
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

GİRDAPLI BİR YAKICIDA DAĞITILMIŞ YANMA TEKNİĞİNİN ALEV STABİLİZASYONU VE NO_X EMİSYONU ÜZERİNE ETKİLERİ

Göktürk CANDAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2021

ETİK BEYAN

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

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

  Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Göktürk CANDAN

29/12/2021

GİRDAPLI BİR YAKICIDA DAĞITILMIŞ YANMA TEKNİĞİNİN ALEV STABİLİZASYONU VE NO_X EMİSYONU ÜZERİNE ETKİLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Göktürk CANDAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Girdaplı yakıcılar günümüzde farklı endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Girdaplı akışlar ile yanma tepkimelerinin verimliliği arttırılabilmekte ve alev stabilizasyonu sağlanabilmektedir. Yanma işlemleri sonucunda ısı elde edilmekle birlikte aynı zamanda NO_X gibi çeşitli kirletici emisyonlar oluşmaktadır. Bu vb. kirletici emisyonlar hava kirliliğine, küresel ısınmaya ve asit yağmurlarına neden olması dolayısıyla canlılar için tehdit oluşturmaktadır. Bu zararları olabildiğince azaltabilmek amacıyla çeşitli sınırlandırmalar getirilmiştir. Yanma işlemi sonucunda oluşan NO_X emisyonunu kontrol altına almak için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada bir girdaplı yakıcı modellenmiştir. Yakıcıda metan ve hidrojen hava ile yakılmış ve dağıtılmış yanma tekniğinin alev stabilizasyonu ve NO_X üzerine etkileri incelenmiştir. Metan-hava ve %10-%50 arası CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasının yanma odasındaki sıcaklık ve NO_X emisyonları incelendiğinde yanma odasına verilen CO_2 miktarının sıcaklığı ve NO_X emisyonunu düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Bilim Kodu : 91440
Anahtar Kelimeler : Girdaplı Yakıcı, Alev Stabilizasyonu, Dağıtılmış Yanma Tekniği
Sayfa Adedi : 87
Danışman : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

THE EFFECTS OF THE DISTRIBUTED COMBUSTION TECHNIQUE ON FLAME STABILIZATION AND NO_X EMISSION

(M. Sc. Thesis)

GÖKTÜRK CANDAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2021

ABSTRACT

Swirl burners are widely used in different industrial areas nowadays. With eddy flows, the efficiency of combustion reactions can be increased and flame stabilization can be achieved. While heat is obtained as a result of combustion processes, various pollutants such as NO_X are also formed. These pollutant emissions pose a threat to living things because they cause air pollution, global warming and acid rain. Various restrictions have been introduced in order to reduce these damages as much as possible. There are various methods to control the NO_X emission resulting from the combustion process. In this study, a swirl burner is modelled. Methane and hydrogen were burned with air in the burner and the effects of the distributed combustion technique on flame stabilization and NO_X emission were investigated. When the temperature and NO_X emissions in the combustion chamber of methane and combustion using CO_2 dilution technique between 10%-50% are examined, it is observed that the amount of CO_2 introduced to the combustion chamber reduced the temperature and NO_X emission.

Science Code : 91440
Key Words : Swirl Burner, Flame Stability, Distributed Combustion
Page Number : 87
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarının bütün aşamalarında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamın sayısal analiz ve modelleme aşamalarında verdiği desteklerden ötürü saygıdeğer hocam Doç.Dr. Serhat KARYEYEN'e teşekkürü bir borç bilirim. Yardımlarını her zaman hissettiğim Arş. Gör. Büşra ARSLAN ve Arş.Gör. Fethi Mustafa ÇİMEN'e teşekkür ederim.

Ayrıca tüm hayatım boyunca maddi manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli ve kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELER LİSTESİ ix

ŞEKİLLER LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiv

1. GİRİŞ 1

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE 5

2.1. Hava Kirliliği ve Yakıtlar 5

2.1.1. Katı yakıtlar 6

2.1.2. Sıvı yakıtlar 7

2.1.3. Gaz yakıtlar 9

2.1.4. Yanma reaksiyonları 10

2.2. Yakıtlar ve Hava Kirliliğine Etkileri 11

2.2.1. NO_X emisyonu 16

2.2.2. NO_X oluşum mekanizması 18

2.2.3. Emisyon sınırları ve düzenlemeler 26

2.2.4. NO_X'in insan sağlığına zararları 27

2.2.5. CO_2 29

2.2.6. CO 32

2.3. Girdaplı Yakıcı 35

2.3.1. Verimlilik 35

2.3.2. Hidrolik direnç katsayısı 36

2.3.3. Yoğunluk 36

Sayfa

3. MATERYAL VE METOT 39
3.1. Girdaplı Yakıcı Geometrisinin Oluşturulması 39
3.2. Ağ Yapısının Oluşturulması 41
3.3. Model Doğrulama 42
4. MODELLEME VE SONUÇLARI 45
4.1. Girdaplı Yakıcıda Hidrojen Yanması 46
4.2. Girdaplı Yakıcıda Metan Yanması 51
4.3. Girdaplı Yakıcıda CO_2 Seyreltmesi Yapılmış Hava İle Metan Yanması 56
4.3.1. Girdaplı yakıcıda %10 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması 57
4.3.2. Girdaplı yakıcıda %20 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması 61
4.3.3. Girdaplı yakıcıda %30 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması 65
4.3.4. Girdaplı yakıcıda %40 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması 69
4.3.5. Girdaplı yakıcıda %50 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması 73
4.4. Metan ve (%10-%50) CO_2 Seyreltmesi Yapılmış Hava İle Metan Yanmasının Karşılaştırılması 77
5. SONUÇ VE TARTIŞMA 81
KAYNAKLAR 83
ÖZGEÇMİŞ 87

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Santral türlerine göre kirletici emisyon değerleri 9

Çizelge 2.2. Havanın doğal yapısında bulunan maddeler ve oranları..... 12

Çizelge 2.3. 2018 yılında kaynaklarına göre SO_2 emisyon miktarı..... 13

Çizelge 2.4. CO_2 ve CO arasındaki farklılıklar..... 35

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. 2030 yılı küresel enerji tüketimi tahminleri 5

Şekil 2.2. Fosil enerji üretim tahminleri 6

Şekil 2.3. Kaynaklarına göre yüzdesel emisyon miktarı 13

Şekil 2.4. 2007 yılında ülkelere göre NO_X emisyon miktarları 14

Şekil 2.5. 2010-2020 yılları arasında yakıt türüne göre CO_2 emisyon değişim oranları 15

Şekil 2.6. Yakıt azot monoksit oluşum süreci 24

Şekil 2.7. CO_2 emisyonuna neden olan yakıt türleri 30

Şekil 2.8. 1990-2002 yılları CO emisyon miktarları 34

Şekil 3.1. Girdaplı yakıcının yandan görünümü 39

Şekil 3.2. Girdaplı yakıcının üstten görünümü 40

Şekil 3.3. Girdaplı yakıcının alttan görünümü 40

Şekil 3.4. Ağ örgüsü oluşturulmuş girdaplı yakıcının görünümü 41

Şekil 3.5. Referans alınan model ile çalışmanın yapıldığı modelin karşılaştırılması 42

Şekil 3.6. Deneysel çalışma ile mevcut modellemenin karşılaştırılması 43

Şekil 4.1. Sınır şartları belirlenmiş girdaplı yakıcının izometrik görünümü 45

Şekil 4.2. Sınır şartları belirlenmiş girdaplı yakıcının alttan görünümü 45

Şekil 4.3. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı 47

Şekil 4.4. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız dağılımı 47

Şekil 4.5. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı 48

Şekil 4.6. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Hidrojen kütle kesri dağılımı 48

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.7. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri dağılımı 49

Şekil 4.8. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı 49

Şekil 4.9. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı 52

Şekil 4.10. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız dağılımı 52

Şekil 4.11. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı 53

Şekil 4.12. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı 53

Şekil 4.13. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı 54

Şekil 4.14. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı 54

Şekil 4.15. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı 57

Şekil 4.16. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı 57

Şekil 4.17. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı 58

Şekil 4.18. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı 58

Şekil 4.19. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı 59

Şekil 4.20. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı 59

Şekil 4.21. Metan-Hava karışımının %20 oranında CO_2 ilavesi ile yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı 61

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.22. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı 61

Şekil 4.23. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı 62

Şekil 4.24. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı 62

Şekil 4.25. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı..... 63

Şekil 4.26. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı 63

Şekil 4.27. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı 65

Şekil 4.28. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı 65

Şekil 4.29. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı 66

Şekil 4.30. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı 66

Şekil 4.31. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı..... 67

Şekil 4.32. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı 67

Şekil 4.33. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı 69

Şekil 4.34. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı 69

Şekil 4.35. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı 70

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.36. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı 70

Şekil 4.37. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı..... 71

Şekil 4.38. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı 71

Şekil 4.39. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı 73

Şekil 4.40. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı 73

Şekil 4.41. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı 74

Şekil 4.42. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı 74

Şekil 4.43. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı..... 75

Şekil 4.44. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı 75

Şekil 4.45. Metan-hava karışımlarında eksenel sıcaklık profili..... 77

Şekil 4.46. Metan-hava karışımlarında eksenel NO_X kütle kesri profili..... 78

Şekil 4.47. Metan-hava karışımlarında eksenel metan kütle kesri profili..... 79

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Ai	Alan
Dei	Çap
Deg	Yakıcının çıkış bölümünün çapı
G	Yakıcıdan geçen hava akışı
$G_{\emptyset}$	Eksenel olarak momentum akışı
G_x	Eksenel yön
H	Entalpi, kJ
h	Özgül entalpi, kJ/kg
k	Türbülans kinetik enerjisi
m_f	Yakıtın kütle oranı
m_o	Havanın kütle oranı
m_{gaz}	Yanma sonu toplam debi, kg/s
m_{hava}	Hava debisi, kg/s
$m_{yakıt}$	Yakıt debisi, kg/s
p	Statik basınç
R	Universal gaz sabiti, kJ/kg.K
r	Yarıçap
r_g	Yakıcının çıkış yarıçapı
r_1 ve r_2	Brülör çıkışının radyal sınırı

Simgeler	Açıklamalar
s	Entropi, kJ/kg.K
S	Girdap düzeyi
Sg	Optimal girdap sayısı
U	Yakıcının çıkış bölümündeki ortalama eksenel hız
Ui	Akış yoğunluğu
u	Eksenel hız bileşeni
w	Teğetsel hız bileşeni
W	Girdap çıkış hızı
w_i	Akış hızı
λ	Hava fazlalık katsayısı
φ	Yakıt/hava eşdeğerlilik oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
BAT	En uygun teknolojiler
CDC	Renksiz dağıtılmış yanma
EIA	Enerji bilgisi idaresi
H/Y	Hava-yakıt oranı
IEA	Uluslararası enerji ajansı
MILD	Orta veya yoğun düşük oksijen seyreltme
OECD	Uluslararası ekonomik işbirliği ve kalkınma örgütü
WHO	Dünya sağlık örgütü

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknolojiyle beraber enerji ihtiyacı hızlı bir şekilde artmıştır. Bu gelişmelere paralel olarak oluşan enerji ihtiyacının önemli bir kısmı fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Ancak bu durum çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Oluşan bu sorunların önlenmesi amacı ile çevreyi kirletici etkisi olan gazlara kısıtlamalar getirilmiştir. Bu sebeple dünyada yanma sonucu oluşan NO_X gazlarının azaltılması hedeflenmektedir.

Atmosferin %78'i azottan meydana gelmektedir. Azot oksitlerin temel kaynağı hava içerisindeki azottur. Atmosferdeki azotun oksitlerine NO_X dönüşümü ise yanma işlemleri sonucu olmaktadır. Azot oksitlerin büyük bir kısmı trafikteki motorlu taşıtların egzozları ile sabit yakma tesislerinde meydana gelmektedir. Azot oksitler yakıt içindeki azotlu maddelerden olduğu gibi, yüksek sıcaklıkta yakma tesislerinde kullanılan azotun oksijenle birleşmesinden de meydana gelmektedir. Atmosferde kararlı ve kararsız olarak bulunan azot oksitler yanma olaylarından sonra havaya atılan en önemli kirletici emisyonlar olarak bilinmektedir. Genellikle azot oksitler NO, NO_2, NO_3 şeklinde olup bunlardan NO_2 ve NO en önemli kirletici gazlardır. Azot oksit oluşumunu etkileyen birçok faktör bulunmasına rağmen iyi bir yanma sonucunda sıcaklık 1800 K'nin üzerine çıktığı zaman buna bağlı olarak oksijen moleküllerinin ayrılması ile beraber NO_X oluşum hızı da artmaktadır [1]. NO_X emisyonları genel olarak üç farklı emisyondan oluşmaktadır. Bunlar, N_2O, NO ve NO_2'dir. N_2O, inert bir gaz olup anestezik (uyuşturucu) karakteristiği gösterir. NO_X oluşumuna bağlı olmaksızın çevresel çevrimlerde genellikle dengeli bir yapıya sahiptir. NO, renksiz bir gazdır ve 0.50 ppm'den daha az konsantrasyonlarında, insan sağlığı için zehirleyici etkisi oldukça azdır. Bunun yanında, NO, fotokimyasal duman oluşumunda aktif rol oynamaktadır. Ayrıca NO emisyonları solunduğu zaman, sinir sistemini doğrudan etkilemekte, kandaki hemoglobine yapışmaktadır. NO_2, NO'nun, atmosferde hızlıca NO_2'ye dönüşmesi neticesinde ortaya çıkar ve göz ve burnun tahrişine yol açar. Ayrıca, NO_2 seviyesi, 15 ppm'in üzerine çıkacak olursa, akciğer rahatsızlıklarına neden olabilir [2]. Azot dioksit gaz halinde bulunduğu için solunum yolu ile canlıların sağlığı üzerinde birçok etkileri bulunmaktadır. Gaz halinde bulunan azot dioksit solunum yolu ile alındığı zaman canlıların solunum yollarında birikerek, alt solunum yollarına zararlı etkiler meydana getirmektedir. Azot dioksitin bulunduğu ortamlarda diğer kirleticilerin ve özellikle ozonun bulunması durumunda, bu kirleticiler arasında oluşan reaksiyonlar sebebiyle insan sağlığında olumsuz

etkileşimler artarak akciğerlerin bakteriyel enfeksiyonlara karşı hassasiyetleri yükselir ve biyokimyasal değişimler meydana gelmektedir[3-4]. Yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde, kompozit yakıttaki hidrojen miktarı arttıkça alev sıcaklığının da arttığı ve buna bağlı olarak da NO_X emisyonlarında artış olduğu gözlemlenmiştir [5]. Normann ve ark. yaptıkları bir çalışmada yüksek sıcaklıktaki azot oksit (NO_X) miktarındaki değişimi araştırmıştır. Yapılan araştırmada, saf oksijen kullanılmış ve yanma sonu NO_X emisyonunun ana kaynağı havadaki N_2 olmadığından yanma sonu NO_X emisyonunun azaltılması başarılmıştır [6]. Fackler vd. [7] tarafından yapılan çalışmada, zayıf ön-karışımlı CH_4, CO_2 ve N_2 karışım yakıtın yanma sonu NO_X oluşum seviyeleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada, CH_4, farklı seviyelerde CO_2 ve N_2 ile seyreltilmiştir. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, yakıt seyreltiminin NOx emisyonlarını azaltabildiği belirlenmiştir. Lee ve ark. [8]'nın yaptığı bir başka çalışmada ise yanmanın N_2, CO_2 ve buhar ile seyreltilme işlemi sonrasında yanma sonu emisyonları araştırılmıştır. Li ve ark. [9] hidrojen ilavesinin MILD yanma özellikleri ve NO mekanizması üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. CH_4/H_2 karışımlarının MILD koşulu altında NO oluşum ve indirgeme mekanizmaları detaylı kimyasal kinetik modeli ile incelenmiştir. Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada CO_2 ve Argon seyreltici ilavesinin yanma özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Genel yanma özellikleri, alev fenomenolojisi, alev şekli tahmini, kirletici emisyonu ve seyreltmenin kirlilik emisyonları üzerindeki etkilerini anlamak için CHEMKIN simülasyonu yapılmıştır[10]. Bu çalışmada Froud ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadan [11] referans alınan model ile yanma odasında hidrojen, metan ve dağıtılmış yanma tekniği CO_2 ile seyreltme tekniği ile yakılan metanın sıcaklık, hız, NO_X kütle kesri ve yakıt kütle kesri üzerindeki etkileri sayısal modellenerek incelenmiştir.

Konunun tanımı

Bu çalışmada modellenen girdaplı yanma odası için sayısal analiz yapılmıştır. Metan ve Hidrojen yanmasında önemli bir etken olan yakıt türü, yanma odası tasarımı ve dağıtılmış yanma tekniğinin yanma özellikleri ve kararsızlığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, metan yanması ve %10, %20, %30, %40, %50 oranlarında uygulanan CO_2 ilavesi ile metan yanması sonucu sıcaklık, hız, NO_X kütle kesri ve CH_4 kütle kesri dağılımları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Araştırmanın amacı

Yanma tepkimelerinin verimliliğini arttırmak ve alevin kararlılığını sağlamak amacıyla yanma odası içerisinde girdap oluşturulmuştur. Modellemesi yapılan girdaplı yakıcıda dağıtılmış yanma tekniği (CO_2 ilavesi ile) kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamınca modellenen girdaplı yakıcıda yanma odasına CO_2 takviyesinin yanma odası içerisindeki sıcaklığa, hıza, yakıt miktarına, oksijen miktarına ve yanma ürünü olan NO_X emisyonuna, etkisinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Araştırmanın önemi

Dünyada küresel sıcaklıktaki yükselişler ve iklim değişikliği nedeniyle giderek etkisini artıran çevresel sorunlar tüm dünyada bazı kısıtlamaları beraberinde getirmiştir. Bu kısıtlamalara çözüm olarak geliştirilen düşük NO_X emisyonuna sahip metan/hidrojen yakıcılarına olan talepte hızlı bir artış meydana gelmiştir. Meydana gelen bu talep ile birlikte düşük NO_X emisyonuna sahip metan/hidrojen yakıcılarındaki problemlerin araştırılması ve çözüme kavuşturulması daha fazla önem arz etmektedir. Düşük NO_X salınımlı yakıcılardaki yanma kararsızlığı ve alev stabilizasyonun değerlendirilmesi çalışmanın önemi olarak bahsedilebilir.

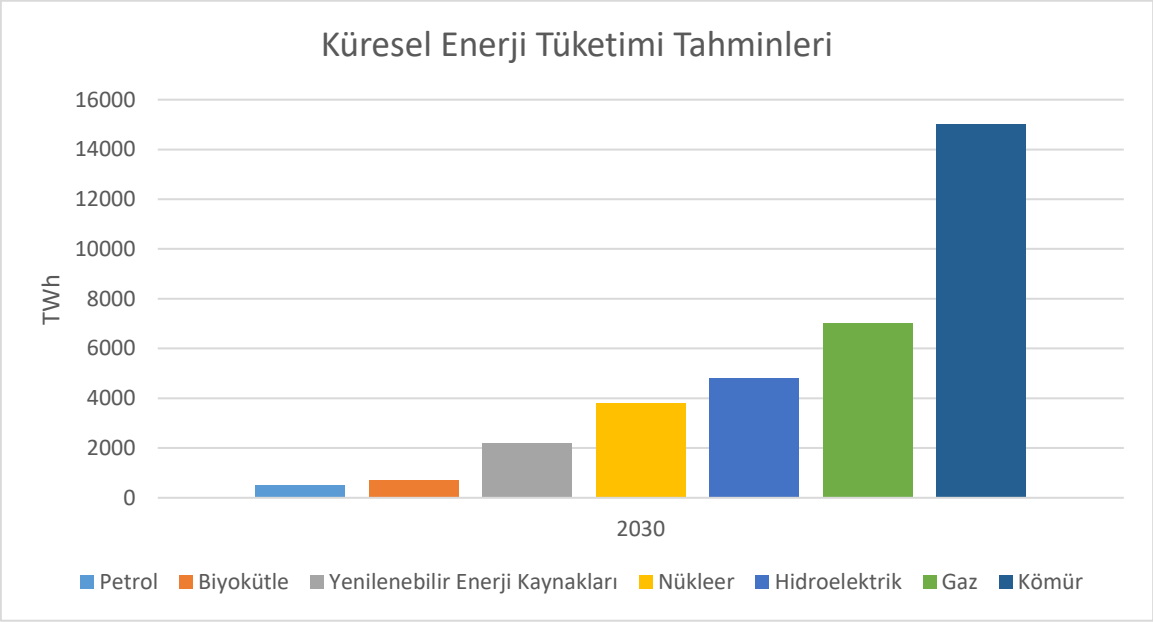
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

2.1. Hava Kirliliği ve Yakıtlar

Kavramsal olarak "yakıt" oksijen ya da oksijen içeren bir gaz karışımı ile tepkimesi sonucunda yanan maddelere denmektedir. Temel olarak üç çeşit yakıt sınıflandırması bulunmaktadır [12]. Bu sınıflar;

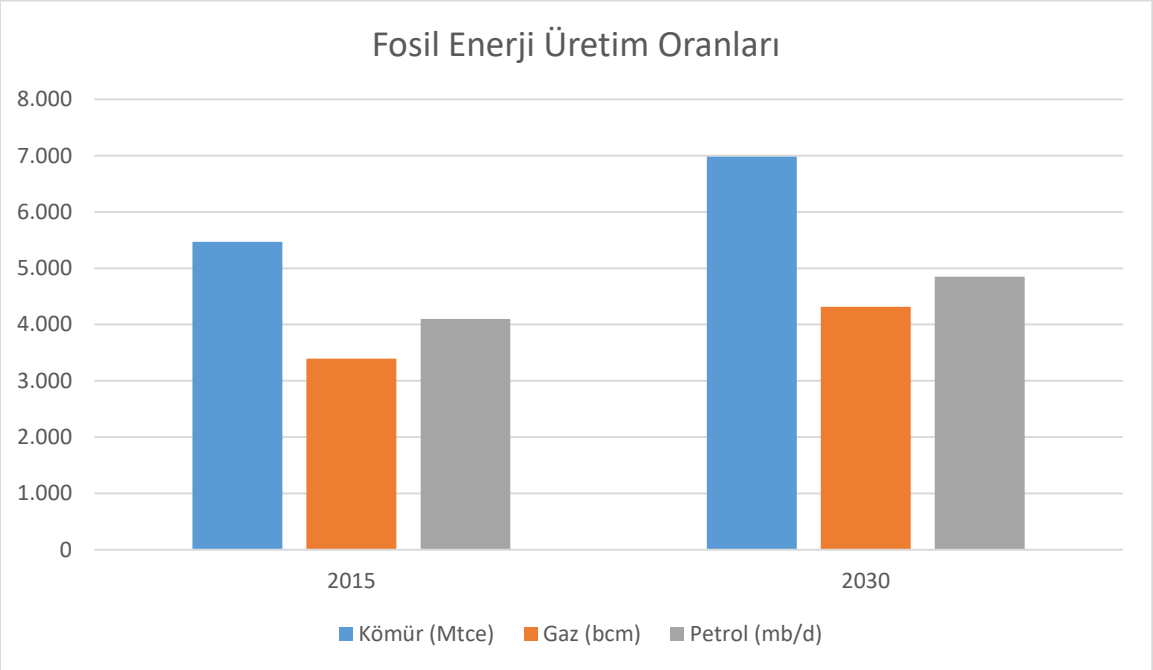
- Katı Yakıtlar
- Sıvı Yakıtlar
- Gaz Yakıtlar olmaktadır.

Küresel düzeyde yapılan araştırmalar ve çalışmalarda elde edilen veriler ve bulgular doğrultusunda gelecek zamanlarda enerji tüketim şekillerinin değişeceği düşünülmektedir. Bu bağlamda gelişmiş olarak nitelendirilen ülkelerin enerji tüketim araçlarına olan bağımlılık oranının düşeceği tahmin edilmektedir. Fakat gelişmekte olan ülke şeklinde sınıflandırılan ülkelerin ise gelecek zaman içerisinde enerji tüketim araçlarına bağımlılığının artacağı tahmin edilmektedir. Dolayısıyla gelecek zaman içerisinde küresel düzeyde enerji talebi ve tüketiminde azalma söz konusu olacağı tahmin edilmemektedir [12]. Şekil 2.1'de enerji türlerine göre 2030 yılında enerji tüketimi tahminleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1. 2030 yılı küresel enerji tüketimi tahminleri [13]

İnsanlar, fosil yakıtların yenilenebilir olmaması ve sınırlı kaynak olması nedeniyle farklı kaynak arayışları içerisine girmiştir. Fakat her ne kadar yeni kaynaklar bulunuyor olsa da genel olarak kıyaslandığında fosil yakıtlara ulaşılabilirlik daha kolay olmaktadır. Bu nedenle fosil yakıtların günlük tüketim oranlarında artış olacağı tahmin edilmektedir (Department of Energy, 2010). Küresel çapta enerji üretimine ilişkin olarak ülkelerin petrol, gaz ve kömür üretim oranları Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Fosil enerji üretim tahminleri [12]

2.1.1. Katı yakıtlar

Katı yakıtlar arasında en sık kullanılan fosil yakıt kömürdür. Isı enerjisi elde edebilmek için yaygınlıkla kullanılan kömürlerin yanması sonucunda oluşan ürünler şunlardır:

- Azot oksitler (NO_x)
- Karbondioksit (CO_2)
- Hidrokarbonlar (HC)
- Aldehitler
- Kükürt oksitler (SO)
- İnce tozlar

Isı enerjisi üretmek amacıyla kullanılan kömürlerin yanması sonucunda oluşan ürünler atmosfere yayılmakla birlikte doğal dengeyi ve çevreyi olumsuz etkilemektedir. Atmosferde biriken özellikle CO_2 gazları asit yağmurlarına sebep olmaktadır. Doğal akışa uygun bir hava olayı olan yağmurların pH değeri 5.6'dan büyük olmakla birlikte asit yağmurları pH değeri 5.6'dan küçük olan yağmurlar için tanımlanmaktadır. Bu duruma etken sebepler ise yanma işlemi sonucunda oluşan SO ve NO_xemisyonlarının HNO_3 ve H_2SO_4'e dönüşmesi olmaktadır. Yanma ürünleri olan NO_x ve SO emisyonlarının dönüşmesiyle birlikte HNO_3ve H_2SO_4 atmosferde biriken su buharları ile etkileşime girmekle birlikte su buharının yoğunlaşması sonucunda asit yağmurları oluşmaktadır [14].

2.1.2. Sıvı yakıtlar

Günümüz itibariyle en büyük endüstrilerden biri olan petrol endüstrisi kapsamınca ham petrol birtakım işlemlerle birlikte işlenerek günümüzde hava kirliliğine en büyük etkenlerden olan mazot ve benzin ürünleri üretilmektedir.

Benzin ve motorin gibi ürünler petrol rafinerilerinde ham petrolün birtakım fiziki ve kimyasal işlemler ile işlenmesi ile elde edilmektedir. Petrol rafinerilerinde kullanılan yöntemler şunlardır [14]:

- Ayrımsal damıtma
- Parçalama
- Hidrojenleme
- Birleştirme/Harmanlama yöntemleridir.

Petrol rafinerilerinde benzin ve motorin ürünlerinin yanı sıra üretilen diğer ürünler şu şekilde sıralanabilir:

- Motor yağı
- Asfalt
- Kerosen
- Plastik
- Petrol gazı

Ham petrolün işlenme sürecinde petrol içerisinde bulunan azot, ağır metal ve kükürt gibi maddeler ayrıştırılmaktadır. Bu işlemler için kullanılan yöntemler şu şekilde sıralanmaktadır:

- Hidrojenleme
- Asfalt Ayırma
- Asit gazı çıkarma
- Hidrodesülfürizasyon
- Tuzdan arındırma şeklindedir.

Atmosferde biriken ve "küresel ısınma" olarak adlandırılan duruma etken olan kimyasal bileşikler sülfür oksitler, azot oksitler, karbondioksit, aldehitler, partiküller, hidrokarbonlar ve amonyak olmaktadır. Petrol rafinerilerinde üretim prosesi kapsamınca hava kirliliğine etken durumlar şu şekilde sıralanmaktadır:

- Üretim sürecinde kullanılan ekipmanlardan kaynaklı olarak sızıntıların meydana gelmesi
- Üretim sürecinde enerji elde edebilmek amacıyla uygulanan yüksek sıcaklık değerlerinde gerçekleştirilen yanma tepkimeleri
- Üretim süreci kapsamında yer alan sıvıların ve buharın ısıtılması
- Üretim süreci kapsamında yer alan ürünlerin diğer ünitelere aktarılması

Petrol rafinerisi üretim süreci kapsamında oluşan kirletici maddeler genellikle arızalar, kaçak emisyonlar ve baca emisyonları dolayısıyla havaya yayılmaktadır. Petrol rafinerilerinin üretim prosesinde oluşan ve havaya yayılan azot oksitler ve hidrokarbonlar özellikle ozon oluşumuna etken olmaktadır. Bu bağlamda her 1 milyon ton ham petrolün işlenmesi sonucunda oluşan kirleticiler için sayısal veriler şu şekilde sıralanmaktadır [14].

- 20.000-820.000 ton CO_2
- 60-700 ton NO_x
- 10-3.000 ton partikül
- 30-6.000 ton SO_2
- 50-6.000 ton uçucu organik bileşik havaya salınmaktadır.

2.1.3. Gaz yakıtlar

Maddenin gaz halinde bulunan yanıcı maddeler, gaz yakıtlar olarak adlandırılmaktadır. Hidrojen, propan, likit petrol gazı (LPG), metan ve doğalgaz gaz yakıtlara örnek olarak gösterilebilmektedir.

Küresel ısınma ve çevre kirliliğinin son yıllarda ciddi artış göstermesiyle birlikte bu durumlara ilişkin olarak çeşitli önlemler alınmaya devam etmektedir. En sık kullanılan gaz yakıt türlerinden biri olan doğal gazların yanma işlemi kusursuz gerçekleşmesiyle birlikte yanma ürünü olarak oluşan kirletici maddeler oldukça az olmaktadır. Bu bağlamda fosil yakıtlar arasında çevreye en az zararlı yakıt doğal gaz olmaktadır. Doğal gazın çevresel zarar bakımından en az zararlı yakıt olmasının çeşitli sebepleri bulunmaktadır. Bu sebeplerden en önemlisi hava ve çevre kirliliğine oldukça önemli etken olan üç maddenin doğal gaz içerisinde bulunmuyor olmasıdır [15].

Çizelge 2.1. Santral türlerine göre kirletici emisyon değerleri [39]

Santral Türü	CO_2 **(kg/MWh)**	SO_2 **(kg/MWh)**	NO_x **(kg/MWh)**	**Partiküller (kg/MWh)**
Kömür yakıt kullanılan tesisler	994	4.71	1,955	1.012
Akaryakıt kullanılan tesisler	758	5.44	1,814	Bilinmiyor
Gaz yakıt kullanılan tesisler	550	0.0998	1.343	0.0635
Hidrotermal-buharlı ve sıvı hâkim tesisler	27.2	0.1588	0	0
Hidrotermal-Gayzer kuru buhar	40.3	0.000098	0.000458	Hava kirliliğine etkisi düşük
Hidrotermal-kapalı döngü	0	0	0	Hava kirliliğine etkisi oldukça düşük

Çizelge 2.1'de yer alan veriler değerlendirildiğinde en çok CO_2 emisyonlarının kömür yakıt kullanılan tesislerden kaynaklı olduğu görülmekle birlikte bu sırayı akaryakıt kullanılan tesisler ve ABD'de yer alan santraller kaynaklı olarak oluşan CO_2 emisyonları takip etmektedir. SO_2 emisyonlarına göre değerlendirildiğinde ise en yüksek SO_2 emisyon kaynaklarının akaryakıt kullanılan tesisler olduğu görülmekle birlikte bu sıranın hemen ardından kömür yakıt kullanılan tesisler geldiği görülmektedir. ABD santralleri kaynaklı olarak oluşan SO_2 emisyon miktarı ise bu sırayı takip etmektedir. Hidrotermal olarak faaliyet gösteren tesislerde ise Hidrotermal-kapalı döngü tesislerinde SO_2 emisyonlarının olmadığı görülmektedir.

2.1.4. Yanma reaksiyonları

Yanıcı madddeler ile O_2'nin kimyasal tepkimesi sonucunda yanma durumu oluşmaktadır. Yanmanın oluşabilmesi için bazı temel durumlar bulunmaktadır. Bunlardan ilki yanma durumunun optimal olabilmesi için gerekli sıcaklığın sağlanması olmaktadır. Bir diğer durum ise yakıt ve hava karışımı arasında dağılımın sağlanmış olmasıdır. Son durum ise kimyasal reaksiyonun oluşabilmesi gereken zaman olmaktadır. Yanmanın oluşumuna etken kimyasal tepkime gerçekleşmeden önce yanmaya ilişkin mevcut bilişenlere girdiler adı verilmektedir. Kimyasal tepkime gerçekleştikten sonra ve yanma oluştuktan sonra oluşan bileşenler ise "ürünler" olarak adlandırılmaktadır [16].

Yanmanın oluşumu için gerekli yakıt ve oksijenin tek başına tepkimeye girmesi yanmanın oluşumu için yeterli olmamaktadır. Bu unsurlar ile birlikte yanmanın oluşumu için gerekli olan yakıtın tutuşma sıcaklığı, yanmanın oluşumu için gerekli olan sıcaklığın üstünde olması gerekmektedir. Ayrıca yakıt ve hava karışımlarının dağılımlarının gerçekleşmiş olması gerekmektedir [16].

Kimyasal olarak yanma durumu incelenirken yakıt ve hava miktarlarının sayısal ifade hava-yakıt oranı (HY) olmaktadır. Bu sayısal ifadenin baz aldığı birim genellikle kütle olmaktadır. Bu bağlamda yanma durumu incelemelerinde havanın kütle olarak miktarı ile yanma reaksiyonuna dahil olan yakıt miktarı oranlanması sonucunda HY elde edilmektedir. HY'nin formülü aşağıda gösterilmektedir [16].

$$HY = \frac{m_g}{m_f} \tag{2.1}$$

Bir yakıt birimi ve yakıcı birim olarak havanın tepkimeye girmesi sonucunda oluşan sıcaklık ve ürünlerin oluştuğu kimyasal tepkimeler "yanma" olarak ifade edilmektedir. Tepkime süreci içerisinde fiziksel ve kimyasal etkileşim olmaktadır. Üç farklı yanma durumu bulunmaktadır. Bunlar;

- Difüzyon (ön karışımsız) yanma
- Ön karışımlı yanma
- Kısmi ön karışımlı yanma durumlarıdır.

Yanmanın oluşumuna etken maddelerin tepkimesi (yanma) sonucunda farklı enerjiler oluşmaktadır. Bu kimyasal reaksiyon kapsamınca oluşan tepkime içerisinde yer alan kimyasalların türlerinin enerjinin hesaplanabilmesi için entalpisi ya da iç enerjisi dikkate alınmaktadır. Yanma incelemelerinde enerji aşağıdaki formülde gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [17].

$$H = U + pV \tag{2.2}$$

Bu formül içerisinde yer alan değişkenlerin ifadesi ise şu şekildedir:

- H: Entalpi
- U: İç Enerji
- pV: mekanik enerjiyi belirtmektedir.

Herhangi bir kimyasal türün entalpisi ya da iç enerjisi net bir biçimde ölçümlenememektedir. Bu nedenle bu hesaplamalarda belirli bir durum baz alınmak durumundadır.

2.2. Yakıtlar ve Hava Kirliliğine Etkileri

Hava, solunum yapan tüm canlılar için en önemli kaynak olmaktadır. Bu bağlamda hava kirliliği durumunda solunum yapan canlıların yaşamları bu durumdan zarar görmektedir. Günlük dilde kullanımdan ayrı olarak hava kirliliği, hava içerisinde dışarıdan karışan yabancı maddelerin anormal olarak hava içerisinde miktar ve yoğunluk olarak artış göstermesini ifade etmektedir. Bu bağlamda havanın kendi yapısı içerisinde bulunmayan maddelerin havanın durumuna olumsuz etki etmesi hava kirliliği olarak tanımlanabilir.

