma Odasının Performansı ……...……..…….…….. 14
2.6.1. Yanma Verimi …….…...……..…….…….. 14
2.6.2. Yanma Odası Çıkış Sıcaklığı …….…..…….…….. 16
2.6.3. Kararlı Çalışma Aralığı ……..……. 16
2.6.4. Yanma Odası Basınç Kaybı ...……..…….……..…… 15
2.7. Emisyon Değerleri …….…..……..……..……... 17
2.8. Kerozin ve Doğal Gaz Yakıtlarının Özellikleri ….…...……..….……... 18

3. BÖLÜM

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

3.1. Giriş …….…...……..…….……. 20
3.2. CFD Çözüm Algoritması …….……..…….…… 20
3.3. Temel Denklemler ……..…….……... 22
3.3.1. Kütle Korunum Denklemi ……..……..…….…… 22
3.3.2. Momentum Korunum Denklemi ……..…….…… 23
3.3.3. Enerji Korunum Denklemi ……..…….…….. 24
3.3.4. Türlerin Korunum Denklemi …….…….. 25

4. BÖLÜM

YANMA ODASI VE DOĞAL GAZIN YANMA MODELLEMESİ

4.1. Yanma Odasının Geometrisi ve Boyutları ……..…….…….. 26
4.2. Sayısal Ağ (Grid) Üretimi …….…….…… 27
4.3. Sayısal Modeller ……..…….……..... 29
4.3.1. Türbülanslı Aksi-Simetrik Akış Modeli ……...……..……..…… 29
4.3.2. RNG k-ε Türbülans Modeli …….…….…….. 30
4.3.3. P1 Radyasyon Modeli …….…...…..…….…….. 31
4.3.4. Girdap Ayrışma Yanma Modeli …….…… 32
4.4. Kerozinin Yanma Reaksiyonu ……..…….……..…….…….. 33
4.5. Doğal Gazın Yanma Reaksiyonu ……...…….…….. 33
4.6. Sınır Şartları ……..…….…… 34

5. BÖLÜM

SAYISAL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

5.1. Sayısal Modelin Uyumluluğu …… 36
5.2. Yanma İşlemi ve Gaz Akışı …… 37
5.3. Yanma Verimi …… 43
5.4. Yanma Odası Çıkış Sıcaklığı …… 47
5.5. Yanma Odası Hız Değişimleri …… 51
5.6. Yanma Odası Basınç Kaybı …… 57
5.7. Özgül Yakıt Tüketimi……63
5.8. Emisyon Değerleri …… 65

6. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar ……78
6.2. Öneriler ……80

KAYNAKLAR …… 81

ÖZGEÇMİŞ ……84

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

A	1.0; bir deneysel sabit
APU	Auxiliary power unit
B	0.5; bir deneysel sabit
$C_{1\,\varepsilon}$, $C_{2\,\varepsilon}$	Model sabitleri (1.42 ve 1.68)
CFD	Computational fluid dynamics
f	Gerçek yakıt hava oranı
f^{1}	Teorik yakıt hava oranı
F_x, F_r	Eksenel ve radyal kuvvet
h	İdeal gazların entalpisi
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
H/Y	Girişteki toplam hava / yakıt oranı
G	Anlık iş
G_b	Türbülans kinetik enerji üretim oranı, (buoyancy)
G_k	Türbülans kinetik enerji üretim oranı, (hız)
J_{j1}	j^1 türünün akma difüzyonu
k	Türbülans kinetik enerjinin yayılım oranı
m_{fi}, M_y	Girişteki yakıt debisi (kg/sn)
m_{fo}	Çıkıştaki yakıt debisi (kg/sn)
M_h	Yanma odasına giren hava debisi (kg/sn)
M_j	j türünün sembol gösterimi
N	Sistem içerisindeki kimyasal türün numarası
P	Basınç, (Pa)
P_i	Girişteki toplam basınç (Pa)
P_o	Çıkıştaki toplam basınç (Pa)
PLP	Basınç kaybı yüzdesi

ppm	Parts per million
$R_{i, r}$	i türünün net üretim oranı
RNG	Renormalization group theory
rpm	Revolution per minute
S_h	Volümetrik ısı kaynağı
S_k, S_ε	Kaynak terimi
S_m	Kütle kaynağı
sfc	Özgül yakıt tüketimi (kg/kWh)
T_{ref}	Referans sıcaklılığı (K)
$(u/w)_{Pair}$	Birincil (iç) havanın açısal komponenti
$(u/w)_f$	Yakıtın açısal komponenti
$(u/w)_{Sair}$	İkincil (dış) havanın açısal komponenti
u, v_x	Eksenel hız (m/sn)
Y_P	Elde edilen her hangi bir türün kütle kesri
v, v_r	Radyal hız (m/sn)
x, r	Eksenel ve radyal koordinat
w, v_z	Türbülans hızı (swirl hızı) (m/sn)
W_{net}	Elde edilen özgül güç (kW)
α	Ters efektif Prandtl sayısı
ε	Türbülans kinetik enerjinin oran sabiti
λ_{eff}	Efektif iletkenlik
η_Y, η_C	Yanma verimi
$\vartheta'_{i, r}$	Reaksiyona giren i türünün stokiometrik katsayısı
$\vartheta''_{i, r}$	Reaksiyondan çıkan i türünün stokiometrik katsayısı
∇	Koordinat sisteminde vektörel operatör
σ_s	Scattering katsayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. 2005-2030 yılları arasında dünyada doğal gaz üretim ve tüketim miktarları……...2

Şekil 2.1. Yanma odası komponentleri…….…….6

Şekil 2.2. Yanma odasının bölümleri…….……....8

Şekil 2.3. Yanma odasına giren hava akımı ve yanma işlemi……...9

Şekil 2.4. Yanma odası tipleri……..12

Şekil 3.1. Ayrılmış çözüm metodunun basamakları……...…….…21

Şekil 4.1. Yanma odasının boyutları……27

Şekil 4.2. Rolls-Royce Nene turbojet motorunun kesit görünümü…….…...……...27

Şekil 4.3. Yanma odası çıkış sıcaklık değerlerinin deneysel ve farklı grid sayılarında yapılan çözümleme sonuçları…...…….……..28

Şekil 4.4. Yanma odasının iki boyutlu modeli ve grid yapısı……..…28

Şekil 5.1. Farklı motor devirlerinde elde edilen yanma odası çıkış sıcaklık değerleri ile katalog değerlerinin karşılaştırılması……...……...36

Şekil 5.2. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre kütle oranlarının değişimi……...……..38

Şekil 5.3. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama sıcaklığı…….……...……38

Şekil 5.4. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama yoğunluğu……....40

Şekil 5.5. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama hızı…….……..…...40

Şekil 5.6. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama basıncı…….……...….42

Şekil 5.7. Sayısal modellemenin yapıldığı yanma odasına ait geometrinin eksenel mesafeye göre alan değişimi…….……..….42

Şekil 5.8. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında eksenel mesafeye göre kerozin ve metan yakıtlarının kütle oranlarının değişimi……..…….43

Şekil 5.9. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma verimleri……...……..45

Şekil 5.10. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma verimleri……...…..……..45

Şekil 5.11. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma verimleri……...…….….46

Şekil 5.12. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre yanma odası ortalama sıcaklık değişimleri.….47

Şekil 5.13. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası sıcaklık dağılımı…….……..……..48

Şekil 5.14. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası sıcaklık dağılımı…….……..……..48

Şekil 5.15. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkış sıcaklığı…….50

Şekil 5.16. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkış sıcaklığı…….....50

Şekil 5.17. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkış sıcaklığı…….....51

Şekil 5.18. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama yoğunluğu……...…....53

Şekil 5.19. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama hızı……....53

Şekil 5.20. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odasındaki hız dağılımı…….……..…….54

Şekil 5.21. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odasındaki hız dağılımı…….……..….54

Şekil 5.22. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası giriş ve çıkış hızları.....56

Şekil 5.23. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası giriş ve çıkış hızları.....56

Şekil 5.24. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası giriş ve çıkış hızları.....57

Şekil 5.25. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının basıncı……..……...58

Şekil 5.26. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası basınç dağılımı…….……..…..…….…..59

Şekil 5.27. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası basınç dağılımı…….…..……59

Şekil 5.28. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası basınç kaybı yüzdeleri…...61

Şekil 5.29. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası basınç kaybı yüzdeleri…...62

Şekil 5.30. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası basınç kaybı yüzdeleri…...62

Şekil 5.31. Farklı termal güçlerde ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yakıtlarının özgül tüketimi. ……..……...…64

Şekil 5.32. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası içerisindeki NO dağılımları…….……..……..……66

Şekil 5.33. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası içerisindeki NO dağılımları…….……..……...……..66

Şekil 5.34. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki NO miktarları..67

Şekil 5.35. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki NO miktarları..67

Şekil 5.36. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki NO miktarları..68

Şekil 5.37. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası maksimum sıcaklığı…..…..69

Şekil 5.38. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası maksimum sıcaklığı…..…..70

Şekil 5.39. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası maksimum sıcaklığı……...70

Şekil 5.40. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası içerisindeki CO_2 dağılımı…….……...……72

Şekil 5.41. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası içerisindeki CO_2 dağılımı…….……72

Şekil 5.42. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki CO_2 miktarları..73

Şekil 5.43. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki CO_2 miktarları..73

Şekil 5.44. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki CO_2 miktarları..74

Şekil 5.45. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası içerisindeki $C_{12}H_{23}$ dağılımı…….…....……..75

Şekil 5.46. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası içerisindeki CH_4 dağılımı…….……..…..……...75

Şekil 5.47. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki HC miktarları...76

Şekil 5.48. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki HC miktarları...76

Şekil 5.49. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki HC miktarları...77

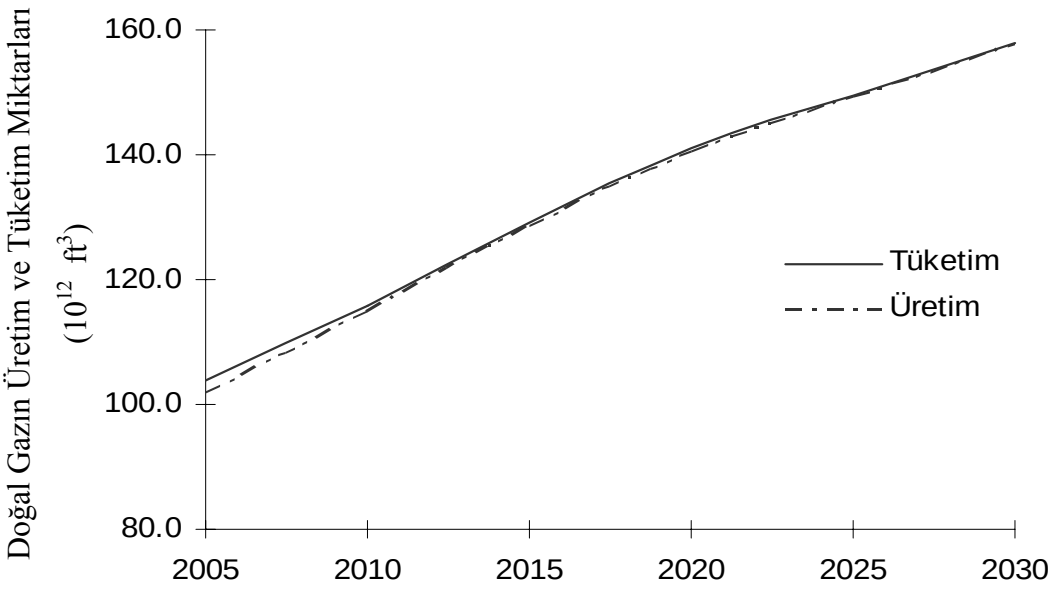
1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Giriş

Ulaşım aracı olarak kullanılan uçaklar, güvenli ve hızlı olmalarından dolayı son zamanlarda çok fazla tercih edilmektedirler. Ulaşım aracı olarak kullanılan bir uçağın en önemli kısmı motorlardır. Motorlar yakıt içerisinde depo edilen kimyasal enerjinin itki kuvvetine dönüştürüldüğü elemanlardır. Bu dönüşüm motorlar içerisinde yer alan yanma odalarında yakıt ile havanın tepkimesi ile başlamaktadır. Yanma odalarının performansı uçakların güvenirliliğini ve ekonomik olmasını doğrudan etkiler. Bu sebepten, yanma odalarının performans analizi çok önemlidir. Bunun yanında, petrol fiyatlarının hızla artması ile standart uçak yakıtları ekonomik olmamaktadır ve bu yakıtlar hızla tükenmektedir. Bundan dolayı, uçaklarda farklı yakıtların kullanımını önemli hale gelmektedir.

Son zamanlarda, uçaklarda kullanılmak üzere standart uçak yakıtlarına karşı alternatif yakıtlar üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bu alternatif yakıtlardan bir tanesi de doğal gaz yakıtıdır. Şekil 1.1'de 2005–2030 yılları arasında dünyada doğal gaz tüketim ve üretim miktarları verilmektedir. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere, gelecek yarım yüzyılda doğal gaz üretimi ve tüketimi hızla artmaktadır [1]. Ayrıca, doğal gaz yakılması sonucu standart uçak yakıtlarına oranla daha az emisyonlar oluşmaktadır. Ekonomik ve temiz yakıt olmasından dolayı, bu çalışmada yanma odası içerisinde doğal gaz yanması sonucu yanma odası performansı analiz edilmektedir. Bu analiz değerleri standart uçak yakıtı olan kerozin yakıtının yanması sonucu oluşan performans değerleri ile karşılaştırılmaktadır.



Şekil 1.1. 2005-2030 yılları arasında dünyada doğal gaz üretim ve tüketim miktarları [1].

1.2. Tezin Amacı ve Önemi

Yapmış olduğumuz tez çalışmasının amaçlarından bir tanesi, gaz türbinli motorda kullanılan yanma odası içerisinde, kimyasal tepkime anında ve sonrasında gaz akış özelliklerinin nasıl değiştiğinin tespitidir. Bu amaca ulaşmak için, literatür çalışmaları üzerinde araştırma yapılmıştır. Literatür çalışmalarından elde edilen referans değerlere göre, Roll-royce Nene turbojet motoruna ait yanma odasının bir modeli oluşturularak sayısal çözümlemeler yapılmıştır. Bu sayısal çözümlemelerde 10000, 11000 ile 12000 rpm motor devirlerinde yanma odasına 1480, 2290 ve 2980 kW güç verilmiştir.

Gaz türbinli motorlarda yakıtın kimyasal enerjisinin itme kuvvetine dönüşme miktarı yanma odasının performansına bağlı olarak değişmektedir. Bu sebepten, tez çalışması ile, gaz türbinli motorlarda kullanılan yanma odalarının performans analizinin yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, yanma odasının performansını etkileyen yanma verimi, yanma odası çıkış sıcaklık dağılımı, basınç kayıpları, yanma odası çıkış hız değerleri, özgül yakıt tüketimi ve yanma sonucu oluşan emisyonlar analiz edilmiştir. Analizler, değişik hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) ve motor devir sayılarında yapılmıştır. Böylece yakıt miktarı sabit iken, düzenli bir şekilde artan hava miktarının yanma odası performansına ve yanma işlemine etkisi gözlenmiştir.

Son olarak, gaz türbinli motorlarda kullanması düşünülen doğal gaz yakıtının yanma odası performans değerlerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Yani, kerozin yakıtının yerine doğal gaz yakılması ile yanma verimi, yanma odası çıkış sıcaklık dağılımı, basınç kayıpları, yanma odası çıkış hız değerleri, özgül yakıt tüketimi ve yanma sonucu oluşan emisyon değerlerinin nasıl değiştiği tespit edilmeye çalışılmıştır. Sayısal çözümlemelerden elde edilen sonuçlar 5. bölümde verilmektedir.

1.3. Literatür Araştırması

Bir gaz türbinli motorda itme kuvvetinin elde edilmesi için gerekli olan enerji, yanma odasında yakıtın kimyasal enerjisinin termal ve kinetik enerjiye dönüşmesi ile elde edilmektedir. Bu sebepten, yanma odası performansının analizi çok önemlidir. Ayrıca, günümüzde hava taşımacılığı yapan şirketlerin giderleri içerisinde en büyük payı yakıt giderleri almaktadır. Son zamanlarda yanma odası performansının analizi ve değişik yakıt türlerinin kullanımı konusunda birçok araştırma yapılmaktadır. Huntley [2], Rolls-Royce Nene turbojet motoruna ait yanma odasının çıkışındaki sıcaklık dağılımlarını basınçlı kabin içerisinde ve değişik çalışma koşullarında deneysel olarak incelemiştir. Cook ve Koch [3], yaptıkları deneysel çalışmada Rolls-Royce Nene turbojet motorunun % 40 ile % 100 motor devir sayısı oranlarında ve farklı yakıtlar yakarak tek bir yanma odasının performansını izlemişlerdir. Bu çalışma, 0.0 mach uçak hızından başlayarak 0.6 mach uçak hızına kadar ve deniz seviyesinden 65000 feet irtifaya kadar olan çalışma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, yakıt tipine bağlı olarak yanma veriminin % 54 ile % 100 arasında değiştiği gözlenmiştir. Barson ve Wilsted [4], yaptıkları deneysel çalışmada, deniz seviyesinden 65000 feet yüksekliğe kadar farklı çalışma koşullarında, aynı turbojet motorun ve yanma odasının performanslarını gözlemlemişlerdir. Bulunan sonuçları tablo ve grafikler halinde sunmuşlardır. Bonacina [5] ise, gaz türbin yanma odası üzerinde deneysel olarak yaptığı çalışmada, yanma odası tasarım prensipleri ve yanma odası üzerinde bulunan seyreltme deliklerinin boyut ve performans analizini yapmıştır. Elde ettiği verileri tablolar halinde sunmuştur.

Ayrıca, yanma odasının performansını artırmak ve daha ekonomik uçuşlar için farklı yanma odası geometrileri, farklı veya kompozit yakıtlar üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Örneğin, Yapıcı ve arkadaşları [6], yayınladıkları sayısal bir çalışmada,

metan yakılması ile yakıcı içerisinde meydana gelen yerel entropi dağılımlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada yanma veriminin artırılması için dönen girdaplı akış tercih edilmiştir. Salva ve Lopez [7], yanma odasının iç kısmından geçen hava içerisine belirli miktarda hidrojen ilave ederek, yanma sonucu meydana gelen emisyon değerlerinin kontrolü üzerine deneysel olarak çalışmışlardır.

Bunlara ek olarak yanma odasının performansını artırmak için, Khelil ve arkadaşları [8], bir gaz türbin yanma odası içerisinde, yüksek türbülans değerlerinde, türbülans modellerin ve reaksiyon mekanizmasının kimyasal türlerin konsantrasyonu ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmada yakıt olarak doğal gaz seçilmiştir. Yılmaz [9], doktora çalışmasında, farklı oranlarda hidrojen ve metandan oluşan kompozit yakıtın yakılması ile model bir gaz türbin yanma odasının, yanma ve emisyon performansını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Akansu ve arkadaşları [10], metan ve hidrojen karışımlı kompozit yakıtın buji ateşlemeli bir motorda yakılmasının motor performansına etkisi üzerine deneysel olarak çalışmışlardır.

Bu çalışmalarla birlikte, Armstrong ve arkadaşları [11], ile Grey ve arkadaşları [12], farklı ebatlarda nozullar monte edilen Rolls-Royce Nene turbojet motorunun yanma odasına ait performans analizlerini deneysel olarak yapmışlardır. Deneysel çalışmaları 1.0 ve 3.5 çarpma basınç oranları arasında ve deniz seviyesinden 65000 feet irtifaya kadar olan şartlarda gerçekleştirilmiştir. Lysenko ve Solomatnikov [13], Fluent paket programında bir gaz türbin yanma odası içerisindeki turbülanslı ısı değişimlerini sayısal olarak incelemişlerdir. Pourmahmoud ve Akhesmeh [14], bir vorteks tüpü içerisindeki sıcaklık, basınç ve akış davranışlarını fiziksel olarak analiz etmişlerdir. Yaptıkları sayısal çalışmada, türbülanslı aksi-simetrik akış modelini ve standart k-ε türbülans modelini tercih etmişlerdir. İlbaş ve arkadaşları [15], hidrojen metan karışımı yakıtı, laminer bir yakıcı içerisinde hava ile reaksiyona sokarak karışımın yanma performansını deneysel olarak incelemişlerdir.

Yanma odası performansının analizi ve gaz türbinli motorlar hakkında ülkemizde bir çok kitap, ders notu ve tez çalışması hazırlanmıştır. Örneğin; Karakoç [16], gaz türbinli motorların yakıt sistemlerini ve sistem komponentleri ile birlikte bazı yakıt sistem tiplerini anlattığı kitabını 1997 yılında yayınlamıştır. Karakoç bu kitabında, yanma odaları hakkında kapsamlı bilgiler de sunmuştur. Erim [17], 1978 yılında hazırladığı

uçak motorlarında yakıtlar, yakıt sistemleri, yanma odaları ve yanma isimli ders notunda bu konularla ilgili ayrıntılı bilgilere yer vermiştir. Bunun yanında çeşitli matematiksel formüllerde çıkarmıştır. Çetinkaya [18], 1999 yılında yayınladığı gaz türbinleri isimli kitabında gaz türbinli motorların çalışma prensiplerini ve gaz türbinli motorlarda bulunan komponentlerin performans hesaplamalarına değinmiştir. Hırkalıoğlu [19], yüksek lisans tezinde, gaz türbin yanma odasında hidrojen ve hidrokarbon yanmasını sayısal olarak modellemiş ve NO_x oluşumunu incelemiştir. Hidrojen ilavesi veya yalnız kullanımı sonucunda, NO_x oluşumunda artma olduğunu tespit etmiştir. Özkan [20], hazırladığı yüksek lisans tezinde bir gaz türbin motoruna ait yanma odasının modellemesini yaparak, model içerisindeki yanma olayını sayısal olarak incelemiştir. Bu incelemeleri farklı güç değerlerinde ve farklı hava fazlalık katsayısı değerlerinde gerçekleştirmiştir. Bu yayınlara ek olarak, Türk Hava Yolları Eğitim Başkanlığının hazırlamış olduğu Uçak Teknik Temel (Motor) [21] isimli bir eğitim kitabı ile gaz türbinli motorlar ve motor sistemleri tanıtılmaktadır. Bu kitapta yanma odaları hakkında ayrıntılı bilgilerde verilmektedir.

Son olarak, Sierra ve arkadaşları [22], gaz türbinli bir motorda yanma odasındaki sıcaklık dağılımının sayısal olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada, yanma odasını modelleyerek basınç dağılımındaki kararsızlığın nedenini araştırmışlardır. Araştırma sonucunda, basınç dağılımındaki kararsızlığın birincil ve ikincil hava girişleri arasındaki farktan meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Tomczak ve arkadaşları [23], bir gaz türbini yakıcısında, hidrojen - doğal gaz karışımının yanmasını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Hidrojen ilavesiyle emisyon değerlerinde önemli derecede bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir.

2. BÖLÜM

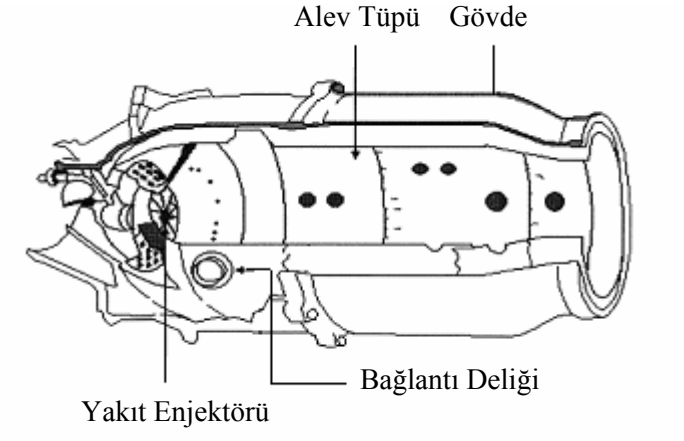
GAZ TÜRBİN YANMA ODALARI VE YAKITLARI

2.1. Yanma Odalarının Yapısı

Yanma odaları, türbin ve jet nozul için sıcak gaz üretirler. Bu sıcak gaz yanma odası içerisinde yakıt hava karışımını sürekli yakılması ile sağlanmaktadır. Gaz türbinli motorlarda kullanılan birçok tipte yanma odası mevcuttur. Bütün yanma odası tiplerinde iki ana komponent vardır. Şekil 2.1'de gösterilen yanma odası komponentleri; gövde ve alev tüpüdür.

Gövde: Yanma odasının dış muhafazasıdır. İç ve dış motor komponentlerini sıcak gazlardan korur. Ayrıca hava basınç yüklerini karşılar. Yanma odasında bulunan alev tüpünü, yakıt enjektörünü, bağlantı deliklerini ve bujileri üzerinde bulundurur.

Alev Tüpü: Yanma sonucu oluşan alevi kontrol ve yataklık ederek yönlendirir. Delik ve yarıkları bulunan dilim şeklindeki birçok kısımdan yapılmıştır. Yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerden imal edilmiştir [21].



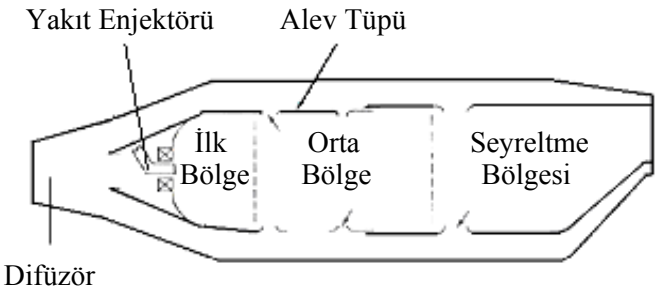
Şekil 2.1. Yanma odası komponentleri [21].

Yanma odaları temelde üç bölümden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi yanma odasının giriş kısmında bulunan ilk bölgedir. İlk bölgenin fonksiyonu alevi düzenlemek ve yakıtın tamamen yanmasını sağlamak için gerekli türbülans, sıcaklık ve uygun zamanı temin etmektir. Büyük miktardaki sirkülasyon az sayıdaki büyük jetlerin kullanılmasıyla elde edilir. Bu sistem ile taze karışım oluşumu ve yanma yavaşça gerçekleşir. Küçük miktardaki sirkülasyon çok sayıdaki küçük jetlerin kullanılmasıyla elde edilir. Eğer büyük yanma odalarından yüksek ısı çıkışı bekleniyorsa bunun için çok sayıdaki küçük hava sirkülasyon bölgeleri yaratmak ve buna karşılık gelecek çok sayıda yakıt enjeksiyon noktaları koymak gerekir.

Yanma odasını oluşturan ikinci bölüm ise, orta bölgedir. İlk bölgedeki 2200 K ve 2400 K sıcaklıklarında yakıtın yanması tamamen gerçekleşir. Bunun yanında, CO_2'nin CO ve O_2 olarak ayrışması meydana gelir. Küçük miktarda bir hava eklenmesi ile sıcaklığın uygun bir seviyeye düşürülmesi CO'nun ve yanmamış ürünlerin tamamen yanması sağlayabilir. Yüksek irtifalarda ilk bölgedeki reaksiyon; hava ve yakıtın düşük konsantrasyonlarından dolayı yavaştır ve yanma ilk bölge çıkısında tamamen gerçekleşmez. Bu durumda orta bölge ilk bölgenin uzantısı gibi kalır. Orta bölgenin boyu gaz akışıyla havanın karışması için gerekli minimum boy ile yanma reaksiyonunun tamamlanması için gerekli minimum zaman göz önüne alınarak belirlenir. Orta bölgenin yerine getireceği fonksiyonlar için uygun uzunlukta bir yer tahsis edilmelidir.

Yanma odasını oluşturan son bölüm ise, seyreltme (dilisyon) bölgesidir. Bu bölgenin rolü yanma reaksiyonuna girmeyen havayı yanma odasına almak, çeper soğutma ihtiyaçlarını karşılamak, ortalama bir sıcaklık ile çıkış akımı ve türbin için uygun sıcaklık dağılımını sağlamaktır. Seyreltme havası gövde çeperindeki kanal arasından veya deliklerden geçirilir. Bu kanalların veya deliklerin şekilleri ve boyutları hava jetlerinin yeterince nüfuz etmesi ve onların ana akım ile karışmasını optimize edecek şekilde seçilir. Seyreltme için mevcut hava miktarı yanma odasının toplam hava akışının % 20 - % 40'ı arasında değişmektedir [16].

Yukarıda bahsedilen yanma odası bölümleri şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Yanma odasının bölümleri [16].

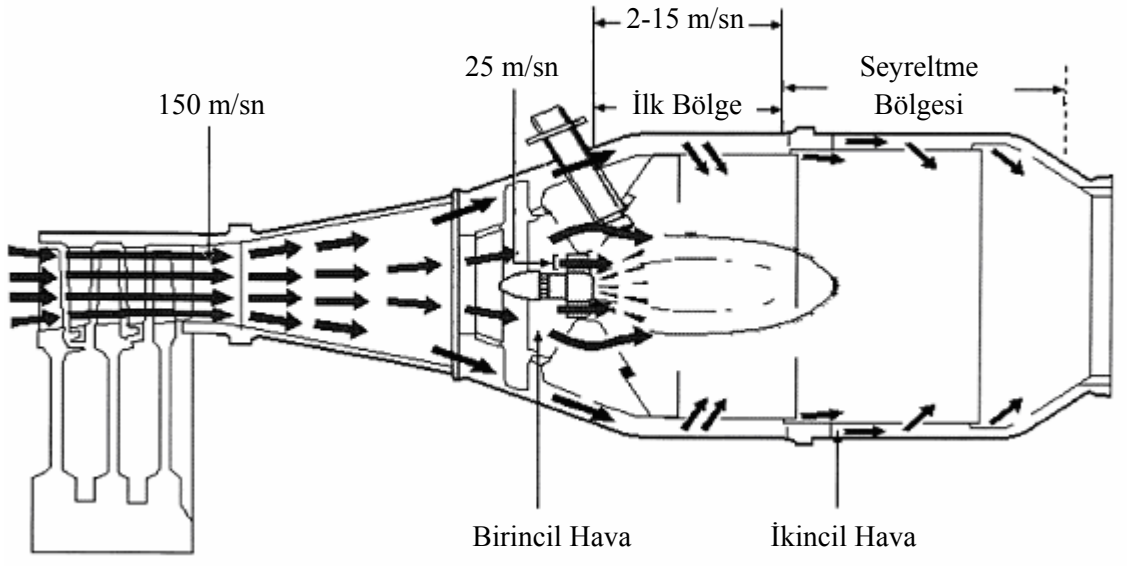
2.2. Yanma İşlemi

Kompresörden çıkan hava yanma odasına 150 m/sn'ye kadar hızlarda girdiğinden, bu hız yanma için çok yüksektir. Bu nedenle, hava önce yavaşlatılarak yanma odasının statik basıncı artırılır. Normal karışım oranlarında yanma hızı sadece 1-2 m/sn dolayında olduğundan, 25 m/sn dolayında bir hıza yavaşlatılmış olan hava bile, yakıt alevini söndürmeye yetmektedir. Bu nedenle, şekil 2.3'de görüldüğü gibi, yanma odasında motor çalıştığı sürece alevin sönmeyeceği, eksenel hızın düşük olduğu bir bölgenin oluşturulması zorunludur [19].

Yüksek verim için, yanma odasını terk eden gazların sıcaklığı mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Yakıtın verimli olarak yanması, stoikometrik olarak 15:1 hava/yakıt oranında olmaktadır. Yanma, bir ateşleme bujisinin oluşturduğu kıvılcımla başlatıldıktan sonra, kendi kendine devam eder ve yanma hattının merkezindeki gazların sıcaklığı 1800...2000 C° dolayındadır. Gazların bu sıcaklığı, türbine yönlendirici kanatçıklarının ısıl gerilmelerinden etkilenmesinden dolayı çok yüksektir. Bu sebepten, gaz türbinli motorların türbin giriş sıcaklıkları en fazla 1500 C° kadardır. Yanma sıcaklığını türbin giriş sıcaklığına düşürmek için, yanma odaları yanmaya katılmayan bir kısım sıkıştırılmış taze hava ile sıcak gazları karıştıran bir karıştırma hattına sahip olmalıdır. Bu nedenle havanın sadece % 20 yakıt ile karışım oluşturması gerekmektedir ki bu havaya birincil (primary) hava denmektedir. Bu durum bir alev tüpü ile sağlanmaktadır. Hava akış kütlesinin yaklaşık % 20 kadarı, giriş kısmından içeri alınır. Girişten hemen sonra yer alan türbülans kanatçıkları ve genişleyen delikli ağızdan geçen hava, ilk yanma bölgesine girer. Türbülanslı hava alev tüpünün ortasına doğru akar ve uygun karışımı sağlar. Alev tüpü yüzeyinde, ikinci bir % 20 hava kütlesinin alev

tüpünün ilk bölgesine alınabilmesini sağlamak üzere belirli sayıda ikincil (sekondary) hava delikleri bulunmaktadır. Türbülans elemanlarından geçen hava ile ikincil deliklerinden gelen hava, birbiriyle etkileşim yaparak, düşük hızlı karışım bölgesi oluştururlar. Bu, duman halkasına benzeyen bir girdap oluşturarak, alevi frenleme ve kararlı hale getirme etkisi yapar. Karışan gazlar yeni enjekte edilen yakıt damlacıklarını hızla yanma sıcaklığına yükselterek, yanmalarını çabuklaştırır. Giriş kısmından alınmayan ve yanma için kullanılmayan % 60'lık hava, dış muhafaza ile alev tüpü arasındaki çevresel aralıktan akar ve kademe kademe alev tüpüne alınır. Bu havanın 1/3'ü gaz sıcaklığını düşürmek, geri kalanı alev tüpü yüzeylerini soğutmak için kullanılmaktadır. Soğutucu hava filmi, alev tüpünün iç yüzeyi boyunca akarak, tüpü yanmış sıcak gazlardan yalıtmaktadır. Yanma, soğutucu hava tüpe girmeden önce bitirilmelidir. Aksi halde, giren hava alevi soğutur ve yanma tamamlanamaz.

