



**RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMANIN ÖN KARIŞIMLI METAN ALEV
KARAKTERİSTİKLERİNE OLAN ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Çağrı TÜMER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

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

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Çağrı TÜMER

18/01/2023

RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMANIN ÖN KARIŞIMLI METAN ALEV
KARAKTERİSTİKLERİNE OLAN ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Çağrı TÜMER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Dünya genelinde enerji ihtiyacındaki artış ve fosil enerji kaynaklarının tükeniyor olması sebebiyle kaynakların daha verimli kullanılması gerekmektedir. Kullanılan kaynakların çevreye olan zararları ise enerji ihtiyacındaki artış ile paralel olarak artmakta ve geri dönülemez zararlara sebep olmaktadır. Çalışmada yanma sonucunda ortaya çıkan emisyonları azaltmak ve dolayısıyla yakıtların çevreye olan zararlarını azaltmak amacıyla renksiz dağıtılmış yanma yöntemi kullanılmıştır. Tasarlanmış olan yanma odası içerisine ön karışimli olarak yakıt-hava karışımı gönderilmiştir. İki farklı koşul altında hava fazlalık katsayısının (λ) da etkisi araştırılmıştır. Çalışma yapılırken öncelikle yanma reaksiyonu hesaplanmıştır. Hava içerisindeki molce %21 O_2 konsantrasyonu, %19, %17 ve %15 olacak şekilde N_2 ile seyreltilerek renksiz dağıtılmış yanma şartları uygulanmıştır. Modellemeler için hava fazlalık katsayısı öncelikle $\lambda=1,2$ kabul edilmiş ve bu şartlar sonucunda ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Ardından, hava fazlalık katsayısı $\lambda=1,7$ olarak değiştirilmiş ve hava fazlalık katsayısının renksiz dağıtılmış yanma şartlarına olan etkileri incelenmiştir. Model ve reaksiyon sonucu doğrulaması için önceki modelleme sonuçları ile karşılaştırma yapılmış ve uyum tespit edilmiştir. 10 kW ısı gücü (yaklaşık 70 MW/m³.atm ısı yoğunluk) sınır şartlarında modellemeler yapılmıştır. Çalışma sonucunda yanma odası içerisindeki hızlarda düşüş, hızların düşüşüne bağlı olarak iç resirkülasyonun artması, bununla orantılı olarak da reaksiyon hızı yavaşlayarak ani yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmaması beklenmektedir. Yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmaması ile paralel olarak NO_x emisyonlarında düşüş, reaksiyon hızının yavaşlaması ile de yanma odası içerisinde yanmamış karbonların tekrar reaksiyona katılması ile CO ve CO_2 emisyonlarının düşüş beklenmektedir. Sonuçlar irdelendiğinde, renksiz dağıtılmış yanma ile, özellikle gaz türbinlerinin ve/veya uçak motorlarının yanma odaları için oldukça önemli olan daha homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilirken CO_2 , NO_x ve CO emisyonlarında önemli derecede azalmalar gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 91440

Anahtar Kelimeler : Renksiz dağıtılmış yanma, ultra düşük emisyon, ön karışimli yakıcı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Sayfa Adedi : 70

Danışman : Doç. Dr. Serhat KARYEYEN

NUMERICAL INVESTIGATION OF COLORLESS DISTRUBUTED COMBUSTION
EFFECT ON PREMIXED METHANE FLAME CHARACTERISTICS

(M. Sc. Thesis)

Çağrı TÜMER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Due to the increase in energy demand and the depletion of fossil energy resources worldwide, resources should be used more efficiently. The damage to the environment of the resources used increases in parallel with the increase in energy demand and causes irreversible damages. With colorless distributed combustion approach, it was aimed to minimize the environmental damage of the fuels, and in this study, colorless distributed combustion method was applied. Premixed air-fuel mixture was introduced into a combustor, and the results were examined by changing the excess air coefficient (λ) under different conditions. The combustion reactions were first determined. 21% O₂ concentration in the air was changed to 19%, 17%, and 15%, and colorless distributed combustion was achieved. Excess air ratio $\lambda=1,2$ was first determined, and the results obtained are evaluated. Then, excess air ratio was changed as $\lambda=1.7$, and excess air ratio effects on colorless distributed combustion was investigated. The existing modeling results were compared for the validation of the model, and it is concluded that the results are in good agreement with the existing results. Modelings were performed at boundary conditions being a thermal power of 10 kW (about a thermal intensity of 70 MW/m³.atm). In order to achieve colorless distributed combustion, modelings that oxygen concentration in the air inside the fuel-air mixture was to be 21% O₂ (conventional combustion), 19% O₂, 17% O₂, and 15% O₂ were performed. N₂ was selected as the diluent to achieve colorless distributed combustion (simulation of combustion products recirculation). According to the results, via colorless distributed combustion, a more uniform thermal field which is particularly so important for gas turbines and/or aircraft engine combustors was obtained along with decrease in CO₂, NO_x, and CO₂ emissions.

Science Code : 91440

Key Words : Colorless distributed combustion, ultra low emissions, premixed burner combustion, computational fluid dynamics

Page Number : 70

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Serhat KARYEYEN

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışmanın her aşamasında; tez konusunun belirlenmesi, kullanılacak uygulamalar ile alakalı tüm bilgi ve deneyimlerin aktarılması, gerek makale gerek ise tez yazım aşamalarında sorun yaşadığım her an ulaşabildiğim, kıymetli bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, yol gösteren tez danışmanım, çok kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Serhat KARYEYEN' e saygı ve şükranlarımı sunarım. Dünyaya geldiğim ilk günden itibaren maddi ve manevi her zaman arkamda olan, beni büyütüp, okutup bugün olduğum insan haline getiren, her kararımda bana destek olan, geçirdiğim tüm zor zamanlarımda bana doğru yolu gösteren ve başarıya ulaşmam için yeri geldiğinde bana benden daha çok inanan annem Fatma TÜMER, babam Özdemir TÜMER ve ablam Gamze TÜMER' e teşekkür ederim. Son olarak bana sevgiyi öğretten, her gördüğümde günümü güzelleştiren, varlığı ile ailemizi şenlendiren sevgili yeğenim Ada Lina TUNCER' in ileride çalışmamı görüp, gururlanıp daha fazlasını yapmasını diliyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
GRAFİKLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. YAKITLAR VE YANMA.....	9
2.1. Yakıtlar.....	9
2.1.1. Katı yakıtlar.....	9
2.1.2. Sıvı yakıtlar	10
2.1.3. Gaz yakıtlar	10
2.2. Yanma	11
2.3. Emisyon.....	12
2.3.1. Azot oksit oluşumu (NO _x)	12
2.3.2. Karbon monoksit (CO) oluşumu	15
2.3.3. Karbon dioksit (CO ₂) oluşumu	15
2.4. Metan ve Hidrojen Metan Karışımlı Yakıtlar	15
2.4.1. Hidrojen.....	15
2.4.2. Metan.....	16
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD).....	17
3.1. HAD Yetenekleri ve Avantajları.....	18

Sayfa

3.2. HAD Bileşenleri.....	18
3.3. Temel Denklemler.....	19
3.3.1. Kütle korunumu.....	19
3.3.2. Momentumun korunumu.....	20
3.3.3. Enerjinin korunumu.....	21
3.3.4. Standard k- ϵ türbülans modeli	21
3.3.5. Eddy dissipation concept (EDC) modeli	22
3.3.6. Sınır koşullarının belirlenmesi	23
4. MATERYAL VE METOD.....	29
4.1. Model Detayları	29
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	33
5.1. Ağ Sayısından Bağımsızlaştırma	33
5.2. Modelin Doğrulanması.....	34
5.3. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız.....	34
5.4. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız.....	37
5.5. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık Dağılımları.....	39
5.6. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık Dağılımları.....	41
5.7. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO _x	43
5.8. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO _x	45
5.9. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO	47
5.10. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO	49
5.11. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO ₂	51
5.12. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO ₂	53
5.13. Çıkış Bölgesi İçin CO ve CO ₂ Emisyonlarının Karşılaştırılması.....	55
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	57
6.1. Öneriler	60

	Sayfa
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	67
EK-1. Kullanılan Kimyasal Reaksiyonun Basamakları ve Özellikleri	68
ÖZGEÇMİŞ	70

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Standart k-ε türbülans modelinde kullanılan sabitler	22
Çizelge 3.2. %21 O ₂ içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu	25
Çizelge 3.3. %19 O ₂ içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu	26
Çizelge 3.4. $\lambda = 1,2$ için %21 den başlayarak % 15' ye kadar O ₂ içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu	26
Çizelge 3.5. $\lambda = 1,7$ için %21 den başlayarak % 15' ye kadar O ₂ içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu	27

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 4.1. Yanma Odası ön (soldaki), yan (ortadaki) ve üst (sağdaki) görünüş teknik resimleri. Teknik resimdeki tüm birimler milimetre (mm) olarak alınmıştır.....	30
Şekil 4.2. Yanma Odasının İzometrik Görünüşü	30
Şekil 5.1. Yanma Odası Alt Kısımından Çıkış Bölgesine Doğru Ağ Sayısının Etkisi	33
Şekil 5.2. Giriş Bölgesinden Yanma Odası Alt Kısımına Doğru Ağ Sayısının Etkisi	33
Şekil 5.3. Referans çalışma (soldaki) [19] ile mevcut çalışma [sağdaki] modelinin doğrulanması	34
Şekil 5.4. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	35
Şekil 5.5. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	35
Şekil 5.6. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	36
Şekil 5.7. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	36
Şekil 5.8. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları	36
Şekil 5.9. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	37
Şekil 5.10. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	37
Şekil 5.11. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	38
Şekil 5.12. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri.....	38
Şekil 5.13. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları	38
Şekil 5.14. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	39
Şekil 5.15. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	40

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	40
Şekil 5.17. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	40
Şekil 5.18. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Sıcaklık Kontur Grafiği	41
Şekil 5.19. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	41
Şekil 5.20. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	42
Şekil 5.21. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	42
Şekil 5.22. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri	42
Şekil 5.23. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Sıcaklık Kontur Grafiği	43
Şekil 5.24. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	44
Şekil 5.25. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	44
Şekil 5.26. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	44
Şekil 5.27. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	45
Şekil 5.28. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO _x Emisyon Konturları.....	45
Şekil 5.29. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	46
Şekil 5.30. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	46
Şekil 5.31. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	46
Şekil 5.32. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO _x Emisyonları	47
Şekil 5.33. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO _x Emisyon Konturları.....	47
Şekil 5.34. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	48
Şekil 5.35. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	48
Şekil 5.36. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	48
Şekil 5.37. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	49
Şekil 5.38. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği.....	49

Şekil	Sayfa
Şekil 5.39. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	50
Şekil 5.40. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	50
Şekil 5.41. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	50
Şekil 5.42. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları	51
Şekil 5.43. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği.....	51
Şekil 5.44. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	52
Şekil 5.45. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	52
Şekil 5.46. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	52
Şekil 5.47. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	53
Şekil 5.48. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO ₂ Emisyon Kontur Grafiği	53
Şekil 5.49. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	54
Şekil 5.50. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	54
Şekil 5.51. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	54
Şekil 5.52. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO ₂ Emisyonları	55
Şekil 5.53. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO ₂ Emisyon Kontur Grafiği	55
Şekil 5.54. $\lambda=1,2$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO ₂ Emisyonlarının Karşılaştırması.....	56
Şekil 5.55. $\lambda=1,7$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO ₂ Emisyonlarının Karşılaştırması.....	56

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Petrolden elde edilen ürünlerin yüzdelik dağılımı.....	10

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Arrhenius faktörü
°C	Santigrad
C	Karbon
CH ₄	Metan
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
D	Çap
Da	Damköhler sayısı
H	Entalpi
H ₂	Hidrojen
H ₂ O	Su buharı
k	Isı iletim katsayısı
K	Kelvin
k	Oran sabiti
Kcal	Kilokalori
Kg	Kilogram
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt-saat
m	metre
m ³	Metreküp
N ₂	Azot
NO	Azot monooksit
NO ₂	Azot Dioksit
NO _x	Azot Oksit
O ₂	Oksijen
OH	Hidroksil

Simgeler**Ppm****Q****Q****S****s****Sc_t****S_m****s_p****s_q****s_x****T****U****V****X** **λ** **φ** **Açıklamalar**

Parts per million

Isı transferi

Yakıt debisi

Entropi, kJ/kg.K

Reaktantlar için stokiometrik katsayı

Türbülanslı schmidt sayısı

Kaynak terimi

P ürünü için stokiometrik katsayı

Q ürünü için stokiometrik katsayı

Stokiometrik bir faktör

Sıcaklık

İç enerji, kJ

Hız

Mol kesri

Hava fazlalık katsayısı

Yakıt/hava denklik oranı

Kısaltmalar**CDC****CFD****EDC****GRI****HAD****LHV****MILD****PDF****PID****PIV****Açıklamalar**

Colorless distributed combustion

Computational fluid dynamics

Eddy dissipation concept

Gas Research Institute

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği

Lower heating value

Moderate or intense low-oxygen dilution

Probability density function

Proportional integral derivative

Particle imaginary velocimetry

1. GİRİŞ

Dünyada enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla son dönemlerde yenilenebilir enerji kaynaklarına doğru yönelimler ve yatırımlar artmaktadır. Ancak, Dünya enerji ihtiyacının büyük bir bölümü hâlâ fosil yakıtlar tarafından karşılanmaktadır. Ulaşımında kullanılan araçların enerji ihtiyacını karşılamak için akaryakıtların, konutların ısıtılmasında doğalgazın veya kömürün ya da elektrik üretiminde neredeyse tüm fosil yakıtların kullanıldığı unutulmamalıdır. 2019 yılında Stanford üniversitesinin yaptığı bir araştırmaya göre [1], enerji kaynaklarının bulunmuş rezervlerinden petrolün 2050’li, doğalgazın 2060’lı ve kömürün ise bu yüzyılın sonlarında tükeneyeceği değerlendirilmektedir. Kullanılan fosil yakıtların enerji kapasitelerinin yenilenebilir enerji kaynaklarının sahip olduğundan daha yüksek oldukları da bilinmektedir [2]. Tükeneyeceği güne kadar kullanılmaya devam edilmesi yüksek ihtimal olan bu kaynaklardan enerji üretmenin de önemli maliyetleri bulunmaktadır. Ancak günümüzde maliyetlerden daha önemlisi ise çevresel faktörler ve bunların sonucu küresel ısınmaya olan olumsuz etkileridir. Fosil yakıtların kullanılması sonucu açığa çıkan CO, CO₂, NO_x, SO_x vb. emisyonlar, çevresel kirlenmeye ve küresel ısınmaya etki etmektedir [3]. Bu sebeple fabrikaların, enerji santrallerinin, araçların bile baca gazı emisyonları (egzoz) düzenli olarak kontrol edilmekte ve emisyonları azaltmak amaçlı çalışmalar yapılmaktadır.

Küresel ısınmanın ve fosil yakıt kullanımı sonucu ortaya çıkan emisyonların kısa vadede etkileri toprak ve çevre kirliliği olsa da asıl problem uzun vadede oluşturduğu etkilerdir. Bunların da en önemlileri kuraklık, çölleşme, sel ve asit yağmurlarıdır [4]. Dünyadaki yaşamı etkileyebilecek bu etkilerin tehlikelerini azaltmak için bilim insanları yanma sonu emisyonları düşürebilmek adına bilimsel çalışmalar yapmaktadırlar.

Çalışmalardan bazıları şöyle değerlendirilebilir. HITAC (High Temperature Air Combustion) yüksek sıcaklıkta havanın yakılması anlamında olan bu yanma şeklinde yanma işlemi büyük hacimde, neredeyse tüm yakıcı hacmine yayılarak gerçekleşmektedir. Yanma işleminde kullanılan yüksek sıcaklıklı ve oldukça düşük oksijen konsantrasyonlu hava kullanılmakta, bu sayede hacimsel yanma ile birlikte alevsiz yanma başarılarak yanma sonu kirlenici emisyonlar azaltılabilmektedir [5]. MILD (Moderate or Intense Low Dilution) hem reaktanların yüksek sıcaklığı hem de yanma sürecinde düşük sıcaklık artışı ile karakterize edilmektedir [6]. FLOX (Flameless Oxidation) alevsiz yanma, yüksek bir

dahili baca gazı devridaimi ile büyük bir hacme aktarılmaktadır. Bu teknoloji diğerlerinde de olduğu gibi çok düşük kirletici emisyonların başarılmasına olanak sağlamaktadır [7]. CDC (Colorless Distributed Combustion) [8] renksiz dağıtılmış yanma, yanma odasına giren havanın bünyesinde bulunan O_2 konsantrasyonunun azaltılması ile başarılan ve bu sayede daha uniform bir sıcaklık dağılımı ile birlikte kirletici emisyonların önemli ölçüde azaltıldığı yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Geleneksel alevli yanma sırasında yüksek NO_x seviyeleri ortaya çıkarken, renksiz dağıtılmış yanmada alevin görünürlüğünün ve dolayısıyla da yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılması ile birlikte oldukça düşük NO_x seviyelerinin başarıldığı gözlenmiştir. Örneğin, Karyeyen vd. [9] 300K giriş sıcaklığı altında renksiz dağıtılmış yanmanın şartlarının uygulandığı, hidrojen bakımından zengin yakıtlar üzerinde çalışma yapmışlardır. Renksiz dağıtılmış yanmanın OH^* ışıltama görüntülerinin yanı sıra kirletici NO_x ve CO emisyonlarına olan etkilerini de araştırmışlardır. Seyrelticilerin karışıma eklenmesi ile birlikte OH^* seviyelerinin, NO_x ve CO emisyonlarının önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında üç farklı yakıt incelenmiş ve seyreltici olarak CO_2 ve N_2 kullanılmıştır.

Khalil ve Gupta [10] çalışmalarında kullandıkları yakıtın içerisine hidrojen ekleyerek hidrojen zengin yakıt elde etmişlerdir ve hidrojen zenginleştirme işlemi ile CO emisyonunda dikkate değer bir azalma sağlandığı ve tutuşma sınırının da genişlediği tespit edilmiştir. Kullandıkları dağıtılmış yanma yöntemi sayesinde geliştirilmiş alev yapısı, ultra düşük emisyonlar ve verimliliği artırmak için yüksek yoğunluklu düşük oksijen konsantrasyonlu koşullar altında önemli faydalar sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Yu vd. [11] alevsiz yanma şartları altında hidrojen bakımından zenginleştirilmiş yakıtları incelemişler ve farklı yakıtları farklı hidrojen oranları için araştırmışlardır. Hidrojen bakımından zenginleştirilmiş olan yakıtın yanması sonucunda NO_x oluşumunu azaltmak için alevsiz yanmanın büyük ölçüde katkı sağladığını belirlemişlerdir. Yanma sonucunda ise NO_x ve CO emisyonlarının sıfıra çok yaklaştığı görülmüştür.

Derudi vd. [12] geleneksel yakıtların aksine geleneksel olmayan yakıtlar üzerinde araştırma yapmışlardır. Kok fırını gazı olarak isimlendirilen yakıtın hidrojen içeren halinde verimli bir yanmaya olanak sağladığı görülmüştür. Hidrojen içeren yakıtlarda jet hızının daha yüksek olması gerektiği ve fırın sıcaklıklarının daha düşük ortalamalarda çalışabilmesi için yanma havasının ön ısıtmasını azalmasının sağlandığı belirtmişlerdir.

Khalil ve Gupta [13] renksiz dağıtılmış yanmanın ultra düşük emisyon, alev kararlılığı ve termal alanın daha homojen olması üzerindeki etkilerini göstermiştir. Kullandıkları üç farklı yakıtta dağıtılmış yanma şartlarının etkilerini araştırmışlardır. Yakıt olarak metan kullanıldığında oksijen konsantrasyonu %11 - %13 arasına kadar azaltılabilirken, NO_x emisyonunda %85 azalma gözlenmiştir. Yakıtların sıcaklıkları 300 K ile 750 K arasında değişirken NO_x emisyonunun 1 ppm'den daha az olduğunu göstermişlerdir.

Liv vd. [14] sayısal ve deneysel olarak MILD koşulları altında metan yakıtını kullanmışlardır. Metana H_2 ilavesinin NO_x emisyonu üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda NO_x emisyonunun önemli ölçüde değişmediğini tespit etmişlerdir.

İlbaş ve Karyeyen [15] model bir yanma odasında birbirinden farklı bileşenlere sahip yakıtları sayısal olarak modellemişlerdir. Modelleme sonucunda ise emisyonları karşılaştırmışlardır. Yanma modeli olarak PDF/Mixture Fraction, radyasyon modeli olarak P-1, türbülans modeli için k- ϵ kullanılmıştır. Yanma sonuçları incelendiğinde hidrojen zengin yakıtlar için NO_x emisyonlarının daha yüksek olduğu, bu durumun ise ikincil ve seyreltme havası beslenerek aşıldığı belirlenmiştir.

Hashemi vd. [16] simetrik ve ani genişlemeli bir yanma odasında yakıt olarak metan kullanmışlar ve sonucun NO_x emisyonundaki değişimine etkisini incelemişlerdir. Yanma modeli olarak β -PDF, türbülans modeli olarak k- ϵ kullanılmıştır. Türbülansın artmasıyla NO emisyonu önemli ölçüde azalmıştır. Yanma odası tasarımındaki hava giriş açısının artırılması da NO emisyonunun azaltılması üzerinde etkili olmuştur.

Yılmaz ve İlbaş [17] yeni bir yanma odası tasarımı geliştirmişlerdir. Bu yanma odasına ise doğalgaz yakıcı bağlamışlardır. Farklı içeriklere sahip yakıtı deneysel olarak yakmışlardır. Yanma sonucunda ortaya çıkan sıcaklık ve emisyon değerlerini, tasarladıkları yanma odasının dikey duvarlarına açtıkları delikler sayesinde ölçmüşlerdir. Sonuçlar incelendiğinde yakıt içerisindeki hidrojen konsantrasyonu artırıldıkça yanma odası sıcaklıkları ve NO_x emisyonların yükselme olurken CO ve CO_2 emisyonlarında ise azalmalar görülmüştür.

İlbaş ve Karyeyen [34] deneysel çalışmalarında kalorisi düşük olan kömürler üzerinde çalışmışlar ve gazlarını hidrojen ile karıştırarak deney sonuçlarını paylaşmışlardır. Isıl

gücü 10 kW olan yakıt, eşdeğerlik oranı $\phi=0,83$ olan hava ile gerçekleştirilen yanma tepkimesinin sonuçlarını almışlar ve yanma odasını ışınsa ve eksensel olarak incelemişlerdir. Tepkimelerinde H_2 gazı eklediklerinde sıcaklık seviyesinin arttığını gözlemişlerdir. H_2 gazı ilave ettiklerinde CO ve CO_2 emisyonlarındaki oranın giderek azaldığını gözlemişlerdir.

Ortiz ve diğerleri [35] gerçekleştirdikleri deneysel ve sayısal çalışmalarında, kısmi olarak ön karışımli bir yakıcı kullanmışlardır. Yakıt olarak metan kullanmışlar ve sıcaklık ve emisyon değerleri üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deney mekanizmalarında yanma odasına oluşturulan alevin su dolu bir kaba temas etmesi sağlanmıştır. Sayısal ve deneysel olarak yapılan her iki çalışmada da ortaya çıkan sıcaklık değerlerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yanma odasına verilen yakıt miktarı artırıldığında , CO emisyonunun da arttığı gözlenmiştir. Termal olarak verimli bir çalışma elde edilmek istenirken, yanma odası çıkışı kesit alanı değiştirilmiştir. 360-390 W aralığında aranan verimliliğin elde edildiği belirtilmiştir.

Zhen, Miao, Leung, Cheung ve Huang [36], 2016 yılında yaptıkları deneysel çalışmada Bunsen Alevi üzerinde odaklanmışlardır. Ön karışımli olarak yanma odasına gönderilen yakıt içerisindeki O_2 sıcaklığı yükseltmek suretiyle, yanma sonucunda meydana gelen emisyonları irdemişlerdir. CH_4 ve H_2 yakıtına N_2 ve CO_2 ilave edilerek yapılan deneylerde sıcaklığın ve hızın arttığı gözlemlenmiştir. Giriş sıcaklığının artırılması sonucunda NO_x seviyesinde artış gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak N_2 ve CO_2 olabileceğini düşünerek bunların ilavesi olmayan yakıtı yanma odasına göndermişler ve NO_x seviyesinin daha da fazla yükseldiğini görmüşlerdir. CO_2 ekleyerek yapılan deneylerde NO_x yükselmesi diğerlerine göre en düşük seviyede CO emisyonu ise en yüksek seviyeye gelmiştir. Eklemeye yapılmayan yakıtta elde edilen CO emisyonu diğerlerine göre en düşük seviyede elde edildiği belirtilmiştir.

İlbaş ve Yılmaz [37] CH_4 ve H_2 yakıtı üzerine ısı güç olarak 40 kW ve %20 daha fazla hava ile deney gerçekleştirmişlerdir. Model sabitini 1 aldıklarında deney sonuçlarının sayısal analiz sonuçları ile yakınlık gösterdiği belirtilmiştir. Kullandıkları üç farklı yakıt arasında tükenme hızı en yüksek olan H_2 olduğu belirtilmiştir. Bunun sebebi olarak yanma hidrojeninde daha erken başladığı ve tepkime zamanının daha kısa sürmesinden kaynaklandığı belirtilmiştir.

Mardani ve Tabejamaat [38] yakıt olarak metan gazı kullandıkları sayısal analizde yakıt içerisinde farklı miktarlarda karıştırılan hidrojen gazının yanmasını incelemişlerdir. Ön karışımsız yanma odası tercih etmişler ve EDC yanma modelini kullanmışlardır. Yakıt içerisindeki hidrojen miktarı artırıldığında, alevin süpürülmesinin azaldığı, termal yoğunluğun gözlemlendiği belirtilmiştir.

