
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

# SEYRELTİCİ TİPİNİN HİDROJEN/METAN/HAVA KARIŞIMININ RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA YANMA VE EMİSYON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

**Wamed Saleh Al-RIKABI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KİMYA ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2025**

## 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.

Wamed Saleh Al-RIKABI

28/01/2025

# SEYRELTİCİ TİPİNİN HİDROJEN/METAN/HAVA KARIŞIMININ RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA YANMA VE EMİSYON ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Wamed Saleh Al-RIKABI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2025

## ÖZET

Bu çalışmada, metan/hava karışımına H2 eklendikten sonra, renksiz dağıtılmış yanma (CDC) koşullarında N2, CO2, He ve Ar gibi seyrelticiler eklenerek metan/hava karışımının yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkisine odaklanılmıştır. Bu nedenle tez kapsamında; yanma odasındaki sıcaklık dağılımı, alev yapısı ve kirletici emisyonları sayısal olarak incelenmiştir. Yanmayı modellemede uygun seyrelticiyi bulmak amacıyla ticari Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yanmayı simüle etmek için çalışmada türlerin taşınması modeli (species transport model) seçilmiştir. K-epsilon türbülans ve p-1 radyasyon gibi matematiksel modellemeler ile de sonuçlar değerlendirilmiştir. CDC yöntemi, seçilen seyrelticilerin oksitleyiciye kademeli olarak eklenmesiyle oksitleyicideki $O_2$ konsantrasyonunun azaltılmasıyla uygulanmıştır. Tüm seyrelticilerin kullanıldığı modellemelerde daha düşük sıcaklıklar, daha tutarlı alevler ve daha düşük NOx emisyonları elde edilmiştir. Karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO2) gibi kirleticiler için kullanılan He ve Ar seyrelticileri her iki yakıtta da bu kirleticilerin emisyonlarını azaltmada olumlu sonuçlar göstermiştir. N2 eklendiğinde ise CO2 emisyonları azalmış, ancak CO emisyonları artmıştır. CH4 yakıtına H2 eklenmesi sıcaklık ve NOx emisyonlarını arttırmasına rağmen, CDC yöntemi özellikle He ve Ar kullanıldığında sıcaklığı ve kirleticileri azaltmada başarılı olmuştur. Çalışmanın sonucu, CDC yönteminin fırınlarda ve yanma odalarındaki mevcut yanma sistemlerinde başarıyla kullanılabileceğini göstermiştir. CDC yöntemi ile yakıta H2 eklenmesiyle birlikte sıcaklık ve NOx artışlarının bastırılabileceği, bunun da gaz türbinleri uygulamalarında yararlı olabileceği düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 20106
Anahtar Kelimeler : CDC, Yakıt ilavesi, seyreltici türü, sıcaklık alanı, kirletici emisyonları.
Sayfa Adedi : 79
Danışman : Doç. Dr. Ertan YİLDİRİM
İkinci Danışman : Prof. Dr. Serhat KARYEYEN

# INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DILUTANT TYPE ON COMBUSTION AND EMISSION CHARACTERISTICS OF HYDROGEN/METHANE/AIR MIXTURE UNDER COLORLESS DISTRIBUTED COMBUSTION CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Wamed Saleh Al-RIKABI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2024

## ABSTRACT

In this study, after H2 is added to methane/air fuel, diluents such as N2, CO2, He and Ar are added under colorless distributed combustion (CDC) conditions and the effect of methane/air fuel mixture on combustion and emission characteristics is focused on. Therefore, within the scope of the thesis; temperature distribution in the combustion chamber, flame uniformity and pollutant emissions are numerically investigated. In order to find the appropriate diluent in combustion modeling, commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) code is used. Species transport model is selected in the study to simulate combustion. The results are also evaluated with mathematical models such as K-epsilon turbulence and p-1 radiation. CDC method is applied by gradually adding the selected diluents to the oxidizer and keeping the $O_2$ concentration in the oxidizer constant for each fuel separately. Lower temperatures, more consistent flames and lower NOx emissions are obtained in the models where all diluents are used. He and Ar diluents used for pollutants such as carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO2) have shown positive results in reducing the emissions of these pollutants in both fuels. When N2 was added, CO2 emissions decreased, but CO emissions increased. Although the addition of H2 to CH4 fuel increased temperature and NOx emissions, the CDC method was successful in reducing temperature and pollutants, especially when He and Ar were used. The results of the study showed that the CDC method can be used in furnaces and combustion chambers. It is thought that the temperature and NOx increases can be suppressed with the addition of H2 to the fuel with the CDC method, and this can be useful in gas turbines.

Bilim Kodu : 20106
Anahtar Kelimeler : CDC, Fuel addition, diluent type, temperature field, pollutant emissions.
Sayfa Adedi : 79
Danışman : Assoc. Prof. Dr. Ertan YİLDİRİM
İkinci Danışman : Prof. Dr. Serhat KARYEYEN

# TEŞEKKÜR

Öncelikle sayın hocam ve akademik danışmanım olan Doç. Dr. Ertan YİLDİRİM'e bu tezin başarılı ve eksiksiz olması için yaptığı her şey için, tezi tamamlamam, tezde ve çalışmada karşılaştığım tüm zorlukların üstesinden gelmem için harcadığı değerli zamanı için teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının önerilmesinde, modelleme konusunda engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım ve yoğunluğuna rağmen tezin her aşamasında destek olan tez eş danışmanım sayın Prof. Dr. Serhat KARYEYEN'e verdiği bilgiler için teşekkür ederim. Özellikle tezin son aşamalarında çok kritik süreçlerde modelleme konusunda destek olan sayın Dr. Ozan KEKÜL'e verdiği bilgilerden dolayı teşekkür ediyorum.

Gazi Üniversitesi'nde öğrenimim süresince aldığım derslerdeki görevli öğretim üyelerine ve dil kursunda destek olan tüm hocalarıma, gösterdikleri incelikli ve nazik muameleden dolayı en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu çalışmada benimle birlikte çok çalışan ve çoğu zaman ayrı kaldığım sevgili eşim, tüm kalbimle teşekkür ediyor ve birlikte güzel bir gelecek inşa etmeyi temenni ediyorum.

Gazi Üniversitesinde geçirdiğim zaman boyunca çocuklarımdan ayır kalmam sebebiyle, çocuklarımın göstermiş olduğu fedakârlıklar için çok teşekkür ediyorum. Hayatlarında başarılar diliyorum.

Bu tez çalışmasından önce vefat eden ancak kalbimde her zaman yaşayan annem ve babama bana olan beni yetiştirdikleri için minnettar olduğumu, nezaketlerini ve fedakârlıklarını asla unutmayacağım.

Yüksek lisansımı tamamlamam için beni Türkiye'ye, özellikle Gazi Üniversitesi'ne gönderen çalıştığım Güney Elektrik Dağıtım Genel Şirketi'ne teşekkür ederim. Irak'a döndüğümde şirketime ve ülkeme hizmet etmeyi umuyorum.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv

ABSTRACT ..... v

TEŞEKKÜR ..... vi

İÇİNDEKLER ..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ..... x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... xi

GRAFİKLERİN LİSTESİ .....

SİMGELER VE KISAL TMALAR ..... xiii

1.GİRİŞ ..... 1

2. YAKIT, YANMA VE YANMA SONUÇLARI ARASINDAKİ İLİŞKİ.. 9

2.1. Yakıt ..... 9

2.1.1. Katı yakıt ..... 9

2.1.2. Sıvı yakıt ..... 9

2.1.3. Gaz yakıt ..... 10

2.2. Metan ve Hidrojen ..... 11

2.2.1. Metan ..... 11

2.2.2. Hidrojen ..... 11

2.3. Yanma ..... 12

2.4. Reaksiyon kinetiği ..... 14

2.5. Hava kirliliği ve emisyon ..... 15

2.5.1.Termal $NO_X$ oluşum mekanizması ..... 15

2.5.2. Ani $NO_X$ oluşum mekanizması ..... 16

2.5.3. Yakıtlarda $NO_X$ oluşum mekanizması ..... 16

2.5.4. Karbon monoksit (CO) oluşumu ..... 17

2.5.5. Karbondioksit ($CO_2$) oluşumu ..... 17

**Sayfa**

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ..... 19
3.1. CFD kodunun yetenekleri ve avantajları ..... 19
3.2. CFD Bileşenleri ..... 20
3.3. Temel Denklem ..... 21
3.3.1. Kütlenin korunumu ..... 21
3.3.2. Momentumun Korunumu ..... 22
3.3.3. Enerjinin Korunumu ..... 22
3.3.4. Standart K-ε ..... 23
3.3.5. Eddy dissipation concept (EDC) modeli ..... 24
3.3.6. Sınır koşullarının belirlenmesi ..... 25
3.3.7. Ansys fluent programı ..... 25
4. MATERYAL VE METOT ..... 27
4.1. Simülasyon ..... 27
4.2. Yanma sistemi ve modelleme parametreleri ..... 30
4.2.1. Sayısal model ..... 31
4.2.2. Ağ yapısından bağımsızlaştırma ..... 32
4.3. Seyrelticiler ..... 32
4.3.1. Karbondioksit ..... 32
4.3.2. Azot ..... 33
4.3.3. Helyum ..... 33
4.3.4. Argon ..... 33
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA ..... 35
5.1. Metan/hava karışımı için modelleme sonuçları ..... 35
5.1.1. Isıl alan karakteristikleri ..... 35
5.1.2. Emisyon karakteristikleri ..... 44
5.2. $H_2$/$CH_4$/hava karışımı için modelleme sonuçları ..... 51

**Sayfa**

5.2.1. Sıcaklık ..... 52

6. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 71

6.1. Sonuçlar ..... 71

6.2. Öneriler ..... 72

KAYNAKÇA ..... 73

ÖZGEÇMİŞ ..... 79

# ÇİZELGELERİN LİSTESİ

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 2.1. Yakıt sınıflandırması ..... 9

Çizelge 3.1. Standart k-Ɛ türbülans modelinde kullanılan Sabitle ..... 24

Çizelge 4.1. %$O_2$ değişimiyle $N_2$ ve oksitleyici konsantrasyonundaki değişimi ..... 29

Çizegle 4.2. Oksijen derişimi değişimiyle oksitleyicideki $CO_2$, Ar ve He kütle miktarları ..... 30

Çizegle 4.3. Yanma odasının çalışma koşulları ..... 31

# ŞEKİLLERİN LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.1. Petrolden elde edilen ürünlerin yüzdelik dağılımı. ..... 10

Şekil 4.1. Yanma odasının fiziksel alanı ..... 30

Şekil 4.2. Üç farklı ağ değerinde eksenel sıcaklıkların dağılımı..... 32

Şekil 5.1. Seyreltici türüne göre (Şekil 5.1.a. $N_2$, Şekil 5.1.b. $CO_2$, Şekil 5.1.c. He ve Şekil 5.1.d. Ar) uygulanan CDC'nin eksenel sıcaklık profili üzerindeki etkisi. ..... 36

Şekil 5.2. 0,1 m radyal eksende seyreltici ile uygulanan CDC'nin etkisi, sıcaklık profili ( a) $N_2$, b)$CO_2$ , c) He ve d) Ar Seyreltici) ..... 37

Şekil 5.3. 0,5 m eksenel radyalde ($N_2$, $CO_2$, He ve Ar seyreltici) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık etkisi ..... 39

Şekil 5.4. 0,85 m eksenelde radyalde ($N_2$, $CO_2$, He ve Ar seyreltici) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık profili ..... 40

Şekil 5.5. a CDC ile yapılan modelleme sonucunda elde edilen sıcaklık eğrileri (a. sol $N_2$ seyreltici ve sağ $CO_2$ seyreltici, b. sol He seyreltici ve sağ Ar seyreltici ). ..... 42

Şekil 5.6. b CDC ile yapılan modelleme sonucunda elde edilen sıcaklık eğrileri (a. sol $N_2$ seyreltici ve sağ $CO_2$ seyreltici, b. sol He seyreltici ve sağ Ar seyreltici ). ..... 43

Şekil 5.7. %23 $O_2$'de $NO_X$ emisyonları ..... 45

Şekil 5.8. Yüksek NOx derişimlerinde farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi. ..... 46

Şekil 5.9. Düşük NOx derişimlerinde farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi. ..... 47

Şekil 5.10. CDC ile CO emisyonu için ile farklı seyrelticilerin (a. $N_2$, b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi. ..... 49

Şekil 5.11. $CO_2$ emisyonu için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ ,b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi. ..... 51

Şekil 5.12. a. $H_2$'nin $CH_4$'e eklenmesinden sonra eksenel koordinatlardaki sıcaklık değişimini b. $H_2$'nin $CH_4$'e eklenmesinden sonra eksenel koordinatlarda $NO_X$ emisyonlarındaki değişimi. ..... 52

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 5.13. %30$H_2$+%70 $CH_4$ (Hacimsel) karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi ..... 54

Şekil 5.14. 0,1 m radyal eksenelde %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi ..... 55

Şekil 5.15. 0,5 m radyal eksenelde %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi ..... 57

Şekil 5.16. 0,85 m radyal eksenelde %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi ..... 59

Şekil 5.17. a %30$H_2$+%70$CH_4$ karışımı için CDC uygulanması sonucunda oluşan sıcaklık eğrileri (a. sol $N_2$ seyreltici ve sağ $CO_2$ seyreltici, b. sol He ve sağ Ar, ). ..... 61

Şekil 5.18. b %30$H_2$+%70$CH_4$ karışımı için CDC uygulanması sonucunda oluşan sıcaklık eğrileri (a. sol $N_2$ seyreltici ve sağ $CO_2$ seyreltici, b. sol He ve sağ Ar, ). ..... 62

Şekil 5.19. $H_2$ eklenmeden önce $NO_X$ emisyonu (CDC) ..... 64

Şekil 5.20. Yüksek $O_2$ derişimlerinde %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon fprofilleri ..... 64

Şekil 5.21. Düşük $O_2$ derişimlerinde %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profilleri ..... 66

Şekil 5.22. %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin CO emisyon profilleri ..... 68

Şekil 5.23. %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $CO_2$ emisyon profilleri ..... 70

# SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| **A** | Arrhenius faktörü |
| **a** | Termal difüzyon |
| **C** | Karbon |
| **CH4** | Metan |
| **CO** | Karbon monoksit |
| **CO2** | Karbon dioksit |
| **d** | Yanma reaksiyon bölge uzunluğu |
| **E** | Aktivasyon enerjisi |
| **F** | Kuvvet |
| **H** | Entalpi |
| **H2** | Hidrojen molekülü |
| **H2O** | Su buharı molekülü |
| **k** | Reaksiyon hız sabiti |
| **K** | Kelvin |
| **Kj** | Kilojoule |
| **Kg** | Kilogram |
| **Kmol** | Kilomol |
| **kW** | Kilowatt |
| **m** | Metre |
| **m** | Kütle |
| **N2** | Azot molekülü |
| **NO** | Azot monoksit |
| **NOx** | Azot oksit |
| **$NO_2$** | Azot dioksit |
| **$NO_3$** | Azot trioksit |
| **CDC** | Colorless distributed combustion |
| **CFD** | Computational fluid Dynamics |

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| **EDC** | Eddy dissipation conc |
| **$N_2O$** | Diazot oksit |
| **$N_2O_3$** | Diazot trioksit |
| **$N_2O_4$** | Diazot tetraoksit |
| **$N_2O_5$** | Diazot pentaoksit |
| **$O_2$** | Oksijen molekülü |
| **OH** | Hidroksil |
| **PPm** | Parts per million |
| ***P*** | Yoğunluk |
| **P** | Basınç |
| **R** | Universal gaz sabiti |
| **S** | Türbülans gerilim altındaki deformasyon |
| **T** | Sıcaklık |
| **U** | İç enerji |
| **u** | Hız |
| **V** | Hacim |
| **W** | Hız |
| **Q** | Isı transferi |
| **°C** | Santigrad derece |
| **Ø** | Eşdeğerlik oranı |

# 1. GİRİŞ

Yaşamın sürdürülmesi ve geliştirilmesi için enerji kaynaklarına ihtiyaç vardır. Dünyadaki popülasyon arttıkça ve yaşamdaki sorunlar oldukça yakıt, ısınma ve diğer insani ihtiyaçlarının karşılanmasında enerji talebi günden güne artmaktadır. Dünyadaki enerji kaynaklarının büyük bir kısmı fosil yakıt kaynaklıdır. Fosil yakıtların enerji alanında kullanılması ile günümüzde iki önemli sorun göze çarpmaktadır. Bu sorunlardan birincisi fosil yakıtların kullanımı sonucunda oluşan kirleticilerin çevre ve insanlar başta olmak üzere genel olarak yaşam üzerindeki olumsuz etkisidir. İkinci sorun ise enerjiye olan ihtiyacın artması ile birlikte enerji kaynaklarının tükenmesidir [1]. Bu iki önemli soruna çözüm getirebilmek için fosil yakıt kullanımının kısa ve uzun vadeli etkileri araştırılmalıdır. Kısa vadede oluşacak olumsuz etkilerin başında küresel ısınma, toprak ve çevre kirliliğidir. Ancak uzun vadeli etkilerde ise dünya üzerindeki kaynakların tamama tükenmesi ile kuraklık, çölleşme, seller ve asit yağmuru gibi daha ciddi sorunlar ortaya çıkabilir [2].

Fosil yakıtların kullanımı sırasında önem arz eden durumlardan biri de yakıt türüdür. Fosil yakıtlar katı ve sıvı yakıtlar olmak üzere başlıca iki türdür. Ancak yanma sistemlerinin gelişmesi ile gaz yakıtlarının kullanımı katı ve sıvı yakıtlara göre daha kolay olmasından dolayı tercih edilmektedir. Aynı zamanda yanma sonucunda oluşacak kirleticilerin en az seviyede olması için gaz yakıtlarının kullanılmasının çevre hassasiyeti açısında daha uygun olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Gaz yakıtların özellikle doğal gaz kullanımı günümüzde en sık kullanılan diğer yakıt türlerine göre daha çevreci olarak göze çarpmaktadır [3]. Özellikle çevresel kısıtlamaların oluşturduğu sorunlar nedeniyle bilim insanları ve araştırmacılar yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Ancak dünyada kullanılan enerji ihtiyaçlarının çoğu fosil yakıtlarla karşılanmaktadır hatta bazı araştırmalar enerji ihtiyacının %85'ten fazlasının fosil yakıtlarla sağlandığını göstermektedir [4].

Yukarıda açıkladığımız gibi, fosil yakıtlardan elde edilen mevcut enerjinin özellikle doğal gazın kullanılmasının günümüzde çok önemli olduğu açıktır. Kirliliği azaltmak için yakıtta bulunan karbon varlığının azaltılması önem arz etmektedir. Bu nedenle, yakıttaki karbon yüzdesini azaltmak ve $CO_2$ oluşumunu düşürmek için metan yakıtına belirli oranlarda yenilenebilir enerji kaynaklarından olan $H_2$ eklenmesi yapılmalıdır. Bu tez kapsamında kirliliği azaltmak üzere ve $CO_2$ miktarının en aza düşürmek için modelleme çalışmaları

yapılmıştır. Modelleme çalışmalarında araştırmacıların sıklıkla tercih ettiği akışkan akışı, ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar vb. analizleri yapabilen ticari CFD kodu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada modellenen yanma odası, özellikle Ansys Fluent olmak üzere ticari CFD programı kullanılarak tasarlanmıştır. Modellemelerde kullanılan brülör, biri hava akışı ve diğeri yakıt akışı için olmak üzere iki bölüme sahip olmakla birlikte, oksitleyici ve yakıt giriş sıcaklıkları 295 K olarak belirlenmiştir. Yanma odası modellemesi önceki deneylerden ve araştırmalarda belirlenen yanma parametreleri ile Eddy dissipation yanma modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Modellemelerde Standard k-epsilon ve P1 radyasyon modelleri kullanılmıştır.

Tez çalışması kapsamında, azot oksitlerdeki azalma ve daha düşük karbon kirletici emisyonları elde etmek için renksiz dağıtılmış yanma (CDC) koşulları altında metan alevi (doğal gazın ana bileşeni) modellemesi üzerine çalışmalar yapıldı. Ansys Fluent yazılımı, metan alevi modelleme etmenin yanı sıra her ortamdaki sıcaklığı ve ilgili türleri tahmin etmede yardımcı olurken azot oksit, karbondioksit ve diğer kirleticilerin emisyonlarını azaltmak için çeşitli stratejiler geliştirmeyi sağlamıştır. Bu stratejilerden biri olan CDC yöntemi ile kirleticiler ve NOx, $CO_2$, CO için azalma sağlamak adına modellemeler yapılmıştır. Yanma odasına seyrelticilerin eklenmesiyle normal havadan daha düşük $O_2$ derişimleri için seyreltici etkisi araştırıldı.

Literatür taraması

Bu tez çalışması kapsamında konu ile ilgili detaylı bir literatür taraması yapılmış olup, elde edilen araştırma sonuçları aşağıda sunulmuştur.

Karyeyen ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada yanma odası 300 K giriş sıcaklığında renksiz dağıtılmış yanma koşullarının uygulandığı hidrojen açısından zengin yakıtların kullanıldığı bir araştırma yapmışlardır [5]. Bu araştırmada; Renksiz dağıtılmış yanma modelinin OH* görüntülerinin kirletici olarak kullanılan $NO_X$ ve CO emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Karışıma seyrelticiler eklendikten sonra OH* ve $NO_X$ seviyelerinin önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada, üç farklı yakıt türünü incelemiş ve seyreltici olarak $CO_2$-$N_2$ kullanmışlardır.

Salem tarafından yapılan bir modelleme çalışmasında, çok bileşenli yakıtların karışık yanma koşulları incelenmiştir. Çok bileşenli yakıtlar olan $CH_4$, $H_2$ ve CO içeren yakıtlar için yanma reaksiyonları 2, 5 ve 10'luk adımlarla oluşturulmuştur. Sonuçlar, reaksiyon adımı sayısının artmasıyla maksimum sıcaklıkta bir azalma olduğunu göstermiştir. Çalışmada Chemkin kodu kullanılmış olup, tek boyutlu Ckemkin kodu analizlerinde yakıtın molar seviyeleri ve yanma sonucu değişen ürünler gösterilmiştir. Laminer alev hızı analizinde ise $CH_4$ ve $H_2$ yakıtları karıştırılmıştır. $CH_4$ ve $H_2$'den oluşan yakıt farklı oranlarda tüketilmiştir. Sayısal analiz, oksitleyici olarak kullanılan hava miktarı değiştirilerek devam ettiğinden yakıttaki $H_2$ oranının artmasıyla alevin patladığı ve hızın da artarak eşdeğer yanma koşulları altında en yüksek seviyeye ulaştığı gösterilmiştir [6].

Ortiz ve arkadaşları ise yaptıkları model ve deneysel çalışmada, metan yakıtı kısmen karışımlı bir yakıcı yakılmış, kirleticilerin sıcaklık ve CO emisyon değerlerini incelemişlerdir. Deney düzeneğinde alev su içeren bir kap ile temas ettirilmiş, sayısal analizde elde edilen radyal sıcaklık verileri ile deneysel veriler incelenmiş, brülörden gönderilen taze gaz akışının yönü ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Gaz akışının 10 mm hareket etmesine rağmen ön karışımlı alevin yapısından dolayı sıcaklığın azaldığı, sürüklenme bölgesinin oluşturduğu koni nedeniyle alev hızı açısından karşılaştırıldığında k-omega türbülans modelinin sonuçlarının verilere daha çok benzediği görülmüştür. Yanma bölgesine gönderilen yakıt miktarının artırılması ile tarama işleminin hızın etkisiyle arttığı böylece soğuk koni alanının genişlediği ve CO emisyon seviyesinin de arttığı tespit edilmiştir. Yakıcı çıkışının kesit alanı ve yakıt akış hızı değiştirilerek termal verim araştırılmış, maksimum termal verimin yaklaşık 350-400 W olduğu belirtilmiştir [7].