Yanma odasının toplam hava/yakıt ağırlık oranı, 50:1....100:1 kadardır. Yanma odalarının tasarımı ve yakıtın sağlanması yöntemleri farklı da olsa, havanın dağıtımı çoğunlukla bu anlatılanlara benzemektedir [18].



Şekil 2.3. Yanma odasına giren hava akımı ve yanma işlemi [21].

2.3. Yanma Odası Tipleri

Şekil 2.4'de verilen üç tip yanma odası vardır. Bu yanma odası tipleri;

a) Boru (can / tubular) tipi yanma odası,
b) Boru-halka (can-annular) tipi yanma odası,
c) Halka (annular) tipi yanma odasıdır.

2.3.1. Boru (Can / Tubular) Tipi Yanma Odası

Santrifüj tip kompresörlü eski gaz türbin motorlarında kullanılır. Her yanma odacığının kendi hava temin borusu, yakıt nozulu, alev tüpü ve gömleği vardır. Tek odacıklı tipleri genellikle küçük gaz türbinli motor ya da APU'larda kullanılır. Çok odacıklı tipleri ise genellikle turboprop, turbojet, turboshaft ve turbofan motorlarda kullanılır. Odacıklar birbirine iç bağlantı boruları ile bağlanır. Bu yapı ateşlemenin bir odacıktan diğerine geçmesine izin verir. Ateşleme için iki adet buji kullanılır. Tüm odacıklardaki basınç eşitlenir.

Avantajları,

- Tasarımı basittir.
- Yapısal mukavemeti iyidir.
- Odacıklar birbirinden bağımsız değiştirilebilirler.

Dezavantajları,

- Büyük ve ağır oluşu nedeni ile fazla yer kaplar.
- Kompresör havasını getiren kanalların karışık olması aerodinamik kayıpları arttırır.
- Ateşlemenin bir odacıktan diğerine geçişinde zorluklar vardır.

2.3.2. Boru-Halka (Can-Annular) Tipi Yanma Odası

Basit bir yapısı vardır. Alev tüpleri yanma bölgesini çevreler. Ortak iç ve dış gövde içinde bulunurlar. Alev tüpleri birbirine iç bağlantı boruları ile bağlıdır.

Avantajları,

- Yapısal mukavemeti iyidir.
- Hava temini daha basittir (Komplike besleme kanallarına gerek yoktur).
- Benzer çok odacıklı tiplerden daha küçük ve hafiftir.

Dezavantajları,

- Aerodinamik kayıplar oldukça fazladır.
- Bir alev tüpünden diğerine ateşleme zorluğu vardır.

2.3.3. Halka (Annular) Tipi Yanma Odası

Modern gaz türbinli motorlarda çok kullanılan bir modeldir. İç ve dış gövdelerin taşıdığı bir tane kovan tipinde alev tüpü vardır. Gövdeler alev tüpü ile birlikte ikincil hava için bir kanal oluştururlar ve aynı zamanda motor yapısının parçasıdırlar (Çoğunlukla, diffuser case veya compressor rear frame olarak adlandırılırlar).

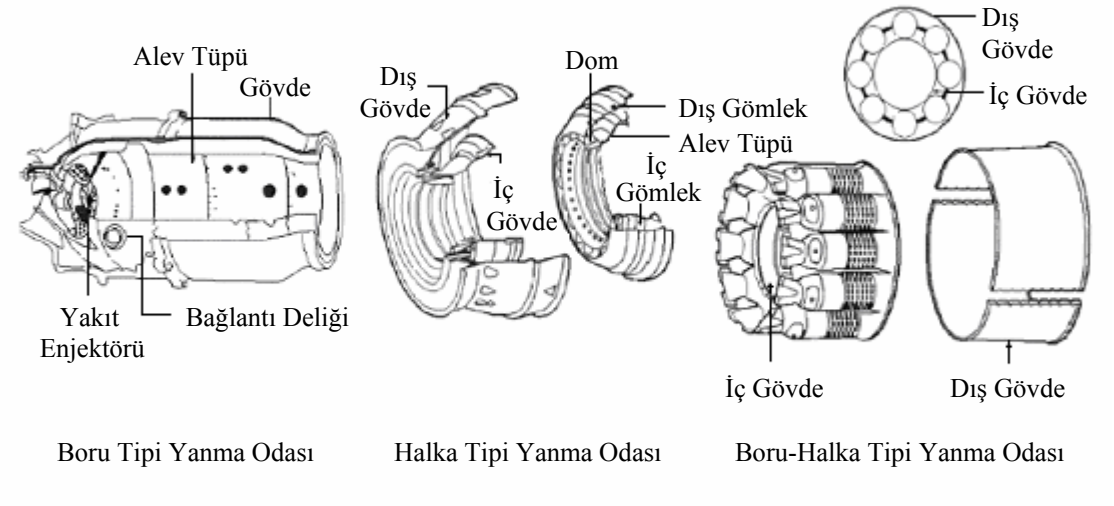
Alev tüpü genellikle üç parçadan oluşur. Bunlar, dom, iç (inner) gömlek ve dış (outer) gömlektir. Dom üzerinde, yakıt enjektörlerinin takılacağı, türbülans kanatçıkları ile çevrelenmiş delikler vardır.

Avantajları,

- Küçük ve hafiftirler.
- Daha büyük yanma hacmi vardır.
- Verimi daha yüksek olur.
- Tam ve dumansız yanma elde edilir.
- Alevin yanması kolaydır.
- Türbinde daha iyi ısıl yük dağılımı olur.

Dezavantajları,

- Üretimi pahalıdır.
- Söküm/montaj zordur ve zaman alır (yüksek bakım maliyeti) [21].



Şekil 2.4. Yanma odası tipleri [20].

2.4. Yanma Odasından İstenen Özellikler

Gaz türbin yanma odasından istenen özellikler motor tiplerine göre oldukça değişiklik göstermesine rağmen temelde aşağıdaki gibi listelenebilir:

- Yüksek yanma oranı (yakıtın tamamının kimyasal enerjiye dönüşme oranı),
- Güvenilir ve düzgün ateşleme,
- Yanma odasında indüklenme stabilizesi ve basınç değişiminden bağımsızlığı
- Düşük basınç kaybı,
- Çıkış sıcaklık dağılımı ile türbin kanatçıklarının ve lüle yönlendirme kanatçıklarının ömrünün maksimize edilmesi,
- Düşük duman yayılması ve çevre için tam yanma,
- Düşük maliyet ve kolay bakım için uygun tasarım,
- Motor yerleşimi için boyut ve şekil kolaylığı,
- Dayanıklılık,
- Çok çeşitli yakıtla beslenebilmesi istenir.

Havacılıkta küçüklük ve hafiflik birinci derecede önemli iken, endüstriyel uygulamalarda uzun ömür ve değişik yakıtlar kullanabilme yeteneği gibi faktörler ön plana çıkmaktadır. Yanma odasından geçen havaya püskürtülen yakıt miktarı, gerekli olan sıcaklık yükselme miktarına bağlıdır. Ancak, maksimum sıcaklıklar, türbin ve nozulların yapıldığı malzemeye bağımlı olarak 850–1700 C° arasındaki sıcaklıklarla

sınırlıdır. Yanma odası ayrıca, geniş bir motor çalışma aralığında yeterli ve verimli yanmayı koruma yeteneğine sahip olmalıdır. Giderek artan hava kirliliği, verimli yanmanın önemini de giderek artırmaktadır [18].

2.5. Yanma Odasının Dizaynını Etkileyen Faktörler

Yanma odasının dizaynını etkileyen faktörlerin çoğu birbiri ile uyuşmazlık halindedir. Örneğin yanma veriminin büyük olması, basınç kayıplarının küçük olması isteği ile çelişmektedir. Çalışma şartlarının değişiklik gösterdiği geniş aralıklarda bu faktörlerin optimum çözüme ulaştırılması oldukça zordur. Aşağıda yanma odası dizaynını etkileyen faktörlerin bazıları sıralanmıştır.

- Yanma sonucu çıkan gazların sıcaklıkları, yüksek gerilmeli türbin malzemesine uyum sağlayacak kadar düşük olmalıdır.
- Yüksek türbin performansının gerçekleşebilmesi ve kanatçıkların aşırı ısınmadan etkilenmesi istenmiyorsa yanma sonundaki sıcaklık dağılımı homojen olmalıdır. Fakat türbin halkasının üzerindeki yarıçapla artması avantaj olabilir. Çünkü kanatçık gerilmeleri kökten uca doğru azalır.
- 30–60 m/sn gibi yüksek hızla hareket eden hava akımı içinde yanma sağlanabilmelidir. Tam yükten rölanti koşullarına kadarki geniş aralıktaki hava/yakıt oranlarında kararlı yanma sürdürülebilmelidir. Hava/yakıt oranı basit gaz türbinleri için 60:1'den 120:1' kadar, ısı değiştirici bulunan gaz türbinlerinde 100:1'den 200:1'e kadar değişmektedir.
- Karbon atıklarının oluşumundan sakınılmalıdır. Yüksek hızlı gaz akımı ile türbin içerisine taşınan küçük parçacıklar kanatçıkları aşındırabilir. Karbon parçacıklarının aerodinamik titreşimleri kanatçıklara daha fazla zarar verebilir.
- Uçak gaz türbinlerindeki yanma, yanma odası basıncının geniş aralıktaki değerleri içinde kararlı olmalıdır. Çünkü basınç; irtifa ve hızla değişir.
- Yanma mümkün olduğunca tam ve çalışma şartları ne olursa olsun kararlı olmalıdır. Alev sönmemelidir. Tekrar ateşlenebilmelidir.
- Durma basınç kaybı küçük olmalıdır.
- Yanma odasının kesit alanı ve uzunluğu küçük olmalıdır [16].

2.6. Yanma Odasının Performansı

Yanma odası yüksek çalışma limitleri arasında yakıtın en verimli yakılmasına uygun olmalıdır. Ayrıca, yanma odasındaki basınç kaybı az olmalıdır. Eğer ateşin sönmesi gibi bir durum olursa tekrar alevlenebilmelidir. Bu çalışma performansı sırasında alev tüpü, yakıcı, atomizer ve sistem elemanları mekanik olarak güvenilir olmalıdır.

Gaz türbinli motorlar sabit basınç altında çalışırlar, çalışma sırasındaki kayıplar minimuma indirilmeli ve bu seviyede tutulmalıdır. Yanma odasında toplam basınç kaybı % 5 veya % 10 olmalıdır. Yanma odasından çıkan ısı yanma odasının alanına bağlıdır. Gerekli olan yüksek çıkış için gaz türbinli motorlarda yanma odası küçük ve çıkan ısı büyük olmalıdır [16].

Gaz türbinli motorlarda bulunan yanma odalarının performansını etkileyen faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yanma verimi,
- Yanma odası çıkış sıcaklık dağılımı,
- Stabilize sınırları (Kararlı çalışma aralığı),
- Basınç kaybıdır [17].

2.6.1. Yanma Verimi

Yanma odasına giren havanın basıncı artarken yanma verimi yükselir ve sabit bir değere ulaşır. Hava giriş sıcaklığı artarken yanma verim gerçek değerine ulaşana kadar yükselir. Eğer yakıt hava oranı artarsa yanma verimi önce yükselir, daha sonra yanma bölgesindeki karışım ideal değere ulaştığında sabitlenir. Bunun yanında yakıt hava karışımı daha da zenginleşirse verim azalır. Yakıt hava oranındaki bu artış, basınç kaybının artmasına neden olur. Bunun sebebi artan yakıt hava oranının yüksek sıcaklıklara neden olup, gaz yoğunluğunu azaltmasıdır.

Sürekli akışı muhafaza etmek için, gazların daha yüksek hızlarda hareket etmesi gerekir. Belirli bir hızın üzerinde hareket eden gaz akışı yanma verimini azaltır [16].

Yanma işleminin verimi, yanma ürünlerinin kimyasal analizi ile belirlenebilir. Ancak, bu işlemin güçlüğü nedeniyle, çoğunlukla;

$$\eta_Y = \frac{gerçek \quad \Delta T \quad için \quad teorik \quad f}{gerçek \quad \Delta T \quad için \quad gerçek \quad f} = \frac{f'}{f} \tag{2.1}$$

olarak verilen (2.1) numaralı eşitlikten yararlanılmaktadır. Birçok gaz türbin motorunun normal koşullardaki yanma verimi % 98....100 arasındadır [18].

2.6.2. Yanma Odası Çıkış Sıcaklık Dağılımı

Yanma odasından çıkan gazların ortalama sıcaklığı, en büyük motor performansını elde etmek için, yanma odası malzemesi sıcaklık sınırına mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Gaz akımındaki büyük yerel sıcaklıklar veya sıcak noktalar, türbini korumak amacıyla izin verilen ortalama türbin giriş sıcaklığını azaltmaktadır. Bu ise sonuçta toplam gaz enerjisinde bir azalmaya ve buna karşılık olarak motor performansında bir düşüşe sebep olacaktır.

Ayrıca basınçtaki küçük bir değişim uygun sıcaklık dağılımını etkileyecektir. Bu sebepten uygun sıcaklık dağılımı basınç kayıplarını da dikkate alarak sıcak ve soğuk gazların daha iyi karıştırılması ile elde edilebilir. Bunun için yanma odalarındaki seyreltme deliklerinden geçen ikincil hava kullanılmaktadır. Eğer yakıt hava oranı ve akış hızı değişirse uygun sıcaklık dağılımı değişecektir. Bunun nedeni açığa çıkan ısının değişmesi ve karışım için gerekli zamanın yetersizliğidir [16].

2.6.3. Kararlı çalışma aralığı

Bir gaz türbinli motor rölanti devrinden maksimum devre kadar olan hava akışlarında, alev sönmeleri meydana gelmeden çalışabilmelidir. Dengeli yanma; yanmanın düzgün olması ve başlamış bir yanmanın uzun çalışma zamanı içinde muhafaza edilmesidir. Herhangi bir yanma odası için çalışabileceği zengin ve fakir karışım oranları belirlidir. Bu limitlerin dışına çıkıldığında alev söner. Uçağın süzülme ve dalışı sırasında gaz

türbin motorunun rölantide çalışmasından dolayı yanma odasına giren yakıt miktarı az ancak hava miktarı fazla olur. Bu farklılık, zayıf karışımın oluşmasına sebep olur ve alevi söndürebilir.

Kompresör hava hızının yükselmesi ile birlikte hava çok aşırı bir şekilde gelir ve alevi söndürme durumuna getirebilir. Bu arada, hava yakıt oranı değişebilir. Denge döngüsünün tanımlandığı çalışma limitleri arasında, yanma odasına giren hava miktarı ve hava yakıt oranı korunmalıdır. Dolayısı ile bir yanma odasının kararlı çalışma aralığı basınç ve akış hızları değişimi ile olur. Basınç azalırken, kararlı çalışma aralığı yanmanın oluşamayacağı bir noktaya kadar azalır. Ayni şekilde akış hızı artarken kararlı çalışma aralığı yanmanın oluşamayacağı kritik hız noktasına kadar daralır. Ayrıca, hız artarken basınç kayıplarının arttığı unutulmamalıdır [16].

2.6.4. Basınç Kaybı

Gaz türbinli motorlarda gerek türbinlerde gerekse egzoz kısmında dinamik basıncın yani gaz akış hızının artabilmesi veya sabit kalabilmesi için yanma odası basınç kayıpları az olmalıdır. Ayrıca, gaz türbin motorların ideal çevrimi olan Brayton çevriminin sabit basınçta gerçekleşmesinden dolayı basınç kayıplarının olmaması çevrim verimi için önemlidir. Bununla birlikte, basınç kayıplarının büyük olması tepki kuvvetini azaltarak yakıt tüketimini artırmaktadır.

Yanma odası içerisindeki basınç kayıplarının iki önemli sebebi vardır. Bunlar,

- Sürtünme ve türbülans,
- Yanma sebebi ile meydana gelen sıcaklık yükselmesidir.

Yanma işleminin tam olabilmesi için yanma odası içerisinde gerek türbülans elemanları gerekse seyreltme delikleri tarafından türbülans oluşturulmaktadır. Bu oluşan türbülans ve sürtünme kuvvetleri basınç kayıplarının en önemli sebeplerindendir. Ayrıca yanma sonucu oluşan sıcaklık yükselmesi yoğunluğu azalttığından hızı ve momentumu artırır. Momentumdaki artış alan ile doğru orantılı olarak basınçtaki azalma ile dengelenmelidir. Dolayısı ile basınç kaybı meydana gelir. Bu basınç kaybına esas basınç kaybı (fundamental loss) denir [17].

2.7. Emisyonlar Değerleri

Gaz türbin motorlarından kaynaklanan kirletici emisyonlarla ilgili olarak, iki genel ilgi alanı bulunmaktadır. Bunlar; hava limanları civarındaki kirlenme ve atmosfer katmanlarından olan stratosferdeki kirlenmedir. Hava limanları civarındaki kirlenme ile ilgili olarak istenmeyen kirletici ürünler, yanma odasında ortaya çıkmaktadır. Yasalarla kontrol edilen, dört adet ana kirletici bulunmaktadır. Bunlar;

- Yanmamış hidrokarbonlar (yanmamış yakıt) (HC),
- Duman (karbon parçacıkları),
- Karbonmonoksit (CO),
- Azot oksitlerdir (NO_x).

Bu kirleticilerin oluşumunda etkili olan üç temel koşul; basınç, sıcaklık ve zamandır. Hidrokarbonlar, yanma odasının ilk bölgesinde karbonmonoksit ve dumana dönüşmektedir. Taze hava, karıştırma bölgesinde CO ve dumanı oksitleyerek zehirsiz CO_2'ye dönüştürür. Bu kademede yanmamış HC'lar da, devam eden yanma ile yakılmakta ve yanma işleminin hemen hemen tam olması sağlanmaktadır.

Yüksek sıcaklıklarda oluşan NO_x'in azaltılabilmesi için alevin mümkün olduğu kadar çabuk soğutulması ve yanma süresinin azaltılması gerekmektedir.

Stratosferin kirlenmesinde önemli olan emisyonlar ise;

- Dünyanın atmosferinde sera etkisi yapabilecek olan su buharı ve karbondioksit,
- Güneş radyasyonunu saptırarak, dünyaya ulaşmasını önleyebilecek olan, partikül oluşumuna yol açan kükürt (sülfür) bileşikleri,
- Ozon tabakasını delerek güneşin ultraviyole ışınlarının dünyaya daha çok ulaşmasına yol açabilecek olan nitrojen oksitlerdir.

Bu problemlerden birincisi, şimdilik önemli görülmemektedir. Potansiyel bir problem olarak görülen ikincisi, sülfürün rafineride ayrılması ile giderilebilmektedir. Bu durumda kirliliğin ana odağını NO_x ve onun atmosferdeki ozonla reaksiyonu oluşturmaktadır. Ozonla reaksiyon;

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2 \tag{2.2}$$

$$NO_2 + O \rightarrow NO + O_3 \tag{2.3}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buradaki birinci reaksiyon ozonun nasıl parçalandığını, ikinci reaksiyon ise, tekrar reaksiyona girmek üzere NO'nun nasıl oluştuğunu açıklamaktadır. Stratosferin ozon konsantrasyonunu etkileyen bu oluşumu azaltmak, gelecekteki uçak motorlarını tasarlayan tasarımcıların ana hedefleri arasındadır [19].

2.8. Kerozin ve Doğal Gaz Yakıtlarının Özellikleri

Kerozin, gaz türbinli motorlarda kullanılan ve kod adı jet-A1 olan yakıt çeşididir. Her ısı ve basınç şartlarında en uygun jet/türbin motor yakıtıdır. Jet uçakları yerden ortalama 10000 metre yükseklikte uçtuklarından, ortam sıcaklığı oldukça düşüktür. Kerozinin donma sıcaklığı -47 C° civarında olup, içinde su yoksa donmadan motora akmaya devam eder.

Kerozinin parlama noktası oldukça yüksektir. Bu özelliği ile bir kaza/kırım sırasında uçakta yangın çıkma olasılığını azaltır. Kerozinde diğer sıvı yakıtlar gibi bir ham petrol ürünü olmasına karşın, uluslararası standartta olması gerektiğinden, üretiminde sülfür oranı düşük ham petrol tercih edilir.

Kerozin yakıldığında, egzoz gazı emisyonu olarak % 99 su buharı, azot (nitrojen) ve karbondioksit çıkarır. Bu gazlar zaten havanın doğasında var olan gazlardır. Egzoz gazlarının geriye kalan % 1'lik miktarın içinde; karbonmonoksit, is/kurum ve sülfürdioksit bulunur. Kerozin içinde hiçbir zaman kurşun bulunmaz. Uluslararası araştırmalar, uçaklarda kerozin yakılmasının hava kirliliğine katkısının % 1-2 gibi çok düşük oranda olduğunu tespit etmiştir [25].

Doğal gaz, metan, etan, propan, bütan, azot, pentan ve az miktarda karbondioksit gazlarının bileşiminden oluşan, renksiz, kokusuz, havadan hafif olan yanıcı bir gazdır. Doğal gazın büyük bölümünü, yaklaşık % 90-96'sını, metan (CH_4) gazı oluşturmaktadır. Geri kalan bölümünü ise, % 2.4 etan (C_2H_6), % 0.736 propan (C_3H_8),

% 0.371 bütan (C_4H_{10}), % 0.776 azot (N_2), % 0.164 pentan (C_5H_{12}) ve % 0.085 karbondioksit ($C0_2$) gazları oluşturmaktadır.

Doğal gazın ısıl değerinin benzin ve alkole göre yüksek olması bir avantaj sağlamaktadır. Doğal gaz benzine oranla daha yüksek hava fazlalık katsayısı değerlerinde tutuşma olanağına sahiptir. Böylece motorun fakir karışımla çalıştırılıp, yakıt ekonomisi ve egzoz gazları emisyonu açısından yarar sağlanması da mümkün olmaktadır [26].

Kerozin ve doğal gaz yakıtlarının bazı özellikleri tablo 2.1'de verilmektedir.

Tablo 2.1. Kerozin ve doğal gaz yakıtlarının bazı özellikleri.

Özellikler	**Kerozin**	**Doğal Gaz (Metan)**
Molekül Ağırlığı	167.3	16.04
Yoğunluk (buhar) (kg/m^3)	4.5	0.67
Buharlaşma Sıcaklığı (K)	310	112
Kendi Kendine Tutuşma Sıcaklığı (K)	483	813
Alev Sıcaklığı (K)	2475	2320
Minimum Tutuşma Enerjisi (MJ)	7.2	0.29
Maksimum Laminer Alev Hızı (cm/sn)	30-40	38
Hava İçerisindeki Difüzyon (cm^2/sn)	0.05	0.16
Sabit Basınçta Özgül Isısı (kJ/kgK)	2.57	2.22
Alt Isıl Değeri (kJ/kg)	43100	50200

3. BÖLÜM

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

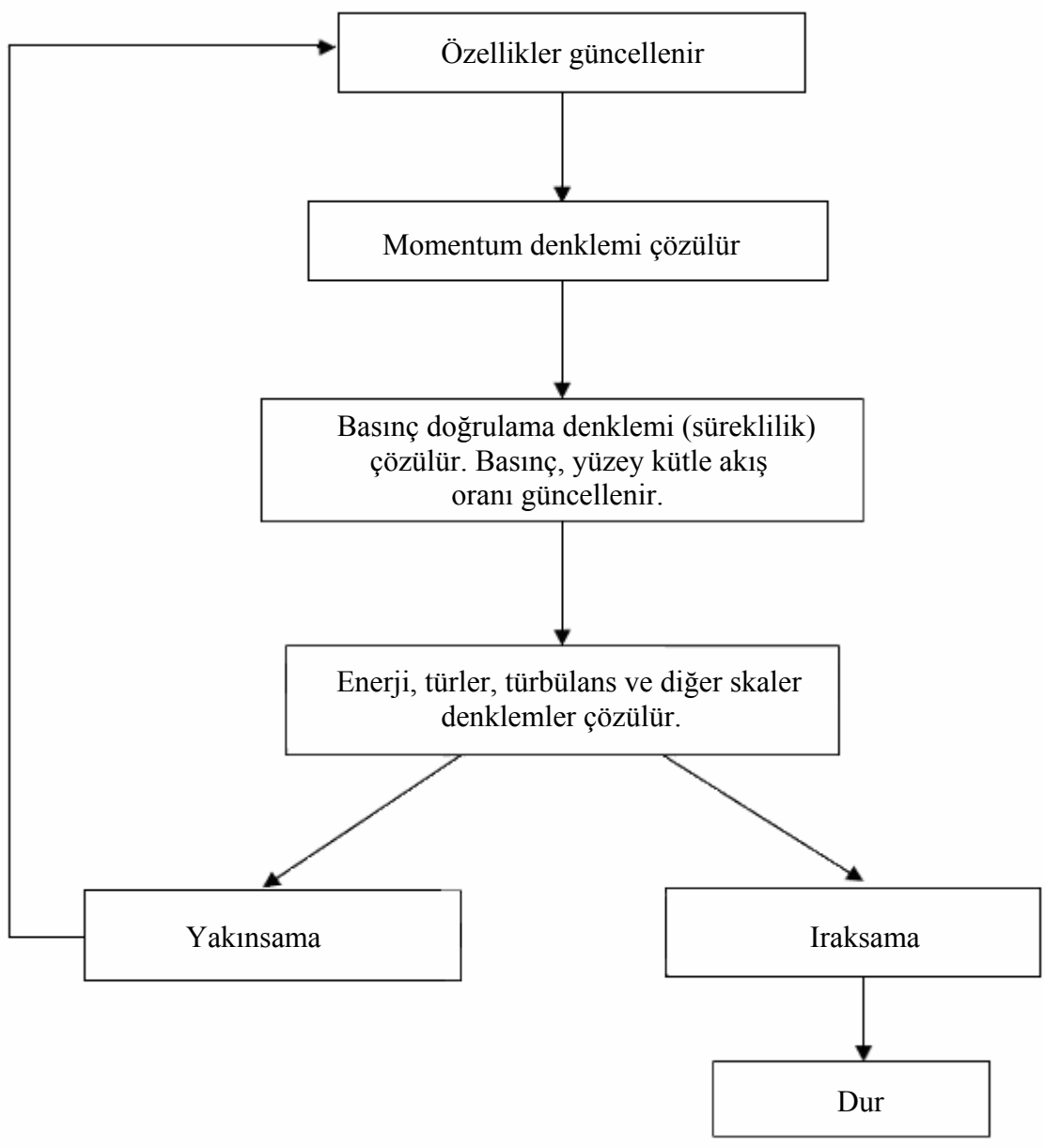
3.1. Giriş

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile çözümleme yapılmasının en önemli nedeni, bir tasarım veya analiz yapılmadan önce bilgisayar simülasyonu aracılığıyla elde edilen veriler kullanılarak verim artırma yöntemleri veya tasarıma yönelik bir takım problemlerin deney aşamasına gelmeden kısa zamanda ve ekonomik olarak çözülebilmesidir. Ayrıca, HAD ile yapılan çalışmalar farklı düşünceler geliştirebilme yönünde büyük katkılar sağladığı için tercih edilmektedir. Yapılan çalışmalar esnasında karmaşık geometri içerisindeki değişiklikler daha kolay ve daha hızlı şekilde yapılabilmektedir [27]. Bu avantajlarından dolayı yapılan bu çalışmada HAD bilgisayar simülasyonu kullanılarak, uygulamada çok pahalı ve zaman gerektiren deneysel araçları kullanmadan, kerozin ve doğal gaz yakılan yanma odasına ait performans değerlerinin tespiti için zaman ve maliyet kazancı sağlanması amaçlanmıştır.

3.2. CFD Çözüm Algoritması

Fluent programı sayısal çözümlemelerde ayrılmış (segregated) çözücü metodu veya birleşik (coupled) çözücü metodundan birini kullanır. Bu metotlardan herhangi birini kullanan Fluent programı kütle, momentum, enerji, kimyasal tür ve türbülans gibi korunum denklemlerini kontrol hacim metodu kullanarak çözer. Bu teknikte, ilk olarak hesaplama alanı genel bir hesaplama ağı kullanılarak ayrıklaştırılmış kontrol hacimlerine bölünür. Daha sonra korunum denklemleri ayrıklaştırılmış bilinmeyenler (hızlar, basınç ve diğer skaler büyükler vb.) için cebirsel denklemler oluşturularak tek tek kontrol hacimleri üzerinde bütünleştirilir. Sonuç olarak, ayrıklaştırılmış denklemler çözülür.

Ayrılmış ve birleşik yaklaşımlar süreklilik, momentum (uygun yerde), enerji ve tür denklemlerinin çözülmesi sırasında farklılık gösterirler. Ayrılmış yaklaşımın kullanılması durumunda, yönetici denklemler sıralı bir şekilde çözülür. Yönetici denklemler lineer (ve birleşik) olmadığından, çözüm halkalarının birkaç iterasyonu yakınsayan çözüm elde edilmeden önce yapılmalıdır. Yapılan her iterasyonda şekil 3.1'de belirtilen basamaklar takip edilir.



Şekil 3.1. Ayrılmış çözüm metodunun basamakları [27].

Yukarıda gösterilen bu basamakları ayrıntılı olarak ifade etmek gerekirse;

1. Akışkan özelikleri şimdiki çözüme bağlı olarak güncellenir.
2. *u, v,* ve *w* momentum denklemleri, hız alanını güncellemek için, basınç ve yüzey kütle akışı için kullanılan değerlerden yararlanılarak, sırayla çözülür.
3. Basınç düzeltmesi için "poisson tipi" denklem süreklilik denklemi ve lineerleştirilmiş momentum denklemlerinden türetilir.
4. Türbülans, enerji, türler ve radyasyon gibi skalerler için denklemler, uygun yerlerde diğer değişkenlerin bir önceki güncellenmiş değerlerini kullanarak çözülür.
5. İnterfaz bağlantı dâhil edileceği zaman, uygun sürekli faz denklemlerindeki kaynak terimler ayrı bir faz eğri hesaplamaları ile güncelleştirilebilir [27].

3.3. Temel Denklemler

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, bir formdan diğer bir forma geçiş esnasında akış dinamiğinin önemli yönetici 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.

3.3.1. Kütle Korunum Denklemi

İki boyutlu aksi simetrik geometriler için kullanılan kütle korunum denklemi (3.1) numaralı denklemde verilmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\rho v_x\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\rho v_r\right) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \tag{3.1}$$

Bu denklemde bulunan *x* ve *r e*ksenel ve radyal koordinatları ifade ederken, v_x ve v_r ise eksenel ve radyal hızları göstermektedir. Ayrıca ρ akışkanın yoğunluğunu, S_m kaynak terimini ifade etmektedir [28].

3.3.2. Momentum Korunum Denklemi

İki boyutlu aksi-simetrik geometriler için kullanılan eksenel momentum korunum denklemi (3.2) numaralı denklemde verilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_x)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_x)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_x}{\partial x}-\frac{2}{3}(\nabla.\vec{v})\right)\right]$$

$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_x}{\partial r}+\frac{\partial v_r}{\partial x}\right)\right]+F_x \quad (3.2)$$

İki boyutlu aksi simetrik geometriler için kullanılan radyal momentum korunum denklemi ise, (3.3) numaralı denklemde verilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x v_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r v_r)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\left(\frac{\partial v_r}{\partial x}+\frac{\partial v_x}{\partial r}\right)\right]_r$$

$$+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu\left(2\frac{\partial v_r}{\partial r}-\frac{2}{3}(\nabla.\vec{v})\right)\right]-2\mu\frac{v_r}{r^2}+\frac{2}{3}\frac{\mu}{r}(\nabla.\vec{v})+\rho\frac{v_z^2}{r}+F_r \quad (3.3)$$

Burada, ∇ koordinat sisteminde vektörel operatör olup, (3.4) numaralı denklemde gösterilmektedir.

$$\nabla.\vec{v}=\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{v_r}{r} \quad (3.4)$$

Yukarıda verilen denklemde bulunan v_z açısal hızı, P paskal cinsinden basıncı ve μ akışkanın viskozitesini belirtmektedir. Bunun yanında F_x ve F_r eksenel ve radyal kuvvet ifadeleridir [28].