İlbaş, Yılmaz ve Özkan [39] hidrojen ve hidrokarbondan oluşan yakıtın yanmasını incelemişler ve yanma sonucunda oluşan NO_x emisyonları üzerinde durmuşlardır. Sıcaklık değerleri en yüksek hidrojen gazında kaydedilirken, en yüksek NO_x emisyon değeri bununla eşdeğer olarak kaydedilmiştir.

Fackler, Karalus, Novosselov, Kramlich ve Malte [40] yakıt olarak metan, azot ve karbon dioksiti karıştırmışlar ve bu yakıt içerisinde metan sabit tutulurken diğer iki gazın miktarı üzerinde değişiklikler yaparak gerçekleştirdikleri çalışmada NO_x emisyon değerlerinde azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Saqr, Aly, Sies ve Wahid [41] metan yakıtının yanmasını gerçekleştirmek için gönderilen hava üzerindeki türbülans yoğunluğunun NO_x emisyonuna olan tesiri incelenmiş, yoğunluk artırıldığında emisyonların ters orantılı olarak düştüğü belirtilmiştir.

Araştırmanın yöntemi

Çalışmada Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 de gösterilen yanma odası içerisinde, metan-hava karışımı yanabilir bileşen, konvansiyonel ve renksiz dağıtılmış yanma şartlarında beslenerek yanma ve emisyon karakteristikleri sayısal olarak araştırılmıştır. Yakıt-hava karışımı, yanma odasına girmeden önce ön karışımı olacak şekilde yanma odasına beslenmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma koşullarının başarılmaması için, hava bünyesindeki oksijen konsantrasyonu %21'den %2 lik değişimleri azaltılarak, %21, %19, %17 ve %15 olacak şekilde karışım oranları belirlenmiştir. Bu işlem için seyreltici olarak N_2 kullanılmıştır. Yanma şartları için hava fazlalık katsayıları $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,7$ olarak belirlenmiş olup bu hava fazlalık katsayılarının başarılmaması için gerekli O_2 miktarları seyreltme ile de değiştirilmemiştir. Bu oranlarda, renksiz dağıtılmış yanmanın da etkisiyle yanma hızı yavaşlamış, yanmanın karakteristiğindeki değişiklikler ve yanma sonunda ortaya çıkan emisyonlar üzerindeki etkiler araştırılmıştır. Çalışmada, özellikle küçük hacimli bir yanma odası tercih edilmiştir.

Buradaki temel sebep, hacim küçültülerek gaz türbinlerinin ısı yoğunluk (thermal intensity) değerlerini temsil edilmesi ve renksiz dağıtılmış yanmanın gaz türbinleri için uygulanabilirliğinin araştırılmasıdır. Yanma odası içerisindeki reaksiyon hızının düşürülmesi ile birlikte içesirkülasyonun daha iyi seviyelere çıkarılması hedeflenmiştir. İç resirkülasyonun iyileştirilmesi sonucunda yanma sonunda yanmamış karbonların tekrar yanma odası içerisine dönerek reaksiyona girmesi beklenmektedir. Bu sayede CO ve CO₂ emisyonlarında azalma ve reaksiyon hızındaki azalmaya bağlı olarak ani sıcaklık yükselmelerinden kaçınılarak NO_x seviyelerinde düşüş beklenmektedir. Gaz türbinlerinin çalıştırıldığı ısı yoğunluklar, kullanım alanına göre değişmekle birlikte 25 MW/m³.atm değerlerinin üzerinde olup çalışmada kullanılan yanma odasının ısı yoğunluğu, 10 kW'lık ısı gücü de değerlendirildiğinde yaklaşık 70 MW/m³.atm civarında olacak şekilde seçilmiştir.

Araştırmanın önemi

Günümüzde enerji çeşitli santrallerde tüketilen fosil yakıtlar sayesinde üretilmektedir. Fosil yakıtlar içeriğinde bulunan elementler sebebiyle yanma tepkimesi sonrasında çeşitli emisyonlar meydana çıkarmaktadır. Bu emisyonlar sonraki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir. Temel olarak emisyonlar doğada olmaması gereken zararlı bileşenlerdir ve doğayı çeşitli şekillerde kirletmektedirler.

Bir çok filtreleme yöntemi ile bu emisyonların zararlı etkilerinden kurtulmak istense de tam anlamıyla başarı sağlanamamaktadır. Bu sebeple araştırmacılar “emisyonları azaltmak için ne yapabiliriz ?” sorusunu sormaya başlamışlar ve renksiz dağıtılmış yanma prensibi ortaya çıkmıştır. Renksiz dağıtılmış yanma bir çok farklı yöntemle sahip olmakla birlikte çalışmamızda ön karışımli olarak yanma odasına gönderilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Renksiz dağıtılmış yanma sonucunda tüm emisyonlarda çok büyük düşüşler beklenmekte ve verim artışı sağlanmak istenmektedir. Bugüne kadar yapılan ve bu çalışmada dahil olmak üzere çalışma sonuçları emisyonlardaki düşüşün göz ardı edilemeyecek seviyede olduğunu göstermiştir.

Araştırmamızda renksiz dağıtılmış yanma şartları %21, %19, %17 ve %15 oksijen konsantrasyonları için uygulanmıştır. Hava fazlalık katsayısı olarak stokiometrik şart olan

$\lambda=1,2$ ve gaz türbinlerinin çalışma aralığına yakın olması açısından $\lambda=1,7$ seçilerek modellemeler gerçekleştirilmiştir. Modellemeler sonucunda gerçekleştirilen analizler sonucunda yanma odası içerisindeki hızlarda ve sıcaklıklarda düşüş, emisyonlarda ise bunlara bağlı olarak düşüş hedeflenmektedir.

2. YAKITLAR VE YANMA

Yakıtların yanması sonucu ortaya çıkan emisyonların doğamıza olan etkilerinden bahsedilmektedir.

2.1. Yakıtlar

Doğada çeşitli formlarda bulunan (katı, sıvı, gaz) ve havadaki oksitleyici olarak bilinen oksijen ile etkileşimi sonucunda elde edilen enerjiden farklı alanlarda faydalanmak amacıyla kullanılan maddelere yakıt denilmektedir. Yakıtların temelinde karbon ve hidrojen bulunmaktadır ve bu öğelerden türemiş olanlardan enerji üretilebilmektedir. Yakıtlar iki farklı gruba ayrılmaktadırlar. Birinci grup olarak doğal yollarla elde edilen yakıtlar için doğal yakıtlar ikincisi ise kimyasal işlemler sonucunda elde edilmiş olan yapay yakıtlardır. Gruplarına ve hallerine göre tüm yakıtlar birbirinden farklı niteliklere sahiptir [20] .

2.1.1. Katı yakıtlar

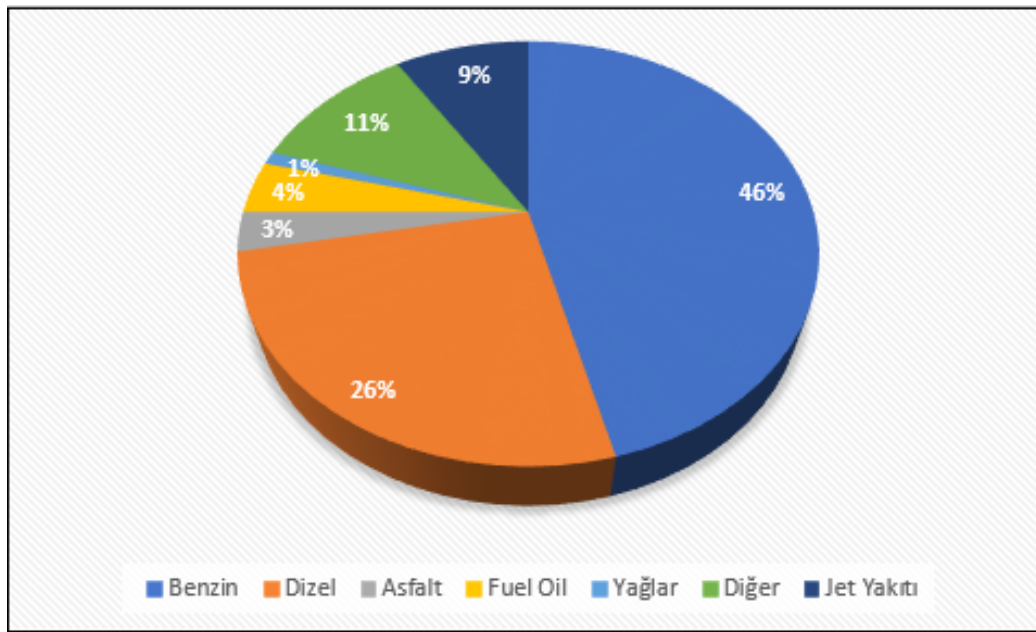
Katı yakıtların temelinde odun ve madenden elde edilmiş olan kömürler bulunmaktadır. Bu yakıt türleri kendi içlerinde üç ana başlıkta incelenmektedirler. Bunlar doğal katı yakıtlar, yapay katı yakıtlar ve biyokütle katı yakıtlardır. Doğal katı yakıtlara en önemli örnek fosillerin yıllar içinde dönüştüğü kömürlerdir. Fosillerin oluşum aşamalarına göre kömürleri ise antrasit, taş kömürü, esmer kömür, linyit, turba olarak sıralayabiliriz.

Yapay katı yakıtlara örnek olarak doğal yakıtlardan elde edilen tüm kok ve odun kömürleri örnek olarak verilebilir.

Biyokütle katı yakıtlara gelindiğinde tarım ve orman ürünlerinden mamul elde eden fabrikaların atıklarından elde edilenler ,biyokütle ve ağaç ürünlerinden üretilen briket, palet gibi yakıtlardır. Katı yakıtların yanıcı özelliği kimyasal bileşenlerinde bulunan odun hidrojen ve karbondan gelmektedir. Kömürlerden antrasiti incelediğimizde %2-3, odun kömürlerini incelediğimizde ise %45-46 oranında oksijen içerdiği görülmektedir [21] .

2.1.2. Sıvı yakıtlar

Günümüzde kullanılan sıvı yakıtların büyük çoğunluğu fosil bir yakıt olan petrolün işlenmesi sonucu elde edilen petrol ve petrol ürünleridir. Doğal ve yapay sıvı yakıtlar olarak iki gruba ayrılmaktadırlar. Doğal sıvı yakıtlar petrolün destinasyonu ile üretilen yakıtlardır. Yapay sıvı yakıtlar ise elde edildikleri kaynağa göre üç farklı grupta incelenmektedirler. Kömür türevi yakıtların destinasyonu ile elde edilenler, ağır petrol ürünlerinden kraking yöntemi ile elde edilenler ve sentez yapılarak elde edilen yakıtlardır.



Resim 2.1. Petrolden elde edilen ürünlerin yüzdelik dağılımı

2.1.3. Gaz yakıtlar

Fosil yakıtların destilasyonu ile Sıvılaştırılmış petrol gazları, LPG, doğalgaz ve hava gazı gibi yakıtlar örnek olarak verilmektedir. Doğalgaz büyük oranda metan ve az oranda diğer gazlardan meydana gelmiştir. Oransa olarak ifade edecek olursak; metan CH_4 (%90-95), etan C_2H_6 (%1-4), propan C_3H_8 (%1-2) ve azot N_2 (%0-4) .

Gaz yakıtlar çıkarıldıkları yerlerden kullanılacakları ve işlenecekleri alanlara taşınabilmesi için boru hatlarına ihtiyaç duymaktadırlar. Diğer yakıt türlerine kıyasla gaz yakıtlar depolama ve taşıma amacıyla sıvılaştırılabilmektedirler [21] .

2.2. Yanma

Yanma; bir yakıt ve bu yakıtın oksidasyonunu sağlayacak olan bir oksitleyicinin (genellikle hava içerisindeki oksijen) bir araya gelmesi sonucu oluşan kimyasal reaksiyondur. Bu reaksiyon esnasında ısı transferi oluşmaktadır. Yanma reaksiyonlarını sınıflandırırken yanma odasına giriş biçimlerine göre sınıflandırma yapılmaktadır. Yakıtın ve havanın farklı kanallardan yanma odasına alınması sonucu oluşan ön-karışimsız yanma, yakıt ve havanın yanma odasına girmeden önce karıştırıldığı ve bu şekilde yanma odasına gönderildiği yanma şekli olan ön-karışimli yanma ve kısmi ön-karışimli yanma olarak üç gruba ayrılmaktadır. Ön-karışimsız yanmaya örnek olarak gaz türbinlerinin bazı versiyonları, dizel motorlar verilebilir [22] .

Yanma reaksiyona giren ve reaksiyon sonucu elde edilen ürünler serbest enerji içerirler. Yanma reaksiyonu sonucu ortaya çıkan enerjiyi hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılabilir [23].

$$H = U + pV \quad (2.1)$$

Denklemde pV mekanik enerjiye, H entalpiye, U ise iç enerjiye karşılık gelmektedir. İç enerji ve entalpinin ölçülebilmesi için standart bir durum seçilmelidir.

$$S_A A + S_B B + S_C C + \dots + S_X X + \dots \quad (2.2)$$

Denklemde S stokiyometrik katsayısı temsil etmektedir.

Genel kimyasal tepkimeler için entalpide oluşan değişimi, tepkimeye girenlerin ve çıkan ürünlerin standart oluşum entalpileri arasındaki fark olarak aşağıdaki denklemde tanımlanmıştır.

$$\Delta H_{298}^\emptyset = \sum S_x \Delta H_{298}^\emptyset(X) \quad (2.3)$$

Bu denklemde $\Delta H_{298}^\emptyset$, klasik şartlar altındaki tepkimenin entalpi değişimidir. S_x , tepkimeye girenler için negatif, tepkime sonrasında oluşan ürünler için pozitif olan stokiyometrik

faktördür. ΔH_{298}^{θ} tepkimeye girenlerin ve tepkime sonu oluşan ürünlerin kJ/kmol biriminde standart oluşum entalpilerini göstermektedir.

Kimyasal bir tepkimenin tavrını bir miktar olarak belirtmek için ürünlerin konsantrasyon ve oran sabitleri şeklinde, kimyasal türlerin konsantrasyonundaki değişim oranını belirten bir oran kanunu denklem (2.4) tanımlanmıştır [24] .

$$-\frac{1}{S_A} \frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{S_B} \frac{d[B]}{dt} = -\frac{1}{S_P} \frac{d[P]}{dt} = -\frac{1}{S_Q} \frac{d[Q]}{dt} = k[A]^a[B]^b \quad (2.4)$$

Denklemde (2.4) k, oran sabitini a ve b tepkimenin derecesini göstermektedir. Oran sabiti k, çoğunlukla konsantrasyon ile bağımsız, sıcaklık ile bağımlı bir ifadedir. Arhenius modelinde belirtecek olursak denklem (2.5) elde edilmektedir.

$$k = A. \exp \left(-\frac{E}{RT} \right) \quad (2.5)$$

Denklemde A, Arhenius faktörünü, E, tepkime aktive etme enerjisini (kJ/kmol), R evrensel gaz sabitini ve T Kelvin cinsinden sıcaklığı göstermektedir.

2.3. Emisyon

Yanma reaksiyonu sonucunda meydana gelen emisyonlar direkt olarak atmosfere karışmakta ve hava kirliliği gibi büyük problemlere sebep olmaktadır. Renksiz dağıtılmış yanma sonucunda ortaya çıkan azot oksit (NO_x), karbondioksit (CO_2), karbonmonoksit (CO), parçacık maddeler ve diğer kimyasal bileşenlerdir. Yanma sonucunda ortaya çıkan emisyonlar çeşitli filtreleme yöntemleri ile azaltılabilmektedir. Ancak tam olarak sıfırlamak için filtrelemekten daha farklı çalışmalar yapılması gerekmektedir. Kirleticileri gruplandıracak olursak yüksek seviyede zararlı olan gazlar CO, NO_2 , SO_3 ve yanmamış hidrokarbonlar iken orta seviyede zararlı gazlar NO ve SO_2 olarak gösterilmektedirler.

2.3.1. Azot oksit oluşumu (NO_x)

Yanma odası içerisinde oluşan ani yüksek sıcaklık bölgelerinde NO_x oluşmaktadır. Ani sıcaklık yükselimi azot oksit oluşumunu desteklemektedir. Bu sebeple çalışmalarda bunu azaltmak hedeflenmektedir. Azot oksit türlerine sırasıyla bakacak olursak, azot mono oksit

(nitrik oksit NO), azot dioksit (NO₂), azot trioksit (NO₃), diazot dioksit (Dimer N₂O₂), diazot trioksit(N₂O₃) azot penta oksit (nitronyum nitrat N₂O₅) gibi farklı kombinasyonlardan oluşmaktadır. Azot oksitlerin tüm türleri kirletici özelliğe sahip olmak ile birlikte azot monooksit (NO), diazot oksit (N₂O) ve azot dioksit (NO₂) en fazla karşılaşılan kirletilecilerdendir.

Isıl NO_x oluşumu

Zeldovich tarafından ortaya çıkarılan ısı NO_x oluşumu, alev sıcaklıklarının pik yaptığı anlarda ortaya çıkan yüksek ısı enerjisi sonucunda yakıtta ve havada bulunan azotun oksitlenmesini gösterir. Isıl NO_x oluşum mekanizması oksijenin kullanılabilirliğine ve pik alev sıcaklığına önemli derecede bağlıdır [22].



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



Zeldovich mekanizmasında adımlardan en zoru N₂ bağlarının koparılmasıdır. Bu nedenle (2.8) reaksiyon oran kontrollü olarak gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Reaksiyonlardan (2.8) ve (2.9) NO oluşumu açısından yanma şartlarına bakılmaksızın önemlidir. Bunlara ek olarak Lavoie tarafından aşağıda verilen reaksiyon önerilmiştir.



Fakir yanma şartlarında (2.10) denklemi önemsenmese de zengin yanma şartları için bu reaksiyon önemlidir. Bunun sebebi ısı NO oluşumu sadece yüksek sıcaklıklarda (T >1800 K) görülmektedir. İlavenen sıcaklığın her 90 K artışında NO seviyelerinde yaklaşık iki katlık bir artış görülmektedir.

Reaksiyonlar (2.8),(2.9),(2.10) ısı mekanizmaya ilişkin reaksiyonlardır. Reaksiyon (2.8) radikallerin tekrar bileşimini tamamladığı ve sıcaklığın belirttiği yanma sonrası ürünlerden NO' nun neredeyse tamamen oluşumunda belirleyici adım oranı olarak kabul görmektedir. Reaksiyon (2.8), (2.9) ,(2.10) için oran sabitleri şöyledir [23] .

$$k_1 = 1,8 \times 10^8 \exp \left(-\frac{38370}{T} \right) \quad (2.11)$$

$$k_{-1} = 1,8 \times 10^7 \exp \left(-\frac{425}{T} \right) \quad (2.12)$$

$$k_2 = 1,8 \times 10^4 T \exp \left(-\frac{4680}{T} \right) \quad (2.13)$$

$$k_{-2} = 3,8 \times 10^3 T \exp \left(-\frac{20820}{T} \right) \quad (2.14)$$

$$k_3 = 7,1 \times 10^7 \exp \left(-\frac{450}{T} \right) \quad (2.15)$$

$$k_{-3} = 1,7 \times 10^8 \exp \left(-\frac{24560}{T} \right) \quad (2.16)$$

Yukarıdaki denklemlerde k_1 , k_2 ve k , reaksiyon (2.8), (2.9) ve (2.10) için ileri oran sabitlerini, k_{-1} , k_{-2} ve k_{-3} ise ters oran sabitlerini göstermektedir. Reaksiyon (2.10)'un aşağıdaki durum için ihmal edilebileceği kabul edilirse;

$$k_2[O_2]_{eq} = k_3[OH]_{eq} \quad (2.17)$$

Isıl NO mekanizması ile NO oluşum oranı aşağıdaki denklemde verilmektedir [23] .

$$\frac{d[NO]_T}{dt} = \frac{2[O]\{k_1 k_2 [O_2][N_2] - k_{-1} k_{-2} [NO]^2\}}{k_2 [O_2] + k_{-1} [NO]} \quad (2.18)$$

Yukarıda verilen denklemde bütün kimyasal türlerin birimi mol.m^{-3} ' tür. O_2 ve N_2 konsantrasyonları, yanmada hesaplanır. Reaksiyon (2.6) ve (2.7)' ye göre O atomunun konsantrasyonu aşağıdaki gibi elde edilmektedir [23] .

$$[O] = 36,64 T^{1/2} \exp \left(-\frac{27123}{T} \right) \quad (2.19)$$

Isıl NO oluşması için çok sayıda evrensel NO modeli önerilmiştir. N atomu için daimi durum yaklaşımı kabul edilir ve O atomunun konsantrasyonu denge göz önüne alınarak hesaplanacağı kabul edeilirse maximum NO oluşum oranı aşağıdaki gibi elde edilmektedir [23] .

$$\frac{d[NO]_T}{dt} = 1,45 \times 10^{17} T^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{69460}{T(K)}\right) (O_2)_{eq}^{\frac{1}{2}} (N_2)_{eq} \quad (2.20)$$

Verilen denklemde NO oluşum yüzdesi yanmış gaz sıcaklığına (T) yoğun şekilde bağlı olduğu ve yanmış gazlarda O₂ konsantrasyonuna ve basınca daha az bağımlı olduğu görülmektedir [22] .

2.3.2. Karbon monoksit (CO) oluşumu

Yanma sonucunda meydana gelen ürünlerin içerisinde CO' nun ortaya çıkmasında iki neden bulunmaktadır. Birincisi yanma havasının yeterli olmaması sebebiyle eksik yanma ya da hava yakıt karışımının yeterli şekilde gerçekleşmemesi sebebiyle ortaya çıkan CO emisyonudur. İkinci sebebi olarak da yanma odasındaki sıcaklığın aşırı yüksek değerlere ulaşması sebebiyle CO emisyonunun oluşmasıdır. Bu asıl sebepler dışında yakıtın bileşiminde bulunan CO emisyonunun tam olarak yanmadan yanma odasından çıkması da emisyonun oluşmasının sebepleri arasında gösterilmektedir.

2.3.3. Karbon dioksit (CO₂) oluşumu

Yeterli hava bulunan ve yakıt-hava karışım oranının beklenen seviyelerde sağlandığı tüm yanmalarda ürünler arasında karbon dioksit bulunur.

2.4. Metan ve Hidrojen Metan Karışımlı Yakıtlar

2.4.1. Hidrojen

Hidrojen yenilenebilir bir enerji kaynağı değildir ancak birincil enerji kaynaklarını kullanarak su, fosil ve biyokütle yakıtlarını hammadde olarak kullanarak üretilebilen yapay bir yakıttır [22] .

Hidrojen üretilirken kullanılan yöntemler arasında su buharının iyileştirmesi ile, foto süreçler ile, termokimyasal süreçler ile, atık gazların saflaştırılması ile, elektroliz ile eldesi örnek olarak verilebilir. Günümüzde doğalgazın yoğun olarak kullanılması sonucu ortaya çıkan atık gazın içerisindeki hidrojenin reformasyonu ile elde edilmektedir. Suyun içerisinde bulunan hidrojen ve oksijen elektroliz ile ayrıştırılarak elde etmek de mümkün olmak ile beraber hem ekonomik olmaması hem de suyun önemli bir yaşam kaynağı olması sebebiyle diğerlerine oranla daha az tercih edilmektedir. Son zamanlarda kullanımı giderek artan güneş enerjisinden biyoteknolojik yöntemlerle hidrojen elde edilmesi üzerinde de araştırmalar ve çalışmalar devam etmektedir [22] .

Hidrojen temiz bir enerji kaynağı olmak ile birlikte kullanımında büyük engellerle karşılaşmaktadır. Kütlesel yoğunluğu nedeniyle uçucu bir yapıda olan hidrojeni depolamak üretim maliyetlerini artırmaktadır.

2.4.2. Metan

Günümüzde enerji kaynakları arasında en önemli yeri doğal gaz tutmaktadır. Doğal gaz ise bir çok farklı elemandan oluşmaktadır. Bunlardan en önemlisi ise metandır. Doğada bulunan ve en kararlı yapıda olan bu hidrokarbon yanma yönünden çok önemlidir. Yanma deneylerinde , ateşleme çalışmalarında sıklıkla tercih edilen yakıtların başında gelmektedir. Kolay tutuşması ve yanmasının yanı sıra yanma sonucunda kül bırakmaması ve duman oluşturmaması sebebiyle önemlidir.

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

Akış gerektiren mühendislik sistemlerinin tasarım ve analizini yapabilmek için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar deney ve hesaplama dır. Deneyler geleneksel olarak test edilmek istenen modelin oluşturulmasını sağlarken, hesaplama kısmı analitik olarak ya da hesaplamalı olarak diferansiyel denklemlerin çözümünü içerir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğı (HAD) bilgisayar üzerinde simülasyonlar oluşturarak akışkanlar dinamiğı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonları kapsayan sistemlerin analizini yapmaktadır.

Modern mühendislik çalışmalarında deneysel çalışmalar ve HAD analizleri birlikte yürütölür. Bu sayede en doğru sonuç almaya çalışılmaktadır. Eski zamanlara kıyasla HAD' in günümüzde daha da yaygınlaşmaya başlamasının temel sebepleri arasında bilgisayar işlemcileri ve ekran kartlarındaki hızlı gelişim gösterilebilir. Bu sistemde yapılan analizler kuvvetli bilgisayarlara ihtiyaç duyduğu için günümüzde kullanımı ve analizlerin derinliğı daha da artmaktadır. Kullanıldığı alanlara bakacak olursak tüm taşıtların aerodinamiğı, araçlarda kullanılan içten yanmalı motorların yanma odalarındaki yanma, tıp alanında insan vücudundaki damarlarda akış gerçekleştiren kan analizlerine kadar yaygın bir yelpazeden bahsedilebilmektedir [25] .

Günümüzde yapılmakta olan araştırmalarda kompleks geometriye sahip sistemlerin analizinde HAD, araştırmacıların elini büyük oranda rahatlatmaktadır. Eğer HAD kullanılmısaydı deneme yanılma metodu ile prototipler üretilecek ve ideal geometriye ulaşmak için maddi ve manevi harcamalar gerekecekti. Ancak HAD kullanılarak, araştırmalar için ideal geometriye ulaşana kadar çizimler, modellemeler ve analizler yapılarak yaşanacak kayıpların önüne geçilebilmektedir.