Al-Bash ve Wilms (2010), $H_2$ ve $CH_4$ alevleri üzerinde bir simülasyon gerçekleştirerek sayısal ve deneysel ölçüm sonuçlarını karşılaştırarak model sabitini belirlemişlerdir. Çalışmada girdap ayırma model sabitinin 1 veya 4 olması karşılaştırması yapılmıştır (%70 $CH_4$ - %30 $H_2$ yakıt karışımı için). 40 kW'lık bir termal güçte %20 daha fazla hava kullanılarak yanma koşulları incelenmiştir. Model sabitinin 1 olarak alındığı belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar ile sayısal çalışma sonuçları birbirine yakın çıkmıştır. Kullanılan üç yakıt türü ($H_2$, $C_3H_8$ ve $CH_4$) arasında en hızlı tüketilen yakıtın hidrojen olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin hidrojenin yüksek difüzyon kabiliyeti, yanma sürecinin daha hızlı başlaması ve reaksiyon süresinin daha kısa olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Konik girişli yanma odasında, alev çıkışa doğru yönlendirildiğinde daha doğrusal bir

sıcaklık elde edildiği, ani genleşmeli yanma odasında ise yanma sonunda sıcak gazların köşelere doğru ilerlemesiyle ölü sıcaklık bölgelerinin oluştuğu sonucuna varılmıştır [8].

Karen ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptığı bir çalışmada dağıtılmış yanma koşulları altında ön karıştırma olmaksızın bir brülörde yanan metan yakıtının yanmasının sayısal analizini gerçekleştirmiştir. Yanma analizine standart K-epsilon türbülans modeli ve p-1 radyasyon modeli dahil edilmiştir. Hava-yakıt karışımı karıştırılmış ve farklı eşdeğerlik oranları ve oksijen konsantrasyonları incelendiğinde, %18 ve %15'lik dağıtılmış yanma koşullarında %21, bu koşullar altında metan alev sıcaklığının azaldığı bulunmuştur. Dağıtılmış yanma yönteminin $NO_X$ emisyonlarını azalttığı sonucuna varılmıştır. Yanma odasının çıkışında karbondioksit emisyon seviyesinin hafif arttığı belirtilirken, $NO_X$ kirletici emisyon seviyesinin sıfıra yakın olduğu doğrulanmıştır [9].

Dong ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada (2021) kısmen karışımlı brülör kullanılmış olup, yakıt olarak çift bileşenli $CH_4$ ve $H_2$ gazları kullanılmıştır. Yanma sonucu oluşan alevin rengi ve boyutları incelenerek belirlenmiştir. Yakıttaki $H_2$ gazı yüzdesinin, oksitleyici olarak kullanılan hava miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür. Yakıttaki $H_2$ gazı miktarı arttıkça alev parlaklığı düşmekte, hava oranı arttıkça bu parlaklık düşmektedir [ 10].

Özkan ve arkadaşlarının 2006 yılında yaptığı bir çalışmada, ani genleşmeli konik bir gaz türbininin yanma odasında hidrojen ve hidrokarbon yanmasının modellenmesini yapmışlardır. Azot oksit derişimini değiştirerek hidrojen gazı yanmasının en yüksek sıcaklığının 2053 K olduğunu belirlemiştir. Ayrıca azot oksitlerin en yüksek değerinin 862 ppm olduğunu ve bu derişimin en yüksek sıcaklık bölgesinde olduğunu bildirmişlerdir [11].

Kong ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada(2013), yanmada oksitleyici olarak hava kullanılan önceden karıştırılmış bir brülörde karbondioksit ve hidrojen gazlarının yakıt karışımlarının yanma koşullarının sayısal (tek boyutlu) bir araştırmasını gerçekleştirdiler. Alev hızı belirlenerek yakıt-hava karışımının giriş basıncı ve sıcaklığı değiştirilerek en uygun koşullar araştırıldı. Alev kalınlık değişimi incelendi ve sonuçlar giriş basıncı ve sıcaklık seviyesinin artırılmasının alev hızında artışa ve alev kalınlığında azalmaya yol açtığını göstermiştir [12].

Khalil ve Gupta (2017) yaptıkları çalışmada, Borghi diyagramındaki CDC bölgesini ve alev yapısı ile türbülansın etkileşimini araştırdılar. CDC bölgesinin Reynolds-Damkohler sayılarına ve dağıtılmış aleve bağlı olduğunu belirttiler. Çalışma, laminer alev kalınlığının ve hızının oksijen konsantrasyonundaki azalmadan önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Dağıtılmış yanma yönteminde uygun karıştırmanın çok önemli olduğunu belirttiler. Alevdeki reaksiyon bölgesi dağıtıldığı için termal $NO_X$ oluşumu azalımı bu çalışmada gösterilmiştir[13].

Karen Visser ve Gupta 2019 yılında, $CH_4/CO_2/N_2$ ve $H_2$ olmak üzere birden fazla gazdan oluşan bir yakıtın yanma koşullarını araştırmış ve bu gazlar CDC yöntemine göre bir girdap brülöründe farklı miktarlarda karıştırılmıştır. Elde edilen yakıtta derişimsel olarak %10 $N_2$, %10 $CO_2$, %50 $H_2$ ve %30 CH4'ten oluşmuştur. Elde edilen yakıt Ø= 0,9 eşdeğerlik oranı koşulları altında tüketilmişti. Yakıt tarafından oluşturulan alev görüntüsü, oksijen konsantrasyonu %23'ten %19'a düşürülmüştür. Seyreltme durumunda alev yoğunluğunun dağıldığı ve eşdeğerlik oranı düşürüldüğünde de aynı sonuçların elde edildiği bildirilmiştir [14].

Jiang ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı sayısal analiz çalışmasında, ön karışımlı yanma koşulları araştırılmış olup, çalışmada yakıt olarak biyogaz kullanılmıştır. Biyogaz içerisindeki $H_2$, $N_2$, $CH_4$ ve $CO_2$ miktarları değiştirilerek farklı yakıt tipleri oluşturulmuş ve yanma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, bu şekilde oluşturulan beş tip yakıt birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Laminer alev hızı, yanma sonucu oluşan molar değişimler ve sıcaklığı karşılaştırmak için Chemkin kodu kullanılmıştır. Sonuçlar, $CH_4$'ten oluşan yakıt tamamen tükendiğinde en yüksek sıcaklığın elde edildiğini, bu yakıta $CO_2$ eklendiğinde sıcaklığın azaldığını, $CO_2$ yerine $N_2$ eklendiğinde ise sıcaklıkta önemli bir değişim olmadığını göstermiştir. Laminer alev hızı konusunda ise, sadece $CH_4$'ten oluşan yakıt tüketildiğinde en yüksek laminer alev hızına ulaşıldığını, $CO_2$ eklendiğinde laminer alev hızının azaldığını, $CO_2$ yerine $N_2$ eklendiğinde ise laminer alev hızının arttığını ifade etmişlerdir. $CH_4$ yakıtının laminer alev hızında çok verimli olduğu bulunmuştur [15].

Khalil ve Gupta ise 2016 yılında, renksiz dağıtılmış yanmanın kirletici emisyonlar üzerindeki etkilerini araştırarak alev kararlılığı ve termal alanın daha homojenliği ile emisyon etkilerini düşük hale getirdiler. Çalışmalarında kullandıkları üç farklı yakıt üzerinde renksiz dağıtılmış yanma koşullarının etkilerini incelediler. Yakıt olarak metan

kullanıldığında, oksijen konsantrasyonu %11-%13 oranında azaltılabilirken, NOx emisyonlarında %85'lik bir azalma gözlemlendi. Sıcaklık 300 K ile 750 K arasında olduğunda $NO_X$ emisyonunun 1 ppm'den az olduğunu gösterdiler[16].

Al-Bash, Krein ve Schillinger (2016), ön karıştırma ile ve ön karıştırma olmadan kullanılmış metanın deneysel yanma koşullarını araştırdılar. Farklı termal kapasiteler (5 kW, 10 kW, 15 kW ve 20 kW) ve farklı fazla hava katsayısı değerleri ($\lambda = 1,2$, $\lambda = 1,5$ ve $= \lambda 1,7$) kullanarak yanma odasının çıkışındaki ve yanmanın sonundaki sıcaklıklar tespit edildi. Ürün seviyesi belirlenerek yanma odasında 1 m uzunluğunda ve 0,4 m çapında iki farklı tip brülör kullanıldı (akış alanları farklı ve brülör ön karıştırma olmaksızın). Elde edilen sonuçlar, yanma koşulları altında fazla hava katsayısının $\lambda = 1,2$ olduğunu göstermiştir. Termal güç arttıkça her iki tip brülörde de sıcaklık seviyesinin arttığı, yaklaşık 10 kW civarında birbirine yakın sonuçlar verdiği ve karışık yanmadan kaynaklanan sıcaklığın diğer termal enerjili yanma koşullarına göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, ön karışımlı yanma koşullarında $CO_2$ seviyesinin daha yüksek olduğu ($CO_2$ yanmanın son ürünlerinden biridir) ve bu durumda ön karışımlı bir brülörün daha iyi performans sağlayabileceği ve kirletici bir emisyon olan karbon monoksit seviyesinin ön karışımlı emisyonda daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ön karışımlı brülörlerde NOx emisyon seviyesinin daha düşük olduğu gösterilmiştir. Fazla hava katsayısı yükseltildiğinde ise her iki brülörden gelen sıcaklık, $CO_2$ ve $NO_2$ çıkışında artışa sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. CO seviyesinde bir artış olduğu deneysel sonuçlar ile paylaşılmıştır. Bu çalışmada, brülörlerin çapraz akış alanlarının farklı olduğunu ve bu nedenle türbülansın etkisinin de hesaba katılması gerektiği belirtilmiştir [17].

Hao ve arkadaşları 2020 yılında, CO ve NO'ya odaklanarak kok fırını gazının sayısal yanma analizine dayalı düşük emisyonlara ulaşmak için tasarım stratejileri üzerine çalışmalar yapmıştır. $CO_2$ ile seyreltme durumunda bu emisyonların değişimlerini incelemişler ve böylece oksijen konsantrasyonu seyreltme sonucunda %21'den %14'e düşmüştür. Çalışmada, NO azalırken karbon monoksitin (CO) ilk başta hafifçe azaldığını ve ardından keskin bir şekilde artarak sıcaklığın da azaldığını göstermiştir [18].

Hashemi ve diğerleri (2012) simetrik ve ani genişlemeli yanma odasında yakıt olarak metan kullanarak sonucun NOx emisyonlarındaki değişimi üzerindeki etkisini incelediler. Yanma modeli olarak $\beta$ -PDF ve türbülans modeli olarak K-$\varepsilon$ kullanılmıştır. Artan türbülansla

birlikte NO emisyonları önemli ölçüde azalmıştır. Yanma odası tasarımında hava giriş açısının artırılması da NO emisyonlarını azaltmada etkili olmuştur [19].

2019 yılında Öztürk ve arkadaşları türbülanslı, adyabatik ve kısmi yanma koşulları altında sentetik gazın $N_2$, $CO_2$ ve $H_2O$ ile seyreltilmesinin sonuçlarını sayısal olarak önceden karıştırılmış olarak araştırmıştır. Yanma odası iki boyutta 0,5 m uzunluğunda, 0,065 m yarıçapında ve yakıt karışım hızı 30 m/s olacak şekilde tasarlanmıştır. İkincil olarak kullanılan hava ise 20 m/s hızla gönderilmiştir. Sonuçlar, NO emisyon seviyesinin yanma odası basıncındaki artışla arttığını, NO emisyon seviyesinin ise dışarıda oksitleyici olarak kullanılan havanın (ikincil) sıcaklığının artmasıyla veya yakıt-hava karışımının sıcaklığının artmasıyla arttığını göstermiştir. Her üç gazın da seyreltme durumunda NO emisyon seviyesini azalttığı, $N_2$ ile seyreltildiğinde NO emisyon seviyesinin daha az azaldığı, $H_2O$ ile seyreltildiğinde ise azalmanın daha fazla olduğu bulunmuştur [20].

Komak ve arkadaşları 2024 yılında saf metan yakıtı üzerinde bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmanın amacı; $CO_2$, Ar ve He eklenmesinin farklı ses frekansları, dinamik basınç genlikleri ve ışık emisyon yoğunluğu altında yanmanın kararsızlığı üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Yanma, farklı ses frekanslarında 90 Hz, 169 Hz, 320 Hz'de uyarılmıştır. Bu zayıflatıcıları kullanarak zayıflamayı gerçekleştirmişler ve bu zayıflatıcıların alev sıcaklığı ve parlaklığı üzerindeki etkisini göstermişlerdir. Çalışma, zayıflatıcılar kullanılarak sıcaklık ve $NO_X$ emisyonlarında bir azalma olduğunu, CO emisyonlarının arttığını ve $CO_2$ emisyonlarının azaldığını göstermiştir [39].

Mustafa Al-Bash, Osman Komak ve diğerleri (2022), gaz türbini yanma odasındaki dağıtım sistemi altında hidrojenle zenginleştirilmiş kerosenin yanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. $H_2$ girişiyle yanma performansının arttığını gözlemlemişlerdir. Sıcaklıkları kontrol ederek azaltmak ve $NO_X$ emisyonlarını düşürmek için CDC yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarının sonuçları, CDC yöntemini kullanırken sıcaklıklarda ve $NO_X$ emisyonlarında bir azalma olduğunu göstermiştir. (44).

Metan veya doğal gaz alevleri ve emisyonları azaltmak için renksiz dağıtılmış yanma yönteminin kullanımı hakkında daha önce yapılmış çalışmalar olmasına rağmen, çoğu çalışmada seyreltici olarak $CO_2$, $N_2$ kullanılmış ve yakın zamanda yapılmış bir çalışmada metanla birlikte Ar, He, $CO_2$ kullanılmıştır (37) Hidrojen eklenmiş metan yakıtı için ise CDC

yöntemini uygulanırken Ar ve He gibi seyrelticilerin eklenmesiyle ilgili bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Yapılan bu tez çalışmasındaki modellemede metan yakıtı ve CDC yöntemi ile dört seyreltici olan $N_2$, $CO_2$, He ve Ar eklenmesi çalışılmıştır. Aynı seyrelticiler eklenerek ve aynı yöntem ile hidrojen eklenmiş metan yakıtındaki etkiler tespit edilmiştir.

Enerji üretiminin yaşamın devamı ve gelişmesi için kaçınılmaz olduğu bilinmektedir (ve girişte belirtildiği gibi) enerjinin en büyük kısmı fosil yakıtlardan üretilmekte olup bunların arasında diğer fosil yakıt türlerine göre düşük kirletici içeriği bakımından enerji açısından en iyi bileşen doğal gazdır. Bilindiği üzere fosil yakıtlardan enerji çıkarılmasıyla zararlı emisyonlar açığa çıkmakta ve bu zararlı emisyonlar insanları ve doğayı etkilemektedir. Bilim insanları ve araştırmacılar emisyonları ortadan kaldırmak veya azaltmak için çalışmalar yapmışlardır ve deneyler hala devam etmektedir. Doğal gazın en büyük bileşeni metandır, dolayısıyla tez çalışması metan ve diğer bileşenler kullanılarak düşük kirleticili enerji üzerine modelleme temeline dayanmaktadır. Bu temel doğrultusunda renksiz dağıtılmış yanma yöntemini (CDC) uygulandı. CDC yönteminde, $O_2$ miktarını sabit tutularak seyrelticiler olan $N_2$, $CO_2$, He ve Ar kullanıldı. Tez çalışmasını literatürden farklı kılan husus CDC yöntemini hem metan yakıtına hem de hidrojen eklenmiş metan yakıtına uygularken seyreltici olarak Ar ve He kullanılmasıdır. Her iki yakıt türü için sıcaklıkları, azot oksit emisyonlarını, karbondioksiti ve karbon monoksiti azaltmada olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Hidrojen eklenmiş metan yakıtı için günümüze kadar Ar ve He'u bu yakıtla (CDC) yöntemiyle kullanan bir çalışma litaretürde yer almamaktadır. Bu çalışmada, seyreltici olarak He ve Ar' un birlikte kullanılmasınınım yanı sıra $N_2$ ve $CO_2$'de varlığında CDC yönteminin avantajları sağlanarak sıcaklıkları ve kirletici emisyonları azaltmadaki etkisi araştırıldı.

# 2. YAKIT, YANMA VE YANMA SONUÇLARI ARASINDAKİ İLİŞKİ

## 2.1. Yakıt

Doğada bulunan malzemeler genellikle üç farklı hal olan katı, sıvı ve gaz halinde bulunurlar. Bu formlardan enerji elde etmek için havada bulunan oksijen ile tepkimeye girerek enerji üretimi sağlayan maddelere yakıt denir. Yakıtların havadaki oksijen ile tepkimeye girmesiyle termal enerjisi adı verilen enerji ortaya çıkar. Bu enerjinin elde edilmesinde kimyasal yakıtlar kullanıldığında yanma sürecinin anlaşılması oldukça önemlidir. Yanma sürecinde kullanılan yakıtlar fiziksel özelliklerine göre katı, sıvı ve gaz formunda bulunurken yakıt varlığına göre ise birincil (doğal yakıt) ve ikincil (sentetik yakıt) olmak üzere iki bölüme ayrılır. Yakıtın genel sınıflandırması aşağıdadır:

Çizelge 2.1. Yakıt sınıflandırması

| Yakıt bölümü → / ↓ | Mevcudiyete göre bölünme | |
|---|---|---|
| Özelliklere göre bölünme | Başlangıç( doğal) | İkincil(endüstriyel) |
| Katı yakıt | Ahşap, serin, turba , tezek vb | Kok,kömür |
| Sıvı yakıt | Petrol | Dizel,benzin,gazyağ, Nafta,etanol. |
| Gaz yakıt | Doğal gaz | Metan , hidrojen , propan ,kömür gazı , su gazı ,yüksek fırın gazı . |

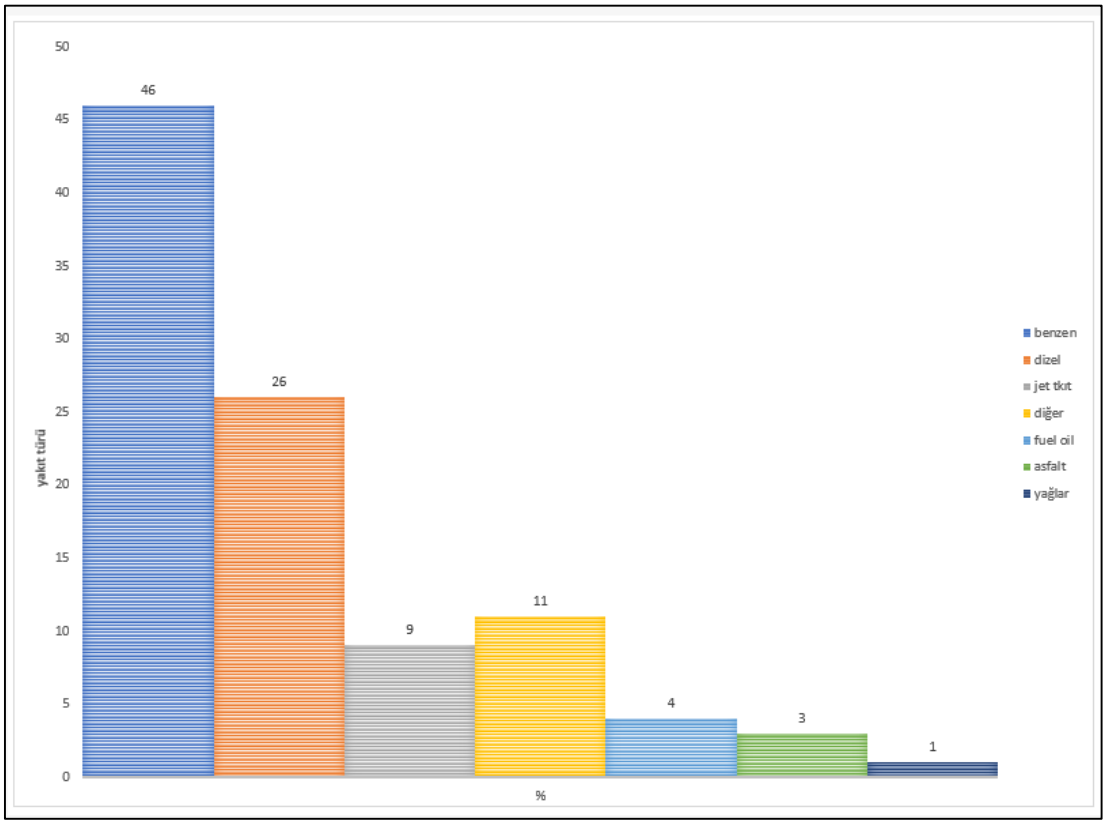
### 2.1.1. Katı yakıt

Günümüzde katı yakıtın temelini madenlerden elde edilen odun ve kömür olduğu bilinmektedir. Katı yakıtın oluşumuna göre sınıflandırmasında ise sentetik ve katı biyokütle yakıtı olarak iki türü bulunmaktadır.

### 2.1.2. Sıvı yakıt

Petrol ve petrol türevi maddelerinden elde edilen petrol ürünleri olarak bilinen yakıt türleri sıvı yakıtı olarak sınıflandırılmaktadır. Günümüzde bu tür yakıtların adlandırılmasında fosil yakıt tanımı da kullanılmaktadır. Fosil yakıtlar organik (biyokütle yakıtları) ve inorganik (hidrojen, kükürt vb.) türler olarak ikiye ayrılır [21 ]. Temel ihtiyaçlar olarak bilinen elektrik

üretimi, ulaşım, ısıtma vb. gibi süreçler fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Fosil yakıtlara örnek olarak doğal gaz, petrol ve kömür verilebilir.




Şekil 2.1. Petrolden elde edilen ürünlerin yüzdelik dağılımı (41)

### 2.1.3. Gaz yakıt

Ev endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan gaz yakıtlardan özellikle doğal gaz, depolama ortamı gerektirmediği ve kül gibi katı atık bırakmadığı için sıvı ve katı yakıtlara göre üstün özelliklere sahiptir. Gaz yakıt olarak doğal gaz ve sıvılaştırılmış petrol gazı kullanılır. Doğal gaz, büyük ölçüde metan ve az miktarda diğer gazlardan oluşur. Doğalgazı içeriğinde yüzdesel olarak metan (90-95%) $CH_4$, etan (1-4%) $C_2H_6$, propan (1-2%) $C_3H_8$, azot (0-4%) $N_2$ bulunur.

## 2.2. Metan ve Hidrojen

### 2.2.1. Metan

Metan bir sera gazıdır ve $CO_2$'den 28-30 kat daha fazla küresel ısınma potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, bir sera gazı olan $CO_2$ emisyonuna yol açan metanı yakmak, metanı havaya salmaktan daha iyidir. Çünkü metanı havaya salmanın küresel ısınma üzerinde daha büyük bir etkisi vardır. Yanma etkisinde metan dünyayı $CO_2$'den 25 kat daha fazla ısıtır. Metan, doğal gazın en büyük bileşeni olduğundan, bu hidrokarbonun büyük C-H bağlarında belirgin bir tetrahedral moleküler yapısı vardır. Ayrıca, yanma sonucu herhangi bir iz veya duman bırakmadan kolayca tutuşarak yanması oldukça önemlidir. Dünyadaki metan emisyonlarının yaklaşık %60'ı insan faaliyetlerinden kaynaklanmaktadır.