3.3.3. Enerji Korunum Denklemi

Türlerin taşınım modeline göre enerji korunum denklemi (3.5) numaralı denklemde verilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left[u_i\left(\rho E + P\right)\right] = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i} - \sum_{j^1} h_{j^1} J_{j^1} + u_j\left(\tau_{i,j}\right)_{eff}\right] + S_h \tag{3.5}$$

Burada, J_j^1; j^1 türünün akma difüzyonu ve S_h kimyasal reaksiyon ısısını veya diğer volumetrik ısı kaynaklarını göstermektedir. Ayrıca, iç enerjiyi ifade eden E (3.6) numaralı denklemde verildiği biçimde hesaplanmaktadır.

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u_i^{\,2}}{2} \tag{3.6}$$

burada ideal gazlar için entalpiyi ifade eden h (3.7) numaralı denklemde verilmektedir.

$$h = \sum_{j^1} m_{j^1} h_{j^1} \tag{3.7}$$

$$h_{j^1} = \int_{T_{ref}}^{T} c_{p,j^1} dT \tag{3.8}$$

Yukarıdaki (3.7) ve (3.8) numaralı denklemlerde ifade edilen m_j^1 ve h_j^1, j^1 türünün kütlesini ve entalpisini ifade etmektedir. Bunun yanında $C_{P,j}^{\,1}$, j^1 türünün sabit basınçta özgül ısısını, T_{ref} referans sıcaklığını göstermektedir. Ayrıca, RNG k-ε türbülans modeli için efektif iletkenliği gösteren λ_{eff}, (3.9) numaralı denklemde verilmektedir.

$$\lambda_{eff} = \alpha . C_p . \mu_{eff} \tag{3.9}$$

burada α, ters efektif Prandtl sayısını ifade etmektedir ve RNG k-ε türbülans modeli için (3.10) numaralı denklemden faydalanılarak bulunur.

$$\left|\frac{\alpha-1.3929}{\alpha_0-1.3929}\right|^{0.6321}.\left|\frac{\alpha+2.3929}{\alpha_0+2.3929}\right|^{0.3679}=\frac{\mu}{\mu_{eff}} \tag{3.10}$$

Bu denklemde bulunan α_0 sabit bir sayı olup (3.11) numaralı denklemde verildiği şekilde hesaplanmaktadır [28].

$$\alpha_0=\frac{\lambda}{\mu C_p} \tag{3.11}$$

3.3.4. Türlerin Korunum Denklemi

Türlerin taşınım modeline göre türlerin korunum denklemi (3.12) numaralı denklemde ifade edildiği şekildedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i)+\nabla.(\rho\vec{v}Y_i)=-\nabla.\vec{J}_i+R_i+S_i \tag{3.12}$$

Yukarıda verilen denklemde kullanılan,

- Y_i; yerel kütle kesrini,
- R_i; i türünün net üretim oranını,
- $\vec{v}$; vektörel hızı,
- $\vec{J}_i$; türbülanslı akışlarda i türünün kütle yayılımını,
- S_i; dağınık fazdan kaynaklanan üretim oranını belirtmektedir [28].

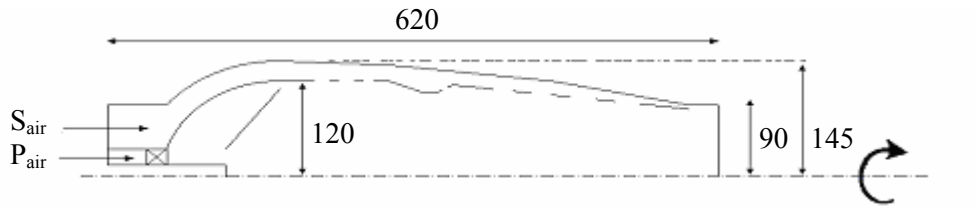
4. BÖLÜM

YANMA ODASI VE DOĞAL GAZIN YANMA MODELLEMESİ

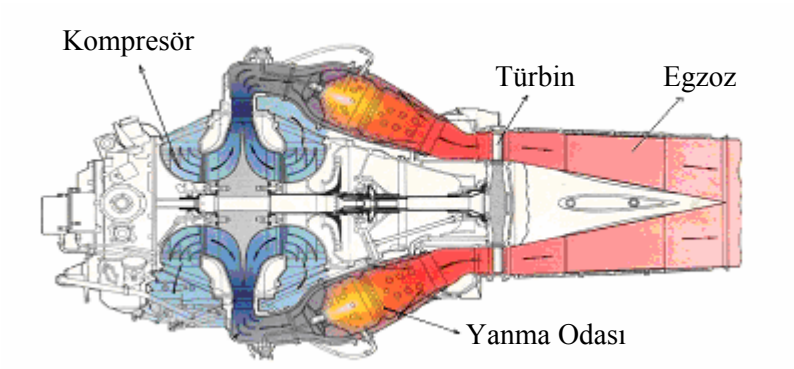
4.1. Yanma Odasının Geometrisi ve Boyutları

Yanma odasının geometrik modeli orijinal boyutları ile Gambit programında çizilmiştir. Yanma odasının geometrisi simetrik olduğundan modellemede iki boyutlu aksi-simetrik geometrik model kullanılmıştır. 2D modeli oluşturulan ve 620 mm uzunluğunda olan yanma odası iç içe geçmiş iki boru olarak kabul edilmektedir. Bu borulardan iç kısımdaki alev tüpünün en geniş kısmının yarıçapı 120 mm'dir. Dış kısımdaki gömleğin en geniş kısmının yarıçapı ise 145 mm'dir. Yanma odasının giriş ve çıkış boyutları ayni olup yarıçapları 90 mm'dir. Ek olarak, yanma odasının modeli üzerinde soğutma için kullanılan havanın alev tüpüne geçmesi ve gerekli olan türbülansın oluşturulması için seyreltme delikleri bulunmaktadır.

Yapılan çalışmada iki tip hava akışı mevcuttur. Yanma odasının iç kısmından geçen birincil (primary) hava, yakıt ile kimyasal tepkime girmektedir. Dış kısımdan geçen ikincil hava (sekondary) ise, yanma sonucu oluşan yüksek sıcaklıktaki akışın, türbin kanatçıklarına ve yanma odası duvarlarına zarar vermemesi için, soğutma havası olarak kullanılır. Ayrıca dış kısımdan geçen havanın bir kısmı yanmamış hidrokarbonların yakılması için orta bölgeden alev tüpüne alınır. Bu çalışmada, iç kısımdan geçen hava miktarı dış kısımdan geçen hava miktarının % 20'si kadardır [24]. Geometrik model üzerinde yanmanın en önemli gereksinimlerinden biri olan türbülansın oluşturulması için türbülans elemanları (swirl kanatçıkları) bulunmaktadır. Ek olarak, yakıt enjektörü eksen çizgisi üzerine yerleştirilmiş olup yarıçapı 2 mm'dir. Bu çalışmada analizi yapılan yanma odasına ait 2D modelin boyutları ve yanma odasının kullanıldığı Rolls-Royce Nene turbojet motorunun kesit görünüşü şekil 4.1 ve şekil 4.2'de gösterilmiştir. Tablo 4.1'de ise Rolls-Royce Nene turbojet motorunun bazı özellikleri verilmektedir.



Şekil 4.1. Yanma odasının boyutları (mm).



Şekil 4.2. Rolls-Royce Nene turbojet motorunun kesit görünümü [29].

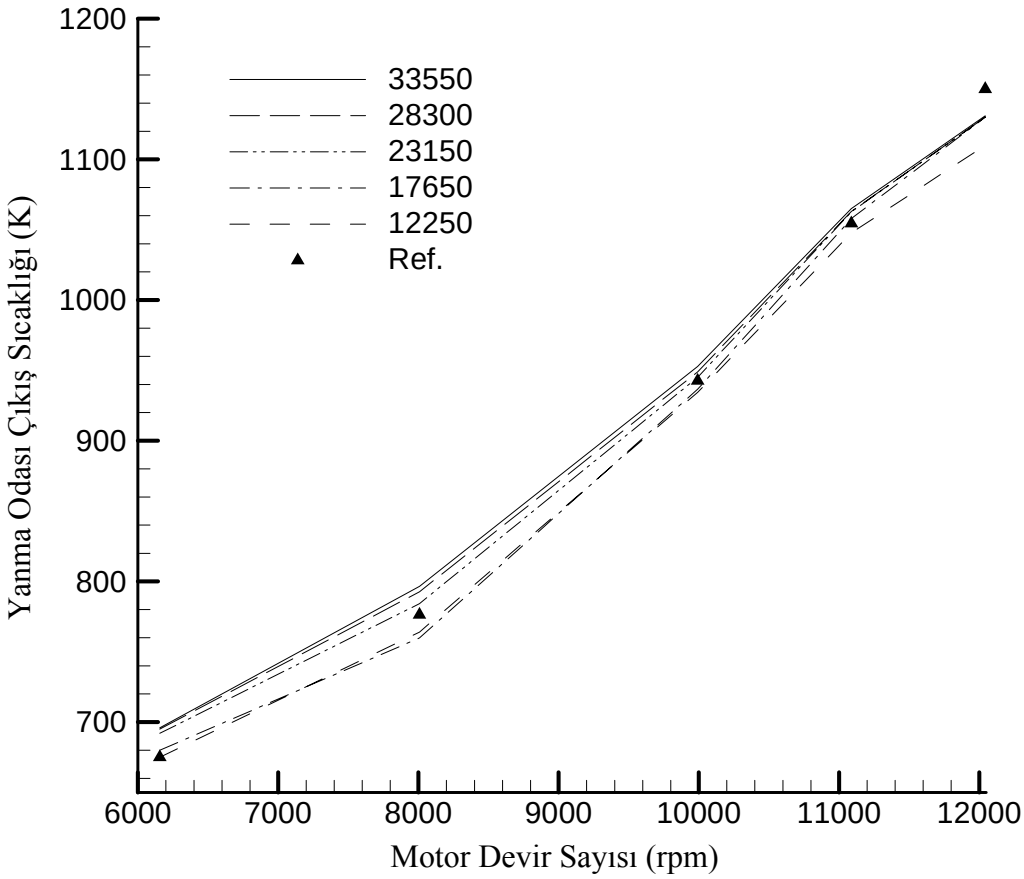
Tablo 4.1. Rolls-Royce Nene turbojet motorunun bazı özellikleri [2].

Ağırlık	1720 (pound), 780 (kg)
Çap	49.50 (inch), 1.26 (m)
Kompresör	Tek kademeli iki girişli santrifüj kompresör
Türbin	Tek kademeli reaksiyon tip aksiyal türbin
Yanma odası	9 adet, boru (tubular) tipi yanma odası
Maksimum thrust kuvveti	5100 (lb), 23 (kN)
Maksimum motor devri	12250 (rpm)

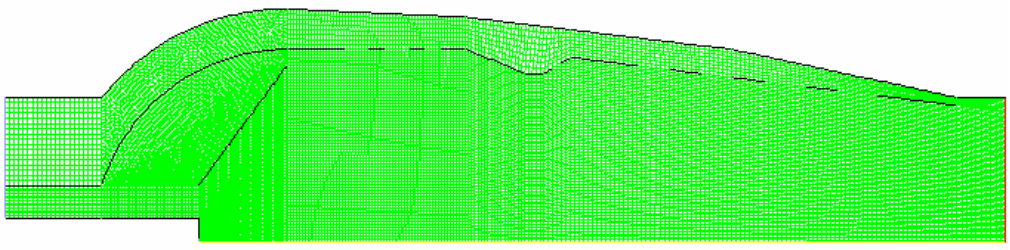
4.2. Sayısal Ağ (Grid) Üretimi

Bu çalışmada analizi yapılan yanma odasına ait 2D geometrik model orijinal boyutlarında ve 15 farklı yüzey oluşturularak Gambit programında çizilmiştir. Yüzeyler toplam 12250, 17650, 23150, 28300 ve 33550 grid sayılarına bölünerek, sayısal çözümlemeler yapılmıştır. Çözümlemelerde, yanma odası çıkış sıcaklık değerlerinin katalog değerlerine yakın olduğu ve grid sayısının artırılması durumunda sonuçlarda

büyük farklılaşmalar görülmediği, 23150'ye bölünen grid yapısı tercih edilmiştir. Farklı grid sayılarında yapılan çözümlemelerden elde edilen yanma odası çıkış sıcaklık değerleri ile literatürden referans alınan yanma odası çıkış sıcaklık değerleri şekil 4.3'de verilmektedir. Ayrıca çözümlemede tercih edilen 23150 grid yapısına bölünmüş yanma odasının iki boyutlu modeli ve grid yapısı şekil 4.4'de verilmektedir.



Şekil 4.3. Yanma odası çıkış sıcaklık değerlerinin deneysel ve farklı grid sayılarında yapılan çözümleme sonuçları.



Şekil 4.4. Yanma odasının iki boyutlu modeli ve grid yapısı.

4.3. Sayısal Modeller

Sayısal çözümlemede analizi yapılan yanma odası, simetrik bir yapıda ve türbülans elemanına sahip olduğundan, akış modeli olarak aksi-simetrik türbülanslı akış modeli seçilmiştir. Ayrıca akış, türbülanslı ve yanma reaksiyonları içermesinden dolayı, türbülans modeli olarak yanma reaksiyonlarında iyi sonuç veren RNG k-ε türbülans modeli tercih edilmiştir [6]. Yanma reaksiyonlarında, ışınım ile ısı transferinin sıcaklık dağılımına etkisi fazla olduğundan, P1 radyasyon modeli ile çalışılmıştır [19]. Yanma modelinde ise, girdap ayrışma türbülans kimyasal etkileşimi ile birlikte, türlerin taşınım modeli seçilmiştir. Ayrıca kerozin ve doğal gaz yakılarak yapılan bu çalışmada deniz seviyesi standart atmosfer koşulları ile birlikte bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller;

- Akış iki boyutlu, eksenel simetrik ve türbülanslıdır.
- Hava akışının basıncı ve sıcaklığı, kompresör tarafından belirli sıkıştırma oranlarında sıkıştırılarak artırıldığı varsayılmıştır.
- Hava yakıt karışımları ideal gaz özellikleri gösterir.
- Kerozin ve doğal gaz yakıtlarının ön ısıtma yapılarak sıcaklığın artırıldığı ve bir yakıt pompası tarafından basınçlandırıldığı kabul edilmiştir.
- Bir türbülans elemanı tarafından yakıt ve birincil havanın türbülans oluşturularak yanma odasına gönderildiği varsayılmıştır.
- Doğal gazın % 100 metandan oluştuğu varsayılmıştır.

4.3.1. Türbülanslı Aksi-Simetrik Akış Modeli

Sayısal çözümlemede analizi yapılan yanma odası, simetrik bir yapıda ve türbülans elemanına sahip olduğundan, akış modeli olarak aksi-simetrik türbülans akış modeli seçilmiştir. Aksi-simetrik türbülans akış modeli için çözümleme yapılan açısal momentum denklemi (4.1) numaralı denklemde verilmektedir. Verilen denklem ile eksenel ve radial momentum denklemleri bir arada yazılmıştır. Burada x eksenel koordinatı, r radyal koordinatı, v_x eksenel hızı, v_r radyal hızı w açısal (swirl) hızı, ρ akışkanın yoğunluğunu ve μ akışkanın viskozitesini temsil etmektedir [28].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}(r\rho v_x w)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\rho v_r w)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu\frac{\partial w}{\partial x}\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^3\mu\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{w}{r}\right)\right]-\rho\frac{vw}{r} \quad (4.1)$$

4.3.2. RNG k-ε Türbülans Modeli

RNG türbülans metodu yeniden normalleştirme grup metodu olarak bilinir ve matematiksel teknikler kullanılarak Navier-Stokes denklemlerinden türetilmektedir. Bu model 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 [6]. RNG k-ε türbülans modelinde türbülans kinetik enerjisi (k) ve dağılım oranı (ε) sırasıyla aşağıdaki (4.2) ile (4.3) numaralı taşınım denklemleri kullanılarak belirlenir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k \mu_{eff}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{4.2}$$

ve

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right)+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R_\varepsilon+S_\varepsilon \tag{4.3}$$

Burada G_k ortalama hız gradyantından dolayı türbülans kinetik enerji üretimini, G_b kaldırma kuvvetinden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini, $C_{1\varepsilon}$, ve $C_{2\varepsilon}$ deneysel sabitleri, σ_k ve σ_ε Prandtl sayılarını göstermektedir ve bu sabit sayılar tablo 4.2'de verilmektedir. $C_{3\varepsilon}$ ise dikey ve paralel ağırlık vektörlerine bağlı bir sabit olup (4.4) numaralı denklemde belirtilmektedir. Ayrıca denklemde verilen ve (4.5) numaralı denklem ile elde edilen Y_M, sıkıştırılabilir ve türbülanslı akışlar için yayılım oranını ifade etmektedir [28].

$$C_{3\varepsilon}=\tanh\left|\frac{v}{u}\right| \tag{4.4}$$

ve

$$Y_M=2\rho\varepsilon M_t^2 \tag{4.5}$$

Bu denklemde bulunan M_t türbülans mach sayısını ifade eder. (4.2) ve (4.3) numaralı denklemlerde bulunan S_k ve S_ε kaynak terimlerini ifade etmektedir. R_ε ise, ε eşitline bağlı bir terimdir ve (4.6) numaralı denklem verildiği gibi hesaplanır.

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \eta/\eta_0\right)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4.6}$$

Bu denklemde bulunan η, (4.6) numaralı denklemde belirtildiği gibi k kaynak teriminin ε'a oranı ile bulunmaktadır. Ayrıca, η_0 ve β sabit olup tablo 4.2'de verilmektedir [28].

Tablo 4.2. RNG analizlerinden doğan sabitler [28].

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

4.3.3. P1 Radyasyon Modeli

Yüksek sıcaklıkların meydana geldiği yanma odalarında en etkin ısı transferi mekanizması radyasyonla ısı transferidir. Bu nedenle, radyasyon; sıcaklık dağılımını ve gaz emisyonlarını önemli derecede etkilemektedir. Çalışmada bu durumu dikkate alabilmek için yanma odası içerisindeki radyasyon, bu tip problemler için uygun bir model olan P1 radyasyon modeli kullanılarak hesaplanmıştır [19].

Fluent programı P1 radyasyon modelinde q_r ile ifade edilen radyasyon akısını (4.7) numaralı denklem ile çözmektedir.

$$q_r = -\frac{1}{3(\alpha + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \tag{4.7}$$

Denklemde verilen α emme katsayısını, σ_s saçılma katsayısını, G yüzeye gelen radyasyonu ve C eş yönlü olmayan doğrusal faz fonksiyon katsayısını göstermektedir. Bu denklemde bulunan oran ifadesi Γ ile tanımlanırsa;

$$\Gamma = \frac{1}{\left(3\left(\alpha + \sigma_s\right) - C\sigma_s\right)} \tag{4.8}$$

olur. Böylece (4.7) numaralı denklemde verilen radyasyon akısı (q_r);

$$q_r = -\Gamma \nabla G \tag{4.9}$$

ifadesine dönüşür. Buradan yüzeye gelen radyasyon (G) için yeni bir eşitlik yazılırsa;

$$\nabla.\left(\Gamma \nabla G\right) - \alpha G + 4\alpha\sigma T^4 = S_G \tag{4.10}$$

ifadesi yazılabilir. Burada verilen σ Stefan-Boltzmann sabitini, S_G ise radyasyon kaynağını ifade etmektedir [28].

4.3.4. Girdap Ayrışma Yanma Modeli

Çoğu yakıtlar hızlı bir şekilde yanarken, reaksiyon oranı türbülanslı karışım tarafından kontrol edilir. Türbülans karışımı yavaş olan ön karışımsız ve ön karışımlı yanmalarda, reaksiyon bölgesinde yakıt ve hava hızlı bir şekilde reaksiyona girerler. Bu durumda yanma oranı karışımın limitlerine ve kompleks oluşuna bağlıdır ve kimyasal kinetik oranları ihmal edilebilir. Fluent programı, girdap ayrışma modeli ile türbülans kimyasal etkileşimini dikkate alır. Girdap ayrışma modelinde reaksiyondan dolayı i türünün net üretim oranı ($R_{i,r}$) (4.11) ve (4.12) numaralı denklemler ile hesaplanır [28].

$$R_{i,r} = w_{i,r} M_{w,i} A\rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left(\frac{Y_R}{w_{R,r} M_{w,R}} \right) \tag{4.11}$$

$$R_{i,r} = w_{i,r} M_{w,i} AB\rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_J^N \hat{w}_{j,r} M_{w,j}} \tag{4.12}$$

Yukarıda verilen denklemlerde Y_P ürünlerden herhangi bir türün kütle oranını, Y_R reaksiyona giren herhangi bir türün kütle oranını, A değeri 1.0 olan bir model sabitini [9], B değeri 0.5 olan bir model sabitini, N sistem içerisindeki kimyasal türlerin numarasını, $w_{i,r}$ reaksiyona giren i türünün stokiometrik katsayısını ve $\hat{w}_{i,r}$ reaksiyondan çıkan i türünün stokiometrik katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca $M_{w,i}$ i türünün molekül ağırlığını ve ρ akışkanın yoğunluğunu göstermektedir [28].

4.4. Kerozinin Yanma Reaksiyonu

Havacılık yakıtı olarak bilinen kerozin, sivil havacılık sektörü için hizmet veren uçakların güç sistemini oluşturan turbojet, turboshaft, turboprop ve turbofan gibi gaz türbinli motorlarda kullanılmaktadır. Sivil uçakların büyük kısmında kullanılan kerozinin yakılması sonucu karbondioksit, su ve enerji açığa çıkar. Kerozinin oksijenle olan tek kademeli reaksiyonu (4.13) numaralı denklemde verilmektedir.

$$C_{12}H_{23} + \frac{35.5}{2} O_2 \rightarrow 12CO_2 + \frac{23}{2} H_2O + ISI \tag{4.13}$$

Kerozinin yanma reaksiyonuna 1 mol kerozine karşılık 17.75 mol oksijen girmektedir. 12 mol karbondioksit ve 11.5 mol su meydana gelmektedir. Bu reaksiyona giren ve çıkan maddeleri kütle cinsinden ifade etmek gerekirse;

$$167\ gr\ C_{12}H_{23} + 568\ gr\ O_2 \rightarrow 528\ gr\ CO_2 + 207\ H_2O \tag{4.14}$$

elde edilir. Bunun yanında 18.75 mol yakıt hava karışımı reaksiyona girerken 33.5 mol ürün reaksiyondan çıkmaktadır.

4.5. Doğal Gazın Yanma Reaksiyonu

Doğal gaz, kurulu enerji çevrim santrallerindeki gaz türbinli motorların çoğunda kullanılmaktadır. Ayrıca uçaklarda bulunan gaz türbinli motorlarda da alternatif yakıt olarak kullanılması için çalışmalar yürütülmektedir. Çevrim santrallerinde yakılıp enerji

elde edilen doğal gazın büyük bir kısmı metandan oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı bu çalışmada doğal gazın % 100 metandan oluştuğu varsayılmıştır. (4.15) numaralı denklemde metanın oksijenle yanma reaksiyonu gösterilmektedir.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O + ISI \tag{4.15}$$

Yukarıdaki denklemde verilen metanın oksijenle yanma reaksiyonuna 1 mol metan girerken buna karşılık 2 mol oksijen girmektedir. Reaksiyon sonunda 1 mol karbondioksit ve 2 mol su meydana gelmektedir. Bu reaksiyona giren ve çıkan maddeleri kütle cinsinden ifade etmek gerekirse;

$$16\ \ gr\ CH_4 + 64\ gr\ O_2 \rightarrow 44\ gr\ CO_2 + 36\ H_2O \tag{4.16}$$

elde edilir. Bunun yanında 3 mol yakıt hava karışımı reaksiyona girerken 3 mol ürün reaksiyondan çıkmaktadır. (4.14) ve (4.16) numaralı denklemler karşılaştırıldığında metanın yanma reaksiyonundan çıkan zararlı ürünlerin daha az olduğu görülmektedir.

4.6. Sınır Şartları

Standart deniz seviyesi şartlarında yapılan çözümlemelerde, kerozin ve metan yakıtlarının sıcaklıkları ön ısıtma işlemi uygulandığı varsayılarak 350 K olarak alınmıştır. Yakıtın sıcaklığı sabit alınırken basıncı yakıt pompasının sıkıştırması ile 20 atm ile 35 atm arasında değişen değerlerde verilmiştir. Çözümlemeler deniz seviyesi şartlarında yapıldığından çevre basıncı 1 atm, çevre sıcaklığı 288 K olarak kabul edilmiştir. Bunun yanında, yanma odası basınç kayıp değerleri tespit edilirken kompresör tarafından artırılan basınç değerleri de dikkate alınmıştır. Reaksiyona giren havanın basıncı ve sıcaklığı kompresörde meydana gelen sıkıştırmaya bağlı olarak 1 atm ile 3 atm arasında değişen değerlerde girilmiştir. Ayrıca, sayısal çözümlemede yakıt ve havanın giriş değerleri için, yakıt ve havanın saniyedeki kütle akış miktarını gösteren, kütle akış oranı cinsinden değerler kullanılmıştır.

Sayısal çözümlemelerde yakıt ve havanın türbülans yoğunluğu % 10 kabul edilmiştir. Bunun yanında yanma odası içerisinde türbülans oluşması için tercih edilen açısal komponentlere ait değerler (4.17) numaralı denklemde belirtilmiştir.

$$\left(\frac{v_x}{w}\right)_{fuel} = 1.0\,, \qquad \left(\frac{v_x}{w}\right)_{Pair} = 0.75 \quad ve \quad \left(\frac{v_x}{w}\right)_{Sair} = 0 \tag{4.17}$$

Yakıt için açısal komponent değerleri 1.0 alınırken birincil hava için 0.75 alınmıştır. Fakat ikincil havanın türbülanslı olmamasından dolayı açısal komponent değerleri 0.0 verilmiştir. Ayrıca, yukarıda bulunan denklemde v_x eksenel hızı, w türbülans (swirl) hızını, P_{air} birincil havayı ve S_{air} ikincil havayı temsil etmektedir.

Sınır şartları tespit edilirken yanma odasına ait duvarlarda herhangi bir tanımlama yapılmamıştır. Bununla birlikte yanma odası giriş ve çıkış ölçüleri hidrolik çap olarak tanımlanıp değerler metre cinsinden yazılmıştır.

Son olarak, yanma odasında kerozin ve metan yakıtlarının hava ile yanma reaksiyonunu modelleyen çalışmada, farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) ve 1480, 2290 ve 2980 kW gücü veren 10000, 11000 ve 12000 rpm motor devir sayılarında çözümlemeler yapılmıştır. Bu çözümlemelerde kullanılan ve literatür çalışmalarından elde edilen hava ve kerozin yakıtına ait bazı referans değerler tablo 4.3'de verilmektedir.

Tablo 4.3. Çözümlemelerde kullanılan ve literatür çalışmalarından elde edilen motor devirlerine göre hava ve kerozin yakıtına ait bazı referans değerler [2].

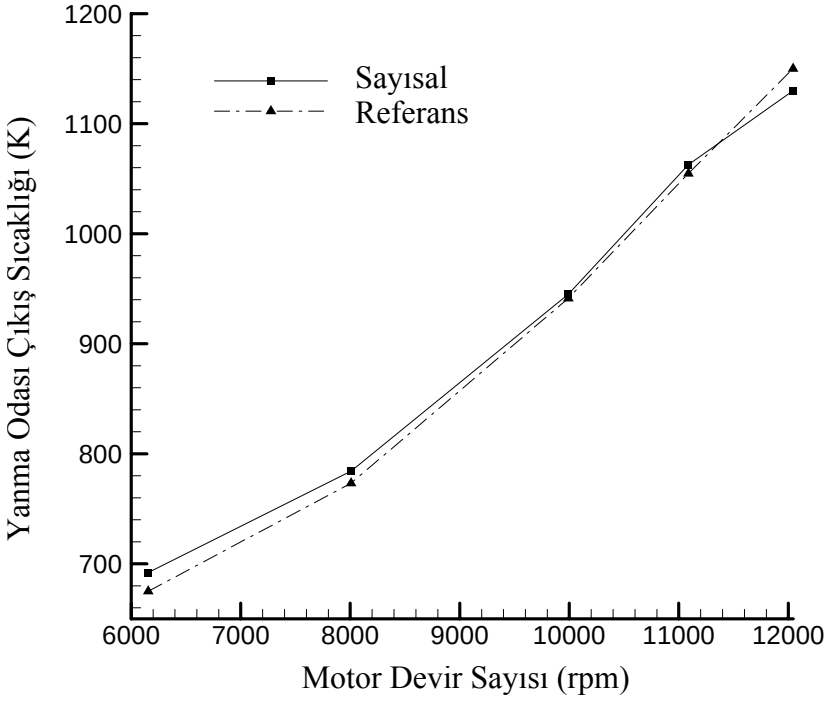
Yakıt	Motor Devri (rpm)	Yakıt (kg/sn)	Hava (kg/sn)	Yakıt Basıncı (Pa)	Hava Basıncı (Pa)	Hava Sıcaklığı (K)
Kerozin	10000	0.03437	4.14178	2294700	245750	445
	11000	0.05312	4.83779	3397900	332900	460
	12000	0.06919	4.54548	3553000	279700	460

5. BÖLÜM

SAYISAL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

5.1. Sayısal Modelin Uyumluluğu

Bu tez çalışmasında sayısal çözümlemelerin uyumluluğu için, farklı motor devirlerinde kerozin yakılması ile elde edilen yanma odası çıkış sıcaklık değerleri, literatür çalışmalarından elde edilen referans değerler [2] ile karşılaştırılmıştır. Sıcaklık değerlerinin birbirlerine yakın olduğu gözlenmiştir. Yalnızca düşük ve yüksek motor devirlerinde maksimum 25 K farklılık olduğu tespit edilmiştir. Bu farklılık referans sıcaklık değerlerinin yaklaşık % 2.5'u kadardır. Bu sayısal çalışmada elde edilen yanma odası çıkış sıcaklık değerleri ve referans değerler şekil 5.1'de gösterilmektedir.



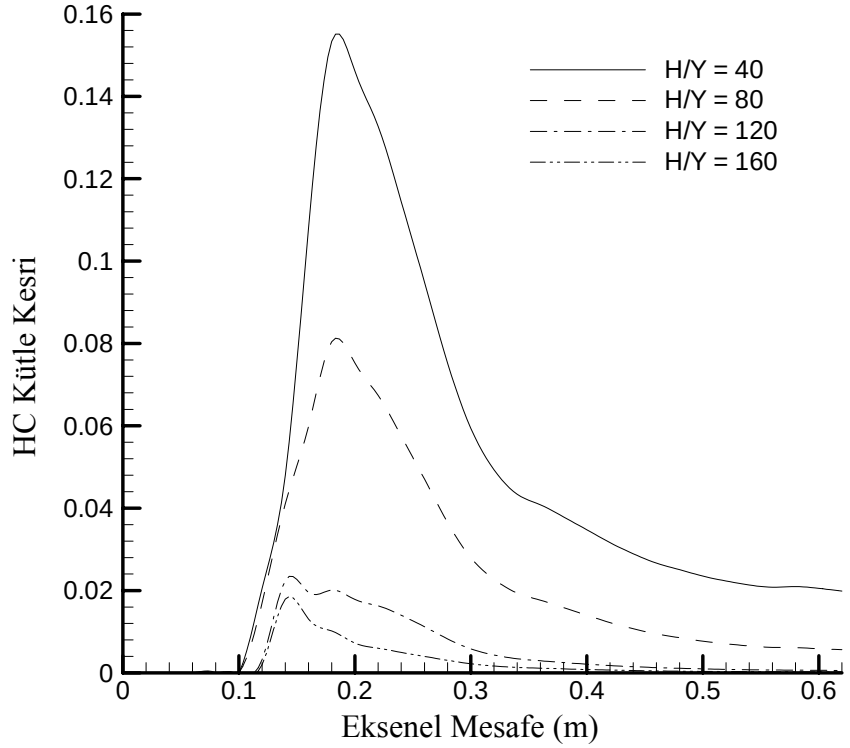
Şekil 5.1. Farklı motor devirlerinde elde edilen yanma odası çıkış sıcaklık değerleri ile katalog değerlerinin karşılaştırılması.