HAD araştırmalarda büyük faydalar sağlamasına rağmen bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Reaksiyonlara giren akışkanların karmaşıklığı gibi temel sebeplerden ötürü doğru sonuçlara ulaşabilmek için bazı modüllerin çalışmalara entegre edilmesi gerekmektedir. Ön karışımli olarak yapılan yanma analizinde, yanma odasına girmeden önce karıştırılan yakıt ve havanın yanma odasına girdikten sonra oluşan yanma esnasında rastgele oluşan türbölansı analiz etmek için çeşitli modüllere ihtiyaç duyulmaktadır. Ön karışımli yanma modellemeleri , ön karışımli yanma modellerine göre modellenmesi ve analiz edilmesi daha zordur [26]. İdeal sonuçlara ulaşabilmek için, reaksiyona giren tüm

türlerin kütle ve entalpi değişimleri ile taşıma denklemlerinin geometriye uygun küçük parçalara bölünerek yinelenme sayısı ile birlikte çözümlenmek istendiğinde karmaşık hale gelebilir. HAD' ın en önemli faydalarından birkaçı olarak düşük maliyetli olması, fiziksel bir yakıt yada enerji kaynağına ihtiyaç duymaması sebebiyle zaman ve enerji bakımından daha verimli olması ve herhangi bir fiziksel işlem gerçekleşmediği için çevreci olması sayılabilir.

3.1. HAD Yetenekleri ve Avantajları

HAD, geniş içerikli yapısı yardımıyla yanma reaksiyonlarını analiz etmek ve görsel sonuçlar almak için önemli bir metot haline gelmiştir. Yanma çalışmalarında bir prototip yapılmadan önce burada detaylı çizimler ve analizler yapılarak hatasız prototipler yapılması deney sonuçlarındaki hata payını minimuma indirmektedir.

Oluşturulan geometrilerde ağ yapısını oluşturarak (mesh) modellemenin her alanındaki analiz sonuçları hakkında bilgi alabilmeyi sağlamaktadır. Ağ yapısı, oluşturulan geometrinin tamamı üzerinde küçük küçük prizmalar oluşturulma işlemidir. Bu prizmalar sayesinde analizin doğruluğu artmaktadır. Ne kadar küçük parçalara ayrılırsa o kadar detaylı ve doğru sonuçlar elde edilecektir [25] . Ancak mesh sayısını artırdıkça bilgisayarımızın işlemci gücüne bağlı olarak analizin çözümlenme süresi de artacaktır. Yani mesh sayısı ile analiz süresi arasında doğru orantılı bir ilişki söz konusudur [27] .

3.2. HAD Bileşenleri

Had kodları yapısal olarak karmaşık bir tasarıma sahiptir. Bu yapı sistemsel olarak birbirleri ile iletişim ve etkileşim halinde bulunan dallanmış farklı sistemlerden oluşmaktadır. Kullanıcıya bir arayüz ile sunulan bu yapı, girilen bilgiler ile arka planda detaylı işlemler ve kullanılması gereken algoritmaları işleyerek birbirleri ile etkileşime sokar ve bu şekilde işlemlerini gerçekleştirir.

HAD' ın çalışma prensibini üç ana birimde incelemek gerekmektedir. Bunlar ön işlemci, hesaplama ve son işlemci olarak adlandırılmaktadır. Ön işlemci kısmında araştırmacının yapmak istediği işlem ya da hesaplamak istediği problemin parametrelerini belirlediği, geometrisini çizdiği ve ağ yapısını (mesh) oluşturduğu kısımdır. Bu alanda ayrıca duvarlar,

yakıt-hava karışımının girdiği ve egzoz gazlarının çıktığı alanlar, simetri eksenleri ve sınır koşulları da belirlenmektedir. Geometride kullanılan malzemenin tarifi, içerdiği akışkan özellikleri ve modelin seçimi yapılır.

Hesaplama adımına geçildiğinde akış değişkenlerinin ayrıklaştırılması ve cebirsel olarak hesaplanmasını, problem ilgili yöntemler ve yaklaşım teknikleri ile birlikte çözülür [28] .

Bu alanda en yaygın kullanılan metot Sonlu Elemanlar Metodudur [25] . Bilinmeyen parametrelerin çözümlenmesi için doğrusal ve ikinci dereceden denklemler ile işlemler yapılmaktadır. Sistem hata oranını en düşük seviyelere çekmek amacıyla, artıkları bazı fonksiyonlar üzerinde test etmektedir.

Son işlemci adımına gelindiğinde ise, analiz sonuçlarının görsel hale getirilmesi ve grafiklerin elde edilmesi işlemleri yapılmaktadır [25] .

3.3. Temel Denklemler

Bu bölümde fiziksel ve kimyasal etkileşimlerin matematiksel denklemler yardımıyla açıklandığı bölümdür

3.3.1. Kütle korunumu

Kütlenin korunumu yasası (Lomonosov-Lavoisier Kanunu) kapalı sistemlerde gerçekleşen işlemlerin ne olduğuna bağlı olmaksızın sistemdeki kütlenin değişmeyeceğini gösteren kanundur. Kapalı sistemlerde kütle farklı biçimlerde düzenlenebilir ancak üretilemez ya da yok edilemez [29] .

Genel kütle korunum denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(pv) = 0 \quad (3.1)$$

Denklem (3.1) sıkıştırılması mümkün akış sistemlerinde, zamana bağımlı, üç eksenli süreklilik denklemini belirtmektedir. Zamanla yoğunlukta değişim olduğunu ifade etmektedir. Çalışmada kullanılan modellemede işlemler zamandan bağımsız

gerçekleştirildiği için bu bölüm sıfır olarak alınmaktadır. Üç ekseninde düzenlenirse denklemimiz aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\frac{\partial(pu)}{\partial x} + \frac{\partial(pv)}{\partial y} + \frac{\partial(pw)}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

3.3.2. Momentumun korunumu

Momentumun korunumu yasası, kapalı bir sistem herhangi bir dış kuvvetin etkisinde değilse o sistemin toplam momentumu değişmez. Newton'un ikinci yasası temel edinilerek x, y ve z elemanlarına basınç, hacim ve viskozite nicelikleri eklenerek aşağıdaki denklemler elde edilmektedir [30] .

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zx})}{\partial z} + F_{mx} = 0 \quad (3.3)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial(\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\tau_{zy})}{\partial z} + F_{my} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial(\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + F_{mz} = 0 \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde u, v, w hızların eksenlerine göre, p basıncı, τ viskoz gerilme, F_{mx} ise x ekseninde etkiyen kuvveti belirtmektedir. Navier-Stokes momentum denklemlerindeki viskoz gerilim kuvveti, dinamik viskozite ve hız biçiminde tanımlanarak denklem yenilenirse (3.6) , (3.7) ve (3.8) denklemleri dinamik viskozite cinsinden momentum korunum denklemleri elde ederiz [25] .

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{-\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(\mu \Delta u) + F_{mx} = 0 \quad (3.6)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{-\partial \rho}{\partial y} + \text{div}(\mu \Delta v) + F_{my} = 0 \quad (3.7)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{-\partial \rho}{\partial z} + \text{div}(\mu \Delta w) + F_{mz} = 0 \quad (3.8)$$

3.3.3. Enerjinin korunumu

Enerji korunumu en temelde termodinamiğin birinci yasası ile ifade edilmektedir [29] . Termodinamiğin birinci yasası bize doğadaki enerjinin yok edilemeyeceğini, olmayan bir enerjinin de var edilemeyeceğini belirtir. Sadece enerji bulunduğu bir formdan başka bir enerji formuna dönüşerek varlığını devam ettirmektedir. Enerji korunum kanunu ile kütle korunum kanununu birbirinden ayrı değerlendirmek pek mümkün değildir.

Denklem (3.5) basınç ve dış kuvvetlerin neden olduğu türlerin difüzyonuna uğradığı ihmal edilerek yeniden düzenlenecek olursa aşağıdaki denklemi elde ederiz.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{dT}{dx_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum J' h_j' j_j' + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \quad (3.9)$$

T sıcaklığı, τ_{ij} viskoz gerilme tensörünü, J' her bir j' için akıyı, k ısı iletkenliği ve S_h ise kimyasal tepkimenin, radyasyonun ve faz değişiminin sebebiyet verdiği ısı değişimi entalpisi için kaynak terimini belirtmektedir [31] .

3.3.4. Standard k-ε türbülans modeli

Türbülanslı akışları analiz etmek sayısal olarak çok zorlayıcıdır. Bir çok ölçülemeyen ve bilinmeyen terim içermektedir. Hız ve uzunluk ölçeklerini tanımlamak ve hesaplamaları kolaylaştırabilmek için k ve ϵ kullanılmaktadır [25] .

$$v = k^{1/2} \text{ ve } l = \frac{k^{3/2}}{\epsilon} \quad (3.10)$$

Denklem (3.10) da görüldüğü üzere küçük çaplı türbülanslar için ϵ modeli ve büyük çaplı türbülanslar için k ve ϵ ile bağımlı l terimi kullanılmaktadır. Bu terimlerin viskozite ile ilişkisi (3.11) denklemi ile gösterilmektedir [25] .

$$\mu_t = C_\mu \rho v l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.11)$$

Denklemdeki (3.11) μ_t türbülanslı viskoziteyi göstermektedir. C_μ sabit bir katsayıdır. Standart bir k - ϵ türbülans modeli için taşınım denklemleri aşağıda gösterilmektedir.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma k}\right) + 2 \mu_t S_{ij} S_{ij} - \sigma \varepsilon \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma \varepsilon} \Delta \varepsilon\right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2 \mu_t S_{ij} S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.13)$$

Bu denklemlerdeki S_{ij} türbülans gerilmi altında oluşan bozulmayı göstermektedir. Kalan tüm sabitler k - ε modelindeki sabitlerdir. Değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Standart k - ε türbülans modelinde kullanılan sabitler

Sabitler	σk	C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$\sigma \varepsilon$	$C_{2\varepsilon}$
Değerler	1,00	0,09	1,45	1,31	1,93

3.3.5. Eddy dissipation concept (EDC) modeli

Ön karışımli yanma analizleri diğer analizlere oranla daha zor ve karmaşıktır. Bunun sebebi olarak yanma tepkimeleri ve türbülanslı akışlar ince bir alev içerisinde oluşmaktadır. EDC reaksiyon hızı yüksek olan kimyasal reaksiyonlarda, farklı ön karışımli yanma çalışmaları için, sabitlerin değiştirilmesi gerekmeksizin, uyumlu ve doğru sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır [32] .

Modellemede altmış dört adımlı bir kimyasal reaksiyon kullanıldığı için türbülans-reaksiyon modeli olarak EDC kullanılmıştır. EDC modelindeki türbülans aşağıdaki denklemler ile bulunabilir [33] .

$$\gamma^* = 2,137 \left(\frac{\mu \varepsilon}{k^2} \right)^{1/4} \quad (3.14)$$

Denklemden (3.14) μ kinematik viskoziteyi, k ve ε türbülansın kinetik enerji oranını göstermektedir. Zaman ölçeği aşağıdaki denklemden bulunabilmektedir [33] .

$$\tau^* = 0,4082 \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (3.15)$$

EDC modelinde oluşan ve yok olan her tür için molar olarak oranı aşağıdaki denklemden elde edilir [33] .

$$R_i = \frac{\rho (\gamma^*)^2}{\tau^* [1 - \gamma^{*3}]} (\gamma_i^* - \gamma_i) \quad (3.16)$$

Denklemden (3.16) γ_i^* zaman içerisinde tepkime sonrasında meydana gelen türlerin kütle oranını göstermektedir.

3.3.6. Sınır koşullarının belirlenmesi

Çalışmada yakıt olarak metan, seyreltici olarak N_2 oksitleyici olarak da $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık katsayıları için hava kullanılmıştır. $\lambda=1,2$ hava fazlalık katsayısının seçilmesinin temel sebebi, gaz yakıtların genellikle stokiyometrik yanma şartlarından biraz yüksek hava fazlalık katsayılarında (çoğunlukla 1,1 – 1,3) yakılmasıdır. $\lambda=1,7$ hava fazlalık katsayısı sınır şartı ise, hem hava fazlalık katsayısının etkisini gözlemlemek hem de çalışmanın ana amaçlarından birisi olan gaz türbini yanma şartlarını temsil etmektir (gaz türbinleri genellikle daha yüksek hava fazlalık katsayılarında çalıştırılır. Ancak, havanın önemli bir bölümü yanma odasına gönderilmeyerek soğutma amaçlı kullanılır). Tüm modellemeler için ısı gücü 10 kW (bu yanma odası ölçüleri için ısı yoğunluk yaklaşık 70 MW/m³.atm) ve giriş sıcaklıkları oda sıcaklığı olan 300K seçilmiştir. Çalışma kapsamında renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılması için N_2 seyreltici olarak seçilmiş ve yanma odasına girmeden önce, hava bünyesinde belirlenen yüzdelerde karışımı sağlanmıştır. Bu işlem sırasında, çalışma kapsamında belirlenen $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık katsayıları için gerekli O_2 miktarları değiştirilmemiş olup, seyreltici ilavesi ile hava bünyesindeki O_2 konsantrasyonu azaltılmış, bu sayede reaksiyon hızı azaltılarak yanmanın tüm yanma odasına daha uniform bir şekilde yayılması hedeflenmiştir. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkilerini daha iyi anlayabilmek için, yanma odasının altından itibaren belirlenen yüksekliklerde ($h=15\text{mm}$, $h=30\text{mm}$, $h=45\text{mm}$, $h=60\text{mm}$) çizilen hayali çizgilerin olduğu kısımlardaki yanma sonu sıcaklık emisyon karakteristikleri sonuçlarda sunulmuştur.

HAD kodu için gerekli sınır şartlarını temel metan yanması için incelenecek olursa aşağıdaki kimyasal denklem elde edilmektedir.



Denklem (3.17) yakıcı hava olarak alınır ve eşitlik düzenlenirse elde edilecek denklem;



Denklem (3.18) de temel metan yanma denklemi görülmektedir. Sunulan çalışmada hava fazlalık katsayıları $\lambda = 1,2$ ve $\lambda = 1,7$ alınarak analiz yapıldığı için denklemi (3.18) $\lambda = 1,2$ için -yalnızca yanmaya giren ürünler üzerinden işlemlerimizi gerçekleştireceğimiz için denk olmayan şartlarda- tekrar hesaplayacak olursak aşağıdaki denklem elde edilmektedir.



$Q_{\text{yakıt}}$ hesaplaması yapabilmek için aşağıdaki denklem 10 kW güç için kullanmıştır.

$$Q_{\text{yakıt}} \times H = 10\text{kW} \quad (3.20)$$

$$\frac{10\text{kW}}{33906} = Q_{\text{yakıt}} \quad (3.21)$$

$$Q_{\text{yakıt}} = 2,94933 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.22)$$

Burada H metanın alt ısı değeri, 10 kW kullanılan gücü göstermektedir. Q_{hava} , $Q_{\text{yakıt}}$ ve Q_{toplam} sonuçlarını elde edebilmek için aşağıdaki denklemler çözülmüştür.

$$Q_{\text{hava}} = (2,4 \times (1 + 3,76) \times Q_{\text{yakıt}}) \quad (3.23)$$

$$Q_{\text{hava}} = (11,424 \times 2,94933 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}) \quad (3.24)$$

$$Q_{\text{hava}} = 33,693 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.25)$$

Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak aşağıdaki denklemler sayesinde Q_{toplam} elde edilmektedir. Bu bölümde yapılan çözümler %21 O_2 konsantrasyonu için gerçekleştirilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

$$Q_{\text{toplam}} = Q_{\text{hava}} + Q_{\text{yakıt}} \quad (3.26)$$

$$Q_{\text{toplam}} = 33,693 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} + 2,94933 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.27)$$

$$Q_{\text{toplaml}} = 36,64233 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.28)$$

Çizelge 3.2. %21 O₂ içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu

%21 O ₂	
n(mol)	mol fraksiyonu
1CH ₄	0,080489CH ₄
2,4O ₂	0,193171O ₂
9,024N ₂	0,72634N ₂
n _{Toplam} = 12,424	1

Aynı denklemler üzerinden $\lambda = 1,2$ ve %19 O₂ konsantrasyonu için denklemler ve çözümlmeleri aşağıdaki kısımlarda gösterilmektedir.

$$Q_{\text{yakıt}} = 2,94933 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.29)$$

$$Q_{\text{O}_2} = Q_{\text{yakıt}} \times 2,4 = 7,0738 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.30)$$

$$\%19 \times Q_{\text{hava}} = Q_{\text{O}_2} \quad (3.31)$$

$$Q_{\text{hava}} = 7,0738 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \times \frac{100}{19} \quad (3.32)$$

$$Q_{\text{hava}} = 37,2542 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.33)$$

%19 konsantrasyon için Q_{hava} elde denklem (3.33) sonucunda elde edilmiştir. Bundan sonraki adımlarda ise yukarıda yapılan denklemler tekrarlanarak sonuçlar elde edilmektedir.

$$Q_{\text{toplaml}} = Q_{\text{hava}} + Q_{\text{yakıt}} \quad (3.34)$$

$$Q_{\text{toplaml}} = 37,2542 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} + 2,94933 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.35)$$

$$Q_{\text{toplaml}} = 40,20353 \times e^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.36)$$

%21 konsantrasyon için elde edilen Q_{toplaml} sonucunda elde edilen n_{toplaml} ile %19 konsantrasyon için elde edilen Q_{toplaml} sonucu oran orantı ile hesaplanarak elde edilmektedir.

$$n_{\text{toplam}\%19} = \frac{40,20353 \times 12,424}{36,64233} \quad (3.37)$$

$$n_{\text{toplam}\%19} = 13,631 \text{ mol} \quad (3.38)$$

Çizelge 3.3. %19 O₂ içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu

%19 O ₂	
n(mol)	Mol fraksiyonu
1CH ₄	0,0732 CH ₄
2,4O ₂	0,1763 O ₂
10,2315N ₂	0,7505 N ₂
n _{Toplam} = 13,631	1

%21 den başlanarak %15 ye kadar konsantrasyonlarda mol ve mol fraksiyon tablosu aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.4. $\lambda = 1,2$ için %21 den başlayarak % 15' ye kadar O₂ içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu

21%O ₂		19%O ₂	
n(mol)	mol fraksiyonu	n(mol)	mol fraksiyonu
1CH ₄	0,080489CH ₄	1 CH ₄	0,0732 CH ₄
2,4O ₂	0,193171O ₂	2,4O ₂	0,1763O ₂
9,024N ₂	0,72634N ₂	10,2315N ₂	0,7505N ₂
n _{Toplam} = 12,424	1	n _{Toplam} = 13,631	1

17%O ₂		15%O ₂	
n(mol)	mol fraksiyonu	n(mol)	mol fraksiyonu
1CH ₄	0,07083CH ₄	1CH ₄	0,0625CH ₄
2,4O ₂	0,17O ₂	2,4O ₂	0,15O ₂
10,7175N ₂	0,75917N ₂	12,599N ₂	0,7875N ₂
n _{Toplam} = 14,117	1	n _{Toplam} = 15,999	1

$\lambda = 1,2$ için yapılan işlemler sonucu elde edilen sonuçlar çizelge 3.4' te verilmektedir. Sunulan çalışmada $\lambda = 1,7$ için de aynı işlemler yapılmış ve tablosu çizelge 3.5' te gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. $\lambda = 1,7$ için %21 den başlayarak % 15' ye kadar O_2 içeren yakıtın toplam mole göre konsantrasyon değerleri tablosu

21% O_2		19% O_2	
n(mol)	mol fraksiyonu	n(mol)	mol fraksiyonu
1 CH_4	0,0582 CH_4	1 CH_4	0,0522 CH_4
3,4 O_2	0,197861 O_2	3,4 O_2	0,1774 O_2
12,784 N_2	0,74394 N_2	14,7696 N_2	0,7704
$n_{Toplam} = 17,184$	1	$n_{Toplam} = 19,1696$	1
17% O_2		15% O_2	
n(mol)	mol fraksiyonu	n(mol)	mol fraksiyonu
1 CH_4	0,0467 CH_4	1 CH_4	0,0418 CH_4
3,4 O_2	0,1587 O_2	3,4 O_2	0,14 O_2
17,025 N_2	0,7946 N_2	19,84 N_2	0,8182 N_2
$n_{Toplam} = 21,425$	1	$n_{Toplam} = 24,28$	1

4. MATERYAL VE METOD

Çalışmada yakıt olarak metan kullanılmıştır. Metanın yanma reaksiyonu ise, daha iyi sonuç verebilmesi için Ansys – Chemkin kullanılarak ekteki tabloda tüm basamakları ile birlikte sunulmuştur [EK-1]. Yakıt-hava karışımı ön karışımli olarak yanma odasına beslenirken $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık katsayıları ile hava içerisinde oksijen yüzdesi %21 O₂'den, %19 O₂, %17 O₂ ve %15 O₂ oranlarına azaltılarak renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarılmasına olanak sağlanmıştır. Seçilen yanma odası, sınır koşulları, türbülans ve radyasyon modellerinin detayları çalışmanın sonraki bölümlerinde sunulmuştur. Çizelge 3.4. ve Çizelge 3.5.'te reaksiyona giren türlerin mol fraksiyon olarak hesaplaması verilmiştir.

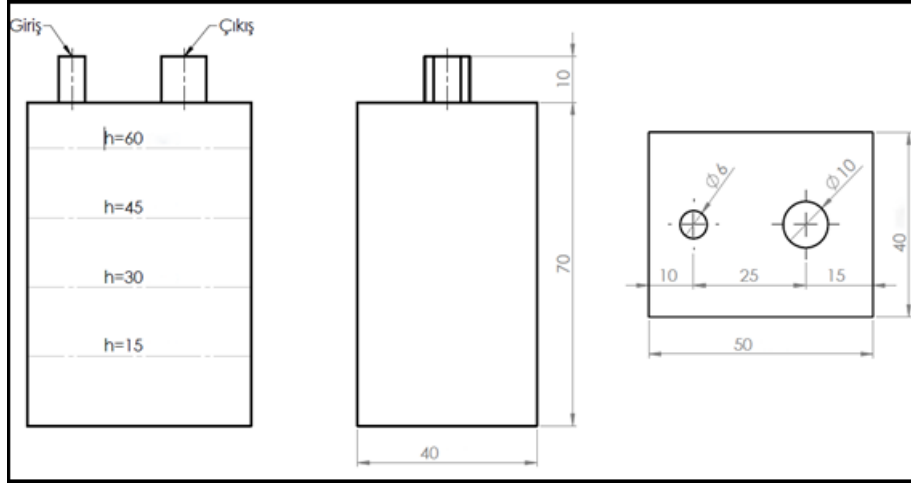
4.1. Model Detayları

Modellemelerin gerçekleştirildiği yanma odasının teknik resmi ve 3 boyutlu görünüşü Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Yanma odası dikdörtgen bir yapıda olup, uygulamadaki yanma odaları (örneğin gaz türbinleri) için daha silindirik bir yapıda tasarım yapılabilecek olsa da literatür karşılaştırması yapılabilmesi için bu çalışma kapsamında bu tipte bir yanma odasının çalışılmasına karar verilmiştir. Silindirik yapıda bir yanma odasının da modellemesi yapılabilir. Bu durum, sonuçlar kısmında görülecek bölgesel resirkülasyonların önüne de geçebilir.

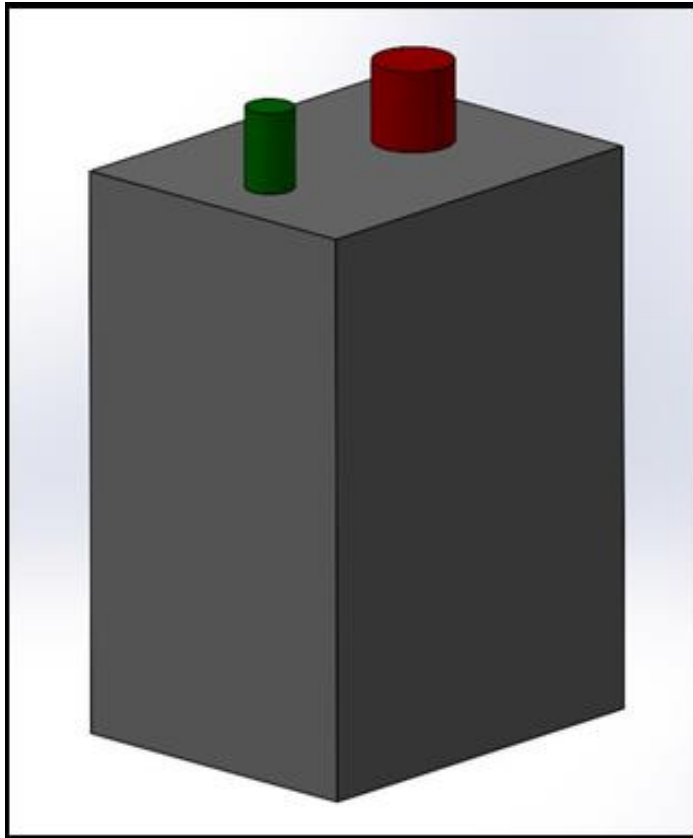
Yanma odasının 70 mm yüksekliği ve bu yüksekliğe ek 10 mm yakıt girişi ve egzoz çıkış bölümü bulunmaktadır. 3 boyutlu çizimde görüleceği üzere yeşil olarak renklendirilmiş olan yakıt girişi için çap 6 mm ve kırmızı olan çıkış bölümünün çapı ise 10 mm olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Giriş ve çıkış bölümleri, merkezleri arasında 25 mm uzaklık bulunacak şekilde yerleştirilmiştir.