Havanın doğal yapısı içerisinde çeşitli maddeler bulunmaktadır. Çizelge 2.2'de bu maddeler gösterilmektedir [12].

Çizelge 2.2. Havanın doğal yapısında bulunan maddeler ve oranları [12]

Madde	**Hacim (ppm)**	**Madde**	**Hacim (ppm)**
Azot oksitler	780.900	**Metan**	2.2
Oksijen	209.500	**Kripton**	1
Argon	9.300	**Hidrojen**	0.5
Karbondioksit	800	**Ksenon**	0.08
Neon	18	**Azot dioksit**	1
Helyum	5.2	**Su buharı**	Değişiklik göstermektedir

Çizelge 2.2'de görüldüğü üzere hava içerisinde yer alan maddeler arasında hacim olarak en büyük kimyasal bileşik azot oksitlerden meydana gelmektedir. Bununla birlikte oksijen ve argon diğer maddelere kıyasla havada daha çok bulunmaktadır.

Havanın doğal yapısında olmayan maddeler ve buna ilişkin durumlardan aşağıda bahsedilmektedir.

Partiküller

Hava içerisinde asılı olarak duran katı ve sıvı aerosollere partikül adı verilmektedir. Havaya karışan partiküller genellikle ince karbon halinde bulunan is parçaları olmaktadır. Bununla birlikte havaya karışan partiküller içerisinde ağır metal oksitleri de bulunmaktadır. Yakıtların yanması sonucunda oluşan yan ürünlerden biri de polisiklik hidrokarbonlar olmaktadır. Hava kirliliğine etken unsurlar arasında polisiklik hidrokarbonlar da bulunmaktadır [16].

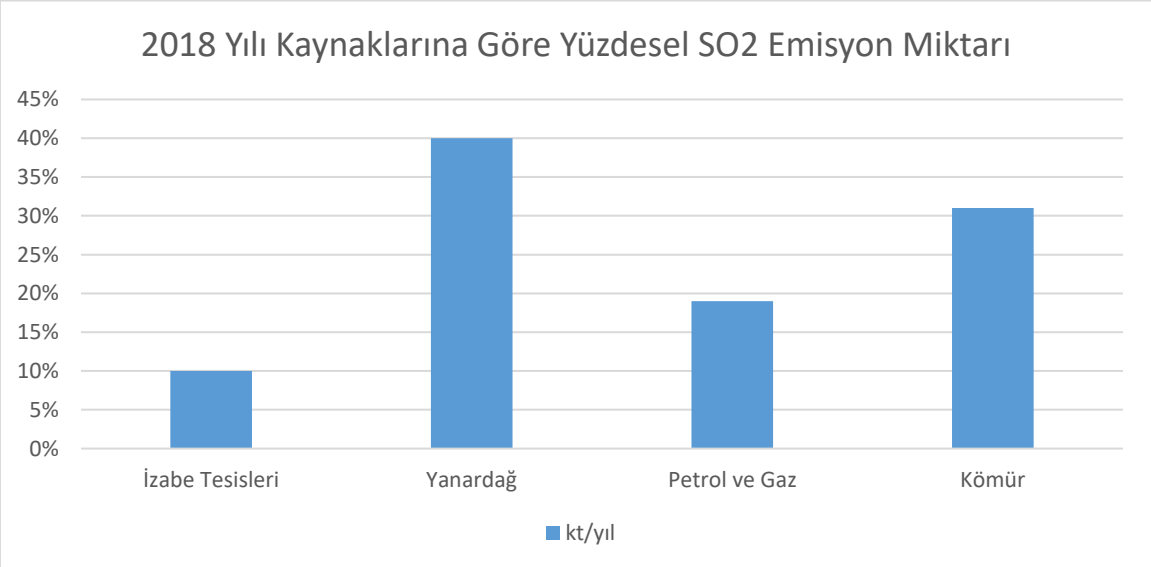
Kükürt Oksitler

Fosil yakıt türlerinden, kükürt içeren fosil yakıtların yanma durumu neticesinde havaya karışan kirleticilerden biri ise kükürtlü oksitler olmaktadır. Kükürtlü oksitlerin havaya karışması durumu çoğunlukla fabrika ya da soba bacalarından çıkan atıklar sonucunda olmaktadır. Kükürtlü oksitler içerisine sülfür dioksit, hidrojen sülfürler, atmosferde tepkimeye girmektedirler. Bu tepkimeler sonucunda ise sülfürik asit ve sülfatlar oluşmaktadır. Dolayısıyla kükürtlü oksitlerin atmosferde tekrar tepkimeye girmesi sonucunda hava kirliliğine etken farklı maddeler oluşmaktadır [16].

2018 yılı için dünya genelinde yüzdesel SO_2 emisyonları ve kaynağına göre toplam emisyon miktarları Çizelge 2.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 2.3. 2018 yılında kaynaklarına göre SO_2 emisyon miktarı [18]

Emisyon Kaynağı	**SO_2 Emisyon Miktarı (kt/yıl)**
Yanardağ	19868
Kömür	15217
Petrol ve Gaz	9385
İzabe Tesisleri	5216



Şekil 2.3. Kaynaklarına göre yüzdesel emisyon miktarı [18]

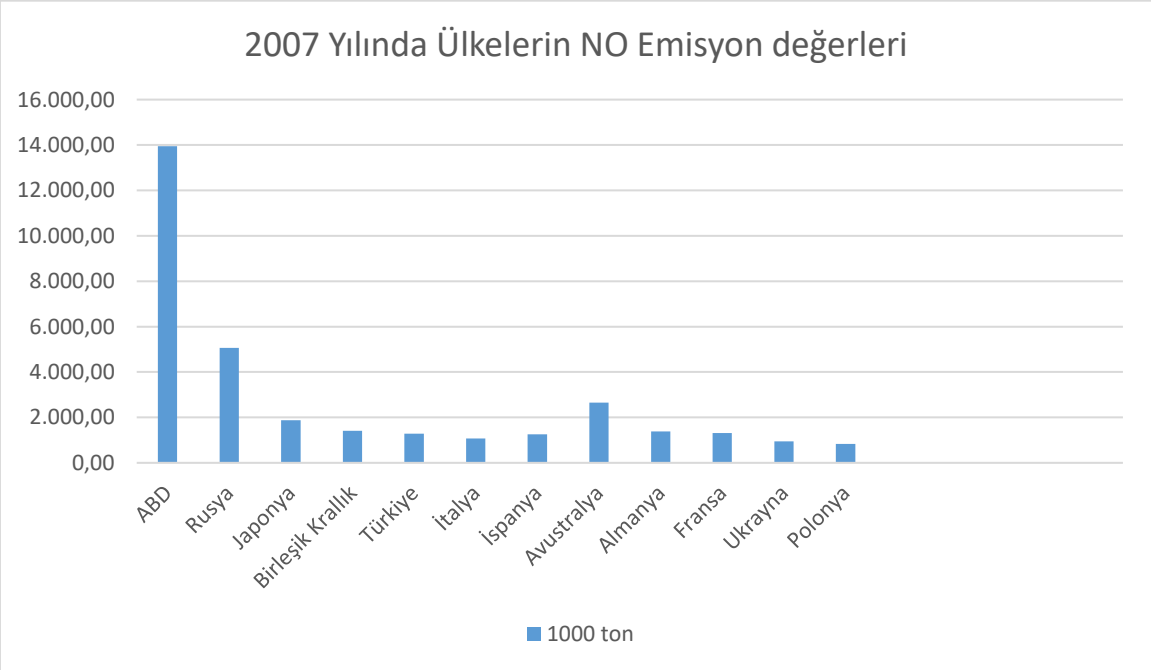
2018 yılı için verilen SO_2 emisyon miktarları değerlendirildiğinde en yüksek emisyon kaynağı yanardağlar olmakla birlikte bunun ardından günümüz itibariyle en yaygın kullanılan fosil yakıt türlerinden biri olan kömür gelmektedir. Ardından ise araçlarda ve üretim süreçleri gibi farklı alanlarda kullanılan petrol ve gaz yakıtlarının kullanımı sonucunda oluşan emisyon miktarı bulunmaktadır [16]. Şekil 2.3 değerlendirildiğinde en az SO_2emisyon kaynağının izabe tesisleri olduğu görülmektedir.

Organik Maddeler

C1 ve C5 arasında bulunan bileşikler hava kirliliğine etken bileşiklerdir. Bu bileşikler atmosferde çeşitli tepkimeler ve oksitlenme durumları neticesinde farklı kirletici unsurlar oluşturmaktadır [16].

Azot Oksitler

Azotlu oksitlerin hava kirliliğine etkileri egsoz ve bacalardan çıkan NO ve NH_3'ün havaya karışma sonucunda olmaktadır. Ayrıca bu bileşikler atmosferde çeşitli tepkimeler sonucunda farklı kirleticiler (NO_2 ve NO_3) oluşturmaktadırlar[16] . Ülkelerin 2007 yılında NO_x emisyon miktarları Şekil 2.4'te gösterilmektedir.

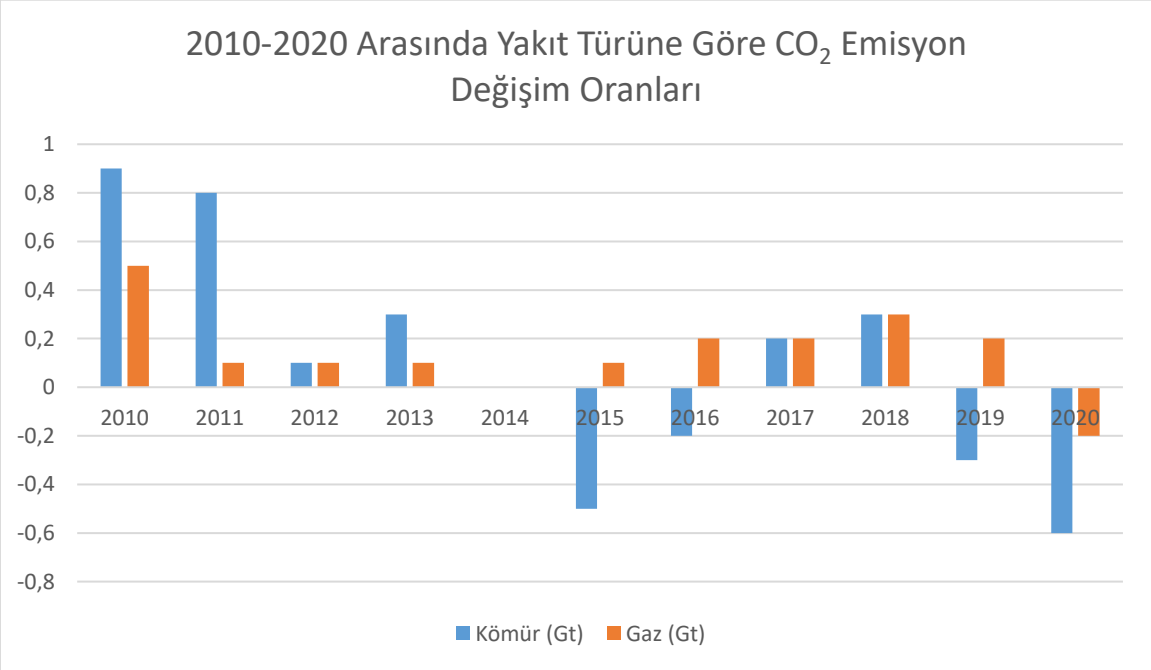


Şekil 2.4. 2007 yılında ülkelere göre NO_X emisyon miktarları [18]

Grafikte yer alan veriler değerlendirildiğinde özellikle ABD'de diğer ülkelere kıyasla oldukça büyük miktarda NO_xemisyonu gerçekleşmekle beraber bu sırayı hemen ardından Rusya takip etmektedir. Bununla birlikte ABD ve Rusya'da gerçekleşen NO_xemisyon miktarı grafik içerisinde yer alan diğer ülkelerde gerçekleşen NO_x emisyon miktarının toplamına yakın olduğu görülmektedir.

Karbon Oksitler

Hava kirliliğine etken olan karbon oksitlerin hava kirliliğine etkilerinin en önemli kaynakları otomobil egzozları olmaktadır. Bununla birlikte çeşitli fosil yakıtların yanması sonucunda oluşan ürünlerin havaya karışma sonucunda da hava kirliliğine etken olmaktadırlar. Moleküler kütle bakımından karbonmonoksit ağır bir maddedir. Havanın da mevcut moleküler kütlesi ile karbonmonoksit gazının moleküler kütlesinin eşit olması sebebiyle bulunduğu yerde dağılmamaktadır. Bununla birlikte bulunduğu yerde fark edilememektedir. Dolayısıyla bu maddeler genel anlamda oldukça tehlike arz etmektedirler. Şekil 2.5'te 2010-2020 yılları arasında kullanılan gaz, kömür yakıtları kaynaklı olarak oluşan CO_2emisyonları ve değişim oranları gösterilmektedir.



Şekil 2.5. 2010-2020 yılları arasında yakıt türüne göre CO_2 emisyon değişim oranları [18]

Şekil 2.5'te yer alan veriler değerlendirildiğinde CO_2 emisyonlarının zaman içerisinde azalmaya başladığı görülmektedir. Bununla birlikte 2014 yılında gaz ve kömür yakıtları kaynaklı olarak oluşan CO_2emisyonlarında değişim olmadığı görülmektedir. 2015 yılında ise ilk defa kömür yakıtları kaynaklı olarak oluşan CO_2 emisyonlarının geçmiş yıla göre azaldığı görülmektedir. Bu bağlamda 2015 yılında kömür yakıtlar kaynaklı olarak oluşan CO_2 emisyonlarının -0,5 Gt azaldığı görülmektedir. Azalma oranı değerlendirildiğinde CO_2 emisyonlarına ilişkin alınan önlemlerin etkin olduğu görülmektedir.

2016 yılına gelindiğinde kömür yakıtlar kaynaklı olarak oluşan CO_2 emisyonlarında -0.2 Gt'lik bir azalma olduğu görülmektedir. 2017 ve 2018 yıllarında artış gösteren kömür yakıtlar kaynaklı CO_2 emisyonlarının 2019 ve 2020 yılında sırasıyla -0,3 ve -0,6 değerinde azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte 2020 yılında COVID-19 salgının da etkisiyle yavaşlayan ve ara verilen üretim faaliyetleri dolayısıyla gaz ve kömür yakıtlar kaynaklı olarak oluşan CO_2 emisyonlarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca 2010-2020 yılları arasında gaz yakıtlar kaynaklı olarak oluşan CO_2 emisyonlarının ilk defa azaldığı görülmektedir.

2.2.1. NOx emisyonu

Atmosferde biriken kirleticilerden biri NO_x emisyonları olmaktadır. Bu emisyon atmosferde birikmesi sonucunda asit yağmurlarına ve ozon üretimine sebep olmaktadır. Dolayısıyla çevresel olarak ciddi bir sorun ortaya koymaktadır. NO_x emisyonlarının sebep olduğu asit yağmurları ve ozon doğaya, araçlara, binalara ve pek çok farklı unsura zarar vermekle birlikte görüş mesafesini azaltmaktadır. NO_x emisyonlarının azaltılmasına ilişkin önlemler alındığı takdirde asit yağmurları ve ozon miktarı da azaltılabilmektedir. Yanma tepkimesi sonucunda azot monoksit ve azot dioksit ürünleri oluşmaktadır. Bu bileşikler NO_x olarak tanımlanmaktadır. NO_x oluşumu için üç çeşit mekanizma bulunmakla birlikte bu mekanizmalar ani, ısıl ve yakıt mekanizmalarından oluşmaktadır. Isıl NO_x mekanizması yüksek sıcaklık değerlerinde oksijen ve azotun etkileşimi sonucunda meydana gelmektedir. Isıl NO_x oluşumuna ilişkin üç temel tepkime bulunmakla birlikte bu mekanizma aynı zamanda Zeldovich mekanizması olarak da adlandırılmaktadır [17].

Isıl NO_x oluşum mekanizmasında temel reaksiyonlar şu şekilde sıralanmaktadır.

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \tag{2.3}$$

$$N_2 + O \leftrightarrow NO + N \quad (2.4)$$

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \quad (2.5)$$

Yanma tepkimelerinde hidrokarbonların yakıt olarak kullanılması durumunda düşük sıcaklıklarda dahi NO_x oluşumu ani olarak yükselebilmektedir. Bununla birlikte yanma tepkimesi için kullanılan yakıtların zengin olması durumunda da NO_x oluşumu ani olarak artabilmektedir [17].

Ani NO_x oluşumları özellikle alev bölgesinde meydana gelmektedir. Bununla birlikte ani NO_x oluşumu durumunda hacim olarak 10-102 ppm arasında değişiklik gösterebilmektedir. Bununla birlikte ani NO_x oluşumunun temel olarak oksijen ve hidrooksijenin mol oranları ile doğrudan ilişkili olduğu belirlenmiştir [17]. Ani NO_x oluşum mekanizması kapsamında yer alan tepkimeler şu şekildedir:

$$\mathrm{CH} + \mathrm{N_2} \leftrightarrow \mathrm{HCN} + \mathrm{N} \quad (2.6)$$

$$CH_2 + N_2 \leftrightarrow HCN + NH \quad (2.7)$$

$$CH_2 + N_2 \leftrightarrow H_2CN + N \quad (2.8)$$

$$C + N_2 \leftrightarrow CN + N \quad (2.9)$$

Yanma bölgesine dahil edilen hava içerisinde yer alan oksijen ve yanma işleminin gerçekleştirilmesi için kullanılan yakıtta bulunan azotun etkileşime girmesi sonucunda yakıt NO_x oluşumu gerçekleşmektedir. Bununla birlikte çok düşük miktarlarda gaz halinde bulunan yakıtların (doğalgaz, LPG vs.) kullanıldığı yanma reaksiyonlarında da oluşabilmektedir. Bununla birlikte yanma işlemi için kullanılan yakıt içerisinde bulunan azot miktarı yoğunlukta olduğu durumda yanma işlemi sonucunda meydana gelen NO_x emisyonunun büyük bir çoğunluğu yakıt kaynaklı olarak oluşmaktadır.Yanma tepkimeleri sonucunda meydana gelen NO_xemisyonu farklı koşullara bağlı olarak oluşmaktadır. Bununla birlikte NO_x emisyonuna etken en önemli unsurlar yanma işlemi için kullanılan yakıt içerisinde bulunan azot miktarı ve yanma sıcaklığı olmaktadır.

Ayrıca NO_xemisyonuna etken diğer unsurlar ise yanma işleminin gerçekleştirilmesi için tepkime içerisine dahil edilen yanma havası sıcaklığı ve hava fazlalık oranları olmaktadır. NO_x oluşum mekanizmalarına göre NO_x emisyonuna etken unsurlar şu şekilde sıralanmaktadır:

- Isıl NO_x oluşumunda en önemli etken alev sıcaklığı olmaktadır.
- Yakıt NO_x oluşumunda en önemli etken yanma tepkimesi için kullanılan yakıt içerisinde bulunan azot miktarı olmaktadır [17].

2.2.2. NO_X oluşum mekanizması

Yakıt ve yakıcının kimyasal tepkimesi sonucunda oluşan yanma durumu neticesinde farklı NO_x türleri oluşmaktadır. Bu türler şunlardır:

- Diazotpentaoksit (N2O5)
- Diazottrioksit (N2O3)
- Diazotoksit (N2O)
- Azot dioksit (NO2)
- Azot monoksit (NO)

Yanma sonucunda oluşan bu türler maddesel olarak kararlı gaz niteliğindedirler. Hava kirliliği kapsamında en önemli etkiyi ise bu emisyonlardan azot monoksit, azot dioksit ve diazotoksit oluşturmaktadır. Azot monoksit yapısal olarak insan sağlığını tehdit eden bir emisyondur. Bununla birlikte azot monoksit, dumanın oluşumuna da en önemli etkenlerden biri olmaktadır [16].

Yanmanın gerçekleşmesi sonucunda genellikle NO_x'ların büyük bir çoğunluğunu azot monoksit oluşturmaktadır. Bununla birlikte insan sağlığının yanı sıra çevresel olarak da azot monoksitin oldukça olumsuz etkileri bulunmaktadır. Yanma süreçlerinde NO_x(azotoksit) oluşumunda etken olan iki farklı unsur bulunmaktadır. Bunlardan ilki molarite olarak %21 oksijen ve %79 azot içeren hava olmaktadır. Diğer etken ise azot içeren yakıtlar olmaktadır. NO_x emisyon değerinin 3 farklı yoldan oluştuğu kabul edilmektedir. Bu değerler şunlardır [16] :

- Isıl (thermal) NO_x
- Ani (prompt) NO_x
- Yakıt (fuel) NO_x olmaktadır.

Isıl NO_x (Zeldovich Mekanizması) Oluşum Mekanizması

Bu mekanizmada, tavan seviyeye ulaşan alev sıcaklığında, yüksek ısıl enerji aracılığıyla havada mevcut azot oksidasyonu tespit edilmektedir. Bu mekanizma temel olarak pik seviyeye ulaşan alev sıcaklığına ve oksijen kullanılabilirliğine göre hesaplanmaktadır.

Aşağıda oksijen atomlarının oluşumu gösterilmektedir [16].

$$O_2 \leftrightarrow 2O \tag{2.10}$$

$$O_2 + M \leftrightarrow O + O + M \tag{2.11}$$

Zeldovich mekanizması kapsamınca azotun oksidasyonu aşağıda gösterildiği gibi olmaktadır.

$$O + N_2 \leftrightarrow NO + N \tag{2.12}$$

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{2.13}$$

Isıl NO_x oluşum mekanizması içerisinde en zor aşama N_2 bağlarının parçalanması aşaması olmaktadır. $O_2 \leftrightarrow 2O$ ve $O_2 + M \leftrightarrow O + O + M$ fakir ve kısmen zengin (λ<0.85) alevler kapsamında azot monoksit oluşturulabilmesi konusunda oldukça önem arz etmektedirler. Buna ilişkin olarak Lavoie ve arkadaşları aşağıdaki reaksiyonu önermişlerdir [17].

$$N + OH \leftrightarrow NO + H \tag{2.14}$$

$O + N_2 \leftrightarrow NO + N$ reaksiyonu ise zengin alevler (λ<1) için önem arz etmektedir. $N + OH \leftrightarrow NO + H$ durumunda azot monoksit oluşumu yüksek sıcaklıklar (T> 1800 K) bazında önem arz etmektedir. Bununla birlikte reaksiyon içerisinde her 90 K birim sıcaklık artışı söz konusu olduğunda azot monoksit oranı da buna bağlı olarak iki kat artış göstermektedir [17].

$O_2 \leftrightarrow 2O$, $O_2 + M \leftrightarrow O + O + M$ ve $O + N_2 \leftrightarrow NO + N$ reaksiyonlarında azot monoksit mekanizması bulunmaktadır. $O_2 \leftrightarrow 2O$ reaksiyon ise azot monoksit oluşumunda en önemli aşama olarak kabul edilmektedir. Yukarıda gösterilmekte olan reaksiyonlar için oran sabitleri aşağıda gösterilmektedir [17].

$$k_1 = 1.8\ x\ 10^8 exp\ \left(-\frac{38370}{T}\right) k_{-1} = 3{,}8\ x\ 10^7 \exp(-\frac{425}{T}) \quad (2.15)$$

$$k_2 = 1{,}8\ x\ 10^4\ T\ \exp(-\frac{4680}{T})\ \ k_{-2} = 3{,}8\ x\ 10^3\ T\ exp(-\frac{20820}{T}) \quad (2.16)$$

$$k_3 = 7{,}1\ x\ 10^7\ T\ \exp(-\frac{-450}{T})\ k_{-3} = 1{,}7\ x\ 10^8\ T\ \exp(-\frac{24560}{T}) \quad (2.17)$$

$O_2 \leftrightarrow 2O$, $O_2 + M \leftrightarrow O + O + M$ ve $O + N_2 \leftrightarrow NO + N$ için belirlenen oran sabitleri sırasıyla k_1, k_2, k_3 olarak tanımlanmıştır. Ters tepkime oran sabitleri ise sırasıyla k_{-1}, k_{-2}, k_{-3} olarak tanımlanmıştır [6]. $O + N_2 \leftrightarrow NO + N$ tepkimesi ihmal edilebilir olduğu varsayıldığında

$$k_2[O_2]\ \ k_3[OH]_{eq} \quad (2.18)$$

Bu bağlamda Zeldovich mekanizması aracılığı ile azot monoksit oluşum oranı şu şekilde olmaktadır [17]:

$$\frac{d[NO]_T}{dt} = \frac{2[O]\{k_1 k_2[N_2] - k_{-1}k_{-2}[NO]^2\}}{k_2[O_2] + k_{-1}[NO]} \quad (2.19)$$

Azot monoksit oluşum oranının gösterildiği formülde kimyasal türlerin her biri mol.m^3olarak değerlendirilmektedir.

Zeldovich azot monoksit oluşum mekanizması için pek çok arklı azot monoksit modelleri bulunmaktadır. Bu modeller kapsamınca N atomu daimi olarak değerlendirilmektedir. O atomu ise konsantrasyon dengesi dikkate alınarak tespit edileceği düşünülürse en üst seviyede azot monoksit oluşum oranı şu şekilde gerçekleşebilmektedir [17].

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

Azot monoksit oluşum oranı bu denklem içerisinde özellikle gaz sıcaklığına bağlı olmaktadır. Bununla birlikte basınç ve O_2 konsantrasyonuna bağımlılığı daha düşük seviyededir.

Ani NO_x Oluşum Mekanizması (Fenimore)

Bu mekanizma ilk olarak Fenimore tarafından önerilmiştir. Ani NO_x oluşum mekanizması azot monoksit oksidasyonu veya N_2 azaltılması öncesinde hidrokarbon parçalanması sonucunda oluşan azot tepkimesini tespit edebilmek için kullanılmaktadır. Bu mekanizma özellikle düşük sıcaklıklarda, ısıl mekanizma sonucunda oluşan azot monoksit ile kıyaslandığında oldukça küçük kalmaktadır. Ani NO_x oluşumu, Yakıt NO_x'a kıyasla hidrokarbon yakıt parçalanmasının fazla olduğu, yakıt olarak zengin alanlarda daha çok önem arz etmektedir. Ani azot monoksit, alevlerde oluşan ani NO_x'un büyük bir çoğunluğunu oluşturabilmektedir. Düşük sıcaklıklarda (T<1800K), ısıl azot monoksit mekanizması neticesinde oluşan azot monoksit, toplam oluşan azot monoksitle kıyaslandığında oldukça küçük kalmaktadır. Azot monoksit oluşumu genellikle aşağıda gösterildiği gibi olmaktadır [17].

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N \tag{2.21}$$

$$C_2 + N_2 \leftrightarrow 2CN \tag{2.22}$$

$$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2 + H_2O \tag{2.23}$$

Tepkimeler sonucunda azot ve siyanür oksidasyonu neticesinde azot monoksit oluşumu gerçekleşmektedir.

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{2.24}$$

$$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO \tag{2.25}$$

Hidrokarbonlar, ani NO_xoluşumuna etken kaynak olmaktadır. Yakıt parçalanması sonucunda oluşan kimyasal türlere hidrokarbonlar etki edebilmektedir [17].

Ani azot monoksit yukarıda bahsedilen mekanizmaya kıyasla daha hızlı bir şekilde meydana gelen azot monoksit olarak ifade edilebilmektedir. Bu ifade vasıtasıyla ani NO_2'nin oluşumuna etken üç farklı kaynak tanımlanabilmektedir.

Bu kaynaklardan ilki tepkime içerisinde ve yanmış gazlar kapsamında bulunan ısıl azot monoksit mekanizmasının oranını hızlandıran dengesi mevcut olmayan oksijen ve hidrooksijen konsantrasyonu olmaktadır. İkinci kaynak ise tepkime alanı içerisinde bulunan hidrokarbon radikal tepkimeler ve moleküler azot arasında oluşan ardışık tepkime (Fenimoperprompt NO mekanizması) olmaktadır. Son kaynak ise cisim birleşmesi tepkimesi neticesinde meydana gelen N_2ve O atomları arasında meydana gelen tepkime sonucunda oluşan N_2O olmaktadır [17].

$$O + N_2 + M \rightarrow N_2O + M \tag{2.26}$$

Bu ardışık tepkime sonucunda oluşan azot monoksit aşağıda gösterilmekte olan tepkime sonucunda tespit edilebilmektedir.

$$N_2 + O \rightarrow NO + NO \tag{2.27}$$

Azot monoksitin meydana gelme sürecinde gösterilen tepkimelerin ve meydana gelen ani azot monoksitin toplam miktarı yakıcı türün koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Azot monoksit oluşumunu hızlandıran, dengede olmayan radikal konsantrasyon ön karışımlı ve difüzyon alevler kapsamınca azot monoksitin büyük bir çoğunluğunu oluşturmaktadır.

Ani azot monoksit oluşumuna etken olan hidrokarbon radikal moleküler azot mekanizması, azot monoksit oluşumunun büyük çoğunluğuna etken ön karışımlı hidrokarbon yanmasında ve difüzyon alevlerinde etken olmaktadır.

Azot monoksit oluşumuna etken N_2O, yanmış gaz sıcaklığı ve yakıt ve hava oranı düşüş gösterirken veya basıncın artma durumunda artış göstermektedir. Hidrokarbon yanması durumunda birbirinden farklı pek çok kimyasal tür ve karmaşık tepkimeler bulunmaktadır. Dolayısıyla bu değerleri sayısal olarak tespit etmek zorlaşmaktadır.

Sayısal olarak ifade edilebilmesinin güç olması nedeniyle bu konuyla ilgili olarak araştırmacılar sayısal ifadelerin tespit edilebilmesi için genel modellerin kullanılmasını önermektedir. Bu konuya ilişkin olarak De Soete aşağıdaki ifadeyi önermektedir [19].

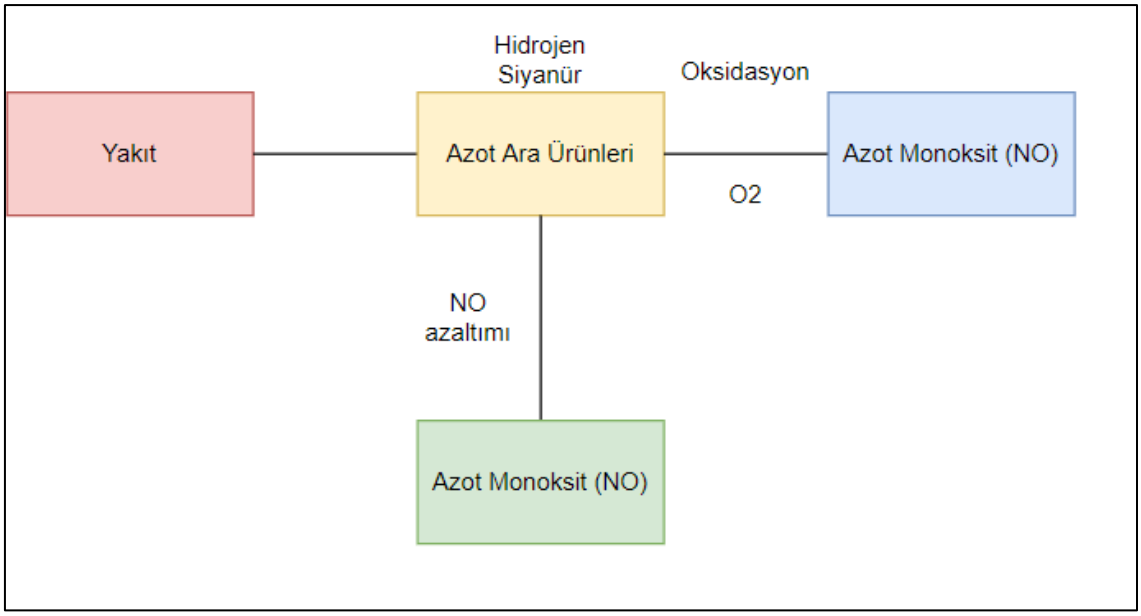
$$\frac{d[NO]_{pr}}{dt} = 1{,}2 \times 10^{7}[N]_2[O]_2[CH_4] \exp(-\frac{60000}{RT}) \quad (2.28)$$

DeSoete'nin önermiş olduğu bu formül 2000 K'ya yakın sıcaklıklarda oluşan durumların incelenmesi sonucunda geliştirilmiştir [16].

Yakıt NO_x Oluşum Mekanizması

Bu mekanizma yakıt molekülleri içerisinde bulunan azot bağlarının oksidasyon sürecini ifade etmektedir. Tepkimelerin oluştuğu alanlarda ara radikal tepkime ve oksijen mevcudiyeti neticesinde azot dioksit ya da azot monoksite evrilmektedir. Yakıt azot monoksit oluşum mekanizması kapsamında azot monoksit molekülleri azaltılması bulunmaktadır. Dolayısıyla azot monoksite evrilme süreci yerel alev stokiometrisine bağımlı olmaktadır.

Tepkime kapsamınca yakıt damlacıklarının ısısı arttırıldığında azot içeren bileşenler, gaz aşamasında serbest hale geçmektedirler. Çeşitli azot ara ürünleri bileşenlerin ısıl ayrışması işlemi sonucunda oluşmaktadır. Bu durumda bu ürünler azot monoksite evrilebilmektedir. Hesap edilmesi güç olması nedeniyle önerilen genel modeller kapsamınca kabul edilen yakıt azot monoksit mekanizması Şekil 2.6'da gösterilmektedir [17].



Şekil 2.6. Yakıt azot monoksit oluşum süreci [17]

Yakıt içerisinde bulunan azotun tepkime görmesi sonucunda hidrojen siyanür oluşmaktadır. Bu durum sonucunda üretilen hidrojen siyanür, yakıt azot monoksit oluşum mekanizmasının damlacık buharlaşması kapsamında yer alan gaz aşamasında yakıtın serbest kalma oranına eşit oranda olmaktadır.

İki tepkime sonucunda hidrojen siyanür tüketilebilmektedir. Bu tepkimelerden ilki üretilen hidrojen siyanürün, azot monoksite oksitlenmesi sonucunda olmaktadır. Diğer tepkime ise azot gazını azaltabilmek için azot monoksit ile tepkimeye girmesi sonucunda olmaktadır. Bu tepkimeler sonucunda hidrojen siyanür tüketiminin oransal olarak ifadesi aşağıda gösterilmektedir.

$$R_1 = A_1 X_{HCN} X_{O_2} \exp(-\frac{E_1}{RT}) \quad (2.29)$$

$$R_2 = A_2 X_{HCN} X_{NO} \exp(-\frac{E_2}{RT}) \quad (2.30)$$

NO_X oluşum tahmini

Yanma durumunun sonucunda oluşan nitrik oksitin büyük bir çoğunluğunu azot monoksit oluşturmaktadır. Dolayısıyla nitrik oksitin tahmin sürecinde özellikle azot monoksit dikkate alınmaktadır.

Nitrik oksitin metan alevler bazında oluşum sürecine ilişkin olarak tepkime mekanizmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller içerisinde pek çok farklı özellik ve tepkime bulunmaktadır. Dolayısıyla bu modeller içerisinde yer alan tepkileri ve kimyasal özellikleri tespit etmek oldukça zor olmaktadır. Hidrokarbon yakıtların oksidasyonunun tespit edilmesinin oldukça güç olması nedeniyle De Soete bu duruma ilişkin olarak daha önce bahsedildiği gibi azaltma tepkime mekanizmalarını ve genel modellemeleri önermektedir [20].