### 2.2.2. Hidrojen

Hidrojen; su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi birincil enerji kaynaklarından hammadde olarak üretilen endüstriyel bir yakıttır (22). Su buharı arıtımı, fotokimyasal işlemler, termokimyasal işlemler ve atık ve elektrolizden kaynaklanan gazların arıtılması gibi birçok yöntemle hidrojen üretimi yapılabilir. Daha önce de belirtildiği gibi enerji üretmek için büyük oranda fosil yakıtların kullanılması gereklidir. Fosil yakıt kullanımında çevre konusunda hassas yöntemler seçerken kirleticiler olmadan enerjiye ihtiyaç duyulması veya kirleticilerin azaltılması için yakıttaki karbon azaltılması gerekmektedir. Bu sürecin oluşturulmasında kullanılan hidrojen, $CO_2$ emisyonlarını azaltmak için iyi bir enerji taşıyıcısı olarak bilinmektedir (5). Ayrıca, hidrojenin avantajlarından biri, geleneksel fosil yakıtlara kıyasla çok büyük bir enerji (120 mj/kg) içermesidir (24). Hidrojen kullanımının belirgin avantajlarına rağmen, hidrojenin gaz olarak düşük yoğunluğu nedeniyle hidrojeni etkili bir şekilde kullanmanın önündeki en büyük zorluk olarak hidrojenin depolanmasıdır. Ulaşımda kullanmak için, otomobil ve uçak gibi bu yakıtla çalışan araçlar için uygun bir depolama sistemi tasarlanmalıdır. Hidrojeni iyi depolamak için sıvı hale dönüştürülmesi gerekir. Hidrojeni gaz halinden sıvı hale dönüştürmek yüksek basınç (35-70 mPa) veya oldukça çok düşük sıcaklıklar (-423 F) gerektirir. Hidrojenin etkili depolanması için bu fiziksel gereksinimler tasarımcılar için zor görevler olarak kabul edilir ve yüksek maliyetler gerektirir. H2'nin uygun şekilde depolanması araştırmacılar için günümüzde çözülmesi gerek önemli bir konu olma özelliğini taşımaktadır (5,24,10).

## 2.3. Yanma

Yakıt ve oksitleyici madde belirli bir sıcaklığın altında buluştuğunda yanma işlemi gerçekleşir. Yanma bir oksidasyon reaksiyonu sürecidir. Bu süreç sonunda büyük miktarda enerji üretilir. Oksitleyici madde olarak genellikle kolayca elde edilen havadaki moleküllerden yararlanılır. Yanma süreci, oksitleyicinin yanma odasına girme şekline göre türlere ayrılır. Karışımsız yanma örnekleri arasında gaz türbinlerinin bazı türleri bulunur. Ön karışımlı yanma, yakıt ve oksitleyicinin yanma odasına girmeden önce karıştırıldığı bir yanma türüdür.

Yanmanın başka bir şekilde iki madde arasındaki kimyasal reaksiyon olarak tanımlanabilir. Yanma işlemlerinde ısı ve gaz emisyonları üretilirken işlem boyunca alev bu sürece eşlik eder. Ortamdaki yanma süreci oksijen miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Tam yanma

Ortamda bulunan oksijen miktarının hidrojen ve karbon atomları ile tepkimeye girecek kadar yeterli miktarda olması sonucunda oluşur.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

Tam yanma sürecinde $H_2O$ ve $CO_2$ üretilirken yanma sırasında ateş rengi parlak değil mavidir.

Eksik yanma: Oksijenin tüm hidrojen ve karbon atomlarıyla birleşecek kadar bulunmadığı yanmadır. Metanın eksik yanması denklemi gibi:

$$5\,CH_4 + 13\,O_2 \rightarrow 2\,CO_2 + 10\,H_2O + 2CO + C$$

Yanma süreci sonucunda $H_2O$, $CO_2$, kömür dumanı ve CO oluşur. CO, insanı dakikalar içinde öldürebilecek kadar tehlikeli bir gazdır. Bu tür yangınların rengi sarıdır.

Fizik ve kimyada ısı bir enerji biçimi olarak kabul edilir ve genellikle atomların, moleküllerin veya hatta maddenin bileşimine giren herhangi bir parçacığın hareketiyle ilişkilendirilir.

Termodinamiğin yasalarını, özellikle termodinamiğin birinci yasasını (25) kullanarak yanma reaksiyonlarından elde edilen enerji miktarını hesaplayabiliriz.

$$dQ=du+ pdv \tag{2.1}$$

dQ=Sıcaklık değişimi
du=İç enerji değişimi
p=basınç
dv=hacim değişimi
Denklem entalpiye göre düzenlenirse

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

$$dH=dU+pdv+vdp \tag{2.3}$$

Yanmanın bir tanımı, zincirleme kimyasal reaksiyonlarda reaktantlar ve ürünler arasındaki dönüşüm sırasında elde edilen enerjidir. Yanma reaksiyonunu aşağıdaki denklemde olduğu gibi ifade edebiliriz

$$A + B + C + \ldots.\rightarrow D + E + F + \tag{2.4}$$

Tepkime sonucu oluşan tüm reaktantlar ve malzemeler aynı durumda olduğundan, ürünler ve reaktanlar arasındaki entalpi değişimi, sabit akışta bir enerji dengesine yol açar. Yani, ısı transferinin reaksiyon sırasında oluşan kimyasal enerjiden kaynaklandığını söyleyebiliriz. Yanma reaksiyonundan elde ettiğimiz ısı denklemi aşağıdadır:

$$Q= H_{Sonuç}-H_{Tepken} \tag{2.5}$$

Bir reaksiyonun entalpisini, belirli bir durumda oluşan maddelerin (ürünler) entalpileri ile aynı durumda tepkimeye giren maddelerin (girdiler) entalpileri arasındaki farkın miktarı olarak ifade edebiliriz.

## 2.4. Reaksiyon kinetiği

Yanma sırasında birçok reaksiyon meydana gelir ve bazen reaksiyonların ürünleri yeni bir reaksiyon için girdi olur. Tüm bu kimyasal reaksiyonlar yoluyla enerji üretilir[26]. Reaksiyonu tek bir adım şeklinde açıklamak istersek, aşağıdaki şekilde yazılır

$$aA + b \longrightarrow B + cC\ k\ D + E + F + \quad (2.6)$$

Yukarıdaki denklemdeki K terimi etkileşim katsayısını temsil ederken, girdilerin zaman içindeki azalma denklemini ifade etmek için denklemin biçimi şöyledir:

$$\frac{d[A]}{dt} = -k[A]^a\,[B]^b\,[C]^c. \quad (2.7)$$

a, b ve c sembolleri, girdinin bağlı olduğu dereceyi temsil eder. Hız sabiti K'yi Arrhenius faktörü ile ilişkişi; [27].

$$K = A\, e^{((-E_a)/RT)} \quad (2.8)$$

Ticari CFD koduyla modelleme yaparken, her reaksiyon için arrhenius faktörü, aktivasyon enerjisi ve her reaksiyon için üstel sıcaklık değeri hakkında bilgilere sahip olmak gerekir. Bu nedenle, bu denklemi CFD kodunda kullanmak için, denklemi (2.8) yeni bir forma dönüştürmek gerekli hale gelmiştir:

$$K = ATne^{((-E_a)/RT)}$$

A = Arrhenius faktörü ($mol.cm^{-1}S^{-1}K^{-1}$) E = aktivasyon enerjisi (cal/mol) R = evrensel gaz sabitini (cal/mol.K), T= mutlak sıcaklık (K), n= sıcaklığın temel değeridir.

## 2.5. Hava Kirliliği ve Emisyon

Yanma işlemi sonucunda ortama, azot oksitler NOx, karbon monoksit, karbondioksit, kükürt dioksit, partikül madde ve diğer kimyasal türler üretilir. Bu bileşenler kullanılan yakıt türüne bağlıdır [27]. Doğada insanları ve çevreyi yüksek konsantrasyonlarda etkileyen bazı zararlı maddeler vardır ve buna genellikle hava kirliliği denir. Yakıt yanmasının veya yanmamış yakıtın ürünleri hava kirliliğinin nedenleri arasındadır. Bu ürünler veya kirleticiler, kullanılan yakıt türünden ve kullanılan yakıtın içeriğinden doğrudan etkilenir ve giriş sıcaklığı gibi yanma koşullarından etkilenir [27].

### 2.5.1. Termal NOx oluşum mekanizması

Yanma odasında yüksek sıcaklıkların oluştuğu noktalarda, yanan havadaki veya yüksek ısılı yakıtta bulunan azotun oksidasyonu ile azot oksitler oluşur ve bu mekanizma Zeldovich tarafından önerilmiştir [28]. Aşağıdaki reaksiyonlar çok yüksek sıcaklıklarda meydana gelir ve 1800 K'lik bir tepe noktasına ulaşır.

$$O_2 \leftrightarrow 2O^*$$

$$O_2 + M \leftrightarrow O^* + O^* + M$$

Yukarıdaki reaksiyonlardan sonra, azot oksit oluşumunun mekanizması aşağıdaki denklemlere göredir:

$$O^* + N_2 \leftrightarrow NO + N^*$$

$$N^* + O_2 \leftrightarrow NO + O^*$$

$N_2$ bağlarını kırmak, reaksiyondaki en zor adımdır ve Zeldovich, bu adımın yalnızca ani sıcaklık artışının olduğu alanlarda gerçekleşebileceğini belirtmektedir [28]. NOx oluşumundaki bir diğer önemli faktör de oksijene erişimin kolay olmasıdır, bu nedenle zengin yakıt karışımları daha yüksek oranda NOx oluşumuna sahip olacaktır. Ayrıca, yanma odasının içindeki çok sıcak noktalar NOx oluşumunu artırır.

### 2.5.2. Ani $NO_X$ oluşum mekanizması

Finnimore tarafından önerilen mekanizma, yakıtın zengin olduğu reaksiyon bölgesinde oksidasyonun meydana geldiği termal mekanizmanın tam tersidir (47). Azot oksit miktarının büyük bir kısmı düşük sıcaklıklarda (1800 K'den az) bu mekanizma yoluyla oluşur. Aniden oluşan azot oksit miktarı, diğer iki yöntemle oluşan miktarlardan daha azdır. Aşağıdaki etkileşimler bu mekanizmanın nasıl çalıştığını göstermektedir.

$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N$

$2C + N_2 \leftrightarrow 2CN$

$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2O$

Daha sonra, aşağıdaki reaksiyonlara göre N ve CN'nin oksidasyonundan NO oluşur

$N + O_2 \leftrightarrow NO + O^*$

$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO$

Yanma sırasında oluşan CH bileşiği bu mekanizmada önemli bir faktördür, ayrıca yakıtın ayrışması sırasında açığa çıkabilecek $CH_2$, 2C, $C_2H$ gibi diğer kimyasallar da bu mekanizmaya yol açabilir.

### 2.5.3. Yakıt $NO_X$ oluşum mekanizması

Bu mekanizma, yakıttaki azotun NO'ya dönüşümünün azot, hava ve yakıt oranlarıyla yakından bağlantılı olduğunu göstermektedir. Yakıt damlacıklarının ısıtılması sonucunda, azot içeren bileşikler gaz fazında serbest bırakılır. Bileşenlerin termal ayrışması sonucunda, azot oksitlere dönüştürülebilen HCN, N, CN, NH gibi azot içeren ara ürünler oluşur [29].

### 2.5.4. Karbon monoksit (CO) oluşumu

Karbon monoksit, yanma havası eksikliği veya yetersiz hava-yakıt karışımı nedeniyle eksik yanma sonuçlarında ortaya çıkar. Karbon monoksitin yanma ürünlerinde ortaya çıkmasının bir başka nedeni de yanma odasının sıcaklığının çok yüksek değerlere ulaşmasıdır. Yanma odasından çıkan yakıtta bulunan karbon monoksit, yanmanın nedenlerinden biridir.

### 2.5.5. Karbondioksit ($CO_2$) oluşumu

Yeterli hava bulunduğunda ve yakıt-hava karışım oranı beklenen seviyelerde tutulduğunda tüm yanma işlemlerinde ürünler arasında karbondioksit bulunur.

# 3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ

Akış gerektiren mühendislik sistemlerini tasarlamak ve analiz etmek için deneysel ve modelleme olarak iki farklı yöntem kullanılır. Deneyler, gerçek bir modelin oluşturulması ve test edilmesi gereken geleneksel çözümü temsil ederken bu süreçte maliyet ve zamana ihtiyaç vardır. Hesaplamalı kısım, diferansiyel denklemleri analitik veya hesaplamalı olarak çözmeyi içerir. Bu, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) analizi yoluyla yapılır.

CFD, bilgisayar tabanlı simülasyonlar gerçekleştirerek ısı transferi, akışkanlar dinamiği ve kimyasal reaksiyonlar gibi sistemleri analiz eden bir programdır [26]. CFD ile kütle, momentum, enerji ve taşıma denklemlerini çözerek hesaplamalar ve modellemeler yapılabilir. CFD tekniği araştımacılar tarafından tercih edilerek son yıllarda önemli bir sayısal yöntem haline gelmiştir [30]. Bigisayarların modernizasyonu ve gelişmiş işlemcilere sahip olmaları nedeniyle CFD kullanma eğilimi daha da artmıştır [26]. Modern zamanlarda bu programdan, içten yanmalı motorlarda yanma ve mikroelektronik devreler için soğutma ekipmanları, kirleticilerin ve kanalizasyonun dağıtımı, uçak ve araçların aerodinamiği, hava durumu tahminleri ve meteoroloji ve hatta damarlarda akan kanı analiz ederek insan vücudunun içinde bile birçok alanda kullanılmaktadır.

Günümüzde bazı geometrik şekiller karmaşık olması ve kolayca anlaşılamaması nedeniyle sistemlerdeki parametre analizleri oldukça zordur. Ancak CFD programı bu gibi zor ve karmaşık sistemleri analiz etmede büyük ölçüde yardımcı olur. CFD programı kullanılmadan yapılan deneysel çalışmalarda deneme yanılma gerektiren, fazla malzeme harcamaları ve ideal geometrik şekle ulaşmak için uzun zaman gerektiren deneysel yöntemler yerine bilgisayar kullanılarak yapılan simülasyon süreçleri olumsuzlukları düzeltmenin yanısıra az malzeme maliyeti ve kısa sürede istenen tasarıma veya ideal geometrik şekle ulaşmaya yardımcı olur.

## 3.1. CFD kodunun yetenekleri ve avantajları

CFD kodunun kapsamlı algoritmaları sayesinde, yanma süreçlerini görüntülemek ve analiz etmek çok önemli hale gelmiştir [26]. Bu program, enerji üretimi, endüstriyel ekipman ve prototipler için birçok yanma modelinin tasarlanmasında güvenilir ve kullanışlı bir araç

olarak kabul edilir. Teknolojinin ilerlemesiyle, bu programın doğruluğu düşük maliyetli hesaplamanın geliştirilmesi nedeniyle daha da artacaktır [31]. Araştırmacı ayrıca, para ve zaman kaybetmeye gerek kalmadan, işe uygun amaçlanan modele veya geometrik şekle ulaşana kadar modelde değişiklikler yapabilir ve düzeltmeler yapabilme yeteneğine sahip olmaktadır. Yani program, test sonuçlarındaki hataları azaltan detaylı çizimler ve hatasız prototipler yapmamızı sağlamaktadır. Böylece, gerçek deneyi yapmadan önce en uygun modeli elde edilirken deneylerin daha verimli ve daha az hatayla yürütmemizi sağlar.

Bu program, deneysel kurulum veya simülasyonun her bir bölümünü veya parçasını görselleştirmemizi sağlar. Deneysel çalışmanın başlangıcından sonuna kadar tüm belirli noktalarda sonuçlar almamızı ve bilgisayarlara bağlı olarak istediğimiz herhangi bir noktada kısa sürede sıcaklık, basınç, kuvvet, hız vb. ile ilgili ayrıntılı incelemeler yapmamızı olanak sağlar[6]. Programın özelliklerinden biri, tasarlanan herhangi bir geometrik şekil için bir ağ yapısı oluşturulmasıdır. Geometrik şekil için ağ oluşturma adımında, tüm geometrik model üzerinde küçük prizmatik şekiller kullanılır [26]. Bu küçük şekiller, çözümün doğruluğunu artırmaktan sorumludur. Geometrik şekli ağda daha küçük parçalara böldükçe doğruluk artarken çözüm süresi uzar [6]. Yani, daha fazla doğruluk için daha uzun bir işlem süresi elde edilir. Çünkü ağ sayısının artmasıyla birlikte analizi yapılan problemin çözümünü oluşturmak için bilgisayar gücüne ihtiyaç duyularak uzun zamanda süreç tamamlanır.

### 3.2. CFD Bileşenleri

CFD kodlarının tasarımı basit bir yapısal düzenden ziyade karmaşık parametelere sahip süreçlerden oluşmaktadır. CFD kodları programa giriş bilgileri, ayrıntılı işlemleri ve hangi algoritmaların kullanılacağı belirlenerek sistematik bir şekilde birbirleriyle iletişim kuran ve etkileşimde bulunan farklı alt sistemlerden (algoritmalar) oluşur [26].

CFD'de ön işleme, son işleme ve kod çözme birimleri bulunmaktadır [26]. Her mühendislik problemi veya araştırmacının çözmek veya hesaplamak istediği herhangi bir işlem, araştırmacı tarafından ön işleme kısmında belirlenir. Ön işleme kısmında, üzerinde çalışılacak model veya geometrik şekil tasarlanarak ağ yapısı oluşturulur. Hava ve yakıtın veya yakıt-hava karışımının girdiği alanlar (örneğin brülörün duvarları veya üzerinde çalışılacak model, reaksiyon veya yanma sonuçlarının çıktığı çıkış ve eksenin simetrik olup olmadığı) belirlenir [32]. Kullanılan malzeme ve içerdiği akışkanların özellikleri tanımlanır

ve uygun model seçilme işlemi ön işleme (kimyasal reaksiyonları göstermek için) kısmında yapılır. Çözüm adımına gelince, belirtilen akış değişkenlerinin ayrılıp cebirsel olarak çözüldüğü cebirsel hesaplamalar yapılır. Koda ait ilgili yöntemler ve yaklaşıklık teknikleri problemi çözmek için birleştirilir [33].

CFD kodunda en yaygın kullanılan yöntemin sonlu elemanlar yöntemi olduğu belirtilmektedir [26]. Bu yöntemde, bilinmeyen parametreleri çıkarmak için doğrusal ve ikinci dereceden denklemler kullanılır [26]. Ancak, problemlere çözüm bulmak için kullanılan temel denklemler tamamen çözülemeyebilir, bu gibi durumlarda sistem hata oranını düşürür. CFD kodundaki yanılsamayı azaltmak ve cebirsel denklemler üzerindeki kirleticilerin etkisini azaltmak için, bu artıklar belirli fonksiyonlara göre test edilir. Üçüncü aşama olan son işleme adımına gelindiğinde ise problem için elde ettiğimiz veriler işlenir ve sonuçlar görselleştirilir [26]. Çünkü bu kısım grafikler veya görsel şekiller gibi görsel sonuçları ve belirtilen tüm parametreleri değiştirme açısından veri hazırlamayı içerir.

CFD, bilgisayarların akışkan akışlarının sayısal simülasyonlarını sağlamasına yardımcı olan bir dizi tekniği içermektedir [53]. CFD, akışkan akışlarını içeren problemleri analiz etmek ve çözmek için sayısal analiz ve veri yapıları kullanır. Bu teknikler, herhangi bir akışkanın fiziksel yönlerini belirlemelerini sağlayan üç temel ilkeye göre çalışır. Bu ilkeler şunlardır: (a) Enerjinin korunumu. (b) Newton'un ikinci yasası. (c) Kütlenin korunumu. CFD analizinde, akışkan akışı ve sıcaklık, basınç, hız, viskozite ve yoğunluk gibi biribiri ile ilişkili fiziksel özellikler, belirli çalışma koşullarına bağlı olarak hesaplanır. CFD, bir sistemin davranışını incelemede ve tasarımında yenilikçi bir yaklaşımdır [54]. Günümüzde, CFD tekniklerinin birçok kullanım alanı bulunmaktadır [55-59].

### 3.3. Temel Denklem

#### 3.3.1. Kütlenin korunumu

Kütle veya madde korunumu yasası olarak bilinen Lavoisier-Lomonsoff yasası aşağıdaki şekilde gösterilir: Bir kimyasal reaksiyon meydana geldiğinde, reaksiyona giren malzemelerin kütlesi (reaktantlar) reaksiyondan elde edilen malzemelerin kütlesine eşittir. Kapalı bir sistemdeki herhangi bir kütle sistem içinde ne olursa olsun sabit kalır. Kütle farklı şekillerde düzenlenebilir, ancak yok edilemez veya üretilemez [25].

Aşağıda kütle korunumu için genel denklem verilmiştir:

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

Bu denklem, sıkıştırılabilir akış için zamana bağlı boyutsal süreklilik denklemini ifade eder. Denklemden yoğunluktaki değişimin zamana bağlı olduğu görülmektedir. Çalışmalarda genellikle modelleme zamandan bağımsız olarak yapılır. Bu nedenle zaman terimi sıfır olarak kabul edilir. Denklem iki boyutta (x,y) düzenlenirse denklem şu şekildedir

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

### 3.3.2. Momentumun korunumu

Momentumun değişim oranı gövdeye etki eden kuvvetin büyüklüğüne orantılı olması momentumun korunumunun temelini oluşturmaktadır (Newton'un ikinci yasası). Sıkıştırılamaz akışkanlar için momentumu i yönü gibi belirli bir yönde ifade etmek için[34].

$$\frac{\partial (pui)}{\partial t} + \frac{\partial (puiui)}{\partial xi} = -\frac{\partial p}{\partial xi} + \frac{\partial Tij}{\partial xj} + \rho gi + \text{Fi} \quad (3.3)$$

$\rho =$ Statik basınç
$\rho gi =$ Bu, i yönündeki yer çekimi kuvvetidir
Fi = i yönündeki dış kuvvettir.
Tij = Bir gerilim tensörüdür.

Bu denklem momentumun korunması için kullanılan Navier-Stokes denklemi olarak bilinir.