Modellemelerin tamamı momentum, kütle, enerji ve türler dahil olmak üzere genel denklemler üzerinden Ansys Fluent Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Programı kullanılarak çözümlenmiştir. Yanma modeli için program üzerine varsayılan Eddy Dissipation Concept'e, Chemkin yardımıyla elde edilen GRI-MECH 3.0 reaksiyon basamakları entegre edilmiştir (64 basamak). Türbülans modeli olarak standart k- ϵ türbülans modeli kullanılmıştır. Radyasyon modeli için ise 1000 K'den fazla alev

sıcaklıklarında hatalı modelleme sonucu almamak için P-1 modeli seçilmiştir. Tüm modellemeler 10 kW ısıt güç (yaklaşık 70 MW/m³.atm'lık ısıt yoğunluk) için yapılmıştır. $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,7$ için elde edilen hesaplama sonuçları Çizelge 3.4. ve Çizelge 3.5.' te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Yanma Odası ön (soldaki), yan (ortadaki) ve üst (sağdaki) görünüş teknik resimleri. Teknik resimdeki tüm birimler milimetre (mm) olarak alınmıştır [18]



Şekil 4.2. Yanma Odasının İzometrik Görünüşü [18]

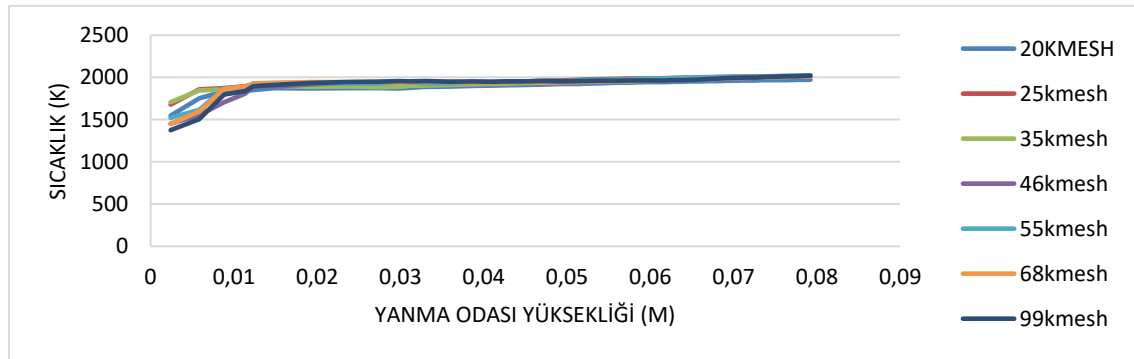
Çalışmada kullanılan yanma odası [18], ilgili referansta kullanılan yanma odası ile benzer olup, bu çalışmada ön-karışımli bir geometrik düzenleme yapılmış ve ısı gücü artırılarak gaz türbini ve/veya uçak motoru yanma odalarının ısı yoğunluk çalışma değerleri simüle edilmiştir. Giriş ve çıkış kısmı, Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilen şekilde tasarlanan yanma odasının en önemli özelliklerinden birisi de yüksek iç resirkülasyon sağlayabiliyor olmasıdır. Renksiz dağıtılmış yanma şartları, yanma sonu ürünlerinin dış ya da iç resirkülasyonu (alevsiz yanma) ile başarılabilirken, bu çalışma ile bu etki hem iç hem de dış resirkülasyon ile araştırılmaktadır. Çalışmada tasarlanan yanma odası [18] referans alınmış, ön karışımli olacak şekilde yeniden tasarlanmış ve yanma hem iç hem de dış resirkülasyonlu (dış resirkülasyon, N_2 ile seyreltme sayesinde simüle edilmektedir) olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekillerde de görüldüğü gibi yanma odası dikdörtgen bir prizma şeklinde, hava-yakıt karışımının gireceği ve çıkacağı iki alan haricinde tamamen kapalı olacak şekilde tasarlanmıştır. Genişliği 50 mm derinliği ise 40 mm’dir. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkisini daha iyi irdeleyebilmek için yanma odasının alt kısmından itibaren farklı yüksekliklerde ($h=15\text{mm}$, $h=30\text{mm}$, $h=45\text{mm}$ ve $h=60\text{mm}$) hayali çizgiler üzerinde yanma ve emisyon karakteristikleri belirlenmiştir.

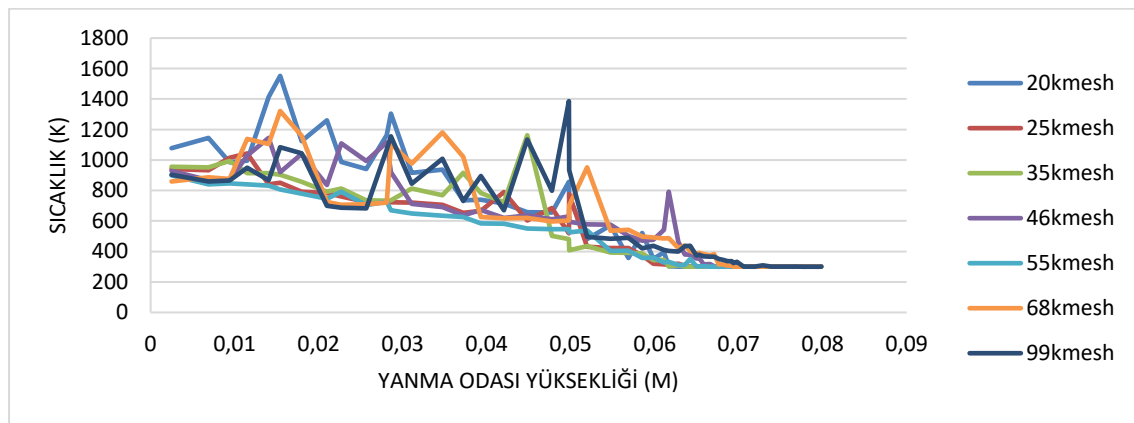
5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Ağ Sayısından Bağımsızlaştırma

Modelleme yapılırken gereksiz fazla ağ yapısı ile çalışmak, hem modellemenin yapıldığı bilgisayar gücü açısından sorun olabilmekte hem de zaman kaybına neden olabilmektedir. Bu nedenle de genellikle modelleme çalışmalarında ağ yapısından bağımsızlaştırma yapmak işlemleri daha kolaylaştırmakta ve devam eden modellemeler için zaman kazandırmaktadır. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmada da yedi farklı ağ yapısı ile modellemeler gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısından bağımsızlaştırma yapılırken 20000, 25000, 35000, 46000, 55000, 68000 ve 99000 ağ sayılı ağ yapıları kullanılarak ayrı ayrı modellemeler gerçekleştirilmiş ve yanma odası alt kısmından yanma odasına kadar ve yanma odası girişinden yanma odası alt kısmına kadar olan sıcaklık değişim profilleri Şekil 3 ve Şekil 5.4'te karşılaştırılmıştır. Bu modellemeler sonucunda 55000 ağ sayılı ağ yapısının uygun ve yeterli olacağına karar verilmiştir.



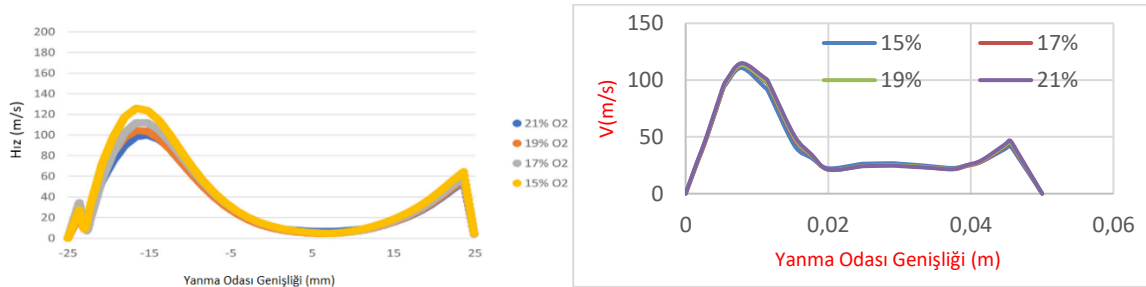
Şekil 5.1. Yanma Odası Alt Kısımından Çıkış Bölgesine Doğru Ağ Sayısının Etkisi



Şekil 5.2. Giriş Bölgesinden Yanma Odası Alt Kısımına Doğru Ağ Sayısının Etkisi

5.2. Modelin Doğrulanması

Yanma modellemelerine başlanmadan önce, daha önce yapılmış aynı ya da benzer deneysel ve/veya sayısal modelleme sonuçları ile karşılaştırma yapmak, yapılacak modellemelerin doğrulanması için esastır. Bu amaçla Ilbas vd. [19] tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada (bu çalışmada benzer bir yanma odası kullanılmıştır) elde edilen modelleme sonuçları ile bu çalışmadaki modelleme sonuçları karşılaştırılmış ve Şekil 5'te gösterilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde yanma ürünlerinin yanma odası içerisindeki hız dağılım profillerinin birbirine oldukça benzediği, ancak, değerler açısından değerlendirildiğinde ise mevcut çalışma için hız değerlerinin biraz düşük olduğu görülmektedir. Buradaki farklılığın temel nedeninin ise Ilbas vd. [19] tarafından yapılan çalışmadaki yanma odasının ön-karışimsız, mevcut çalışmada kullanılan yanma odasının ise ön karışımli yanma odası olması ve bu nedenle yanma odası içerisindeki jet momentumlarının az da olsa farklı olmasıdır.

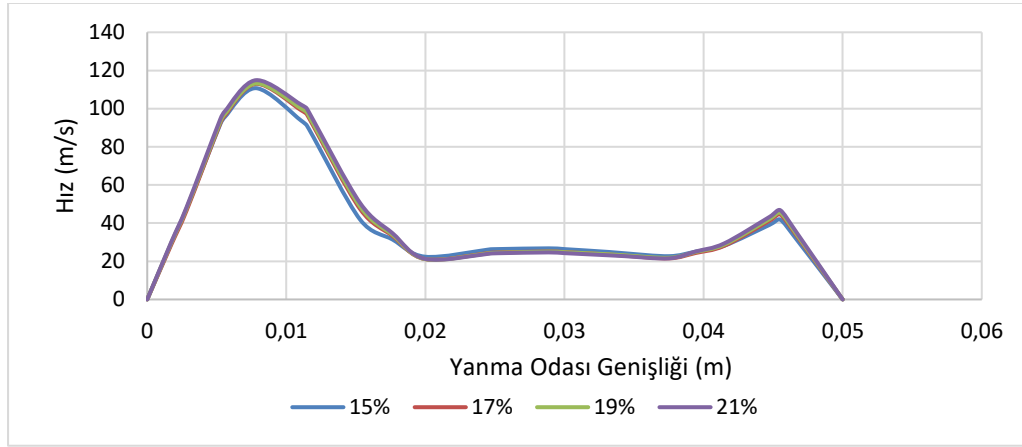


Şekil 5.3. Referans çalışma (soldaki) [19] ile mevcut çalışma [sağdaki] modelinin doğrulanması

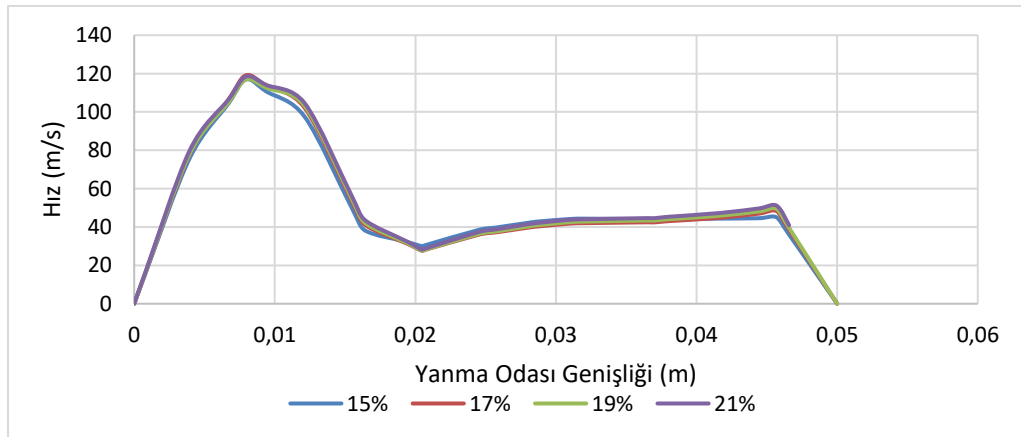
5.3. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız

Hava fazlalık katsayısının $\lambda=1,2$ olarak alınması ve renksiz dağıtılmış yanma şartlarının uygulanması sonucu elde edilen bulguların ilkinde yanma sonu ürünlerinin yanma odasındaki dağılımları için hız modelleme sonuçları, farklı yükseklikler için ($h=15$ mm, $h=30$ mm, $h=45$ mm ve $h=60$ mm) Şekil 6 ila Şekil 9'da sunulmuştur. Şekiller incelendiğinde, yanma odası giriş kesitine denk gelen 0.01 m genişlikte hız profillerinin değerleri daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Yanma odasının orta bölümlerine ilerlendikçe (0.02 m – 0.04 m), yanma sonu ürünleri çıkışa doğru ilk döngüden dolayı hız profillerinin değerleri, tüm oksijen konsantrasyonları için azalmıştır. Ardından, yanma odası çıkışına doğru yönelen yanma sonu ürünlerinin hızları, yanma odası yüksekliği

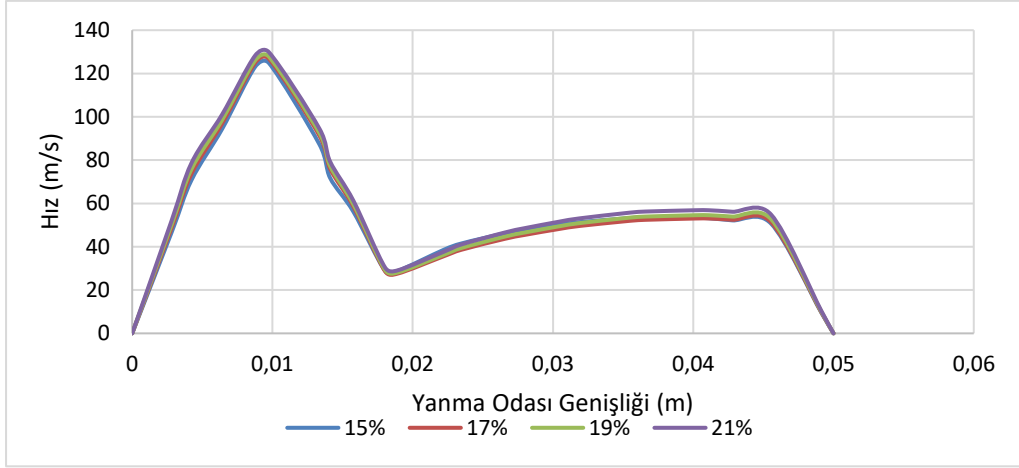
arttıkça tekrar artarak yanma odasını terk etmiştir. Renksiz dağıtılmış yanma şartları için hız profilleri değerlendirildiğinde, yanma odası giriş ve çıkış kısımlarında önemli sayılabilecek bir değişiklik olmamıştır. Yanma sonu ürünlerinin hız profillerini daha iyi anlamak için Şekil 10'da hız konturları gösterilmiştir. Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu azaltıldıkça (seyreltici beslendikçe), Şekil 10'da soldan sağa doğru hız değerlerinin arttığı, özellikle de yanma odası çıkış bölgesinde görülmektedir. Şekil 10'da ayrıca, yanma odası çıkış bölgesinde, yanma sonu ürünlerinin bir kısmının, yüksek iç resirkülasyon nedeniyle yanma odası içerisinde doğru resirküle oldukları da anlaşılmaktadır. İç resirkülasyon ile renksiz dağıtılmış yanmanın başarılmasına katkı sağlanmaktadır.



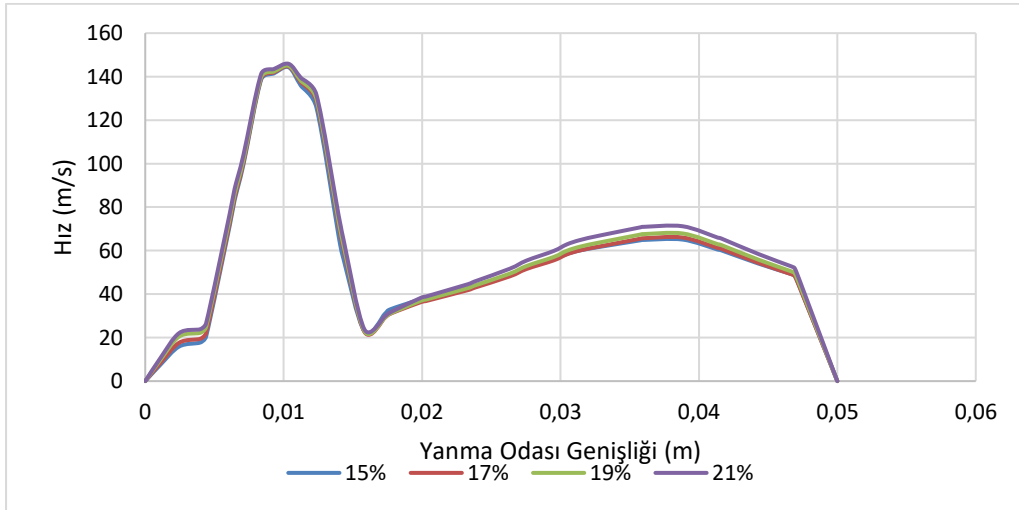
Şekil 5.4. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



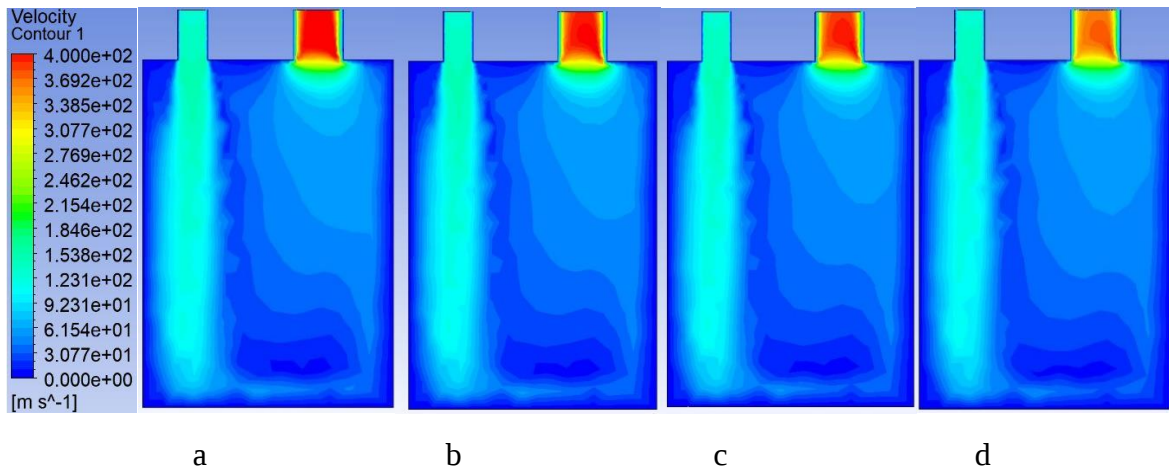
Şekil 5.5. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



Şekil 5.6. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



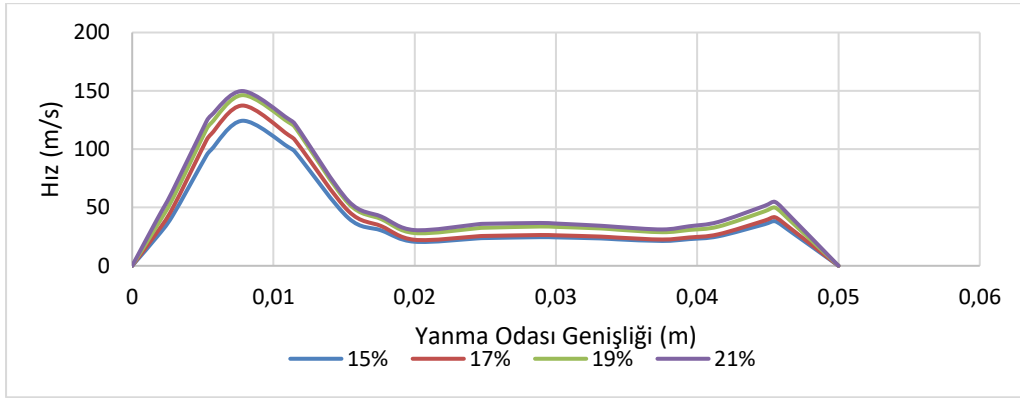
Şekil 5.7. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



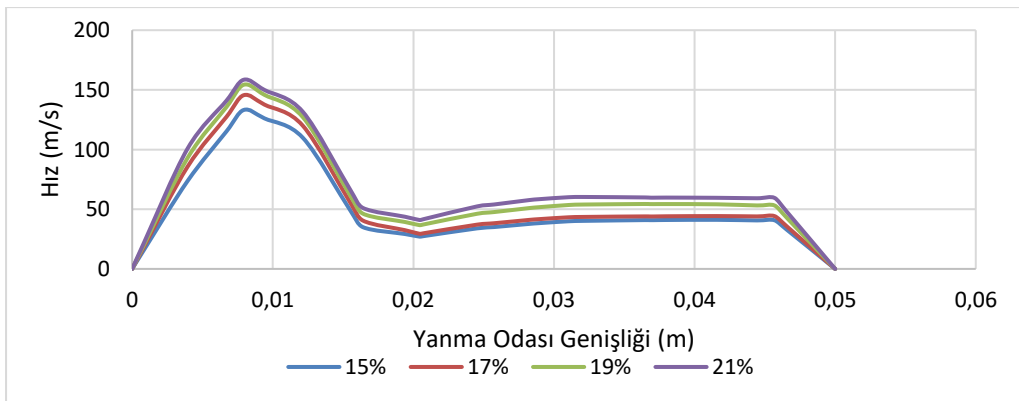
Şekil 5.8. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları

5.4. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Hız

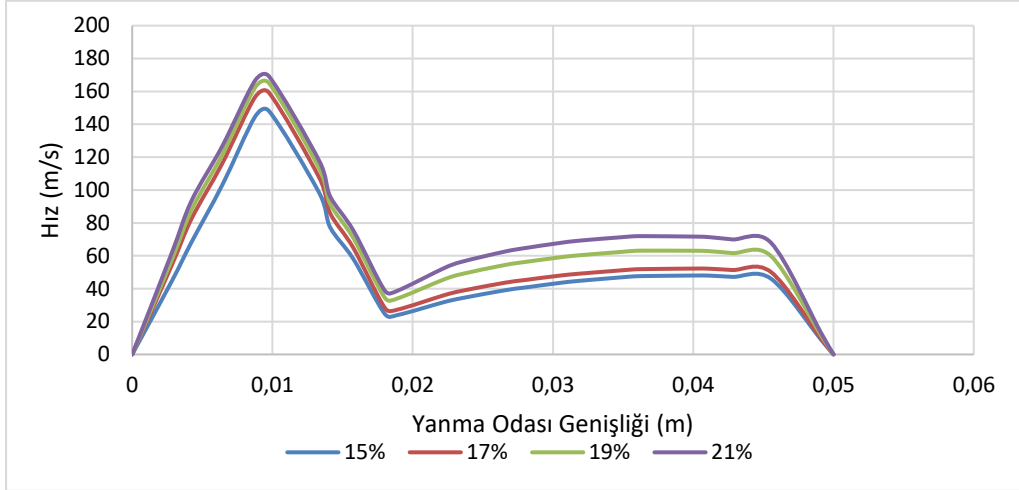
Hava fazlalık katsayısını artırıp, renksiz dağıtılmış yanma şartları uygulandığında ve elde edilen bulgular yeniden değerlendirildiğinde, yanma odası içerisinde tahmin edilen yanma sonu ürünlerinin hızlarında, analiz edilen her yükseklik için artışlar olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.11 ila Şekil 5.14). Bu durumun temel nedeninin yanma odasına gönderilen hava-yakıt karışımının debisinin arttırılmış olduğu değerlendirilmektedir. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarında ise, seyreltici beslenmesinin de etkisiyle yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisindeki hız değerlerinde belirgin bir artış olmuştur. Şekil 15'te is yanma sonu ürünlerinin hız profilleri sunulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanmanın etkisinin yanı sıra iç resirkülasyon etkileri de Şekil 15'te gösterilen yanma sonu ürünlerinin hız konturlarından anlaşılmaktadır.