Tepkime alanında azot monoksitin oluşumunun sağlanabilmesi adına tepkime katılımcısı olarak metan dahil edilmektedir. Isıl azot monoksit oluşumu aşağıda gösterilen tepkime kapsamınca belirlenebilmektedir.

$$O_2 + N_2 \rightarrow 2NO \tag{2.31}$$

Daha önce gösterilen ısıl azot monoksit hesaplamaları ile ilişkili olarak bu tepkime de kullanılabilmektedir. Yanma reaksiyonu içerisine metan dâhil olduğunda, nitrik oksit oluşumu ani ve ısıl nitrik oksit şeklinde iki kimyasal kinetik işlem sürecine dâhil olmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda (T > 1800K) ısıl nitrik oksit önem arz etmektedir. Yanma tepkimesine metanın dahil edilmesi kapsamınca DeSoete tarafından önerilen azot monoksit mekanizması geliştirilmiştir. Bu bağlamda önerilen mekanizma kapsamına metan yanmasının dahil edilmesi ile birlikte reaksiyon aşağıda gösterildiği gibi olmaktadır [20].

$$NCO + NO \rightarrow N_2O + CO \tag{2.32}$$

1400 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda yanma durumu için ani nitrik oksit oluşum mekanizması aşağıda gösterildiği gibi olmaktadır.

$$\frac{d[NO]}{dt} = 6.86\ x\ 10^6\ (\frac{RT}{p})^2[CH_4][N_2][O_2]^a \exp(-\frac{72000}{RT}) \tag{2.33}$$

Bu konuya ilişkin olarak İlbaş ve ark. Tarafından daha etkin olan başka bir model önerilmiştir [40].

$$\frac{d[NO]}{dt} = 3{,}53\ x\ 10^{-4}(\frac{RT}{p})^2[CH_4][N_2][O_2]^{(\frac{T}{2000}0{,}4} \exp(-\frac{6821}{RT}) \tag{2.34}$$

Ayrıca DeSoete'nin önermiş olduğu model aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir (Dupont, Pourkashanian, Williams, & Wolley, 1993).

$$\frac{d[NO]}{dt} = \not{f}AT^6(O_2)^a[N][CH_4]^a\exp(-\frac{E_a}{RT}) \quad (2.35)$$

Dupont ve ark. tarafından modifiye edilen model orta seviyede olumlu sonuçlar vermektedir. Geliştirilen bu modelde tepkime için gereken aktivasyon enerjisi düşük sıcaklıklarda (T<1920K) Ea= 3,03 x 108 J/kmol olarak oluşturulabilmektedir. Model içerisinde metan ve oksijen üsleri a ve b olarak ifade edilmektedir. Bu modelde O_2 0 ve 1 arasında, metan gazı ise 0,2 ve 1 arasında değer almaktadır [21].

2.2.3. Emisyon sınırları ve düzenlemeler

1990'lı yıllar itibariyle Avrupa Bölgesinde hava kirliliği daha belirgin bir hal almıştır. Bu nedenle hava kirliliği ile mücadele edebilmek için çeşitli çalışmalara ve görüşmeler yapılmaya başlanmıştır. Yapılan görüşmeler sonucunda bu duruma ilişkin olarak 1999 yılında Gothenburg Protokolü imzalanmıştır [22].

Gothenburg Protokolü kapsamında yükümlülüğü bulunan 25 ülke bulunmaktadır. Gothenburg Protokolü 1999 yılında imzalanmasına karşın 17 Mayıs 2005 itibariyle yürürlüğe girmiştir. Protokol kapsamınca azot oksitler, amonyak, uçucu organik bileşikler ve kükürt salınımlarını azaltmaya ilişkin olarak 2010 yılı için sayısal hedefler belirlenmiştir. Bu bağlamda hedef değerler 1990'lı yıllarda Avrupa Bölgesindeki hava kirleticilerin değerleri baz alınarak oluşturulmuştur. 2010 yılında azaltılması hedeflenen değerler şu şekilde sıralanmaktadır [22]:

- Kükürt salınımının %63 azaltılması
- Azot oksit (NO_x) salınımının %41 azaltılması
- Uçucu organik bileşik salınımının %40
- Amonyak salınımının %17 azaltılması hedeflenmiştir.

Gothenburg Protokolü kapsamınca belirlenen sayısal hedeflerin sağlanabilmesi amacıyla 2001 yılında büyük yakma tesisleri (LCPD) için emisyon miktarının sınırlandırılmasına ilişkin düzenlemeler yapılmıştır. Bununla birlikte Gothenburg Protokolü kapsamınca

tanımlanan kullanımı maddesine ilişkin olarak IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control Directive- Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrol Direktifi) adlı direktifi kabul etmiştir. Yapılan düzenlemeler kapsamınca belirli emisyon sınırları oluşturulmuştur [22].

2.2.4. NO_X'in insan sağlığına zararları

NO_x olarak tanımlanan grup içerisinde yer alan bileşikler şu şekilde sıralanmaktadır.

- Diazotpentaoksit (N_2O_5)
- Diazottrioksit (N_2O_3)
- Diazotoksit (N_2O)
- Azot dioksit (NO_2)
- Azot monoksit (NO)

Bu bileşiklerin solunum yolu ile vücuda girmesiyle birlikte kan dolaşımında yer alan hemoglobin ile etkileşime girmektedirler. Bunun ardından ise akciğerlerde yer alan nem ile etkileşime girmeleri sonucunda nitrik asit (HNO_3) oluşturmaktadırlar. Bu durum neticesinde ise solunum yolu hastalıkları oluşabilmekle birlikte insan hayatını tehlikeye atmaktadır. Yanma tepkimeleri kapsamında yüksek sıcaklık ve basınç ile elde edilen enerjinin yanı sıra NO_xgibi ürünler oluşmaktadır. Yüksek itiş güçlü motorlarda NO_x emisyonları diğer yanma tepkimeleri sonucunda oluşan miktara göre çok daha fazla olmaktadır. Yanma reaksiyonları sonucunda oluşan NO_x emisyonları atmosferde birikmekle birlikte hava kirliliğine, küresel ısınmaya sebep olmakla birlikte ozon tabakasına da zarar vermektedir [23-29].

NO

- Renksiz ve kokusuz bir gazdır.
- Solunum yoluyla insan vücuduna girmektedir.
- Akciğerleri tahrip etmektedir.
- Mukoza zarını tahriş etmektedir.
- Çeşitli koşullara bağlı olarak felç yapıcı etkisi bulunmaktadır.
- Nitrik asit oluşumuna neden olmaktadır.
- Maksimum işyeri atmosferi 9 mg/m^3'tür.

Solunum yoluyla insan vücuduna giren NO akciğerlere ciddi zarar vermekle birlikte mukoza zararını da tahriş etmektedir. Bununla birlikte çeşitli durumlarda felç yapıcı etkisi olabilmektedir. Ayrıca solunum yolu ile vücuda girmesinin ardından hemoglobin ile etkileşime girmekle birlikte HNO_3oluşumuna sebep olmaktadır [23-29].

NO_2

- Kırmızı ve kahverengi renkli bir gazdır.
- Keskin bir kokusu bulunmaktadır.
- Vücuda düşük miktarda alınmasına karşın akciğerleri tahriş etmektedir.
- Vücuttaki dokulara zarar vermektedir.
- Mukoza zarını tahrip etmektedir.
- Maksimum işyeri atmosferi değeri 9 mg/m^3'tür.

Atmosferi oluşturan gazlar ve oranları şu şekilde sıralanmaktadır [30].

- Azot %78
- Oksijen %20,95
- Argon %0,93
- Neon %0.0018
- Helyum %0.0005
- Hidrojen %0.00006
- Xenon %0.000009

NO_x emisyonları atmosferde yer alan oksitleyici maddelerle etkileşime girmektedir. Bu kimyasal etkileşim neticesinde ise fotokimyasal sis meydana gelmektedir. Bu durum aynı zamanda fotoşimik kirlenme olarak da ifade edilmektedir.

NO_xemisyonlarının etkileşimi sonucunda oluşan HNO_3 en önemli çevresel problemlerden biri olan asit yağmurlarının yağmasına neden olmaktadır. Atmosferde ve hava tabakalarında biriken NO_xemisyonları canlıların sağlığına oldukça olumsuz etkilerde bulunmaktadır. NO_xemisyonları genellikle solunum yolu ile canlı sağlığına etki etmekle birlikte bu durum neticesinde çeşitli solunum yolu hastalıklarına sebep olmaktadır. NO_x emisyonlarının etkisinin yanı sıra diğer kirleticiler olan CO_2, SO_2 ve ozon gibi çeşitli kimyasal bileşikler

aynı ortamda bulunduğunda birbirleriyle etkileşime girmekte ve bu etkileşim sonucunda canlıların sağlığına etkileri artmakla birlikte aynı zamanda çevresel zararları da çok daha fazla artış göstermektedir [23-29].

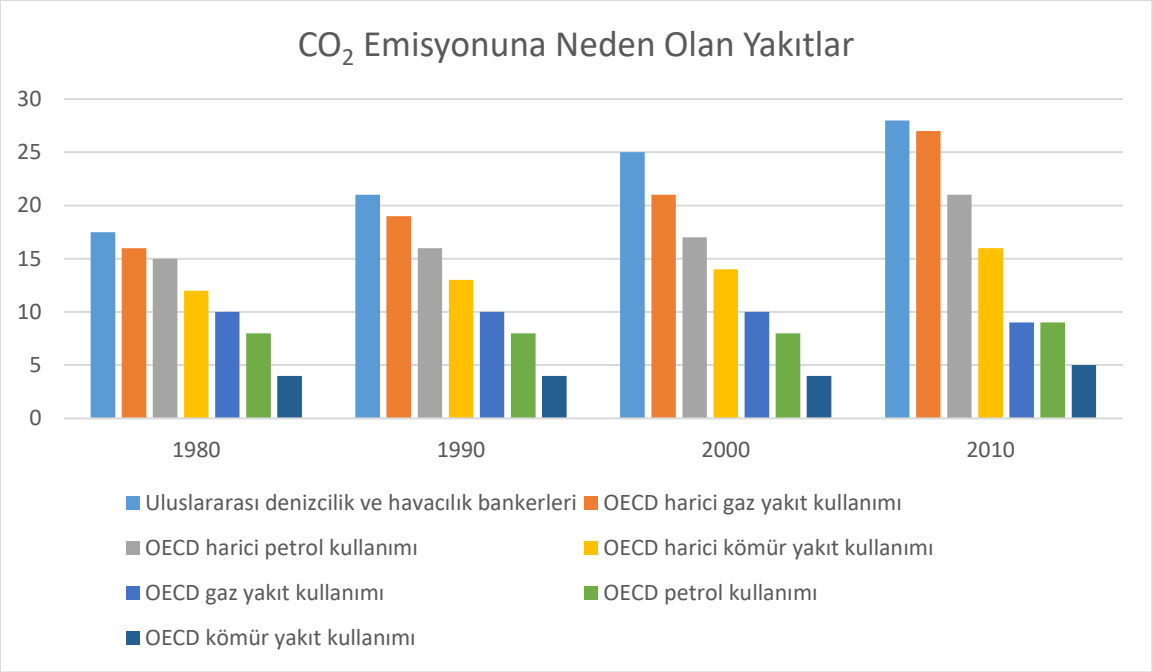
2.2.5. CO_2

Sanayi Devriminin gerçekleşmesiyle birlikte üretim süreçlerinde fosil yakıtların kullanımında büyük bir artış gerçekleşmiştir. Hava kirliliğinde etken sera gazlarından birisi CO_2 olmaktadır. Atmosferde bulunan sera gazları CO_2 ve su damlacıkları olmaktadır. Dünyaya gelen güneş ışığının %47'si kızılötesi ışınlardan oluşmakla birlikte CO_2 gazları kızıl ötesi ışıklarını emmesi nedeniyle sıcaklıkları doğrudan etkilemektedir. Atmosferin geçirgen ve saydam yapıda olması nedeniyle kızılötesi ışınları CO_2 gazları tarafından emilmekte ve bu nedenle yeryüzünde sıcaklık artış göstermektedir. Güneşten gelen ışınlar yeryüzü tarafından soğurulmasının ardından tekrar atmosfere dönmektedir. Yeryüzü ışınları soğurup atmosfere yaydıktan sonra atmosferde bulunan CO_2 gazları, NO_x, CH_4, SF_6 gibi gazlar yeryüzünden gelen ışınları tekrar soğurduktan sonra uzaya ve yeryüzüne tekrar göndermektedir. Bu durum "sera etkisi" olarak adlandırılmaktadır.1927 yılında Jean Fourier atmosferin sera işlevi gösterdiğini tespit etmiştir. John Tyndall ise 1960'lı yıllardan sonra atmosferde CO_2, CH_4, SF_6 gibi gazların bulunduğunu keşfetmiştir. Atmosferin sera etkisi göstermesi nedeniyle yer kabuğunun sıcaklığı 35 ºC'lere kadar yükselebilmektedir. Bu durum kaynaklı olarak günümüzde toplumların yaşamını olumsuz etkileyen küresel ısınma oluşmaktadır. Bu bağlamda fosil yakıtların kullanılması durumunda CO_2, CH_4, SF_6 gibi gazlar atmosferde birikerek küresel ısınma durumunu arttırmaktadır. Ortalama küresel sıcaklık değerlerinin belirlenmesine ilişkin yapılan çalışmalar sonucunda 20. Yüzyıl itibariyle bu değerin 0,6±0,2 olduğu tespit edilmiştir. IPCC (International Programme of Climate Change, Uluslararası İklim Değişim Paneli) 20. ve 21. Yüzyıllarda ortalama küresel sıcaklık değerinin 1,4-5,8 ºC arasında artış göstereceğine ilişkin öngörüde bulunmuştur. Ortalama küresel sıcaklık değerlerinin artış göstermesinde en önemli etkenler arasında sera gazları bulunmaktadır [31-36].

Birinci Dünya Savaşı ve özellikle İkinci Dünya Savaşının gerçekleşmesiyle birlikte 1970'li yıllar itibariyle ortalama küresel sıcaklık değerlerinde artışlar olmuştur. Bu durum ise "küresel ısınma" olarak ifade edilmektedir. Atmosferin sera etkisi dolayısıyla yeryüzüne gelen kızılötesi ışınlarının atmosferden tekrar yeryüzüne gelmesi ve bu durum neticesinde

ortalama küresel sıcaklık değerinin 35 ºC'ye kadar artış göstermesi nedeniyle sera etkisi olgusal değerlendirilmiştir. Sera gazları temel olarak su buharından oluşmaklar birlikte içinde CO_2, CH_4 gibi gazlar bu buharın miktarını ve dolayısıyla etki oranı da arttırmaktadır. Atmosferde biriken CO_2 yoğunluğu Sanayi Devrimi gerçekleşmeden önce 280 ppm iken günümüz itibariyle 380 ppm'e kadar artış göstermiştir [36].

Gelişmiş OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development-Uluslararası Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Örgütü) ülkeleri ve gelişmekte olan ülkelerde CO_2emisyonuna neden olan yakıt türleri Şekil 2.7'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. CO_2 emisyonuna neden olan yakıt türleri [13]

Ortalama küresel sıcaklık değerlerinin artışında en temel etken toplumların CO_2 emisyonları ve zararları hakkında bilinçsiz olması olmaktadır.

Ortalama küresel sıcaklık değerlerinin artışında diğer etkenler olarak volkanik aktiviteler ve güneş ışını yoğunluğu gibi durumlardan bahsedilebilir. 1970'li yıllar itibariyle CO_2 emisyonlarında ciddi bir artış olması nedeniyle ortalama küresel sıcaklık değerlerinin artışı açıklanabilmektedir. Bununla birlikte CO_2 emisyonları ve doğal etkenler kıyaslandığında doğal etkenlerin ortalama küresel sıcaklık değerlerinin artışında etkisi CO_2 emisyonlara göre çok daha az olmaktadır.

Ortalama küresel sıcaklık değerlerinin artması ile birlikte dünya üzerindeki etkileri ortaya çıkmaktadır. Bu etkiler arasında en belirgin durum Arktik'te bulunan buzların hızla eriyor olmasıdır. Bununla birlikte 2005-2006 yıllarında Antarktika Okyanusunda bulunan buzulların yüzölçümünü tespit etmeye ilişkin yapılan çalışmalarda toplam yüzölçümünün 300.000 km²'ye kadar azaldığı gözlemlenmiştir. Küresel ısınmanın etkisiyle birlikte 1960'lı yıllardan bu zamana kadar kar kaplama seviyelerinin dünya genelinde %10 azaldığı tespit edilmiştir [36].

Dünya genelinde fosil yakıt kullanımının artmasıyla birlikte 1950'li yıllardan bu zaman karbon emisyonlarında 110 Gt'lik bir artış olmuştur. Bu durumun sayısal etkisi ise şu şekilde ifade edilebilir:

- 110 Gt Karbon= 63 ppm CO_2
- 110 Gt Karbon= Ortalama küresel sıcaklık değerinde 0,5 ºC artış şeklinde etkisini göstermektedir. [33]

Bununla birlikte 2005 yılında yapılan ölçümler sonucunda atmosferde biriken karbon emisyonlarının 7 Gt arttığı gözlemlenmiştir. Bu emisyonların kontrol altına alınmasına ilişkin önlem alınmadığı takdirde 2055 yılında 14 Gt artacağı öngörülmektedir. Ortalama küresel sıcaklık değerlerinin artışında bir diğer önemli etken ise atmosferden dünyaya geri dönen güneş ışınlarının okyanuslar tarafından soğurulması olmaktadır. Bu durum neticesinde yoğunluğu az olan su yüzeyi ve yoğun olan dip suyunun soğurma oranı düşmektedir. Bu bağlamda atmosferden gelen CO_2 yoğunluğu azalmakla birlikte yüzey sıcaklığı da orantılı olarak artış göstermektedir. Sanayi Devriminden bu yana artan fosil yakıt kullanımı ve bununla orantılı olarak artan karbon miktarının büyük bir çoğunluğu okyanuslar tarafından soğurulmaktadır. Bu bağlamda Sanayi Devrimi gerçekleşmeden önce salınım yapılan CO_2 emisyonları halen yoğun dip sularında varlığını korumaktadır.

Dolayısıyla okyanuslar aynı zamanda CO_2 çukurları olarak da değerlendirilmektedir. Bununla birlikte her yıl 2 Gt karbon emisyonu okyanuslar tarafından soğurulmaktadır. Atmosferden gelen CO_2 emisyonlarının yeryüzü tarafından soğurulması ise toprağın özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu bağlamda her yıl 1-2 Gt değerlerinde karbon emisyonunun yeryüzü tarafından soğurulduğu tahmin edilmektedir [36].

Fosil yakıt kullanımı ve orman yangınlarının her yıl artış göstermesi hava kirliliğine sebep olmasının yanı sıra aynı zamanda dünyanın aerosol adlı madde ile çevrelenmesine sebep olmaktadır. Aerosol havada dağılan katı ve sıvı halde olan partiküllerden oluşmaktadır. Bu madde canlıların sağlığına zarar vermekle birlikte yeryüzünde gölge alanları genişletmektedir. Ayrıca bu durum neticesinde yeryüzünde sıcaklık değeri de azalmaktadır. Aerosol ve CO_2 maddeleri karşılaştırıldığında sıcaklık değerlerinin artmasında CO_2 maddesi daha etkili olmaktadır [36].

IPPC, 1990-2100 yılları arasında ortalama küresel sıcaklık değerlerinin 1,4-5,8 ºC artacağını tahmin etmektedir. Bir başka tahmine göre ise 2050 yılında ortalama küresel sıcaklık değerinin 1,0-1,8 ºC artacağı tahmin edilmekle birlikte 2050 yılında atmosferde bulunan CO_2 yoğunluğunun 475-575 ppm arasında olacağı tahmin edilmektedir [36].

Araştırmalar ve çalışmalar sonucunda yapılan tahminler değerlendirildiğinde ortalama küresel sıcaklık değerlerinin kesinlikle artacağı öngörülmektedir. Küresel ısınmanın artması sonucunda ise yeryüzünde meydana gelecek iklimsel değişiklikler kaynaklı olarak oluşabilecek olumsuz durumları engelleyebilmek için karbon emisyonlarının azaltılmasına ilişkin önlemler alınması önerilmektedir [36].

2.2.6. CO

Bir karbon ve bir oksijen atomundan meydana gelen moleküller karbonmonoksit (CO) olarak adlandırılmaktadır. CO nitelik olarak kokusu ve rengi olmayan bir gazdır. Bununla birlikte insan sağlığını oldukça olumsuz etkileyen bir moleküldür. CO solunumu arttığı takdirde kan dolaşımına girmektedir. Bunula birlikte O_2'ye kıyasla hemoglobine daha kolay bağlanabilmektedir. Solunan karbonmonoksit miktarı tamamen bitmeden oksijenler hemoglobine bağlanamamaktadır.

Bu durum neticesinde ise oksihemoglobin oluşamamakla birlikte vücut içerisinde organ ve dokulara oksijen ulaşamamaktadır ve hücrelerde ölüm gerçekleşmeye başlamaktadır. CO zehirlenmesi ölüme neden olmakla birlikte zehirlenmeye maruz kalan kişilerde görülen belirtiler ise şu şekilde sıralanmaktadır

- Baş ağrısı

- Görme bozukluğu
- Uyku hali
- Zihin bulanıklığı
- Koma gibi belirtiler görülmektedir.

Yukarıda bahsedilen nedenler dolayısıyla insanların ve canlıların yaşamı CO dolayısıyla oldukça olumsuz etkilenmektedir. CO'lar üretim süreçlerinde su gazı, jeneratör gazı, hava gazı ve kuvvet gazı içinde kullanılmakla beraber aynı zamanda yakıt olarak da kullanılmaktadır [34].

CO'ların tam yanma ve eksik yanma reaksiyonu aşağıda gösterilmektedir [37].

Tam yanma reaksiyonu:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 + 8113\,\frac{Kcal}{kg} - C \tag{2.36}$$

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H2O + 34650\,\frac{Kcal}{kg} - H \tag{2.37}$$

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 + 2250\,\frac{Kcal}{kg} - S \tag{2.38}$$

Eksik yanma reaksiyonu:

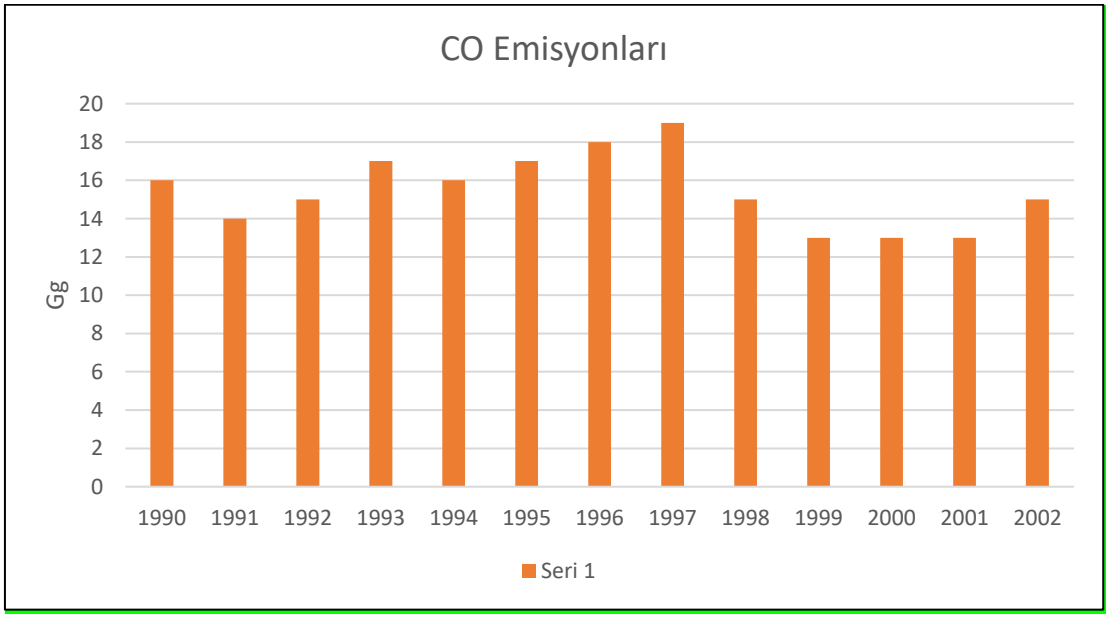
$$2C + O2_2 = 2CO + 2467\,\frac{Kcal}{kg} - C \tag{2.39}$$

Yanma reaksiyonlarında da belirtildiği gibi oksijen miktarının yetersiz olması durumunda C, CO_2'ye dönüşememekte ve CO'ya dönüşmektedir. Bu durumda kaybedilen enerji miktarı ise %70 oranda olmaktadır.

Yanma reaksiyonunun kusursuz olması için genel olarak yakıtların içine belirli bir miktarda hava dahil edilmektedir. Bu işlem ise hava fazlalık katsayısı olarak ifade edilmektedir. Hava fazlalık katsayısı yakıt türüne göre farklılık göstermektedir. Hava fazlalık katsayısının az olması durumunda ise C, CO'ya dönüşmekte ve enerji kaybı meydana gelmekle birlikte yanma reaksiyonun verimliliği de azalmaktadır. Ayrıca hava fazlalık katsayısı gereğinden fazla olduğu takdirde ise CO azalmakla birlikte yanma reaksiyonuna dahil edilmeyen hava ısınarak bacadan çıkmaktadır. Bununla birlikte yanma reaksiyonu bozulmakta ve yanma

verimliliği de azalmaktadır. Yanma reaksiyonun optimal olarak gerçekleşebilmesi için baca gazı analizleri ile yanma değerlendirilebilmekte ve yanma reaksiyonuna müdahale edilebilmektedir. Bununla birlikte yanma reaksiyonu içerisinde CO miktarı 100 ppm'e kadar normal değerlendirilmektedir. Yanma reaksiyonu stokiyometrik olarak gerçekleşmediği takdirde CO oluşumu meydana gelmektedir. Yanma reaksiyonu içerisinde yüksek sıcaklıklar ile birlikte oluşan CO, yanma reaksiyonu içerisinde oksijen yoğunluğunun artmasıyla birlikte azalmaktadır. Yakıt zengin karışım, yanma haznesinin yanlış tasarımı ve alev konumu nedeniyle yanma reaksiyonu içerisinde CO üretimi gerçekleşmektedir [34].

Yanma reaksiyonun verimsizliği ve CO oluşumuna etken sebepler arasında düşük baca çekişi de bulunmakla birlikte yakıcının yanlış ayarlanması durumunda da reaksiyon sonucunda CO oluşabilmektedir. Şekil 2.8'de 1990-2002 yılları arasında CO emisyon oranları gösterilmektedir.



Şekil 2.8. 1990-2002 yılları CO emisyon miktarları [13]

CO emisyonlarının azaltılmasına ilişkin alınabilecek bazı önlemler şu şekilde sıralanabilir:

- Yakıcıların düzenli olarak bakımının gerçekleştirilmesi
- Yakıcıların yakıt türüne uygun olarak kullanılması
- Yanma reaksiyonun optimum gerçekleşebilmesi için uygun kazan ve sistemlerin kullanılması CO emisyonlarının azaltılmasına ilişkin önlemler almaktadır [34].

Çizelge 2.4. CO_2 ve CO arasındaki farklılıklar [16].

CO	**CO_2**
Farklı etkenler sebebiyle atmosferde bulunmaktadır.	Dış etkenler ve doğal etkenler dolayısıyla atmosferde bulunmaktadır.
Yanma reaksiyonun doğru gerçekleşmemesi sonucunda oluşmaktadır.	Fosil yakıt kullanımı, kimyasal tepkimeler, canlıların solunumları ve fermantasyon sonucunda oluşmaktadır.
Solunuma maruz kalındığında ölümcül etkileri olabilmektedir.	CO'ya kıyasla zehirleme oranı çok daha azdır.
Yanlış yanma tepkimesi sonucunda oluşmakla birlikte yanıcı bir bileşiktir.	Yanma işleminin sonucunda oluşmakla birlikte yanıcı bir bileşik değildir.

2.3. Girdaplı Yakıcı

2.3.1. Verimlilik

Girdaplı yakıcı seçiminde en önemli unsurlardan biri yanmanın verimliliği olmaktadır. Bu noktada yakıcı tercihinde en önemli unsur girdap girişinde gereken basınç olmaktadır. Girdap oluşumu için gerekli basınç girdap akışının kinetik enerjisini arttırmaktadır. Girdap akışındaki kinetik enerji aşağıdaki formülde gösterilmektedir [38].

$$E_k = G\ u^2(1 + \mathrm{G}\ S^2)/2 \tag{2.40}$$

G: Yakıcıdan geçen hava akışı

U: Yakıcının çıkış bölümündeki ortalama eksenel hız

S: Girdap düzeyi

Yakıcıların girdap verimliliği yakıcının tasarımına ve girdap yollarına bağlı olarak kinetik enerji akış katsayısı ile değerlendirilmektedir. Bununla birlikte girdap akışı verimliliği yakıcının çıkış bölümünden çıkan kinetik enerji oranını etkilemektedir. Bu oran ile girdap oluşumu ve yoğunluğu değerlendirilmektedir. Yakıcılara göre girdap yoğunluğu da farklılık gösterebilmektedir [38].

2.3.2. Hidrolik direnç katsayısı

Uygun yakıcı seçimi için dikkat edilmesi gereken kriter yanma işlemine havanın dahil edilebilmesi için gereken enerji miktarı olmaktadır. Yanma tepkimesi içerisinde girdap yoğunluğunun artması sonucunda yanma işlemi güvenli gerçekleşmekle birlikte alev kararlılığı da artış göstermektedir. Bu durum yanma işlemine dahil edilen havaya bağlı olarak değişmektedir [38].

$$\varphi = \frac{2\Delta p_{st}}{pw^2} + (\frac{Ae}{A_i})^2 \tag{2.41}$$

Hidrolik direnç katsayısı türbülans dolayısıyla meydana gelen enerji kayıplarını ifade etmektedir. Ayrıca hidrolik direnç katsayısı girdap yoğunluğu ile ilişkilidir [39].

2.3.3. Yoğunluk

Hidrolik direnç katsayısına bağlı olarak her yakıcıda girdap yoğunluğu farklılık göstermekle birlikte yakıcılarda momentum korunmaktadır. Dolayısıyla momentum şu şekilde ifade edilebilir [38]:

$$G_{\emptyset} = \int_{r1}^{r2} (wr)\, pu2\pi rdr = const. \tag{2.42}$$

$$G_x = \int_{r1}^{r2} upu2\pi rdr + \int_{r1}^{r2} p2\pi rdr = const. \tag{2.43}$$

Momentum korunumu, girdap akışının aerodinamik özelliklerinden birisidir. Akışın boyutuna ilişkin olarak önerilen girdap yoğunluğu ise şu şekilde ifade edilmektedir:

$$S = G\emptyset/(G_x r_g) \tag{2.44}$$

Girdap sayısının hesaplanabilmesi için yakıcı çıkışındaki girdap hızı ve statik basınç değerlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Fakat bu durum sayısal olarak net bir şekilde tespit edilememektedir. Bu nedenle yakıcı tasarımlarının modellerine göre hesaplanmaktadır [38].

Fanlı brülörlerde girdap sayısının tespiti için kullanılan model şu şekildedir:

$$Sg = (\sum_{i=1}^{n} S_i D_{ei} p_i \, A_i w_i^2)/(\sum_{i=1}^{n} D_{ei} p_i A_i w_i^2 \, D_{eg}) \quad (2.45)$$

$$Sg = (1.7397 * tg\beta s)/(1 + 0.4645(p_p w_p^2/p_s w_s^2)) \quad (2.46)$$

Birincil girdap akışının bulunduğu yakıcılarda:

$$Sg = (S_p D_{ep} p_p A_p w_p^2 + S_s D_{es} p_s A_s w_s^2)/((p_p A_p w_p^2 + p_s A_s w_s^2) D_{eg}) \quad (2.47)$$

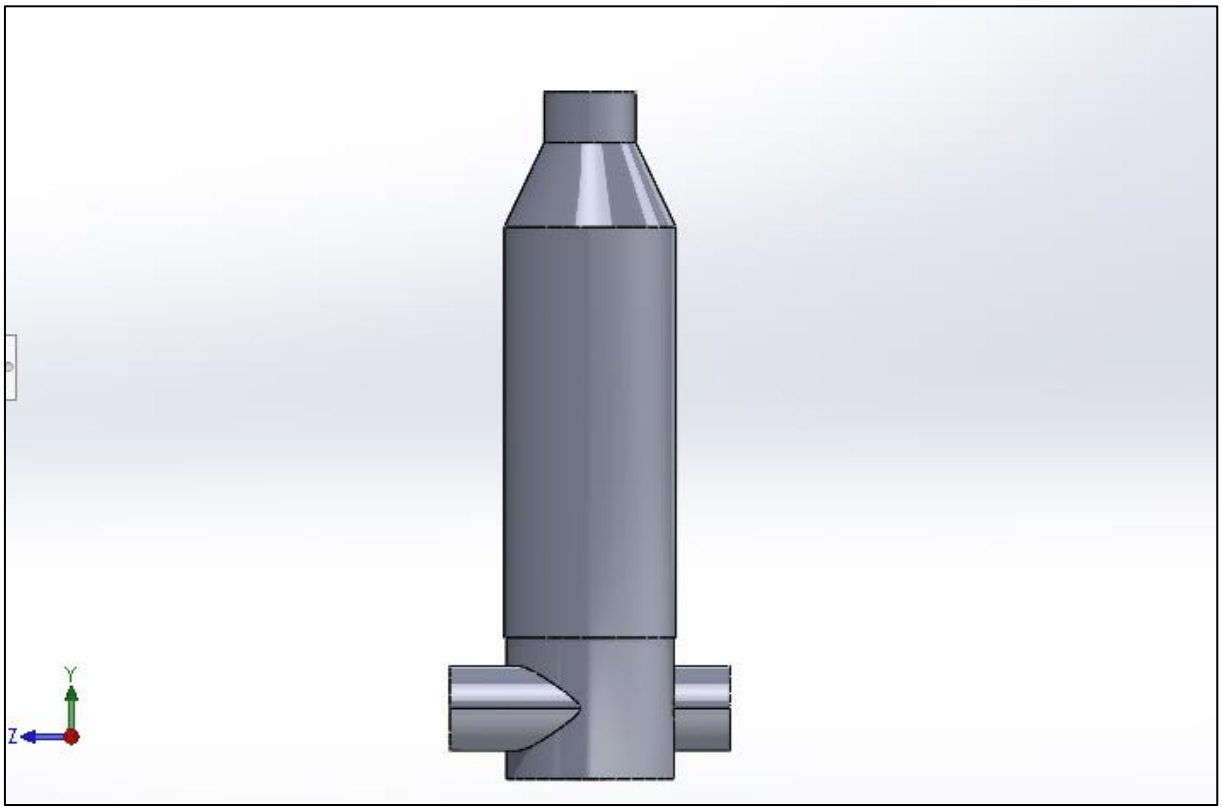
$$S_p = 1.86 * tg\beta_p and S_s = 3.6 * tg\beta_s. \quad (2.48)$$

Çarpraz akış yakıcılarında, yakıcının tasarımına bağlı olarak hesaplanmaktadır.