5.2. Yanma İşlemi ve Gaz Akışı

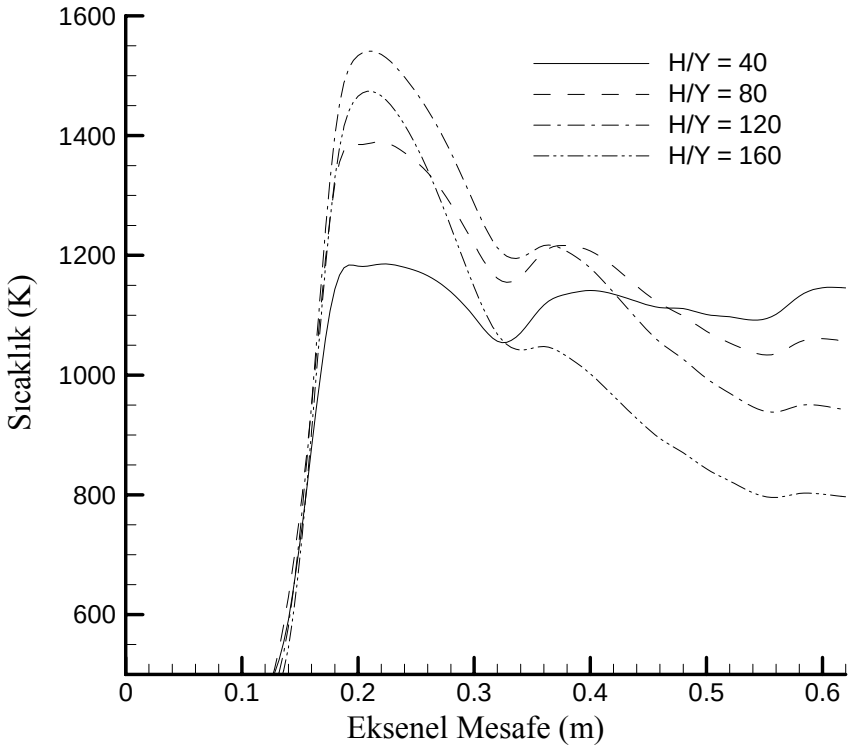
Gaz türbinli motorlarda tepki kuvvetinin elde edilmesi için yanma odalarında yakıt ve hava kimyasal tepkimeye sokulmaktadır. Tepkime sonucu oluşan gaz akışının termal ve kinetik enerjisi türbinde ve egzozda yararlı iş ve itme kuvvetine dönüştürülmektedir. Yararlı iş ve itme kuvvetinin oluşturulması için kullanılan gaz akışının, yanma odası içerisinde birçok özelliği değişmektedir. Sıcaklık ve hız artmakta, yoğunluk ve basınç azalmaktadır. Gaz akışında ki bu değişimler, yakıt ve havanın kimyasal reaksiyonu ve yanma odasının geometrisine bağlı olarak meydana gelmektedir. Bu nedenle, yapılan bu tez çalışmasında, gaz türbinli yanma odalarında meydana gelen olayların tespit edilmesi ve yanma işleminin gaz akışı üzerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Şekil 5.2'de 10000 rpm (1480 kW güçte) motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında (40, 80, 120 ve 160) kerozin yakıtının hava ile tepkimeye girmesi sonucu eksenel mesafeye göre yakıtının kütle kesir değerlerinin değişimi verilmektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere, bütün H/Y oranlarında yakıt püskürtüldükten sonra kimyasal yanma reaksiyonu başlamakta ve yakıt miktarı hızla tükenmektedir. Bu grafikte görülen yakıt kütle kesrini yanma verimi olarak düşünürsek, yanma verimi süratle artmaktadır. Şekil 5.3'de ise 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında (40, 80, 120 ve 160) kerozin yakıtının hava ile tepkimeye girmesi sonucu eksenel mesafeye göre yanma odası içerisinde gaz akışının ortalama sıcaklık değişimleri verilmektedir. Her iki şekil incelendiğinde, yanma veriminin artması ile gaz sıcaklığı hızla artmaktadır. Fakat yanma verimi maksimum noktada sabitlendikten sonra, yanma odasına giren ve seyreltme deliklerinden geçen ikincil hava gaz sıcaklığını ideal seviyeye düşürmektedir. Burada, hem türbin kanatçıklarının ve yanma odası duvarlarının zarar görmesi engellenmekte hem de çıkıştaki sıcaklık dağılımları stabil hale gelmektedir.

Ayrıca, farklı H/Y oranlarında yanma odasına giren yakıt miktarı sabitken hava miktarı değiştiğinden, elde edilen yakıt kütle kesir değerleri ve sıcaklık değerleri arasında farklılıklar bulunmaktadır. Şekil 5.2 incelendiğinde, H/Y=40 iken hava miktarının az olması ile yanma veriminin az olduğu görülmektedir. Fakat H/Y oranı arttıkça yanma için gerekli olan hava miktarı artmaktadır. Bunun sonucunda yanma verimi artmaktadır. Artan yanma verimi, şekil 5.3'de görüldüğü gibi, yanma odası sıcaklık değerlerinde artış sağlamaktadır. Yani, H/Y oranı arttıkça yanma odası sıcaklık değerleri artmaktadır.



Şekil 5.2. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre kütle oranlarının değişimi.



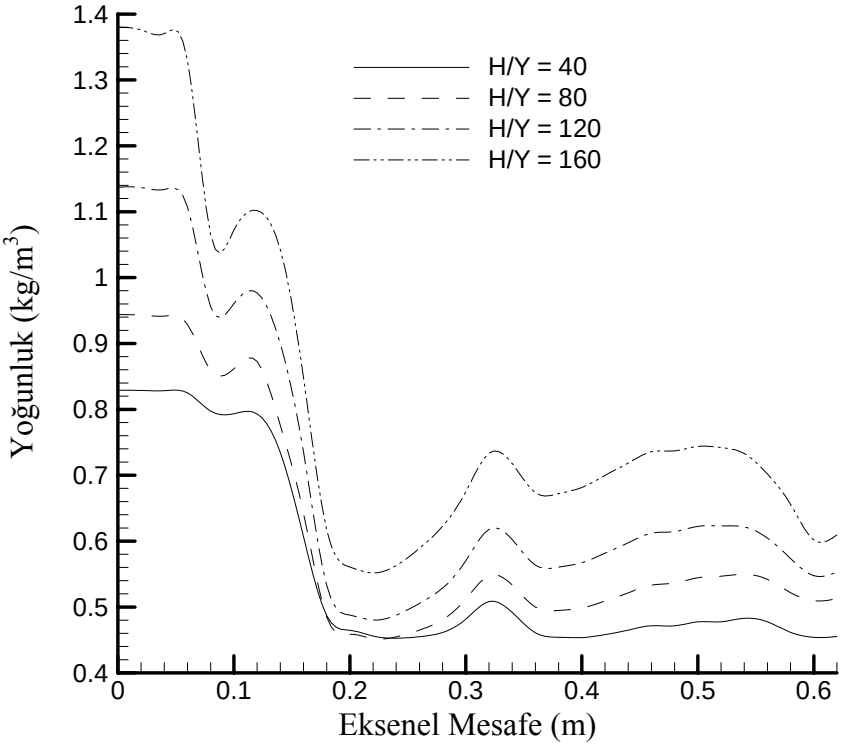
Şekil 5.3. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama sıcaklığı.

Şekil 5.4'de 10000 rpm (1480 kW güçte) motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında (40, 80, 120 ve 160) kerozin yakıtının hava ile tepkimeye girmesi sonucu eksenel mesafeye göre yanma odası içerisinde gaz akışının ortalama yoğunluğu verilmektedir. Yanma odası sıcaklık değişim grafiğinin verildiği şekil 5.2 incelendiğinde, sıcaklık değerinin yükselmeye başladığı noktadan itibaren, sıcaklık ve yanma odası hacminin etkisi ile gaz akışının yoğunluğunda eksenel mesafeye göre hızlı bir düşüş meydana gelmektedir. Fakat seyreltme deliklerinden gelen ikincil havanın etkisi ile gaz akışının sıcaklık değeri düşmektedir. Sıcaklığın düşmesi, hacmin küçülmesi ve ikincil hava yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı gaz akışının ortalama yoğunluğu bir miktar artmaktadır. Yanma odasının sonuna doğru ise ortalama sıcaklıktaki yükselmeden dolayı yoğunluk azalmakta ve daha sonra sabit kalmaktadır.

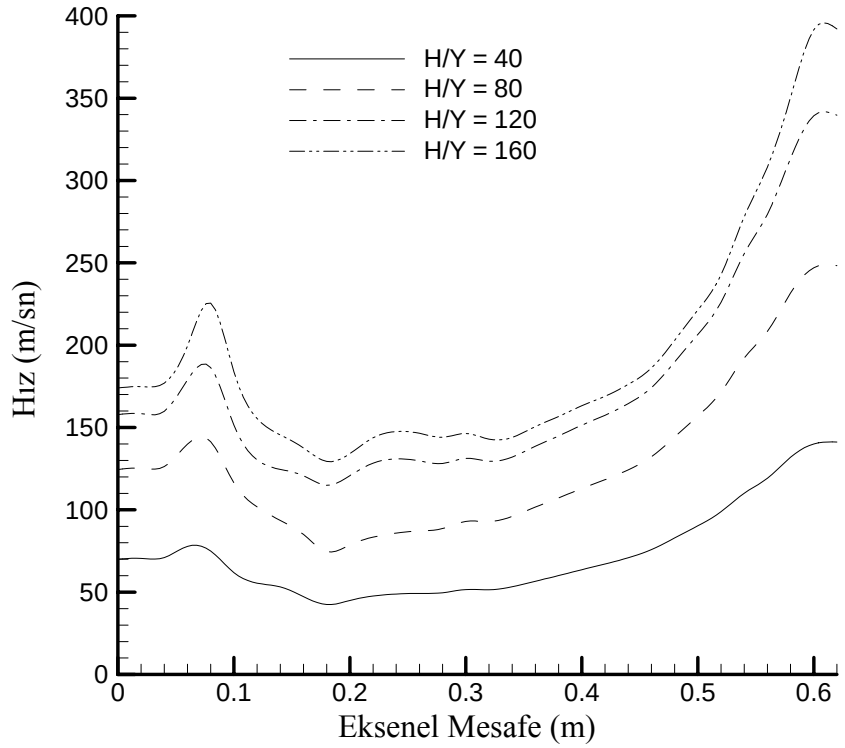
Gaz akışının yoğunluğundaki bu değişimler, ayni zamanda akış hızını değiştirmektedir. Şekil 5.5'de 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yakıtının hava ile tepkimeye girmesi sonucu, eksenel mesafeye göre yanma odası içerisinde gaz akışının ortalama hız değişimleri görülmektedir. Şekilde görülen ortalama gaz akış hızı, ikincil hava hızının artmasından dolayı bir miktar artmaktadır. Daha sonra yanma işleminin tam olabilmesi için, şekil 5.7'de alanı görülen yanma odası difüzör kısmında gaz akışının dinamik basıncı statik basınca dönüşmekte ve gaz akışının hızı azalmaktadır.

Bu arada, alandaki hızlı genişlemeye rağmen yanma tepkimesinden dolayı açığa çıkan sıcaklık yoğunluğu azaltmakta ve hızdaki düşüşü sınırlamaktadır. Daha sonra, gaz akışı yanma odasında ilerlerken, ortalama sıcaklığın düşmesine rağmen şekil 5.7'de görülen yanma odası alanındaki küçülmeden dolayı ortalama hız bir miktar artmaktadır. Yanma odasının sonuna doğru, sıcaklık düşmesi sabitlenirken, yanma odası alanındaki küçülme devam etmektedir. Bundan dolayı, gaz akışının ortalama hızı artmaktadır.

Yanma odasında gaz akış yoğunluğunun gösterildiği şekil 5.4 incelendiğinde, H/Y oranı arttıkça, yanma odasına giren hava miktarı daha fazla olduğundan gaz akışının ortalama yoğunluğu artmaktadır. Benzer bir davranış şekil 5.5'de verilen hız grafiğinde de görülmektedir. H/Y oranının ifade ettiği yanma odasına giren hava yakıt oranı arttıkça, yakıt sabitken hava miktarı artmakta ve yanma odasının giriş ve çıkışındaki ortalama gaz akış hızı artmaktadır.



Şekil 5.4. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama yoğunluğu.



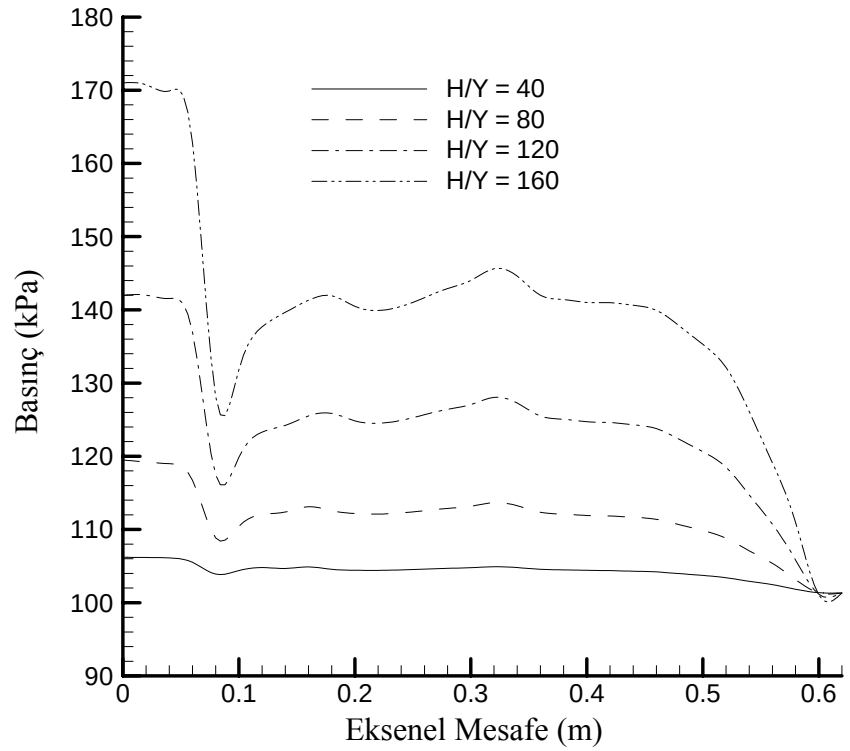
Şekil 5.5. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama hızı.

Şekil 5.6'da 10000 rpm (1480 kW güçte) motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında (40, 80, 120 ve 160) kerozin yakıtının hava ile tepkimeye girmesi sonucu, eksenel mesafeye göre yanma odası içerisinde gaz akışının ortalama toplam basıncı gösterilmektedir. Ayrıca, sayısal modellemenin yapıldığı, yanma odasına ait geometrinin eksenel mesafeye göre alan değişimi şekil 5.7'de verilmektedir. Yanma odasının giriş kısmında, sürtünme ve ortalama akış hızının artmasından dolayı ortalama gaz basıncı düşmektedir. Daha sonra, şekil 5.5'deki gaz akış hız grafiğinde görüldüğü gibi, ortalama gaz akış hızının azalması ile ortalama gaz basıncı biraz artmaktadır.

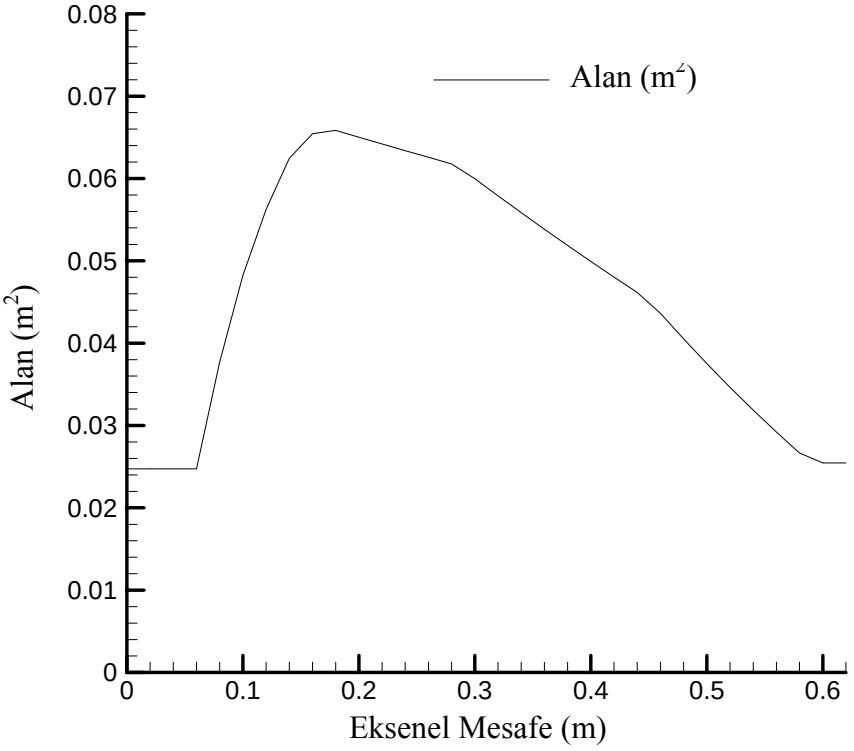
Yanma odasının sonuna doğru, yanma verimi maksimum noktaya ulaştığından, kimyasal tepkime sonucu açığa çıkan ısı enerjisi gaz akışının sıcaklığını daha fazla artıramamaktadır. Böylece sıcaklığın yoğunluk, hız ve basınç üzerindeki etkisi kalmamaktadır. Yanma odasının sonuna doğru, alan ile orantılı olarak artan gaz hızının, seyreltme deliklerinden gelen ikincil havanın ve yanma odası geometrisinden dolayı meydana gelen türbülansın basınç üzerine etkisi olduğu görülmektedir.

Bununla birlikte şekil 5.6 incelendiğinde, H/Y oranının artması ile gaz akışının basıncında büyük değişimler meydana gelmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi, yanma odasına giren hava miktarı arttığından dolayı, giriş basıncı yüksek olmaktadır. Fakat yanma odasının çıkışında basınç değeri yüksek H/Y oranları için neredeyse ayni olmaktadır. Bu sebepten H/Y oranı ile basınç kaybı doğru orantılıdır. H/Y oranı arttıkça yanma odası basınç kaybı artmaktadır.

Sonuç olarak, gaz akış özellikleri kompresör tarafından sıkıştırılmış ve ısıtılmış havanın yüksek hızla yanma odasına girmesiyle değişmeye başlar. Şekil 5.5'deki gaz akış hızı, şekil 5.6'daki gaz basıncı ve şekil 5.7'deki yanma odasının alan grafikleri incelendiğinde, yanma odası difüzör kısmında, iyi bir yanma için dinamik basıncın statik basınca dönüştüğü görülmektedir. Böylece gaz akış hızı azalmakta ve iyi bir yanma sağlanmaktadır. Kimyasal tepkimeden sonra sıcaklığı artan gaz akışının yoğunluğu azalmakta ve hızı artmaktadır. Türbin kanatçıklarının yüksek sıcaklıktan zarar görmemesi için seyreltme deliklerinden soğuk gaz akışı ortalama sıcaklığı düşürmektedir. Yanma odasının sonuna doğru, gerek sıcaklığın etkisi gerekse yanma odasının alanındaki küçülmeden dolayı, gaz akışı hızlanmaktadır. Gaz akışındaki bu hızlanma basınç kayıplarına sebep olmaktadır.



Şekil 5.6. 10000 rpm motor devrinde ve farklı H/Y oranlarında kerozin yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama basıncı.



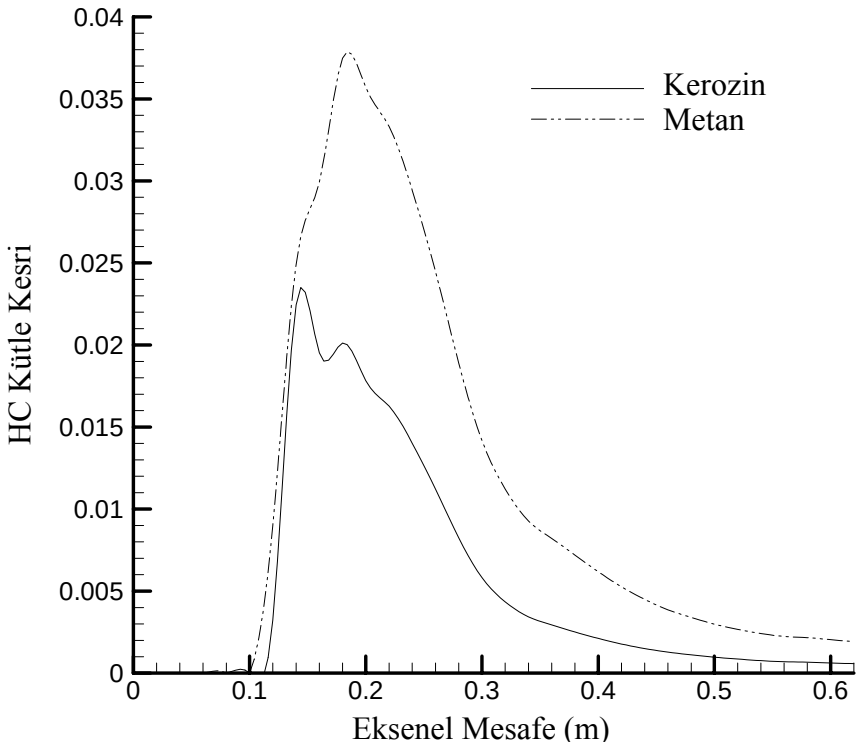
Şekil 5.7. Sayısal modellemenin yapıldığı yanma odasına ait geometrinin eksenel mesafeye göre alan değişimi.

5.3. Yanma Verimi

Yanma verimliliği yanma odası dizayn parametrelerinden en önemlisidir. Yanma odası içerisinde, yakıt kimyasal enerjisinin termal enerjiye dönüşüm oranını göstermektedir. Bu tez çalışmasında, yanma verimliliği (η_C) (5.1) numaralı denklem ile ifade edildiği gibi; yanma odasına giren yakıt miktarı (m_{fi}) ile çıkan yakıt miktarı (m_{fo}) arasındaki farkın giren yakıt miktarına oranı ile bulunmaktadır.

$$\eta_Y = \eta_C = \frac{\dot{m}_{fi} - \dot{m}_{fo}}{\dot{m}_{fi}}.100 \tag{5.1}$$

Bu denklemden elde edilen yanma verimi, modern gaz türbinli motorlarda % 98 civarında değişmektedir. Yanma verim ifadesinde yer alan tükenmiş yakıt miktarları, kerozin ve metana göre değişiklikler göstermektedir. 10000 rpm motor devrinde ve H/Y=120 oranında eksenel mesafeye bağlı bu değişimler, şekil 5.8'de verilmektedir.



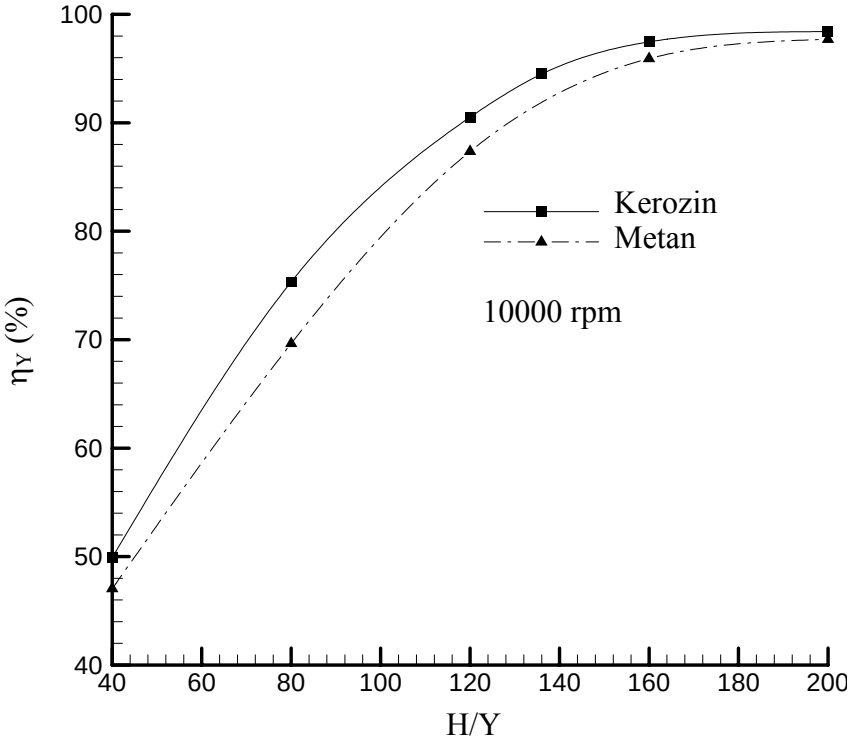
Şekil 5.8. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında eksenel mesafeye göre kerozin ve metan yakıtlarının kütle oranlarının değişimi.

Şekilde, eksenel mesafeye göre yakıtların kütle kesir değerleri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, başlangıç itibari ile kerozin yakıtı metana oranla daha hızlı bir şekilde tükenmektedir. Bunun sebebi olarak, ayni H/Y oranında kerozin yakıtının tepkimeye girdiği hava miktarı metanla tepkimeye giren hava miktarına göre fazladır. Daha sonra, seyreltme deliklerinden gelen ikincil havanın etkisi ile tükenen yakıt miktarlarını belirten çizgiler benzer bir eğim izlemekte ve yanma odasının sonunda bu çizgiler birbirlerine yakın değerlerde olmaktadır. Yanma odasına sonradan dâhil olan ikincil havanın bir kısmı yakıtlarla tepkimeye girerek, yanma verimini artırmaktadır.

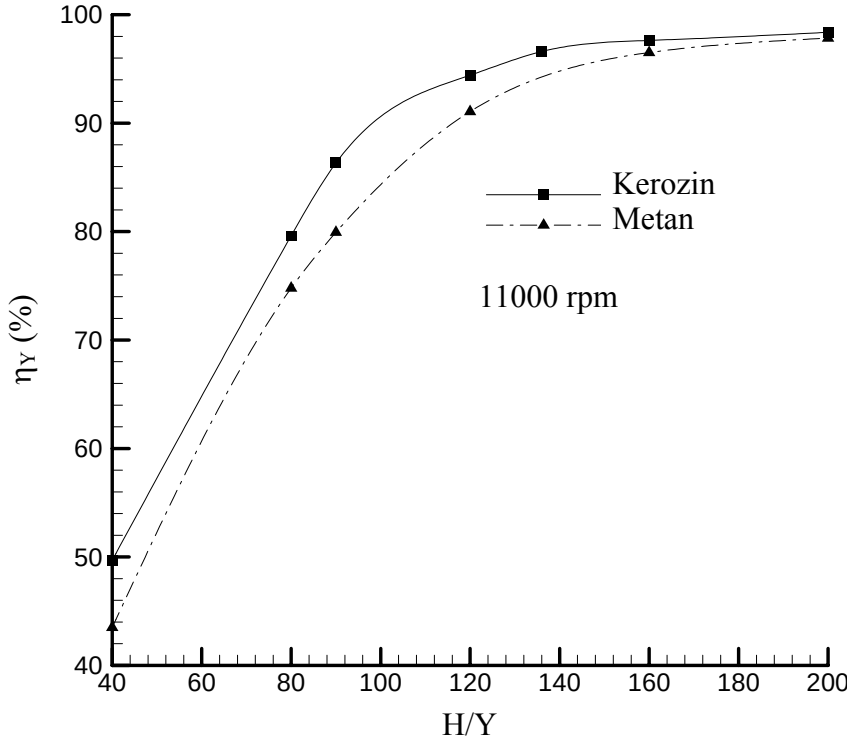
Yanma odasını bir bütün olarak düşünürsek, yanma odasının çıkışındaki yanma verimi önem kazanmaktadır. Yanma odası çıkışındaki yanma verim değerleri, hava yakıt oranına ($40 \leq H/Y \leq 200$) bağlı olarak, 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.9'da, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.10'da ve 12000 rpm (2980 kW güçte) motor devri için şekil 5.11'de gösterilmektedir.

Bu şekiller incelendiğinde, H/Y oranının artması ile bütün motor devirlerinde yanma verim değerleri her iki yakıt içinde % 40–50 değerinden başlayarak % 95-98'e kadar yükselmektedir. Bununla birlikte yanma verimi, H/Y oranının belirli bir değerine kadar ($120 \leq H/Y \leq 160$) hızla artmaktadır. Bu değerden sonra artış miktarı azalmakta ve maksimum değeri olan % 98'de sabitlendiği görülmektedir. Düşük H/Y oranlarında yanma reaksiyonu için gönderilen hava miktarının az olması yani karışımın zengin olmasından dolayı yanma verimi az olmaktadır. H/Y oranı arttıkça yakıta göre giren hava miktarı artmakta ve yanma verimi artmaktadır. Belirli bir H/Y oranından ($120 \leq H/Y \leq 160$) sonra yanma odasına gönderilen hava miktarı artmakta fakat yakıt miktarı sabit kaldığından yanma verimi maksimum değerde sabitlenmektedir.

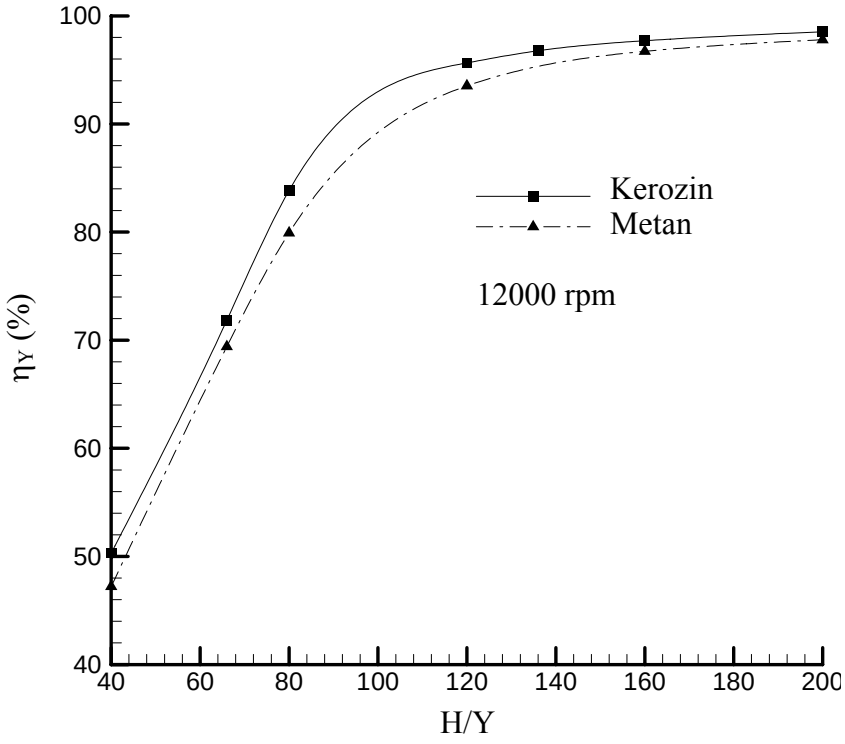
Sayısal metotla yanma modellemesi yapılan kerozin ve metan yanması için, yanma veriminde farklılıklar görülmektedir. Ayni H/Y oranında kerozin yanmasının verimi metan yanmasına göre fazla olduğu görülmektedir. Burada, kerozin yakıtı ile tepkimeye giren hava miktarı metanla tepkimeye giren hava miktarına göre fazladır. Bu farklılıklar düşük motor devirlerinde biraz daha belirgindir. Motor devri arttıkça yanma odasına giren havanın miktarı artmakta ve her iki yakıt için yanma verimi eğrileri birbirine yaklaşmaktadır. H/Y oranının ve devir sayısının artması yanma verim eğrileri arasındaki farkın kapanmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.9. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma verimleri.



Şekil 5.10. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma verimleri.



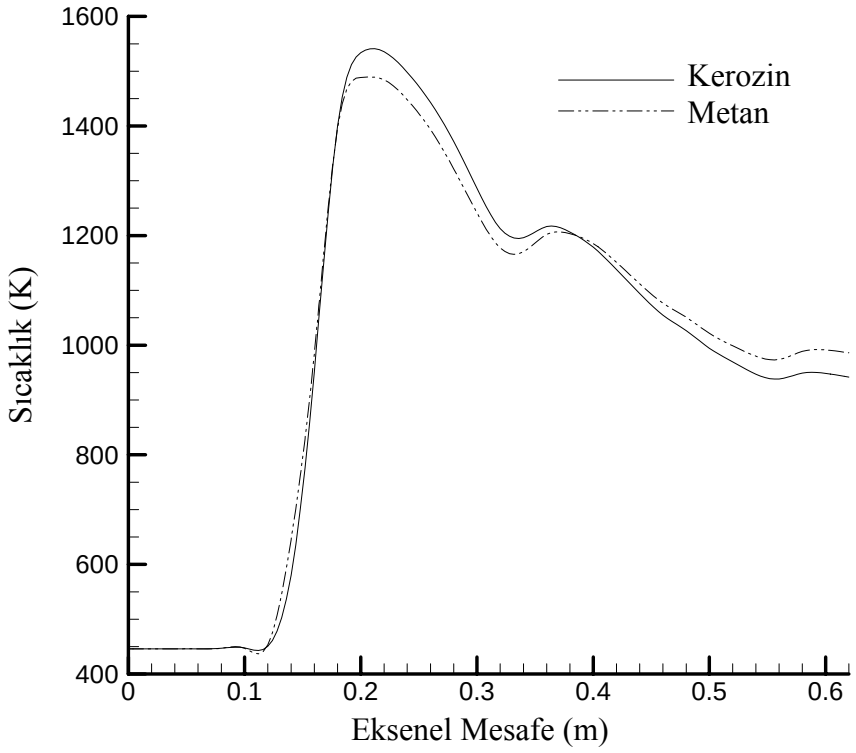
Şekil 5.11. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma verimleri.