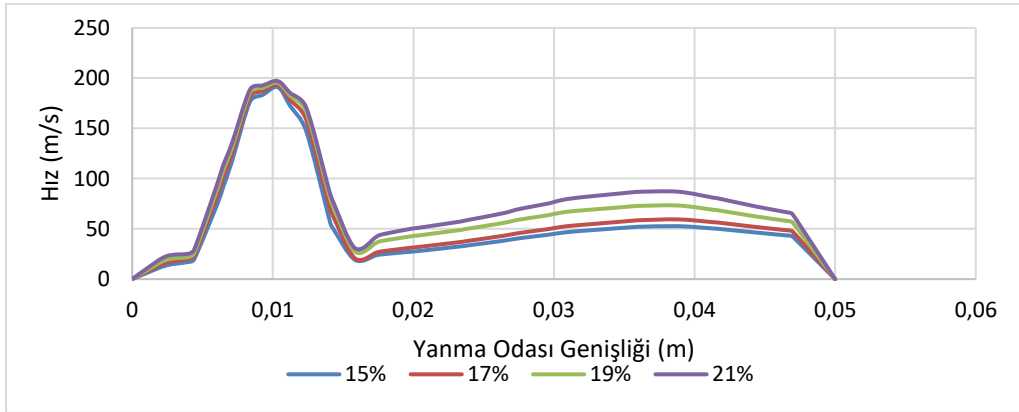
Şekil 5.9. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



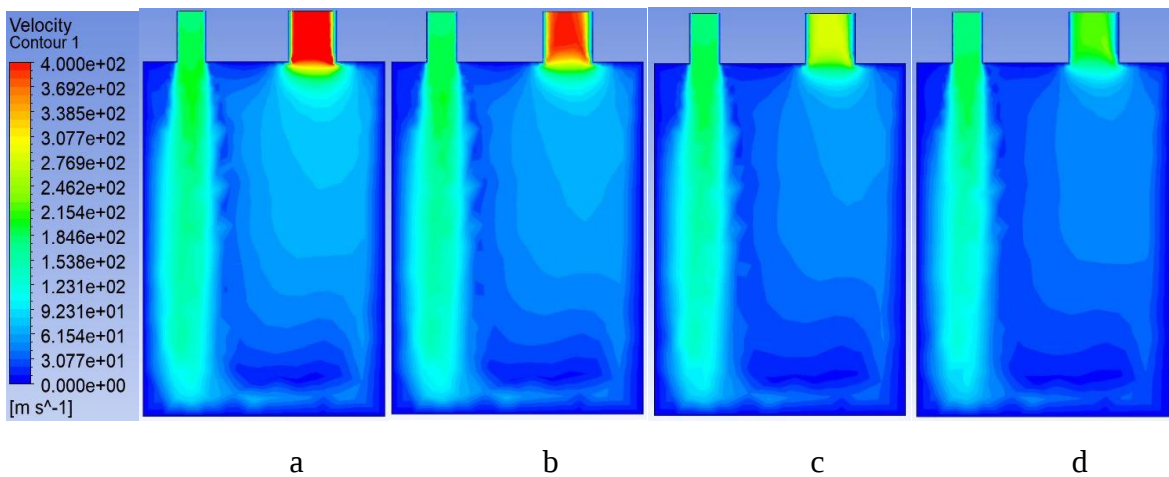
Şekil 5.10. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



Şekil 5.11. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



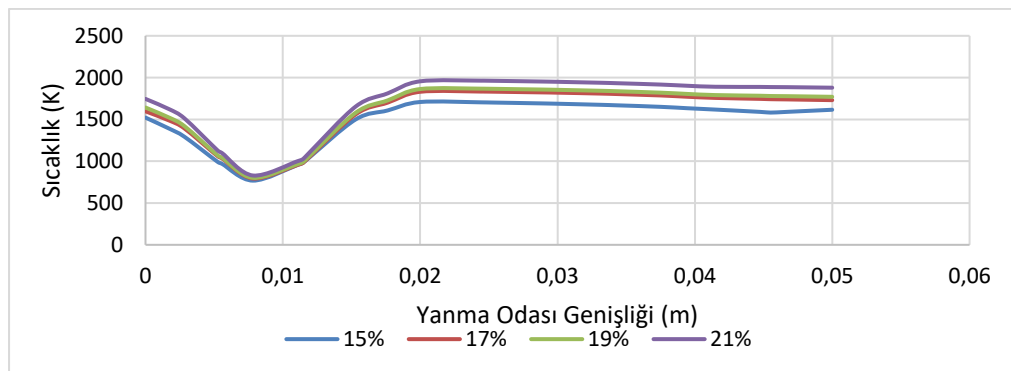
Şekil 5.12. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için yanma sonu ürün hızı değerleri



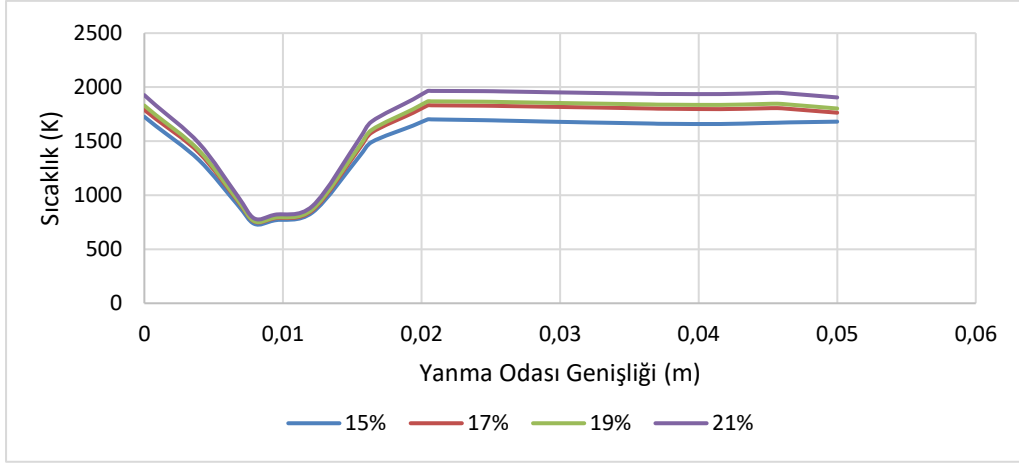
Şekil 5.13. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Yanma Sonu Ürünlerinin Hız Konturları

5.5. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık Dağılımları

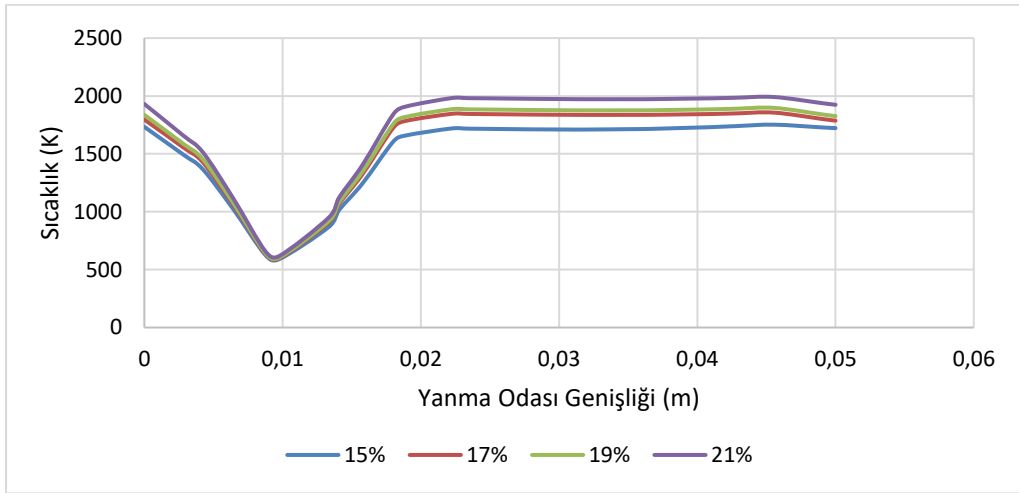
Modellemeler sonucu tahmin edilen yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımları bu bölümde sunulmuştur. Şekil 16 ila Şekil 19'da farklı yüksekliklerdeki yanma odası genişlikleri boyunca sıcaklık profilleri, konvansiyonel (%21 O₂) ve renksiz dağıtılmış yanma şartları için gösterilmiştir. Şekil 16, Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19 incelendiğinde, yanma odasının tamamı için, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçildikçe sıcaklık değerlerinin bir miktar düştüğü anlaşılmaktadır. Bu durumun temel sebebinin, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olabilmesi için yanma odasına beslenen azot seyrelticiisinin etkisi olduğu düşünülmektedir. Sıcaklık değerlerinin, beklenmedik şekilde düşmemesini sağlayan en önemli etken ise, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarılıırken, stokiyometrik olarak hesaplanan ve gerekli olan, hava bünyesindeki oksijen miktarının değiştirilmemesidir. Burada sağlandığı görünen en temel durum, yanma hızının yavaşlatılması ve yanmanın yanma odasına daha efektif bir şekilde yayılımının başarılmasıdır. Bu sonuç, yanma sonu ürünlerinin sıcaklık konturlarının gösterildiği Şekil 20'den daha da iyi anlaşılmaktadır. Şekil 20'de konvansiyonel yanma (en sağdaki) neticesinde elde edilen sıcaklık konturunda, yanma odasının farklı bölgelerinde bazı farklı sıcaklık değerli bölgeler oluşurken, oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonunun azaltılması neticesinde yanma, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına doğru geçmeye başlamış (sağdan sola) ve %15 O₂ içeren oksitleyici için yapılan modelleme sonuçlarına göre sıcaklık dağılımı oldukça uniform bir görüntü çizmiştir. Bu sonuca göre renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olduğu anlaşılmakla birlikte, kirletici emisyon seviyelerine de bakmak ve onların sonucuna göre değerlendirmek daha doğru olacaktır. Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu, alevin sürdürülebilirliği noktasında sorun teşkil edebileceğinden %15'in altına indirilmemiştir.



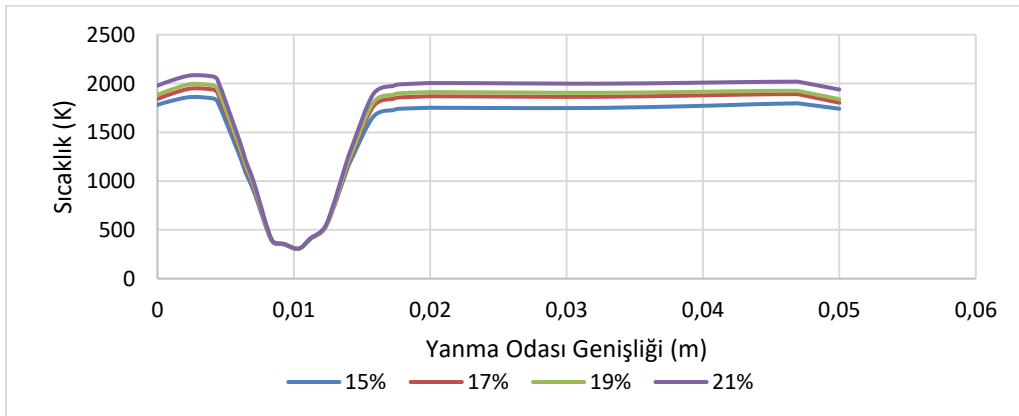
Şekil 5.14. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



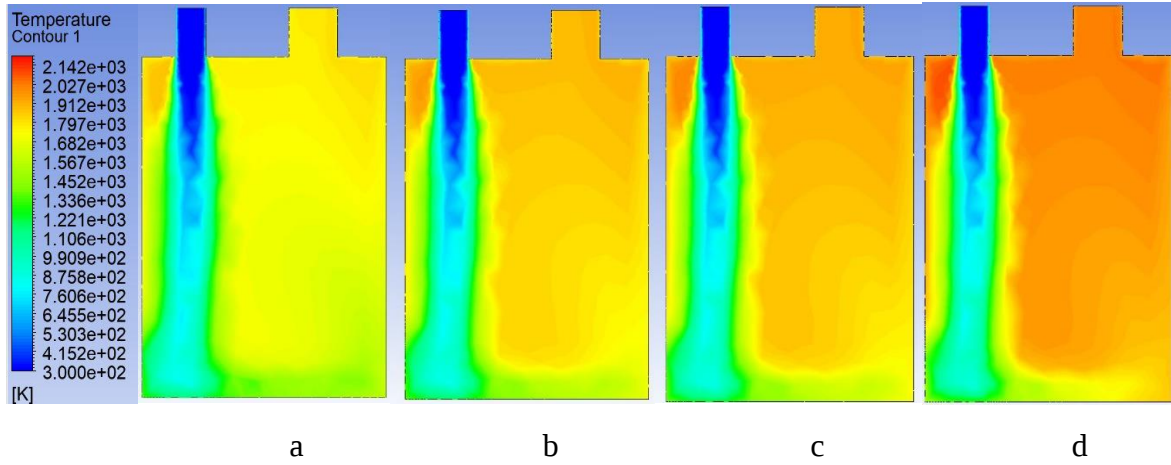
Şekil 5.15. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil 5.16. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



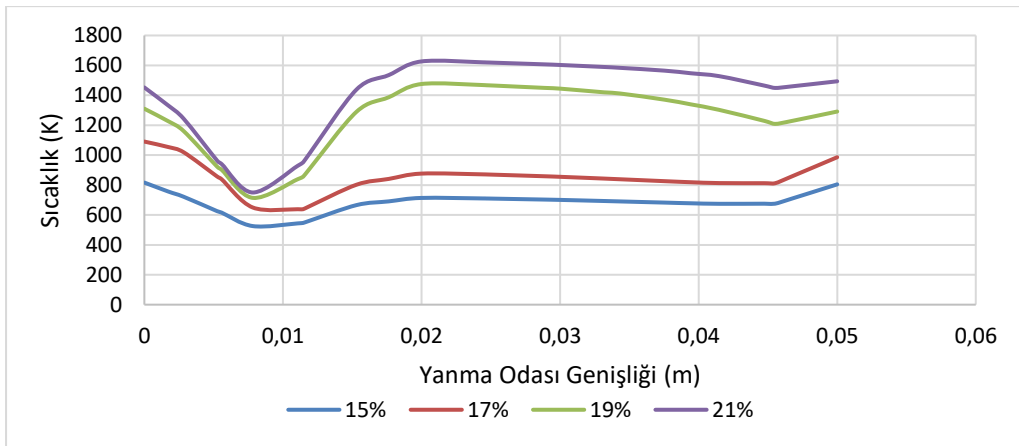
Şekil 5.17. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



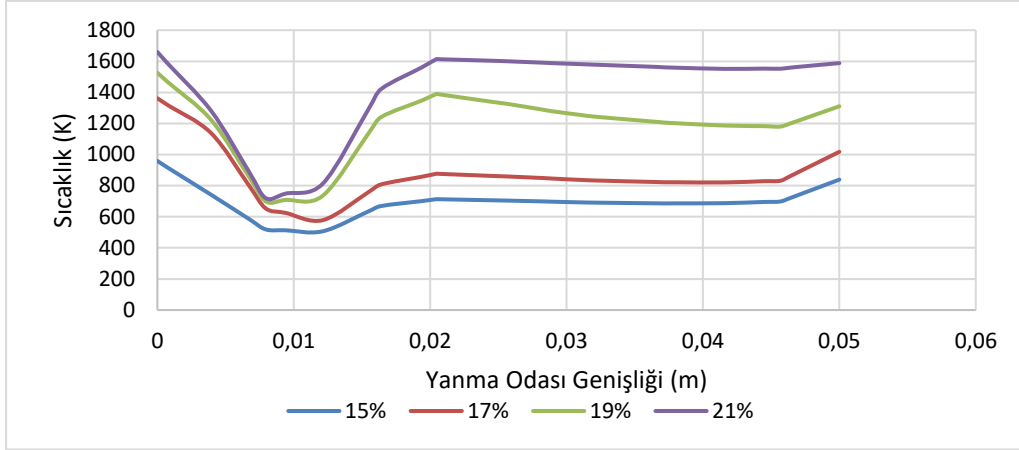
Şekil 5.18. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Sıcaklık Kontur Grafiği

5.6. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin Sıcaklık Dağılımları

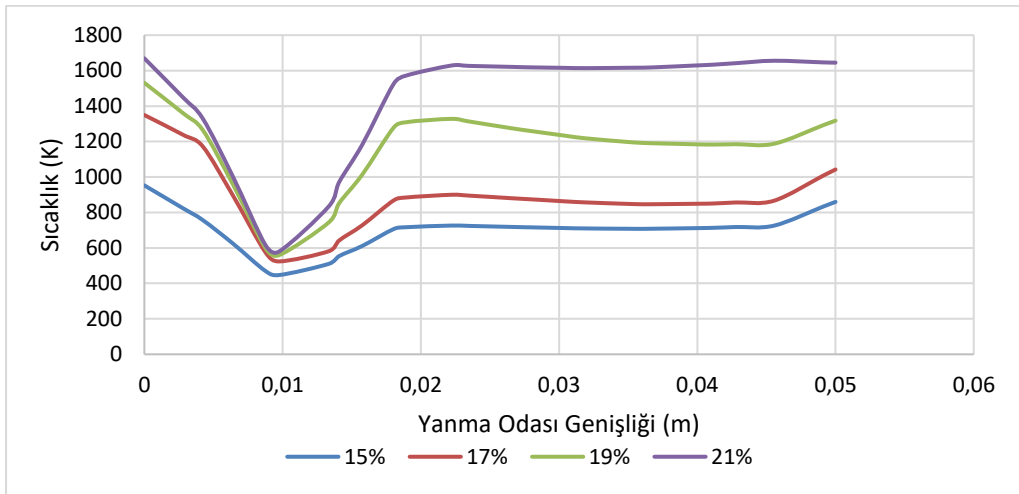
Şekil 21 ila Şekil 24'te 1.7 hava fazlalık katsayısı için tüm yanma şartlarındaki yanma sonu ürünlerinin sıcaklık profilleri verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere, renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçildikçe yanma hızı yavaşlatılmış ve yanmanın tüm yanma odasına yayılımı sağlanmıştır. Bu sonuç Şekil 25'ten de anlaşılmaktadır. Sıcaklık seviyelerinin, bir önceki bölümde sunulan ($\lambda=1.2$) sıcaklık seviyelerinden daha düşük olması, yanma sonu ürünlerinde daha fazla azot bulunmasıdır.



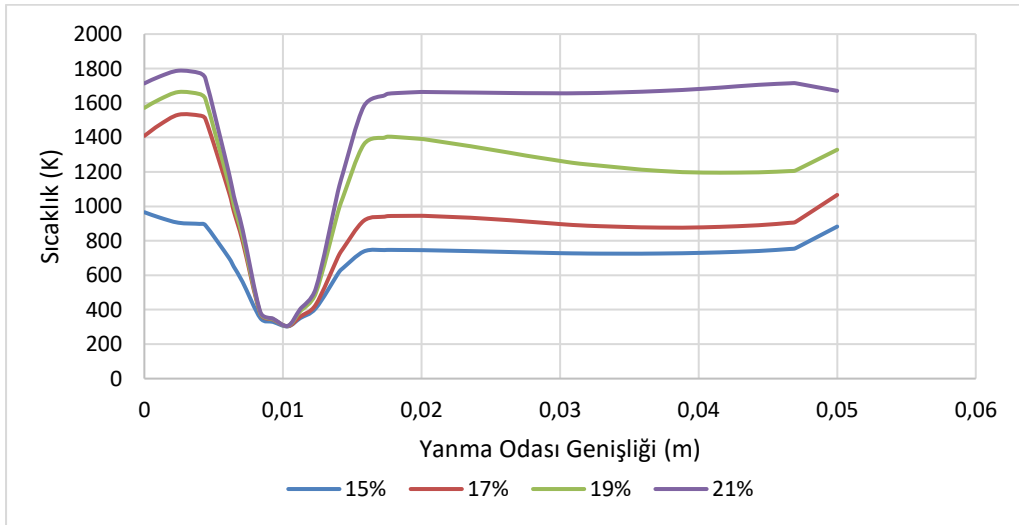
Şekil 5.19. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



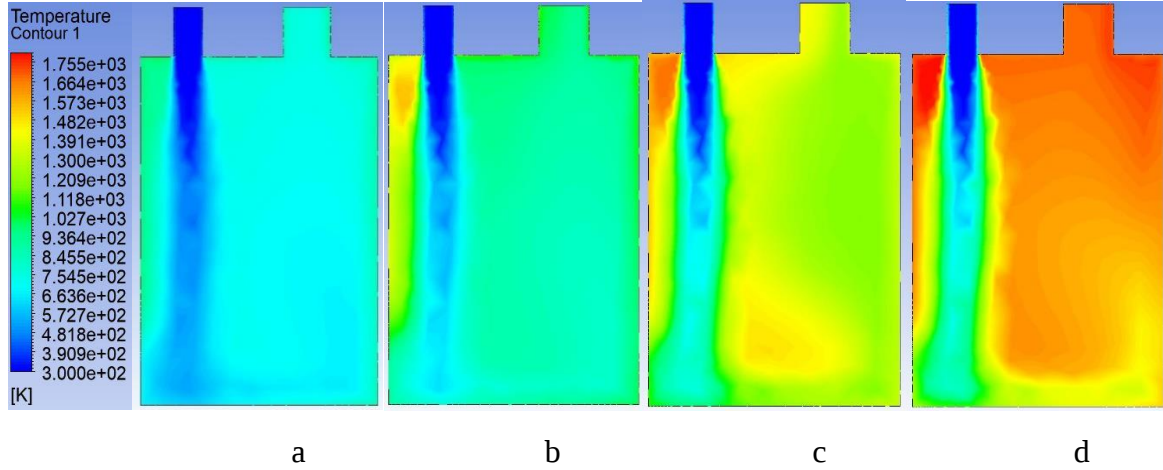
Şekil 5.20. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil 5.21. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



Şekil 5.22. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için Sıcaklık değerleri



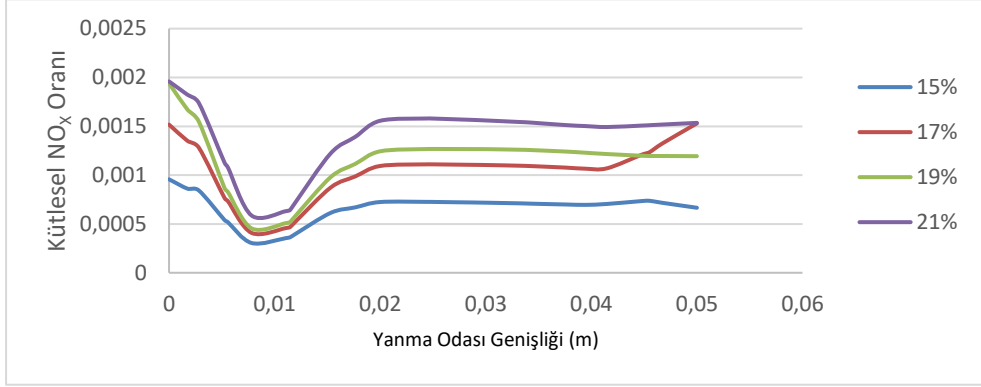
Şekil 5.23. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait Sıcaklık Kontur Grafiği

Şekil 16 ile Şekil 19 ve Şekil 21 ile Şekil 24 incelendiğinde, yanma odası tüm yükseklik grafikleri için yanma odası genişlik değerinin 0 olduğu bölgedeki sıcaklık değerleri genel olarak yüksektir. Öyle ki, bazı grafiklerde bu değer, yanma odası içerisinde elde edilen en yüksek sıcaklık değerinden daha yüksek olarak tahmin edilmiştir. Bu durumun temel nedeni, hem ön karışımli alev yapısının, yanabilir karışımın merkezinden etrafına doğru alev yapısı oluşturması hem de yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odası kullanımı ile yanma sonu ürünlerinin yanabilir yakıt-hava karışımına doğru resirküle edilmesidir.

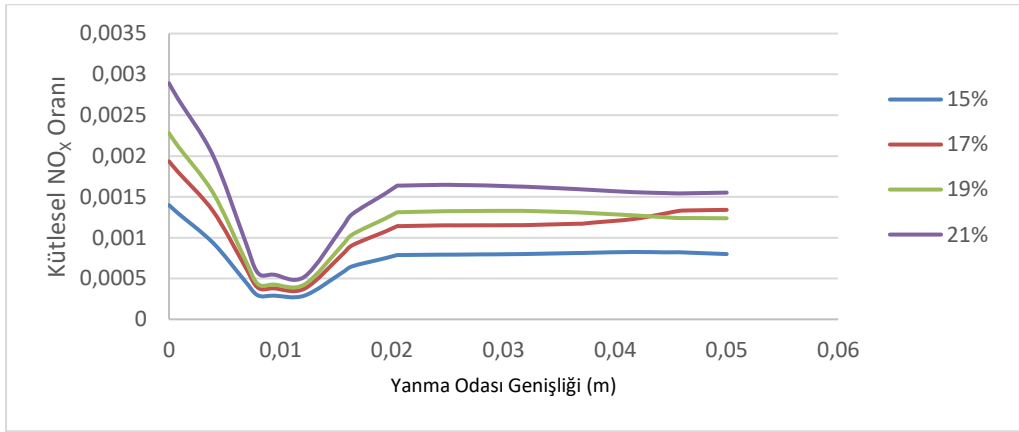
5.7. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO_x

Renksiz dağıtılmış yanmanın önemli başarı kriterlerinden biriside, renksiz dağıtılmış yanma ile reaksiyon hızının yavaşlatılması, bu sayede, yanma odası içerisinde gelişmesi muhtemel, bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasının engellenmesi ve bunun sonucunda da yanma sonu NO_x kirletici emisyonlarının önemli derecede azaltılmasıdır. Buradaki ana kriter, ısı NO_x oluşumunun önemli ölçüde baskılanmasıdır. Şekil 26 ile Şekil 30 yanma sonu NO_x kirletici emisyon profillerini ve NO_x konturlarını göstermektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, yanma odası içerisindeki en yüksek kütleli NO_x oranlarının konvansiyonel yanma şartlarında tahmin edildiği, buna karşın, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça kütleli NO_x oranlarının önemli derecede azaldığı tahmin edilmiştir. Önceki bölümde verilen sıcaklık profilleri ile NO_x profilleri karşılaştırıldığında ise, önemli sayılabilecek düzeyde benzerlik bulunmaktadır. Isıl NO_x ' un, özellikle 1000 K sıcaklıkların üzerindeki sıcaklıklarda daha baskın hale gelmeye

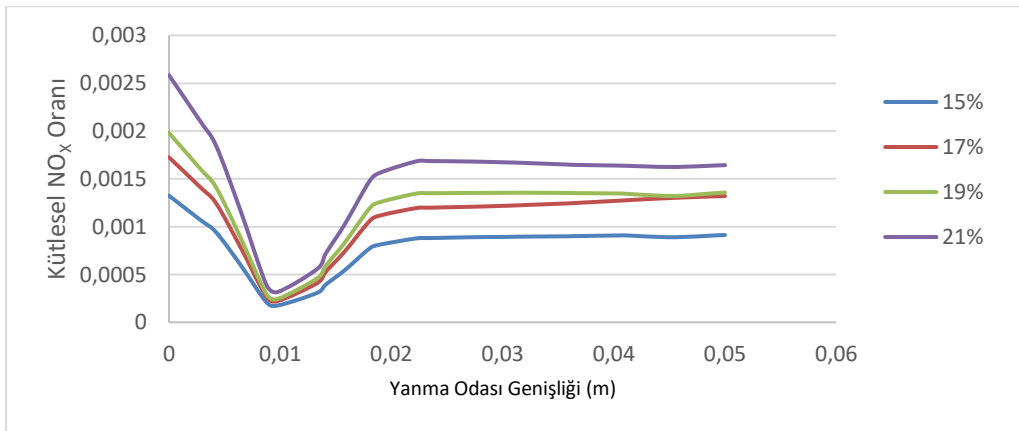
başladığı düşünüldüğünde, NO_x oluşum seviyelerinin, 0.01 m'lik yanma odası genişliğinde 0 değerlerine oldukça yaklaştığı görülmektedir.