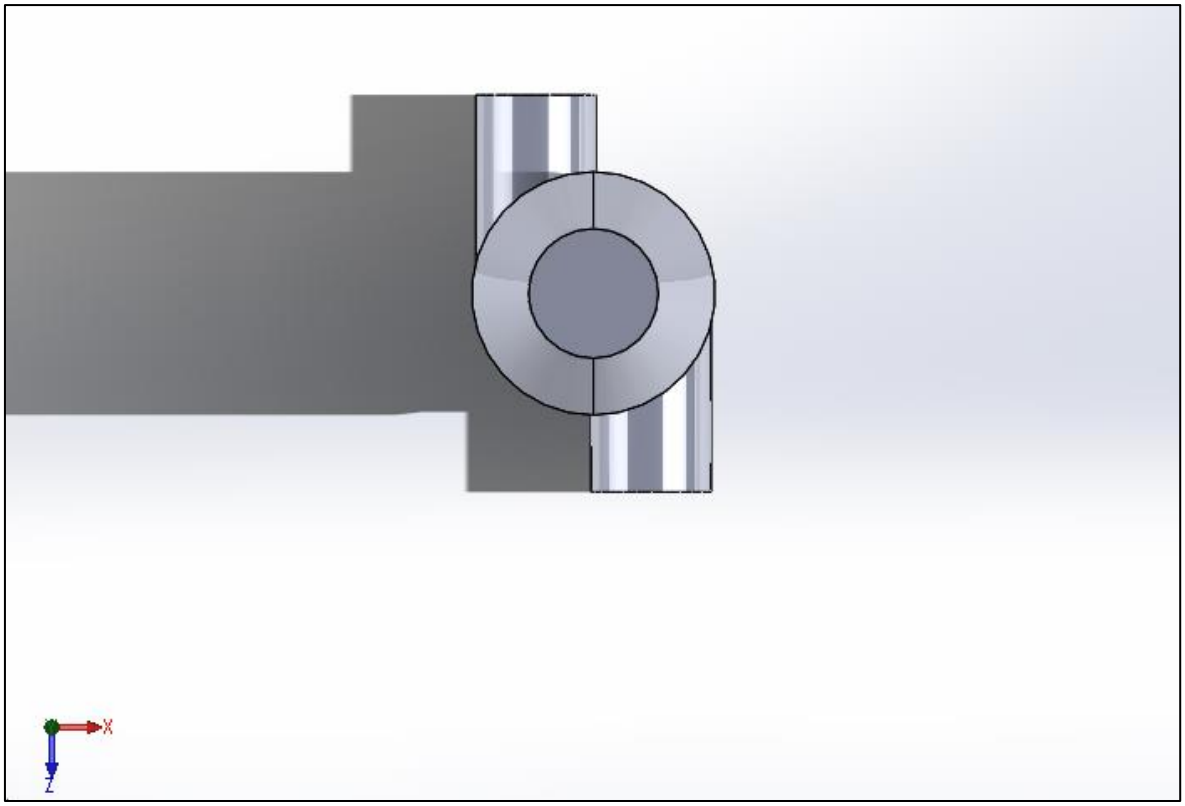
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Girdaplı Yakıcı Geometrisinin Oluşturulması

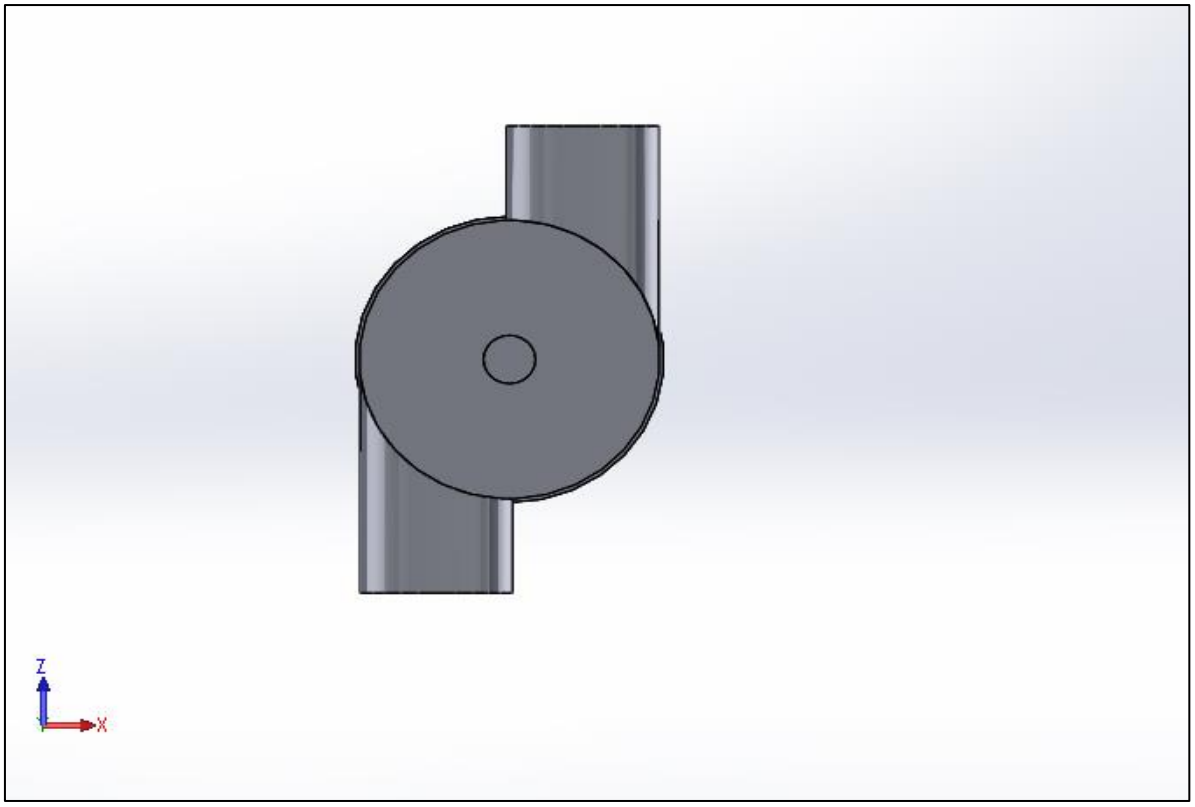
Bu çalışmada, Froud ve arkadaşları [11] tarafından gerçekleştirilen modellemede kullanılan yanma odası geometrisi referans geometri olarak seçilmiştir. Sınır şartları ve geometri Froud ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmadaki veriler ile modelin ve analizin doğrulanması sağlanmıştır. Oluşturulan yanma odasına ilişkin detaylar Şekil 3.1 Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Tasarımda girdap akışını, yakıcının birbirine zıt iki taraflı hava giriş kanalı sağlamaktadır. Tasarımda gövde yapısı girdaplı akışı yakıcının çıkış kısmına kadar taşımakta, hat boyunca girdap formunun devam etmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.1. Girdaplı yakıcının yandan görünümü [11]



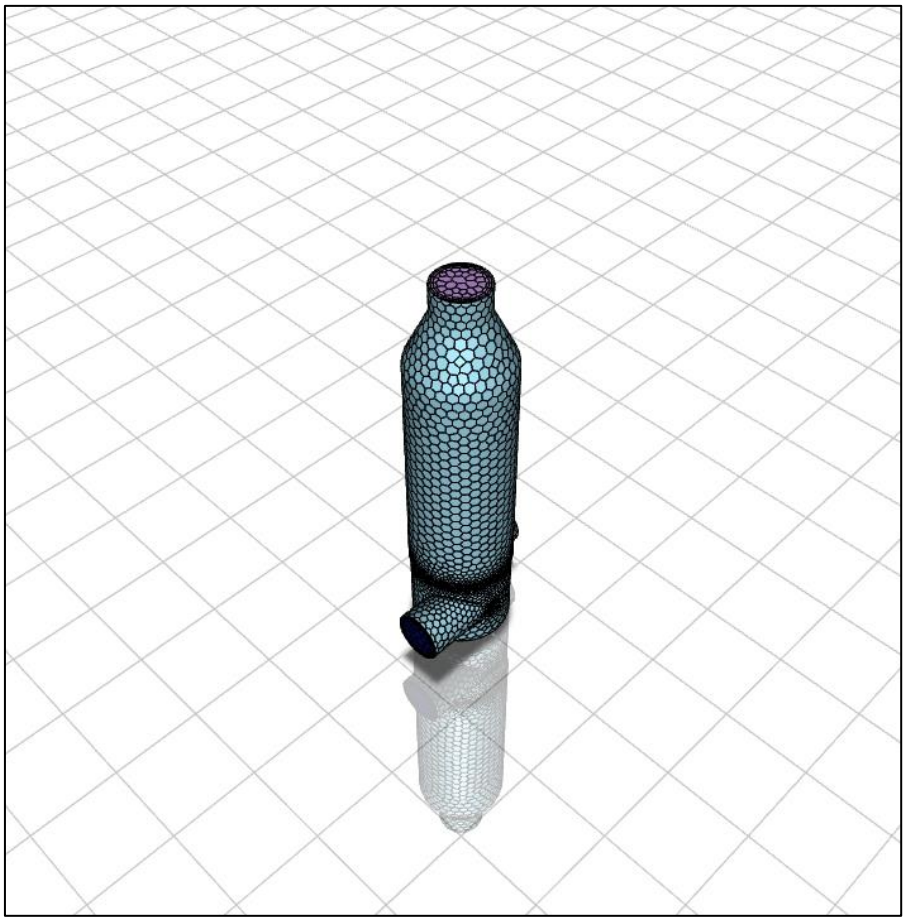
Şekil 3.2. Girdaplı yakıcının üstten görünümü [11]



Şekil 3.3. Girdaplı yakıcının alttan görünümü [11]

3.2. Ağ Yapısının Oluşturulması

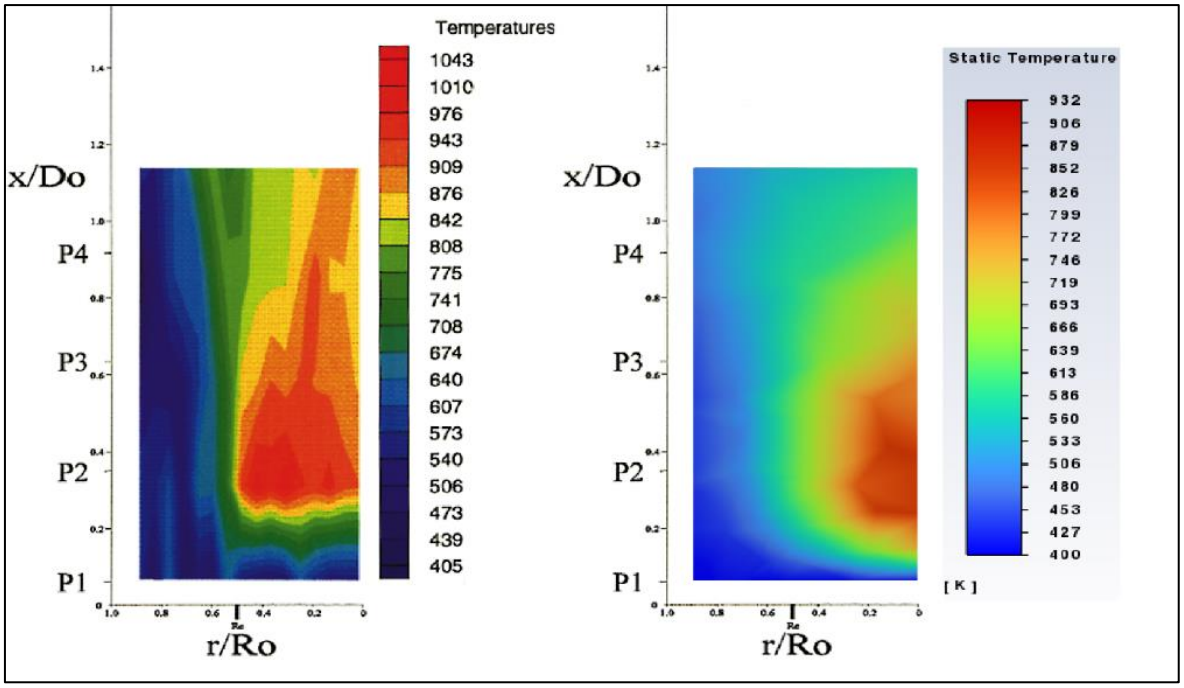
Katı model programı ile oluşturulan geometri, yanma analizlerinin yapılabilmesi için Ansys Fluent programına aktarılmıştır. Aktarılan geometrinin ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısı oluşturulurken giriş ve çıkış kanallarında mesh sayısı arttırılmıştır. Girdaplı akış tasarlandığından dolayı çıkış kanalının dış kısımlarındaki mesh ölçüleri küçültülerek mesh yoğunluğu sağlanmıştır. Ağ örgüsünden bağımsız nokta bulunmuş bu noktada ağ yapısında 126991 düğüm, 1315 kenar, 162531 yüz ve 29288 hücre bulunmaktadır. Ağ örgüsü oluşturulmuş girdaplı yakıcı Şekil 3.4'de verilmiştir.



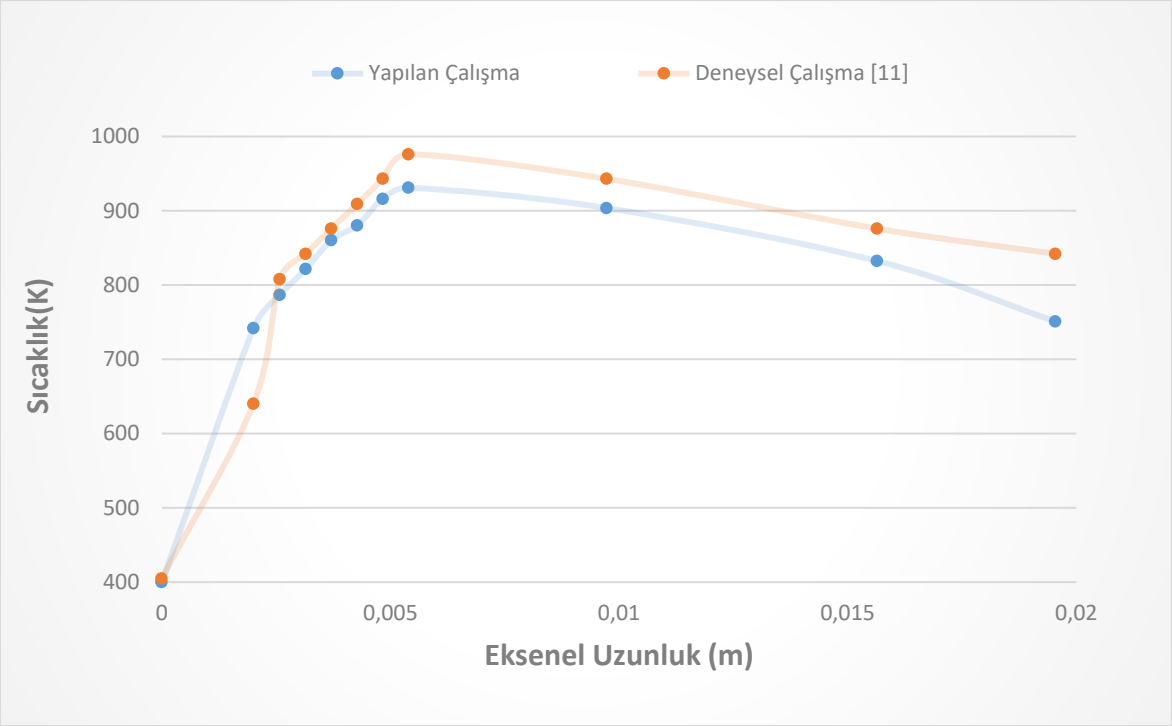
Şekil 3.4. Ağ örgüsü oluşturulmuş girdaplı yakıcının görünümü

3.3. Model Doğrulama

Yapılan çalışmada kullanılan model literatür araştırması sonucu belirlenmiş, belirlenen modelin analizlerine başlanmadan önce doğrulama işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.5'de Froud ve arkadaşlarının [11] yaptığı çalışma ile bu tez çalışmasındaki sıcaklık verileri karşılaştırılmıştır. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere sıcaklık değerleri paralellik göstermektedir. Froud ve arkadaşlarının [11] yaptığı çalışmada sıcaklık değerleri 405 °C ile 1043 °C arasında geldiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada ise 400 °C ile 932 °C aralığında analiz yapılmıştır. Verilerin sayısal değerlerindeki farklılık, farklı ağ örgüsünden kaynaklandığı düşünülmektedir.



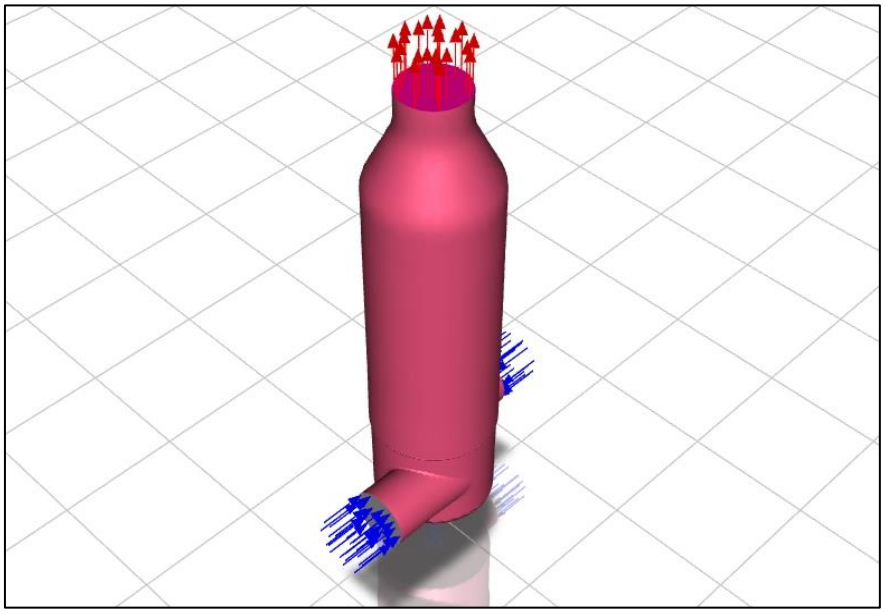
Şekil 3.5. Referans alınan model ile çalışmanın yapıldığı modelin karşılaştırılması [11]



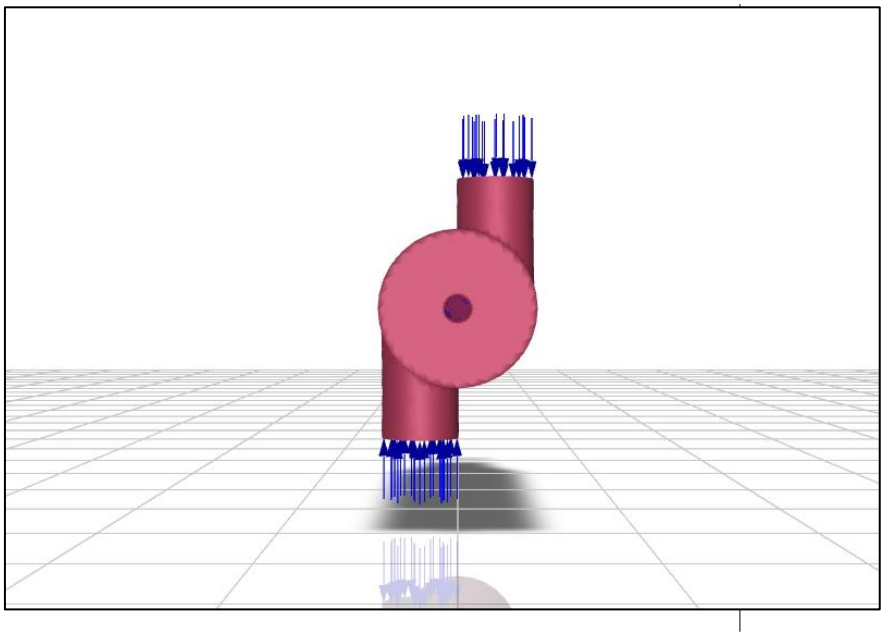
Şekil 3.6. Deneysel çalışma ile mevcut modellemenin karşılaştırılması

4. MODELLEME VE SONUÇLARI

Ağ örgüsü oluşturulan modelin hava girişi 1, hava girişi 2, yakıt girişi ve çıkış koşulları tanımlanmıştır. Şekil 4.1'de mavi ok ile gösterilen kısımlardan (0.075 m) hava girişi, kırmızı ok ile gösterilen kısımdan (0.081 m) yanma sonrası oluşan gazların çıkışı, ve Şekil 4.2'de modelin alt kısmında bulunan bölümden (0.026 m) yakıt girişi sağlanmıştır.



Şekil 4.1. Sınır şartları belirlenmiş girdaplı yakıcının izometrik görünümü



Şekil 4.2. Sınır şartları belirlenmiş girdaplı yakıcının alttan görünümü

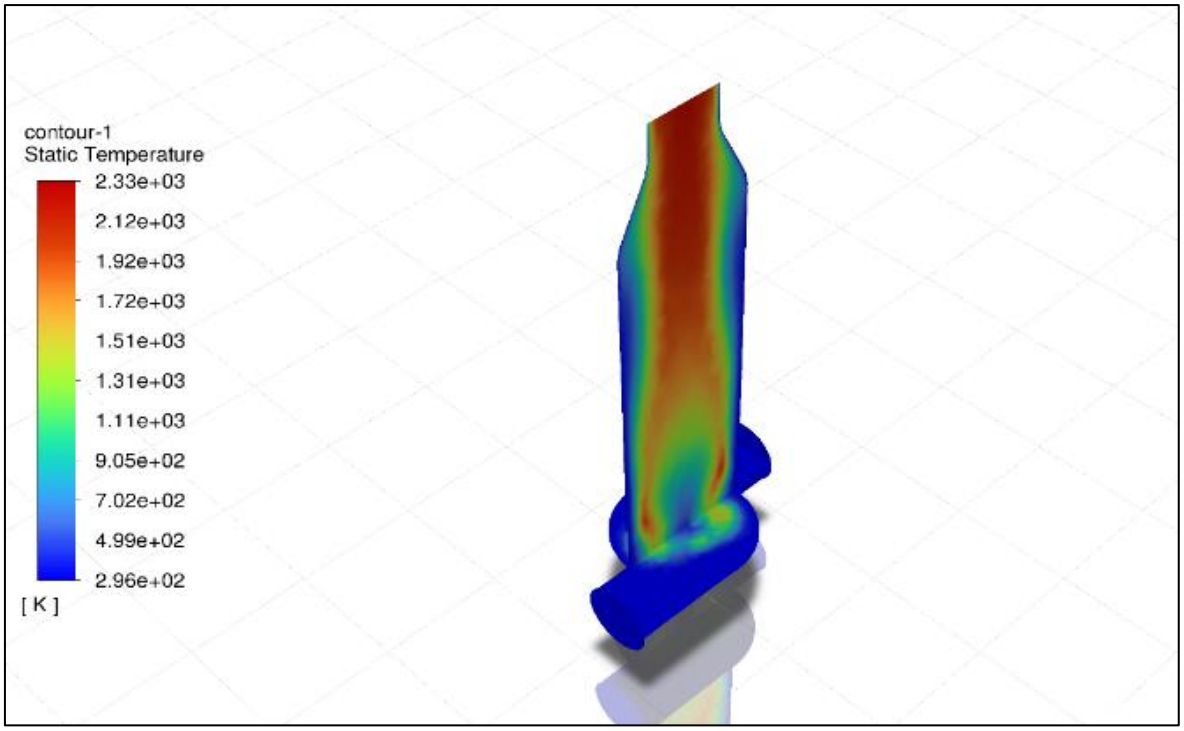
Sınır şartları oluşturulduktan sonra sıradaki adım olarak model özellikleri belirlenmiştir. Program ara yüzünde bulunan enerji, radyasyon, NO_X ve tür modülleri aktif hale getirilmiştir. 100' KW'lık enerji elde edilebilmesi için yakılması gereken hidrojen miktarı ve bu hidrojen miktarının yakıt giriş kanalından geçmesi gereken debi hesabı yapılmıştır. Yakıcı tasarımına uygun hava yakıt oranı ve hava fazlalık katsayısı belirlenmiştir. Yanma simülasyonuna başlamadan önce sınır şartları, çözüm hacmi için sayısal ağ yapısının belirlenmesi, fiziksel modelin tanımlanması (türbülanslı), türbülans modelinin seçimi (k-ε türbülans modeli) ,yanma modelinin seçimi (species transport) ve radyasyon modeli (P1) gibi parametreler analiz programında belirlenmiştir.

Bu aşamadan sonra yazılım ara yüzünde bulunan tür modülünde analize göre düzenlemeler yapılmıştır ve "Species Transport" modülü aktif edilmiştir. Yakıcı özelliği olarak Hidrojen-Hava, Metan-Hava ve %10-%50 arası CO_2 ilavesi uygulanmış dağıtılmış yanma tekniği kullanılarak yakılan Metan-Hava karışımları kullanılmıştır.

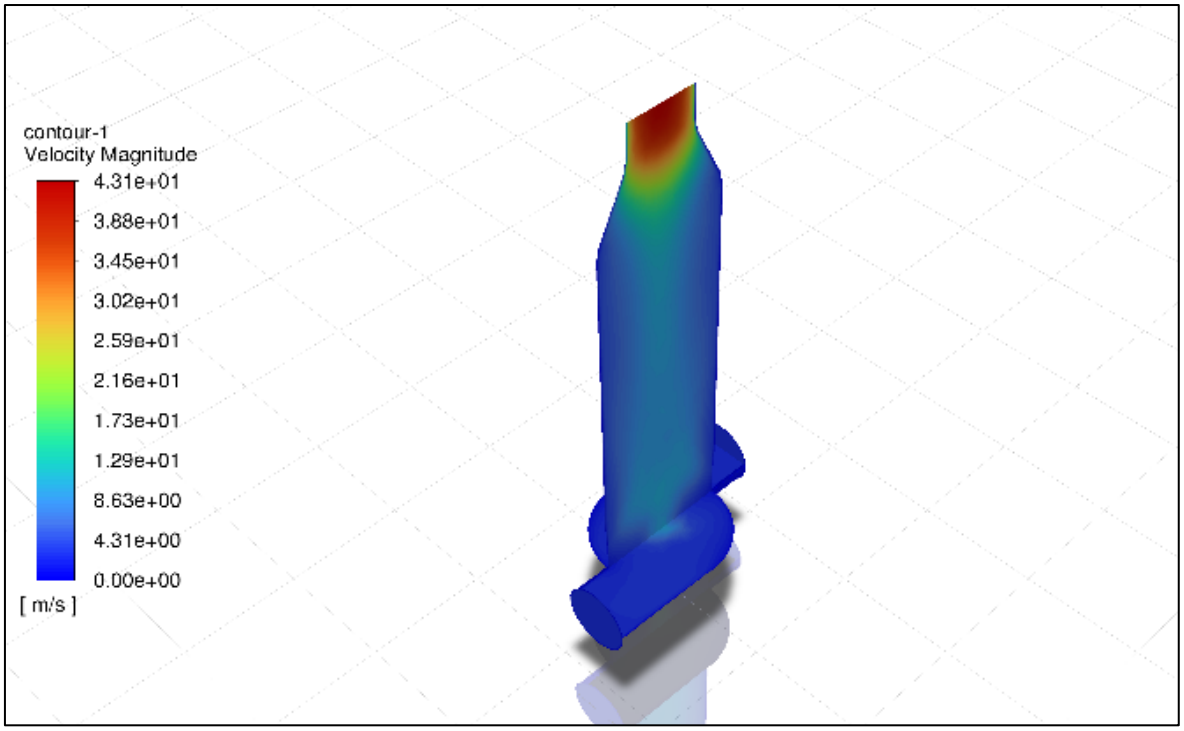
4.1. Girdaplı Yakıcıda Hidrojen Yanması

Oluşturulan sınır şartlarının değerlerinin girilmesi bu bölümde yapılmıştır. Hidrojen-Hava karışımının yakıldığı analizde hava girişi olarak tanımlanan "Inlet1" ve "Inlet2" girişlerinde hız belirleme yöntemi olarak "Magniude, Normal to Boundary", referans çerçevesi olarak "Absolute", hız olarak 3.00 m/s metod kısmına "Intensity and Hydraulic Diameter", türbulans yoğunluğu olarak %10 ve hidrolik çap olarak 0.075 m tanımlanmıştır. Termal bölümünden giren havanın sıcaklığı 300 K'dir. Girdaplı yakıcıda yakılacak yakıt-hava karışımı için hava girişi tanımlanmış ve havanın kütle oranı yazılımın giren havayı tanıya bilmesi için 0.23 olarak tanımlanmıştır. Hidrojen-Hava karışımının yakıldığı analizde hava girişi olarak tanımlanan "Inlet3" ve girişinde hız belirleme yöntemi olarak "Magnitude, Normal to Boundary", referans çerçevesi olarak "Absolute", türbülans yoğunluğu olarak %10 ve hidrolik çap olarak 0.02573 m tanımlanmıştır. Girdaplı yakıcıda yakılacak yakıt-hava karışımı için yakıt kanalından Hidrojen girişi tanımlanmış ve Hidrojen'in kütle oranı 1 olarak tanımlanmıştır.

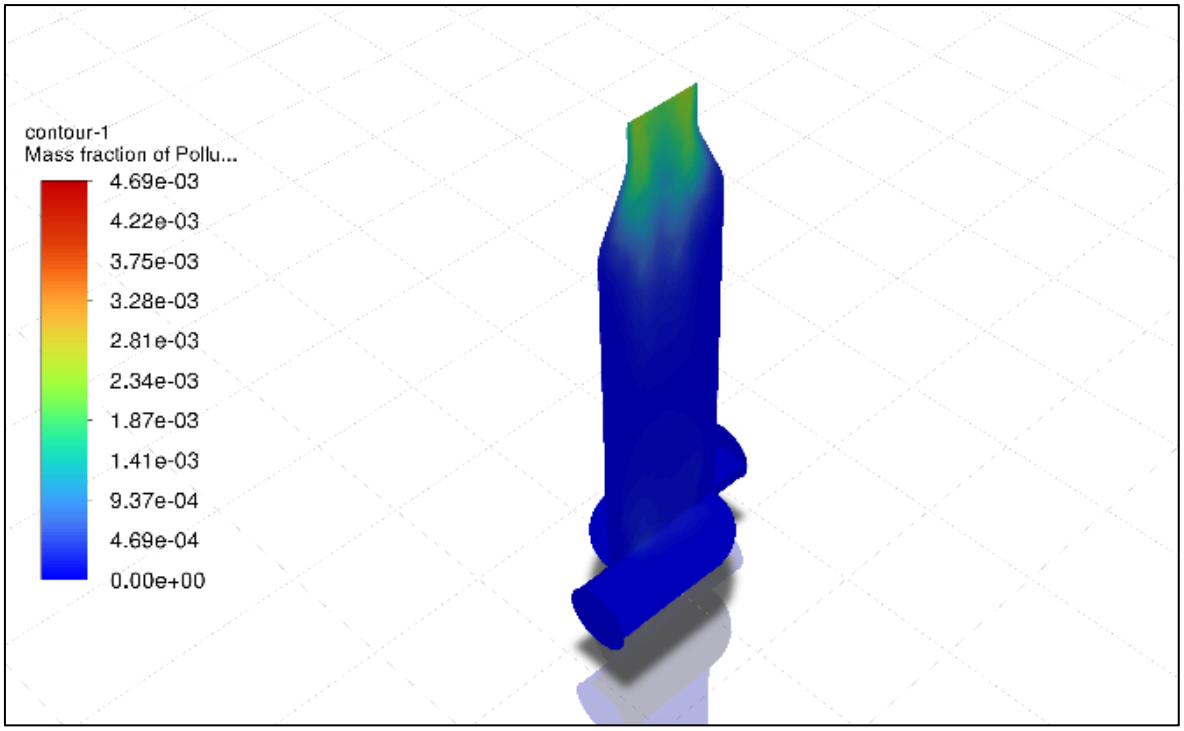
.



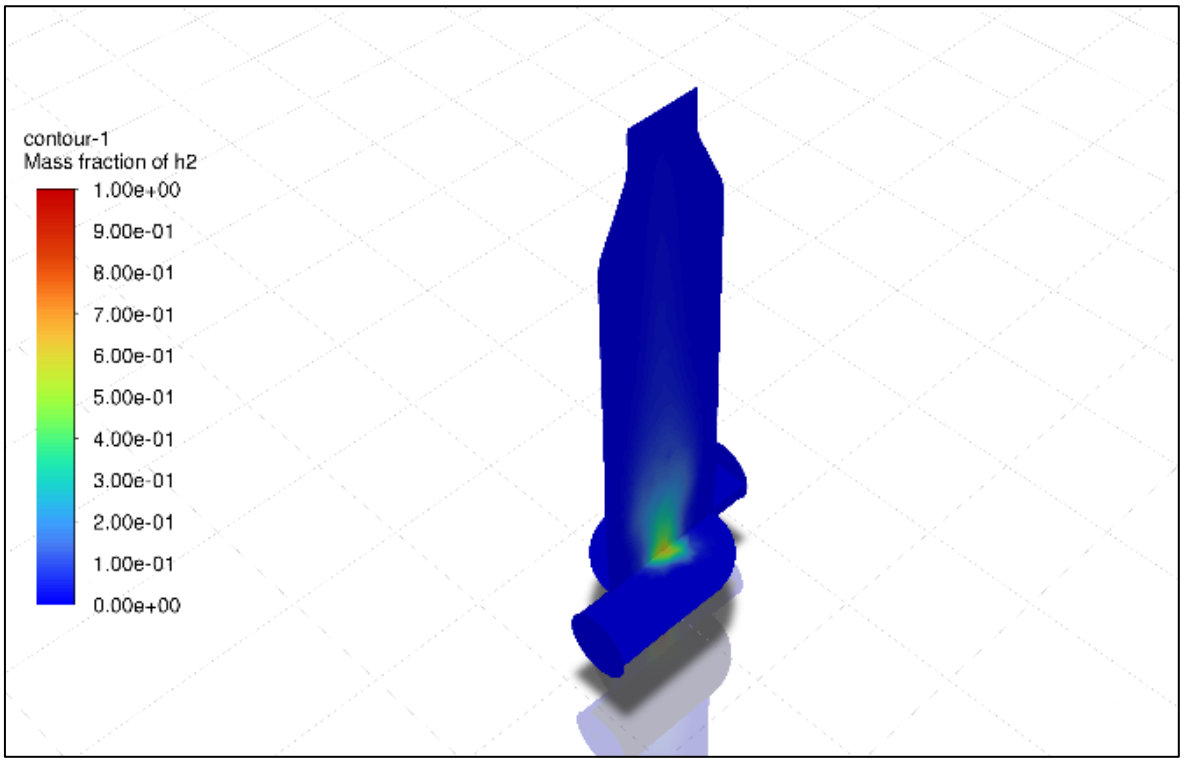
Şekil 4.3. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı



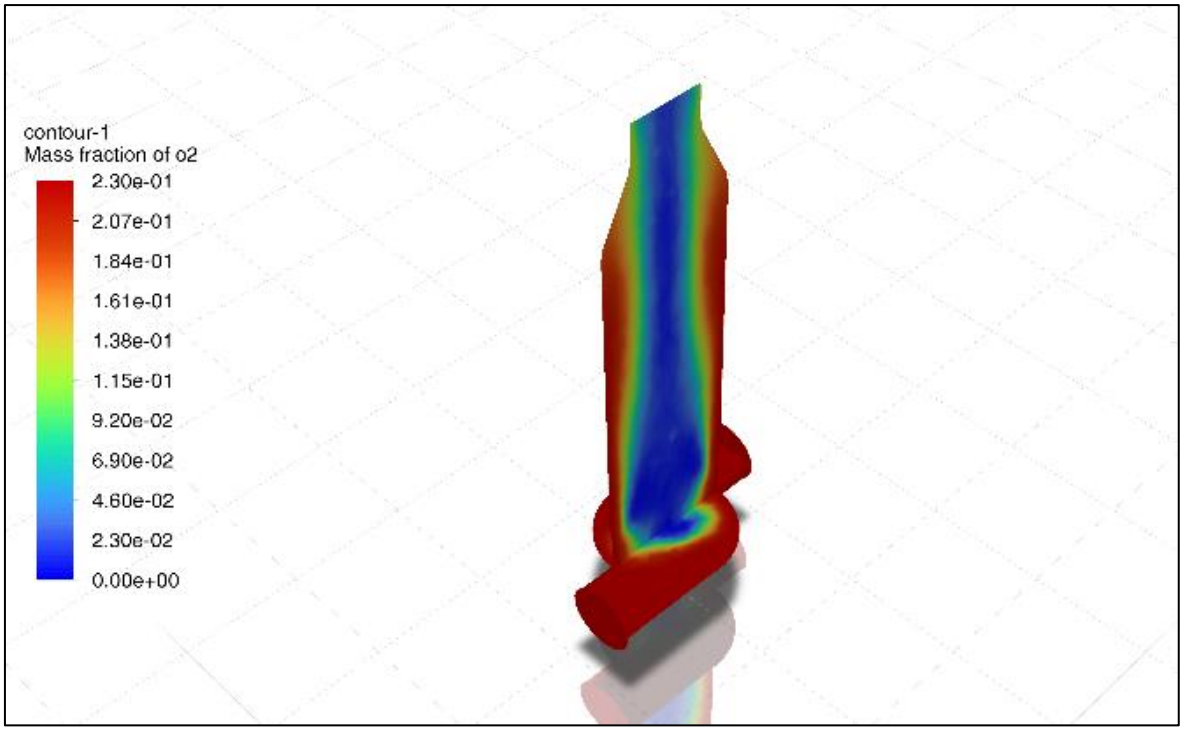
Şekil 4.4. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız dağılımı



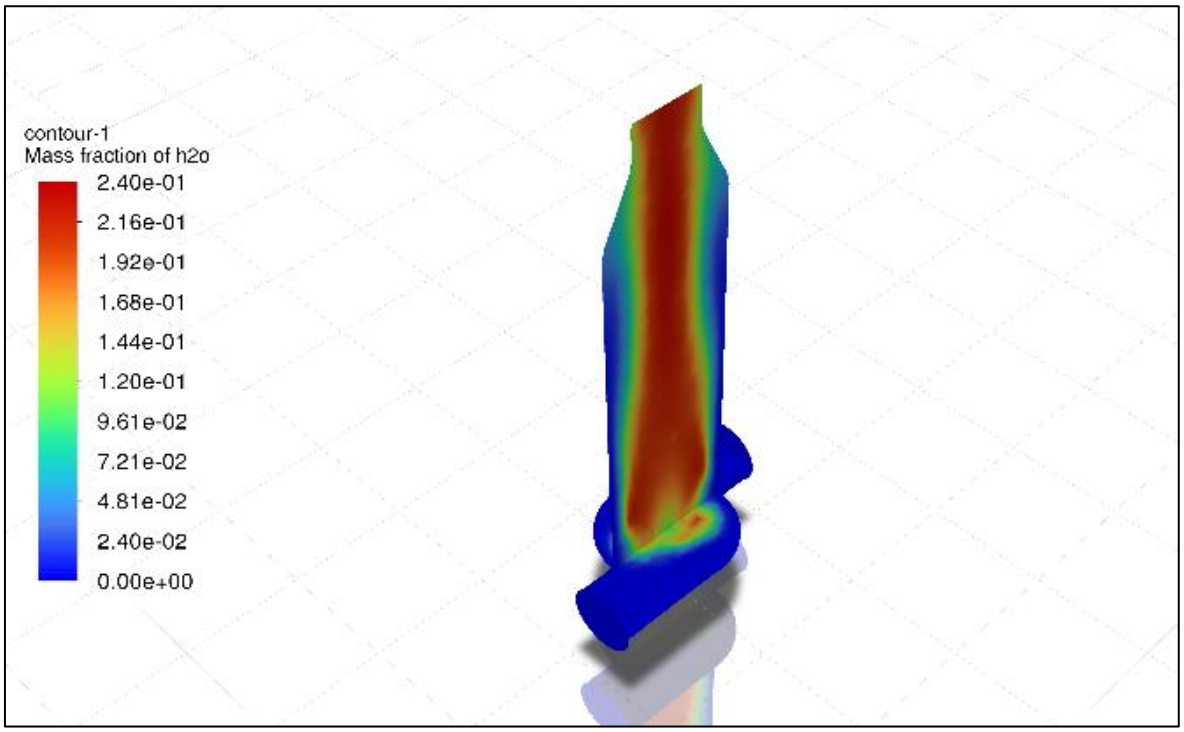
Şekil 4.5. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı



Şekil 4.6. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Hidrojen kütle kesri dağılımı



Şekil 4.7. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri dağılımı



Şekil 4.8. Hidrojen-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı

Hidrojen-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, NO_X kütle kesri dağılımı, hidrojen kütle kesri dağılımı, oksijen kütle kesri dağılımı ve H_2O kütle kesri dağılımı Şekil 4.3.-4.8. arasında gösterilmiştir. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi yakılan hidrojenin yarattığı sıcaklık değerleri 296 K – 2330 K arasında değişmektedir. Yakıcının sahip olduğu girdap akışı nedeniyle oluşan sıcaklık dağılımının yakıcın ortasında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'den de anlaşılacağı gibi Hidrojen-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız değerinin maksimum 43.1 m/s hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Modellenen yakıcı tasarımı gereği daralan çıkış kanalına sahiptir. Bu kanal girdaplı yakıcıda yakılan yakıtın çıkarken hız kazanarak çıkmasına neden olmaktadır. Şekil 4.5'de Hidrojen-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı görülmektedir. Elde edilen maksimum NO_X kütle kesri 0.00469'dur.