### 3.3.3. Enerjinin korunumu

Enerjiyi veya enerji türleri arasındaki ilişkiyi ifade etmek istediğimizde, enerjinin yok edilemeyeceğini ve yoktan yaratılamayacağını gösteren termodinamiğin birinci yasasına veya enerjinin korunumu yasası temel alınmaldır. Enerji, bir formdan diğerine dönüşerek varlığını sürdürür. Enerjinin korunumu yasası ve kütlenin korunumu yasası birbirleriyle

ilişkilidir ve hiçbiri ayrı ayrı değerlendirilemez. Bilim insanı Albert Einstein tarafından önerilen denklemde ilişkilerini görülebilir.

$$E = mc^2 \quad (3.4)$$

Bu denklemde, E, sabit bir değer olan ($2{,}9979 \times 10^8$ m/s) vakumdaki ışık hızını temsil eder [25] ve böylece kütledeki değişimin enerjideki değişime bağlı olduğunu söylenebilir. Toplam enerji (E) kavramı, termodinamiğin birinci yasasının en önemli verilerinden biridir. Bir sistemdeki enerjideki toplam değişim, net işe eşittir [25]. Zamanla enerjideki artış denklemle gösterilir. Enerjideki artışı hesaplamak için Denklem 3.5 kullanılabilir.

$$\rho \frac{dE}{dt} \quad (3.5)$$

Aşağıdaki denklemden (3.6.), parçacığa ısı transfer hızını hesaplanabilir [25,35].

$$- \text{div}\,(q) = K\frac{dT}{dx} \quad (3.6)$$

T mutlak sıcaklığı K ise cismin ısıl iletkenliğini temsil eder. Önceki denklemde, cisme aktarılan ısı belirlenmiştir. Bir cismin yüzeyine uygulanan viskoz kuvvetler aşağıdaki denkleme göre belirlenebilir [26].

$$-\text{div}(\rho u) + \frac{\partial(uTxx)}{\partial x} + \frac{\partial(uTxy)}{\partial y} + \frac{\partial(uTyy)}{\partial y} + \frac{\partial(uTyx)}{\partial x} \quad (3.7)$$

### 3.3.4. Standart K-ε

Sayısal bir bakış açısından türbülanslı akışları analiz etmek oldukça zordur. Ölçülemeyen birçok bilinmeyen terim içerir. K ve E terimleri, hız ve uzunluk ölçüsünü belirleyerek matematiksel işlemleri kolaylaştırmada kullanılır [26]. Bu terimlerin kullanımı konuyu daha anlaşılır hale getirir.

$$v = k_2^1 \quad , \quad I = \frac{k_2^3}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Son denklemde, bozulmalar küçük ölçekli (küçük girdap) olduğunda ε modeli ve büyük ölçekli bozulmalarda (büyük girdap) k modeli ile ε terimleriyle ilişkilendirilen I teriminin kullanıldığı görülmektedir. Aşağıdaki denklem, bu terimlerin viskoziteyle olan ilişkisini göstermektedir [26].

$$M_{t=\,CpvI=}\,\rho C_{M\,\frac{k^2}{\varepsilon}} \tag{3.9}$$

Yukarıdaki denklemde, $M_t$ terimi türbülanslı viskoziteyi tanımlar. $C_m$ terimi sabit, boyutsuz bir parametredir. Aşağıdaki denklemler, standart k-ε türbülans modeli için kullanılan taşıma denklemlerini gösterir [26].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + div(\rho KU) = div(\frac{M_t}{\sigma k}\Delta K) + 2M_t\,S_{ij}.S_{ij} - \sigma\varepsilon \tag{3.10}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + div(\rho \varepsilon U) = div\left(\frac{M_t}{\sigma \varepsilon}\Delta\varepsilon\right) + C1\varepsilon\,\frac{\varepsilon}{k}\,2M_t\,S_{ij}\,.\,S_{ij} - C_{ZE}\,\rho\frac{E^2}{k} \tag{3.11}$$

Önceki denklemde, $S_{ij}$ terimi türbülanslı basınç altındaki deformasyona atıfta bulunur. Diğer terimler standart K-ε formundaki sabitlerdir. Aşağıdaki tablo bu sabitleri göstermektedir

Çizelge 3.1. Standart k-Ɛ türbülans modelinde kullanılan Sabitler

| Sabit türü | $C_M$ | $\sigma_k$ | $\sigma_\varepsilon$ | $C_{1\varepsilon}$ | $C_{ZE}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Değer | 0.09 | 1.00 | 1.30 | 1.44 | 1.92 |

### 3.3.5. Eddy dissipation concept (EDC) modeli

Yanma analizleri, yanma reaksiyonları ve türbülanslı akışların meydana gelmesi nedeniyle karmaşık ve zordur. Bu nedenle, kimyasal reaksiyonlar için tutarlı ve doğru sonuçlar sağladığı kanıtlanmış olan Eddy dissipation concept (EDC) modellemesi kullanıldı. EDC, çok aşamalı reaksiyon mekanizmaları için uygun olan bir türbülans-reaksiyon modelidir. Aşağıdaki denklem, EDC modelindeki türbülans ölçüsünü göstermektedir [36].

$$r^{*}= 2.137\left(\frac{M\varepsilon}{k^2}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{3.12}$$

### 3.3.6. Sınır koşullarının belirlenmesi

Tez çalışmasında yakıt olarak metan, oksitleyici olarak hava, seyreltici olarak $N_2$, seyreltici olarak $CO_2$ ile Ar ve He kullanılmıştır. Çalışma kapsamında renksiz dağıtılmış yanma koşullarını sağlamak için, yanma odasına girmeden önce belirli oranlarda hava ile karıştırılan azot seyreltici olarak seçilmiştir. Yanma odasındaki oksijen miktarının artması havadaki oksijen konsantrasyonunun azalmasına neden olur ve böylece renksiz dağıtılmış yanma süreci uygulanır.

### 3.3.7. Ansys fluent programı

Çok amaçlı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) programıdır. CFD programı akışkan akışını, ısı ve kütle transferini, kimyasal reaksiyonları vb. modellemek için yaygın olarak kullanılan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılım paketidir. Bu program çok çeşitli sorunları analiz etmek için kullanılabilir. Ön işleme aşamasından son işleme aşamasına kadar hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin işini tek bir pencere iş akışı içinde basitleştiren modern ve kullanımı kolay bir arayüz sağlar. Bu program mühendislik ve fizik simülasyonunda vb. yaygın olarak kullanılır, program tek boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu sorunları çözmek için bir dizi öğe içerir.

# 4. MATERYAL VE METOT

## 4.1. Simülasyon

Simülasyon, bir süreç veya sistemin geleneksel bir temsili olarak ifade edilebilir. Süreç veya sistem gerçek dünyada mevcut olup modelleme çalışmaları yapılabilir [48-50]. Simülasyon aynı zamanda esas olarak gerçek veya sanal bir sistemi bilgisayarda modelleme olarak düşünülebilir. Modelleme ile gerçek veya sanal sistemleri inceleme ve böylece simülasyondaki parametreleri değiştirerek bu sistemin veya durumun nasıl çalıştığını anlamımızı sağlar. Sonuç olarak sistemin davranışı hakkında tahminler yapılabilir. Bilgisayar simülasyonu fizik, kimya ve mühendislik vb. alanlarda birçok doğal sistemin modellenmesinin yararlı bir parçası haline gelmiştir [51]. Bu sistemlerin işleyişi hakkında daha fazla bilgi için bilgisayar simülasyonunda bilgisayar durum geçişleri, girdileri ve çıktıları tanımlayan bir programı çalıştırılmalıdır [52]. Tez çalışmasında kullanılan modelleme için yanma odası tasarımı gerçekleştirilmiştir. Yanma odasındaki girdap hareketi sırasında yakıt ve hava girişi bir daire gibi olarak düşünülebilir. Basit matematiksel yasalar aracılığıyla oksitleyici alanı hesaplanabilir. Daha sonra bu yasalar kullanılarak $O_2$, $N_2$ ve $CO_2$ değerleri değiştirilerek CDC yöntemini uygulanabilir. Tez çalışmasında kullanılacak modellemedeki seyreltici hesaplamaları aşağıda detaylı bir şekilde sunulmuştur.

Hesaplama için;

$$Mair = P(air) \times V(air) \times Ac(air) \quad (4.1)$$

Burada:
M=kütle akış hızı
$\rho$=hava yoğunluğu
$A_c$=hava girişi alanı

Bu işlemden sonra havanın kütlesini çıkarılarak, havadaki her bir gaz bileşeninin yüzdesi ile havanın kütlesi çarpılarak %23 oranındaki $O_2$ kütlesini ve %77 oranındaki $N_2$ kütlesini çıkarılır.

M(air) = $\rho_{air} * V_{air} * Ac_{air}$ =1.2 * 12.8 * 1.57 $10^{-3}$ = 0.0241152 kg/s




0.0241 * 0.23 = 5.543 $* 10^{-3}$ 0.0241 * (0.77)= 0.01856

CDC yöntemi için gerekli olan sınır koşulları aşağıdaki hesaplamalar yoluyla elde edilir. $O_2$ yüzdesi %23 oranında sabit tutularak, yeni $O_2$ oranlarında oksitleyicinin kütlesi hesaplanır.

Ve sonra $M_{(oksitleyici)}=M_{O2}+M_{N2}$ (4.2)

Daha sonra $O_2$ ve N2'nin hacim oranı;

$$F= \frac{\emptyset O2}{\emptyset(total)} \quad (4.3)$$

F= $O_2$ için hacimsel kesir

Ø= $O_2$ yoğunluğu

$$\emptyset = \frac{M_{O2}}{\rho_{O2}}$$

$\emptyset = 5.546 * 10^{-3}$ /1.305 = 4.25$* 10^{-3}$ $m^3$/s

N2 için:

$$\emptyset = \frac{M_{N2}}{\rho_{N2}}$$

$\emptyset = \frac{0.0196}{1.143}$ =0.0171 $m^3$/s

$f_{O2}=\frac{\emptyset_{O2}}{\emptyset_{Total}} = \frac{4.25*10^{-3}}{4.25*10^{-3}+0.0171}$ =0.199

$f_{N2}$= 1-0.199 = 0.801

$\rho_{oksitleyici}= \rho_{O2}xf_{O2} + \rho_{N2}xf_{N2}$

$\rho_{oksitleyici}$=(1.305x0.199)+(1.143x0.801)=1.1752 $kg/m^3$

Ve eksenel hız;

$V_{oxdizer} = M_{oxidizer} / \rho_{oxidizer} * Ac_{oxidizer}$ (4.4)

$V_{oxidizer}=\frac{0.0252}{1.175*1.5710^{-3}}$ =13.66 $m^3$ /S

Yukarıdaki hesaplamalar $N_2$ seyreltmesi durumunda ve %22 Oksijen konsantrasyonu için uygulanmıştır. Aynı yöntem ve hesaplamaları kullanarak %21 $O_2$'den %15'e kadar hesaplamalar yapılarak bulunan değerler programa entegre edilmiştir.

Çizelge 4.1. %$O_2$ değişimiyle $N_2$ ve oksitleyici konsantrasyonundaki değişim

| % O2 | $m_{Oksitleyici}$ | MN2 |
|---|---|---|
| % 22 | 0.0252 | 0.0196 |
| % 21 | 0.0264 | 0.0208 |
| % 20 | 0.0277 | 0.0222 |
| % 19 | 0.0292 | 0.0236 |
| % 18 | 0.0308 | 0.0252 |
| % 17 | 0.0326 | 0.0270 |
| % 16 | 0.0346 | 0.0291 |
| % 15 | 0.0369 | 0.0314 |

Daha sonra her $O_2$ konsantrasyonu için programa girilmesi gereken $CO_2$ değerleri hesaplandı.

$M_{CO2} = M_{oxidizer} - M_{O2} - M_{N2}$ 3,17. (4.5)

Yukarıda yapılan hesaplamadan Moksitleyici, $M_{O2}$ ve $M_{N2}$ değerlerini bilindiği için;

$M_{CO2}$= 0.0252 - $5.546 * 10^{-3}$ – 0.019

%22 $O_2$ için; $M_{CO2} = 6.54 * 10^{-3}$ Kg/S

$F\ (CO2) = \frac{M(CO2)}{M(oxidizer)}$ .3,18 (4.6)

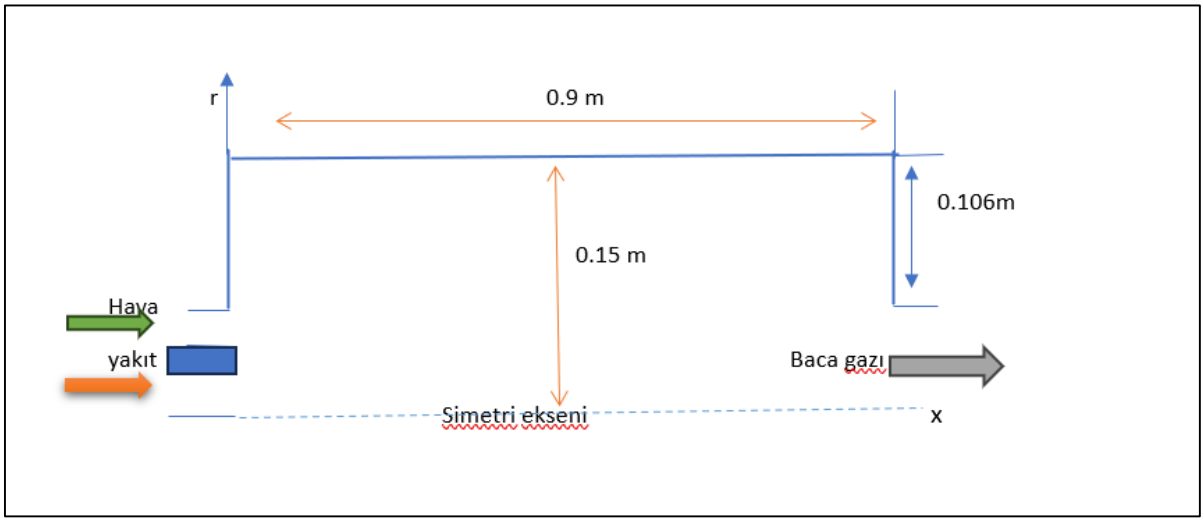
$F_{CO2}$=(6.5410x$10^{-3}$)/0.0252 = 0.02595≈ 0.0256 verisini % 22 $O_2$'den başlayarak % 15 $O_2$'ye ulaşana her bir oran için hesaplanır. Aynı şekilde bu hesaplamalar Ar ve He içinde yapılır.

Çizelge 4.2. Oksijen derişimi değişimiyle oksitleyicideki $CO_2$, Ar ve He kütle miktarları

| % $O_2$ | $m_{Oksitleyici}$ | $FCO_2$ | $F$Ar | $F$He |
|---|---|---|---|---|
| % 22 | 0.0252 | 0.0256 | 0.0256 | 0.0256 |
| % 21 | 0.0264 | 0.070 | 0.070 | 0.070 |
| % 20 | 0.0277 | 0.113 | 0.113 | 0.113 |
| % 19 | 0.0292 | 0.159 | 0.159 | 0.159 |
| % 18 | 0.0308 | 0.203 | 0.203 | 0.203 |
| % 17 | 0.0326 | 0.247 | 0.247 | 0.247 |
| % 16 | 0.0346 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |
| % 15 | 0.0369 | 0.33 | 0.33 | 0.33 |

## 4.2. Yanma sistemi ve modelleme parametreleri

Sayısal modellemelerde Harwell fırını (Şekil 4.1.) olarak bilinen bir yanma sistemi kullanılmıştır. Bu türbülanslı bir alev üreten doğal gaz fırınıdır, yanma odasının uzunluğu 0,9 m ve odanın yarıçapı 0,15 m'dir [60,61]. Simülasyonda metan yakıtı 0,006 m yarıçaplı merkezi bir tüp aracılığıyla yanma odasına beslenmiştir. Dönen hava, iç yarıçapı 0,0065 m ve dış yarıçapı 0,0275 m olan merkezi bir halka kanalı aracılığıyla enjekte edilmiştir. Akış hızı 0,00114 km/s'dir. Bu da 15 m/s hıza karşılık gelmektedir. Oksitleyici, yakıt ve havanın iyi karışmasını sağlayan bir dönen jeneratör aracılığıyla yanma odasına gönderilmektedir. Çalışmanın ikinci aşamasındaki metan yakıtına $H_2$ eklendiği durumda da aynı yakıt girişi kullanılmıştır. Tablo 1'de çalışmada kullanılan parametreler gösterilmektedir.




Şekil 4.1. Yanma odasının fiziksel alanı

Havanın eksenel hızı 12,8 m/s ve brülörün girdap sayısı (0,4)'tür. Aynı zamanda, yakıt ve havanın sıcaklığı 295 K'dir ve türbülanslı kinetik enerji ve dağılma oranı sırasıyla 1,63 $m^2/s^2$ ve 692 $m^2/s^2$'dir. Yakıt için ise kinetik enerji ve türbülanslı genleşme oranı sırasıyla 2,26 $m^2/s^2$ ve 1131,8 $m^2/s^2$'dir.

Çizegle 4.3. Yanma odasının çalışma koşulları

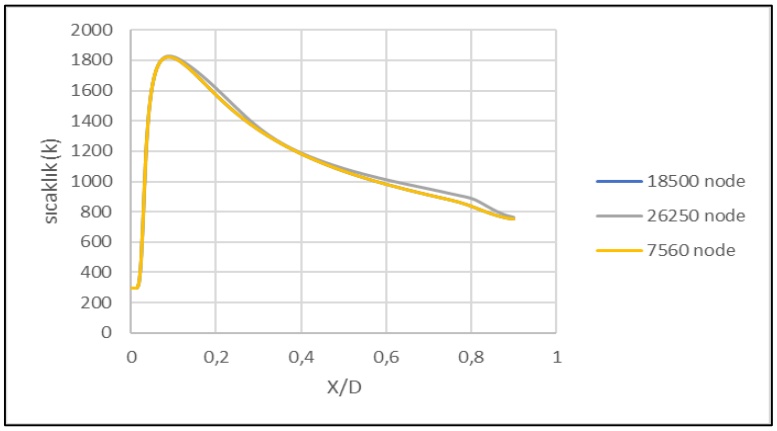
| Geometri | | |
|---|---|---|
| Yakıt giriş bölgesi(m) | r=0.0'dan | r=6.0'a |
| Hava giriş bölgesi(m) | r=16.5'ten | r=27.5'e |
| Fırın çapı(m) | 0.15 | |
| Fırın uzunluğu(m) | 0.9 | |
| Giriş sınır koşulları | Yakıt | Hava |
| Eksenel hız (m/s) | 15.0 | 12.8 |
| Radyal hız (m/s) | _ | _ |
| Türbülanslı kinetik enerji ($m^2/s^2$) | 2.26 | 1.63 |
| Türbülansın dağılma hızı ($m^2/s^3$) | 1131.8 | 692.0 |
| Sıcaklık(k) | 295 | 295 |
| Girdap sayısı(-) | _ | 0.4 |
| Bileşim (kütle kesri) | Yakıt | Air |
| $O_2$ | _ | 0.2315 |
| $N_2$ | _ | 0.7685 |
| $CH_4$ | 1.0 | |

### 4.2.1. Sayısal model

Bu çalışmada, yakıt başlangıçta %100 $CH_4$ ve sonra yakıt oranı %30 $H_2$ + %70 $CH_4$ kullanıldı. Oksitleyici olarak hava kullanıldı ve kütlece %23,15 $O_2$ ve %76,85 $N_2$ karışımından oluşturuldu. Yakıt yanma odasına girmeden önce karıştırma işlemine tabi tutulmadı. Farklı oksijen oranlarında oksitleyici ile yanma koşulları altında gazla (metan) ateşlenen bir Harwell fırınındaki türbülanslı yanma akışlarını çözmek için ticari bir yazılım (Ansys Fluent) kullanıldı. Türbülans modeli K-epsilon, $C_{mu}$ = 1.0, $C_1$ = 1.44 ve $C_2$ = 1.92 seçildi. Yanmanın modellenmesi için (Eddy-dispation modeli [64], basit olması ve türbülanslı reaksiyon akışlarını tahmin etmedeki güçlü performansları nedeniyle kullanıldı. Sayısal tahminler sabit bir akış ve 2D eksenel simetrik durum için gerçekleştirilmiş olup, artıkların 0,000001'den küçük olduğu durumda modellemelerin yakınsadığı kabul edilmiştir.

### 4.2.2. Ağ yapısından bağımsızlaştırma

Daha az hesaplama süresi ve daha iyi doğruluk elde etmek için, çözümün oluşturulan ağ yapısıdan bağımsızlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için üç farklı hücre sayısı kullanılmıştır (7659, 18500, 26250). Seçilen değerler için sıcaklık dağılımı sonuçları Şekil (2)'deki gibi elde edilmiştir. Modelleme çalışmasında 18500 ağ yapısı tercih edildi. Çünkü bundan daha yüksek hücre sayıları için sonuçlarda herhangi bir değişikliğe rastlanılmamıştır.




Şekil 4.2. Üç farklı hücre sayısı için eksenel sıcaklık profilleri

Uygun ağ yapısı seçildikten sonra, %23 $O_2$'de sıcaklık değerleri ve emisyonlar elde etmek için herhangi bir seyreltici ilavesi olmadan ön karışımlı olmayan bir brülörde metanın hava ile yanması modellendi. Daha sonra, $O_2$ değerlerini sabit tutarken oksitleyiciye seyreltici ekleyerek renksiz dağıtılmış yanma (CDC) yöntemini uygulandı. CDC yöntemi oksitleyicide kullanılan seyrelticinin artmasına ve O konsantrasyonunun azalmasına neden olmuştur.

## 4.3. Seyrelticiler

### 4.3.1. Karbondioksit

Oksijen ve karbondan oluşan bir kimyasal bileşik olup, standart basınç ve sıcaklık koşullarında renksiz, kokusuz ve yanıcı olmayan bir gazdır. Yanmazlık özelliği, renksiz dağıtılmış yanma yönteminde kullanılan seyrelticilere ($N_2$, $CO_2$, He, Ar) benzemektedir. Ayrıca $CO_2$, çevreyi etkileyen önemli sera gazlarından biridir. Tüm yanma işlemlerinde yeterli hava mevcut olduğunda, hava ve yakıt karışımının oranı beklenen seviyelerde tutulur

ve bunun sonucunda yanma ürünleri arasında $CO_2$ bulunur. $CO_2$, Renksiz dağıtılmış yanma yönteminde ve inceltici olarak ortama verildiğinde, oksitleyici içindeki oksijeni azaltarak sıcaklıkları düşürür. Bu özellikleri nedeniyle bilgisayar simülasyonu üzerinde çalışan ve Ansys fluent programını kullanan çalışmalarda $CO_2$ inceltici olarak kullanılmıştır [37,41].

### 4.3.2. Azot

Azot evrende yaygın bir elementtir ve bu nedenle en bol bulunan saf kimyasal elementtir. N2 yanıcı olmayan bir gazdır ve soğutma işlemlerinde kullanılır [76]. $N_2$ gazı, Dünya atmosferini oluşturan gazların en büyük oranını oluşturur. Çünkü kuru havada hacimce %78,08 ve ağırlıkça %75,53 oranında bulunur [77]. Azot gazının fiziksel özelliklerinin bir sonucu olarak, bu gaz, bilgisayar simülasyonu yoluyla renksiz dağıtılmış yanma yöntemini (CDC) uygularken seyreltici bir malzeme olarak kullanılır. $N_2$ gazı yanma odasına eklendiğinde $O_2$ konsantrasyonunu azaltacak ve yanma oranını düşürecektir. $N_2$'yi seyreltilmiş ham gaz olarak kullanmak, simülasyon işlemi sırasında termodinamik kararlılığa ulaşmak için işe yaramaktadır. $N_2$ gazıda diğer seyrelticilerde olduğu gibi CDC uygulamalarında kullanılmıştır [37,41].

### 4.3.3. Helyum

Helyum bir soy gazdır ve neondan sonra en az reaktif soy gazlardan biri olarak kabul edilir, yani en az reaktif elementlerden biridir [75]. Tüm standart koşullar altında kimyasal olarak inert ve monoatomiktir. Helyumun nispeten düşük mol kütlesi nedeniyle, ısıl iletkenliği ve özgül ısısı yüksektir. Monoatomik olarak küçük boyutundan dolayı katılarda havadan üç kat daha hızlı yayılır. Helyumun yanıcı olmaması nedeniyle yanmayı geciktirir. Helyumun, insanlar arasında yaygın olan balonlarda kullanımı dışında birçok kullanımı vardır, ancak en yaygın olanı kriyojenik uygulamalardır. Uygulama alanları arasında özellikle çoğu tıp alanında kullanılan manyetik rezonans görüntüleme cihazlarında süperiletken mıknatısları soğutulması süreci vardır [76].