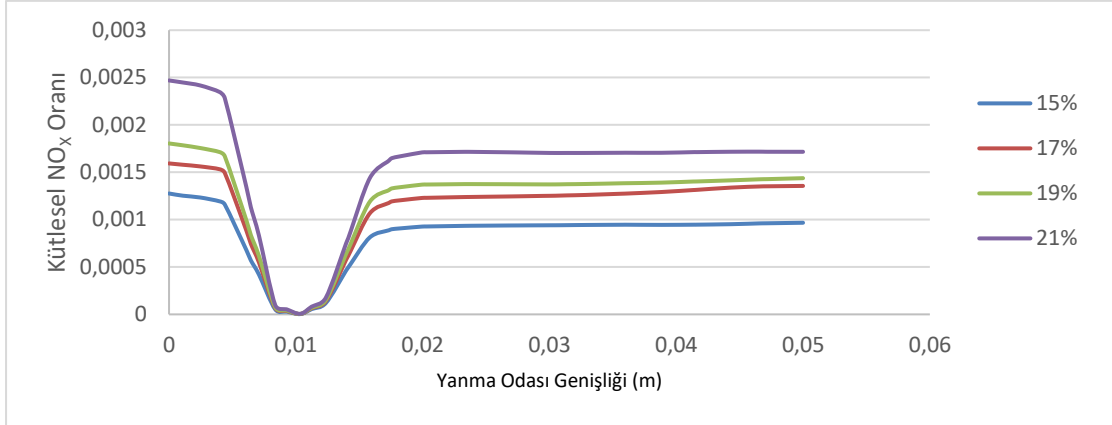
Şekil 5.24. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



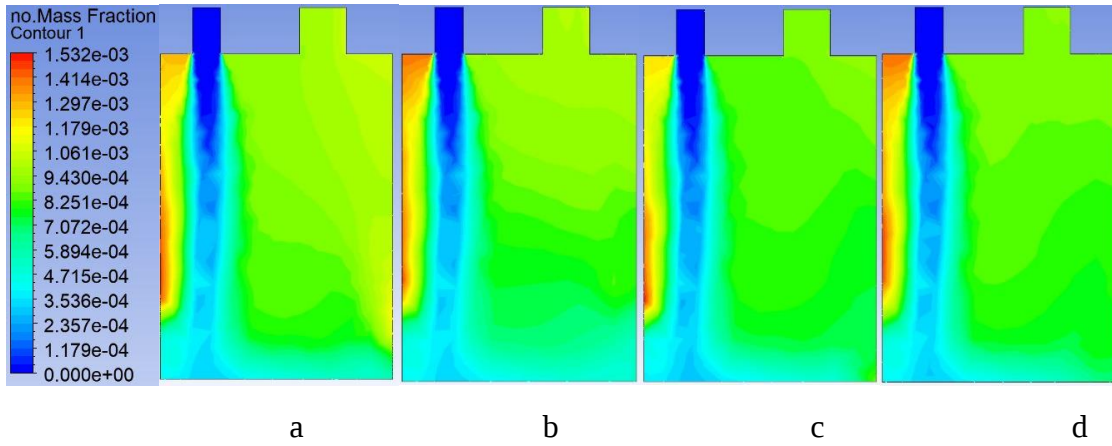
Şekil 5.25. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



Şekil 5.26. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



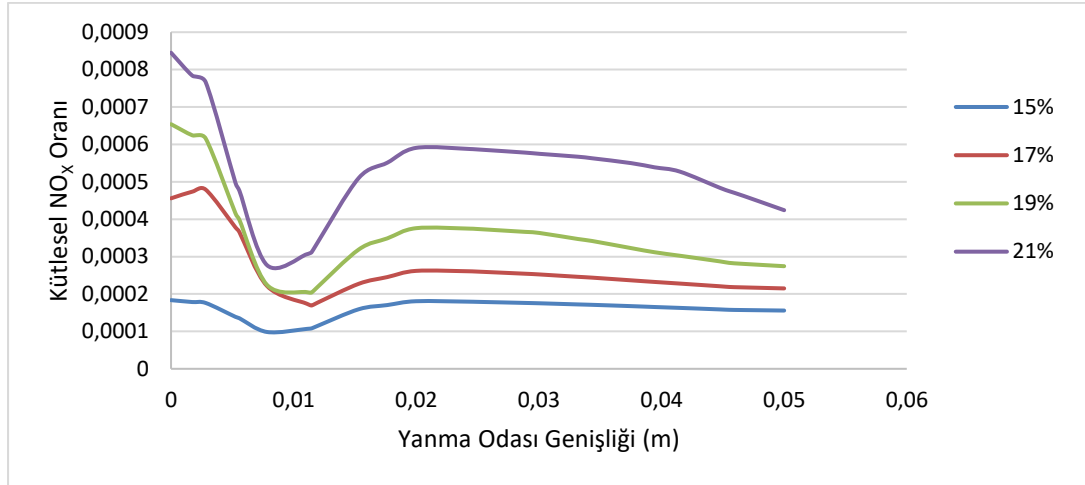
Şekil 5.27. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



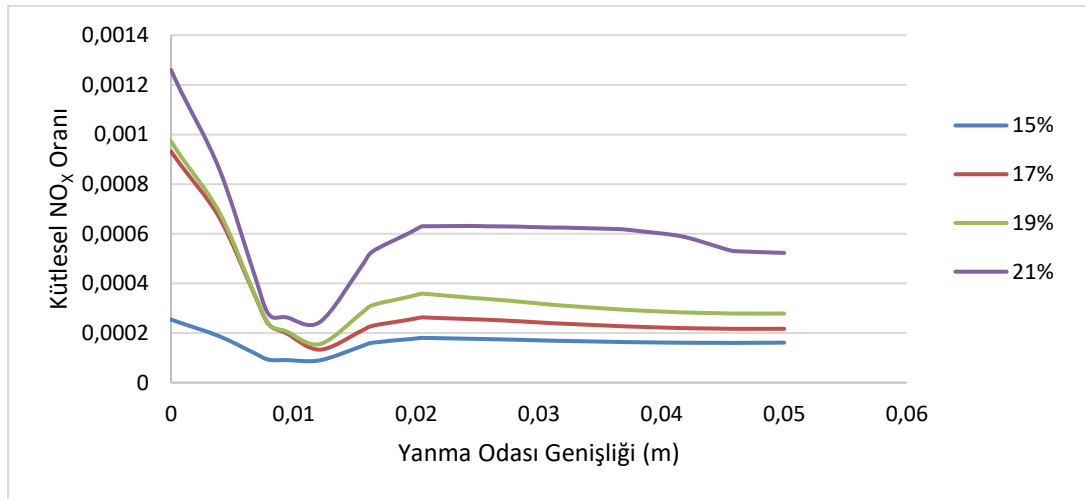
Şekil 5.28. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO_x Emisyon Konturları

5.8. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin NO_x

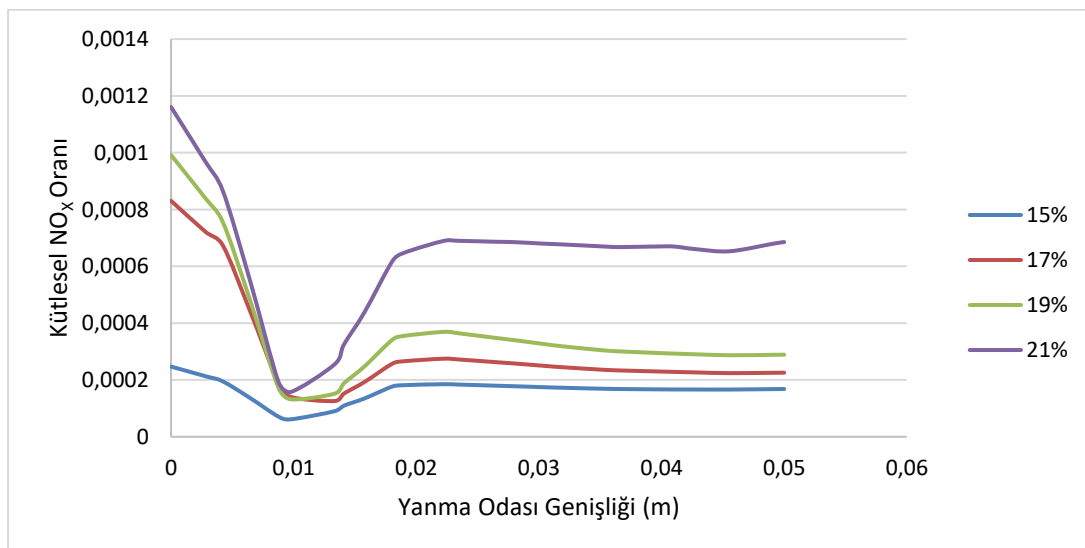
Yanma sonu NO_x kirlenici emisyonlarına hava fazlalık katsayısının arttırılma etkileri bu bölümde incelenmiş ve tahmin sonuçları Şekil 5.31 ile Şekil 5.35 NO_x profil grafiklerinde ve konturlarında sunulmuştur. $\lambda = 1,7$ hava fazlalık katsayısı için yapılan modelleme tahmin sonuçlarına göre, $\lambda=1,2$ hava fazlalık katsayısı için elde edilen kütleli NO_x oranlarının daha da azaldığı tespit edilmiştir. $\lambda = 1,7$ hava fazlalık katsayısı için elde edilen sıcaklık tahmin sonuçları ile paralel profillerin, yanma hızının azaltılması ve buna bağlı olarak bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılmasıyla, oluştuğu ve bunun sonucunda oksitleyici bünyesindeki oksijen oranı azaltıldıkça renksiz dağıtılmış yanma şartlarının başarıldığı tahmin edilmiştir.



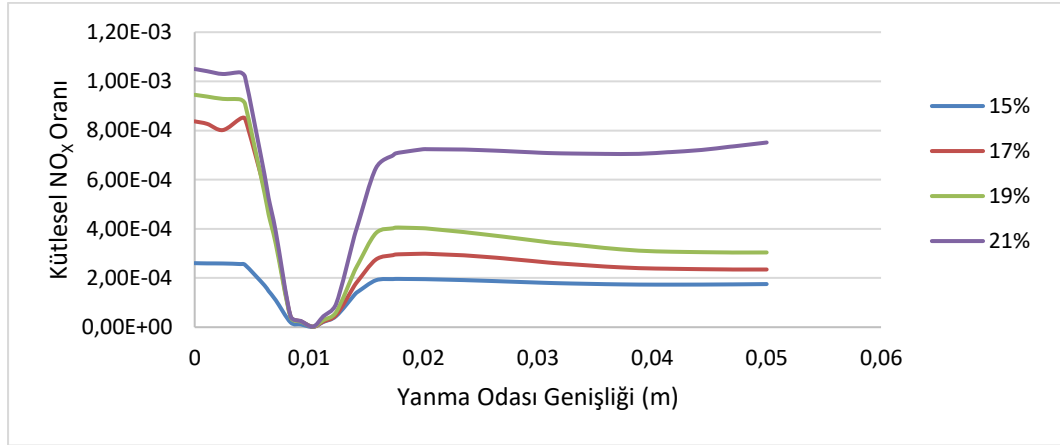
Şekil 5.29. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



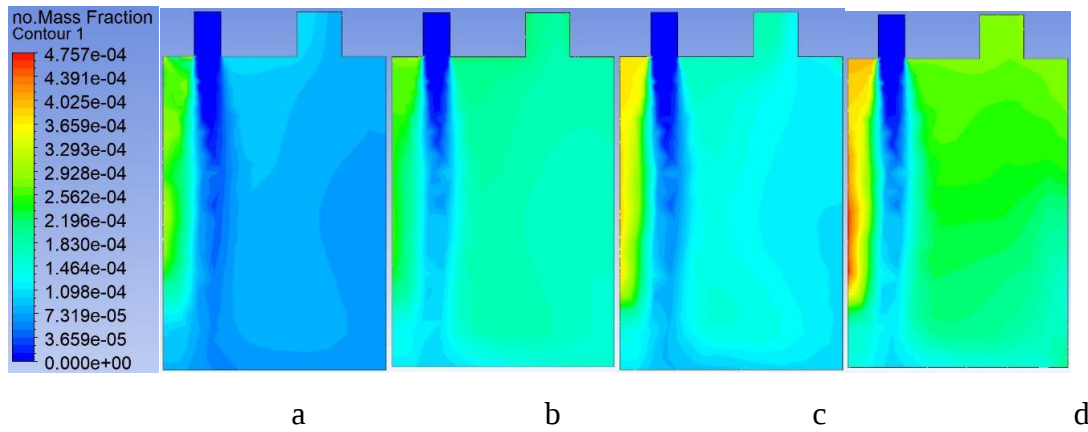
Şekil 5.30. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



Şekil 5.31. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları



Şekil 5.32. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için NO_x Emisyonları

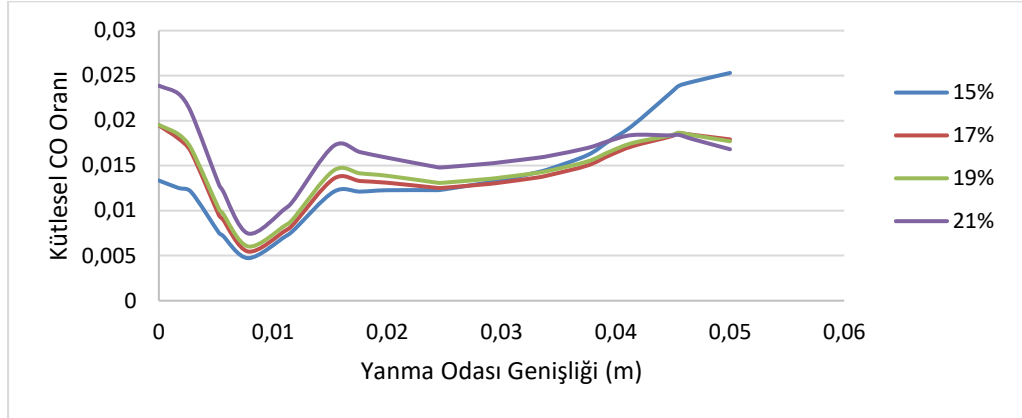


Şekil 5.33. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait NO_x Emisyon Konturları

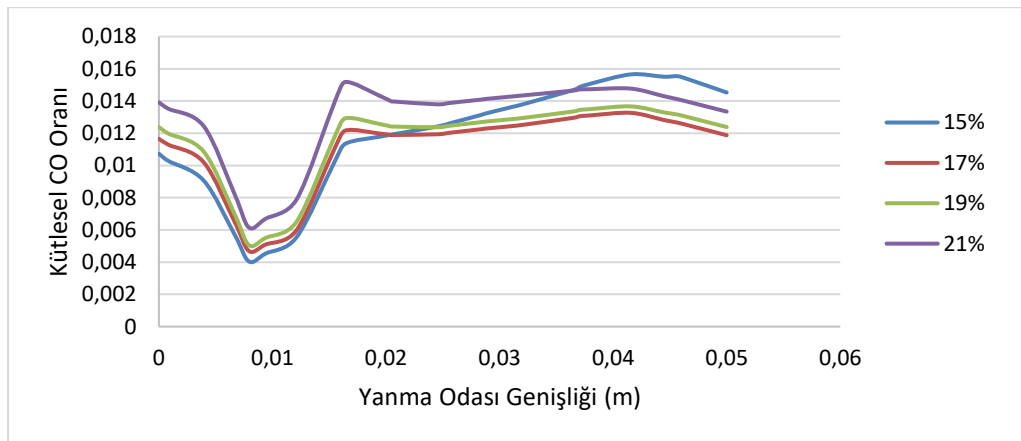
5.9. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO

Renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için diğer önemli bir gösterge de, yine renksiz dağıtılmış yanma ile reaksiyon hızının yavaşlatılması sayesinde yanmanın tüm yanma odasına yayılmasına olanak sağlanması, bu sayede, eksik yanma ürünlerinin (örneğin CO) yeniden yakılmasına olanak sağlanmasıdır. Şekil 36 ila Şekil 40 yanma sonu CO kirlenici emisyon profillerini ve CO konturlarını göstermektedir. Şekiller değerlendirildiğinde, yanma odası içerisindeki en yüksek kütleli CO seviyelerinin büyük oranda konvansiyonel yanma şartlarında tahmin edildiği, buna karşın, renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça kütleli CO oranlarının önemli derecede azaldığı tahmin edilmiştir. Çalışma kapsamında renksiz dağıtılmış yanmanın başarılmasındaki önemli kriterlerden birisi, oksitleyici bünyesindeki oksijen oranının azaltılması iken diğer önemli bir husus da yüksek iç resirkülasyonlu yanma odasının (gaz türbinlerinde başarılmak istenen şekilde)

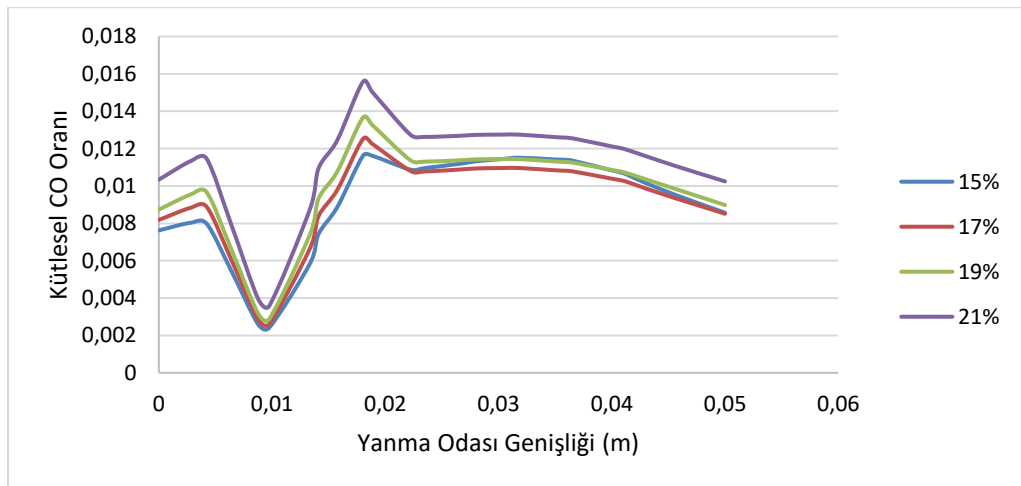
kullanılmasıdır. Bu sayede, CO eksik yanma ürünü yanma odasına resirküle edilebilmiş ve CO emisyon seviyeleri yüksek değerlerde oluşmamıştır.



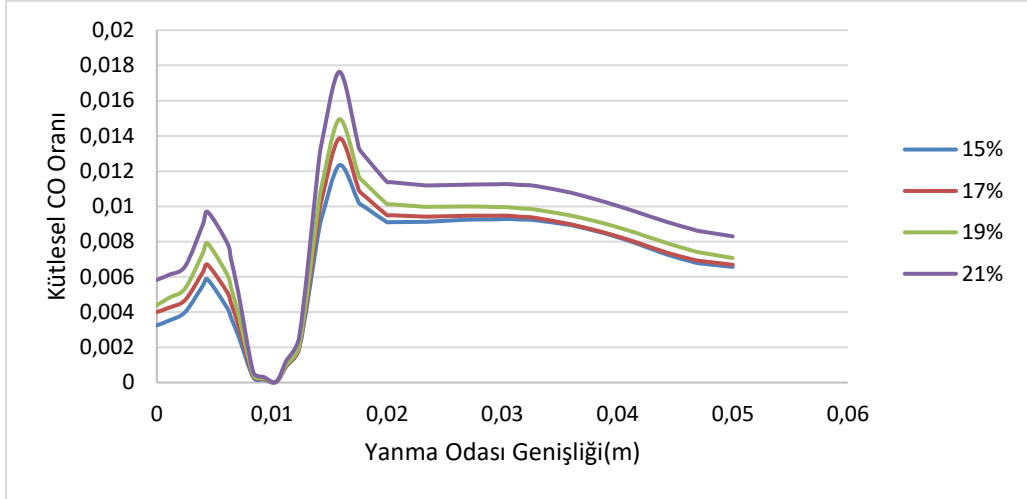
Şekil 5.34. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



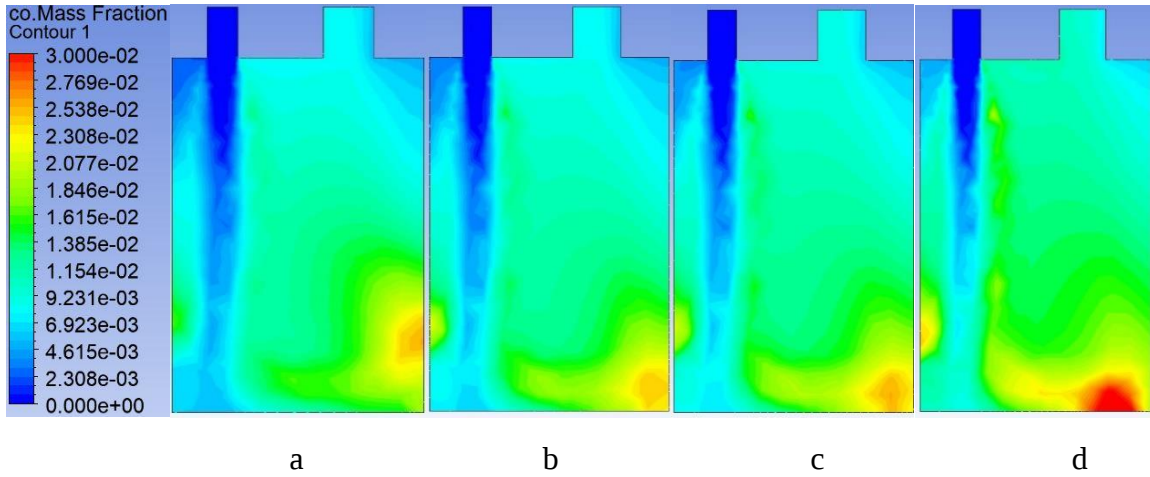
Şekil 5.35. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



Şekil 5.36. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



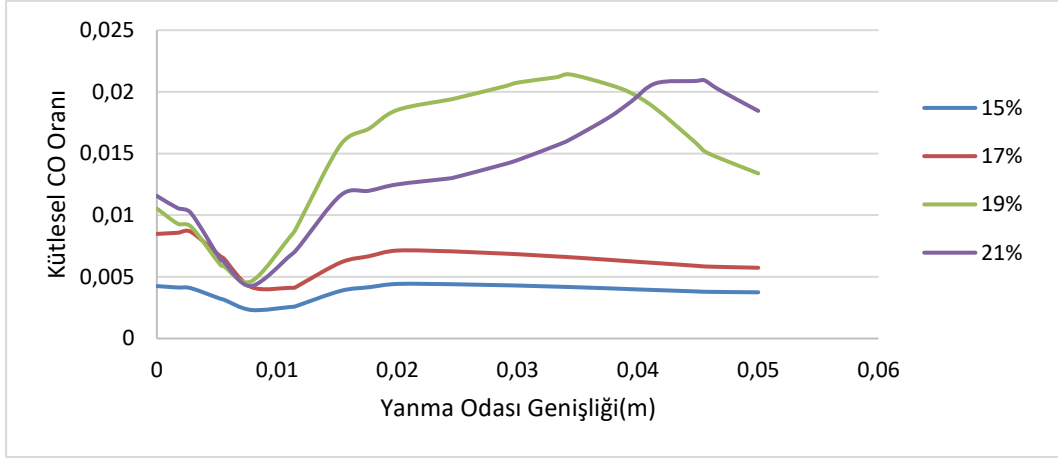
Şekil 5.37. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



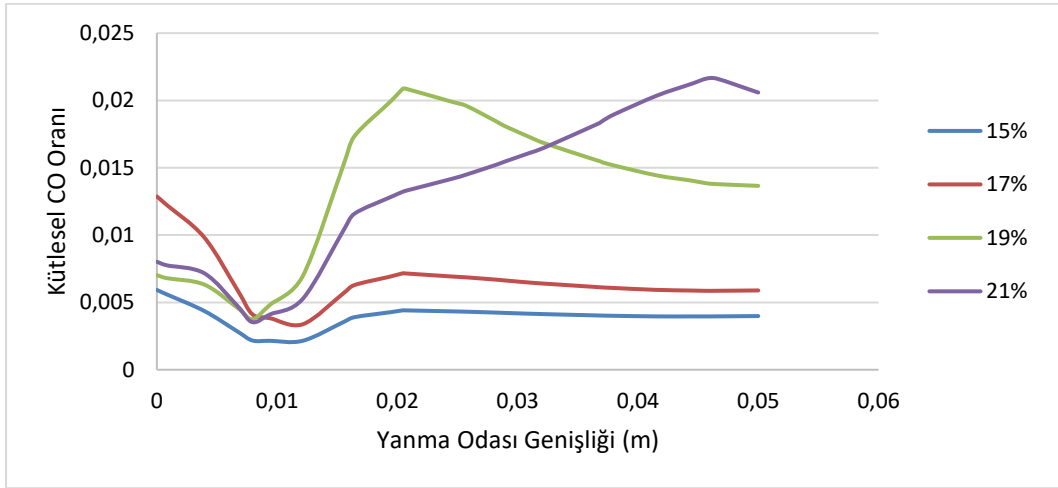
Şekil 5.38. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği

5.10. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO

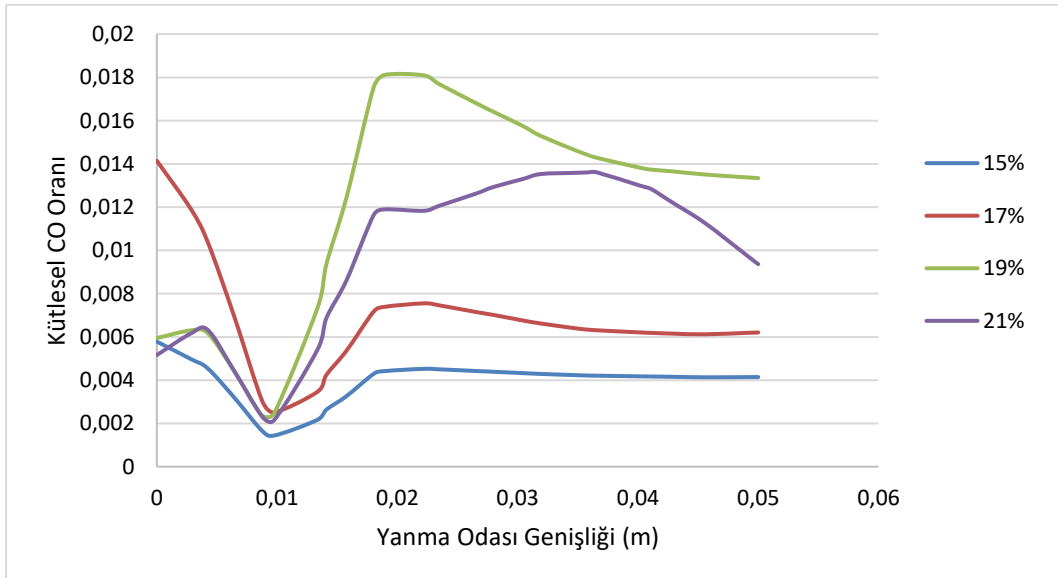
Hava fazlalık katsayısının artırılması ile birlikte yakıt-oksitleyici karışımındaki azot oranı artırılmış, buna karşın yüzde karbon oranı azalmıştır ve bunun sonucu Şekil 41 ile Şekil 45'te tahmin edilen CO profilleri ve konturlarında sunulmuştur. Yanma odası içerisinde neredeyse tüm bölgelerde $\lambda=1,2$ hava fazlalık katsayısı için tahmin edilen CO seviyelerine göre önemli bir değişiklik olmamakla beraber bir miktar düşüş olduğu da gözlemlenmiştir.