Motor devrindeki artışın yani yanma odasına verilen güç değerlerindeki artışın, yanma verim değerleri üzerine fazla bir etki yapmadığı gözlenmektedir. Bununla birlikte, motor devrindeki artış ile yanma verim değerleri dönüm noktasına daha düşük H/Y oranlarında ulaştığı görülmektedir. Örneğin; 10000 rpm motor devrinde (1480 kW güçte) kerozinin hava ile kimyasal tepkimeye girmesi ile elde edilen yanma verim değeri, yaklaşık H/Y=160 oranında dönüm noktasına ulaşırken, 11000 rpm motor devrinde (2290 kW güçte) H/Y=140 oranında dönüm noktasına ulaştığı görülmektedir. 12000 rpm motor devrinde (2980 kW güçte) ise, H/Y=110 oranında dönüm noktasına ulaştığı görülmektedir. Bu değişim metan yakıtının hava ile tepkimesinde de görülmektedir.

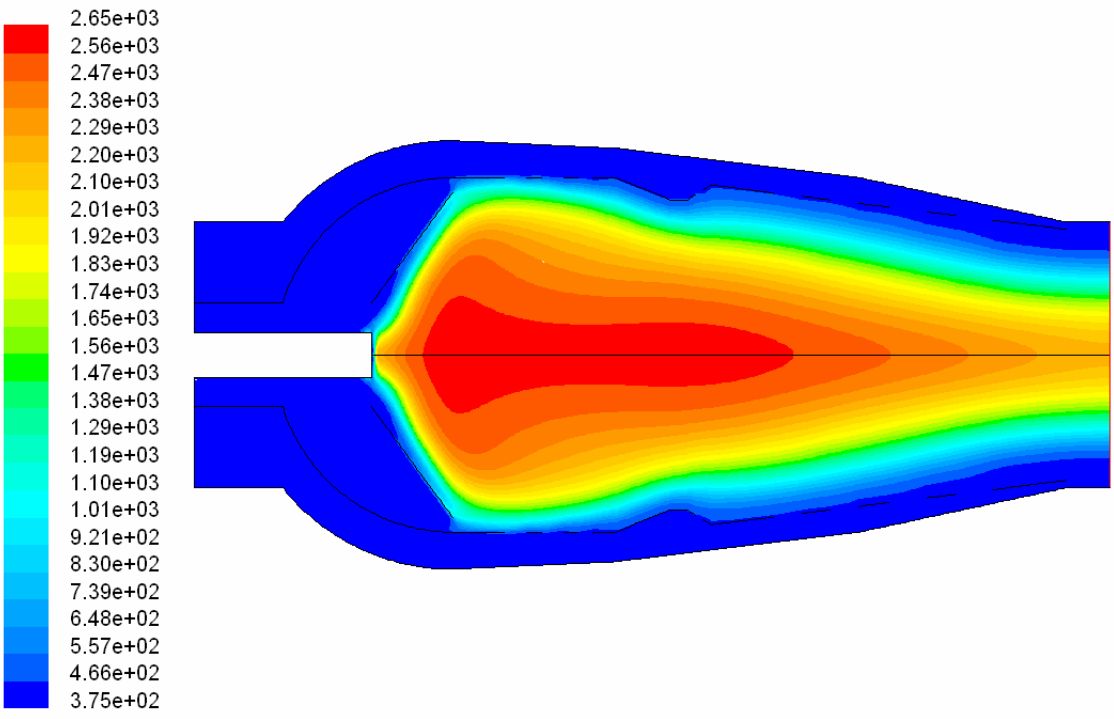
Burada, motor devri artarken yanma odasına giren yakıt ve hava miktarı artmaktadır fakat yanma odasına giren hava miktarındaki artış yakıta oranla daha fazladır. Bu nedenle yanma verim değerleri daha düşük H/Y oranlarında doyuma ulaşmaktadır. Buna bağlı olarak, şekillerde görüldüğü gibi motor devrinin artması ile yanma verim grafikleri üzerinde bulunan çizgilerin eğimi artış göstermektedir.

5.4. Yanma Odası Çıkış Sıcaklığı

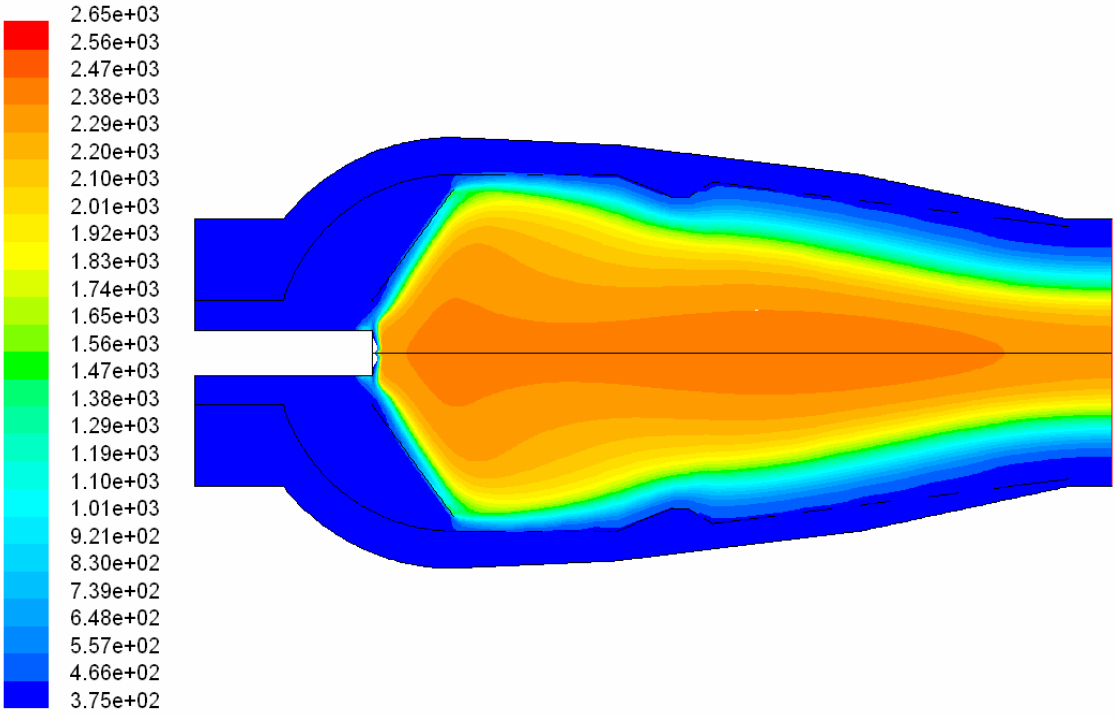
Yanma odası çıkış sıcaklık değerleri, maksimum itme kuvvetinin üretimi ve türbin kanatçıklarının zarar görmemesi için optimum seviyede tutulmalıdır. Düşük sıcaklık değerlerinde yeteri kadar itki kuvveti oluşturulamaz, yüksek sıcaklık değerlerinde ise, türbin kanatçıkları ve yanma odası duvarları zarar görecektir [18]. Öncelikle, yanma odası içerisinde gaz akış sıcaklığının arttırılması için enjektörden yakıt püskürtülmekte ve yakıt hava ile reaksiyona girmektedir. Şekil 5.12'de 10000 rpm motor devri (1480 kW güçte) ve H/Y=120 oranında eksenel mesafeye göre kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu yanma odasındaki gaz akışının ortalama sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. Bu şekilde görüldüğü üzere, yakıt püskürtüldükten sonra yanma reaksiyonu başlamakta ve gaz sıcaklığı hızla artmaktadır. Daha sonra yanma odasına giren ve ikincil hava sıcaklığı ideal seviyeye düşürmektedir. Burada, alev sıcaklığı ve verime bağlı olarak gaz sıcaklığı yakıt tipine göre farklı özellikler göstermektedir. Yanma odasında gaz akışının sıcaklığı 450 K'dan yaklaşık 1550 K'na yükselmekte daha sonra ideal seviyesi olan yaklaşık 850 K'na düşmektedir.



Şekil 5.12. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre yanma odası ortalama sıcaklık değişimleri.



Şekil 5.13. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası sıcaklık dağılımı.



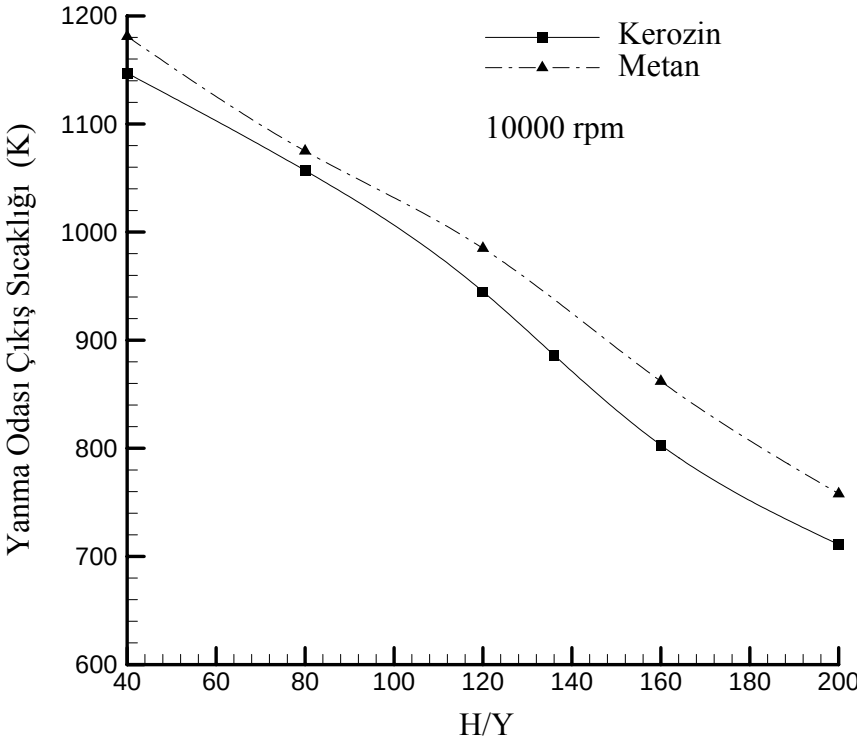
Şekil 5.14. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası sıcaklık dağılımı.

Şekil 5.13 ve şekil 5.14'de 10000 rpm motor devri (1480 kW) ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması sonucu yanma odası içerisindeki gaz akışının sıcaklık dağılımları gösterilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde, kerozin yanması sonucu alev çekirdek sıcaklığı metana göre yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, metan yanmasında havanın az yani verimin düşük olduğu ve metanın difüzyon hızının yüksek, yoğunluğunun düşük olmasından dolayı, alev yapısının uzadığı görülmektedir. Buna ilaveten, metan yakıtın ikincil havayı yanma tepkimesi için kullandığı görülmektedir. Ayrıca, ikincil havanın yanma odası duvarlarının zarar görmemesi için soğutma yaptığı ve sıcaklık dağılımlarını optimum seviyeye düşürdüğü görülmektedir.

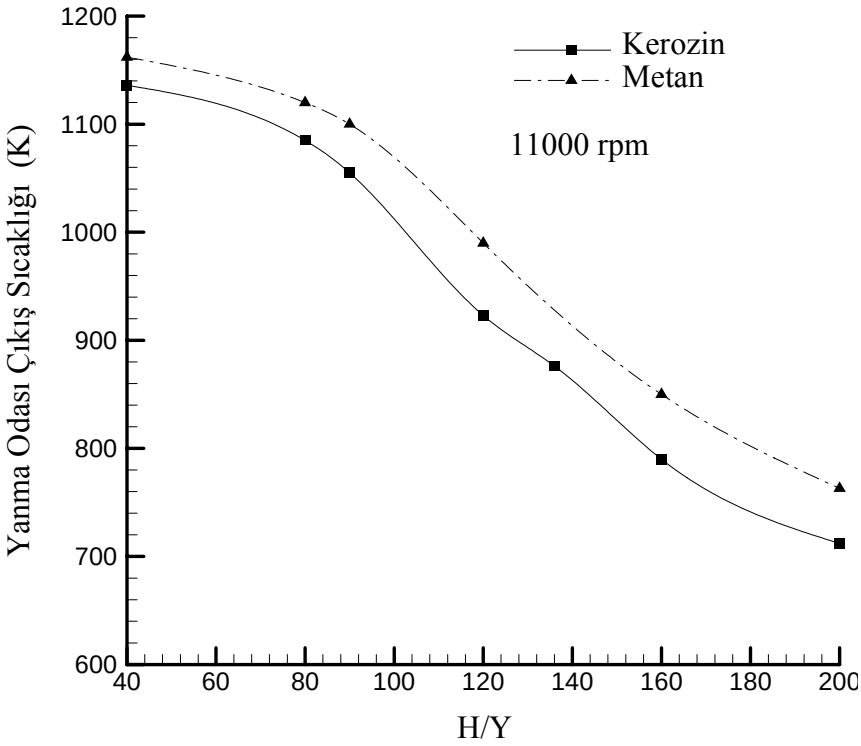
Yanma odası performans parametrelerinden birisi olan yanma odası çıkış sıcaklık değerleri yanma odasına giren hava miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yanma odası çıkışındaki gaz akışının sıcaklığı, hava yakıt oranına ($40 \leq H/Y \leq 200$) bağlı olarak, 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.15'de, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.16'da ve 12000 rpm (2980 kW) motor devri için şekil 5.17'de verilmektedir.

Şekiller incelendiğinde, ayni H/Y oranlarında kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu açığa çıkan sıcaklık değerleri birbirleri ile paralellik içerisinde olup metan yanmasında sıcaklık daha yüksektir. Örneğin, H/Y=120 oranında kerozin için çıkış sıcaklığı 10000 rpm'de 945 K iken, metan için 990 K olmaktadır. 11000 ve 12000 rpm'de ise kerozin için 925 K, 920 K metan için 990 K, 980 K olmaktadır. Ayni H/Y oranında, metanın hava ile tepkimesinde verim düşük olmasına rağmen, metan yakıtının alt ısıl değerinin kerozine göre yüksek olması çıkış sıcaklığın yüksek olmasını sağlamaktadır. Yüksek H/Y oranlarında, metan yanması sonucu elde edilen yanma odası çıkış sıcaklık değerleri, kerozin yanması sonucu elde edilen değerlere göre biraz daha fazladır. Bunun sebebi, H/Y arttıkça metan yanmasındaki veriminin artmasıdır.

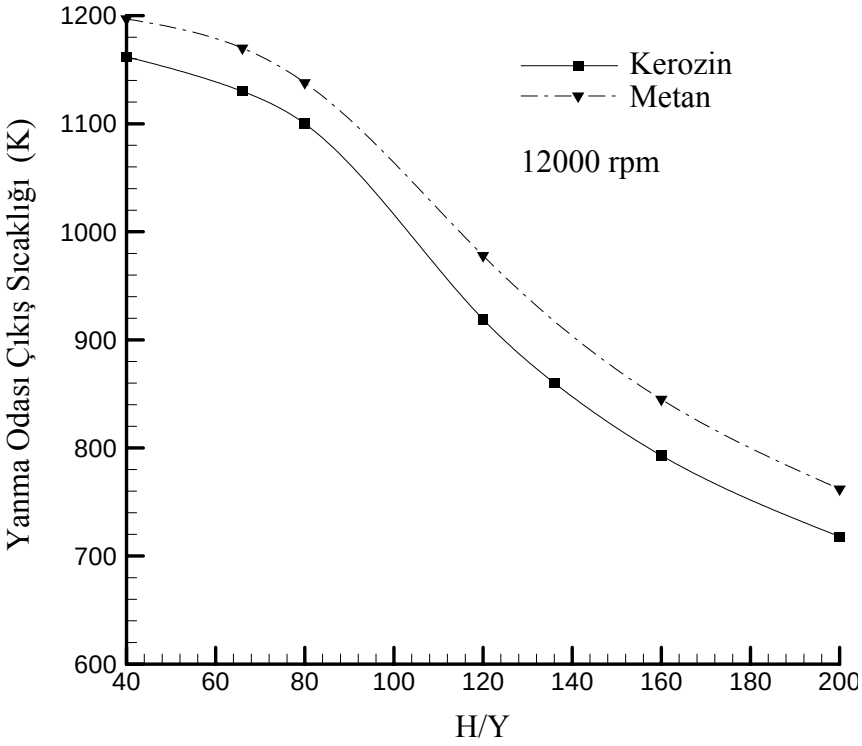
Şekil 5.15, şekil 5.16 ve şekil 5.17'de grafikler incelendiğinde, H/Y oranının artması ile yani yanma odasına giren yakıt miktarı sabit iken hava miktarının artması ile, yanma odası çıkış sıcaklık değerleri yaklaşık 1200 K'dan 750 K'na kadar düşmektedir. Bu düşüşteki en büyük sebep, yanma verimi dönüm noktası olan % 90'lara $120 \leq H/Y \leq 160$ oranlarında ulaşmasıdır. Bu H/Y oranlarından sonra giren hava miktarı artmakta fakat yakıt miktarı sabit kalmaktadır. Dolayısı ile seyreltme deliklerinden gelen ikincil hava gaz akışının ortalama sıcaklığını düşürmektedir.



Şekil 5.15. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkış sıcaklığı.



Şekil 5.16. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkış sıcaklığı.



Şekil 5.17. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkış sıcaklığı.

Ayrıca, motor devrinin artması ile alev hızındaki değişimlerden dolayı yanma odası çıkış sıcaklık değerleri arasında bir miktar farklılık olduğu gözlenmektedir. 10000 rpm motor devrinde düz bir eğriye benzeyen sıcaklık değerleri, 11000 ve 12000 rpm motor devirlerinde bir parabolü andırmaktadır. Motor devri arttıkça elde edilen değerler arasındaki uyum yani yanma stabilizesi azalmaktadır.

5.5. Yanma Odası Hız Değişimleri

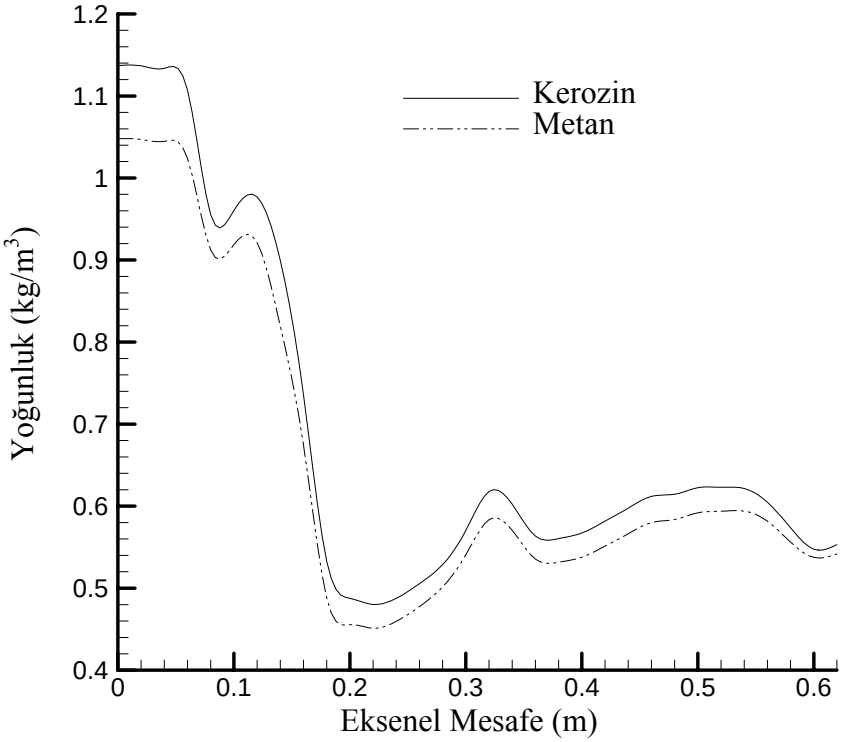
Türbin kanatçıklarında, yanma odasından çıkan gazların kinetik enerjisi hareket enerjisine dönüştürülmekte, egzoz kısmında ise gaz akışı ivmelendirilerek itme kuvvetinin oluşması sağlanmaktadır. Ayrıca, yanma odası girişindeki gaz akış hızı yanma stabilize sınırlarını belirlemektedir. Bundan dolayı, yanma odası giriş ve çıkışındaki hız değerleri çok önemlidir.

Yanma odasında, kimyasal tepkime sonucu sıcaklık artırılarak gaz akışının yoğunluğu azaltılmakta, yoğunluğun azalması ve kesitinin daralması ile akış hızı artmaktadır [17].

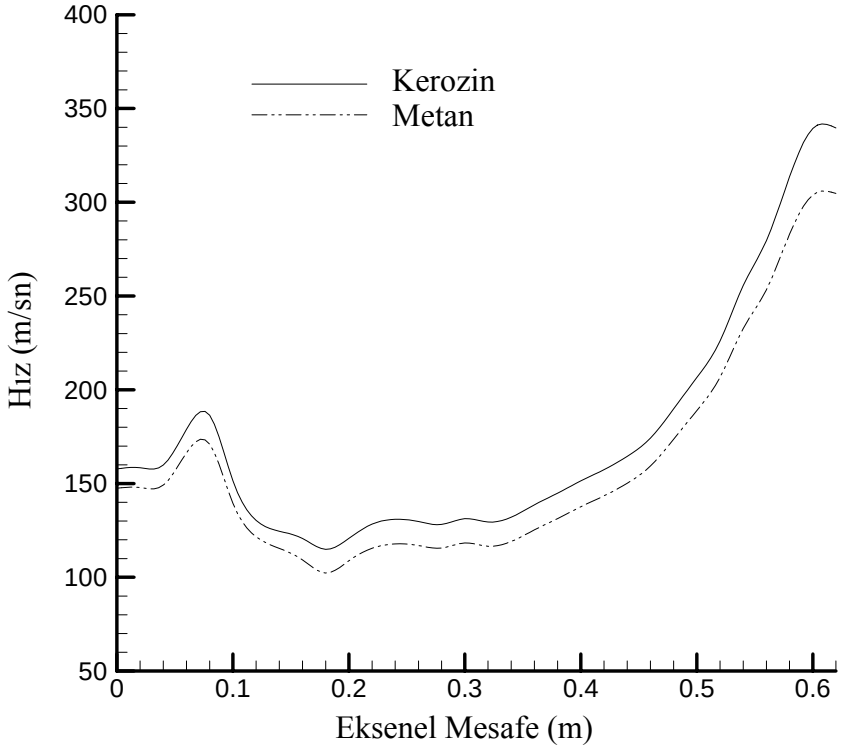
Şekil 5.18'de 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında eksenel mesafeye göre kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu gaz akışının ortalama yoğunluğu gösterilmektedir. Şekil 5.19'da ise, 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında eksenel mesafeye göre kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu gaz akışının ortalama hızı verilmektedir. Şekil 5.12'deki sıcaklık değişim grafiğinde görüldüğü gibi, sıcaklık artmaya başladığı noktadan itibaren gaz akışının yoğunluğunda eksenel mesafeye göre hızlı bir düşüş meydana gelmektedir. Fakat ikincil havanın etkisi ile sıcaklık değerindeki düşüş ve ikincil havanın yoğunluğundan dolayı ortalama gaz akışının yoğunluğu artmaktadır. Yanma odasının sonuna doğru ise sıcaklığın etkisiyle yoğunluk azalmakta ve giderek sabit kalmaktadır.

Şekil 5.19 incelendiğinde, giriş kısmında ikincil havanın dar bir kesitten geçmesi sonucu ortalama hız biraz artmaktadır. Daha sonra yanma işleminin tam olabilmesi için difüzör kısmında gaz akışının dinamik basıncı statik basınca dönüştürülmekte ve hız azaltılmaktadır. Bu arada, alandaki büyümeye rağmen yanma tepkimesinden dolayı açığa çıkan sıcaklık yoğunluğu azaltmakta ve hızdaki düşüşü sınırlamaktadır. Daha sonra, gaz akışı yanma odasında ilerlerken, ortalama sıcaklığın düşmesine rağmen alanındaki küçülmeden dolayı ortalama hız biraz artmaktadır. Yanma odasının sonuna doğru, sıcaklık düşmesi sabitlenirken, yanma odası alanındaki daralma devam etmektedir. Bundan dolayı, gaz akışının ortalama hızı artmaktadır. Sonuçta, kerozin ve metan yanması sonucu ortaya çıkan sıcaklık geometriden dolayı durma noktasına gelen gaz akışını ivmelendirmektedir. Ayrıca, şekil 5.18 ve şekil 5.19'da görüldüğü gibi, kerozin yanmasında kullanılan hava miktarı, metan yanmasına göre fazla olduğundan yoğunluk ve hız değerleri metan yanmasına göre yüksek çıkmaktadır.

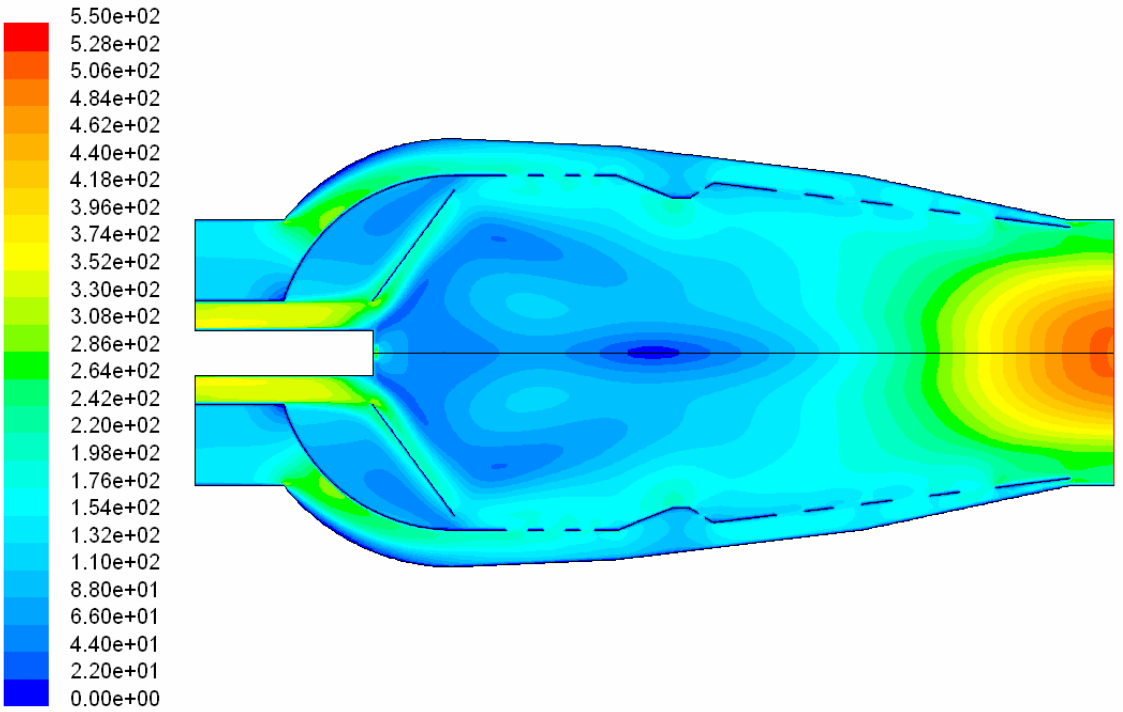
Şekil 5.20 ve şekil 5.21'de eksenel mesafeye göre kerozin ve metan yanması için yanma odası içerisindeki hız dağılımları verilmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi, ideal bir yanma için yanma odasının geometrik yapısından dolayı, yanmanın başladığı bölgede akış hızı minimum seviyeye düşürülmektedir. Daha önce söylendiği gibi, gaz akışının dinamik basıncı statik basınca çevrilmektedir. Yanma odasının çıkışına doğru ise, gerek sıcaklığın etkisi gerekse geometrik kesitin daralmasından dolayı gaz akış hızı artmaktadır. Şekillerden anlaşıldığı gibi, metan ve kerozin yakıtının yakılması sonucu oluşan sıcaklık yanma odası hız dağılımları üzerine ayni etkiyi yapmaktadır.



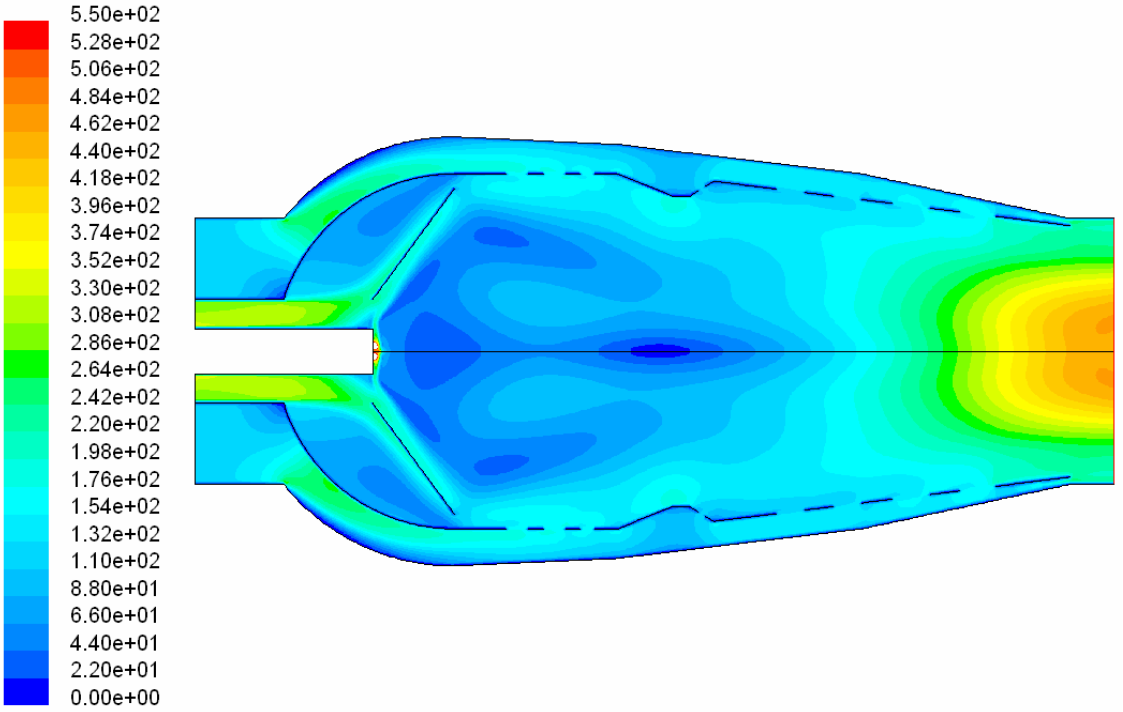
Şekil 5.18. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama yoğunluğu.



Şekil 5.19. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının ortalama hızı.



Şekil 5.20. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odasındaki hız dağılımı.

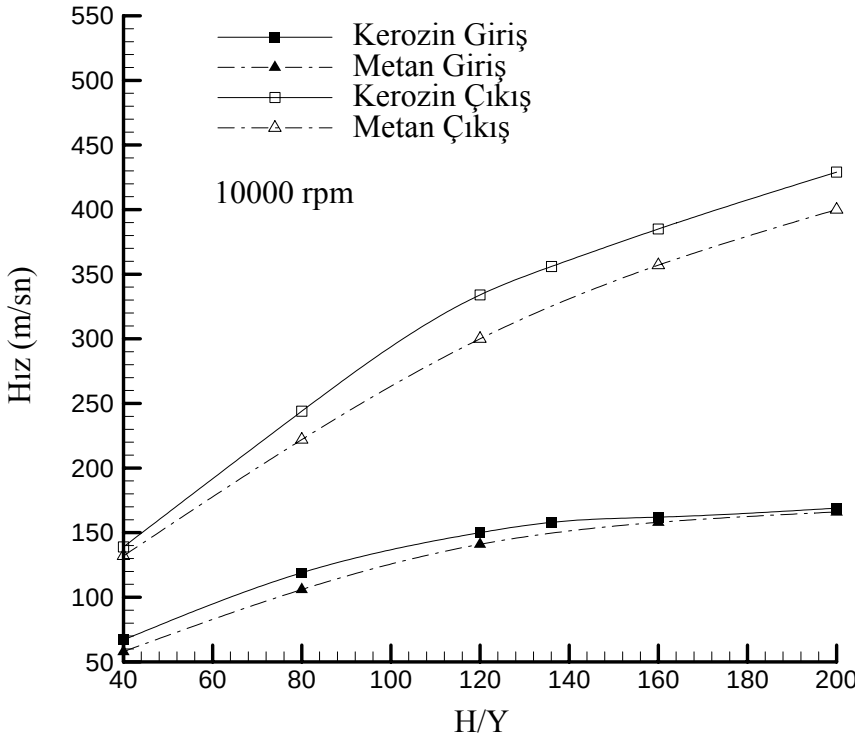


Şekil 5.21. 10000 rpm motor devri ve H/Y oranında metan yanması için yanma odasındaki hız dağılımı.