### 4.3.4. Argon

Argon (Ar), soy gazlar grubuna ait havadan ağır ve inert bir elementtir. Argon standart basınç ve sıcaklık koşulları altında monatomik bir gaz formunda bulunur. Argon suda çözünür,

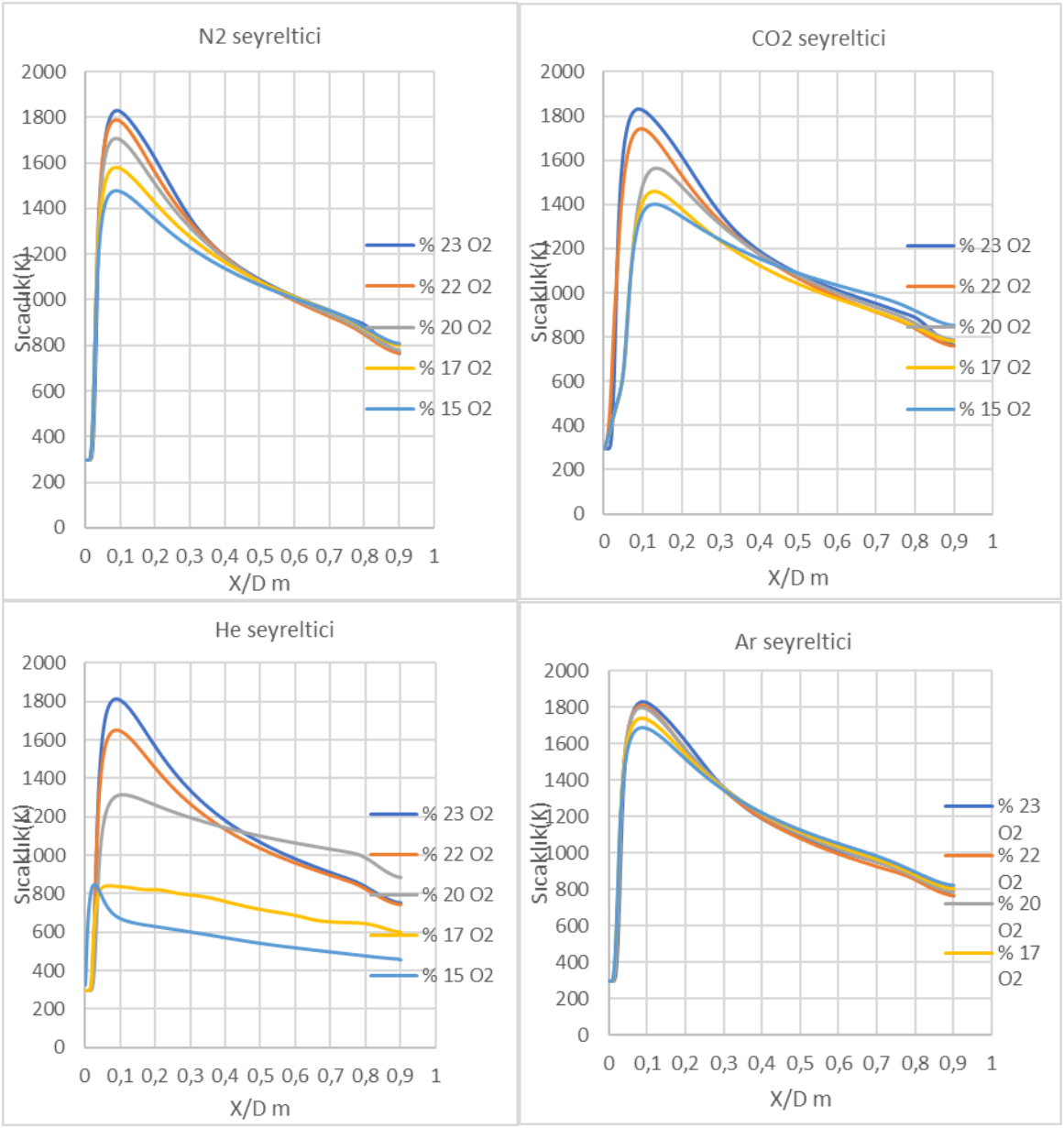
normal basınçta ve 0 °C sıcaklıkta litre su başına 53,6 mililitresini çözer [77]. Argonun en dış yörüngesindeki kabuğu elektron ile doludur. Bu nedenle element kimyasal inertlikle karakterize edilir ve normal koşullar altında herhangi bir elementle reaksiyona girmez. Kimyasal bileşikler oluşturmak için reaksiyona girme eğiliminde olmayıp zorlu koşullar altında reaksiyona girebilir ve ortaya çıkan bileşikler kararsızdır. Argon inert bir gaz ve aynı zamanda bir termal yalıtkan olduğundan, birçok kullanım alanı vardır.

# 5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

## 5.1. Metan/Hava Karışımı için Modelleme Sonuçları

### 5.1.1. Isıl alan karakteristikleri

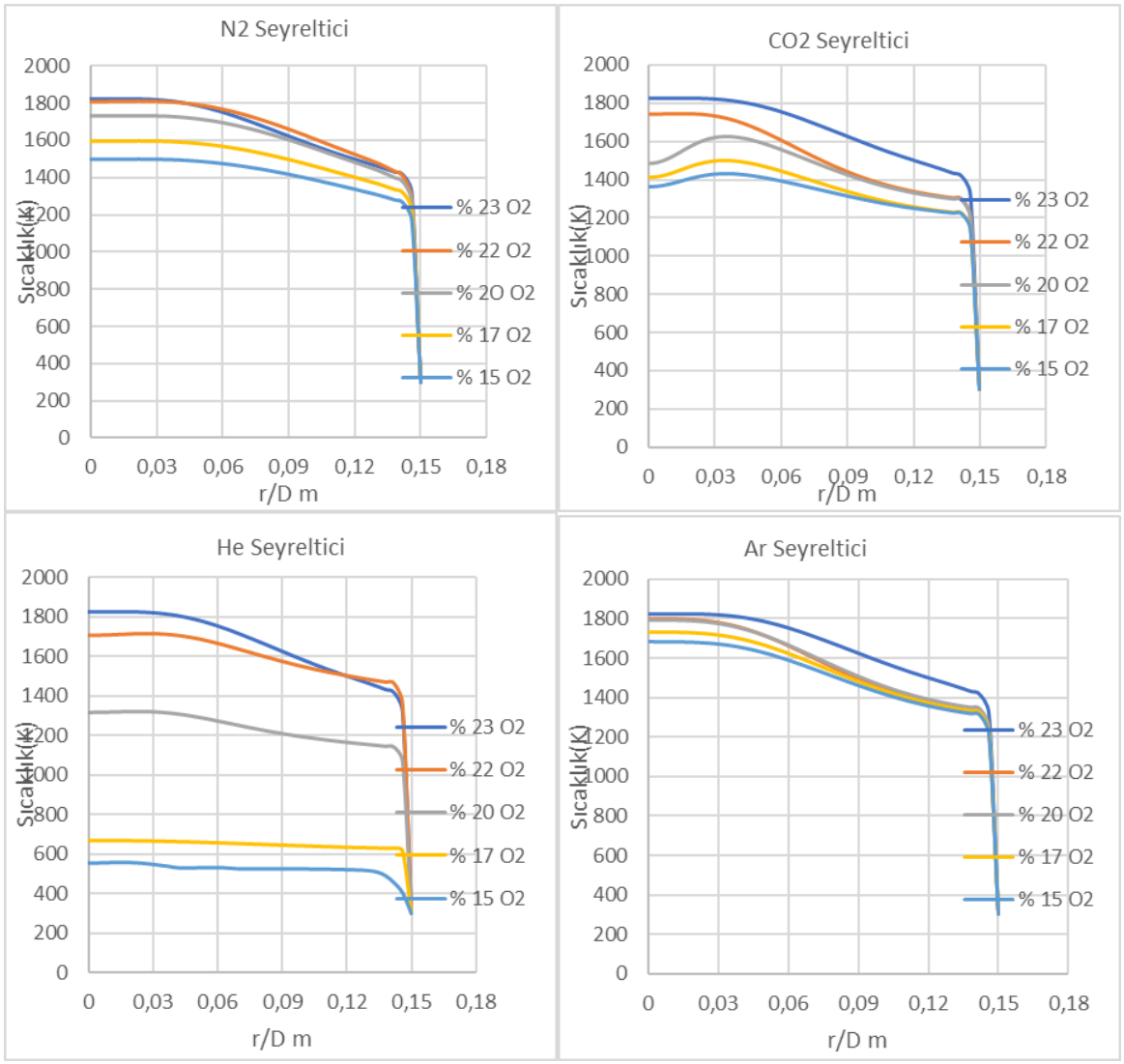
Tez çalışmasında CDC yönteminin uygulanması için $O_2$ derişimi sabit tutularak $N_2$, $CO_2$, He ve Ar seyrelticileri kullanılmıştır (Şekil 5.1). $N_2$ derişimlerinin artırılması ile sıcaklıklarda düşüş olduğu görülmüştür. $N_2$ derişimi artıkça ortamdaki $O_2$ miktarı %20'nin altına düşerek sıcaklıktaki düşüsün daha net olduğu Şekil 5.1.a'da görülmektedir. %15 $O_2$ derişiminde sıcaklık değeri en düşük değerde bulunmaktadır. Sıcaklıktaki bu düşüşün temele nedeninin yanma odasindaki $N_2$ derişimlerinin artırılmasıyla yanmaya doğrudan katkı sunan $O_2$ derişimlerininin düşmesidir. Seyreltici olarak $CO_2$ kullanıldığında ise %23'lük $O_2$ derişimi olarak bilinen geleneksel yanmaya göre sıcaklıklardaki düşüş Şekil 5.1.b. de görülmektedir. CDC tekniği ile birlikte ile $O_2$ derişimindeki azalış ile birlikte yanma odasının sıcaklığı düşmüştür. $CO_2$Yanma odasına gönderilen gazların özgül ısısının yüksekliği yanma sırasındaki sıcaklığı absorbe ederek sıcaklığın düşmesinin temel etkenidir [37]. Yapılan modellemede hem $N_2$ hem de $CO_2$ gibi gazların yanma odasına gönderilmesi sıcaklığın düşmesine sebebiyet vermiştir.




Şekil 5.1. Seyreltici türüne göre (Şekil 5.1.a. $N_2$, Şekil 5.1.b. CO2, Şekil 5.1.c. He ve Şekil 5.1.d. Ar) uygulanan CDC'nin eksenel sıcaklık profili üzerindeki etkisi.

Yanma odasına He ve Ar gibi diğer gönderilen ($N_2$ ve $CO_2$ gibi) gazlara göre daha hafif ve inert gazların gönderilmesi ile elde edilen sıcaklık değişimlerine ait sonuçlar Şekil 5.1.c. ve 5.1.d. 'de gösterilmiştir. Yanma odasına He eklendiğinde %22 $O_2$ derişiminden %15 $O_2$ derişimine kadar sıcaklıklarda keskin bir düşüş olduğu görülmüştür. Sıcaklıkta gözlemlenen keskin düşüşün He'un diğer malzemelerle reaksiyona girmeyişinin yanısıra inert olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda He'un yakıtı ve yanma reaksiyonunu çevrelemesi ile yanma verimini düşürdüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca, argondan büyük olan helyumun özgül ısı kapasitesi, sıcaklıkları önemli ölçüde düşürmede yardımcı olmuştur.

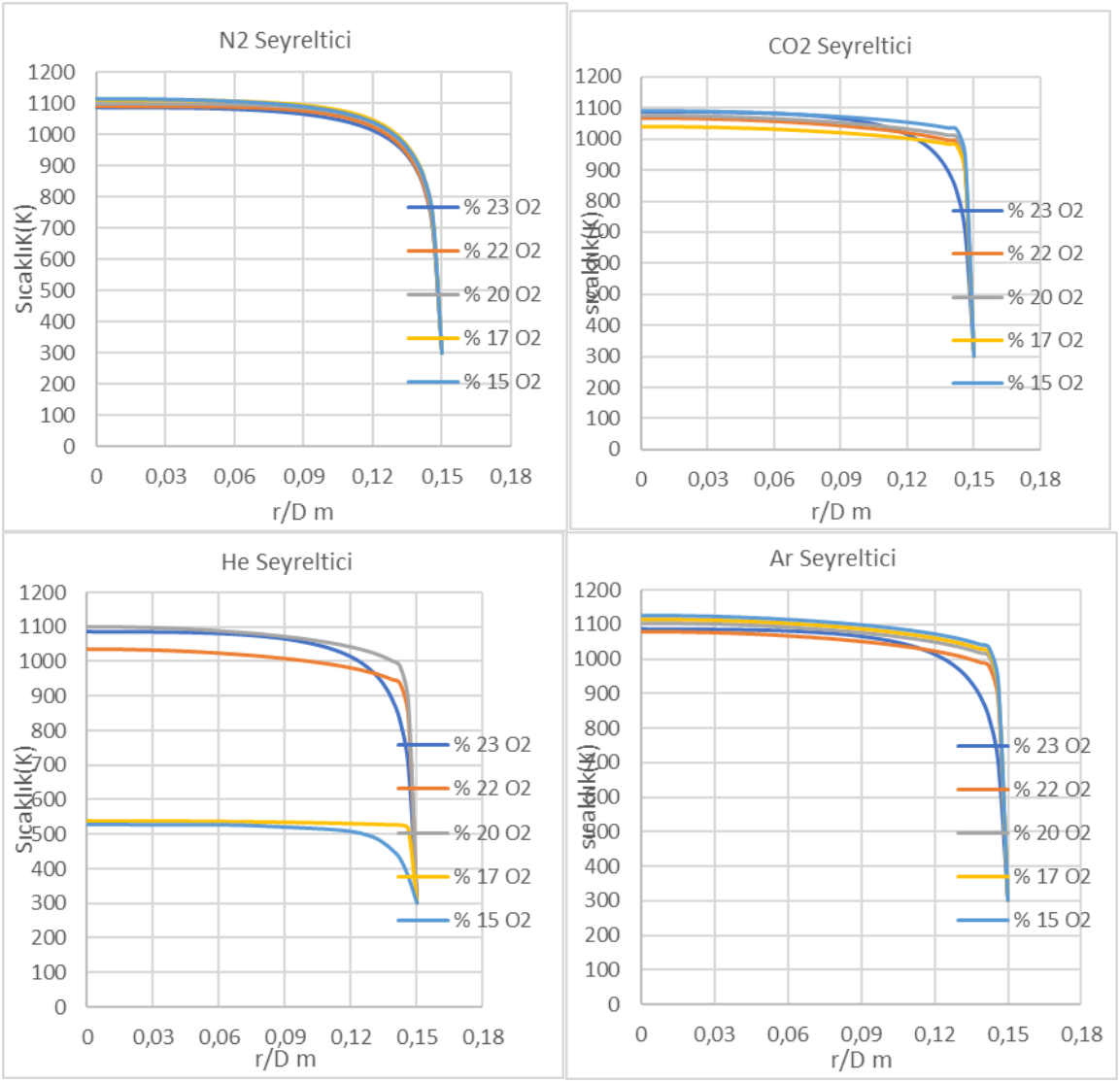
Diğer taraftan, kasrışıma Ar eklendiğinde sıcaklık düşüşünün çok az olduğu görülmüştür. Bunun nedeni argonun diğer malzemelerle reaksiyona girmeyen ve yanmayan inert bir element olmasıdır. Özgül ağırlığından dolayı Ar havadan 1,5 kat daha ağırdır. Dolayısıyla Ar'nin, yanma odasının dibine çökerek yanmayı etkilemediği, böylece yanma reaksiyonunu engellemediği için sıcaklık düşüşünün daha az olmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir.




Şekil 5.2. 0,1 m radyal eksende seyreltici ile uygulanan CDC'nin etkisi, sıcaklık profili ( a) $N_2$, b)$CO_2$, c) He ve d) Ar Seyreltici)

Yanma odasının farklı radyal eksenel bölgelerinde (0,1 m, 0,5 m ve 0,85 m) CDC yöntemi ile tez kapsamında kullanılan seyreltıcilerin sıcaklık üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Öncelikle radyal eksenel 0,1 m seçilmiştir (Şekil 5.2.a). 0,1 m radyal eksenelde N2 seyreltici olarak kullanıldığında CDC yönteminin sağladığı koşullar nedeniyle sıcaklıkta düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 5.2.a.). Aynı yanma odasına $N_2$ yerine $CO_2$ seyreltıcisi

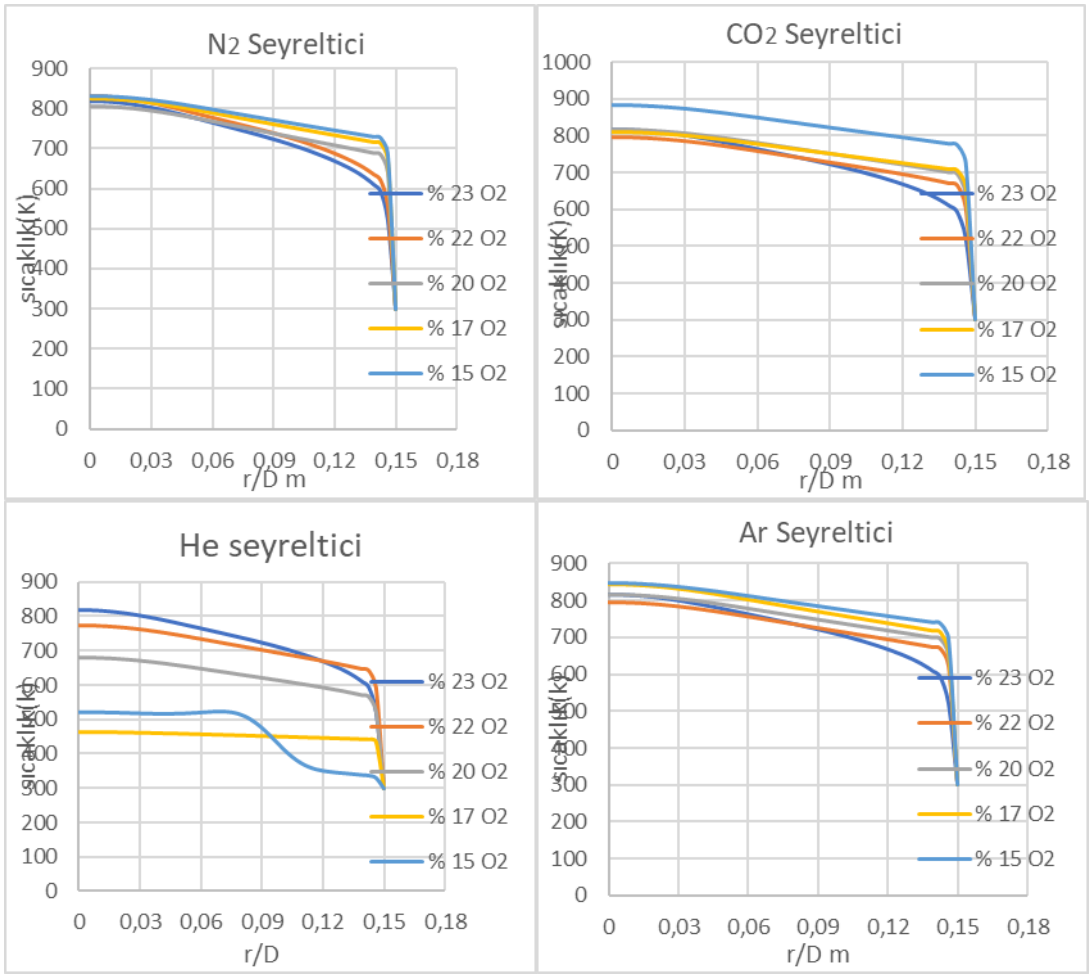
gönderildiğinde oksijen derişiminin %22'den %15'e düşmesi sonucunda sıcaklıktaki düşüş eğilimi $N_2$ göre daha fazladır (Şekil 5.2.b.). $CO_2$'in özgül ağırlığının fazla olması ve daha fazla özgül yanma ısısına sahip olması $N_2$''ye göre sıcaklığın daha fazla düşmesine sebebiyet vermiştir. He' un seyreltici olarak kullanıldığı CDC koşullarında ise sıcaklıkta keskin düşüşler görülmüştür (Şekil 5.2.c.). Keskin düşüşlerin sebebinin He'un oldukça hafif olması ve reaksiyonun etrafını sararak sıcaklıkların keskin düşmesine sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Sıcaklıklardaki azalışları destekleyen yakın bir tarihte litaretürde yapılan bir çalışmada yine CDC tekniği kullanılmıştır. Litaretürde yapılan çalışmada parametrelerin tez kapsamındaki paramterelerden farklı olduğu sürecin yine sıcaklık azalışı ile sonuçlandığını göstermektedir [39]. Dolayısıyla He için elde edilen sıcaklık düşüşü sonuçları liatretrü desteklemektedir. Yanma odasında seyreltici olarak Ar kullanıldığında ise sıcaklıktaki azalış eğilimi devam etmektedir (Şekil 5.2.d.) CDC yöntemi sayesinde farklı seyrelticiler kullanılarak 0,1 m radyal eksenel bölgesindeki sıcaklık profillerindeki düşüş eğilimi devam etmektedir [26] .




Şekil 5.3. 0,5 m eksenel radyalde (a.$N_2$, b.$CO_2$, c.He ve d.Ar seyreltici) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık etkisi

Yanma odasının radyal ekseninin 0,5 m olduğu durumda elde edilen sıcaklık profilleri şekil 5. 3. te gösterilmiştir. CDC yönteminin uygulanması ile birlikte sıcaklıklardaki düşüşler her bir seyreltici için belirlenmiştir. Özellikle yakıt ve hava içeriği barındırmayan gazların ($H_2O$, $CO_2$, vb.) gönderilmesinin sıcaklıkta bir azalmaya yol açtığı belirtilebilir [37]. Ayrıca, yüksek özgül ısıya sahip gazların kullanımının sıcaklığı daha da düşürme konusundaki sonuçları devam etmektedir [37], bu yukarıdaki grafiklerde açıktır. CDC yönteminin uygulanması ile 0,5 m'de sıcaklık dağılımının yakın olduğu (5.3.a,5. 3.b, ve5. 3.d) grafiklerinden açıkça anlaşılmaktadır. Bu durum yanma odasının 0,5 m radyal eksenel konumda daha homojen bir termal alan ve iyi bir sıcaklık dağılımı sağlandığını göstermektedir [39]. He'nin seyreltici olarak kullanılması ile ilgili sıcaklık profili Şekil (5.3.c.) de görülmektedir. Helyumun fiziksel özelliklerinden dolayı sıcaklıkta keskin bir

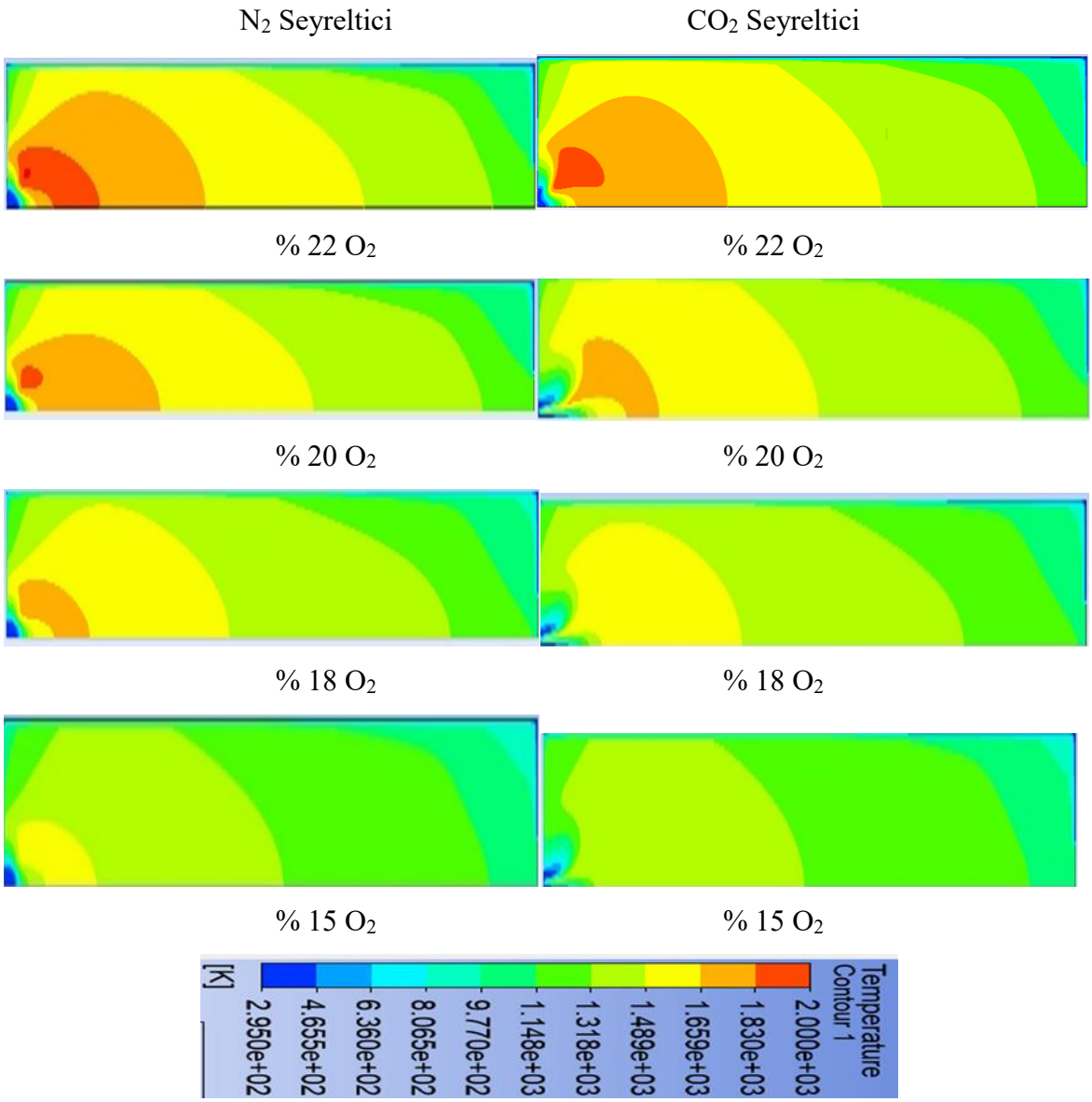
düşüş görülmüştür. Seyreltici olarak argon kullanılması durumunda ise (Şekil 5.3.d), farklı argon konsantrasyonlarında ve dolayısıyla farklı oksijen konsantrasyonlarında sıcaklık değerlerinde benzerlik görülmektedir. Helyum ve argonun sıcaklıklar üzerindeki etkisi arasındaki fark, benzer özelliklere sahip inert elementler olmalarına rağmen havadan bir buçuk kat daha ağır olan argonun ağırlığının, sıcaklıklar üzerindeki bu farklı etkiyi oluşturacağı düşünülmektedir. Ancak, argonun kullanımı ayrıca sıcaklıklarda bir azalmaya ve yanma odasında ısının homojen bir şekilde dağılmasına yol açmıştır [39].