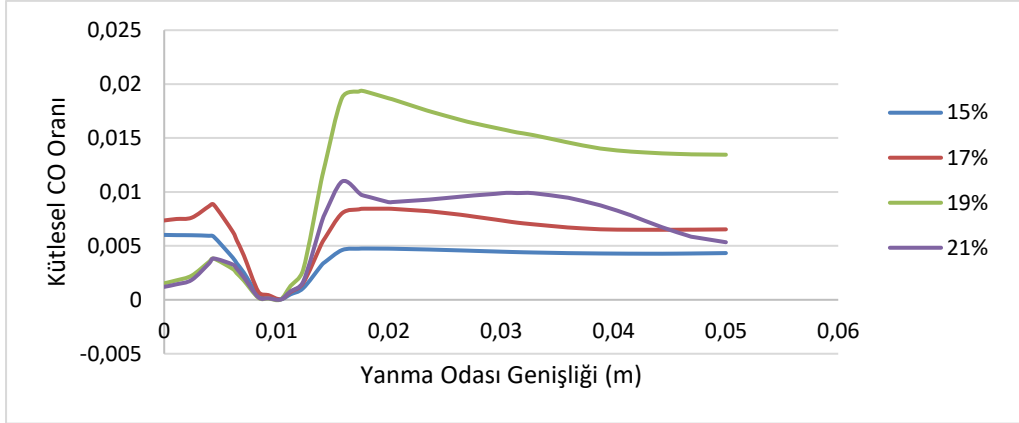
Şekil 5.39. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



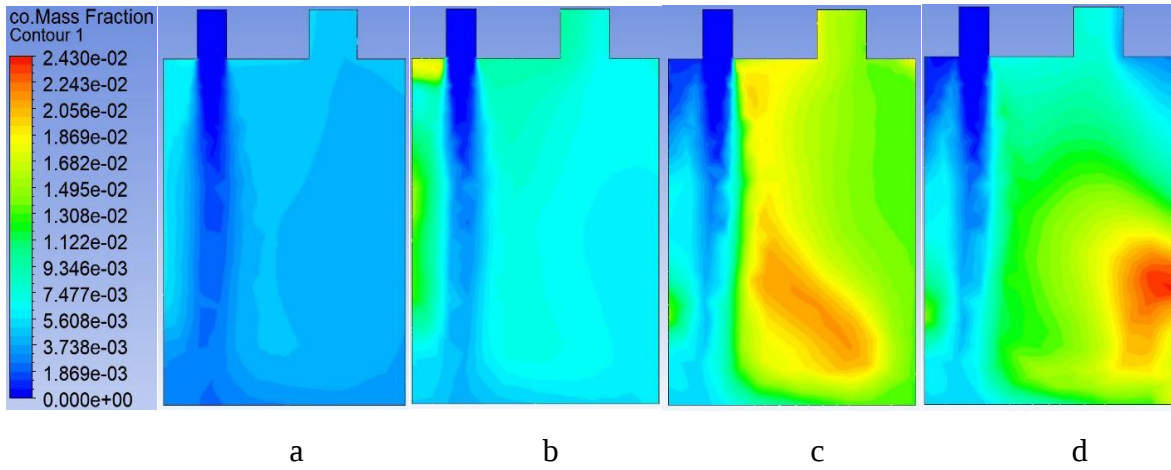
Şekil 5.40. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



Şekil 5.41. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları



Şekil 5.42. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO Emisyonları

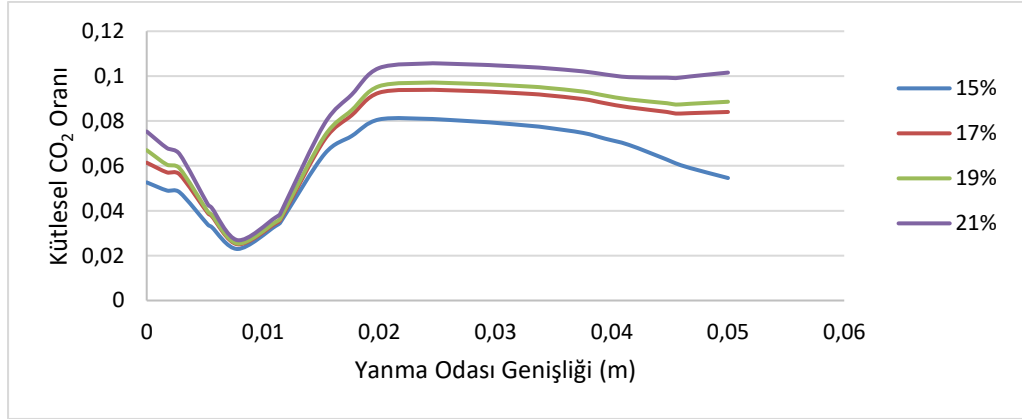


Şekil 5.43. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO Emisyon Kontur Grafiği

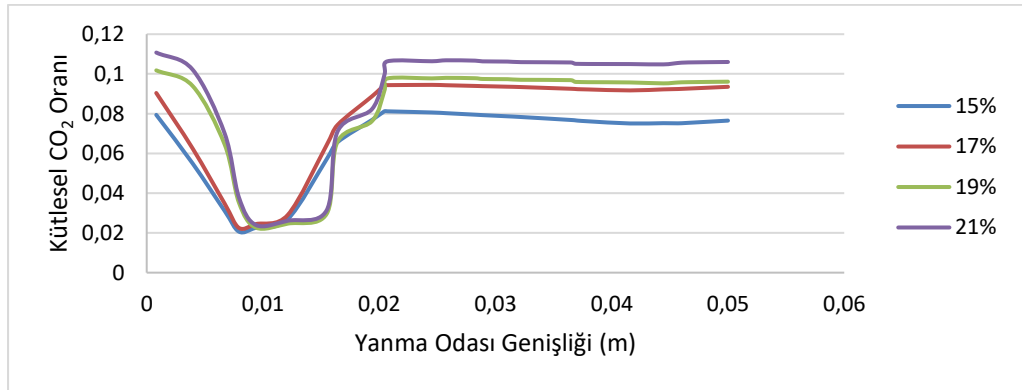
5.11. 1.2 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO₂

Yanma ve emisyon karakteristiklerinin araştırıldığı çalışmalarda CO₂ emisyonlarını değerlendirmek ve sonuçlarını ortaya koymak önem arz etmektedir. CO₂, küresel ısınmaya neden olan en önemli yanma sonu emisyonlarından birisidir ve seviyelerinin azaltılması da oldukça önem arz etmektedir. Bu kapsamda Şekil 46 ila Şekil 50’de yanma CO₂ emisyon profilleri ve konturları sunulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarına geçiş sağlandıkça CO₂ seviyelerinin azaldığı ilgili şekillerden anlaşılmaktadır. Bir önceki bölümde yanma sonu CO emisyonlarının azaldığı belirtilmişti. Bunun sonucu olarak CO₂ emisyonlarının da artması beklenmektedir (CO emisyonlarının CO₂’ye dönüşme hızlarının arttığı anlamına gelir). Buna karşın, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılması için gerekli seyreltici azotun beslenmesi ile birlikte, karışımda ve bunun sonucunda da yanma sonu ürünlerinde karbon

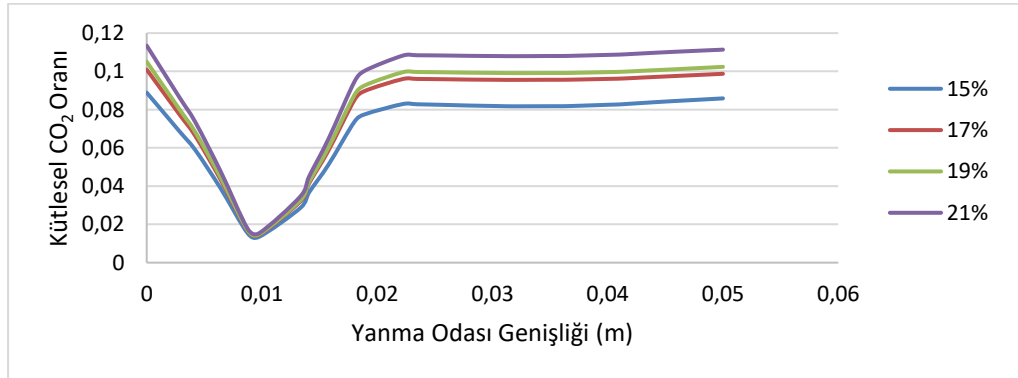
içerikli ürünlerin kütleli oranlarının da azalmasını beklemek şaşırtıcı olmayacaktır. Şekil 46 ila Şekil 50 değerlendirildiğinde, beslenen seyreltici etkisinin, CO' dan CO₂'ye dönüşen emisyon seviyelerinden daha baskın olduğu ve bunun sonucunda da renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, kütleli CO₂ oranlarının azaldığı sonucunun ortaya çıktığı değerlendirilmektedir.



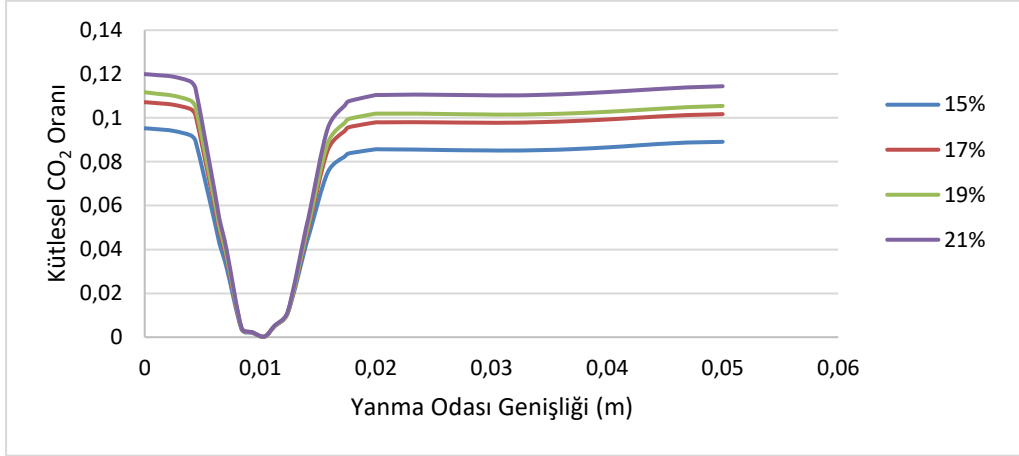
Şekil 5.44. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



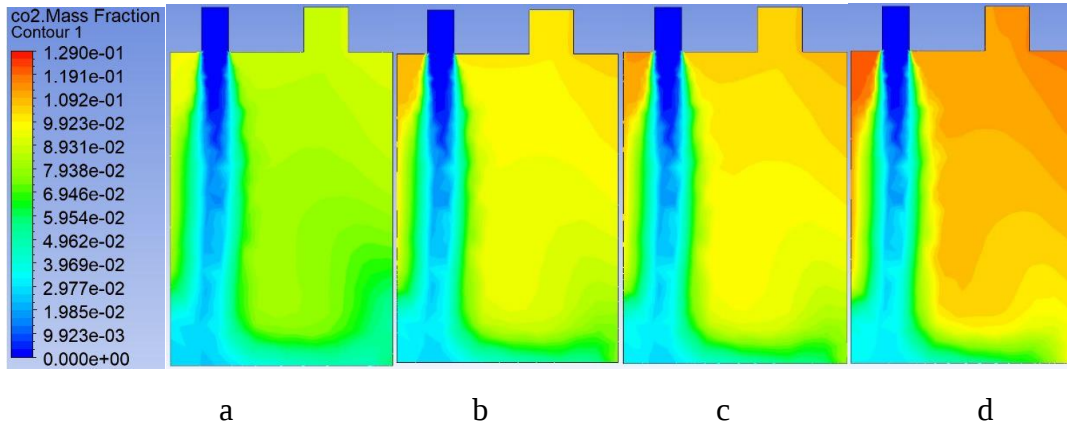
Şekil 5.45. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



Şekil 5.46. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



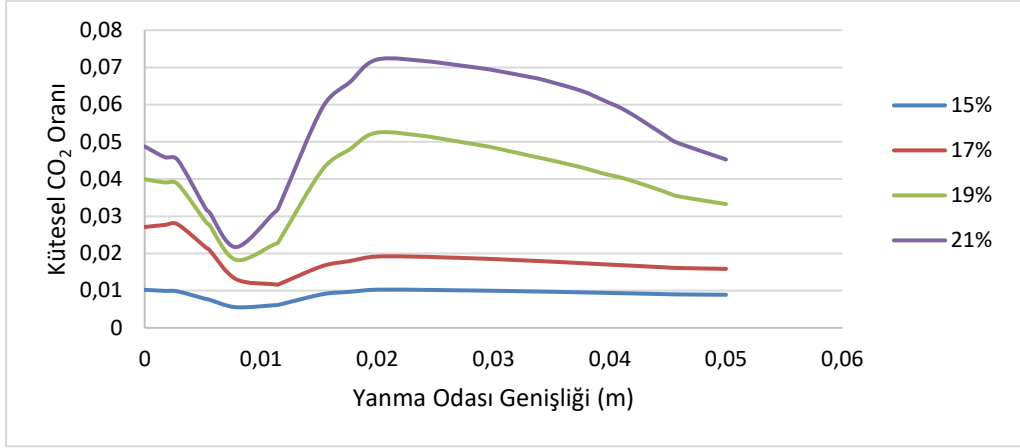
Şekil 5.47. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



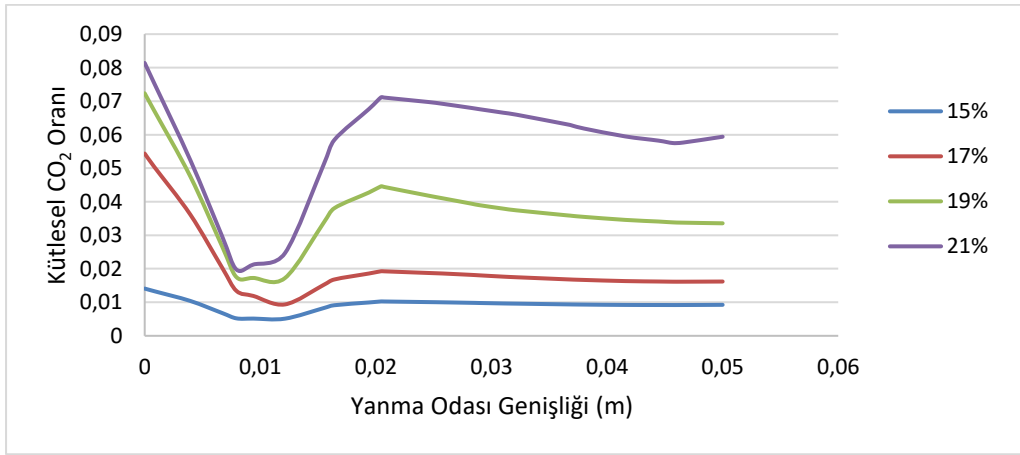
Şekil 5.48. $\lambda=1,2$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO₂ Emisyon Kontur Grafiği

5.12. 1.7 Hava Fazlalık Katsayısı İçin CO₂

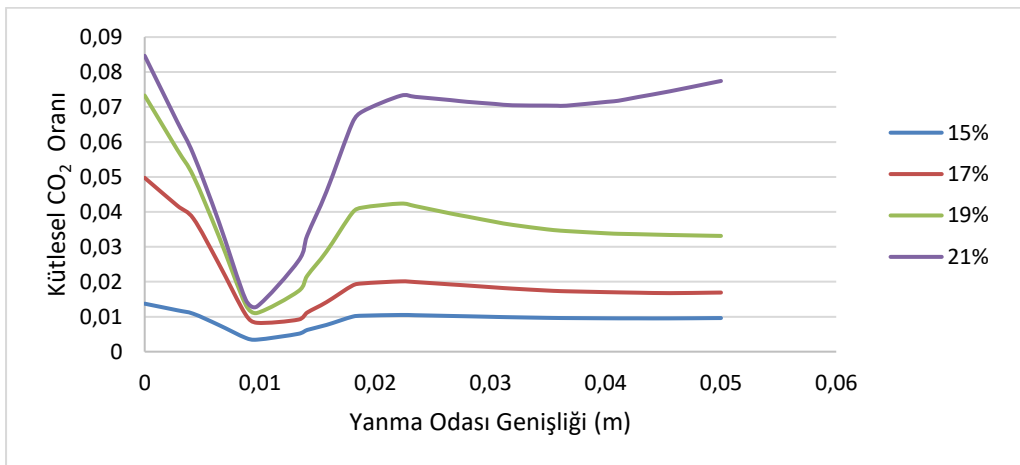
Hava fazlalık katsayısının artırılması ile birlikte CO₂ emisyon seviyelerinin azaldığı Şekil 51 ile Şekil 55'ten anlaşılmaktadır. Yakıt-oksitleyici karışımı bünyesinde azot oranının artması, yanma sonu ürünlerindeki karbon içerikli emisyonların azalmasına da olanak sağlamış ve CO₂ seviyeleri hem konvansiyonel hem de renksiz dağıtılmış yanma şartları için azalmıştır.



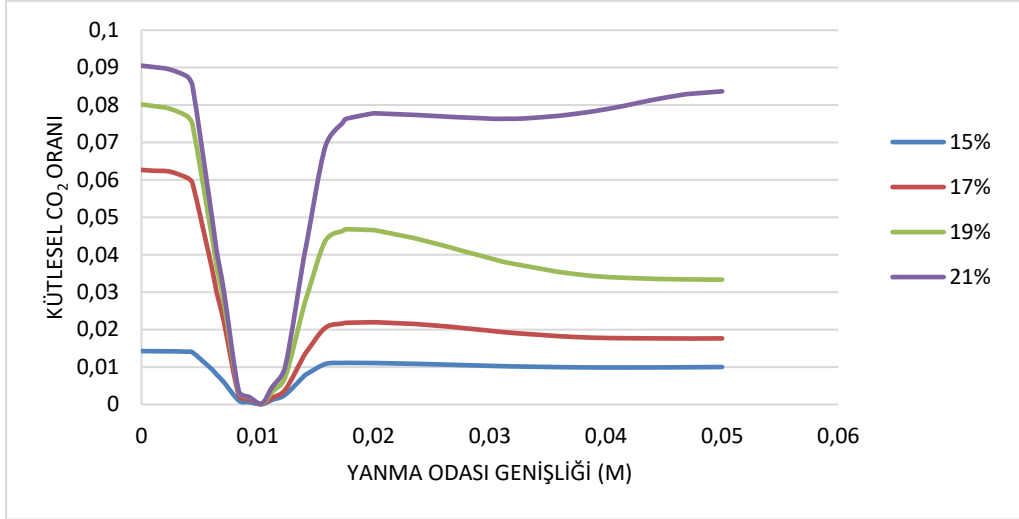
Şekil 5.49. 15 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



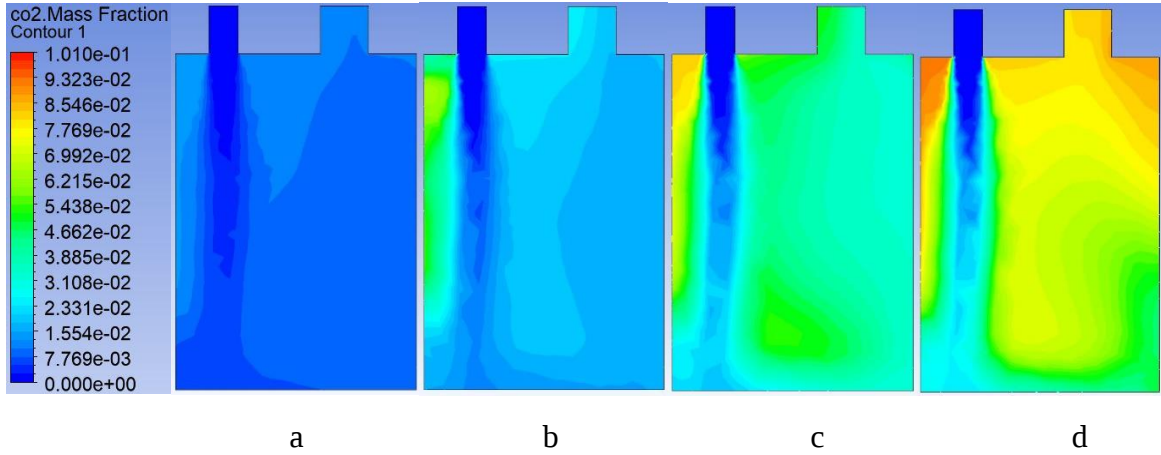
Şekil 5.50. 30 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



Şekil 5.51. 45 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



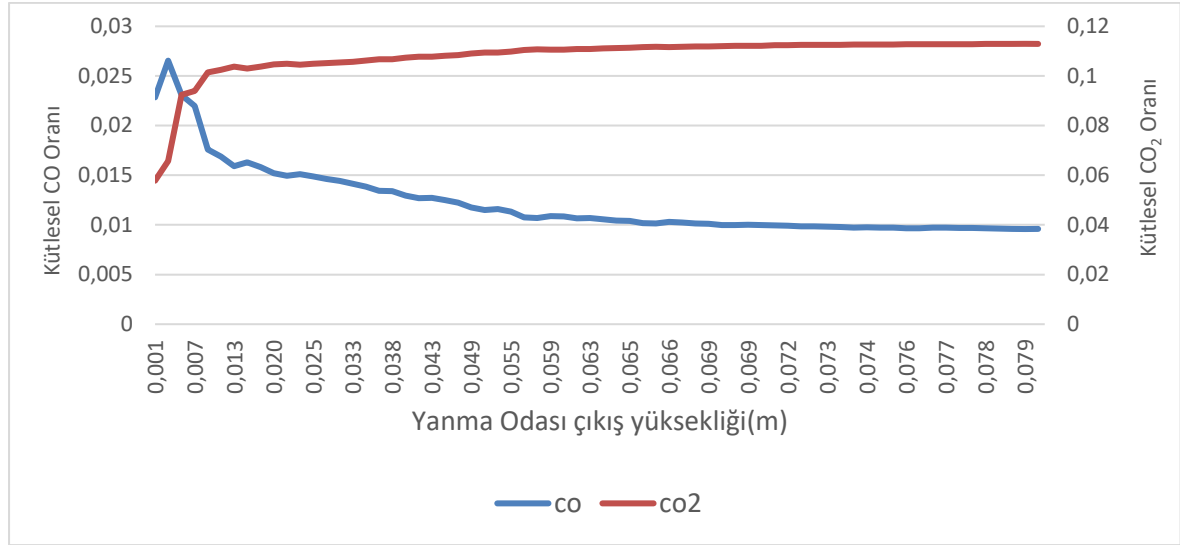
Şekil 5.52. 60 mm yükseklikteki yanma odası genişliği için CO₂ Emisyonları



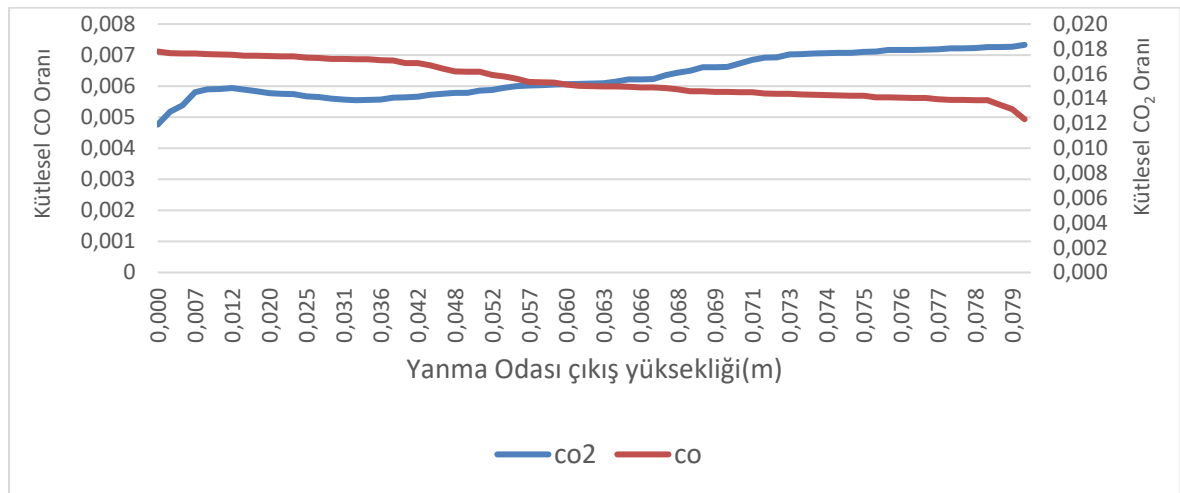
Şekil 5.53. $\lambda=1,7$ için (a= %15, b= %17, c= %19, d= %21) Oksijen Konsantrasyonuna Ait CO₂ Emisyon Kontur Grafiği

5.13. Çıkış Bölgesi İçin CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırılması

Şekil 56 ve Şekil 57’de, % 21 oksijen konsantrasyonu içeren oksitleyici için $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık sayılarında gerçekleştirilen modellemeler neticesinde, yanma odası çıkış kesitine dik ve yanma odasının alt kısmına kadar çizilen hayali, yanma odası çıkış yüksekliği çizgisi için kütleli CO ve CO₂ oranlarının değişimleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere yanma odası çıkışına doğru (yanmanın sonlanmaya başladığı bölgede) yanma sonu CO emisyonları azalırken CO₂ emisyonlarında artış tahminleri ortaya konulmuştur.