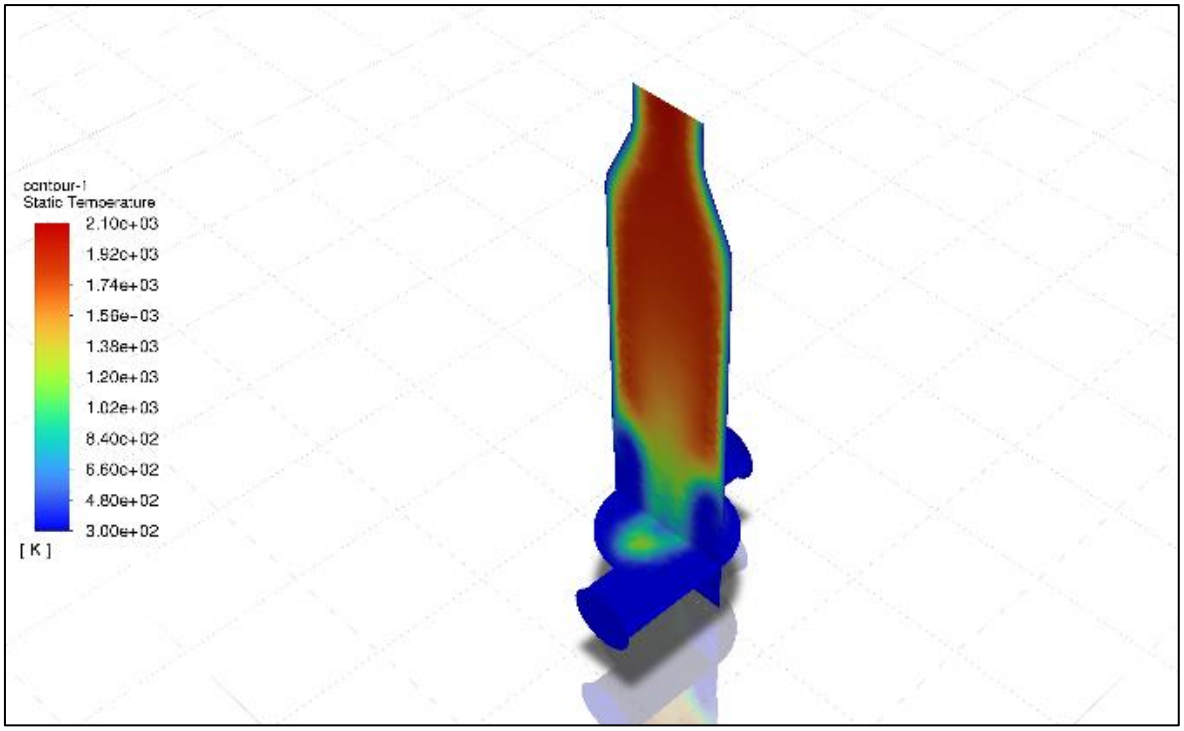
Hidrojen-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Hidrojen kütle kesri dağılımı Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Yakılan yakıtın giriş bölümündeki kütle kesri dağılımı 1, çıkış bölümündeki kütle kesri dağılımı ise 0 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerlerden beklenildiği üzere girdaplı fırının yanma odasına gönderilen Hidrojenin tamamının tükendiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.7'den de anlaşılacağı gibi Hidrojen-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri değerinin maksimum 0.23 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer hava giriş kanallarında ve girdaplı yakıcının yanma odasındaki duvarların çevresinde toplandığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.8'de Hidrojen-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı gösterilmektedir. Yanma reaksiyonu sonucu oluşan suyun maksimum kütle kesrinin 0.24 olduğu gözlemlenmiştir. Reaksiyon sonucu oluşan suyun beklenildiği üzere yanma odası içindeki girdaplı akışın merkez bölgelerinde oluştuğu gözlemlenmiştir.

Çalışmada modellenen girdaplı yakıcıda Hidrojen-Hava karışımı yakılarak Şekil 4.3.- 4.8. arasında verilmiş olan analiz sonuçları elde edilmiştir ve değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında Metan- Hava karışının yakılması sonucu elde edilen analiz sonuçları değerlendirilecektir.

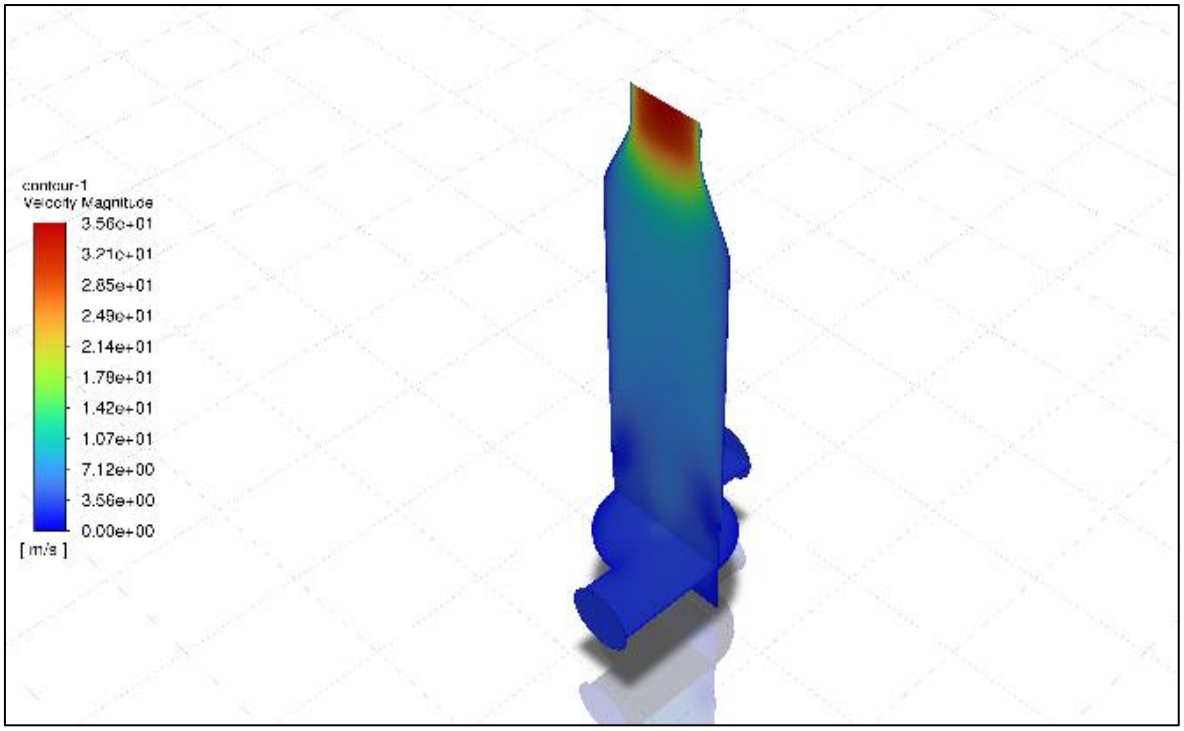
4.2. Girdaplı Yakıcıda Metan Yanması

Metan-Hava karışımının yakıldığı analizde hava girişi olarak tanımlanan “Inlet1” ve “Inlet2” girişlerinde hız belirleme yöntemi olarak “Magniude, Normal to Boundary”, referans çerçevesi olarak “Absolute”, hız olarak 3.00 m/s, yoğunluğu olarak %10 ve hidrolik çap olarak 0.075 m tanımlanmıştır. Termal bölümünden giren havanın sıcaklığı 300 K’dir. Girdaplı yakıcıda yakılacak yakıt-hava karışımı için yakıt kanalından hava girişi tanımlanmış ve havanın kütle oranı yazılımın giren havayı tanıya bilmesi için 0.23 olarak tanımlanmıştır. 100’ KW’lık enerji elde edilebilmesi için yakılması gereken metan miktarı ve bu metan miktarının yakıt giriş kanalından geçmesi gereken debi hesabı yapılmıştır. Yakıcı tasarımına uygun hava yakıt oranı ve hava fazlalık katsayısı belirlenmiştir. (H/Y oranı 23.8 kg hava / kg yakıt), ($\lambda = 1.4$). Yanma simülasyonuna başlamadan önce sınır şartları, çözüm hacmi için sayısal ağ yapısının belirlenmesi, fiziksel modelin tanımlanması (türbülanslı), türbülans modelinin seçimi (k-ε türbülans modeli) ,yanma modelinin seçimi (species transport) ve radyasyon modeli (P1) gibi parametreler analiz programında belirlenmiştir.

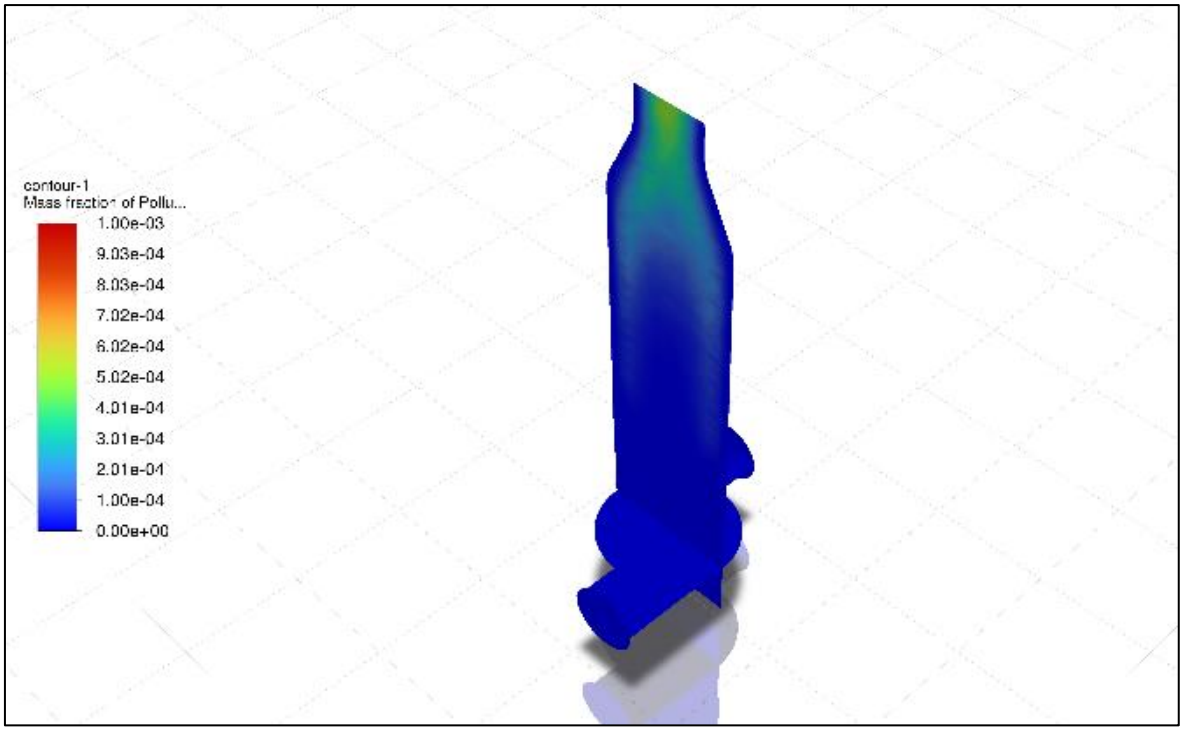
Metan-Hava karışımının yakıldığı analizde hava girişi olarak tanımlanan “Inlet3” ve girişinde hız belirleme yöntemi olarak “Magniude, Normal to Boundary”, referans çerçevesi olarak “Absolute”, hız olarak 4.30 m/s, türbülans yoğunluğu olarak %10 ve hidrolik çap olarak 0.02573 m tanımlanmıştır. Termal bölümünden giren havanın sıcaklığı 300 K’dir. Girdaplı yakıcıda yakılacak yakıt-hava karışımı için yakıt kanalından CH_4 girişi tanımlanmış ve CH_4’ün kütle oranı 1 olarak tanımlanmıştır.



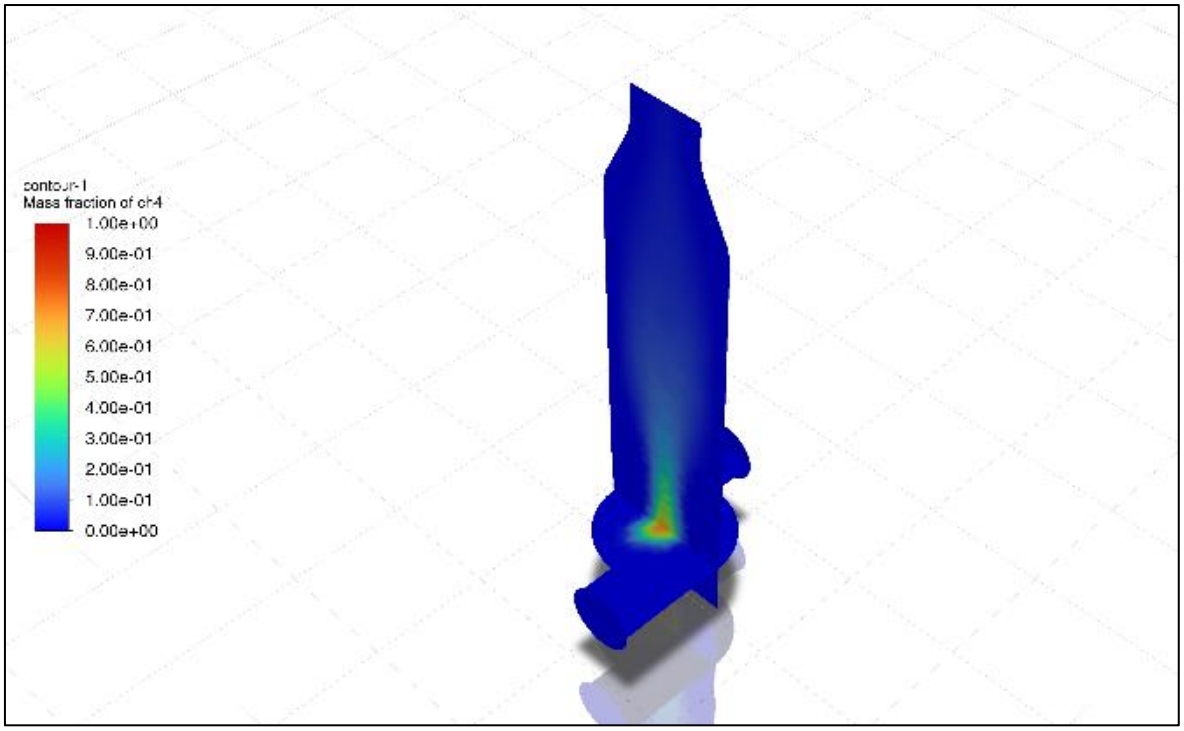
Şekil 4.9. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı



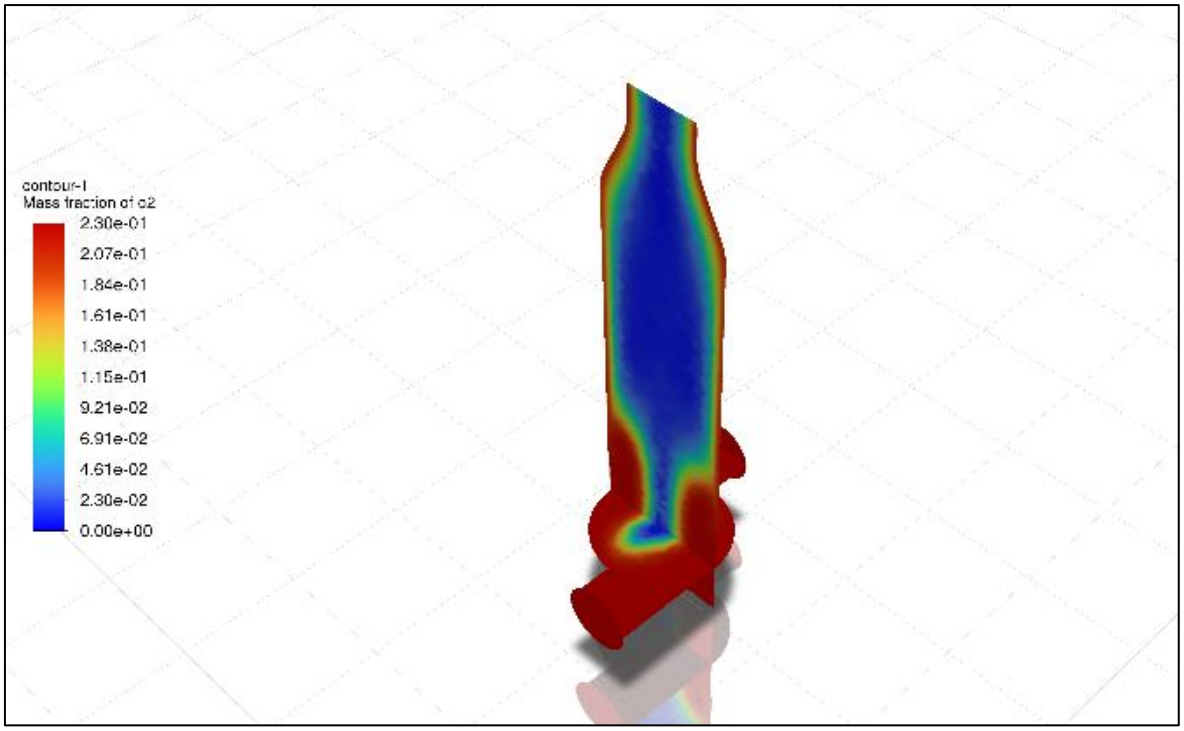
Şekil 4.10. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız dağılımı



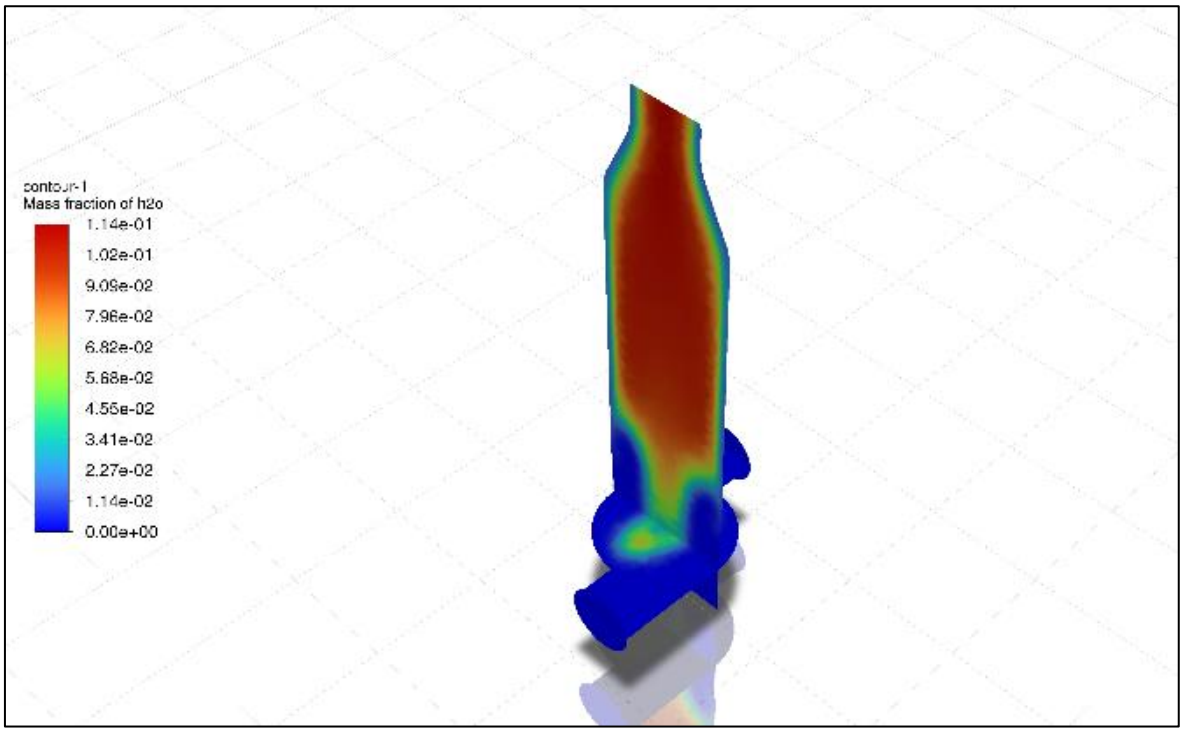
Şekil 4.11. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı



Şekil 4.12. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı



Şekil 4.13. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı



Şekil 4.14. Metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı

Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, NO_X kütle kesri dağılımı, Metan kütle kesri dağılımı, Oksijen kütle kesri dağılımı ve H_2O kütle kesri dağılımı Şekil 4.9-4.14 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.9'da görüldüğü gibi yakılan metanın yarattığı sıcaklık değerleri 300 K – 2100 K arasında değişmektedir. Yakıcının sahip olduğu girdap akışı nedeniyle oluşan sıcaklık dağılımının yakıcın ortasında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.10'dan de anlaşılacağı gibi metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız değerinin maksimum 35.6 m/s hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Modellenen yakıcı tasarımı gereği daralan çıkış kanalına sahiptir. Bu kanal girdaplı yakıcıda yakılan yakıtın çıkarken hız kazanarak çıkmasına neden olmaktadır. Şekil 4.11'de metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı görülmektedir. Elde edilen maksimum NO_X kütle kesri 0.001'dir.

Şekil 4.12'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Metan kütle kesri dağılımı gösterilmiştir. Girdaplı yakıcını giriş bölümündeki kütle kesri dağılımı 1, çıkış bölümündeki kütle kesri dağılımı ise 0 olduğu analiz verileri sonucunda görülmüştür. Bu değerlerden beklenildiği üzere girdaplı fırının yanma odasına gönderilen metanın tamamının tükendiği anlaşılmaktadır. Şekil 4.13'den de anlaşılacağı gibi metan-hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri değerinin maksimum 0.23 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer hava giriş kanallarında ve girdaplı yakıcının yanma odasındaki duvarların çevresinde toplandığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.14'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı gösterilmektedir. Yanma reaksiyonu sonucu oluşan suyun maksimum kütle kesrinin 0.114 olduğu gözlemlenmiştir. Metan-Hava yanmasına benzer olarak reaksiyon sonucu oluşan suyun beklenildiği üzere yanma odası içindeki girdaplı akışın merkez bölgelerinde oluştuğu gözlemlenmiştir.

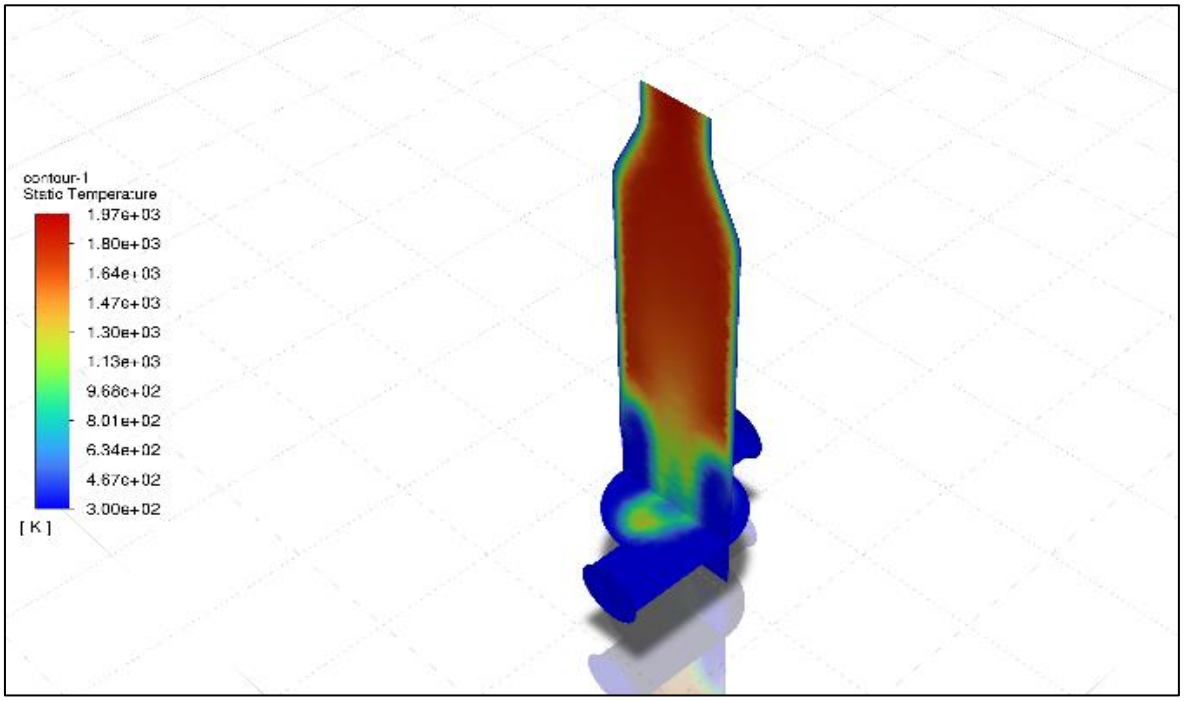
Çalışmada modellenen girdaplı yakıcıda Metan-Hava karışımı yakılarak Şekil 4.9-4.14 arasında verilmiş olan analiz sonuçları elde edilmiştir ve değerlendirilmiştir. Çalışmanın devamında modellenen girdaplı yakıcıda %10-%50 CO_2 ilavesi ile dağıtılmış yanma tekniği uygulanarak metan-hava karışının yakılması sonucu elde edilen analiz sonuçları değerlendirilecektir.

4.3. Girdaplı Yakıcıda CO_2 Seyreltmesi Yapılmış Hava İle Metan Yanması

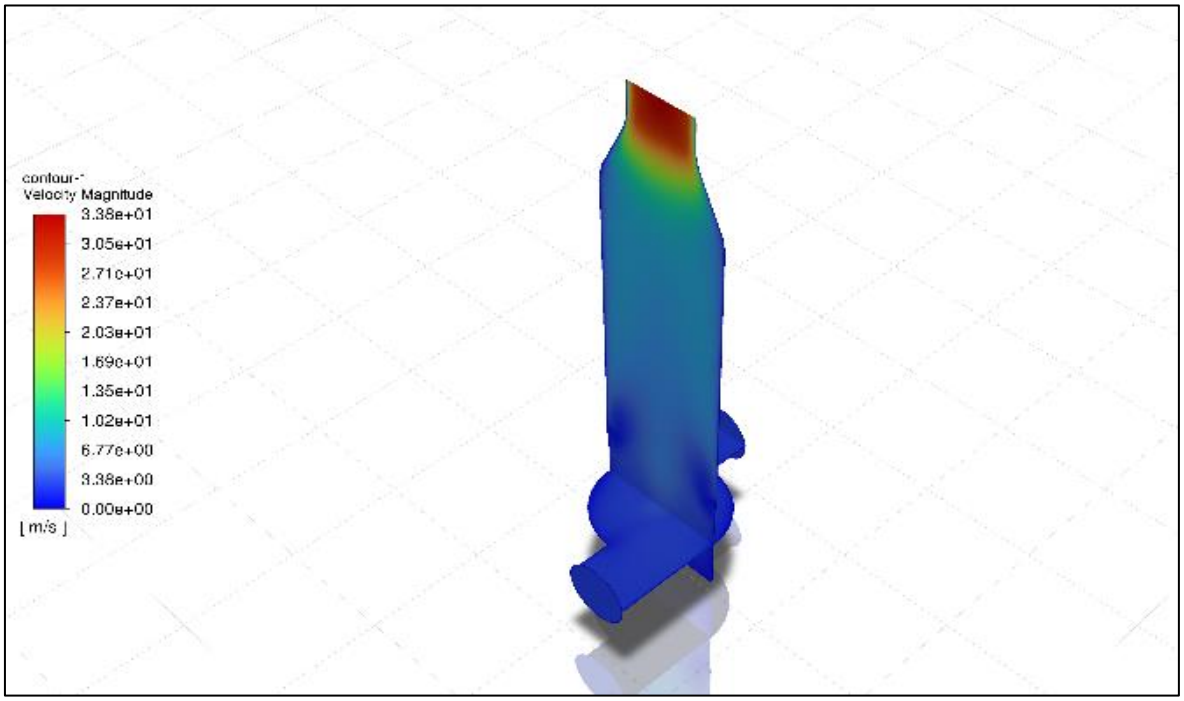
Dağıtılmış hava tekniğinin kullanıldığı metan-hava karışımının yakıldığı analizde hava girişi olarak tanımlanan "Inlet1" ve "Inlet2" girişlerinde hız belirleme yöntemi olarak "Magniude, Normal to Boundary", referans çerçevesi olarak "Absolute", hız olarak 3.00 m/s, türbulans yoğunluğu olarak %10 ve hidrolik çap olarak 0.075 m tanımlanmıştır. Termal bölümünden giren havanın sıcaklığı 300 K'dir. CO_2 ilavesinin girdaplı yakıcıdaki performansını değerlendirebilmek adına CO_2 ilavesi %50 oranına kadar analiz edilmiş ve yorumlamıştır. 100' KW'lık enerji elde edilebilmesi için yakılması gereken metan miktarı ve bu metan miktarının yakıt giriş kanalından geçmesi gereken debi hesabı yapılmıştır. Yakıcı tasarımına uygun hava yakıt oranı ve hava fazlalık katsayısı belirlenmiştir. Yanma simülasyonuna başlamadan önce sınır şartları, çözüm hacmi için sayısal ağ yapısının belirlenmesi, fiziksel modelin tanımlanması (türbülanslı), türbülans modelinin seçimi (k-ε türbülans modeli) ,yanma modelinin seçimi (species transport) ve radyasyon modeli (P1) gibi parametreler analiz programında belirlenmiştir.

Dağıtılmış hava tekniğinin kullanıldığı metan-hava karışımının yakıldığı analizde hava girişi olarak tanımlanan "Inlet3" ve girişinde hız belirleme yöntemi olarak "Magniude, Normal to Boundary", referans çerçevesi olarak "Absolute", hız olarak 4.30 m/s türbülans sekmesi altında bulunan metod kısmına "Intensity and Hydraulic Diameter" türbulans yoğunluğu olarak %10 ve hidrolik çap olarak 0.02573 m tanımlanmıştır. Termal bölümünden giren havanın sıcaklığı 300 K'dir. Girdaplı yakıcıda yakılacak yakıt-hava karışımı için yakıt kanalından CH_4 girişi tanımlanmış ve CH_4'ün kütle oranı 1 olarak tanımlanmıştır.