Şekil 5.4. 0,85 m eksenelde mesafede (a. $N_2$, b.$CO_2$, c.He ve d. Ar) seyreltici ile uygulanan CDC'nin etkisi, sıcaklık profili.

Yanma odasının 0,85 m eksenel mesafesinde olarak seçildiğinde elde edilen sıcaklık profillerine ait grafikler Şekil 5.4 te verilmiştir. Modelleme sürecinde yanma odası eksen uzunluğu 0,9 m seçilmiştir. Bu kısımda seçilen 0,85 m eksenel mesafe yanma odasının en uç bölgesine yakındır. Sıcaklık profillerindeki eğilim daha önce çalışılan 0,1 m ve 0,5 m için elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Bu eğilim modellenen yanma odasında

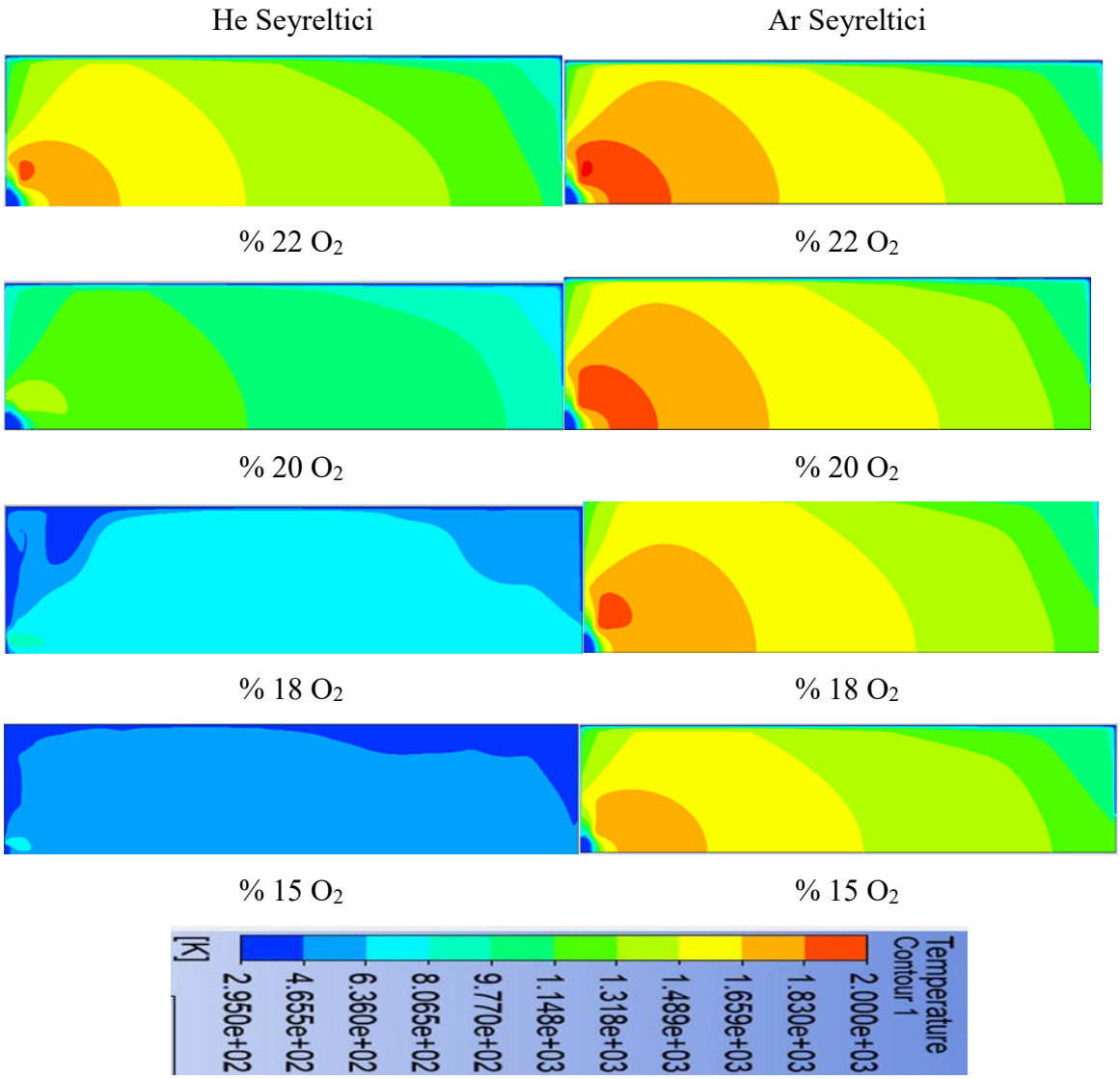
gerçekleşen reaksiyonun odanın tüm noktalara ulaştığını ve yanma derecesinin oda boyunca gözlemlendiğini göstermektedir [40]. Sıcaklıklar kullanılan seyreltici türünden bağımsız olarak düşünüldüğünde yanma odasının orta bölgesinden itibaren düşmeye başlamıştır. 0,85 m radyanal eksende yanma odası sıcaklığı en düşük seviyede gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler ışığında yanma odasına giren seyreltilmiş gaz, reaksiyon süresinin sonunda yanma odasındaki en uzak yere ulaşabilir olduğu Şekil 5.4.'ten her bir seyreltici için gösterilmektedir [37]. Teorik olarak artan akış hızı alevi yanma odasının içinde daha uzak noktalara itmektedir. Seyrelticilerin tanıtılmasıyla elde edilen temel amaç, yanma oranını vermek ve yanma odasının içinde daha etkili bir yanma yayılımı elde etmektir. Seyrelticiler, sahip oldukları fiziksel özelliklere bağlı olarak sıcaklıklar üzerindeki etkileri bakımından birbirlerinden farklılık göstermişlerdir. Örneğin, $CO_2$ gazı, $N_2$'den daha yüksek özgül ısıya sahip olduğundan sıcaklıkları düşürmede $N_2$'den daha iyi olduğu bu yanma odasının en uç bölgesinde geçerliliğini korumuştur [37]. Ayrıca, Ar ve He arasındaki fiziksel özellikler farklı olması sıcaklık değişimini etkilemiştir. Hatta, $CO_2$'nin büyük moleküler ağırlığından dolayı $CO_2$ ve He arasındaki sıcaklık değişimi üzerindeki etkiyi net bir şekilde ortaya koymaktadır[39]. CDC yöntemi kullanılması sırasında seyreltici gaz ve türünün önemi bütün modellemeler sonucunda önem kazanmaktadır [37]. Eksenel ve radyal sıcaklık profillerinin grafiklerinde özellikle düşük $O_2$ konsantrasyonunda seyreltici eklenmesi, alevin sönme eğilimini artırdığını ve böylece yanma reaksiyonunu durdurduğunu göstermektedir [39]. Bu durum, seyreltici türünün ve eklenen maddenin uygun konsantrasyonunun önemli olduğunu gösterir.




Şekil 5.5. a. CDC ile yapılan modelleme sonucunda elde edilen sıcaklık eğrileri (sol $N_2$ seyreltici ve sağ $CO_2$ seyreltici).

CDC ile yapılan modellemede kullanılan seyreltici türüne elde edilen sıcaklık eğrileri Şekil 5.5.a. ve 5.5.b.'de verilmiştir. Seyreltici olarak $N_2$ kullanıldığında $O_2$ derişimini yanma odasının giriş bölgelerinde çok etkilememiştir (Şekil 5.5.a. sol). Bu nedenle yakıtın çok az kısmının tüketilmesiyle yanma odasının başlangıç bölgelerinde %22 $O_2$ derişiminde sıcaklıklar artış olduğu görülmüştür. Yanma odasına seyreltici olarak $N_2$ verilmeye devam ettikçe yanma odasının giriş ve geri kalan bölgesinde $O_2$ derişimi düşmekte ve sıcaklıklar azalmaktadır. Ortamdaki %18 $O_2$ derişiminde seyreltici gaz olan $N_2$ gazının etkisi sıcaklıklarda belirgin bir azalmaya sebebiyet vermiştir. $O_2$ derişimi daha düşürüldükçe (seyreltici $N_2$ eklendikçe %15 $O_2$ konsantrasyonunda) azalmanın daha şiddetli olduğunu ve

alevin sönme eğiliminde olduğu sıcaklık eğrilerinde net görülmektedir [39]. $CO_2$'nin seyreltici olarak kullanıldığı CDC modellemesinde sıcaklıklardaki düşüşün daha fazla olduğu sıcaklık eğrilerinden görülmektedir (Şekil 5.5.a.sağ). $CO_2$'in yüksek özgül ısısı nedeniyle sıcaklıklardaki düşüşe önemli bir etki yaptığı görülmüştür. $N_2$ seyreltisine göre $CO_2$ seyreltici olarak kullanıldığında, %22 $O_2$ derişiminden %20 $O_2$ derişimindeki sıcaklık azalması daha şiddetli olmuştur. %15 $O_2$'ye ulaşıldığında alevin N2'den daha fazla sönme eğiliminde olduğu görülmüştür [37,39].




Şekil 5.6. b. CDC ile yapılan modelleme sonucunda elde edilen sıcaklık eğrileri.( sol He seyreltici ve sağ Ar seyreltici

Seyreltici olarak He (Şekil5. 5.b.sol) kullanıldığında sıcaklıklar diğer seyrelticilerde olduğu gibi düşmüştür. He seyrelticisi, çok hafif bir gaz olup yakıtı çevreleyerek yanma reaksiyonunu engellediğini ve yüksek özgül ısısının sıcaklıkların düşmesine yol açtığı

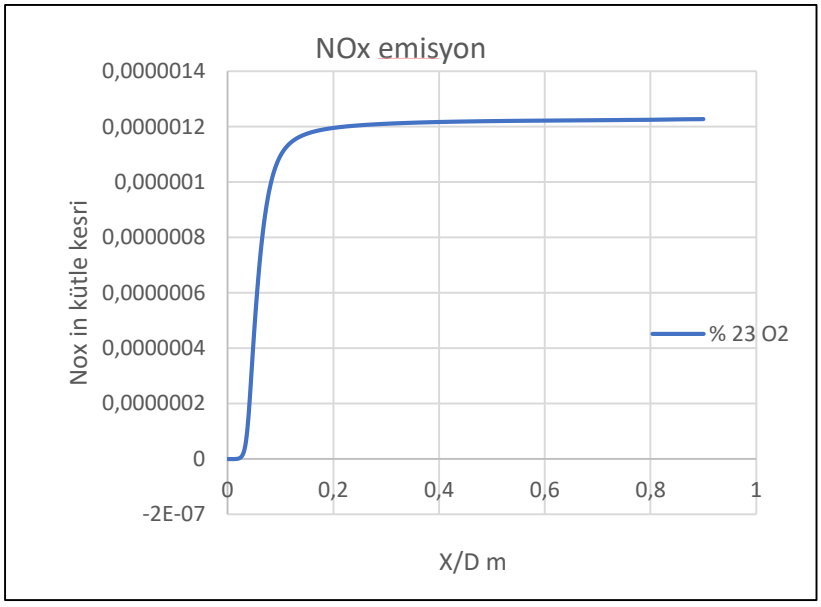
görülmüştür. %22 $O_2$ derişiminde azalmanın diğer seyrelticilerden daha şiddetli olduğu tespit edilmiştir, ancak %18 $O_2$ ve altındaki derişimlerinde güçlü bir sönme eğilimi olduğu sıcaklık eğrilerinden görülmektedir. Bu nedenle, seyreltici olarak He kullanıldığında, %19'luk $O_2$ derişiminden sonra alevin sönme eğiliminde olması ve yanma reaksiyonunun durması nedeniyle kullanılan derişime dikkat edilmelidir [39]. Ar'ın seyreltici olarak kullanımında %22 $O_2$ ve %20 $O_2$ derişimlerindeki sıcaklıklarda hafif bir düşüş gözlemlenmiştir (Şekil 5.5.b.sağ). Seyrelticinin etkisinin yanma reaksiyonunun sıcaklığını düşürmeye başladığı %18 $O_2$ derişiminde azalma belirginleşmeye başlayarak %15 $O_2$'de azalmanın daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

### 5.1.2. Emisyon karakteristikleri

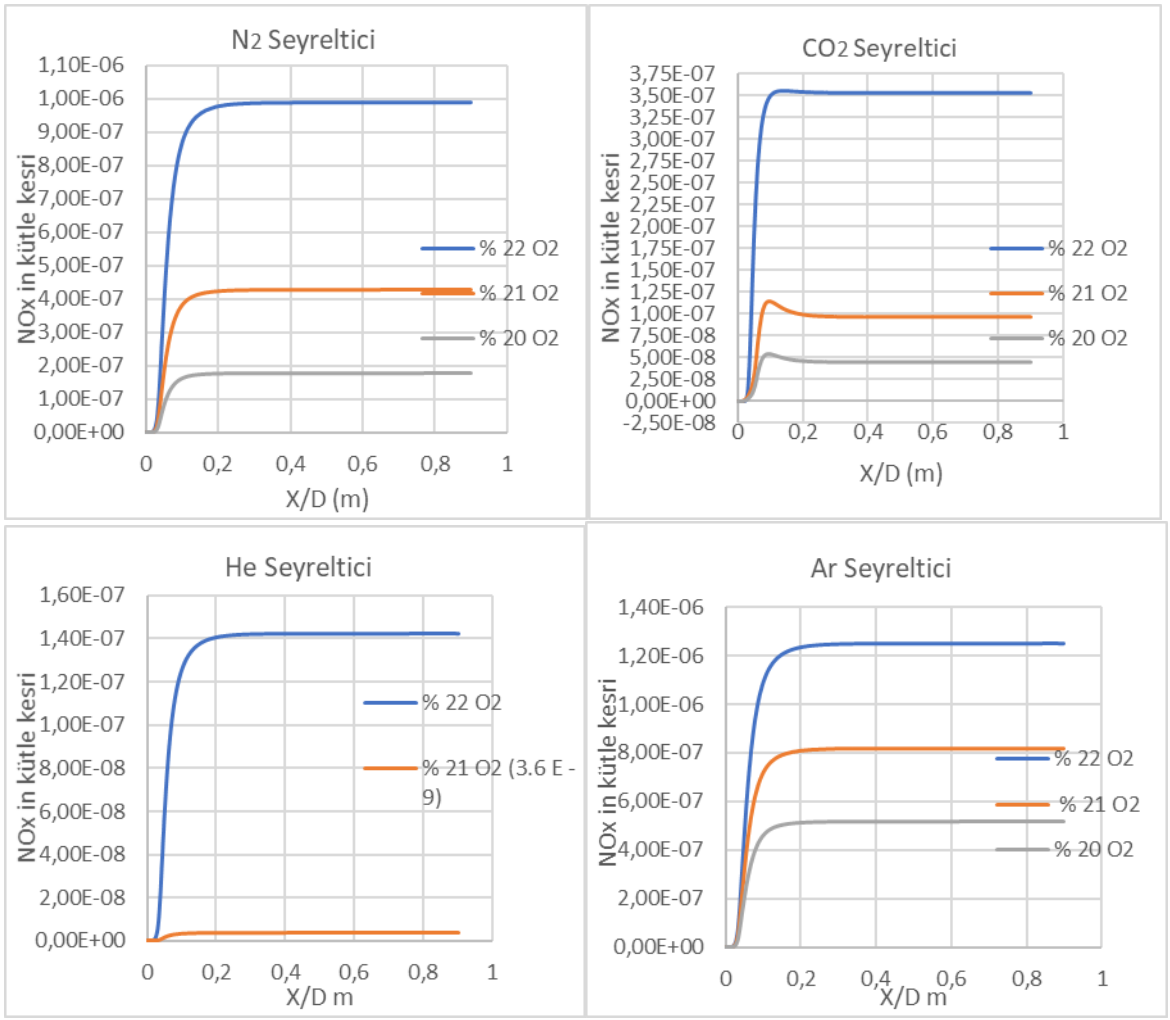
Her yanma reaksiyonu, yanma işlemi sırasında yakıttan emisyonlar üretir [26]. Bunun nedeni, yanma işleminin birkaç ardışık reaksiyona ulaştıktan sonra gerçekleşmesidir. Yanma birkaç aşamada gerçekleştiği için ara ürünlerin oluşumuna yol açar [4]. Bu ara ürünler doğrudan veya dolaylı olarak emisyonlar oluşturur. Örneğin, metanın havayla yani oksijenle reaksiyonu, tek adımda ise bu reaksiyondan $CO_2$ ve $H_2O$ üretir, ancak bu reaksiyon birden fazla adımda gerçekleşirse ara ürünü CO olan maddeler ortaya çıkabilir. Aynı şey, azot monoksit gibi diğer emisyonlara da olabilir. Bu nedenle, ara bileşikleri azaltmak için sıcaklığı düşürme işlemi büyük önem taşır. Oksitleyici içindeki $O_2$ konsantrasyonunu azaltmak için seyreltici malzemeler göndermek ve böylece sıcaklığı düşürmek faydalıdır. Çünkü yanma bölgesine daha seyreltilmiş bir gaz göndermenin bu ara ürünlerin yanma bölgesinde buluşma olasılığını azalttığına ve böylece emisyonları azalttığına inanılmaktadır. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda yanma sırasında emisyonların oluşumunun yükseldiği gözlemlenir [23].

<u>NOx emisyonları</u>

Yanma sırasında oluşacak emisnyonda azot oksit emisyonu gözlezlenebilir. Azot oksit derişimi yanma sürecinde sıfıra yakındır ve farklı $O_2$ derişimlerinde birbirinden uzak olarak gözlemlenebilir. Bu nedenle tez kapsamında NOx emisyonu yüksek ve düşük derişimlerde modelleme çalışmaları yapılmıştır [39]. Seyreltme sonuçlarını $NO_X$ emisyonları ile karşılaştırmak için seyreltici eklenmediği durumdaki $NO_X$ emisyonları yani % 23 $O_2$ derişimindeki emisyon Şekil 5.6.'da verilmiştir.

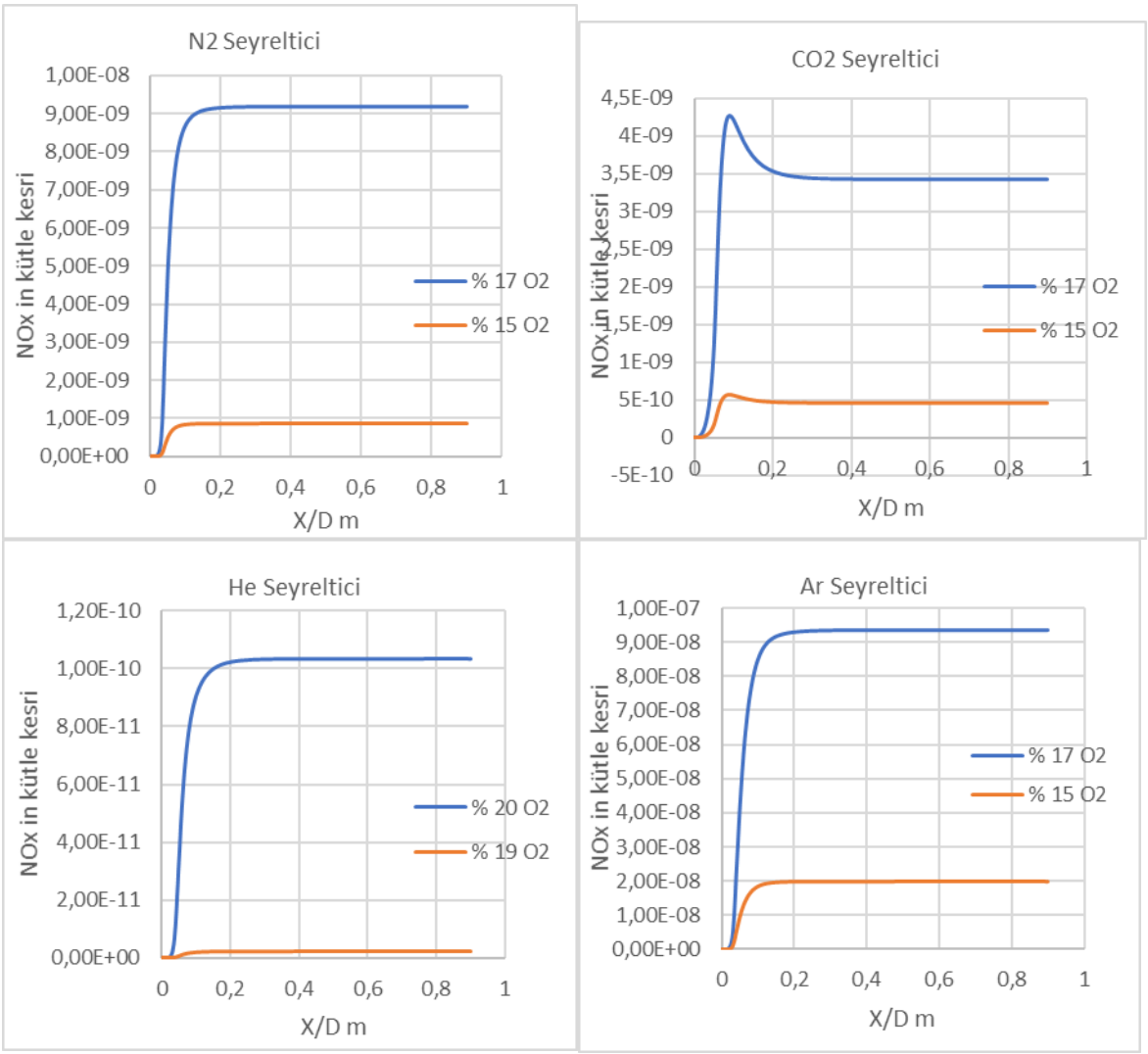



Şekil 5.7. %23 $O_2$'de $NO_X$ emisyonları.




Şekil 5.8. Yüksek $NO_X$ derişimlerinde farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi.

NOx'in yüksek sıcaklıklı alanlarda Zeldovich yöntemine göre oluştuğu bilinmektedir, bu da azot oksitlerin oluşumu için termal mekanizmadır [28]. Buna göre, CDC yönteminin uygulanması sıcaklıkta bir azalmaya ve dolayısıyla $NO_X$ emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır [41]. Seyreltici olarak $N_2$ kullanıldığında $NO_X$ emisyonları (Şekil 5.7. a), %22 $O_2$ konsantrasyonunda azalmanın küçük ve %23 $O_2$ durumunda $NO_X$ emisyonlarına yakın olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi $O_2$ derişimininin yakın olmasından kaynaklı sıcaklık azalmasının küçük olmasıdır. Ancak, %20 $O_2$'de emisyonlardaki azalma çok daha fazladır. Bu durum ise $O_2$ derişiminin azaltılması ve seyrelticinin artırılması ile birlikte sıcaklıkta bir azalma ve ara bileşiklerin buluşmasının engellenmesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla yüksek derişimli $NO_X$ emisyonlarında düşük derişimli $O_2$ durumu $NO_X$ emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır [37,40,42].




Şekil 5.9. Düşük $NO_X$ derişimlerinde farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi.