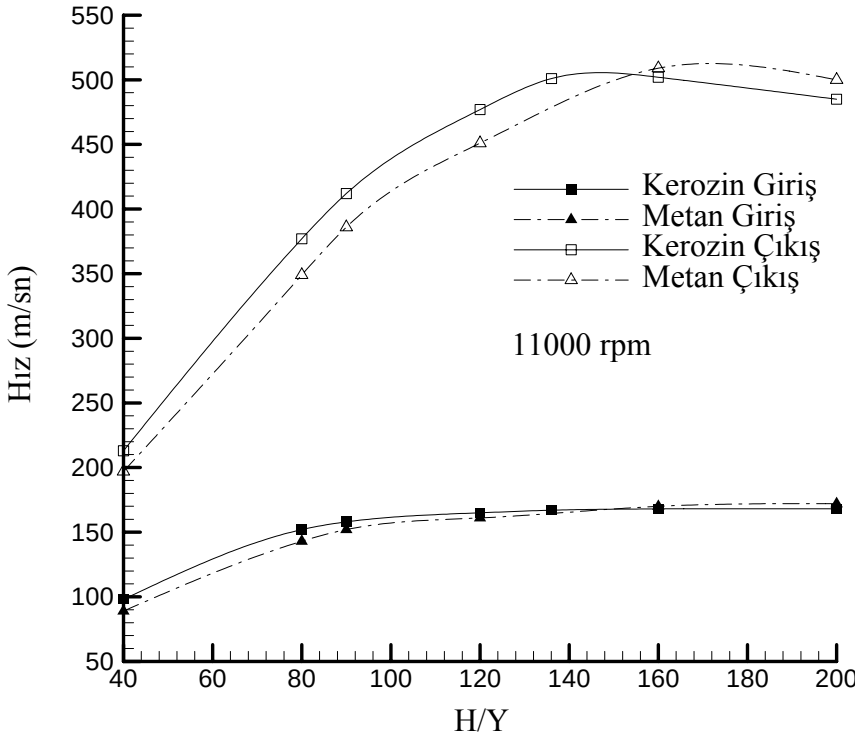
Yanma odasının giriş ve çıkışındaki gaz akış hız değerleri, hava yakıt oranına ($40 \leq H/Y \leq 200$) bağlı olarak, 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.22'de, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.23'de ve 12000 rpm (2980 kW) motor devri için şekil 5.24'de verilmektedir. Bu şekiller incelendiğinde, hava yakıt oranının artması ile yanma odası giriş ve çıkışındaki gaz akış hızının artmakta olduğu görülmektedir. Fakat bu giriş ve çıkış hızlarındaki artışta farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin, 10000 rpm motor devrinde H/Y oranının artması çıkış hızını artırırken, 11000 ve 12000 rpm motor devirlerinde önce çıkış hızı artmakta daha sonra bir miktar azalmaktadır. Buna ilaveten, düşük H/Y oranlarında giriş hız değerleri artarken, yüksek H/Y oranlarında giriş hızındaki artış durmakta ve girişteki akış hızı sabitlenmektedir. Bunun sebebi olarak yüksek türbülans ve geometriden kaynaklanan boğulma gösterilebilir. Ayrıca, belirli bir H/Y oranından sonra yanma veriminin maksimum noktaya ulaşması ile sıcaklığın hız üzerine olumlu etkisi ortadan kalkmaktadır.

Şekil 5.22, şekil 5.23 ve şekil 5.24 incelendiğinde, giriş ve çıkış hızlarını motor devri etkilemektedir. Örneğin, 10000 rpm devirde, yanma odası çıkış hızı sürekli artarken, 11000 rpm motor devrinde yaklaşık H/Y=160 oranında ve 12000 rpm motor devrinde yaklaşık H/Y=120 oranında azalmaya başlamaktadır. Burada, motor devrindeki artışa paralel olarak, yanma odasına giren hava miktarı artmaktadır. Bu ise, giriş ve çıkıştaki gaz akış hızının artmasına sebep olmaktadır. Fakat bütün motor devirlerinde H/Y oranı arttıkça giriş hızı sabitlenmekte, çıkış hızı önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 değerinde kerozin yakıldığında giriş ve çıkış hızları sırasıyla 150 ve 334 m/sn hesaplanırken, 11000 rpm motor devrinde giriş ile çıkış hızları 165 ve 477 olmaktadır. 12000 rpm motor devrinde ise, sırasıyla 165 ve 537 m/sn olarak hesaplanmıştır. Metan yakılması durumunda, ayni H/Y oranında giriş ve çıkış hızları 10000 rpm'de 141 ve 300 m/sn, 11000 rpm'de 160 ve 451 m/sn ve 12000 rpm'de ise, 162 ve 547 m/sn olmaktadır.

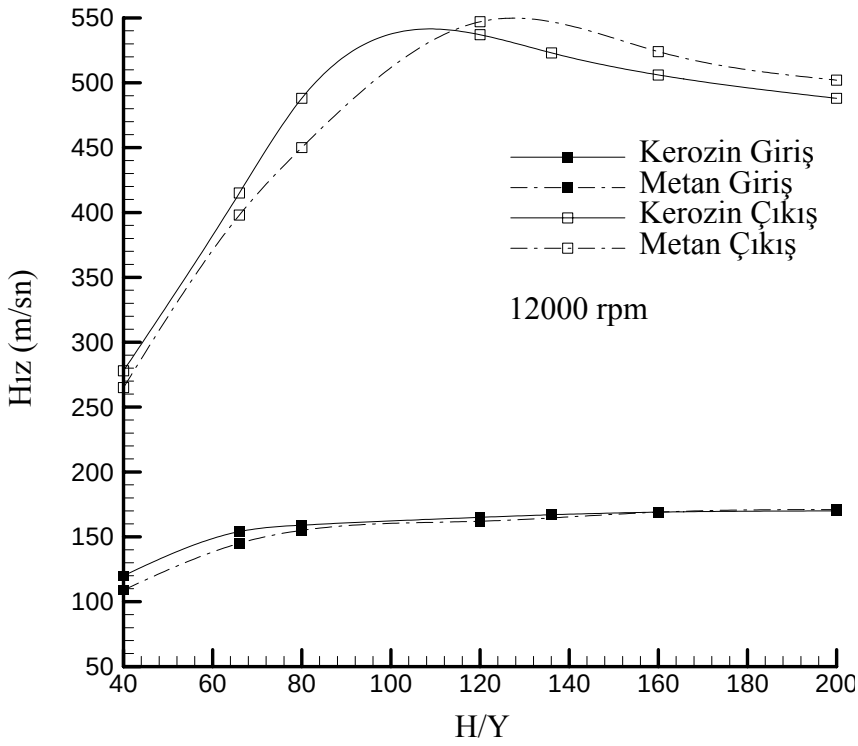
Metan ile kerozin yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu yanma odasındaki gaz akış hız değerlerinde farklılıklar görülmektedir. Burada, yanma için kullanılan hava miktarlarının farklı olması hız değerlerini etkilemektedir. Örneğin, 10000 rpm devirde ve H/Y=120 oranında, yanma odasına gönderilen havanın debisi kerozin yanması için 4.125 kg/sn iken, metan yanması için 3.554 kg/sn'dir. Bu şartlarda, kerozin yanmasında giriş ve çıkış hızları 150 ve 334 m/sn iken, metan yanması için 141 ve 300 m/sn'dir.



Şekil 5.22. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası giriş ve çıkış hızları.



Şekil 5.23. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası giriş ve çıkış hızları.

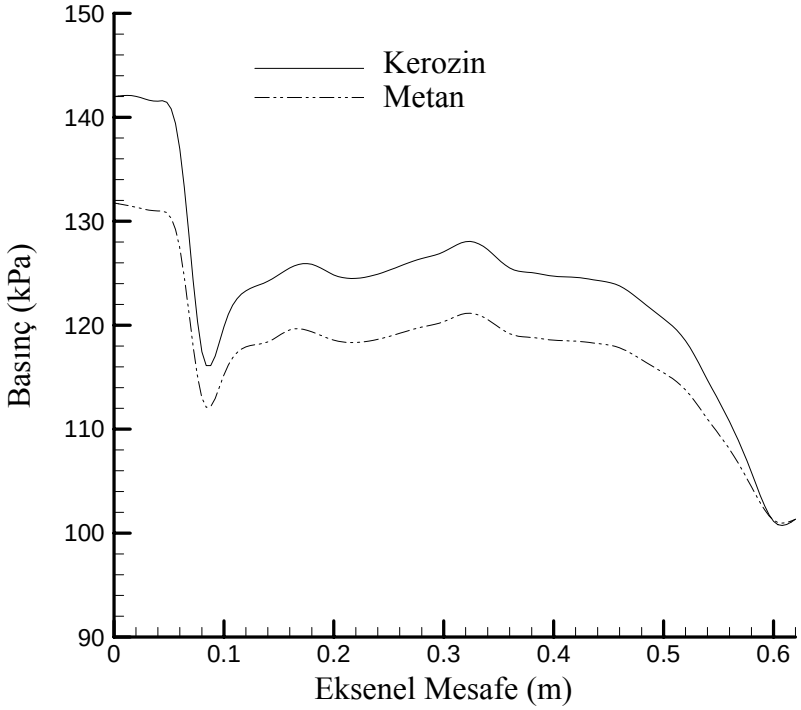


Şekil 5.24. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası giriş ve çıkış hızları.

5.6. Yanma Odası Basınç Kaybı

Yanma odası içerisinde basınç kaybının iki önemli sebebi vardır. Bunlardan birincisi; sürtünme ve türbülanstan kaynaklanan kayıplardır. Diğeri ise, sıcaklığın artması ile yoğunluktaki azalmadan meydana gelen kayıplardır [17]. Basınç kaybı, yanma odasının dizaynı için kullanılan bir parametredir. Gaz türbinli motorlarda basınç, türbin kanatçıklarında ve egzoz kısmında hıza çevrilmesinden dolayı, yanma odası içerisinde meydana gelen toplam basınç kaybının maksimum % 10 değerde olması istenir [16].

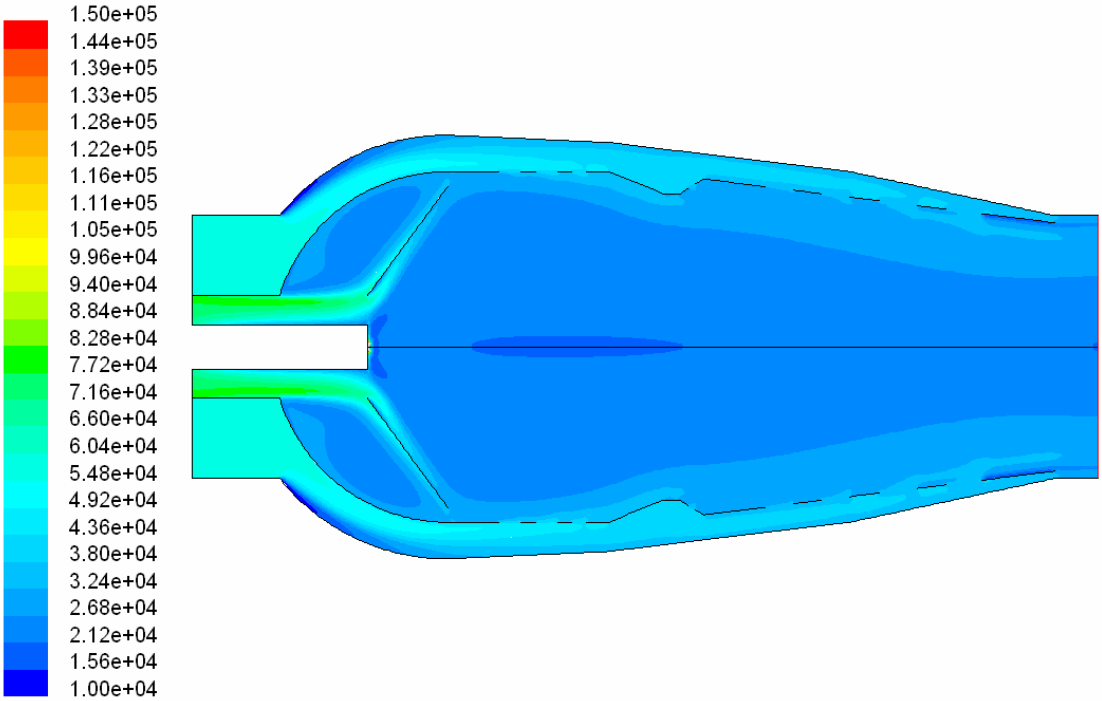
Şekil 5.25'de 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında eksenel mesafeye göre kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu gaz akışının ortalama basınç değerleri gösterilmektedir. Yanma odasının giriş kısmında, gaz akış hızın artması ve sürtünmeden dolayı ortalama gaz basıncı düşmektedir. Daha sonra, şekil 5.19'daki gaz akış hız grafiğinde görüldüğü gibi ortalama hız azalmakta ve ortalama gaz basıncı bir miktar artmaktadır. Yanma odasının sonunda ise, alan ile orantılı olarak ortalama gaz akış hızı atmakta dolayısı ile ortalama gaz basıncı azalmaktadır.



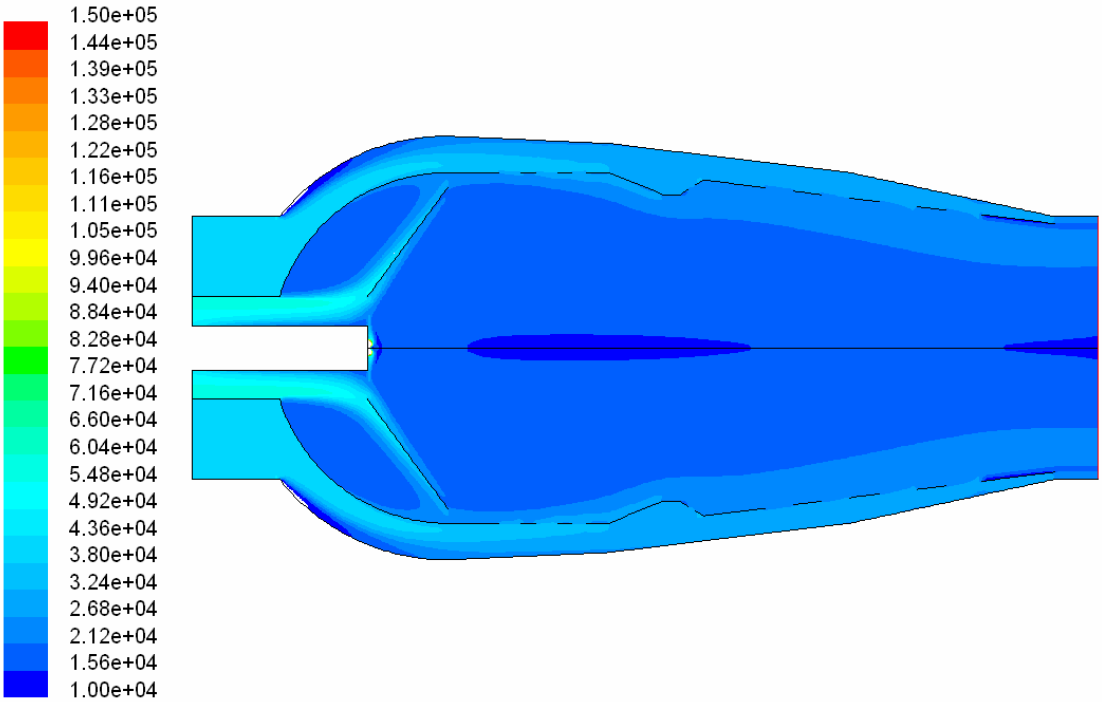
Şekil 5.25. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yanması için eksenel mesafeye göre gaz akışının basıncı.

Şekil 5.25'de görüldüğü gibi, yanma odasındaki basınç dağılımları kPa olarak ölçülmüştür. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimeye girmesi sonucu yanma odasındaki basınç değerleri yaklaşık 140 kPa'dan 100 kPa'a düştüğü görülmektedir. Kerozin yanmasında, kullanılan hava fazla olduğundan metan yanmasına göre basınç fazla olmaktadır.

Yapılan sayısal çalışmada elde edilen yanma odası basınç dağılımları kerozin yanması için şekil 5.26'da, metan yanması için şekil 5.27'de görülmektedir. Bu şekillerde, yanma odasının giriş kısmında yükselen basıncın, yanma odasının çıkışında düştüğü görülmektedir. Ayrıca, kerozin yanması ile meydana gelen basınç dağılımları, metan yanmasına göre yerel farklılıklar göstermektedir. Örneğin, kerozin yakıtının hava ile tepkimesinde alev merkezindeki basınç değerleri, metan yanmasına göre daha yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu farklılık, yanma odasına giren hava miktarının basıncından kaynaklanmaktadır. Ayrıca her iki yakıt için alev merkezlerinde basınç çok fazla düşmektedir. Basınç dağılımında kerozin ve metan yanması için yerel farklılıklar olduğu görülse de genel itibariyle, gaz akışları ayni basınç özellikleri göstermektedir.



Şekil 5.26. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası basınç dağılımı.



Şekil 5.27. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası basınç dağılımı.

Kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odasında meydana gelen basınç kayıp değerleri 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.28'de, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.29'da ve 12000 rpm (2980 kW güçte) motor devri için şekil 5.30'da yüzde olarak verilmektedir. Hesaplanan basınç kaybı yüzdesi (5.2) numaralı denklemde verildiği gibi ifade edilmektedir. Burada yanma odasına giren hava ve yakıtın toplam basıncından, çıkıştaki toplam basınç çıkarılmakta ve sonuç girişteki toplam basınca bölünüp basınç kaybı yüzdesi bulunmaktadır. Bu denklemde verilen *PLP* toplam basınç kaybının yüzdesini, P_{in} yanma odası girişindeki toplam basıncı, P_{out} yanma odası çıkışındaki toplam basıncı ifade etmektedir.

$$PLP = \frac{P_{in} - P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \tag{5.2}$$

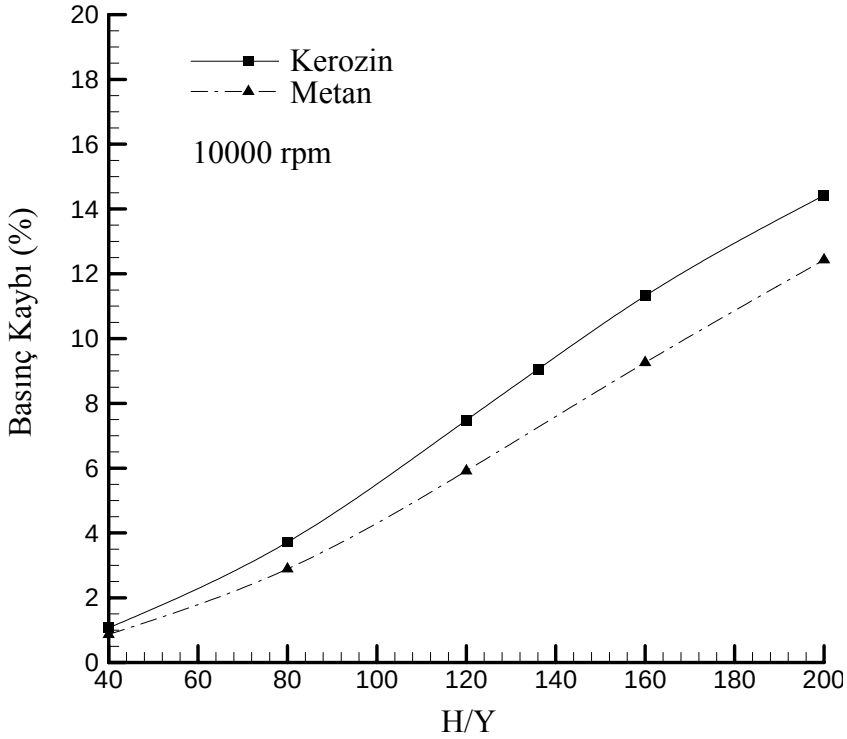
Daha önce belirtildiği gibi, H/Y oranının artması ile yanma odasına giren hava miktarı artmaktadır. Şekil 5.28, şekil 5.29 ve şekil 5.30 incelendiğinde, H/Y oranının artması ile yanma odası girişindeki hava hızı artmakta ve hızdaki artış, basınç kayıplarını artırmaktadır. Bunun yanında motor devrindeki artış ile de yanma odasına giren hava miktarı artırılmakta dolayısı ile yanma odası basınç kayıpları artmaktadır. H/Y=40 oranında her iki yakıt için meydana gelen basınç kayıp değerleri, 10000 rpm motor devrinde yaklaşık % 1.0 olurken, 11000 rpm motor devrinde kerozin ve metan için sırasıyla % 2.0 ve 1.6 olmaktadır. 12000 rpm motor devrinde ise sırası ile % 4.3 ve 2.9 olmaktadır. H/Y=200 oranında ise, 10000, 11000 ve 12000 rpm motor devirlerinde meydana gelen basınç kayıp değerleri sırası ile % 14.4; 12.4, 15.8; 14.4 ve 19.1; 17.5 olmaktadır. Ayrıca, literatürde belirtilen % 10 maksimum toplam basınç kaybı değerine, 10000 rpm motor devrinde (1480 kW) yüksek H/Y oranlarında (145, 170) ulaşırken, 11000 rpm motor devrinde daha küçük değerlerde (110, 130) ulaşılmaktadır. 12000 rpm motor devrinde ise daha küçük H/Y oranlarında (75, 100) ulaştığı görülmektedir.

H/Y oranının artması basınç kaybını artırdığından yanma odasından yüksek performans sağlayabilmek için yanma verimi % 98'e ulaştığı andaki H/Y oranı korunmalı ve yanma odasına daha fazla hava gönderilmemelidir. Eğer yanma odasına daha fazla hava

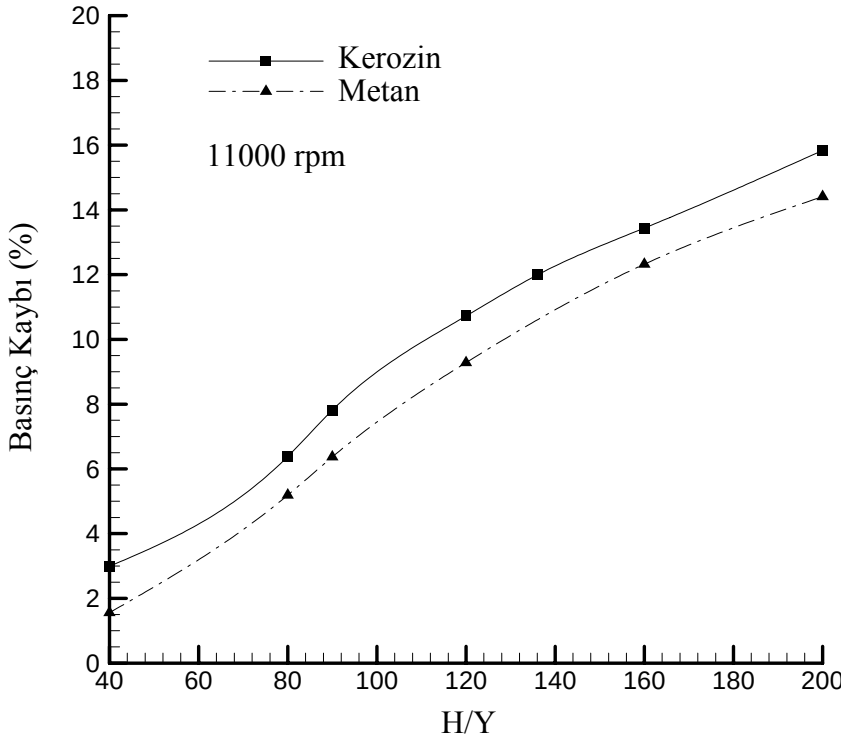
gönderilirse, yanma odası çıkış hız değerleri artarken, hem ortalama gaz akış sıcaklığı düşmekte hem de yanma odası basınç kayıpları artmaktadır.

Ayrıca, motor devrinin artması ile şekil 5.28'de verilen eğri, şekil 5.29 ve şekil 5.30'da görüldüğü gibi ters parabol halini almaktadır. Yani, yanma odasına verilen güç artırılırken, yanma odasına giren hava miktarı artırılmaktadır. Bu hava miktarındaki artış, şekil 5.7'de verilen yanma odasının alanındaki küçülmeden kaynaklanan türbülanstan dolayı, gaz akış hızının artışını sınırlamaktadır. Hız artışı azaldığından dolayı basınç kaybındaki artışın yavaşladığı ve giderek basınç kaybının sabitlendiği görülmektedir. Buradan yanma odası içerisinde meydana gelen olaylar sonunda hız artışının ve yanma odasında meydana gelen türbülansın basıncı düşürerek kayıplara neden olduğu sonucu çıkarılabilir.

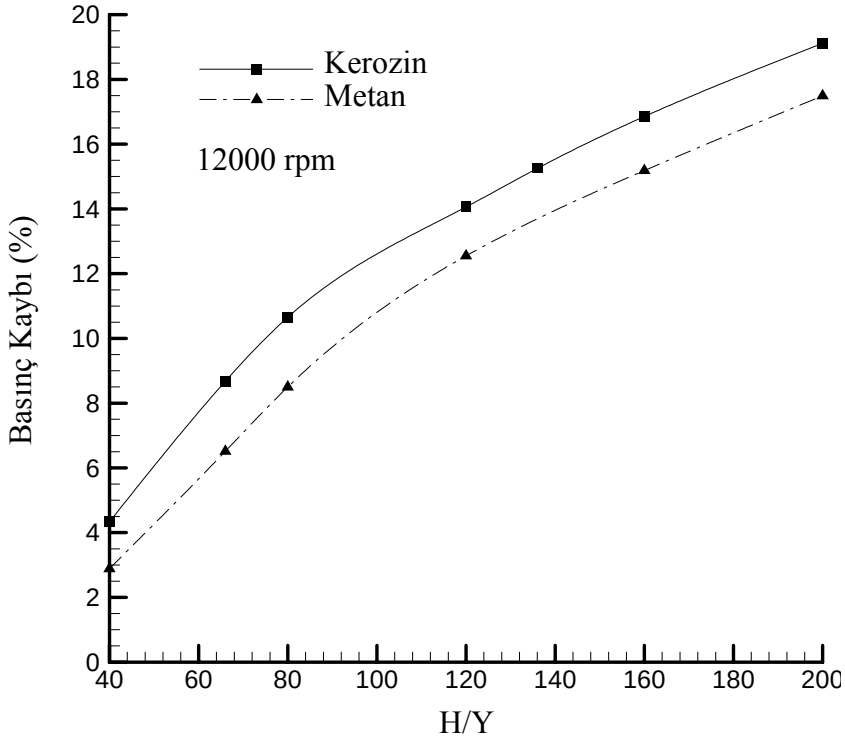
Kerozin yanmasında ayni H/Y oranı için, kullanılan hava miktarı fazla olduğundan metan yanmasına göre basınç kayıpları daha büyük olmaktadır. 10000 rpm motor devrinde H/Y oranı arttıkça aradaki fark açılırken, 11000 ve 12000 rpm motor devirlerinde basınç kayıp eğrileri arasındaki fark sabit kalmaktadır.



Şekil 5.28. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) yanma odası basınç kaybı yüzdeleri.



Şekil 5.29. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası basınç kaybı yüzdeleri.



Şekil 5.30. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası basınç kaybı yüzdeleri.

5.7. Özgül Yakıt Tüketimi

Uçak imalatçılarının ve kullanıcılarının motor seçimlerinde dikkat ettikleri en önemli parametrelerden biridir. Özgül yakıt tüketiminin az olması istenir. Özgül yakıt tüketimi uçaklarda kullanılan pistonlu motorlarda en az turbojet motorlarda en fazladır. Diğer gaz türbinli motorlarda (turboshaft, turboprop ve torbofan) ise, turbojet motora oranla daha azdır. Gaz türbinli bir motorda özgül yakıt tüketiminin fazla olmasından dolayı ekonomik değeri daha az olan kerozin (Jet A1) yakıtı tercih edilmektedir.

Özgül yakıt tüketimi, özgül güç/kuvvet değerlerine karşı birim zamanda kütlesel olarak tüketilen yakıt miktarını ifade etmektedir. Motordan elde edilen güç, kuvvet veya torka göre özgül yakıt tüketiminin birimi değişmektedir. Bu tez çalışmasında termal güç değerlerine göre analiz yapıldığından birim olarak kg/kWh veya g/kWh kullanılmıştır. Yanma odalarında hava ile kimyasal tepkimeye giren yakıtların birbirleri ile karşılaştırılmasında kullanılan özgül yakıt tüketimi (5.3) numaralı denklemde verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$sfc = \frac{3600.f}{W_{net}} \tag{5.3}$$

Bu denklemde verilen *sfc* özgül yakıt tüketimini, *f* gerçek yakıt hava oranını, *Wnet* ise; özgül gücü ifade etmektedir. gerçek yakıt hava oranı (5.4) numaralı denklemde, özgül güç ise (5.5) numaralı denklemde verilmektedir.

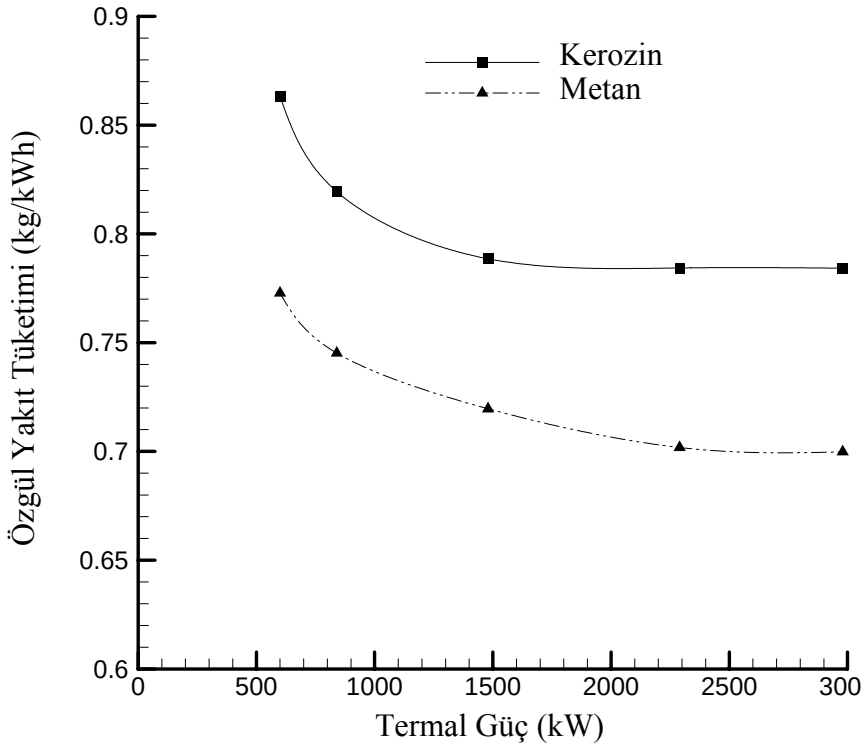
$$f = \frac{f'}{\eta_C} \tag{5.4}$$

ve

$$W_{net} = \frac{W_T}{M_h} \tag{5.5}$$

(5.4) ve (5.5) numaralı denklemde yer alan f' teorik yakıt hava oranını, η_C yanma verimini, W_T termal gücü, M_h yanma odasına giren toplam hava debisini ifade etmektedir [18]. Yukarıda verilen denklemler kullanılarak H/Y=120 oranında ve değişik termal güçlerde hesaplanan kerozin ve metan yakıtlarının toplam özgül tüketimi şekil 5.31'de verilmektedir.