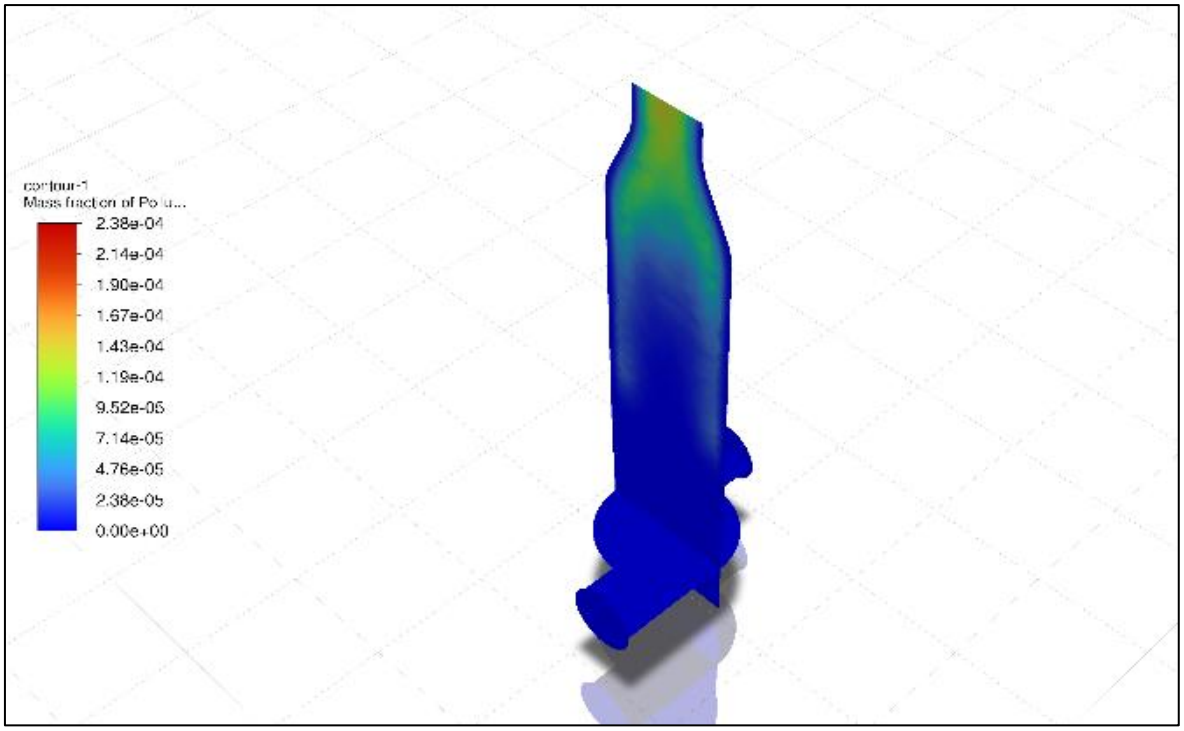
4.3.1. Girdaplı yakıcıda %10 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması



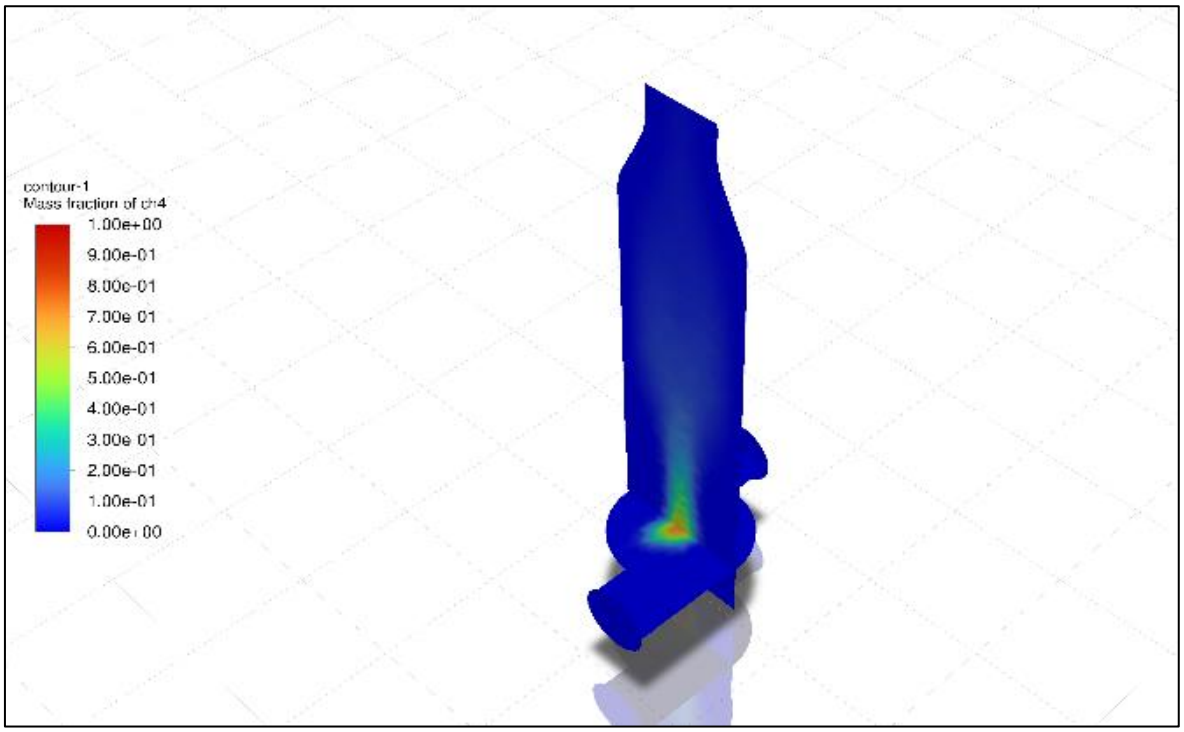
Şekil 4.15. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı



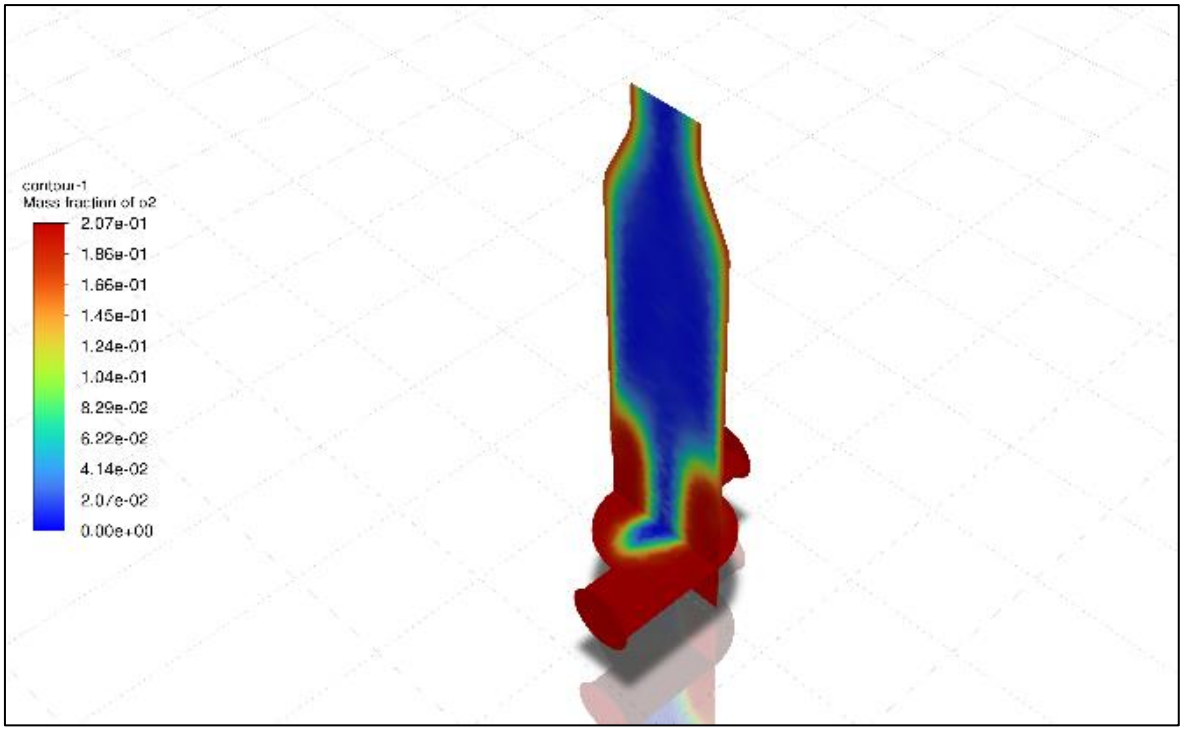
Şekil 4.16. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı



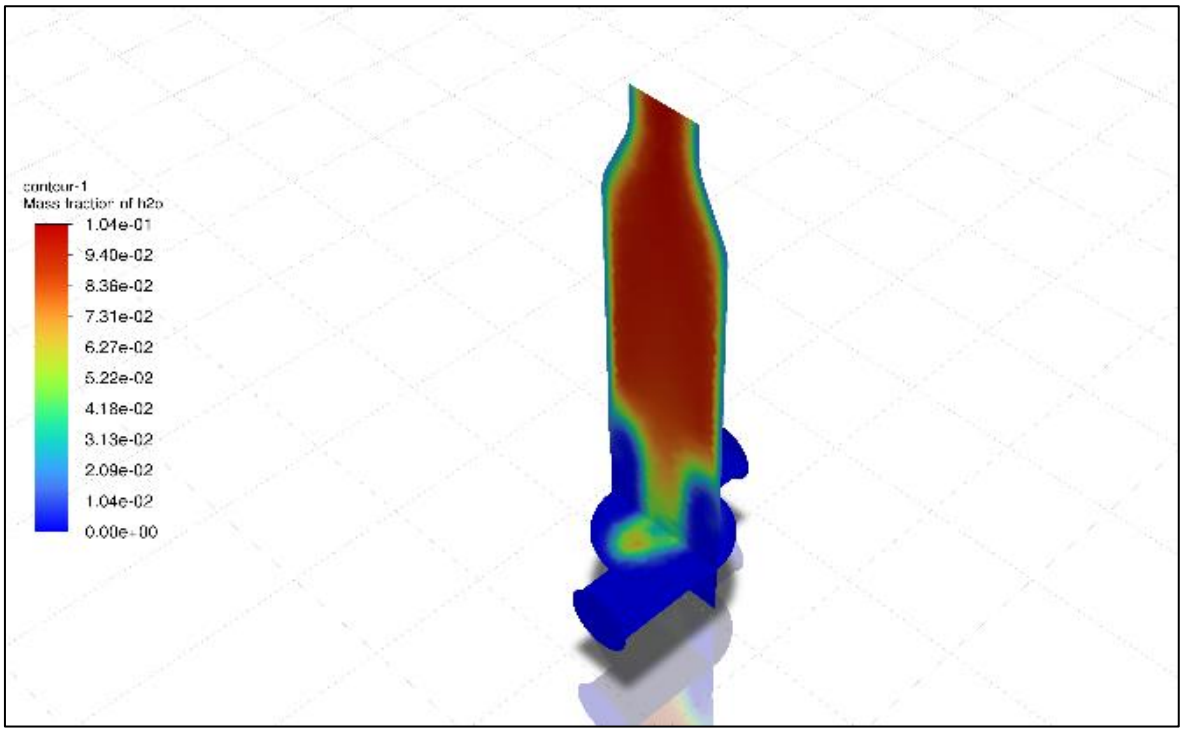
Şekil 4.17. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı



Şekil 4.18. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı



Şekil 4.19. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı

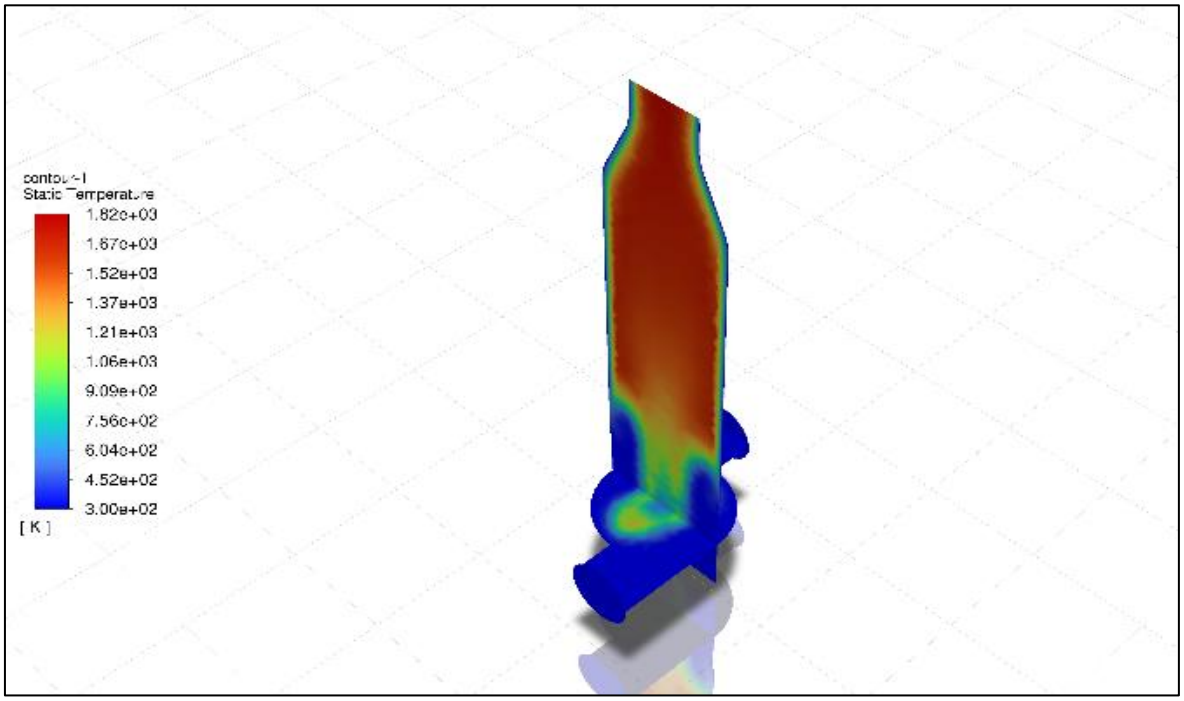


Şekil 4.20. %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı

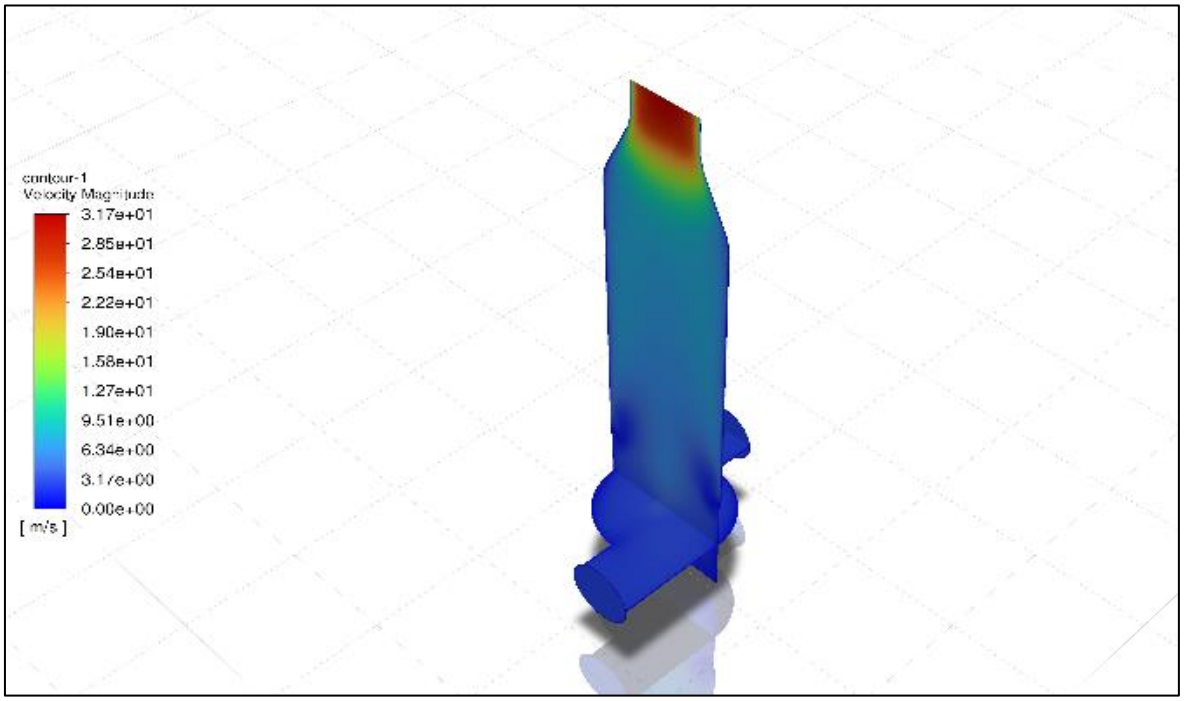
Metan-Hava karışımının girdaplı yakıcıda %10 CO_2 ilavesi ile dağıtılmış yanma tekniği kullanılarak yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, NO_X kütle kesri dağılımı, Metan kütle kesri dağılımı, Oksijen kütle kesri dağılımı ve H_2O kütle kesri dağılımı Şekil 4.15-4.20 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.15'de görüldüğü gibi yakılan metanın yanma odası içerisinde yarattığı sıcaklık değerleri 300 K – 1970 K arasında değişmektedir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum sıcaklık değerinde yaklaşık %6.19 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.16'dan de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız değerinin maksimum 35.6 m/s hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum hız değerinde yaklaşık %5.06 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.17'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı görülmektedir. Elde edilen maksimum NO_X kütle kesri 0.000238'dir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum NO_X kütle kesri değerinde yaklaşık %76.20 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.18'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Metan kütle kesri dağılımı gösterilmiştir. Girdaplı yakıcını giriş bölümündeki kütle kesri dağılımı 1, çıkış bölümündeki kütle kesri dağılımı ise 0 olduğu analiz verileri sonucunda görülmüştür. Bu değerlerden beklenildiği üzere girdaplı fırının yanma odasına gönderilen Metanın tamamının tükendiği anlaşılmaktadır. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki sonuçların paralellik gösterdiği saptanmıştır. Şekil 4.19'dan de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri değerinin maksimum 0.207 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum Oksijen kütle kesri değerinde yaklaşık %10 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.20'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı gösterilmektedir. Yanma reaksiyonu sonucu oluşan suyun maksimum kütle kesrinin 0.101 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum H_2O kütle kesri değerinde yaklaşık %11.40 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

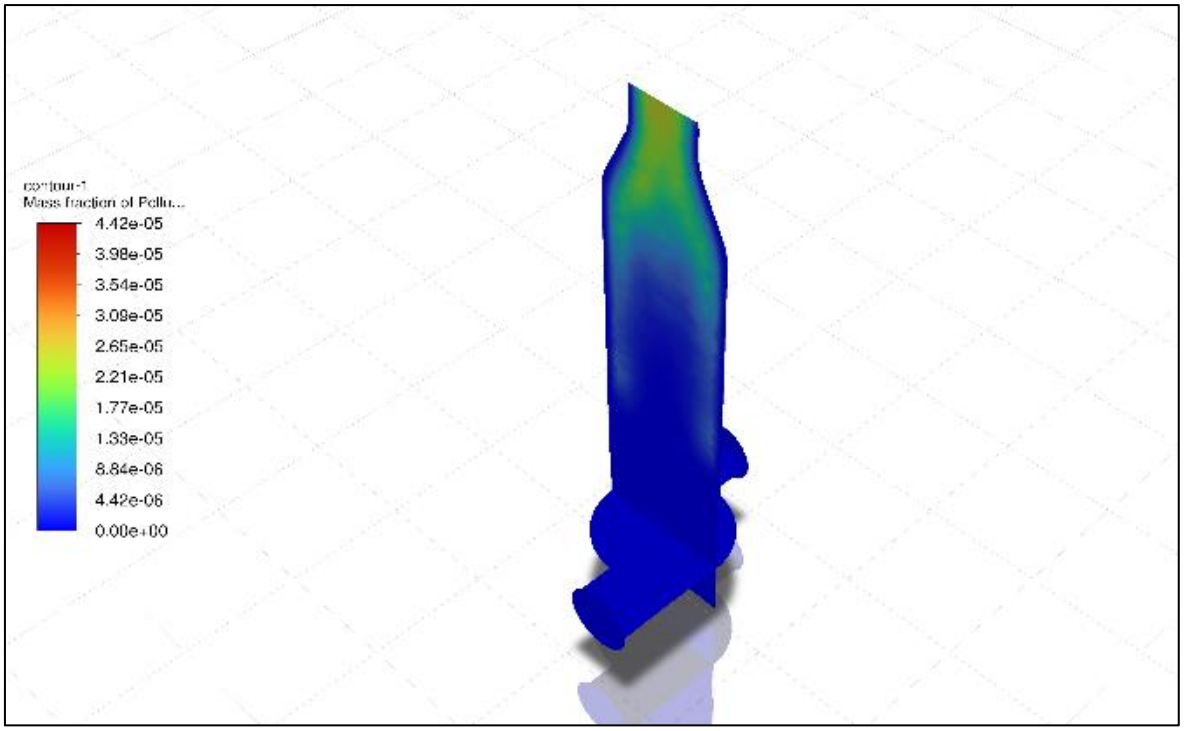
4.3.2. Girdaplı yakıcıda %20 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması



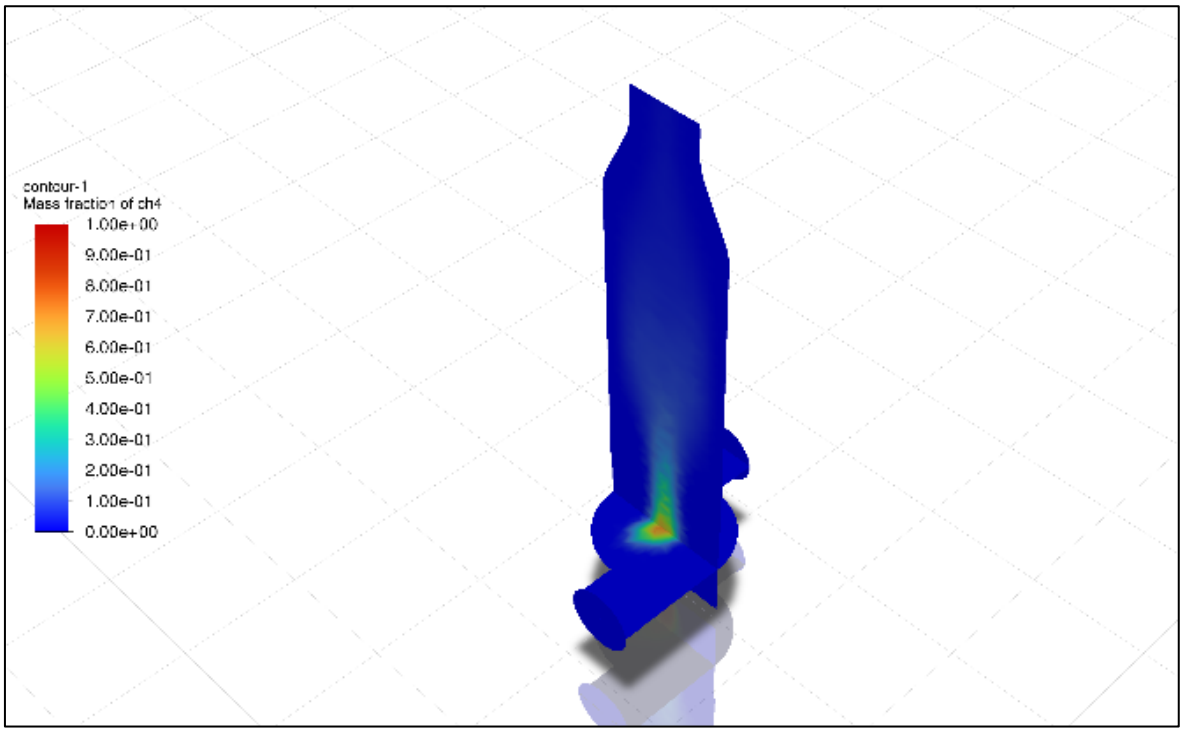
Şekil 4.21. Metan-Hava karışımının %20 oranında CO_2 ilavesi ile yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı



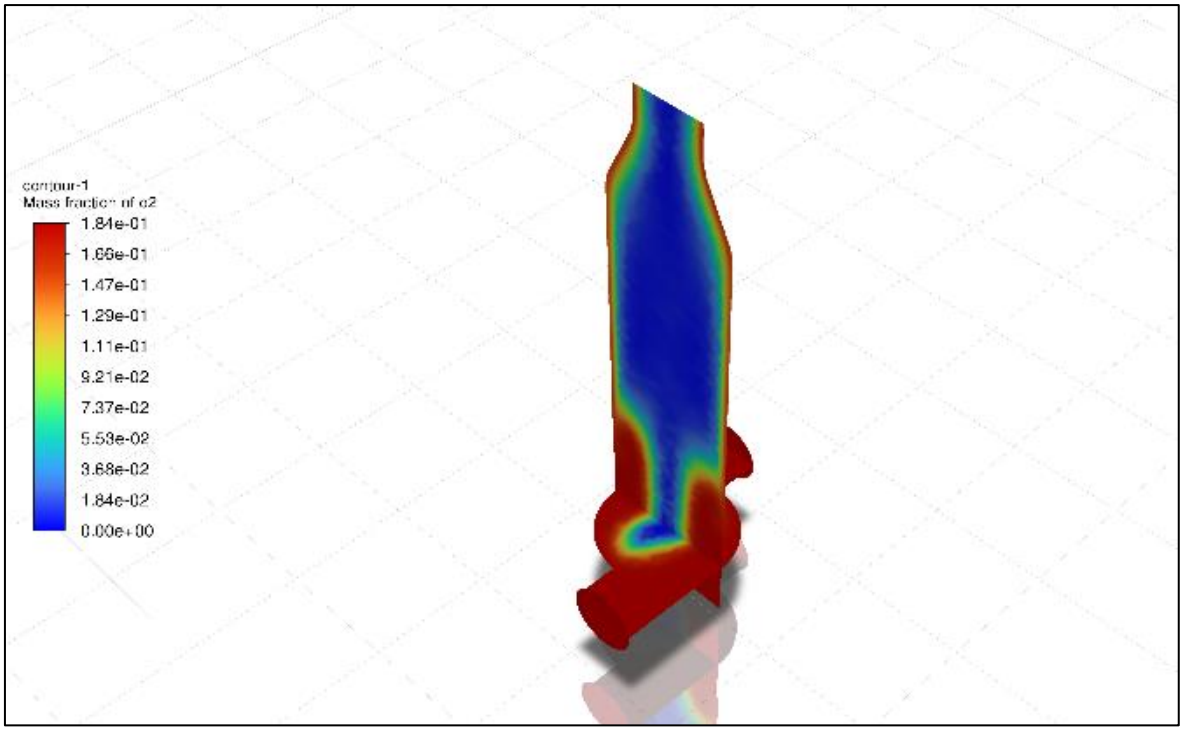
Şekil 4.22. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı



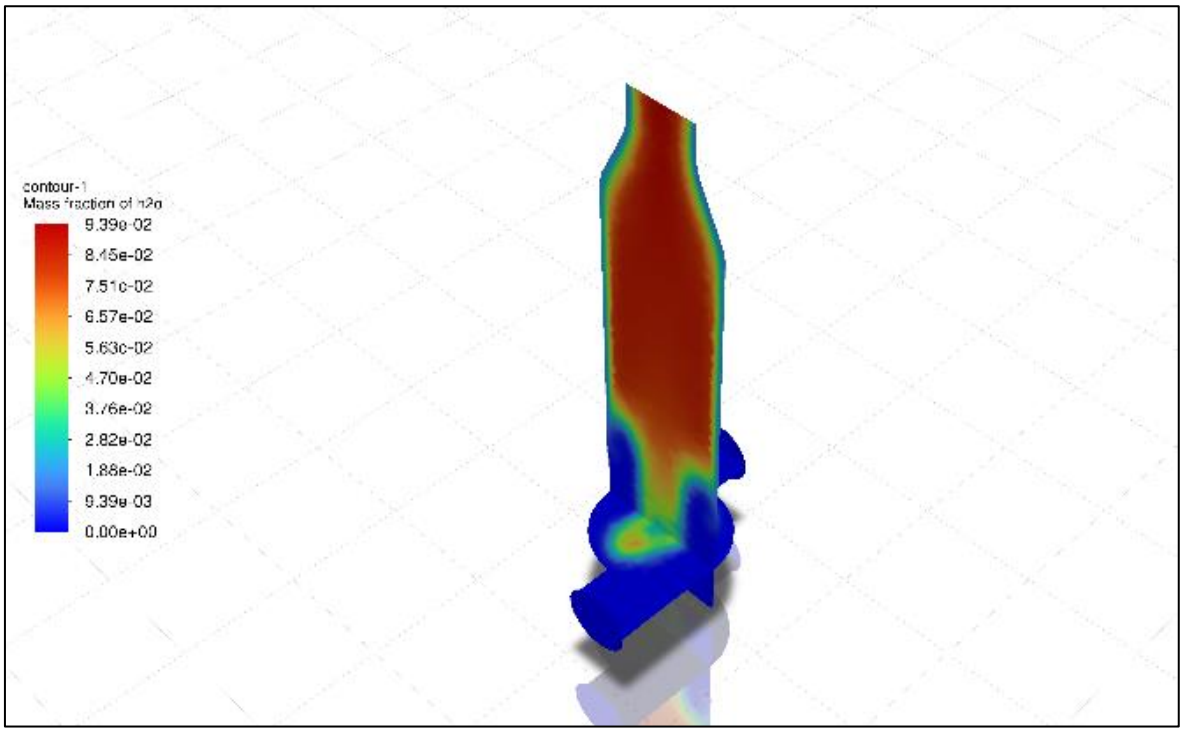
Şekil 4.23. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı



Şekil 4.24. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı



Şekil 4.25. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı

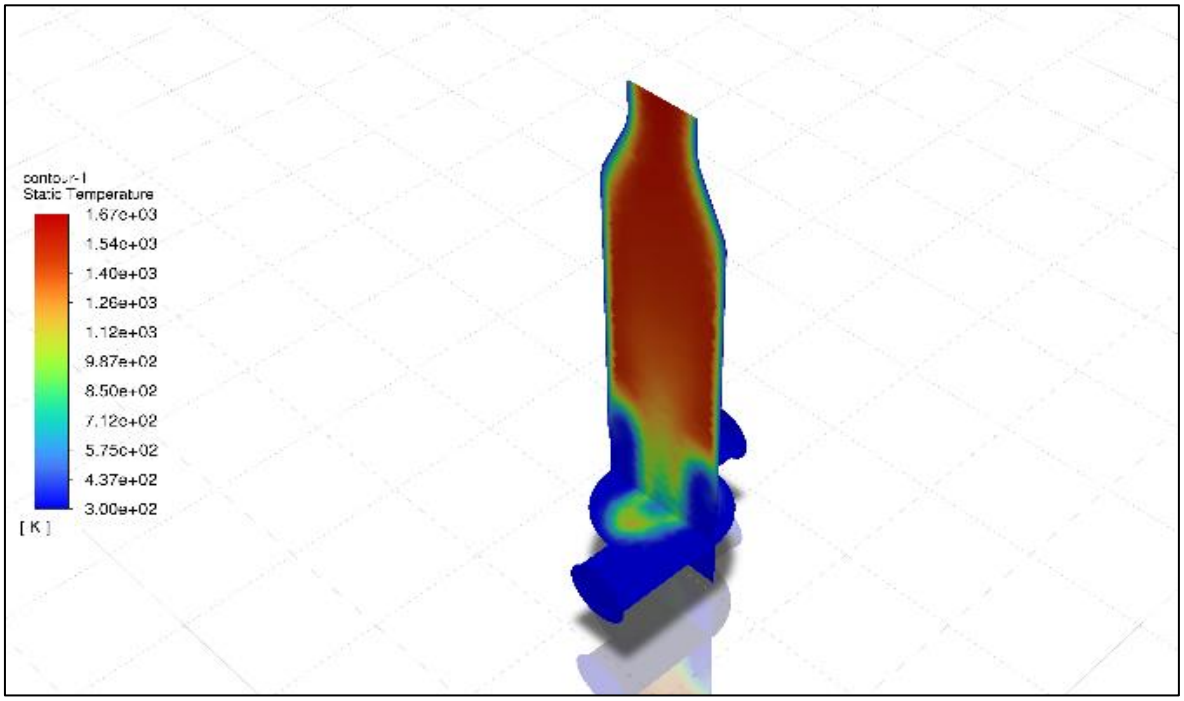


Şekil 4.26. %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı

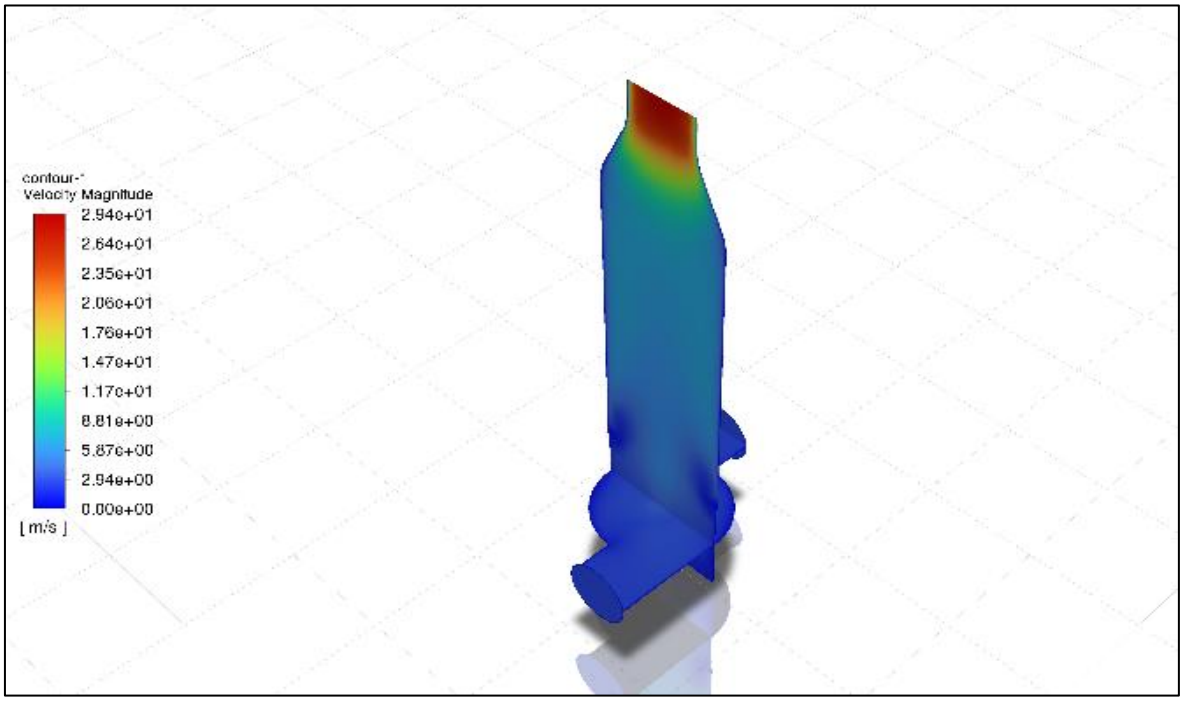
Metan-Hava karışımının girdaplı yakıcıda %20 CO_2 ilavesi ile dağıtılmış yanma tekniği kullanılarak yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, NO_X kütle kesri dağılımı, Metan kütle kesri dağılımı, Oksijen kütle kesri dağılımı ve H_2O kütle kesri dağılımı Şekil 4.21-4.26 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.21'de görüldüğü gibi yakılan metanın yanma odası içerisinde yarattığı sıcaklık değerleri 300 K – 1820 K arasında değişmektedir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum sıcaklık değerinde yaklaşık %13.33 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.22'den de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız değerinin maksimum 31.7 m/s hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum hız değerinde yaklaşık %10.95 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.23'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Nox kütle kesri dağılımı görülmektedir. Elde edilen maksimum NO_X kütle kesri $4.42x10^{-5}$'dir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum NO_X kütle kesri değerinde yaklaşık %95.58 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.24'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Metan kütle kesri dağılımı gösterilmiştir. Girdaplı yakıcını giriş bölümündeki kütle kesri dağılımı 1, çıkış bölümündeki kütle kesri dağılımı ise 0 olduğu analiz verileri sonucunda görülmüştür. Bu değerlerden beklenildiği üzere girdaplı fırının yanma odasına gönderilen Metanın tamamının tükendiği anlaşılmaktadır. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki sonuçların paralellik gösterdiği saptanmıştır. Şekil 4.25'den de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri değerinin maksimum 0.184 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum Oksijen kütle kesri değerinde yaklaşık %20 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.26'da Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H2O kütle kesri dağılımı gösterilmektedir. Yanma reaksiyonu sonucu oluşan suyun maksimum kütle kesrinin 0.0939 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum H_2O kütle kesri değerinde yaklaşık %17.63 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