Yanma odasındaki $NO_X$ emisyonunun belirlenmesi için oksitleyici $CO_2$ ile seyreltildiğinde, Şekil (5.8.b)'te, %22'lik ilk $O_2$ konsantrasyonundan ve sıcaklıklardaki düşüş nedeniyle ($CO_2$ ile seyreltildiğinde sıcaklık grafiklerinde fark ettiğimiz gibi) geri kalan konsantrasyonlardan $NO_X$ değerlerinde belirgin bir düşüş görülmüştür. Bu durum NOx değerlerinde bir düşüşe yol açmıştır [28]. Dolayısıyla, $CO_2$'nin yüksek bir özgül ısı kapasitesi olduğundan, sıcaklıkları ve $NO_X$ değerlerini düşürmede $N_2$'ye kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir [37].
He ile seyreltme işleminde $NO_X$ emisyonlarında keskin düşüş olduğu görülmektedir [28]. Elde edilen sonuçlar literatürde yapılan çalışmalar ile uyumludur [39]. Ar ile seyreltmede ise sıcaklıktaki hafif düşüş $NO_X$ oluşumunun termal mekanizmasına göre $NO_X$ emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır[28]. Ar'nin bir seyreltici olarak tanıtılması, ara

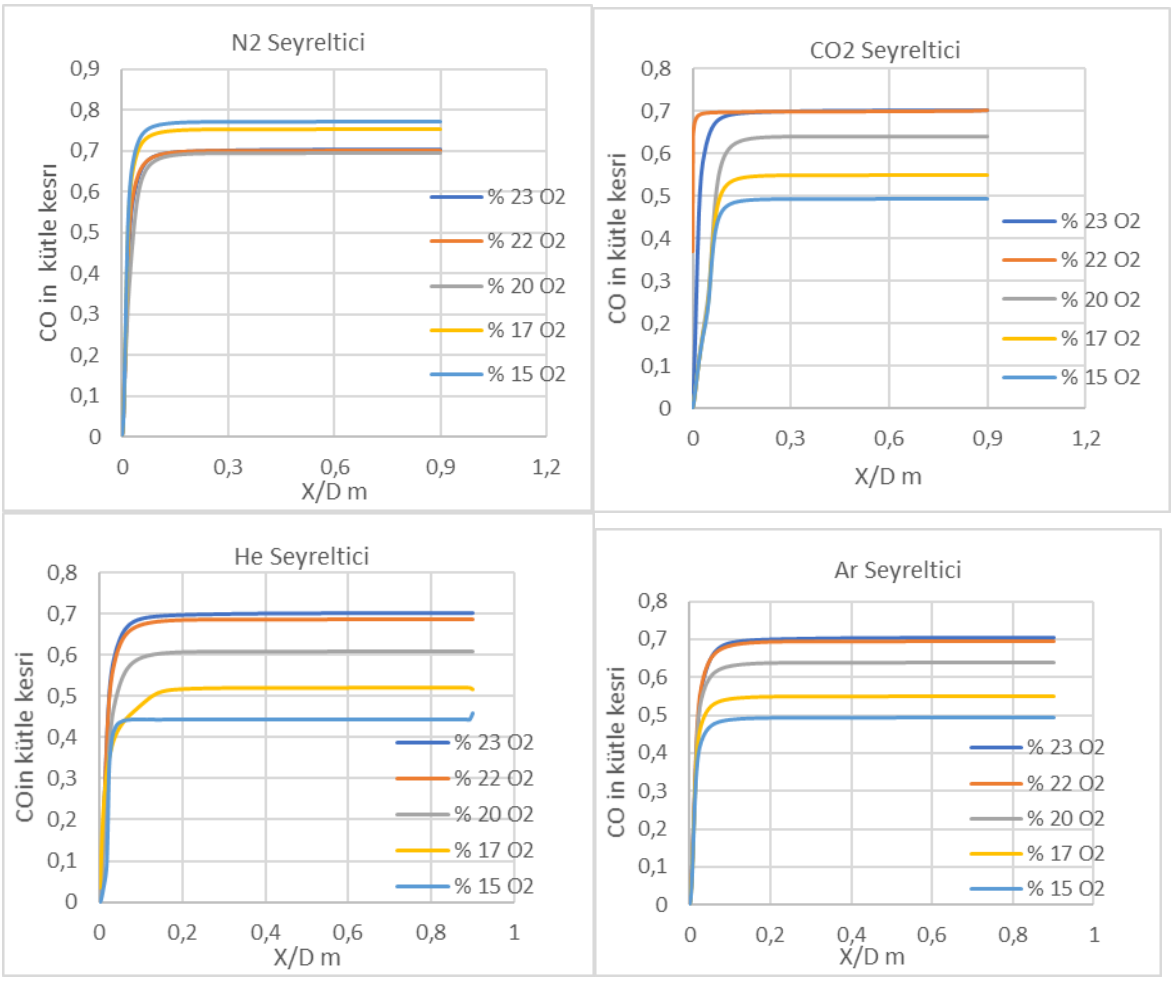
bileşiklerin birbirleriyle buluşmasını engelleyerek $NO_X$ emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olmuştur [37,39].

Oksitleyicideki düşük $O_2$ yüzdelerinde ise yani yanma bölgesine seyreltici girişinde bir artış olduğunda, kullanılan tüm seyrelticilerde $NO_X$ değerlerinde sırasıyla He, $CO_2$, $N_2$ ve Ar'da bir azalma olduğu belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında en düşük derişimin %19 $O_2$ olduğu görülmüştür. Çünkü %17 $O_2$'de sıcaklıktaki düşüş şiddetli olup He'nin grafiklerinde (Şekil 5.8.c) ve sıcaklık konturlarından (Şekil 5.8.c) net bir şekilde anlaşılmaktadır. Daha düşük derişimlerde yanma meydana gelmeyebilir veya alev önemli ölçüde sönme eğiliminde olabilir [39].

CO Emisyonu

İnsan sağlığını etkileyen zararlı bir bileşik olan ve yakıt yangınlarında istenmeyen emisyonlardan biri olan CO emisyonları sona erdirmek veya azaltmak için çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalarda bazı araştırmacılar azot oksitleri ve karbon monoksit emisyonlarını azaltma ve tutarlı bir alev elde etmedeki etkisi nedeniyle CDC yöntemini kullanmışlardır [42]. Tez çalışmasında, seyreltici olarak $N_2$ kullanmaya başlandığında, Şekil (5.9.a)'daki CO emisyonlarınının %23, %22, %20'lik $O_2$ konsantrasyonlarındaki CO değerlerinin aynı olduğunu ve değişmediği görülmüştür. Bu durum CDC uygulaması ile birlikte yanma odasındaki ısının yayılmasını ve alevin tutarlılığı hakkında önemli ipuçlar vermektedir. Ancak, %17'lik bir $O_2$ derişimine düşürüldüğünde (yani inceltici olarak $N_2$ konsantrasyonunda bir artış olduğunda) CO'da bir artış olduğu özellikle %15'lik $O_2$'de CO değerinin arttığı belirlenmiştir. Bu artış, yakıt ve havanın eksik nüfuz etmesi veya yetersiz karışması sonucu CO'ya yol açan yanma değerlerindeki $O_2$ değerlerinin eksikliğinden kaynaklandığını göstermektedir [7,37]. Aynı zamanda bu durum $N_2$'nin yanma bölgesi içindeki bazı bileşiklerle ileri düzeyde reaksiyona girerek CO oluşumuna yol açmış olabilir. Ancak, $CO_2$'yi seyreltici olarak kullanıldığında $CO_2$ seyrelticisi aracılığıyla CDC yönteminin uygulanması nedeniyle CO emisyonları azalmıştır (Şekil 5.9.b). He ve Ar seyrelticelerininde ortama CDC eklenmesiyle yayılan CO değerlerinde azalma eğilimi görülmüştür. Hem $CO_2$ hem de Ar ve He için elde edilen veriler değerlendirildiğinde daha homojen bir termal alanla eşit bir ısı dağılımına yol açmış ve $NO_X$/CO emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır[43]. Ayrıca, metanın tam yanması $CO_2$ ve $H_2O$ üretir. Yanma odasına seyreltici $CO_2$'nin girişi

nedeniyle ara bileşiklerin oluşumunun engellenmesi de CO emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır [37].




Şekil 5.10. CDC ile CO emisyonu için ile farklı seyrelticilerin (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi.

$CO_2$ Emisyonu

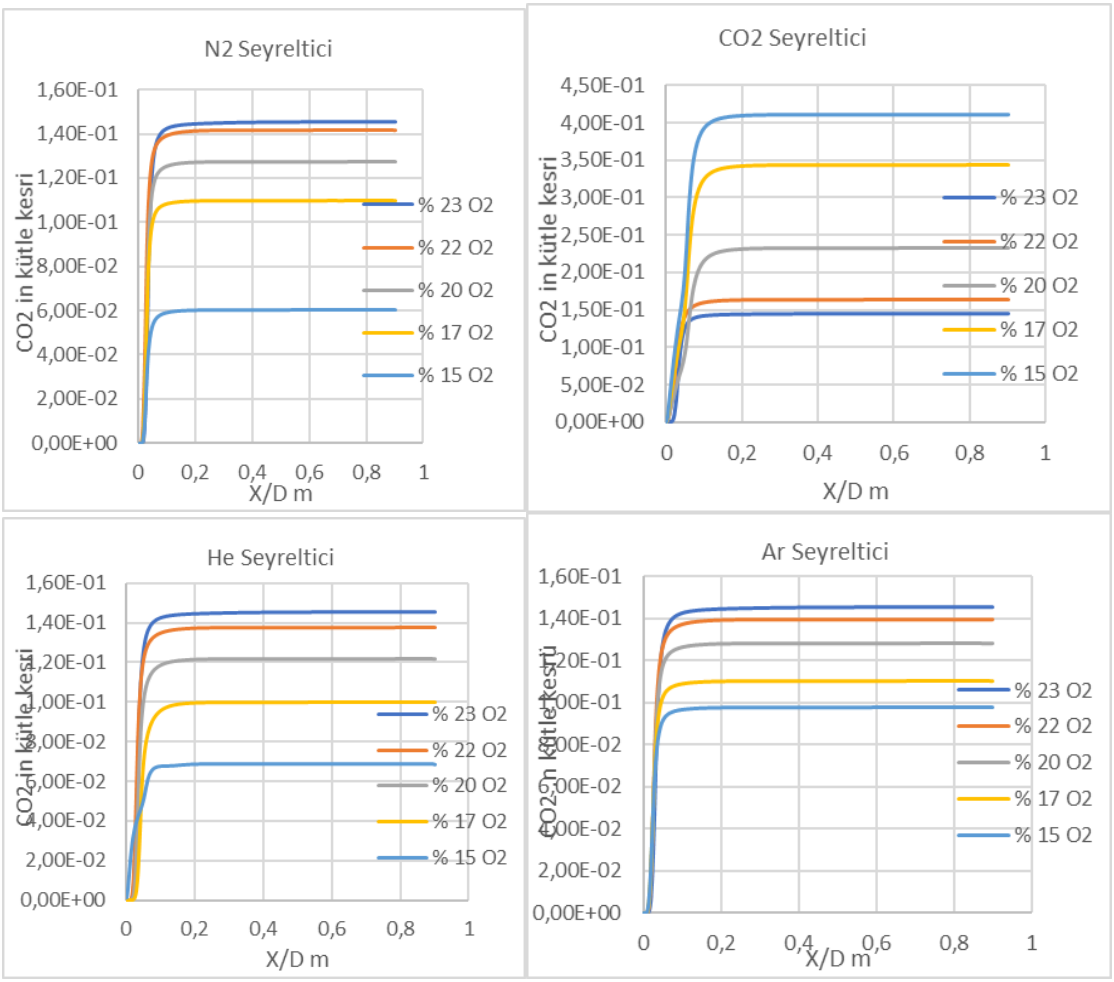
Karbondioksit, yanma reaksiyonlarının bir ürünü olarak istenmeyen bir emisyon olarak kabul edilir. $CO_2$ emisyonunu ortadan kaldırmak veya azaltmak için çalışmalar yapılmaktadır. CDC tekniği kullanılarak $CO_2$ dahil olmak üzere incelticilerin emisyonlar üzerindeki etkisi Şekil 5.10.'de gösterilmiştir. Yanma odasına $N_2$ seyrelticisi eklendiğinde sıcaklık kademeli olarak azalmıştır (Şekil 5.10.a). Sıcaklıktaki bu azalış %15 $O_2$'ye ulaşana kadar devam etmiştir Yanma odasında iyi sıcaklık dağılımı ve tutarlı bir alev elde edilmesi, yakıt moleküllerinin çoğunun tam yanmasına yol açarak $CO_2$ ve $H_2O$ oluşumuna neden olmuştur. Ancak $O_2$'deki azalmaya rağmen yanma sureci devam etmiştir. Ancak oksitleyici

içindeki $O_2$ konsantrasyonundaki azalma nedeniyle reaksiyon şansı azalmıştır. CO emisyonunun çıkışı, $O_2$'deki azalmanın veya $N_2$'nin bazı bileşiklerle yanma odasından ileri reaksiyonlarından kaynaklanmaktadır. CO emisyonu sonucu $CO_2$'ye dönüşüm gözlemlenmemiştir. Bu durumda $CO_2$ emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde farklı parametreler kullanılarak yapılmış olsa bile uyumludur [41].

Yanma odasında seyreltici olarak $CO_2$ kullanıldığında $CO_2$ emisyonlarında bir artış olmuştur (Şekil 5.10.b.). Bunun nedeni CDC yönteminin alevde tam yanma ve homojenliğe yol açmasından kaynaklıdır. $CO_2$'deki artışın, $CO_2$'yi seyreltici olarak yanma bölgesine gönderilmesi sonucunda oluştuğu söylenebilir. $CO_2$ yanma odasının tüm bölgelerine ulaşabilir ve bir kısmı dışarı çıkabilir [37]. Seyreltici olarak ne kadar çok $CO_2$ yanma odasına girerse, bir kısmının yanma odasından çıkma olasılığı o kadar artar (kok fırını gazında bulunan $CO_2$ gazının tüketilmeden önce yanma bölgesinden uzaklaşması durumunda olduğu gibi) [27]. $CO_2$'yi seyreltici olarak kullandığımızda elde ettiğimiz bu sonuçlar, CDC yöntemi üzerinde çalışan ve seyreltici $CO_2$ kullanan çalışmalar ile uyum içerisindedir [37].

He seyreltici olarak kullanıldığı zaman $CO_2$ emisyonlarında bir azalma olduğu görülmüştür. He, fiziksel özelliklerine göre, tepkime maddelerini ve yakıtı çevreleyen hafif ve hızla yayılan bir gazdır, böylece ara bileşikleri azaltarak [37] ve $CO_2$ dahil emisyonları azaltır [37]. He seyrelticisini yakıcıdan göndermek akış hızını artırır ve böylece tepkime süresince uygun koşullara ulaşamayan tepkime maddeleri dışarıya uzaklaştırmasına sebep vererek sıcak bölgede daha az ara bileşik oluşturur [3]. Bu nedenler ile He ilavesi $CO_2$ emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır (Şekil 5.10.c). Helyum ve argon üzerine yapılan son çalışma da $CO_2$ emisyonlarında bir azalmaya dair sonuçlara ulaşmıştır [39]. Ar seyrelticisi kullanıldığında ise (Şekil 5.10.d) $CO_2$ emisyonlarındaki azalma eğilimi devam etmektedir. Ar'nun ara bileşiklerin oluşumunu engelleme çalışması ile yakıcıdan seyreltici olarak Ar gönderimi akış hızının artmasına (Helyum gibi) ve böylece gerekli reaksiyon süresine ulaşmayan ve yanma bölgesinde kalmayan bazı ara bileşiklerin yanma odasının dışına atılmasına neden olduğu düşünülmektedir [3].

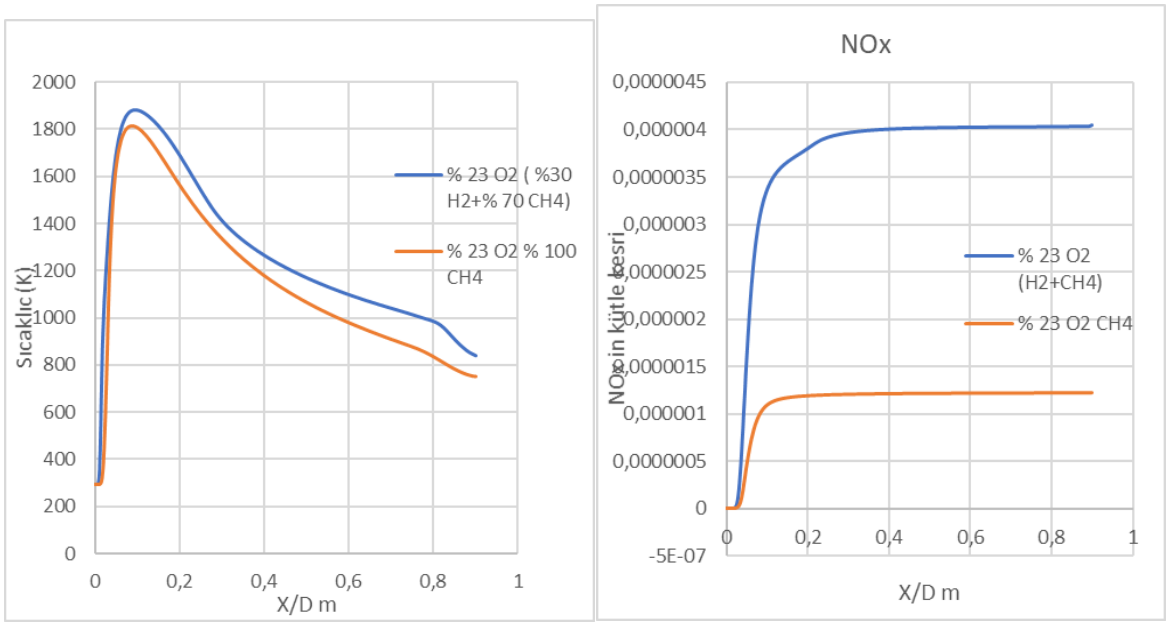
$CO_2$ Emisyonu




Şekil 5.11. $CO_2$ emisyonu için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profili üzerindeki etkisi.

## 5.2. $H_2/CH_4$/Hava Karışımı İçin Modelleme Sonuçları

Yüksek enerji eldesinde sıfır veya düşük emisyon konusunda çalışmalara devam edilmektedir. Bu tez kapsamında metan yakıtının oluşturacağı emisyonu en aza indirmek için modelleme sisteminde hidrojen yakıtı kullanıldı. Hidrojen ($H_2$) yakıtı fosil yakıtlara özellik olarak çok benzemekte ve yüksek enerjiye sahip olmasından dolayı iyi bir enerji transfer sürecine katkı sunar [24]. Enerji transferi ile ortamdaki karbon miktarı da düşmektedir [5]. Yanma odasına hacimce %30 oranında $H_2$ eklenmesi ile birlikte sıcaklıkların arttığı (Şekil 5.11.a.) ve yüksek NOx değerlerinin oluştuğu (Şekil 5.11.b.) Şekil 11.'de görülmektedir [28].

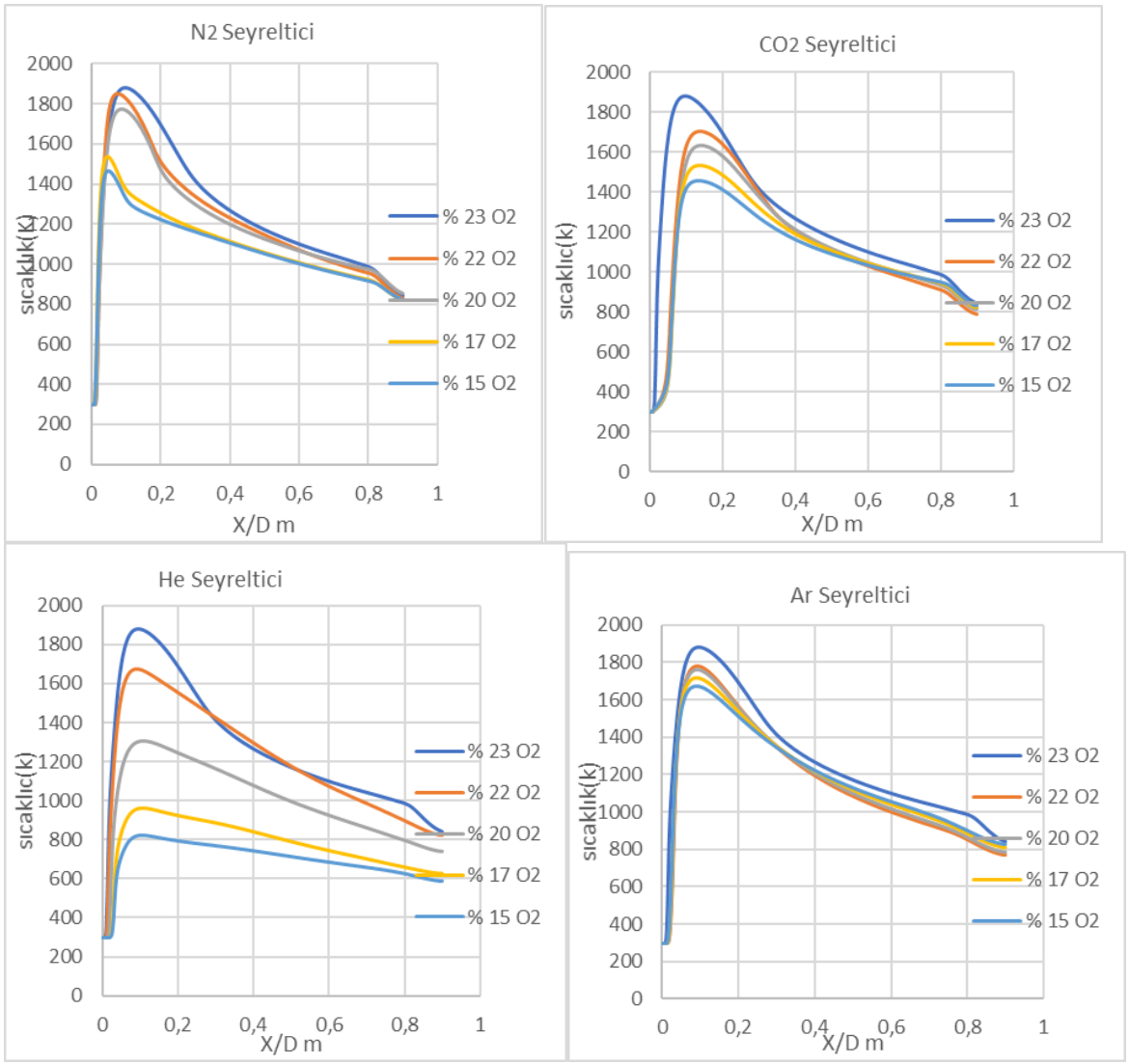



Şekil 5.12. a. $H_2$'nin $CH_4$'e eklenmesinden sonra eksenel koordinatlardaki sıcaklık değişimini b. $H_2$'nin $CH_4$'e eklenmesinden sonra eksenel koordinatlarda $NO_X$ emisyonlarındaki değişimi.