Şekil 5.54. $\lambda=1,2$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırması



Şekil 5.55. $\lambda=1,7$ için Yanma Odası Çıkış Ekseninde CO ve CO₂ Emisyonlarının Karşılaştırması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ön karışımli, yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odasında, doğalgazın önemli bir bölümünü oluşturan metan yakıtının yanma ve emisyon parametreleri, $\lambda=1,2$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık katsayılarında, konvansiyonel ve renksiz dağıtılmış yanma şartları altında sayısal olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda sayısal verilere arasında benzerliği temin edebilmek için EDC yanma modeli, standart k- ϵ türbülans modeli, P-1 radyasyon modeli, GRI-Mech 3.0 kimyasal kinetiği ve 64 basamaklı kimyasal reaksiyon kullanılmıştır. Ansys programında oluşturulan yanma odası tasarımına 15mm, 30mm, 45 mm ve 60 mm yüksekliklerinde yatay analiz bölgeleri eklenmiştir ve analiz yapılırken bu bölgelerdeki sonuçlar analiz edilmiştir. Analiz sonucunda yanma odası içerisinde oluşan sıcaklık, hız, CO, CO₂ ve NO_x sonuçları incelenmiş ve hem grafik hem de kontur yardımıyla karşılaştırılmıştır. Renksiz dağıtılmış yanma dahil edildiğinde elde edilen sonuçlar detaylı olarak karşılaştırılmış ve sonuçlar sonraki bölümde özetlenmiştir.

Yanma modellemelerinden daha doğru sonuç alınabilmesi için 64 basamaklı metan yanma reaksiyonları oluşturulmuş ve modellemelerin yapıldığı ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği programına entegre edilmiştir. Çalışma, 10 kW ısı gücü, uygulamada kullanılan gaz türbinleri için uygun olabilecek bir ısı yoğunlukta (yaklaşık 70 MW/m³.atm) gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- Oksitleyici bünyesindeki oksijen konsantrasyonu %21'den %15'e azaltıldıkça renksiz dağıtılmış yanmanın başarıldığı, bu sayede yanma odası içerisindeki sıcaklık seviyeleri bir miktar azalırken daha homojen bir dağılım elde edildiği sonucuna varılmıştır.
- Hava fazlalık katsayısının arttırılmasıyla sıcaklık seviyelerinin biraz azaldığı tespit edilmiştir.
- Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, yanma odası içerisindeki bölgesel yüksek sıcaklık bölgelerinin azaltılması ve bunun sonucunda ısı NO_x'un baskılanması ile yanma sonu kirletici NO_x emisyonlarında düşüş gözlenmiştir.
- Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, hem yanma hızının yavaşlaması ile yanmanın tüm yanma odasına yayılması hem de yüksek resirkülasyon sayesinde

yanmamış CO'lerin yeniden yanabilmesi ile yanma sonu kirletici CO emisyon seviyelerinde düşüş gözlenmiştir.

- Renksiz dağıtılmış yanma şartları başarıldıkça, yanma sonu CO₂ emisyonlarında düşüş gözlenmiştir. CO seviyelerinin azalması ile CO₂ seviyelerinde artış beklenirken, renksiz dağıtılmış yanmanın başarılabilmesi için beslenen seyreltici azot seviyelerindeki artış daha baskın gelmiş ve kütleli CO₂ oranının azaldığı tespit edilmiştir.
- Tüm bulgular değerlendirildiğinde, en uygun çalışma şartları için hava fazlalık katsayısının 1.2 ve %15 O₂ konsantrasyonu içeren oksitleyici yanma şartları için hem sıcaklık hem de emisyonlar bakımından sağlandığı tespit edilmiştir.
- Çalışma neticesinde, gaz türbini ya da bir uçak motoru yanma odasını temsilen yüksek ısı yoğunluklu ve yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odasında renksiz dağıtılmış yanmanın uygulanmasının sağlayacağı avantajlar ortaya konulmuştur. Gaz türbinlerinin ve uçak motorlarının yanma odası çıkış sıcaklıklarının önemi değerlendirildiğinde, renksiz dağıtılmış yanma tekniğinin, yanma odası sıcaklık seviyelerini önemli derecede azaltmadığı, buna karşın kirletici emisyon seviyelerini önemli derecede düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, farklı yakıtlara da (örneğin, JP-8 veya diğer uçak yakıtları) bu yöntem uygulanabilir ve uygulama alanları daha genişletilebilir.
- Yakıtlarda, yüksek kaliteli yanma modellemesine ulaşabilmek için temel faktörlerden birisinin tepkime basamak sayısı olduğu görülmüştür. Çalışmanın tepkime basamak sayısının artırılması sonucunda deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere yakın sonuçlar elde edildiği ve daha doğru sonuçlar elde edilmiştir. Buradan hareketle sayısal çalışmalarda reaksiyonun basamak sayısının iyi belirlenmesi gerektiği sonucu elde edilmiştir.
- Modelleme yapılırken ağ yapısının (mesh sayısı) artırılması analizin süresini artırdığı ancak analizin çok daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.
- $\lambda=1,2$ için uygulanan renksiz dağıtılmış yanma şartlarının uygulanma oranı artırıldıkça (%21 O₂, %19 O₂, %17 O₂, %15 O₂) yanma odası içerisindeki en yüksek sıcaklık değerlerinde 1800 K den 1500 K' e doğru bir miktar düşüş gözlenmiştir.

- $\lambda=1,7$ için yapılan analizlerde renksiz dağıtılmış yanma şartları uygulandıkça (%21 O₂, %19 O₂, %17 O₂, %15 O₂), yanma odası içerisindeki en yüksek sıcaklıklar 1600 K den 800 K' e doğru düşüş göstermiştir. $\lambda=1,2$ ile karşılaştırıldığında sıcaklık değerlerinin daha düşük olmasının sebebi ise yanma sonu ürünlerindeki azot miktarının daha fazla olmasıdır.
- Yanma sonucunda oluşan emisyonların düşürülmesinde önemli şartlardan biri yanma odası içerisindeki tepkime hızlarının yavaşlatılmasıdır. $\lambda=1,2$ için incelendiğinde renksiz dağıtılmış yanma şartlarının en düşük seviyede olduğu %21 O₂'de en yüksek emisyon değerleri olarak 0,002 kütleli NO_x oranı gözlemlenirken renksiz dağıtılmış yanma şartlarının daha yoğun uygulandığı %15 O₂' de 0,001 kütleli NO_x oranlarına kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar üzerinde bakıldığında renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.
- $\lambda=1,7$ için NO_x emisyonları incelendiğinde %21 O₂'de en yüksek emisyon değerleri 0,0009 kütleli NO_x oranında sonuçlar gözlemlenirken %15 O₂ için 0,00015 kütleli NO_x oranı ve renksiz dağıtılmış yanmanın başarılı olduğu gözlemlenmiştir.
- Reaksiyon sonucunda meydana çıkan bir diğer emisyon olarak CO emisyonu gelmektedir. NO_x emisyonunun olduğu gibi CO emisyonunda düşüşleri sağlamanın en temel yöntemi reaksiyon hızını yavaşlatmak ve yanmanın tüm yanma odası içerisinde dağılıp gerçekleşmesini sağlamaktır. Bunun sonucunda eksik yanma ürünlerinden olan CO' nun yeniden yakılmasına olanak sağlamış ve emisyonda düşüş sağlamıştır. $\lambda=1,2$ için incelendiğinde yanma odası içindeki en yüksek seviyeler 0,025 kütleli CO oranlarından 0,014 kütleli CO oranlarına kadar düştüğü kaydedilmiştir.
- $\lambda=1,7$ için CO emisyon sonuçları incelendiğinde $\lambda=1,2$ için elde edilen sonuçlara çok yakın sonuçlar elde edilmekle birlikte bir miktar düşüş olduğu gözlemlenmiştir.
- Çalışmada incelenen son tür olan CO₂, kirleticiler arasında küresel ısınmaya en önemli emisyonlardan biridir. CO emisyonlarındaki azalma sonucunda CO₂ emisyonlarında artış olması beklenmektedir. Bunun sebebi olarak CO emisyonlarının CO₂' ye dönüşme hızlarında artış olduğu anlamına gelmektedir. $\lambda=1,2$ için yapılan analizlerde renksiz

dağıtılmış yanma şartlarına geçildikçe yanma odası içerisindeki en yüksek emisyon değerlerinin 0,1 den 0,05' e kadar düştüğü kaydedilmiştir.

- $\lambda=1,7$ için yapılan çalışmalar sonucunda yakıt-hava karışımının içeriğindeki azot oranının artması yanma sonucunda ortaya çıkan karbon içerikli emisyonların da azalmasına olanak sağladığı gözlemlenmiştir. Bu hava fazlalık katsayısı için yanma odası içerisinde kaydedilen en yüksek değerler 0,07'den 0,01' e kadar azaldığı gözlemlenmiştir.

6.1. Öneriler

Yapılan modellemeler ve analizler neticesinde edinilen bilgiler ve deneyimler doğrultusunda, renksiz dağıtılmış yanma üzerine yapılacak çalışmalarda yararlı olacağı düşünülen tavsiyeler aşağıda sunulmuştur.

- Bu teze konu olan çalışma sayısal olarak modellenmiş ve gerçekleştirilmiştir. Benzer şartlar altında deneysel bir çalışma yapılması ilerleyen zamanlarda bu modeli kullanacak sistemler için bir hazırlık sağlayabilir.
- Gerek örnek alınan deneysel çalışmalar, gerekse teze konu olan sayısal çalışmada gerçekleştirilen modellemeler sonucunda reaksiyon basamak sayısının önemli bir etken olduğu görülmüştür. Yapılmak istenen çalışmalarda reaksiyon basamak sayılarının artırılması, farklı bileşenler için farklı reaksiyon mekanizmaları kullanılması daha net ve daha efektif sonuçlar alınmasını sağlayabilir.
- Kullanılan HAD modellemelerindeki tüm değerler değiştirilerek farklı sayısal çalışmalar denenebilir.
- Teze konu olan çalışmada renksiz dağıtılmış yanma şartlarında %15 O_2 ' ye kadar gidilerek analizler yapılmıştır. Daha geniş aralıklar üzerinde işlemler gerçekleştirilerek çalışma sonuçları incelenebilir.
- Renksiz dağıtılmış yanma şartlarında kullanılan seyrelticiler değiştirilerek yeni çalışma konuları türetilir.
- Ön karışımli olarak yapılan bu çalışmanın aksine ön karışimsız olarak modellenir.

- Ön karışımli olarak yanma odasına gönderilen yakıtın yanma odasına giriş sıcaklığına değışiklikler yapılarak yeni çalışmalar türetilerilir.
- Teze konu olan çalışmada edinilen tecrübeler sonucunda; yaygın olarak kullanılan metan gazının emisyonlarında düşüş kaydedilmiştir. Bu sebeple metan gazı kullanılan tüm alanlarda renksiz dağıtılmış yanma şartlarının uygulanması için gerekli teşvikler yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. MAHB, When Fossil Fuels Run Out, What Then?, (2019). URL:<https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run>. Accessed :2022-11-05
2. International Energy Outlook (2016), s. 290, URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016>. Accessed :2022-11-05
3. Akin, G., (2006) Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları, *Ankara Üniversitesi Dil Ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi.*, 46(2), 2,.
4. Reyhan, A. S., ve Reyhan, H., (2016) Küresel Isınmanın Nedenleri, Sonuçları, Çözümleri Üzerine Yeni Değerlendirmeler, *Memleket Siyaset Yönetim* s. 24,.
5. Weber, R., Gupta, A.K., ve Mochida, S., (2020) High temperature air combustion (HiTAC): How it all started for applications in industrial furnaces and future prospects, *Applied Energy*, c. 278, s. 115551, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115551.
6. Cavaliere, A., ve Joannon, M., (2004) Mild Combustion, *Progress in Energy Combustion Science*, c. 30, sy 4, ss. 329-366, , doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.
7. Lückcrath, R., Meier, W., ve Aigner, M.,(2008) FLOX[sup ®] Combustion at High Pressure With Different Fuel Compositions, *Journal of Engineering Gas Turbines and Power* c. 130, doi: 10.1115/1.2749280.
8. Arghode V. K., Gupta, A. K., ve Bryden, K. M. ,(2012) High intensity colorless distributed combustion for ultra low emissions and enhanced performance, *Applied Energy*, c. 92, ss. 822-830, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.039.
9. Karyeyen, S., Feser, J.S. ve Gupta, A.K. (2019). Swirl assisted distributed combustion behavior using hydrogen-rich gaseous fuels. *Applied Energy*, 251(1), 113354-113362.
10. Khalil, A.E.E. ve Gupta, A.K. (2013). Hydrogen addition effects on high intensity distributed combustion. *Applied Energy*, 104 (1), 71-79.
11. Yu, Y., Gaofeng, W., Qizhao, L., Chengbiao, M. ve Xianjun, X. (2010). Flameless combustion for hydrogen containing fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 2694-2697
12. Derudi, M., Villani, A. ve Rota, R. (2007). Sustainability of mild combustion of hydrogen-containing hybrid fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 3393-3400.
13. Khalil, A.E.E. ve Gupta, A.K. (2016). Fuel property effects on distributed combustion. *Fuel*, 171(1), 116-124.
14. Li, P., Wang, F., Mi, J., Dally, B.B., Mei, Z., Zhang, J. ve Parente, A. (2014) Mechanisms of NO Formation in MILD Combustion of CH₄/H₂ Fuel Blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(1), 19187–19203

15. İlbaş, M. ve Karyeyen, S. (2014). Modelling of combustion performances and emission characteristics of coal gases in a model gas turbine combustor, *International Journal of Energy Research*, 38(9), 1171-1180.
16. Hashemi, S. A., Skeikhzadeh, G. A., Hajialigol, N. ve Nikfar, M. (2012). Numerical investigation of NOX reduction in a sudden-expansion combustor with inclined turbulent air jet, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(11), 3723-3731
17. Yilmaz, I. ve Ilbas, M. (2008). An experimental study on hydrogen-methane mixtured fuels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(2), 178-187.]
18. Gupta, S. K. ve Arghode, V. K. (2019). Investigation of a reverse-cross flow combustor with varying fuel injection momentum, *Thermal Science and Engineering Process*, 10, 232-244.
19. Ilbas, A, Ozdemir, M. B ve Karyeyen S. (2022). Investigation of colorless distributed combustion regime using a high internal recirculative combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(24), 12338-12353.
20. Costa, M., Melo, M., Sousa, J. ve Levy, Y. (2009). Experimental Investigation of a Novel Combustor Model for Gas Turbines. *Journal of Propulsion and Power*, 25(1), 609–617.
21. Borman, G. L. ve Ragland, K. W. (1998). *Combustion engineering*. Singapore: McGraw-Hill Companies, 25-48.
22. Yılmaz, İ. (2006). *Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal ve Deneysel İncelemesi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 24-27.
23. Ilbas, M. (1997). *Studies of Ultra Low NOX Burners*, PhD Thesis, School of Engineering, University of Wales, Cardiff, UK, 10-28.
24. Jones, J.C. (1993). *Combustion Science, Principle, and Practice* (1. Baskı), Australia: Millennium Books, 306.
25. Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method* (Second Edition). England: Pearson education, 9-112.
26. Williams, F. (1985). *Combustion Theory* (Second edition), Addison-Wesley Publishing Company, 434.
27. Salem, E. (2018). *Numerical Simulations Of Premixed Flames Of Multi Component Fuels/Air Mixtures And Their Applications*, Masters's Thesis, University of Kentucky, Mechanical Engineering, Lexington, 23-99.
28. Sayma, A. (2009). *Computational fluid dynamics*, (First edition), London, Bookboon Company, 16-107.

29. Çengel, Y. A., Boles, M. A., (2012). *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik* (5.Baskı), İstanbul, Güven Bilimsel Yayıncılık, 751-817.
30. Karyeyen, S. (2016). *Geliştirilen Bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-71.
31. Ilbas, M. (1997). *Studies of ultra-Low NOX burners*, Doktora Tezi, School of Engineering University of Wales, Cardiff, 84(87), 109-137.
32. İnternet: Fluent 6.3 User's Guide. Fluent Incorporated, CipecUrl: <http://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf> Son Erişim Tarihi : 20.11.2022
33. Arslan, E. (2013). *İki zamanlı motorda değişken supap zamanlamasının motor performansına etkisinin sayısal incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 45-47.
34. Karyeyen, S., Ilbas, M. (2018). Experimental and numerical analysis of turbulent premixed combustion of low calorific value coal gases in a generated premixed burner, *Fuel*, 220, 586-598.
35. Laguillo, S., Ochoa, J.S., Tizné, E., Pina, A., Ballester, J., Ortiz, A., (2021). CO Emissions And Temperature Analysis From An Experimental And Numerical Study Of Partially Premixed Methane Flames Impinging Onto A Cooking Pot, *Journal Of Natural Gas Science And Engineering*, 88, 103771.
36. Zhen, H.S., Miao, J., Leung C.W., Cheung, C.S., Huang, Z.H. (2016). A Study On The Effects Of Air Preheat On The Combustion And Heat Transfer Characteristics Of Bunsen Flames, *Fuel*, 184, 50-58.
37. İlbaş, M., Yılmaz, İ. (2010). Hidrojen-metan karışım yanmasında yanma model sabitinin değerlendirilmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 30(1), 45-57.
38. Mardani, A. ve Tabejamaat, S. (2010). Effect of hydrogen on hydrogen-methane turbulent non-premixed flame under MILD condition, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11324-11331.
39. İlbaş, M., Yılmaz, İ., Özkan, F. (2006). Gaz türbini yanma odasında hidrojen ve hidrokarbon yanmasının modellenmesi ve nox oluşumunun incelenmesi, *Mühendis ve Makine*, 47(559).
40. Fackler, K. B., Karalus, M. F., Novosselov, I. V., Kramlich, J. C., Malte, P. C. (2011). Experimental and Numerical Study of NOx Formation From the Lean Premixed Combustion of CH4 Mixed With CO2 and N2, *American Society of Mechanical Engineers Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133(12), 121502.
41. Saqr, K. M., Aly, H. S., Sies, M. M., Wahid, M. A. (2010). Effect of free stream turbulence on nox and soot formation in turbulent diffusion CH4-air flames, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(6), 611-617.

EKLER

EK-1. Kullanılan Kimyasal Reaksiyonun Basamakları ve Özellikleri

Reaksiyon Sayısı	Kimyasal Reaksiyon	Arrhenius Faktörü [mol-cm-sn-K]	Sıcaklık Üstel Değeri	Aktivasyon Enerjisi [kal/mol]
1	$\text{CH}_3+\text{H}+\text{M}=\text{CH}_4+\text{M}$	8,0E26	-3	0
2	$\text{CH}_4+\text{O}_2=\text{CH}_3+\text{HO}_2$	7,9E13	0	56000
3	$\text{CH}_4+\text{H}=\text{CH}_3+\text{H}_2$	2,2E4	3	8750
4	$\text{CH}_4+\text{O}=\text{CH}_3+\text{OH}$	1,6E6	2,36	7400
5	$\text{CH}_4+\text{OH}=\text{CH}_3+\text{H}_2\text{O}$	1,6E6	2,1	2460
6	$\text{CH}_3+\text{O}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}$	6,8E13	0	0
7	$\text{CH}_3+\text{OH}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}_2$	1,0E12	0	0
8	$\text{CH}_3+\text{OH}=\text{CH}_2+\text{H}_2\text{O}$	1,5E13	0	5000
9	$\text{CH}_3+\text{H}=\text{CH}_2+\text{H}_2$	9,0E13	0	15100
10	$\text{CH}_2+\text{H}=\text{CH}+\text{H}_2$	1,4E19	-2	0
11	$\text{CH}_2+\text{OH}=\text{CH}_2\text{O}+\text{H}$	2,5E13	0	0
12	$\text{CH}_2+\text{OH}=\text{CH}+\text{H}_2\text{O}$	4,5E13	0	3000
13	$\text{CH}+\text{O}_2=\text{HCO}+\text{O}$	3,3E13	0	0
14	$\text{CH}+\text{O}=\text{CO}+\text{H}$	5,7E13	0	0
15	$\text{CH}+\text{OH}=\text{HCO}+\text{H}$	3,0E13	0	0
16	$\text{CH}+\text{CO}_2=\text{HCO}+\text{CO}$	3,4E12	0	690
17	$\text{CH}_2+\text{CO}_2=\text{CH}_2\text{O}+\text{CO}$	1,1E11	0	1000
18	$\text{CH}_2+\text{O}=\text{CO}+\text{H}+\text{H}$	3,0E13	0	0
19	$\text{CH}_2+\text{O}=\text{CO}+\text{H}_2$	5,0E13	0	0
20	$\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}_2+\text{H}+\text{H}$	1,6E12	0	1000
21	$\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CH}_2\text{O}+\text{O}$	5,0E13	0	9000
22	$\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}_2+\text{H}_2$	6,9E11	0	500
23	$\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}+\text{H}_2\text{O}$	1,9E10	0	-1000
24	$\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{CO}+\text{OH}+\text{H}$	8,6E10	0	-500
25	$\text{CH}_2+\text{O}_2=\text{HCO}+\text{OH}$	4,3E10	0	-500
26	$\text{CH}_2\text{O}+\text{OH}=\text{HCO}+\text{H}_2\text{O}$	3,43E9	1,18	-447
27	$\text{CH}_2\text{O}+\text{H}=\text{HCO}+\text{H}_2$	2,19E8	1,77	3000
28	$\text{CH}_2\text{O}+\text{M}=\text{HCO}+\text{H}+\text{M}$	3,31E16	0	81000
29	$\text{CH}_2\text{O}+\text{O}=\text{HCO}+\text{OH}$	1,81E13	0	3082
30	$\text{HCO}+\text{OH}=\text{CO}+\text{H}_2\text{O}$	5,0E12	0	0
31	$\text{HCO}+\text{M}=\text{H}+\text{CO}+\text{M}$	1,6E14	0	14700
32	$\text{HCO}+\text{H}=\text{CO}+\text{H}_2$	4,0E13	0	0
33	$\text{HCO}+\text{O}=\text{CO}_2+\text{H}$	1,0E13	0	0
34	$\text{HCO}+\text{O}_2=\text{HO}_2+\text{CO}$	3,3E13	-0,4	0
35	$\text{CO}+\text{O}+\text{M}=\text{CO}_2+\text{M}$	3,2E13	0	-4200
36	$\text{CO}+\text{OH}=\text{CO}_2+\text{H}$	1,51E7	1,3	-758
37	$\text{CO}+\text{O}_2=\text{CO}_2+\text{O}$	1,6E13	0	41000
38	$\text{HO}_2+\text{CO}=\text{CO}_2+\text{OH}$	5,8E13	0	22934
39	$\text{H}_2+\text{O}_2=2\text{OH}$	1,7E13	0	47780
40	$\text{OH}+\text{H}_2=\text{H}_2\text{O}+\text{H}$	1,17E9	1,3	3626
41	$\text{H}+\text{O}_2=\text{OH}+\text{O}$	5,13E16	-0,816	16507
42	$\text{O}+\text{H}_2=\text{OH}+\text{H}$	1,8E10	1,0	8826
43	$\text{H}+\text{O}_2+\text{M}=\text{HO}_2+\text{M}$	3,61E17	-0,72	0

EK-1. (devam) Kullanılan Kimyasal Reaksiyonun Basamakları ve Özellikleri

44	H ₂ O/18,6/	CO ₂ /4,2/	H ₂ /2,86/	N ₂ /1,26/
45	OH+HO ₂ =H ₂ O+O ₂	7,5E12	0	0
46	H+HO ₂ =2OH	1,4E14	0	1073
47	O+HO ₂ =O ₂ +OH	1,4E13	0	1073
48	2OH=O+H ₂ O	6,0E8	1,3	0
49	H+H+M=H ₂ +M	1,0E18	-1,0	0
50	H+H+H ₂ =H ₂ +H ₂	9,2E16	-0,6	0
51	H+H+H ₂ O=H ₂ +H ₂ O	6,0E19	-1,25	0
52	H+H+CO ₂ =H ₂ +CO ₂	5,49E20	-2	0
53	H+OH+M=H ₂ O+M	1,6E22	-2,0	0
54	H ₂ O/5/			
55	H+O+M=OH+M	6,2E16	-0,6	0
56	H ₂ O/5/			
57	H+HO ₂ =H ₂ +O ₂	1,25E13	0	0
58	HO ₂ +HO ₂ =H ₂ O ₂ +O ₂	2,0E12	0	0
59	H ₂ O ₂ +M=OH+OH+M	1,3E17	0	45500
60	H ₂ O ₂ +H=HO ₂ +H ₂	1,6E12	0	3800
61	H ₂ O ₂ +OH=H ₂ O+HO ₂	1,0E13	0	1800
62	N+NO=N ₂ +O	2,7E13	0	355
63	N+O ₂ =NO+O	9,0E09	1	6500
64	N+OH=NO+H	3,36E13	0	385



Gazili olmak ayrıcalıktır