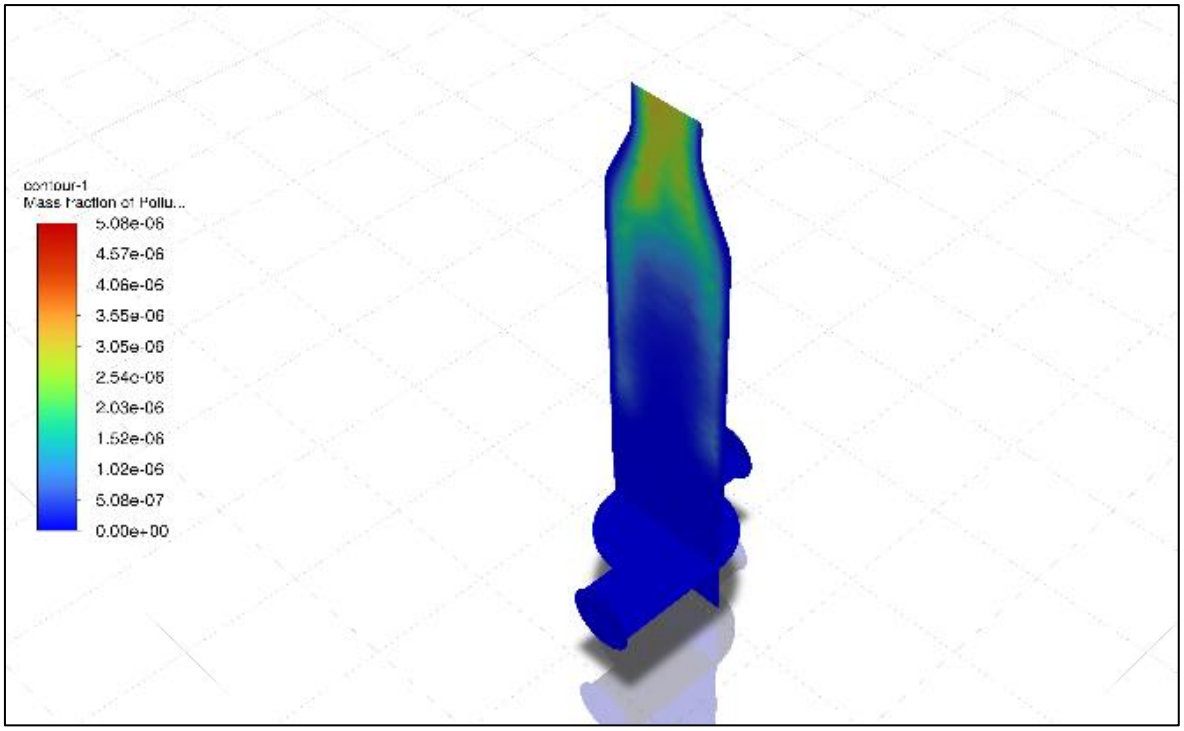
4.3.3. Girdaplı yakıcıda %30 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması



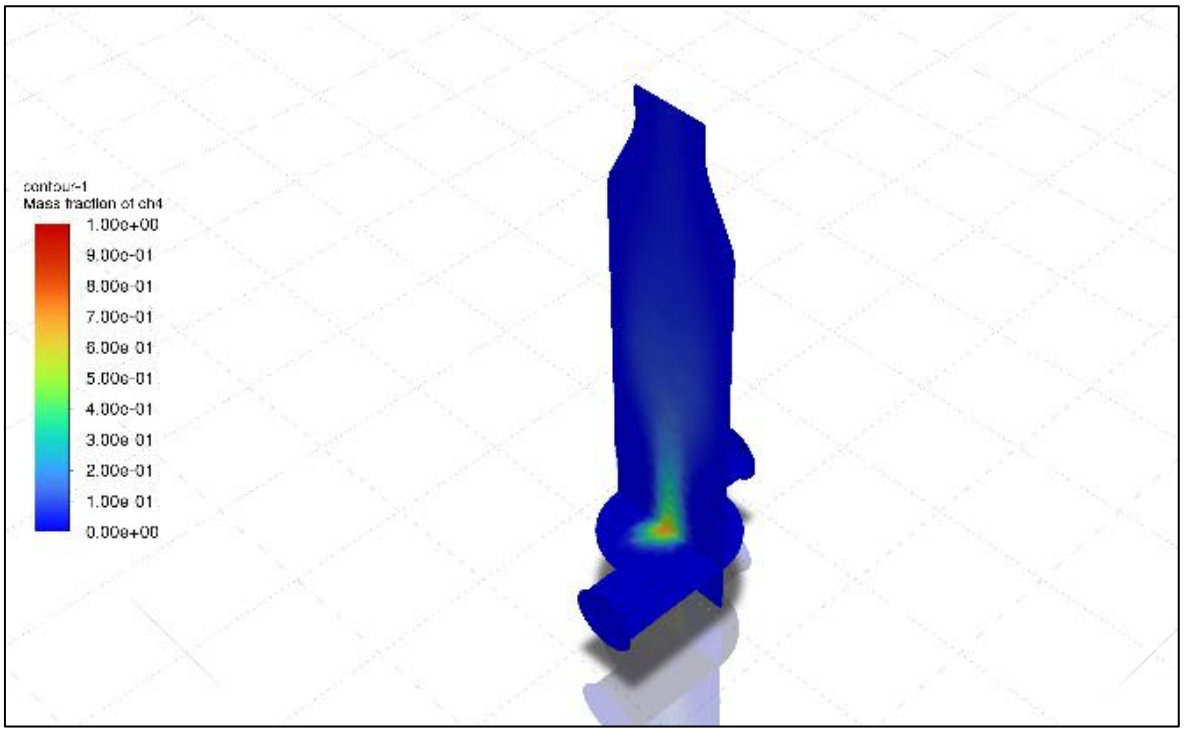
Şekil 4.27. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı



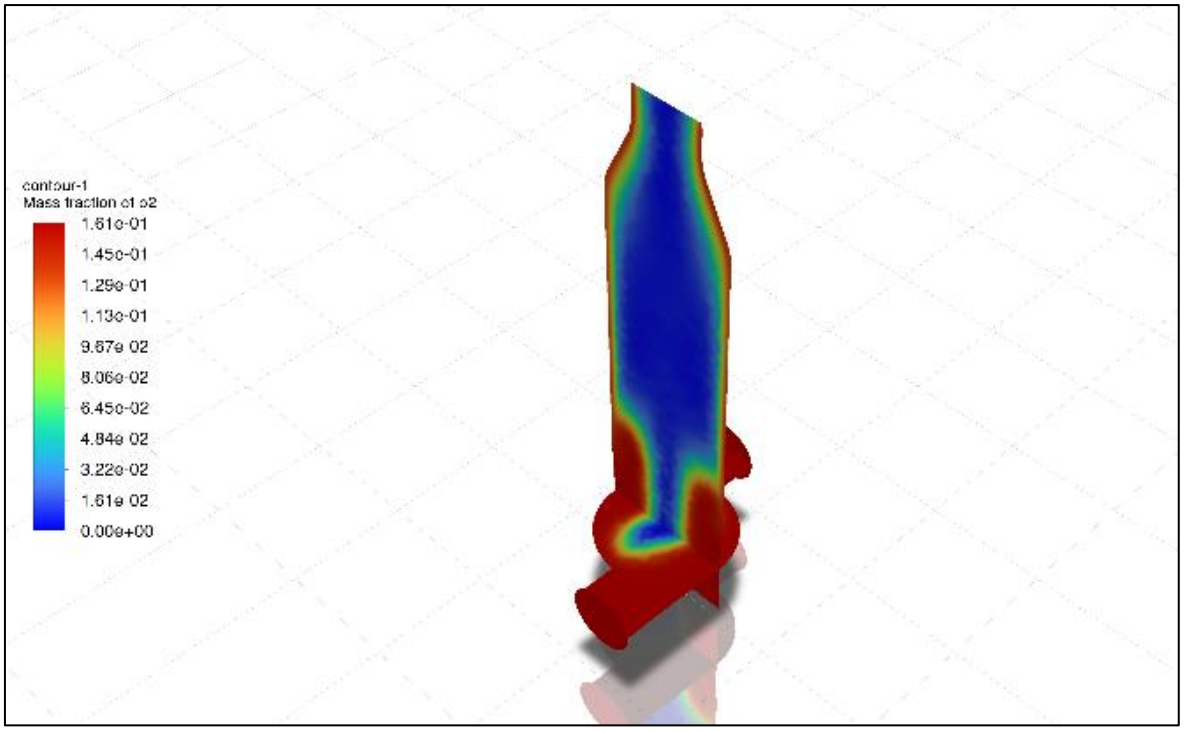
Şekil 4.28. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı



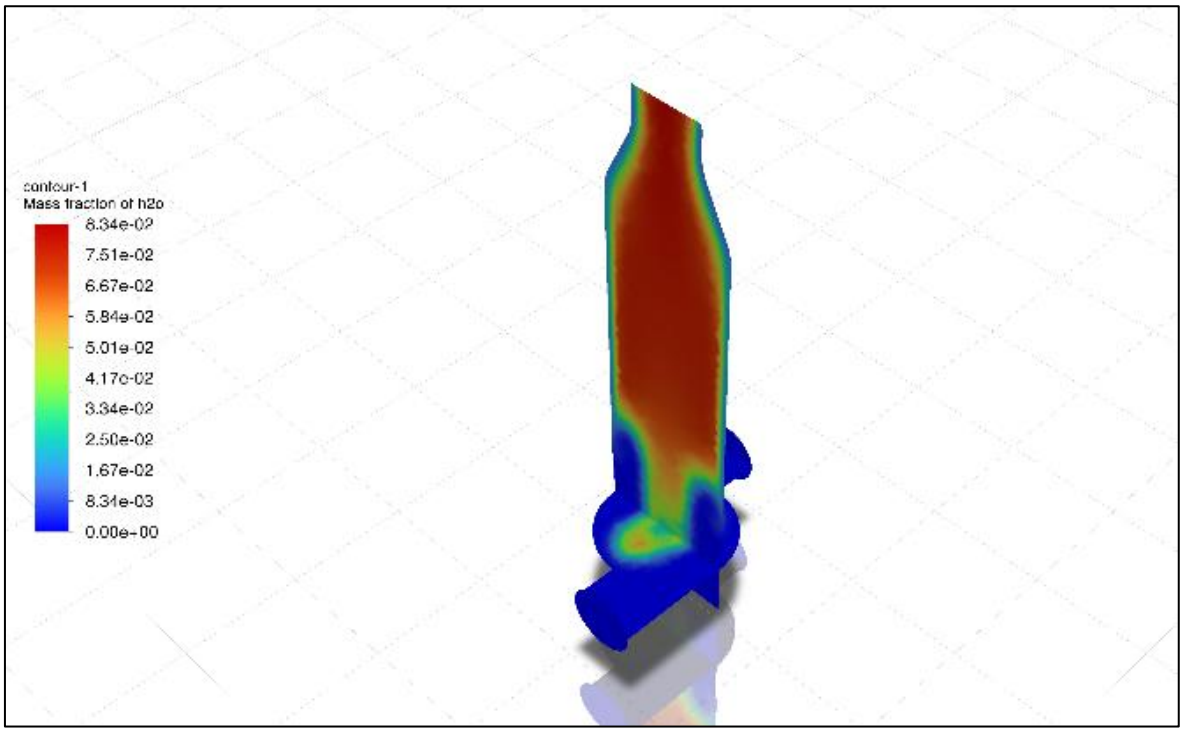
Şekil 4.29. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı



Şekil 4.30. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı



Şekil 4.31. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı

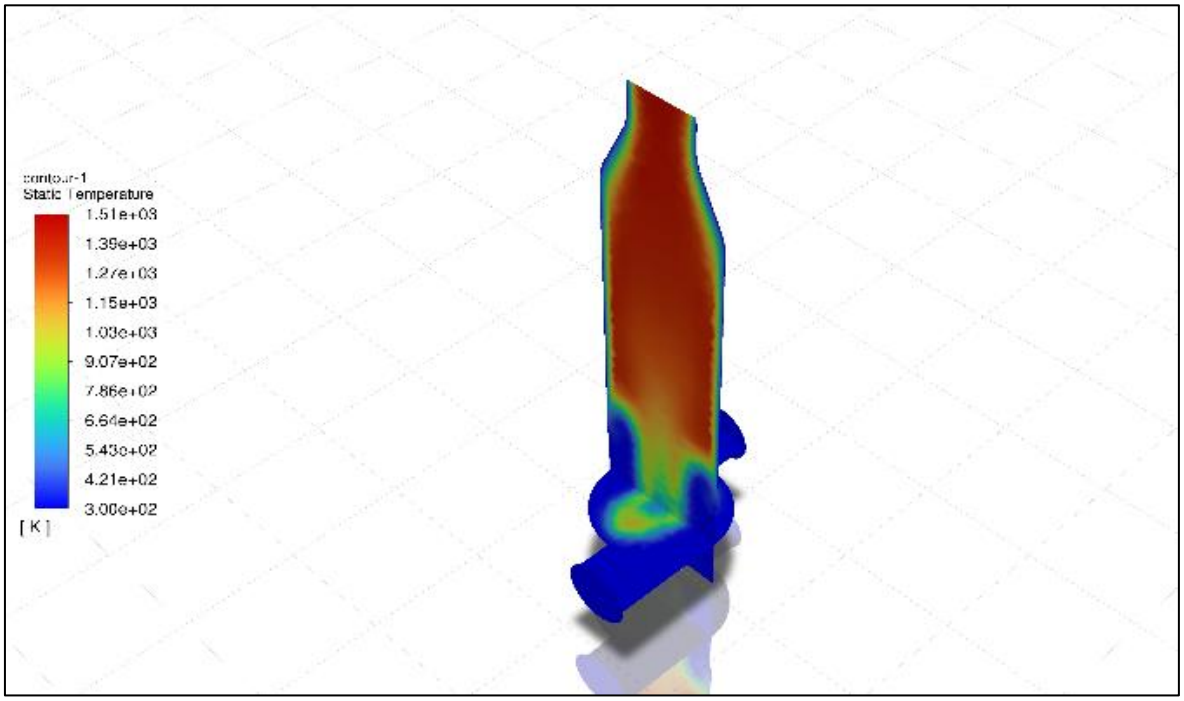


Şekil 4.32. %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı

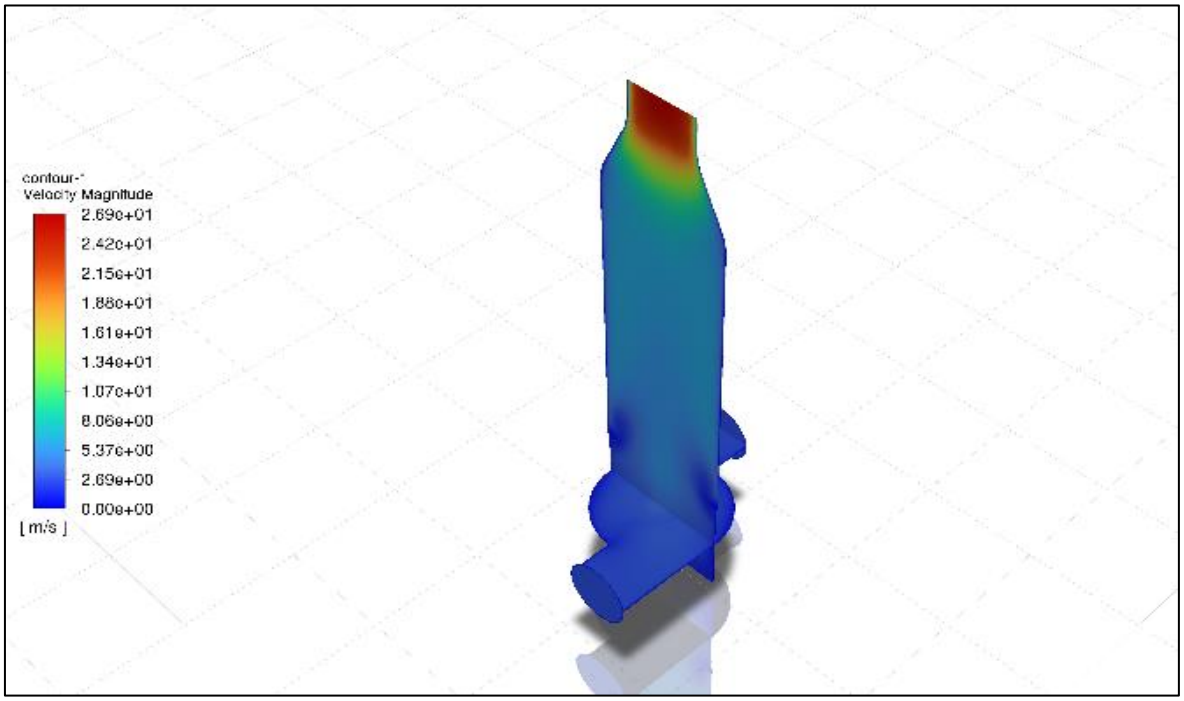
Metan-Hava karışımının girdaplı yakıcıda %30 CO_2 ilavesi ile dağıtılmış yanma tekniği kullanılarak yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, NO_X kütle kesri dağılımı, Metan kütle kesri dağılımı, Oksijen kütle kesri dağılımı ve H_2O kütle kesri dağılımı Şekil 4.27-4.32 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.27'de görüldüğü gibi yakılan metanın yanma odası içerisinde yarattığı sıcaklık değerleri 300 K – 1670 K arasında değişmektedir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum sıcaklık değerinde yaklaşık %20.47 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.28'den de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız değerinin maksimum 29.4 m/s hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değer seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum hız değerinde yaklaşık %17.42 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.29'da Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı görülmektedir. Elde edilen maksimum NO_X kütle kesri $5.08x10^{-6}$'dir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum NO_X kütle kesri değerinde yaklaşık %99.49 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.30'da Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Metan kütle kesri dağılımı gösterilmiştir. Girdaplı yakıcını giriş bölümündeki kütle kesri dağılımı 1, çıkış bölümündeki kütle kesri dağılımı ise 0 olduğu analiz verileri sonucunda görülmüştür. Bu değerlerden beklenildiği üzere girdaplı fırının yanma odasına gönderilen Metanın tamamının tükendiği anlaşılmaktadır. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki sonuçların paralellik gösterdiği saptanmıştır. Şekil 4.31'den de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri değerinin maksimum 0.161 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum Oksijen kütle kesri değerinde yaklaşık %30 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.32'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı gösterilmektedir. Yanma reaksiyonu sonucu oluşan suyun maksimum kütle kesrinin 0.0834 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum H_2O kütle kesri değerinde yaklaşık %26.84 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

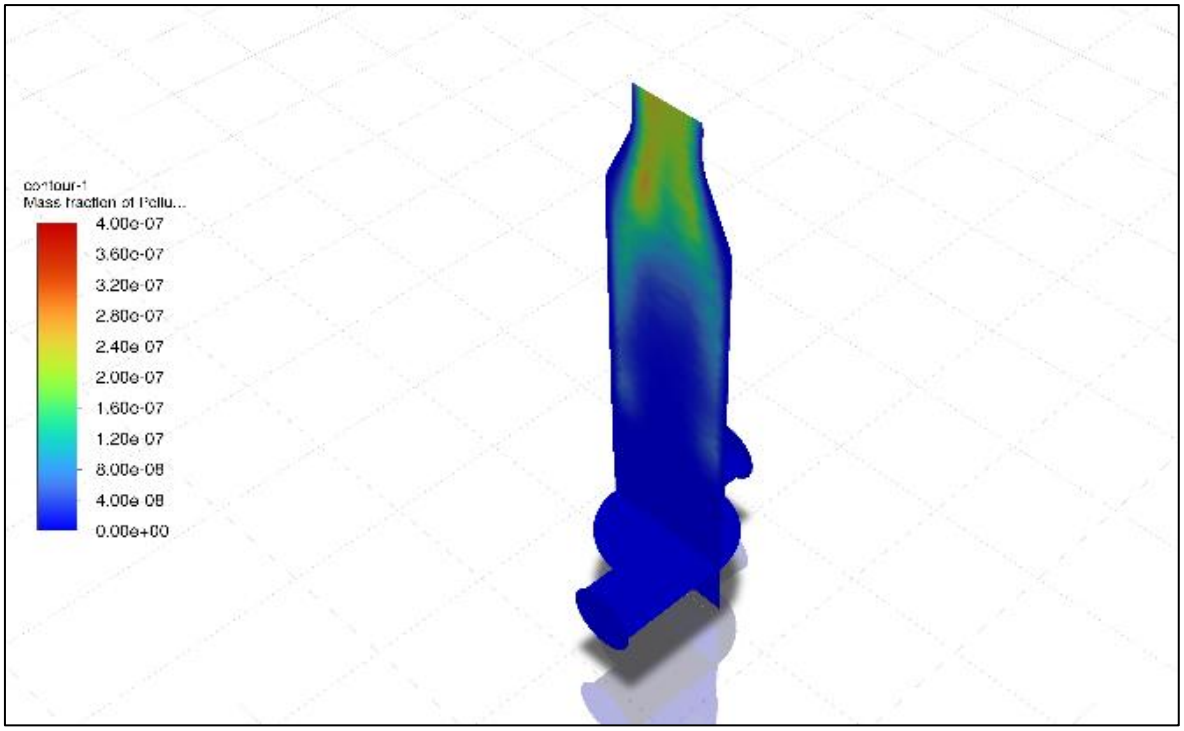
4.3.4. Girdaplı yakıcıda %40 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması



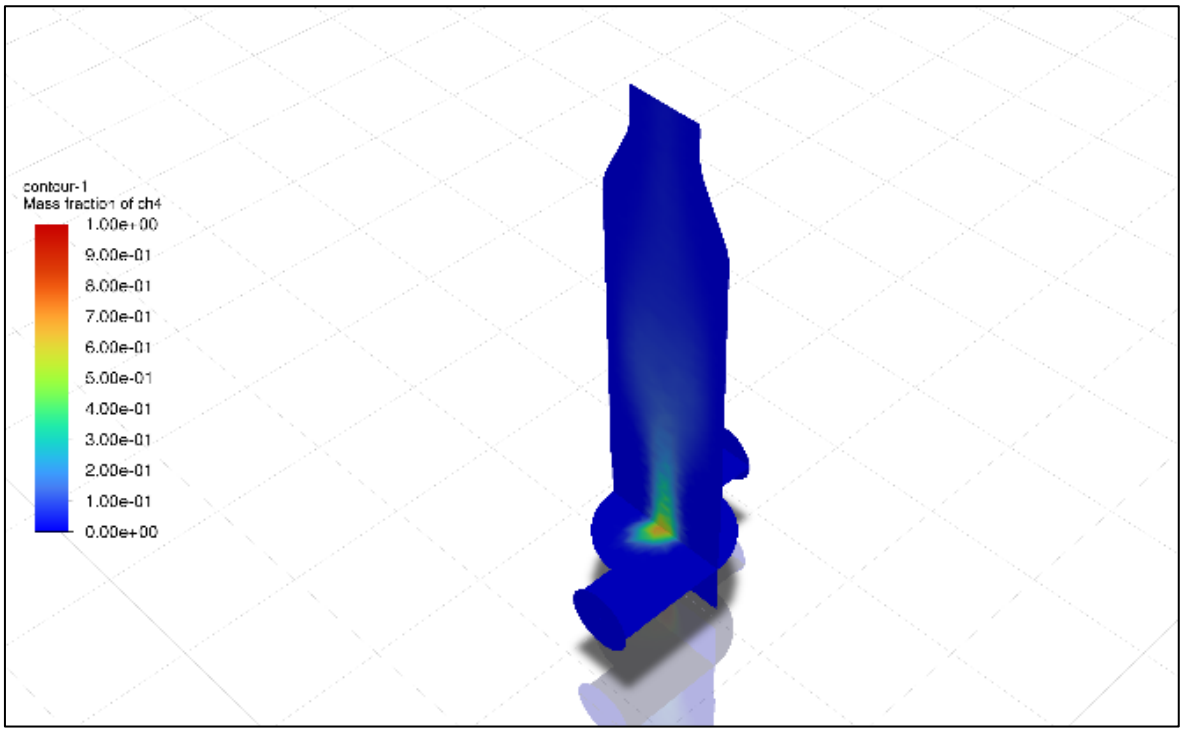
Şekil 4.33. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı



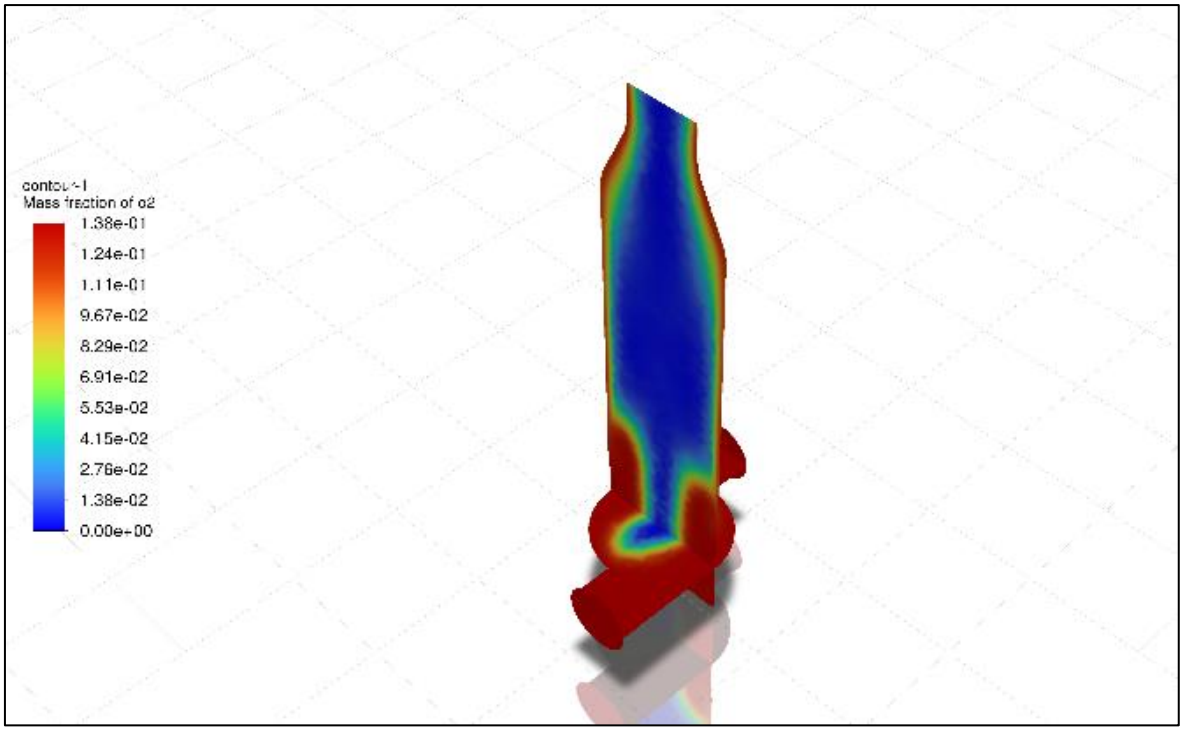
Şekil 4.34. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı



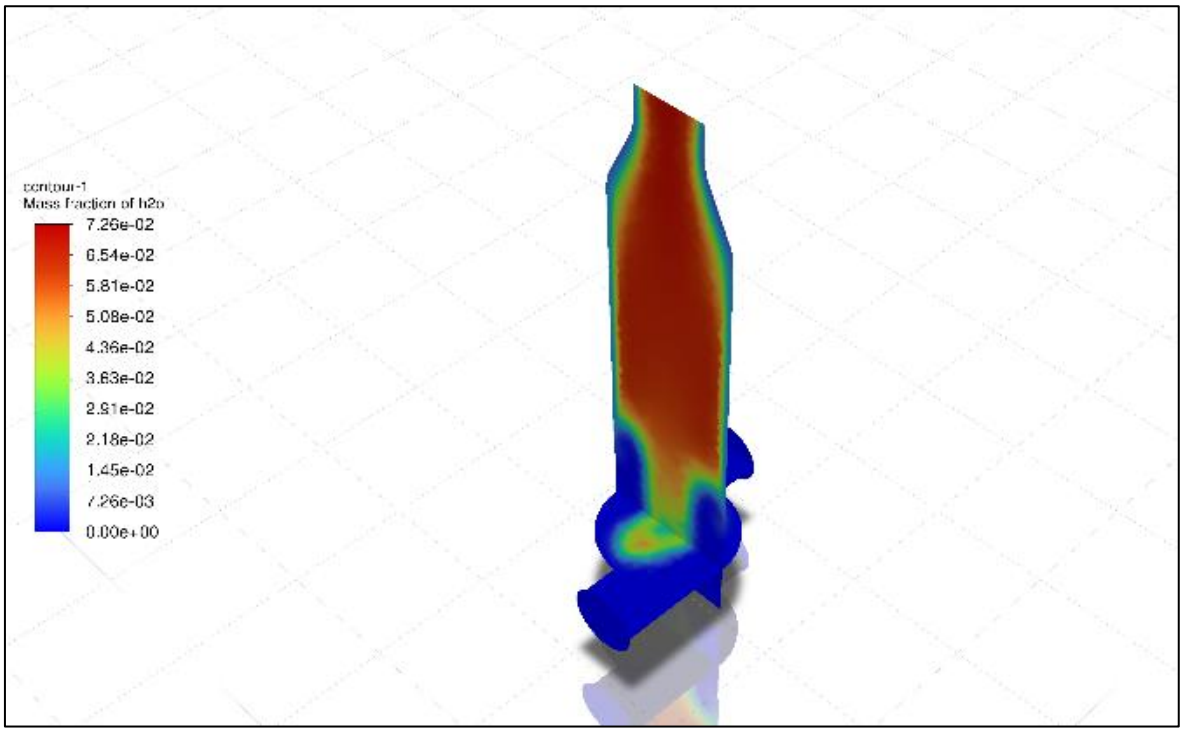
Şekil 4.35. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı



Şekil 4.36. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı



Şekil 4.37. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı

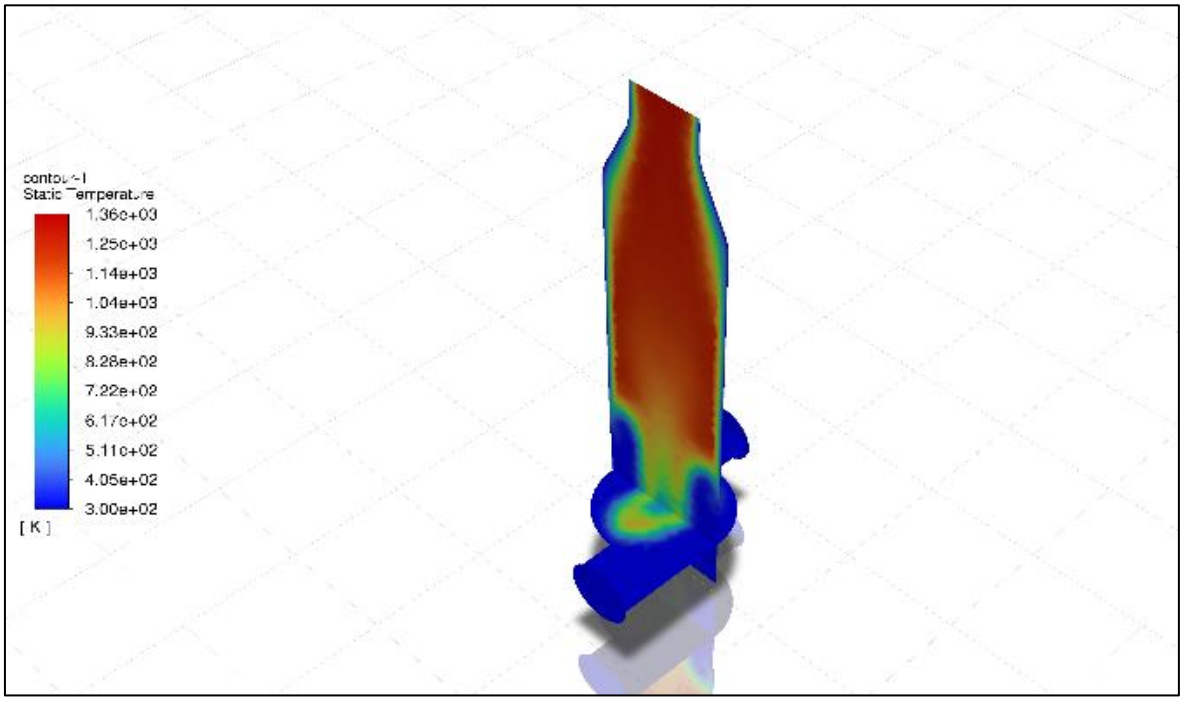


Şekil 4.38. %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı

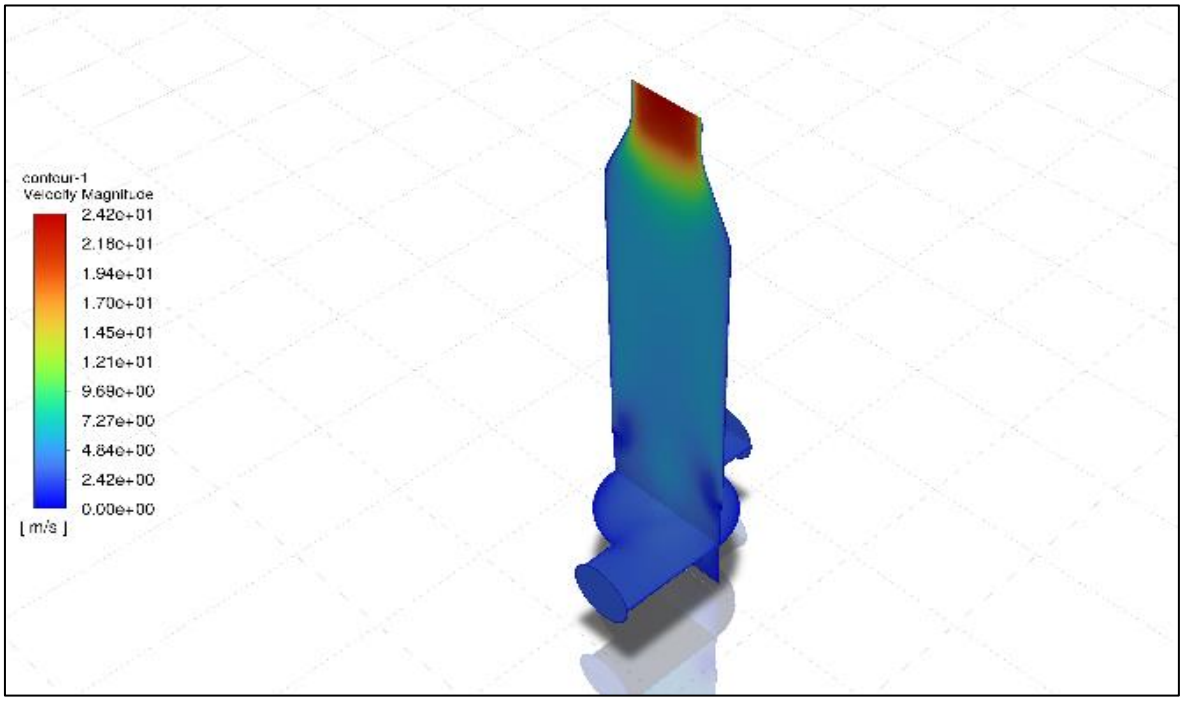
Metan-Hava karışımının girdaplı yakıcıda %40 CO_2 ilavesi ile dağıtılmış yanma tekniği kullanılarak yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, NO_X kütle kesri dağılımı, Metan kütle kesri dağılımı, Oksijen kütle kesri dağılımı ve H_2O kütle kesri dağılımı Şekil 4.33-4.38 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.33'de görüldüğü gibi yakılan metanın yanma odası içerisinde yarattığı sıcaklık değerleri 300 K – 1510 K arasında değişmektedir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum sıcaklık değerinde yaklaşık %28.10 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.34'den de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız değerinin maksimum 26.9 m/s hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum hız değerinde yaklaşık %24.44 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.35'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı görülmektedir. Elde edilen maksimum NO_X kütle kesri $4.0x10^{-7}$'dir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum NO_X kütle kesri değerinde yaklaşık %99.96 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Şekil 4.36'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Metan kütle kesri dağılımı gösterilmiştir. Girdaplı yakıcını giriş bölümündeki kütle kesri dağılımı 1, çıkış bölümündeki kütle kesri dağılımı ise 0 olduğu analiz verileri sonucunda görülmüştür. Bu değerlerden beklenildiği üzere girdaplı fırının yanma odasına gönderilen Metanın tamamının tükendiği anlaşılmaktadır. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki sonuçların paralellik gösterdiği saptanmıştır. Şekil 4.37'den de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri değerinin maksimum 0.138 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum Oksijen kütle kesri değerinde yaklaşık %40 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.38'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı gösterilmektedir. Yanma reaksiyonu sonucu oluşan suyun maksimum kütle kesrinin 0.0726 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum H_2O kütle kesri değerinde yaklaşık %26.32 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