Şekil 5.31'de Rolls-Royce Nene turbojet motorunun bütün yanma odalarına ait özgül yakıt tüketimi verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, bu sayısal çalışmada analizi yapılan metan yakıtının ayni termal güçteki özgül yakıt tüketimi kerozin yakıtına göre oldukça düşüktür. Örneğin, 600 kW termal güçte kerozin yakıtının özgül tüketimi 0.863 kg/kWh iken, metan yakıtının özgül tüketimi 0.773 kg/kWh'dir. Ayni şekilde 1480 kW termal güçte kerozin yakıtının özgül tüketimi 0.789 kg/kWh iken, metan yakıtının özgül tüketimi 0.72 kg/kWh'dir. 2980 kW termal güçte ise, kerozin yakıtının özgül tüketimi 0.784 kg/kWh iken metan yakıtının özgül tüketimi 0.669 kg/kWh'dir. Özgül yakıt tüketimi dikkate alındığında metan yakıtının kerozin yakıtına göre avantajlı olduğu görülmektedir.



Şekil 5.31. Farklı termal güçlerde ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yakıtlarının toplam özgül tüketimi.

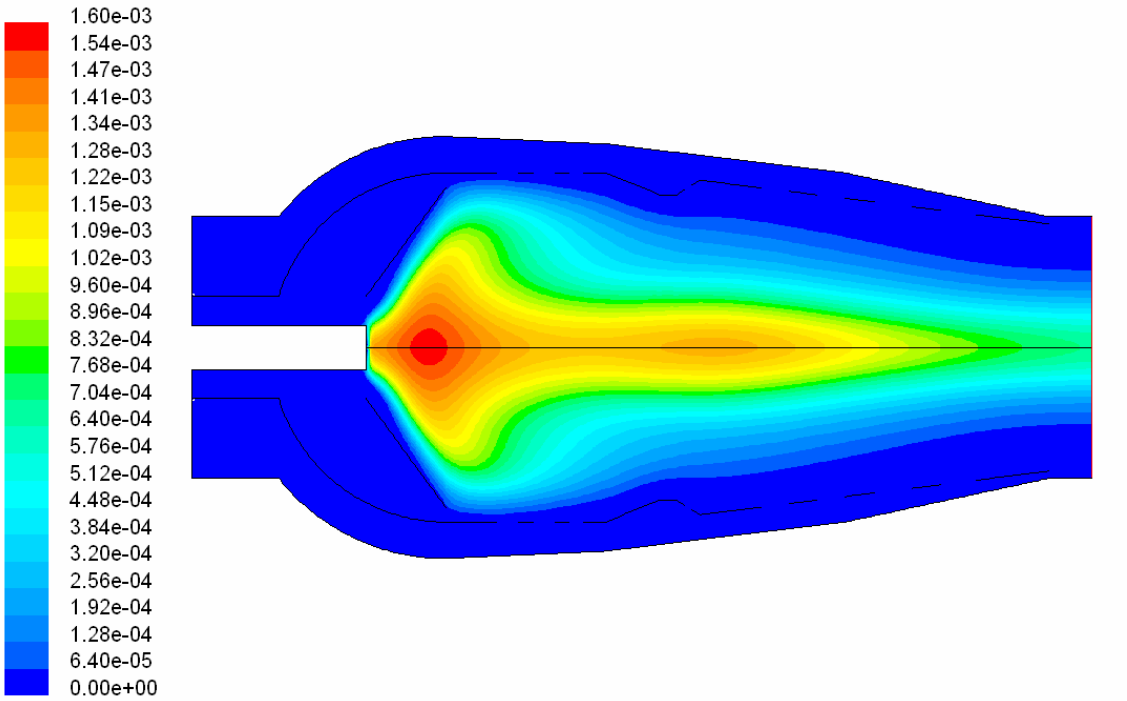
5.8. Emisyon Değerleri

Yanma odası çıkışındaki emisyon değerleri yanma verimi, sıcaklık dağılımı ve kullanılan yakıt tipi ile doğrudan ilgilidir. Yanma veriminin yüksek olması yanmamış hidrokarbon miktarını düşürürken, uygun sıcaklık dağılımı azot oksit miktarını azaltmaktadır. Kullanılan yakıtın kimyasal yapısı karbon dioksit, azot oksit ve yanmamış hidrokarbon miktarını etkilemektedir. Şekil 5.32 ve şekil 5.33'de, 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu meydana gelen yanma odası içerisindeki NO dağılımları verilmektedir.

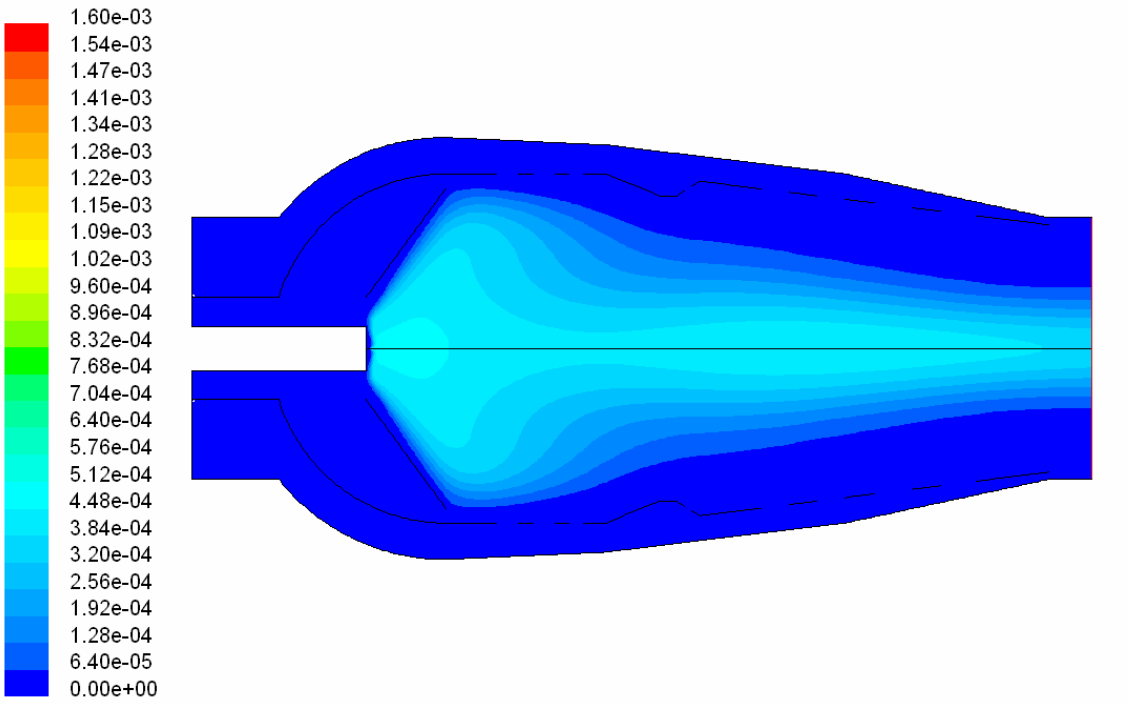
Ayrıca, kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) yanma odası çıkışında ölçülen NO değerleri, 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.34'de, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.35'de ve 12000 rpm (2980 kW) motor devri için şekil 5.36'da ppm olarak verilmektedir. NO_x'ların oluşmasının en önemli sebebi olan yüksek sıcaklık değerleri ise, 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.37'de, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.38'de ve 12000 rpm (2980 kW güçte) motor devri için şekil 5.39'da K (Kelvin) olarak verilmektedir.

Şekil 5.32 ve şekil 5.33'de verilen eksenel mesafeye göre yanma odası içerisindeki NO dağılımına bakıldığı zaman, kerozin yakıtına göre metan yakıtının daha avantajlı olduğu görülmektedir. Bu iki şekilde, kerozin yakıtının hava ile tepkimesi sonucu metan yanmasına göre daha fazla NO konsantrasyonunu olduğu izlenebilir. Bununla birlikte, şekil 5.32 ve şekil 5.33 incelendiğinde, NO moleküllerinin alev merkezinde yoğunlaştığı ve bu yoğunlaşmanın şekil 5.13 ve şekil 5.14'de görülebileceği gibi, alev merkezindeki yüksek sıcaklıklardan kaynaklanmaktadır.

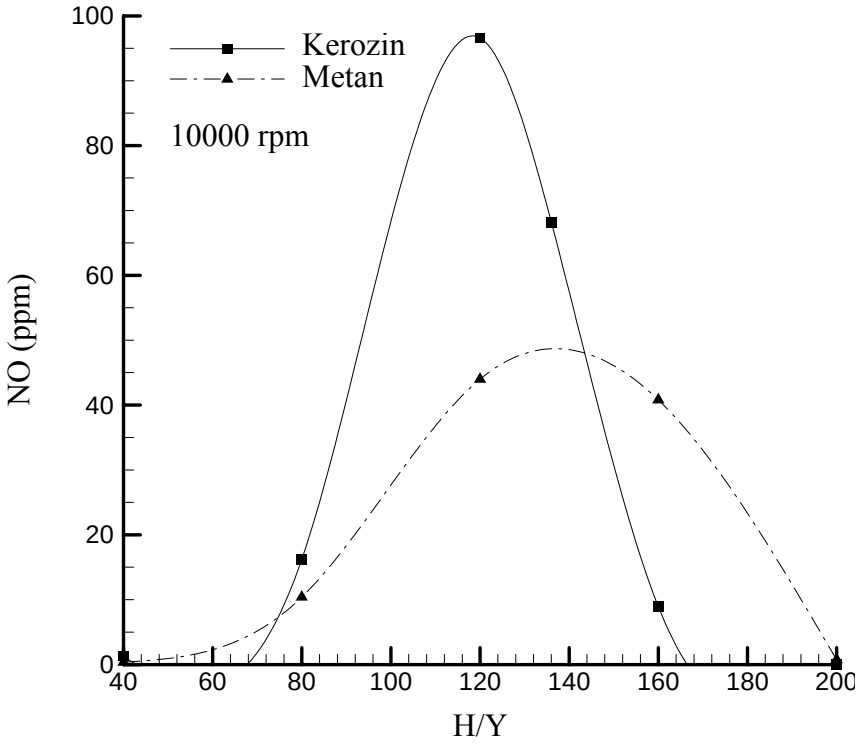
Şekil 5.35, şekil 5.36 ve şekil 5.37 incelendiğinde, metan yakıtının hava ile tepkimesi sonucu oluşan NO değerleri kerozin yanmasına oranla düşük olduğu daha açık görülmektedir. Bu farklılık NO değerlerinin maksimum olduğu noktalarda, 10000 rpm motor devri için 44 ppm, 11000 rpm motor devri için 49 ppm ve 12000 rpm motor devri için 47 ppm olmaktadır. Bu rakamlar ve şekiller yorumlandığında metan yakıtının hava ile tepkimesi sonucu oluşan NO değerleri kerozin yanmasına oranla % 50 daha düşük olduğu kabul edilebilir.



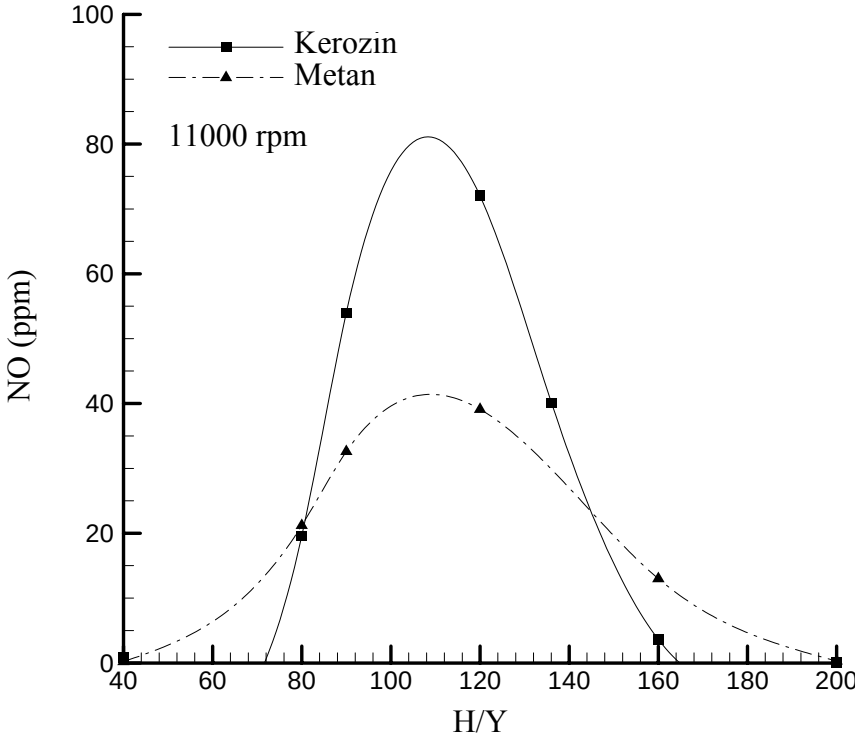
Şekil 5.32. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası içerisindeki NO dağılımları.



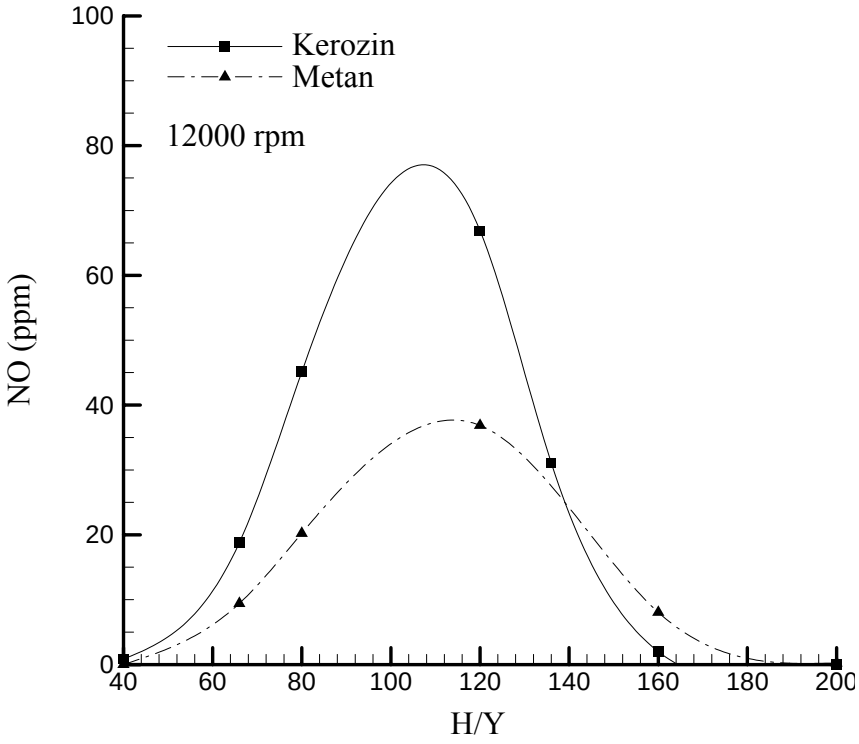
Şekil 5.33. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası içerisindeki NO dağılımları.



Şekil 5.34. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki NO miktarları.



Şekil 5.35. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki NO miktarları.



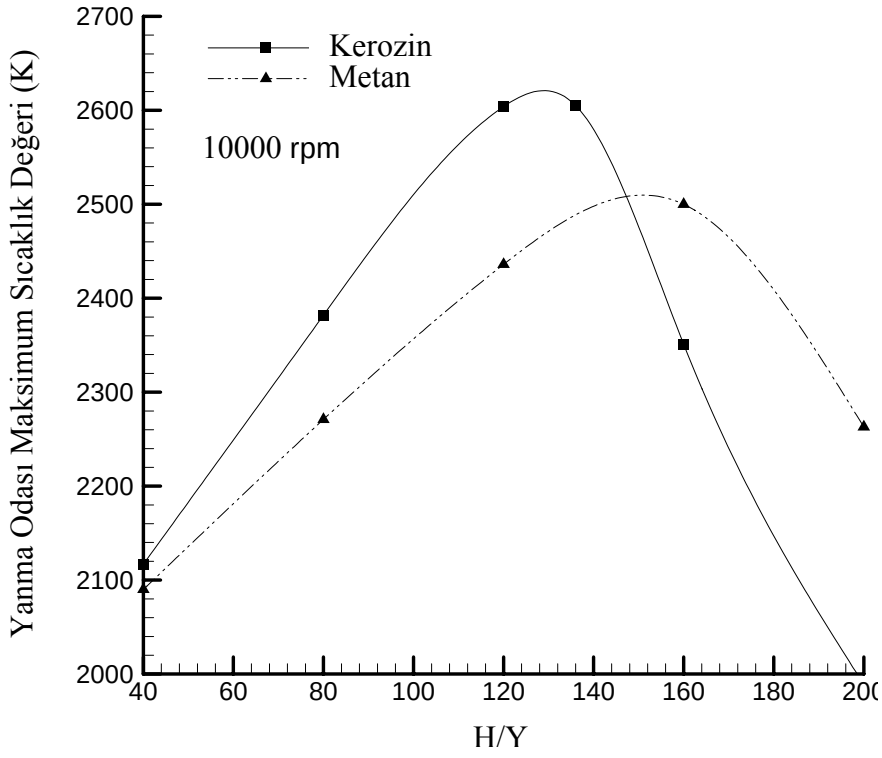
Şekil 5.36. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki NO miktarları.

Şekil 5.34, şekil 5.35 ve şekil 5.36 incelendiğinde, her iki yakıt için 10000 rpm motor devrinde oluşan NO miktarı, 11000 rpm ve 12000 rpm motor devirlerinde oluşan NO miktarına oranla daha yüksektir. Sayısal çalışmada tespit edilen maksimum NO değerleri, 10000 rpm motor devri için kerozinde 98 ppm, metanda 54 ppm'dir. 11000 rpm motor devri için kerozinde 91 ppm, metanda 42 ppm'dir. 12000 rpm motor devri için ise, kerozinde 86 ppm, metanda 39 ppm'dir. Rakamlardan anlaşılacağı üzere, motor devri arttıkça NO değerleri azalmaktadır. Yüksek motor devirlerinde NO değerlerinin düşük çıkmasının sebebi ise, tablo 5.1'de verilen rakamlardan anlaşılacağı üzere, yüksek devirlerde yanma odasına giren hava miktarı gerekenden fazla olmaktadır. Soğuk hava ise, ortam sıcaklığını ve NO oluşumunu düşürmektedir.

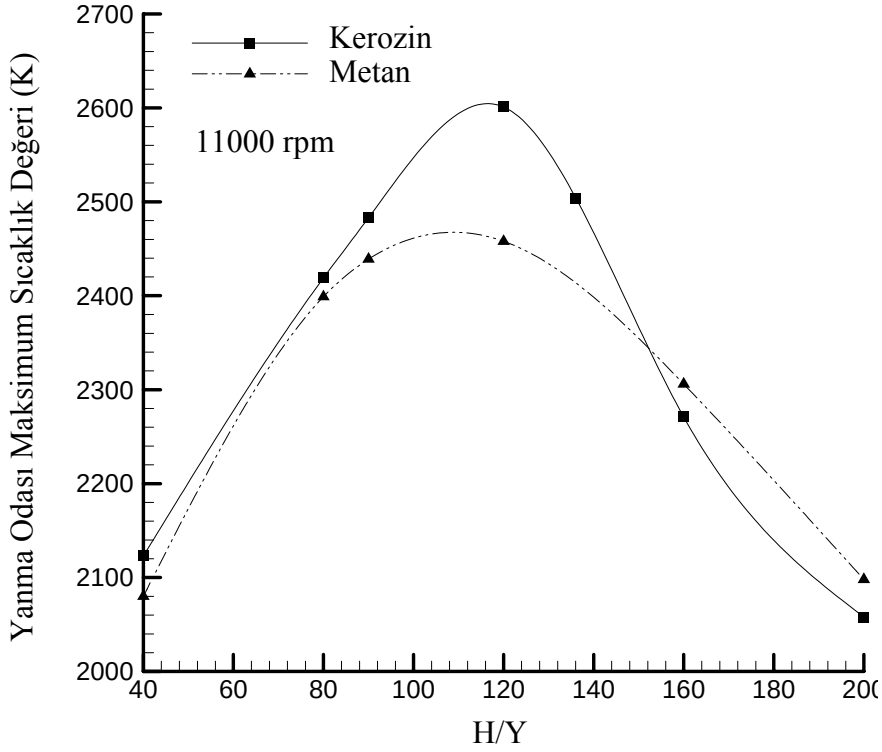
Ayrıca, NO değerlerinin maksimuma ulaştığı noktalar, motor devrinin artması ile geriye doğru kaymaktadır. Yani, motor devri arttıkça, daha düşük H/Y oranlarında maksimum noktaya ulaşmaktadır. Bu H/Y oranları, kerozin yanması sonucu 10000 rpm motor devri için 120 ve metan yanması için 140'dır. 11000 rpm'de kerozin için 110 ve metan için 115'dir. 12000 rpm'de ise, kerozin için 105 iken, metan için 110 olmaktadır.

Yanma odasında NO_x oluşumunun nedeni olan yüksek sıcaklık değerlerinin verildiği Şekil 5.37, şekil 5.38 ve şekil 5.39 incelendiğinde, NO grafikleri ile ayni özellikler gösterdiği görülmektedir. Kerozin yakıtının hava ile tepkimesinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri 10000, 11000 ve 12000 rpm motor devirleri için sırası ile 2605; 2601 ve 2591 K olmaktadır. Metan yakıtının hava ile tepkimesinden elde edilen maksimum sıcaklık değerleri ise; 10000, 11000 ve 12000 rpm motor devirleri için sırası ile 2500; 2492 ve 2478 K olmaktadır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, metan yakıtının yanma odasında kullanımı, kerozin yakıtına göre avantajlı olduğu söylenebilir.

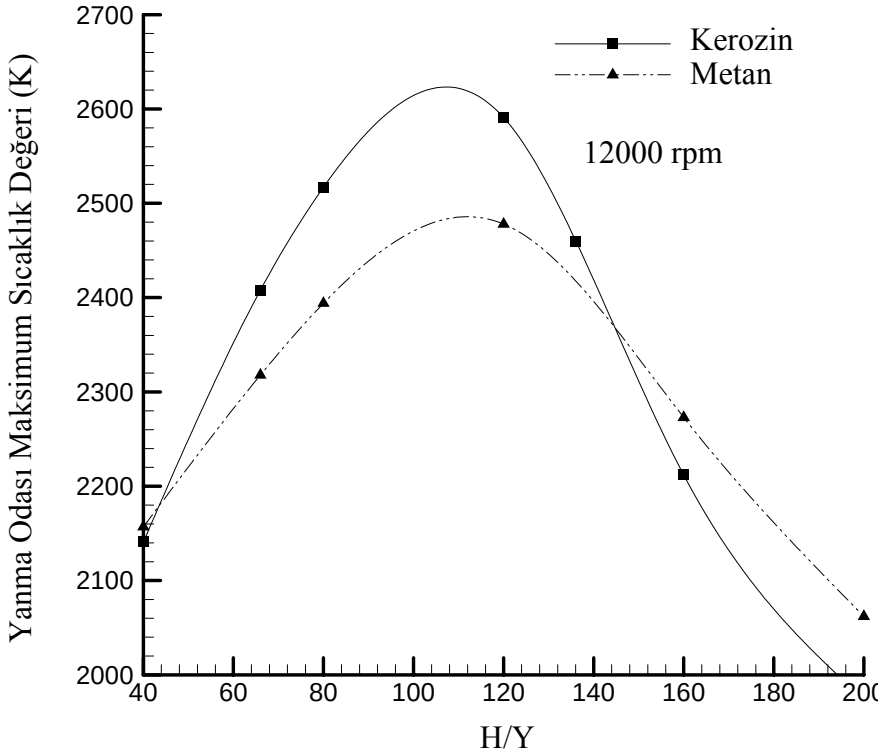
Buna ilaveten, şekil 5.37, şekil 5.38 ve şekil 5.39 incelendiğinde, NO grafiklerine paralel olarak, motor devir sayısı arttıkça sıcaklık değerleri maksimum noktasına daha düşük H/Y oranlarında ulaştığı görülmektedir. Bu değerler kerozin yakıtının hava ile tepkimesi sonucunda 10000, 11000 ve 12000 rpm motor devirleri için 125; 115 ve 110'dur. Metan yakıtının hava ile tepkimeye girmesi sonucu ise, 150; 110 ve 110'dir. Bunun sebebi ise, yanma odasına alınan hava miktarı artarken yanma verimi de daha hızlı artmaktadır.



Şekil 5.37. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası maksimum sıcaklığı.



Şekil 5.38. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası maksimum sıcaklığı.



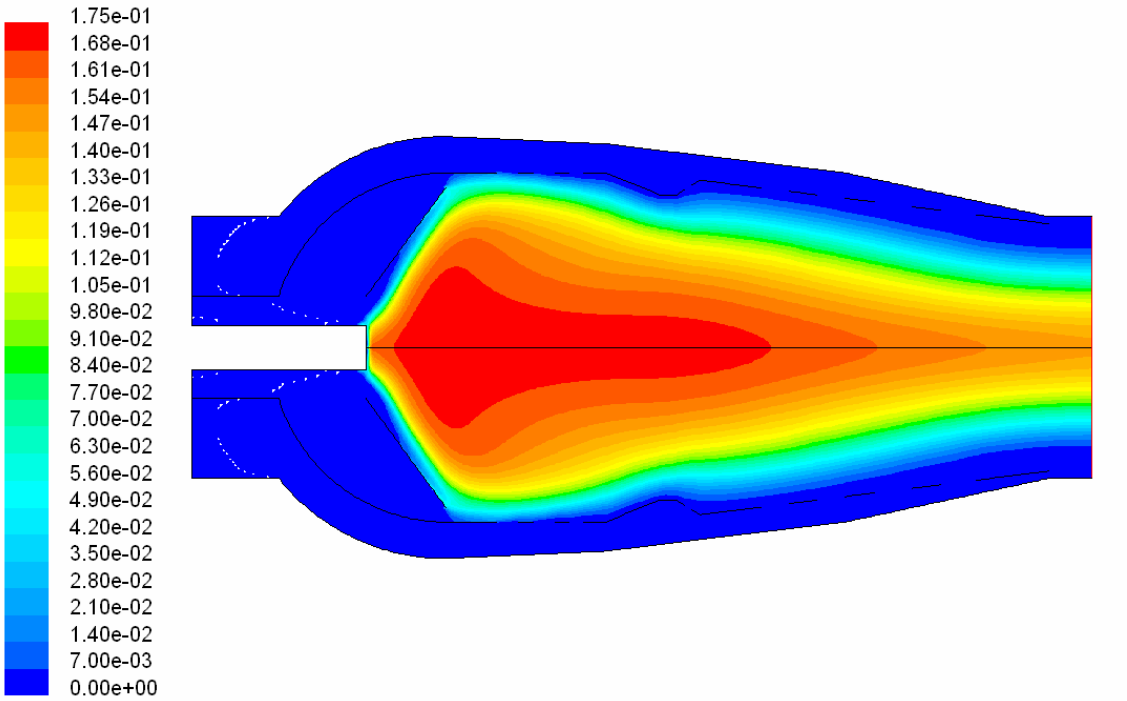
Şekil 5.39. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası maksimum sıcaklığı.

Şekil 5.40 ve şekil 5.41'de, 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu meydana gelen yanma odası içerisindeki CO_2 dağılımları verilmektedir. Ayrıca, kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi sonucu farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) yanma odası çıkışında ölçülen CO_2 kütle kesir değerleri, 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.42'de, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.43'de ve 12000 rpm (2980 kW güçte) motor devri için şekil 5.44'de gösterilmektedir.

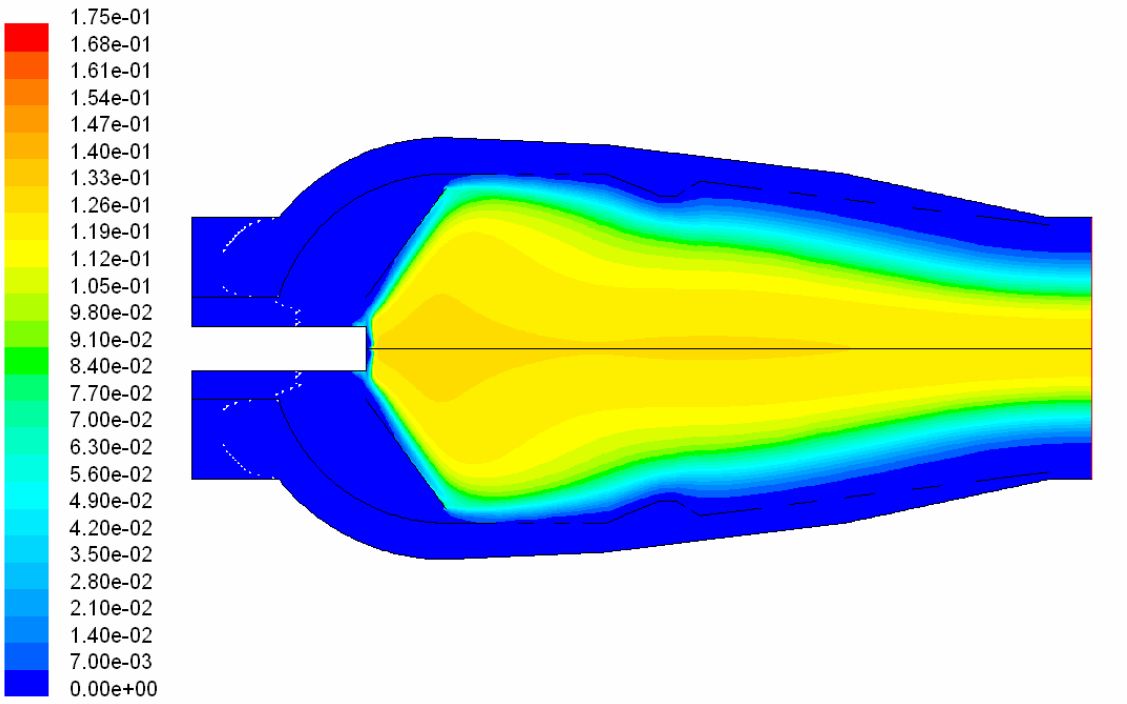
Şekil 5.40 ve şekil 5.41 incelendiğinde, CO_2 dağılımının alev merkezinde yoğunlaştığı görülmektedir. Yanma odasının çıkışında ikincil havanın etkisi ile seyreltildiği izlenmektedir. Şekillerde, metan yakıtının hava ile tepkimesi sonucu oluşan CO_2 konsantrasyonunun, kerozin yanmasına oranla az olduğu açıkça fark edilebilmektedir.

H/Y oranına göre yanma odası çıkışındaki CO_2 kütle kesir değerlerini veren şekil 5.42, şekil 5.43 ve şekil 5.44 incelendiğinde, metan yakıtının hava ile tepkimesi sonucu oluşan CO_2 kütle kesir değerinin kerozin yanmasına oranla az olduğu görülmektedir. CO_2 kütle kesir değerinin az olmasının sebebi ise, yakıtların hava ile yanma reaksiyonlarının verildiği (4.13) ve (4.15) numaralı eşitliklerde görülebilmektedir. Eşitliklere bakıldığında kerozinin yanma reaksiyonundan 12 mol CO_2 ortaya çıkarken, metan yakıtının yanma reaksiyonundan sadece 1 mol CO_2 oluşmaktadır. Şekillerde verilen kerozin ve metan yakıtları arasındaki kütle kesir oranı farkı % 12 ile % 32 değerleri arasında değişmektedir.

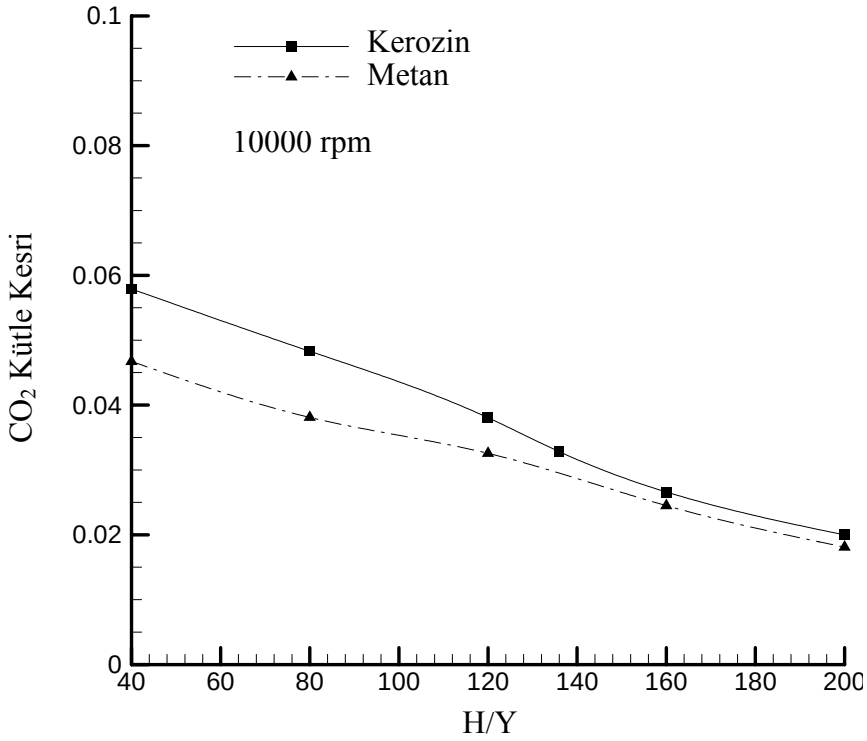
CO_2 kütle kesir değerini veren şekiller incelendiğinde, H/Y oranının artması ile CO_2 kütle kesir değerinin azaldığı görülmektedir. Burada, H/Y oranı artarken yanma odasına giren yakıt miktarı sabit, hava miktarı ise artmaktadır. 10000 rpm motor devrinde H/Y=40 değerinde kerozin yanması için, yanma odasından çıkan CO_2 miktarı 0.055 kg/sn ve yanma odasına giren toplam kütle miktarı 1.41 kg/sn iken H/Y=160 olduğunda, yanma odasından çıkan CO_2 miktarı 0.106 kg/sn, yanma odasına giren toplam kütle miktarı ise 5.54 kg/sn olmaktadır. Buna benzer değerler metan yakıtının yanma reaksiyonunda da elde edilmektedir. Dolayısı ile yanma reaksiyonu sonucu oluşan CO_2 konsantrasyonu bir miktar artarken, toplam kütle değeri sürekli artmaktadır. Bu sebepten toplam kütle içerisindeki CO_2 konsantrasyonu azalmaktadır.