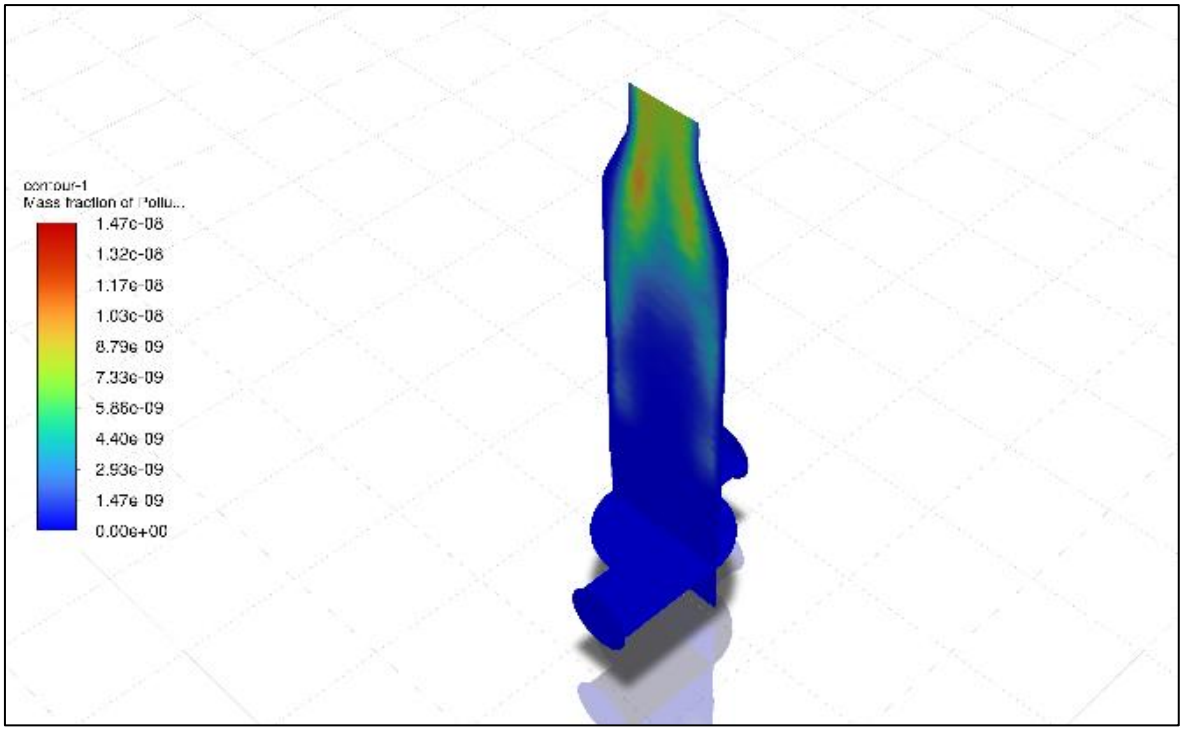
4.3.5. Girdaplı yakıcıda %50 CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması



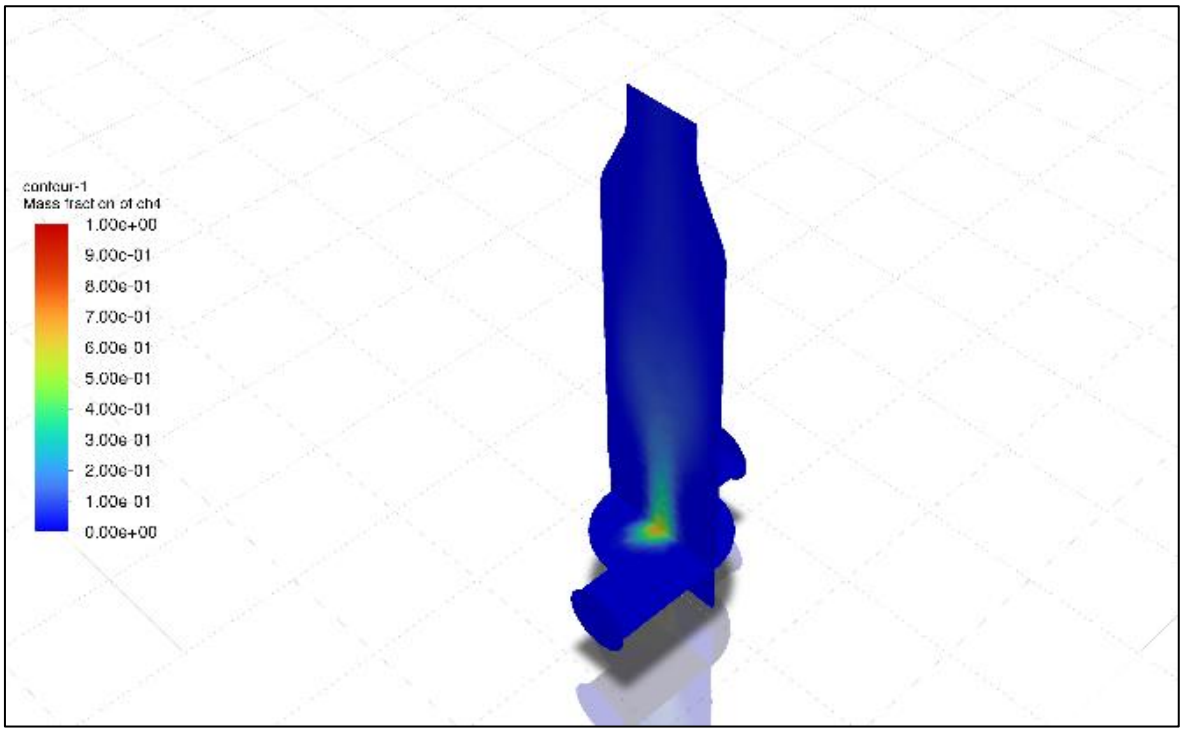
Şekil 4.39. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı



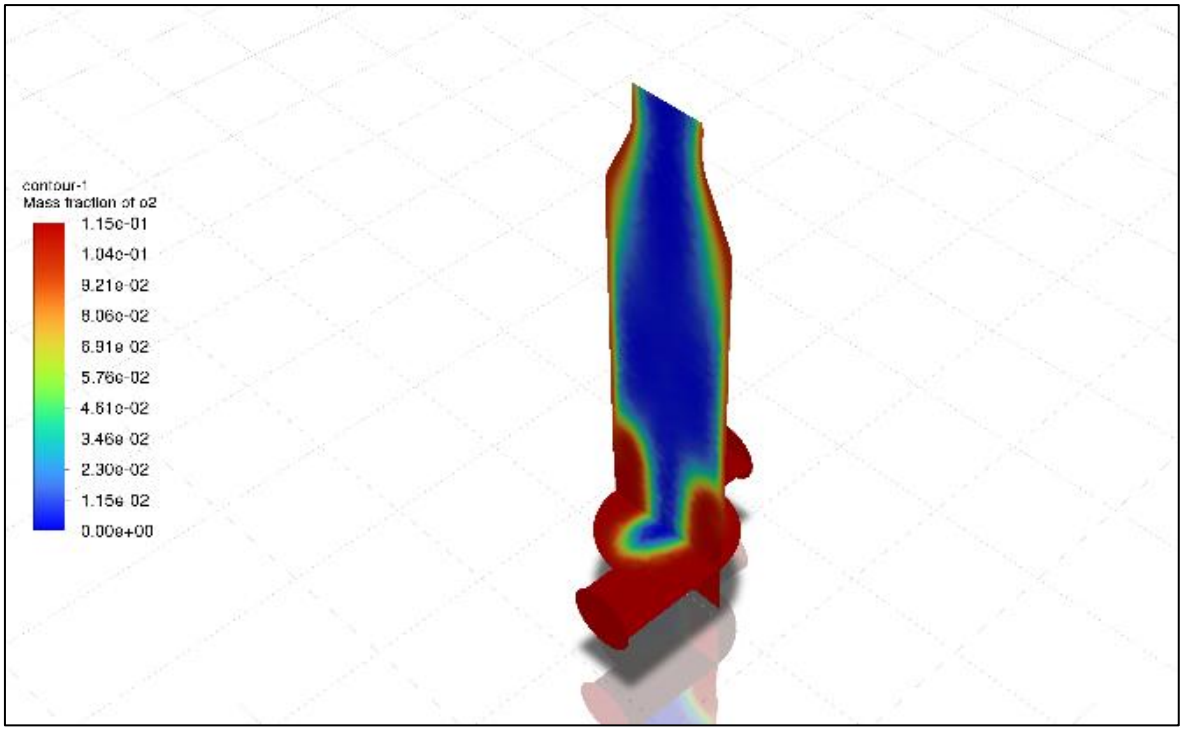
Şekil 4.40. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen hız dağılımı



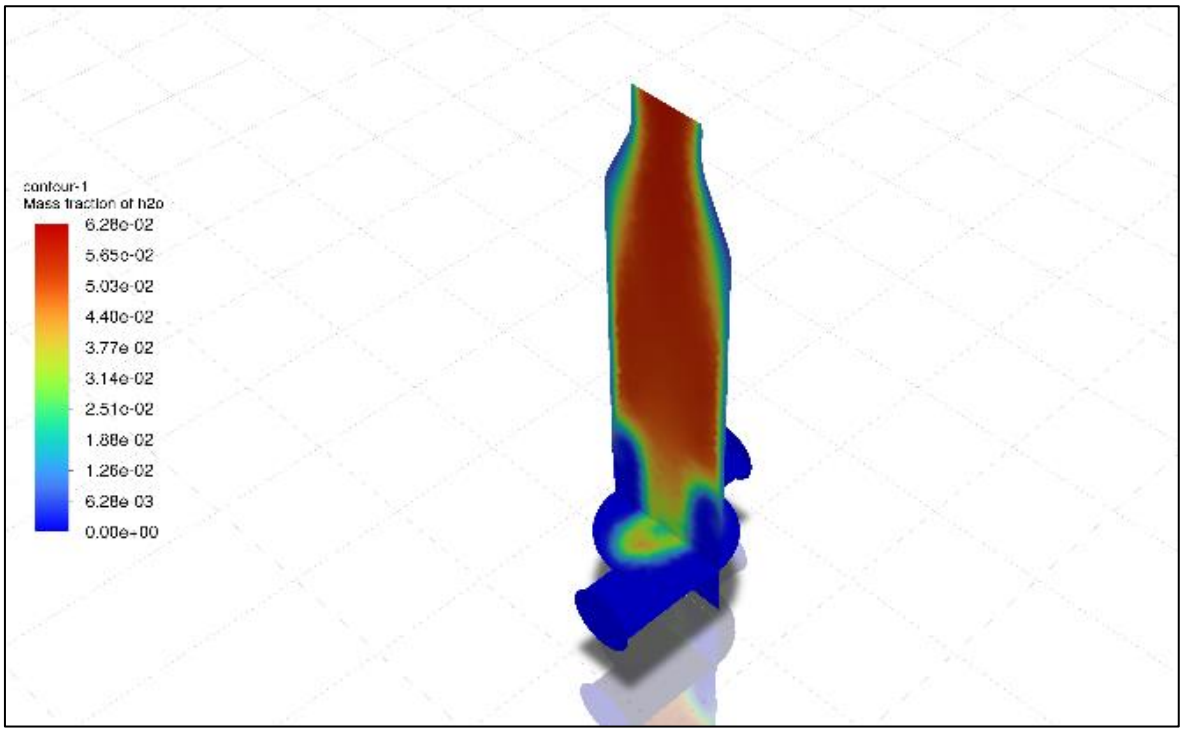
Şekil 4.41. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı



Şekil 4.42. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen metan kütle kesri dağılımı



Şekil 4.43. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen oksijen kütle kesri dağılımı

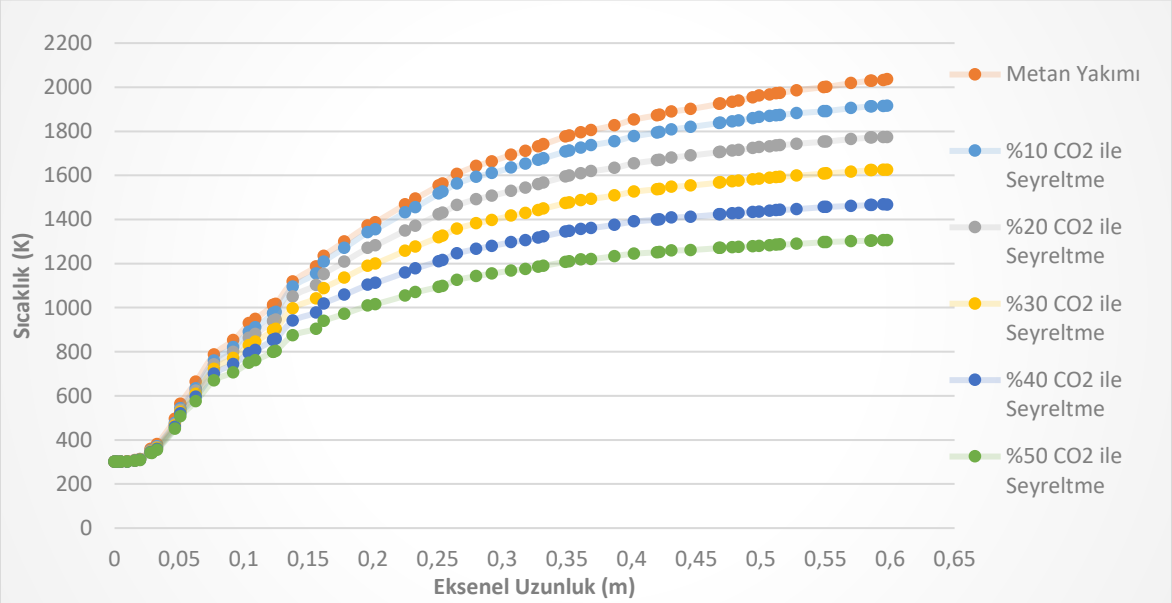


Şekil 4.44. %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı

Metan-Hava karışımının girdaplı yakıcıda %50 CO_2 ilavesi ile dağıtılmış yanma tekniği kullanılarak yakılması sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı, hız dağılımı, NO_X kütle kesri dağılımı, Metan kütle kesri dağılımı, Oksijen kütle kesri dağılımı ve H_2O kütle kesri dağılımı Şekil 4.39-4.44 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.39'da görüldüğü gibi yakılan metanın yanma odası içerisinde yarattığı sıcaklık değerleri 300 K – 1360 K arasında değişmektedir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum sıcaklık değerinde yaklaşık %35.24 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.40'dan de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen hız değerinin maksimum 24.2 m/s hıza ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 ilavesi olmadan yakılan metan ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki maksimum hız değerinde yaklaşık %32.02 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.41'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen NO_X kütle kesri dağılımı görülmektedir. Elde edilen maksimum NO_X kütle kesri $1.47x10^{-8}$'dir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum NO_X kütle kesri değerinde yaklaşık %99.99 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

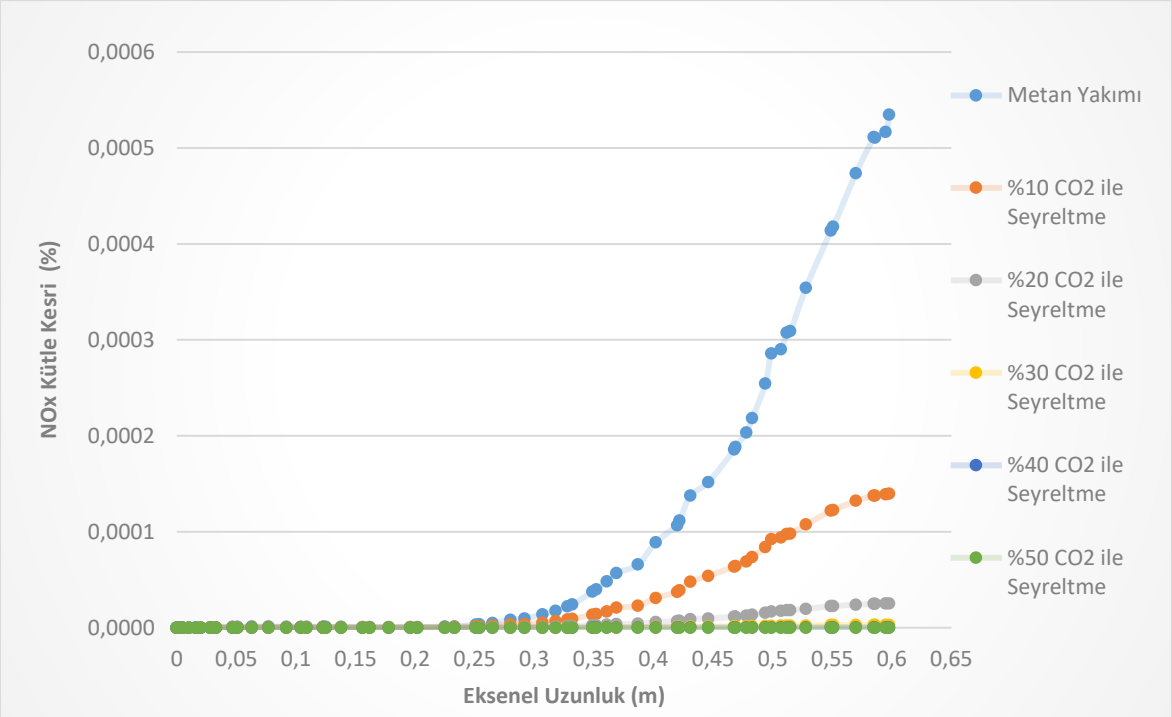
Şekil 4.42'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Metan kütle kesri dağılımı gösterilmiştir. Girdaplı yakıcını giriş bölümündeki kütle kesri dağılımı 1, çıkış bölümündeki kütle kesri dağılımı ise 0 olduğu analiz verileri sonucunda görülmüştür. Bu değerlerden beklenildiği üzere girdaplı fırının yanma odasına gönderilen Metanın tamamının tükendiği anlaşılmaktadır. Bu değer CO_2 ilavesi olmadan yakılan metan ile kıyaslandığında yanma odası içerisindeki sonuçların paralellik gösterdiği saptanmıştır. Şekil 4.43'den de anlaşılacağı gibi Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen Oksijen kütle kesri değerinin maksimum 0.115 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum Oksijen kütle kesri değerinde yaklaşık %50 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.44'de Metan-Hava karışımının yakılması sonucu elde edilen H_2O kütle kesri dağılımı gösterilmektedir. Yanma reaksiyonu sonucu oluşan suyun maksimum kütle kesrinin 0.0628 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer CO_2 seyreltmesi yapılmamış hava-metan yanması ile karşılaştırıldığında yanma odası içerisindeki maksimum H_2O kütle kesri değerinde yaklaşık %44.91 azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir.

4.4. Metan ve (%10-%50) CO_2 Seyreltmesi Yapılmış Hava İle Metan Yanmasının Karşılaştırılması



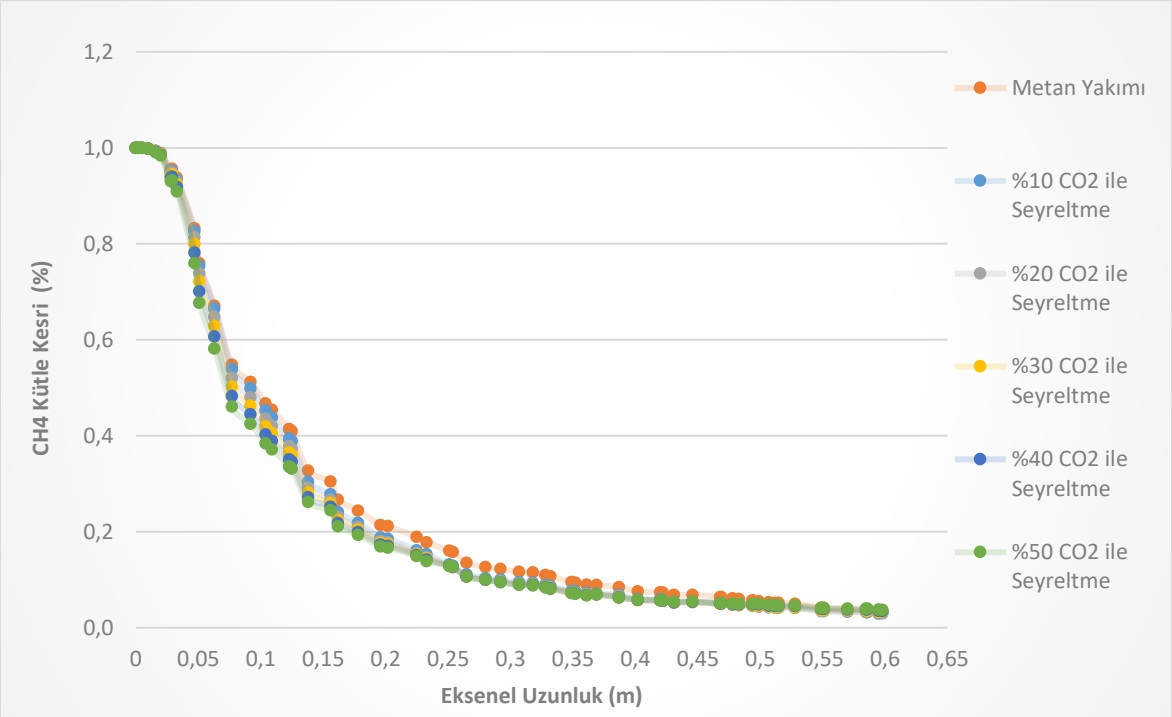
Şekil 4.45. Metan-hava karışımlarında eksenel sıcaklık profili

Şekil 4.45'de metan ve %10-%50 arası CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında modelin merkez noktasından y ekseni boyunca alınan sıcaklık dataları bulunmaktadır. Şekil 4.45'de gösterilen sıcaklık dağılımları incelendiğinde beklenildiği üzere CO_2 ile seyreltme tekniğin yanma odasındaki sıcaklığı düşürüp yanma odasındaki sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca uygulanan tüm yöntemlerde sıcaklık giriş kısmından çıkış kısmına kadar artış göstererek ilerlemiştir. Metan yanmasında maksimum sıcaklık 2035.67 K, %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında 1915.74 K, %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında 1772.58 K, %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında 1624.42 K, %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında 1467.46 K, %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında 1305.87 K'dir. CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması metan-hava yanması ile kıyaslandığında %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %5.89, %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %12.92, %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %20.20, %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %27.91 ve %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %38.85 oranında alev sıcaklığında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.46. Metan-hava karışımlarında eksenel NO_X kütle kesri profili

Şekil 4.46'da metan ve %10-%50 arası CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında modelin merkez noktasından y ekseni boyunca alınan NO_X kütle kesri dataları bulunmaktadır Şekil 4.46'da gösterilen NO_X kütle kesri dağılımları incelendiğinde beklenildiği üzere CO_2 seyreltmesi yapılmış yanma odasındaki NO_X emisyonunu düşürdüğü gözlemlenmiştir. Yanma odasında çıkış bölümüne kadar NOx emisyonunun artarak devam ettiği görülmüştür. Metan-hava yanmasında maksimum NOx emisyonu %0.0005346, %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %0.0001396, %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %0.0000251, %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %0.0000029, %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %0.0000002, %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %0.0000000077'dir. CO_2 ile seyreltilmiş hava ile metan yanması metan-hava yanması ile kıyaslandığında %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %73.88, %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %95.29, %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %99.44, %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %99.96 ve %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %99.99 oranında yanma odasındaki NO_X emisyonunda düşüş olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.47. Metan-hava karışımlarında eksenel metan kütle kesri profili

Şekil 4.47'de metan-hava ve %10-%50 arası CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında modelin merkez noktasından y ekseni boyunca alınan CH_4 kütle kesri dataları bulunmaktadır. Şekil 4.47'de gösterilen CH_4 kütle kesri dağılımları incelendiğinde metanın CO_2 ile seyretme tekniğinde daha hızlı tükendiği gözlemlenmiştir. Metan-hava yanmasında minimum CH_4 kütle kesri %0.0332652, %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında % 0.02945, %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında % 0.0306533, %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında % 0.0325444, %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %0.0347287, %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %0.0368814'dir. CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanması metan-hava yanması ile kıyaslandığında sırasıyla %10 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %11.47, %20 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %7.85, %30 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %2.16, %40 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında, %4.40 ve %50 oranında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasında %10.87 oranında yanma odasındaki metan miktarında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Son yıllarda giderek katılaşan emisyon sınırlamalarına bir çözüm olarak geliştirilen düşük NO_X salınımına sahip yakıcılara olan talepte hızlı bir artış olmuştur. Düşük NO_X salınımlı ve düşük emisyonlu fırınlar/brülörler bu tür kısıtlamalar için umut verici çözümler olmaktadır. Düşük NO_X emisyonlu yakıcılarda en önemli problemlerden birisi yanma kararsızlığıdır. Yapılan bu çalışmada NO_X emisyonunu azaltmak ve yanma kararsızlığını düşürmek amaçlanmıştır. Bu çalışmada daha önce geliştirilmiş [11] girdaplı akış formuna sahip yakıcı/fırının modellenmesi ve sayısal analizi yapılmıştır. Referans alınan çalışma ile bu çalışmada yapılan modelin doğrulaması yapılmıştır. Doğrulaması yapılan modelde yapılan analizler sonucu elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

Metan-hava ve %10-%50 aralığında CO_2 seyreltmesi yapılmış hava ile metan yanmasının, yanma odasındaki sıcaklık sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek sıcaklık metan ile elde edilmiş olup CO_2 ile seyreltme şeklindeki dağıtılmış yanma tekniğinde CO_2 miktarı arttıkça yanma odasındaki sıcaklıklarda düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca dağıtılmış yanma tekniğinin yanma odası içerisinde daha düzgün bir sıcaklık dağılımı oluşmasında fayda sağladığı yapılan analizler sonucunda gözlemlenmiştir. CO_2 ile seyreltme tekniğinin kullanımının asıl hedeflerinden biri NO_X emisyonunun azaltılmasıdır, yapılan analizler sonucu tekniğin amacına ulaştığı gözlemlenmektedir. Metan-hava karışımının yanması sonucu oluşan NO_X salınımını CO_2 ile seyreltme tekniği büyük ölçüde düşürmüştür. Analiz sonucu elde edilen veriler ışığında CO_2 ile seyreltme tekniğinin gün geçtikçe katılaşan emisyon sınırlamalarına çözüm olarak özellikle NO_X emisyonunu büyük ölçüde düşürdüğü için endüstride kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma ışığında önerilebilecek bir çalışma, modellemesi yapılan yakıcı/fırın için farklı yakıt tipleri ve bu yakıtların yanma performansına etkilerinin araştırılmasıdır. Böylelikle CO_2 ile seyreltme tekniği uygulanmış bir girdaplı yakıcı/fırın için hangi yakıtın yanma performansının daha yüksek olduğu, hangi yakıtın NO_X emisyonunun daha düşük olduğu ortaya konulabilecektir.

KAYNAKLAR

1. Heywood, John B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. New York :McGraw-Hill.

2. Ilbas, M. (1997). *Studies of Ultra Low NO_X Burners*, Doktora Tezi, Galler University, Cardiff.

3. Rigas, M. L., Ben-Jebria, A., and Ultman, J. S. (1997). Longitudinal distribution of ozone absorption in the lung: Effects of nitrogen dioxide, sulfur dioxide, and ozone exposures, *Archive of Environmental Health*, 52, 173-178.

4. Colvile, R. N. Hutchinson, E. J. Mindell, J. S., and Warren, R. F. (2001). The transport sector as a source of air pollution, *Atmospheric Environment*, 35, 1537-1565.

5. Ilbas, M., Yilmaz, I. and Kaplan, Y. (2005). Investigation of hydrogen and hydrogen-hydrocarbon composite composite fuel combustion and NO_X emission characteristics in a model combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1139-1147.

6. Normann, F., Andersson. K., Leckner, B., and Johnsson, F. (2009). High-temperature reduction of nitrogen oxides in oxyfuel combustion, *Fuel*, 87(17-18), 3579–3585.

7. Fackler, K. B., Karalus, M. F., Novosselov, I. V., Kramlich, J. C. and Malte, P. C. (2011). Experimental and numerical study of NO_X formation from the lean premixed combustion of CH4 mixed with CO_2 and N_2, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133, 121502, 1-7.

8. Lee, M., C., Seo, S., B., Yoon, J., Kim, M., and Yoon, Y. (2012). Experimental Study on the Effect of N2, CO_2 and Steam Dilution on the Combustion Performance of H2 and CO Synthetic Gas in an Industrial Gas Turbine, *Fuel*, 102, 431-438.

9. Li, P., Wang, F., Mi, J., Dally, B. B., Mei, Z., Zhang, J., and Parente, A. (2014). Mechanisms of NO formation in MILD combustion of CH4/H2 fuel blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(33), 19187–19203.

10. Li YH, Chen CH, and Ilbas M. (2020). Effect of Diluent Addition on Combustion Characteristics of Methane/Nitrous Oxide Inverse Tri-Coflow Diffusion Flames. *Combustion science and technology*, 1-21.

11. Froud, D., Beale, A., O'Doherty, T. and Syred, N. (1996). Studies of Helmholtz resonance in a swirl burner/furnace system. *Proceedings of the Combustion Institute* 26 (2), 3355-3362.

12. Tekin, A. (2011). *Enerji üretimi ve kullanımın çevreye olan etkileri üzerine bir araştırma,* Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 36-38.

13. İnternet: International Energy Agency Web Sitesi URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ac80b701-bdfc-48cfac4c00e60e1246a0/weo2009.pdf , Son Erişim Tarihi: 05.12.2021

14. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2007). Çevre ve Şehircilik Bakanlığının Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) Alanında Kapasitesinin Güçlendirilmesi için Teknik Yardım Projesi (5).

15. Galip, AKIN. (2017). Küresel ısınma, nedenleri ve sonuçları. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 46(2).

16. Yanık, E. (2017). *Model bir yanma odasında oksijence zenginleştirilmiş yanmanın sayısal olarak incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

17. Karyeyen, S. (2013). *Model bir gaz türbini yanma odasında kömür gazları yanma davranışının sayısal analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

18. İnternet: Green Peace Web Sitesi URL: https://wayback.archive-it.org/9650/20200417113741/http://p3raw.greenpeace.org/turkey/Global/turkey/report/2019/Kuresel-SO2-emisyonlarinda-sicak-nokta-veri-tabani.pdf, Son Erişim Tarihi: 05.12.2021.

19. DeSoete, G. G. (1975). Overall Reaction Rates of NO and N2 Formation from Fuel Nitrogen, 15 th Symposium (International) on Combustion, *The Combustion Institute*, 1093-1102 .

20. Prigent, M., De Soete, G., and Doziere, R. (1991). The effect of aging on nitrous oxide N2O formation by automotive three-way catalysts. In *Studies in Surface Science and Catalysis*, 71, 425-436.

21. Dupont, V., Pourkashanian, M., Williams, A., and Woolley, R. (1993). The reduction of NO_X formation in natural gas burner flames. *Fuel*, *72*(4), 497-503.

22. Chasek, P. S., and Downie, D. L. (2020). *Global environmental politics*. Routledge. New York.

23. Atımtay A., Bayram H., Can A., Çımrın A. H., Demiral B., Elçi M. A., Emri S., Ertaş S., Evyapan F., Güllü G., Karaca M., Karlıkaya C., Öztürk B., Sofuoğlu S., Şahin M., Tecer L. H., ve Yüksel H. (2010). *Türkiye'nin Hava Kirliliği ve İklim Değişikliği Sorunlarına Sağlık Açısından Yaklaşım*, Sağlık Bakanlığı, Ankara

24. Han, X., and Naeher, L. P. (2006). A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. *Environment international*, 32(1), 106-120.

25. Saraçoğlu, H. (2010). İzmir Limanına Gelen Gemilerin Oluşturduğu Egzoz Gazı Emisyonlarının İncelenmesi ve Çevresel Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 79.

26. Ün, Ü. T. (2014). Doğal kaynaklar ve çevre kirliliği. Öğütveren, Ü.B. (Ed.) Çevre Sorunları ve Politikaları. Anadolu Üniversitesi Yayını No: 2554, Açıköğretim Fakültesi Yayını No: 1524, 44–64.

27. Bayram, H., Dörtbudak, Z., Fişekçi, F. E., Kargın, M., ve Bülbül, B. (2006). Hava Kirliliğinin İnsan Sağlığına Etkileri, Dünyada, Ülkemizde ve Bölgemizde Hava Kirliliği Sorunu, *Dicle Tıp Dergisi*, 33(2), 105-112.

28. Soysal, A. ve Demiral, Y. (2007). Kapalı Ortam Hava Kirliliği. *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, 6(3), 221-226.

29. Reşitoğlu, İ. A. (2018). Dizel Motorlarda Yanma Sonucu Oluşan NO_X Emisyonları ve SCR Teknolojisi. 14th International Combustion Sysmposium (INCOS2018), 212-216.

30. İnternet: Meteoroloji Genel Müdürlüğü Web Sitesi URL: https://mgm.gov.tr/genel/sss.aspx?s=atmosfer, Son Erişim Tarihi: 05.12.2021

31. Chasek, P. S., Downie, D. L., and Brown, J. W. (2018). *Global environmental politics*. Routledge.

32. Ayşe, A., and Zeren, F. (2011). CO_2 emisyonu ve ekonomik büyüme: Panel veri analizi. Yönetim ve Ekonomi: Celal Bayar Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 18(2), 37-47.

33. Olivier, J. G., Peters, J. A., and Janssens-Maenhout, G. (2012). Trends in global CO_2 emissions. 2012 report. *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*. Netherlands, 1-39.

34. Uğurluoğlu, E., 2007. *Doğal Gaz Yakılan Bir Ocakta Katı Yüzeyin Emisyon ve Verim Üzerine Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 29-30

35. Tezcan, A., Atılgan, A. ve Öz, H. (2011). Seralarda Karbondioksit Düzeyi, Karbondioksit Gübrelemesi ve Olası Etkileri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 6 (1), 44-51.

36. Andrews, J., and Jelley, N.A. (2007). Energy Science: Principles, Technologies, and Impacts, Secon Edition, Oxford University Press, United Kingdom, 1-319.

37. Beer, J. M., and Chigier, N. A. (1972). *Combustion aerodynamics*. Applied Science Publishers, London, 1-264.

38. Hirschel, E. (1996). Vortex flows-Some general properties, and modelling, configurational and manipulation aspects. Presented in 14th Applied Aerodynamics Conference, New Orleans, LA, U.S.A., 1106.

39. Adnan Menderes Üniversitesi (2015). Jeotermal Enerjinin Çevresel Etkileri. *Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi Yayınları* 1, 1-18.

40. İlbaş, M., O'doherty T., Bowen P., and Syred N. (1995). Evaluation of the Effectiveness of a NO_X Post-Processor in Predicting the Natural Gas Fired Cyclone and Swirl Combustors, Presesnted in *3rd International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment*, Portugal.



GAZİ GELECEKTİR..