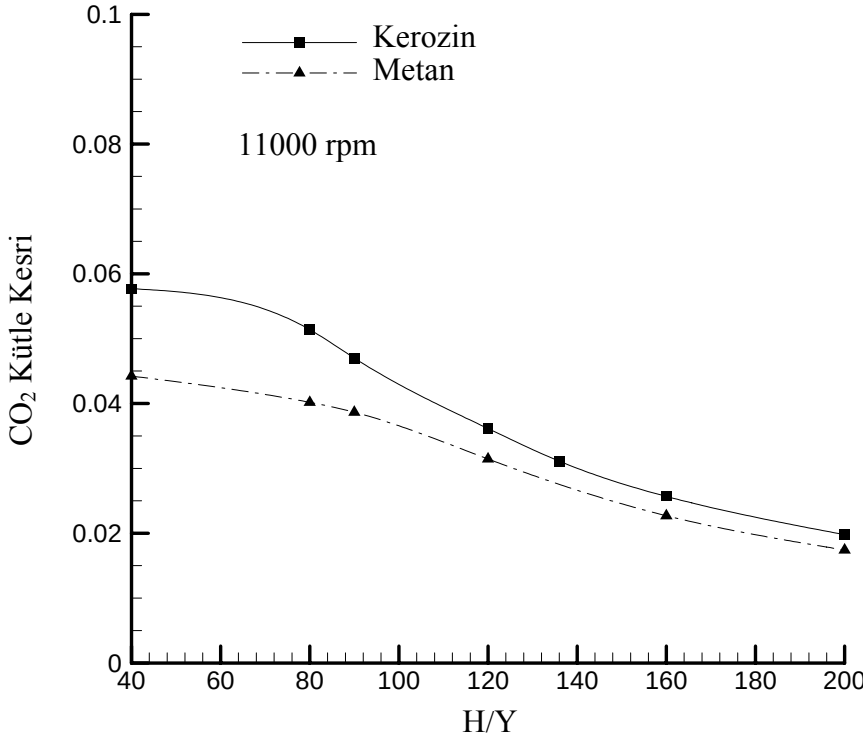
Şekil 5.40. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası içerisindeki CO_2 dağılımı.



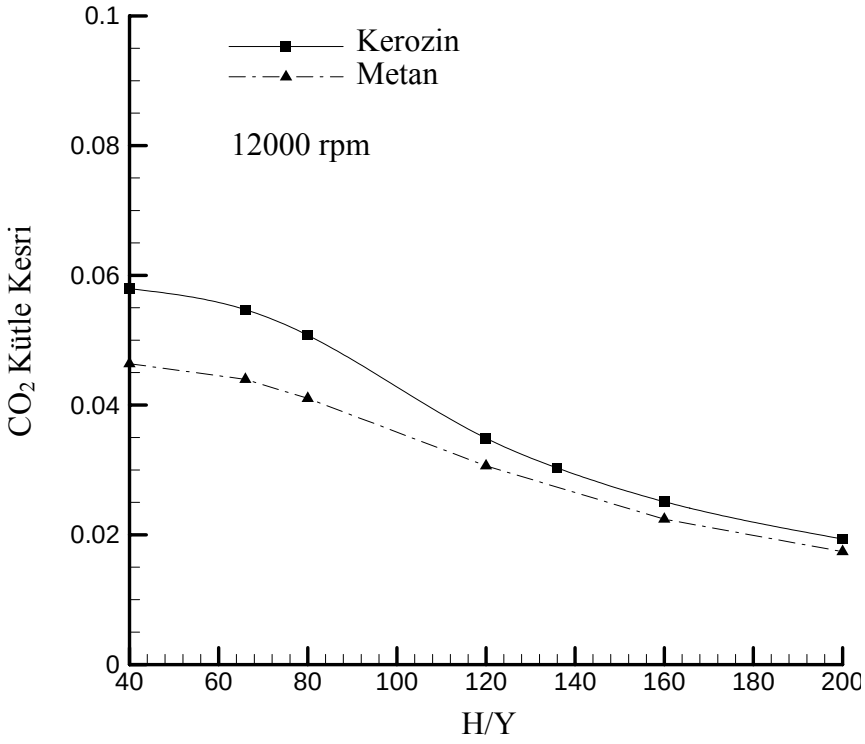
Şekil 5.41. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası içerisindeki CO_2 dağılımı.



Şekil 5.42. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) yanma odası çıkışındaki CO_2 miktarları.



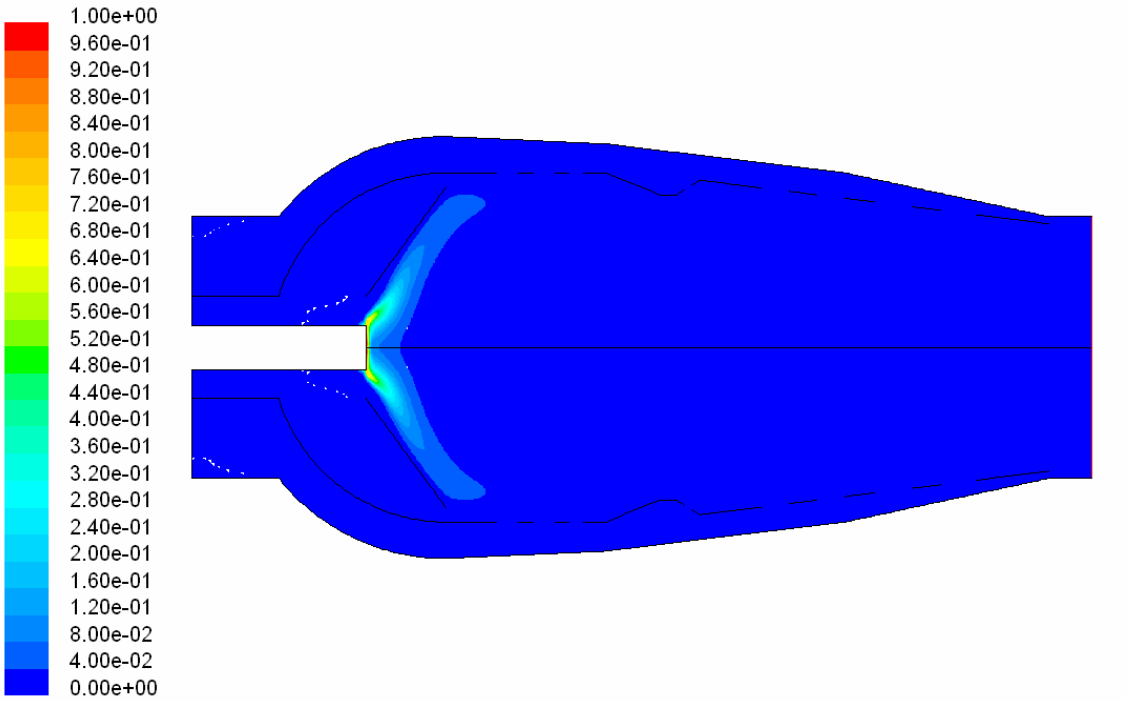
Şekil 5.43. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) yanma odası çıkışındaki CO_2 miktarları.



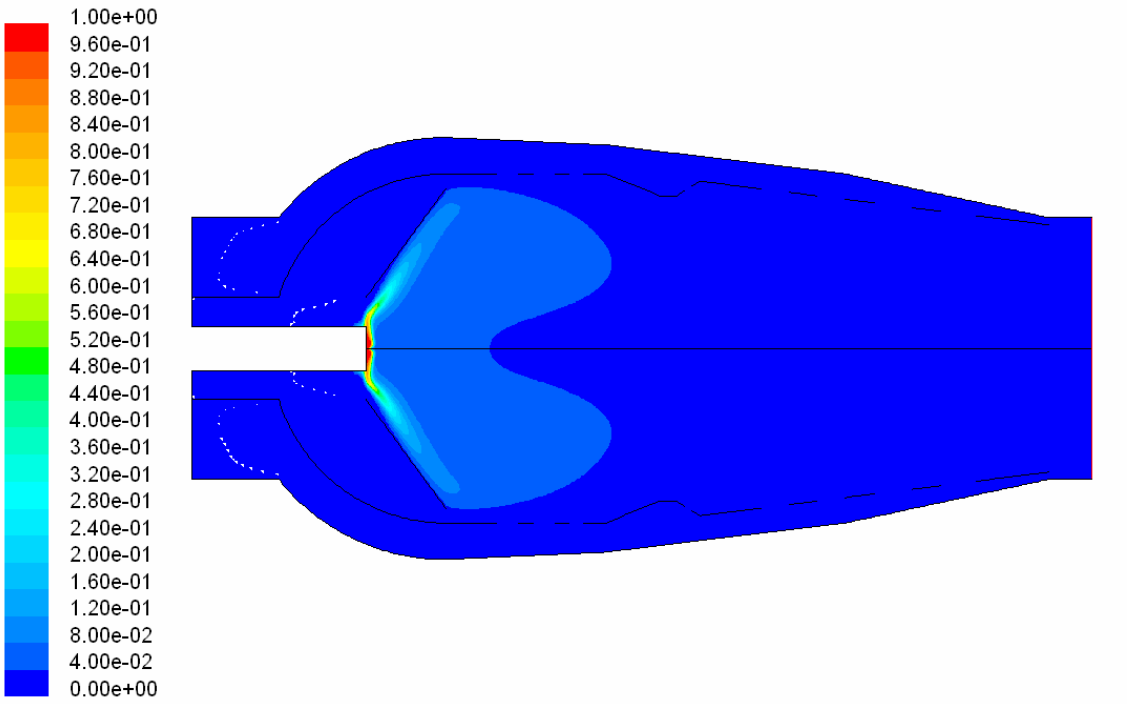
Şekil 5.44. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) yanma odası çıkışındaki CO_2 miktarları.

Şekil 5.45 ve şekil 5.46'da, 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında hava ile tepkimeye giren kerozin ve metan yakıtlarının yanma odası içerisindeki HC dağılımları verilmektedir. Ayrıca, hava ile tepkimeye giren kerozin ve metan yakıtlarının farklı hava yakıt oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) yanma odası çıkışında yanmamış HC kütle kesir değerleri, 10000 rpm (1480 kW) motor devri için şekil 5.47'de, 11000 rpm (2290 kW) motor devri için şekil 5.48'de ve 12000 rpm (2980 kW güçte) motor devri için şekil 5.49'da gösterilmektedir.

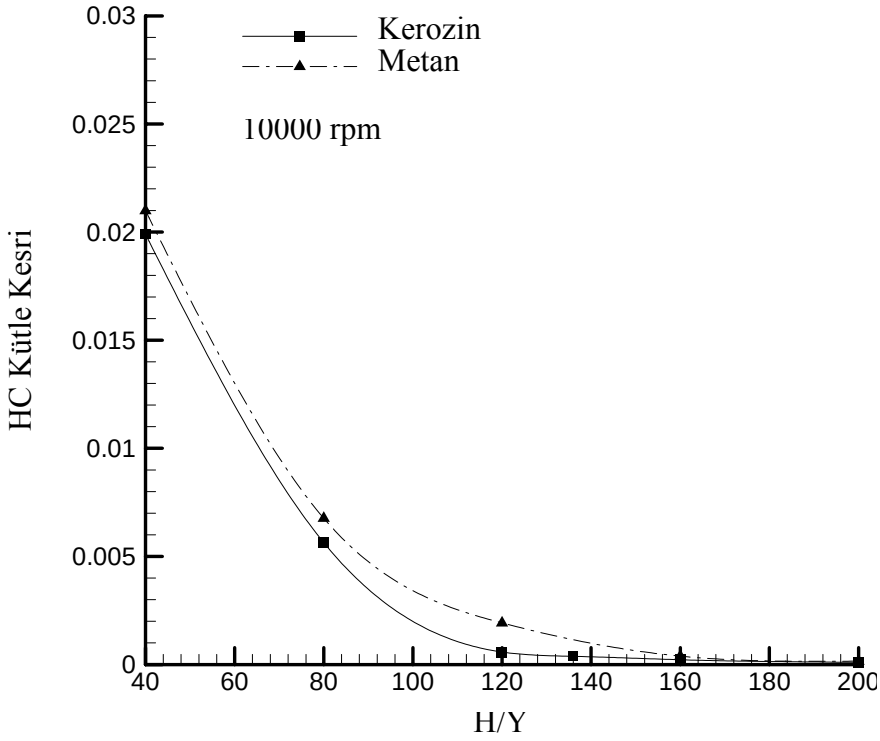
Şekil 5.45 ve şekil 5.46 incelendiğinde, ayni H/Y oranında yakıtların püskürtülmesi ile verimden dolayı kerozin yakıtının metana oranla daha hızlı tepkimeye girdiği görülmektedir. Şekil 5.47, şekil 5.48 ve şekil 5.49 incelediğinde, H/Y oranı arttıkça HC kütle kesir değerlerinin azaldığı görülmektedir. Burada, yanma odasına daha fazla hava girmesi ile hem toplam kütle artmakta hem de yanma verimi artırmaktadır. Ayrıca, yaklaşık H/Y=120 oranına kadar kerozin yakıtının daha fazla tükendiği, bu değerden sonra her iki yakıtında ayni miktarda tükendiği görülmektedir. Bu tükenmenin sebebi olarak, kerozin yanma veriminin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



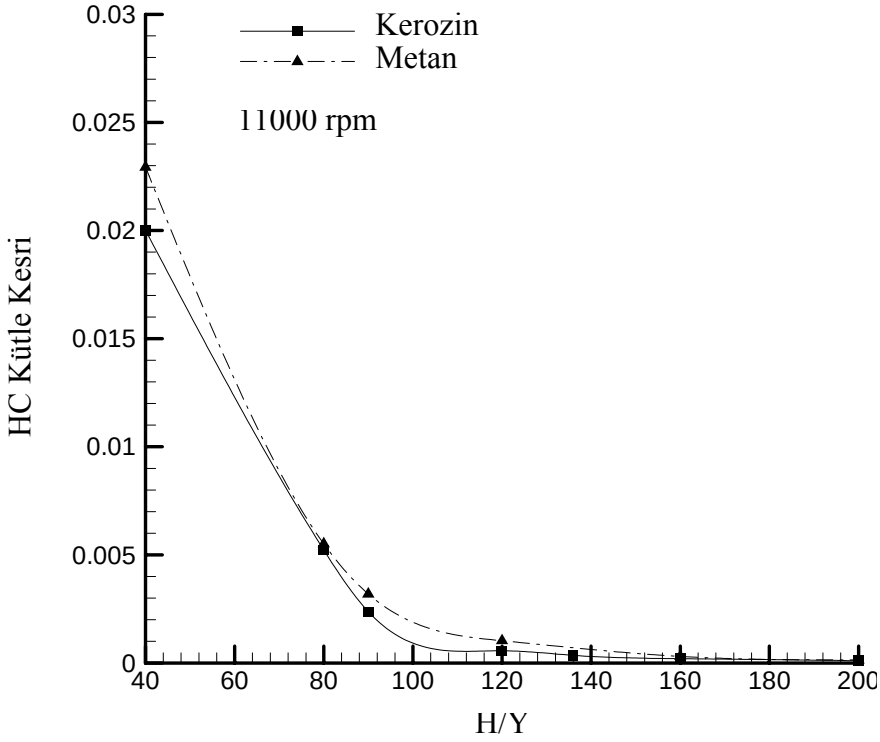
Şekil 5.45. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında kerozin yanması için yanma odası içerisindeki $C_{12}H_{23}$ dağılımı.



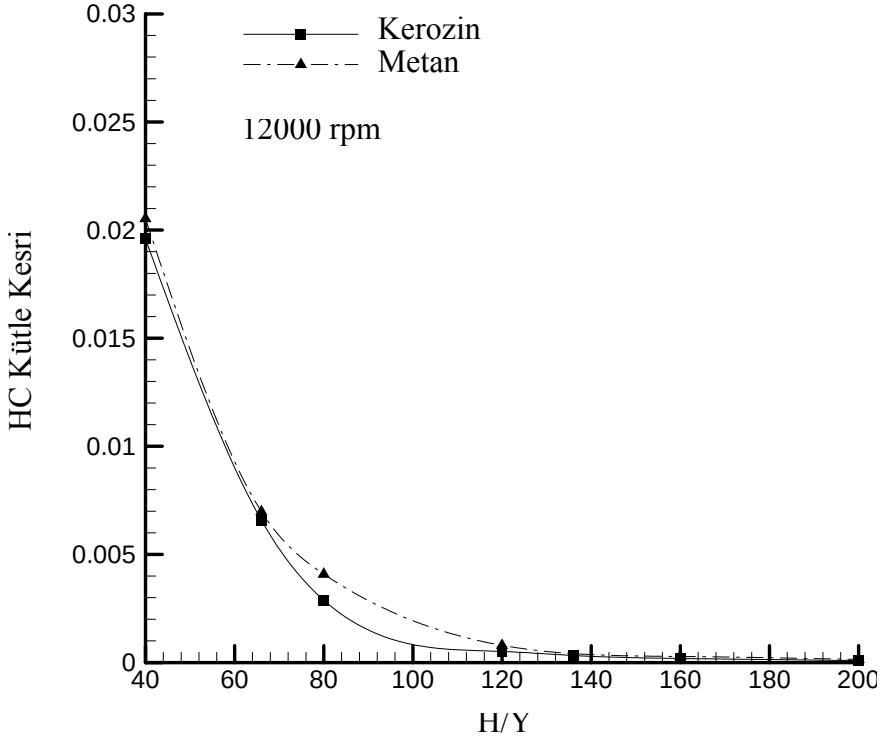
Şekil 5.46. 10000 rpm motor devri ve H/Y=120 oranında metan yanması için yanma odası içerisindeki CH_4 dağılımı.



Şekil 5.47. Kerozin ve metan yanması için 10000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki HC miktarları.



Şekil 5.48. Kerozin ve metan yanması için 11000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki HC miktarları.



Şekil 5.49. Kerozin ve metan yanması için 12000 rpm motor devrinde ve farklı hava yakıt oranlarında (40≤H/Y≤200) yanma odası çıkışındaki HC miktarları.

Tablo 5.1. Farklı motor devirlerinde ve H/Y=120 oranında kerozin ile metan yanması sonucu oluşan NO değerleri ve NO oluşumunu etkileyen bazı spesifik değerler.

Yakıt	**Motor Devri (rpm)**	**Yakıt (kg/sn)**	**Hava (kg/sn)**	**Verim (%)**	**Maksimum Sıcaklık (K)**	**NO (ppm)**
Kerozin	10000	0.03437	4.1244	95.5	2604	97
	11000	0.05312	6.3744	95.5	2601	72
	12000	0.06919	8.3028	95.7	2591	67
Metan	10000	0.02962	3.5544	87.4	2436	44
	11000	0.04577	5.4924	92.1	2458	39
	12000	0.05962	7.1544	93.5	2478	37

6. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Yanma odasında kerozin ve metan yakıtlarının hava ile yanma reaksiyonunun gaz türbin yanma odası performansına etkilerinin incelendiği sayısal modellemede, farklı H/Y oranlarında ($40 \leq H/Y \leq 200$) ve 1480 kW gücü veren 10000 rpm, 2290 kW gücü veren 11000 rpm ve 2980 kW gücü veren 12000 rpm motor devir sayılarında çözümlemeler yapılmıştır. Yanma odasında meydana gelen olayların ve performans parametrelerinin analiz edildiği bu çalışmada belirli sonuçlar elde edilmiştir. Yanma odasında meydana gelen olaylar sonunda gaz akış özellikleri hakkında elde edilen sonuçlar özetlenirse;

- Yanma odası içerisinde yakıt püskürtüldükten sonra kimyasal yanma reaksiyonu başlamakta ve yakıt hızla tükenmektedir. Dolayısı ile yanma verimi artmaktadır.
- Yanma veriminin artması ile gaz sıcaklığı artmaktadır.
- Fakat yanma verimi maksimum noktaya ulaştıktan sonra, yanma odasına giren ikincil hava gaz sıcaklığını ideal seviyeye düşürmektedir.
- H/Y oranı arttıkça yanma için gerekli olan hava miktarı artmakta ve bunun sonucunda yanma verimi artmaktadır.
- Yanma odası içerisinde, yanma odası sıcaklık değerinin yükselmeye başladığı noktadan itibaren, gaz akışının yoğunluğunda eksenel mesafeye göre hızlı bir düşüş meydana gelmektedir. Fakat ikincil havanın etkisi ile gaz akışının sıcaklık değeri düşmektedir. Sıcaklığın düşmesi ve ikincil hava yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı gaz akışının ortalama yoğunluğu bir miktar artmaktadır.
- Gaz akışının yoğunluğundaki değişimler gaz akış hızını değiştirmektedir.
- Yanma tepkimesinden dolayı açığa çıkan sıcaklık yoğunluğu azaltmakta ve gaz akış hızını artırmaktadır.

- Yanma odası alanındaki küçülme ortalama gaz akış hızını artırmaktadır.
- Gaz akış hızının artması toplam basıncı düşürmektedir.
- Yanma odasında bulunan difüzör kısmında dinamik basınç statik basınca dönüşerek iyi bir yanmanın oluşması sağlanmaktadır.
- H/Y oranı arttıkça yanma odası basınç kaybı artmaktadır.

Kerozin ve metan yakıtlarının hava ile tepkimesi için farklı H/Y oranları ve motor devir sayılarında yapılan çözümlemelerde elde edilen sonuçlar özetlenirse;

- H/Y oranının artması ile bütün motor devirlerinde yanma verimi her iki yakıt içinde artmaktadır. Fakat kerozin yanmasında yanma odasına giren hava miktarı metan yanmasına göre fazla olduğundan, kerozinin yanma verimi daha fazladır.
- Motor devri arttıkça yanma verim değerleri dönüm noktasına daha düşük H/Y oranlarında ulaştığı görülmektedir.
- H/Y oranının artması ile yani yanma odasına giren yakıt miktarı sabit iken hava miktarının artması ile, yanma odası çıkış sıcaklık değerleri yaklaşık 1200 K'dan 750 K'na kadar düşmektedir.
- Metanın alt ısıl değerinin kerozine göre yüksek olmasından dolayı, ayni güç ve H/Y oranında elde edilen yanma odası çıkış sıcaklığı daha yüksektir.
- Hava yakıt oranının artması ile yanma odası giriş ve çıkışındaki gaz akış hız değerlerinin başlangıçta arttığı daha sonra sabit kaldığı görülmektedir.
- Ayni H/Y oranlarında kerozin yakılması sonucu elde edilen çıkış hız değerleri, metan yanmasına göre biraz daha fazladır. Fakat H/Y oranı arttıkça aradaki farkın kapandığı ve tersine döndüğü görülmektedir.
- Yanma odası basınç dağılımında kullanılan hava miktarından dolayı kerozin ve metan yanması için farklılıklar görülmektedir. Eksenel olarak kerozin yanmasında basınç, metan yanmasına göre biraz fazladır.
- Ayni H/Y oranında, kerozin yanmasında meydana gelen basınç kayıpları metan yanmasına göre daha fazladır.
- Özgül yakıt tüketimi dikkate alındığında metan yakıtının kerozin yakıtına göre avantajlı olduğu görülmektedir.
- Metan yakıtının hava ile tepkimesi sonucu oluşan NO değerleri kerozin yakıtına oranla oldukça düşük olduğu görülmektedir.

- Her iki yakıt için 10000 rpm motor devrinde oluşan NO miktarı, 11000 rpm ve 12000 rpm motor devirlerinde oluşan NO miktarına oranla daha yüksektir.
- Motor devri arttıkça NO değerleri azalmaktadır.
- Yanma odasında NO_x oluşumunun nedeni olan yüksek sıcaklık NO grafikleri ile ayni özellikler göstermektedir.
- Motor devri arttıkça, NO miktarı daha düşük H/Y oranlarında maksimum noktaya ulaşmaktadır.
- NO ve CO_2 dağılımının alev merkezinde yoğunlaştığı görülmektedir.
- Metan yakıtının hava ile tepkimesi sonucu oluşan CO_2 konsantrasyonunu, kerozin yakıtına oranla az olduğu görülmektedir.
- H/Y oranı artması ile CO_2 ve HC kütle kesir değerlerinin azaldığı görülmektedir.

6.2. Öneriler

Gaz türbinli motorlarda kullanılan yanma odalarının performansının artırılması için bir çok değişik çalışmalar yapılabilir. Ayrıca, yanma odalarının çalışma koşullarındaki iyileştirmeler yanma odalarının performansını artırabilir. Gaz türbin yanma odalarının performansını artırmak için aşağıdaki öneriler sunulabilir.

- H/Y oranının artması basınç kaybını artırdığından yanma odasından yüksek performans sağlayabilmek için yanma verimi % 98'e ulaştığı andaki H/Y oranı korunmalı ve yanma odasına daha fazla hava gönderilmemelidir.
- Yanma odası performansının artırılması için farklı geometriler ve sistemler oluşturulmalı ve üzerinde çalışmalar yapılmalıdır.
- Yanma odası içerisinde basınç kayıplarını azaltacak çalışmalar yapılmalıdır.
- Çalışma şartlarından dolayı yanma odasının boyutları küçültülmelidir.
- İyi bir yanma için yanma odası girişinde gaz akış hızını azaltacak ve hava yakıt karışımını kolaylaştıracak türbülans elemanlarının sayısı artırılmalıdır.
- Yapılan sayısal çalışmalar deneylerle desteklenmelidir.
- Metan yakıtının gaz türbin motorlarında sıvı halde kullanımı araştırılmalıdır.
- Gaz türbin yanma odasının türbülans elemanları ile birlikte, 3D geometrik modeli oluşturularak performans analizleri yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. International Energy Annual 2005, Energy Information Administration, DOE/EIA-0131(05), November-2006. http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/graphic_data.html

2. Huntley, S.C., Altitude-Chamber Performance of British Rolls-Royce Nene II Engine IV - Effect of Operational Variables on Temperature Distribution at Combustion Chamber Outlets, NACA RM E50B10, 1950.

3. Cook, W.P., Koch R.G., Altitude Performance of AN-F-58 Fuels in British Rolls-Royce Nene Single Combustor, NACA RM E9D08, 1949.

4. Barson, Z., Wilsted H.D., Altitude-Chamber Performance of British Rolls-Royce Nene II Engine I – Standard 18.75-Inch-Diameter Jet Nozzle, NACA RM E9I23, 1949.

5. Bonacina, E., Experimental Investigation on Gas Turbine Combustor, Master's Thesis, Middle East Technical University, Ankara, 1994.

6. Yapıcı, H., et al., Numerical Calculation of Local Entropy Generation in a Methane-Air Burner, Energy Conversion and Management 46, pp. 1885–1919, 2005.

7. Salva, J., Lopez G., Effects of Hydrogen Addition on Pollutant Emissions in a Gas Turbine Combustor, Fuel and Combustion Technology for Advanced Aircraft Engines, 1993.

8. Khelil, A., Naji H., Loukarfi L., Numerical Simulation of The Combustion of Strong Swirling Confined Reacting Flow (Natural Gas / Air) in Gas Turbine Combustor, 18. Congrès Français de Mécanique, Grenoble, France, Agust-2007.

9. Yılmaz, İ., Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2006.

10. Akansu, S.O., Kahraman N., Çeper, B., Experimental Study on a Spark Ignition Engine Fuelled by Methane-Hydrogen Mixture, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 32, Issue 17, Pages 4279-4284, December-2007.

11. Armstrong, J.C., Wilsted H.D., Vincent K.R., Altitude-Chamber Performance of British Rolls-Royce Nene II Engine II – 18.41-Inch-Diameter Jet Nozzle, NACA RM E9I27, 1949.

12. Grey, R.E., Brightwell V.L., Barson Z., Altitude-Chamber Performance of British Rolls-Royce Nene II Engine III – 18.00-Inch-Diameter Jet Nozzle, NACA RM E50A31, 1950.

13. Lysenko, D. A., Solomatnikov A. A., Numerical Modeling of Turbulent Heat Exchange in The Combustion Chambers of Gas-Turbine Plants with The Use of The Fluent Package, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 76, No. 4, 2003.

14. Pourmahmoud, N., Akhesmeh S., Numerical Investigation of The Thermal Separation in a Vortex Tube, Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Volume 33, ISSN: 2070-3740, September-2008.

15. İlbas, M., et al., Laminar-Burning Velocities of Hydrojen-Methane-Air Mixture: An Experimental Study, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 31, Issue 12, Pages 1768-1779, September-2006.

16. Karakoç, T.H., Uçaklarda Gaz Türbinli Motorların Yakıt Sistemleri, T.C. Anadolu Üniversiyesi Yayınları, NO: 984, Eskişehir, 1997.

17. Erim, Z., Uçak Motorlarında Yakıtlar Yakıt Sistemleri Yanma Odaları ve Yanma, İTÜ, Ders Notları, İstanbul, 1978.

18. Çetinkaya, S., Gaz Türbinleri, Nobel Kitapevi, Ankara, ISBN: 9789755911021, 1999.

19. Hırkalıoğlu, F., Gaz Türbin Yanma Odasında Hidrojen ve Hidrokarbon Yanmasının Modellenmesi ve NOx Oluşumunun İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2005.

20. Özkan, E., Modeli Yapılan Bir Gaz Türbinli Motor Yanma Odasında Yanmanın Sayısal İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2008.

21. Uçak Teknik Temel (Motor), THY Eğitim Merkezi Teknik Eğitim Müdürlüğü, İstanbul, No: TEK101(8), 2003.

22. Sierra, F.Z., et al., Prediction of Temperature Front in a Gas Turbine Combustion Chamber, Applied Thermal Engineering, 25 (8-9): 1127-1140, Jun-2005.

23. Tomczak, H.J., et al., Investıgation of a Gas Turbine Combustion System Fired with Mixtures of Natural Gas and Hydrogen, IFRF Combustion Journal, Article Number 200207, ISSN: 1562-479, December-2002.

24. The Jet Engine, Rolls-Royce plc, Derby, England, ISBN: 0902121235, 1996.

25. İnanç, E., Kerozin, Uted Dergisi, Şubat-2004. http://www.uted.org/dergi/2004/subat/subat_10.htm

26. Özrahat, D., Doğalgazın İçten Yanmalı Motorlarda Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2004.

27. Albayrak Çeper, B., Hidrojen-Doğal Gaz Karışımlarının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2009.

28. Fluent Incorporated. FLUENT User's guide version 6.1, 2003.

29. http://www.gasturbine.pwp.blueyonder.co.uk/Nene1.jpg

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Kayseri ilinin Tomarza ilçesine bağlı Alakuşak köyünde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Alakuşak köyünde tamamladı. 1997 yılında Kayseri Fevzi Çakmak Lisesinden mezun oldu. İstanbul'da iki sene özel bir elektrik şirketinde çalıştıktan sonra 2000 yılında askerlik hizmetine başladı. 2002 yılında askerlik hizmetini tamamladıktan sonra Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulunun Uçak Gövde-Motor Bölümünü kazandı. 2007 yılında okul ikincisi olarak mezun oldu. Ayni yıl içerisinde Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine ve Sivil Havacılık Yüksekokulunda araştırma görevlisi olarak akademik çalışmalara başladı. 2008 yılında evlenen Selim TANGÖZ, halen araştırma görevlisi olarak akademik çalışmalara devam etmektedir.

Adres	:	Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu 38039 / KAYSERİ
Telefon	:	0352 4374901 / 41106
Faks	:	0352 4375744
E-posta	:	stangoz@erciyes.edu.tr