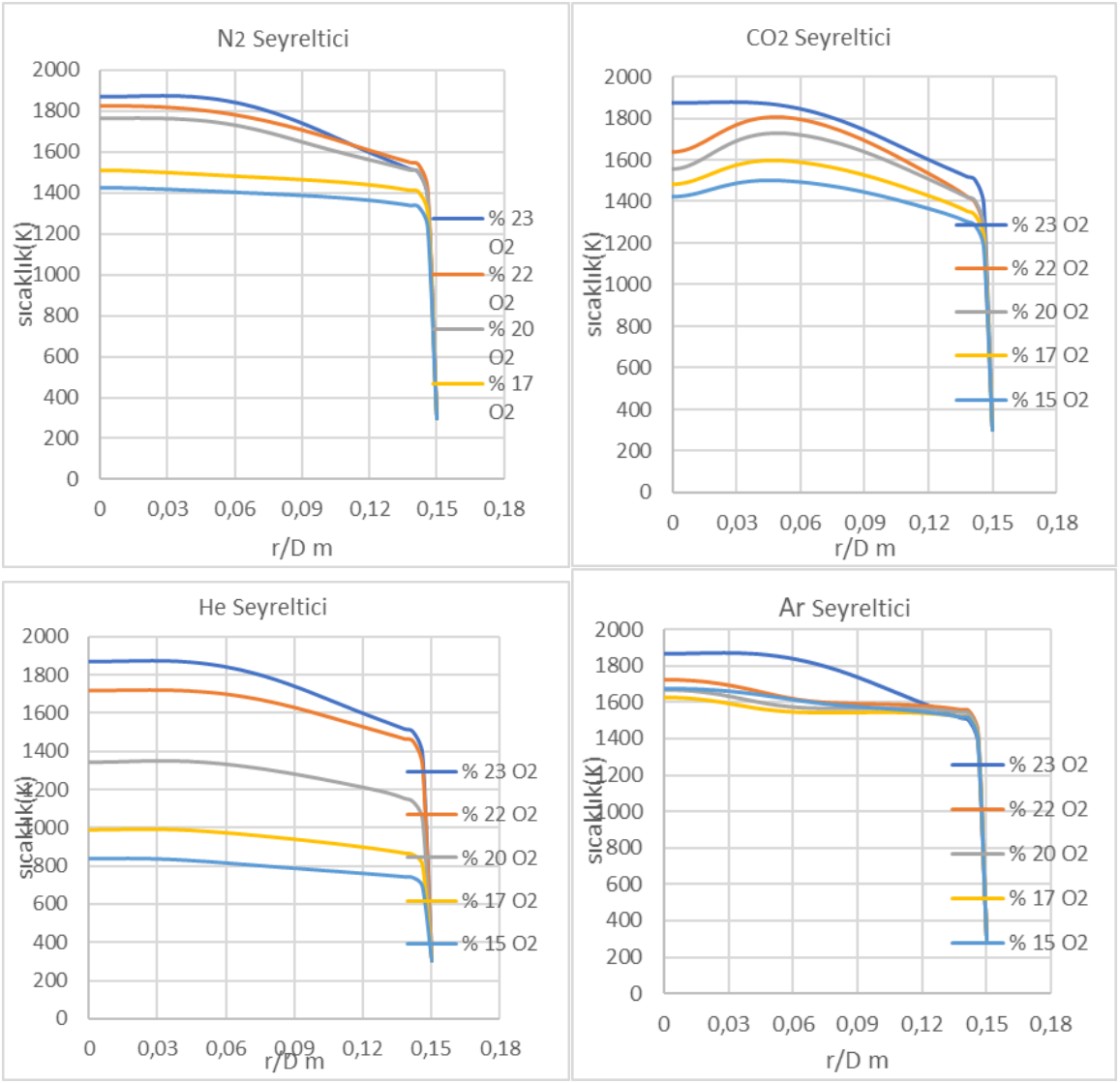
### 5.2.1. Sıcaklık

Yanma odasına %30 $H_2$ eklenmesi ile CDC yönteminin uygulandığı seyreltme etkileri bu bölümde incelenmiştir. %22 $O_2$ konsantrasyonunda $H_2$'nin termal etkisine ek olarak $O_2$ konsantrasyonundaki azalmanın küçük olması nedeniyle sıcaklıklarda hafif bir düşüş görülmüştür. %20 ve altındaki diğer $O_2$ konsantrasyonlarında ise, $O_2$'nin azaldığı ve seyrelticinin ($N_2$) arttığı sıcaklıklarda belirgin bir düşüş oluşmuştur (Şekil 5.12.a). Belirgin düşüşün temel nedeni, seyrelticinin ($N_2$) konsantrasyonundaki artışa ek olarak oksitleyicideki $O_2$ konsantrasyonundaki düşüştür [37]. CDC yönteminde seyreltici olarak $CO_2$ kullanıldığında sıcaklıktaki düşüşün %22 $O_2$'deki ilk seyreltmeden başlayarak azalan $O_2$ derişimlerine doğru (%15 $O_2$ derişimine kadar) belirgin olduğu görülmüştür (Şekil 5.12.b). Seyreltmenin başlangıcından itibaren etkinin ortaya çıkmasının nedeni, karbondioksitin özgül ısı kapasitesinden kaynaklanmaktadır, çünkü yakıt veya hava olmayan ve özgül ısısı yüksek gazların gönderilmesi sıcaklıkları düşürmede iyi bir etkiye sahiptir [37]. $O_2$ konsantrasyonundaki düşüşün yanma verimini düşürdüğünü $O_2$ derişimindeki düşüşün oksijen ve hidrojen arasındaki etkileşimleri azalttığını ve bu nedenlerin sıcaklıkta bir düşüşe yol açtığını belirtmekte fayda vardır.

Bu yöntemde kullanılan üçüncü seyreltici olan He'a ait sıcaklık profili Şekil (5.12.c.) de verilmiştir. %22 $O_2$'deki ilk seyreltmeden başlayarak geri kalan konsantrasyonlara kadar sıcaklıklarda belirgin ve ciddi bir düşüş görülmüştür. Daha önce belirtildiği gibi (He)'nin fiziksel özelliklerinden dolayı yakıtı çevreleyen ve yanma verimliliğini azaltan çok hafif ve hızla yayılan bir gaz olması nedeniyle sıcaklıkları düşürmesine olanak tanır. Ayrıca, özgül ısı kapasitesine sahip gazların girişi sıcaklığı düşürmede etkilidir [37]. Renksiz dağıtılmış yanma yönteminin (CDC) uygulanmasının temelini oluşturan ve göz ardı etmediğimiz önemli neden, $O_2$ konsantrasyonundaki düşüştür. Bu nedenlerin bir araya gelmesi sıcaklıklarda bir düşüşe yol açmıştır. Ancak, %20 $O_2$'den sonraki sıcaklıklardaki düşüş çok fazladır ve dikkatli olunmalıdır. Çünkü yanma reaksiyonunun durmasına ve alevin sönmesine yol açabilir. Literatürde yapılan bir çalışmada seyreltici eklemenin alevin sönme eğilimini artırdığı gösterilmiş ve tezimizde elde edilen veri bu sonucu desteklemektedir [39]. Yanma odasına Ar gibi inert bir gazın girmesi ve oksitleyici içindeki $O_2$ konsantrasyonunun azalması nedeniyle seyreltme %22 $O_2$'de başladığında bile sıcaklıklarda bir azalma tespit edilmiştir. Ancak azalma çok yüksek değildir(Şekil 5.12.d). Bu sıcaklık azalmasına $NO_X$, $CO_2$ ve CO emisyonlarında bir azalma eşlik ederse iyi olarak kabul edilebilir, çünkü çalışmanın amacı daha az kirletici emisyonla yanma veya enerji elde etmektir.



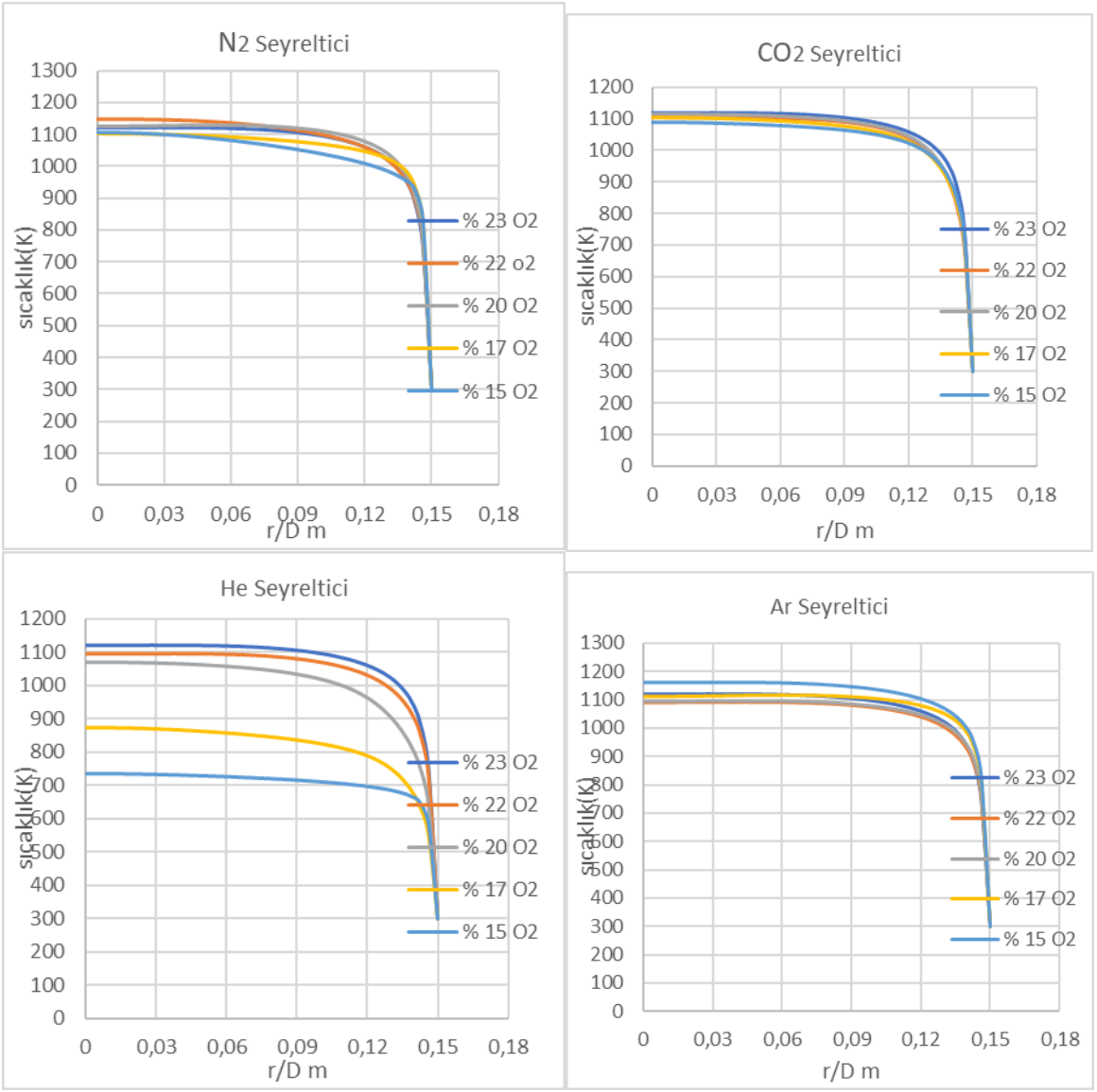

Şekil 5.13. %30$H_2$+%70 $CH_4$ (hacimsel) karışımı için farklı seyreltıciler (a. $N_2$, b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi




Şekil 5.14. 0,1 m radyal eksenelde, %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi

Farklı $O_2$ oranlarına sahip tüm seyreltilmiş malzemeler için eksenel noktada (0,1 m) radyal durumdaki grafikler Şekil 5.13.'te verilmiştir. İlk olarak, yüksek yanma verimliliğine sahip metanlı hidrojenin varlığı nedeniyle yanma odasına girişte sıcaklıkların yüksek olduğunu fark edilmiştir [45,46]. Bu nedenle modellemede kullanılan yakıt karışımının (CDC) yöntemi kullanılarak seyreltilmeye uygun olduğu anlaşılmaktadır. Seyreltici olarak $N_2$ kullanıldığında sıcaklıklarda yanma odasına $N_2$'nin girişi ve $O_2$ derişiminin azalmasıyla sıcaklıklarda bir düşüş meydana gelmiştir (Şekil 5.13.a.) [41]. Seyreltici olarak $CO_2$nin kullanıldığında ise gösteren, sıcaklıklardaki sürekli düşüşü fark edilmiştir. (Şekil 5.13.b.). Bu durum daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi $CO_2$'nin özgül ısısı nedeniyle $N_2$ kullanılması durumundaki düşüşten biraz daha fazladır. Helyumun seyreltici olarak

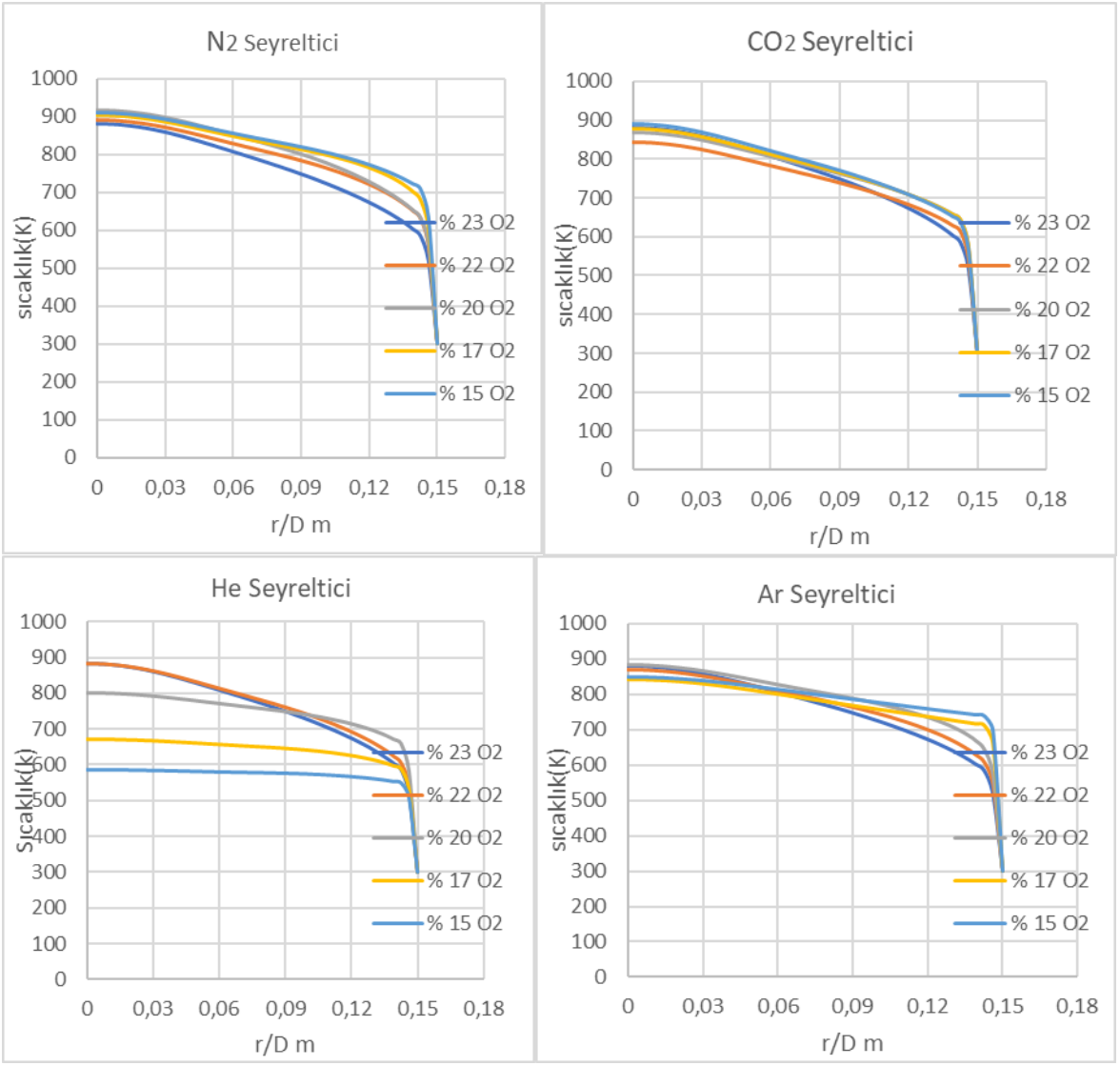
kullanıldığı modelleme sonuçlarında (Şekil 5.13.c.), helyum gazının sahip olduğu yüksek özgül ısıya ek olarak hafifliği ve hızlı yayılması nedeniyle sıcaklıklarda gözle görülür bir düşüş gözlemlenmiştir. He gazı reaksiyona ne kadar çok girerse, $O_2$'deki azalmaya ek olarak sahip olduğu özellikler nedeniyle sıcaklıkları düşürme etkisi de o kadar artmaktadır. Argonun dördüncü seyreltici olarak kullanımı Şekil 5.13.d.'de verilmiştir. Ar seyrelticisini %22 $O_2$ konsantrasyonunda eklediğimizde sıcaklıklarda belirgin bir düşüş görülmektedir. Argonun reaksiyona girmeyen ve yanmayan inert bir gaz olduğunu ve ayrıca havadan daha ağır bir gaz olduğunu düşünülürse, yanma odasının girişinde bir süre kalıp sonra hareket ederek yanma reaksiyonunu engellediği için yanma sıcaklığını düşürmeye katkı sağlar. Kalan $O_2$ konsantrasyonlarında ise sıcaklıklarındaki düşüşlerin benzer olduğu görülmektedir.




Şekil 5.15. 0,5 m radyal eksenelde, %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ ,b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi

Farklı $O_2$ oranlarına sahip tüm seyreltilmiş maddeler için 0,5 m radyal eksenel durumdaki grafikler Şekil 5.14.'te verilmiştir. Bu grafikten yakıtın bir kısmının tüketilmesi sonucu yanma odasının başlangıcından (x=0,1m) itibaren sıcaklığın azaldığı tespiti yapılabilir. Seyreltik gazların yanma odasına girmesi oksitleyici havadaki oksijen konsantrasyonunun azalmasına neden olmaktadır. $O_2$'deki azalmaya bağlı olarak gönderilen oksitleyici havanın akış hızı artmasına sebebiyet vermektedir. Yapılan modelleme sonucunda oluşan sıcaklıklar yanma odası boyunca iyi dağılmakta ve homojen bir alev elde edilmesine imkan vermektedir. Şekil 5.14.a.'da, hidrojenin eklendiği yakıtta $N_2$ kullanılması durumunda sıcaklıkların ilk yakıt $CH_4$ durumundan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Sadece metan yakıtı kullanıldığında 0.5m eksenel mesafedeki sıcaklık (1080-1120) Kelvin iken, $H_2$'nin

eklendiği metan yakıtında aynı seyrelticede sıcaklık (1100-1140) Kelvin arasında değişmektedir. Ancak sıcaklığı artıran yüksek yanma verimine sahip $H_2$'nin varlığına rağmen iki oran arasındaki farkın yakın olduğunu görümüştür [45,46]. Bu durum CDC yönteminin kullanılmasının önemini göstermektedir. Yakıt karışımı için seyreltici olarak $CO_2$ kullanıldığında, yakıtın bir kısmının tüketilmesi sonucu sıcaklıklarda bir düşüş olduğunu ve CDC yönteminin uygulanması sonucu sıcaklıkların iyi dağıldığını ve düşüşün $N_2$ durumundan biraz daha fazla olduğu görülmüştür. Sadece $CH_4$ içeren ilk yakıtla karşılaştırıldığında, ($CH_4$)'teki ortalama sıcaklık 1050 K ila 1090 K ile sınırlıyken, ikinci yakıt kullanıldığında ortalama 1090 ila 1120 K ile sınırlı kalmıştır. Burada farkın küçük olduğunu ve bunun CDC yönteminin bol miktarda $H_2$ içeren yakıtın sıcaklıklarını düşürmek için kullanılmasını desteklediğini ve böylece $NO_X$ emisyonlarını da etkilediği düşünülmektedir [44]. Şekil 5.14.c.'de seyreltici olarak (He) kullanımında, sıcaklıklarda keskin bir düşüş eğilimi daha önceki modelleme sonuçlarını desteklemektedir. Metan yakıtına $H_2$ eklendiğinde sıcaklıklarda artış olmasına rağmen, He seyrelticisi sıcaklıkları düşürebilmiştir. Ar (Şekil. 5.14.d.) ise sıcaklık dağılımının homojen olduğunu ve argon kullanılarak CDC yönteminin uygulanmasının iyi olduğunu, hatta metan yakıtına hidrojen eklendiğinde bile, sıcaklıklardaki düşüşün küçük olmasına rağmen, argon seyrelticinin kirletici emisyonlar üzerindeki etkisinin incelenmesinin Ar eklenmesini sonucuna etkileri daha sınırlıdır.

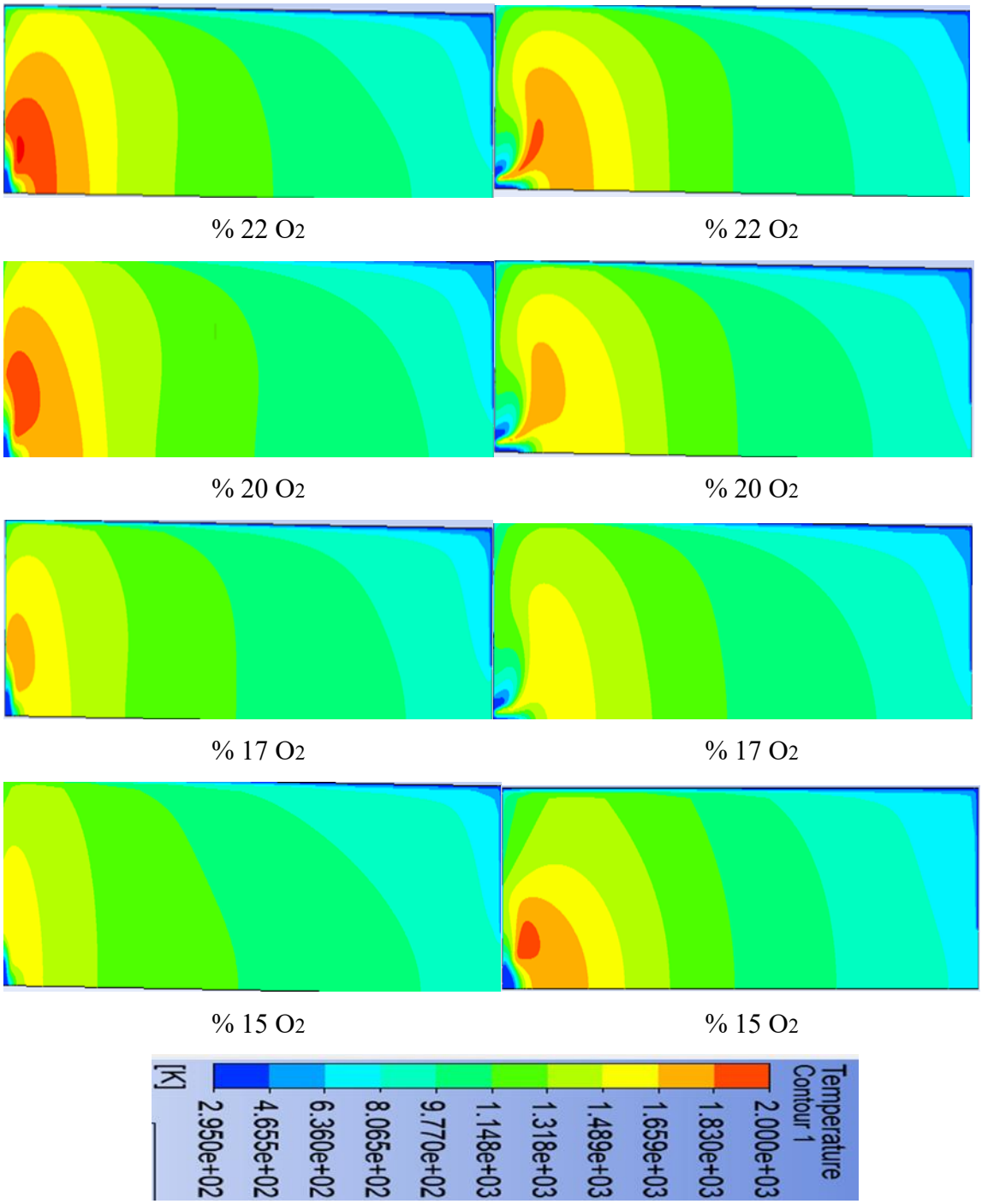



Şekil 5.16. 0,85 m radyal eksenelde,%30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ ,b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin sıcaklık üzerine etkisi

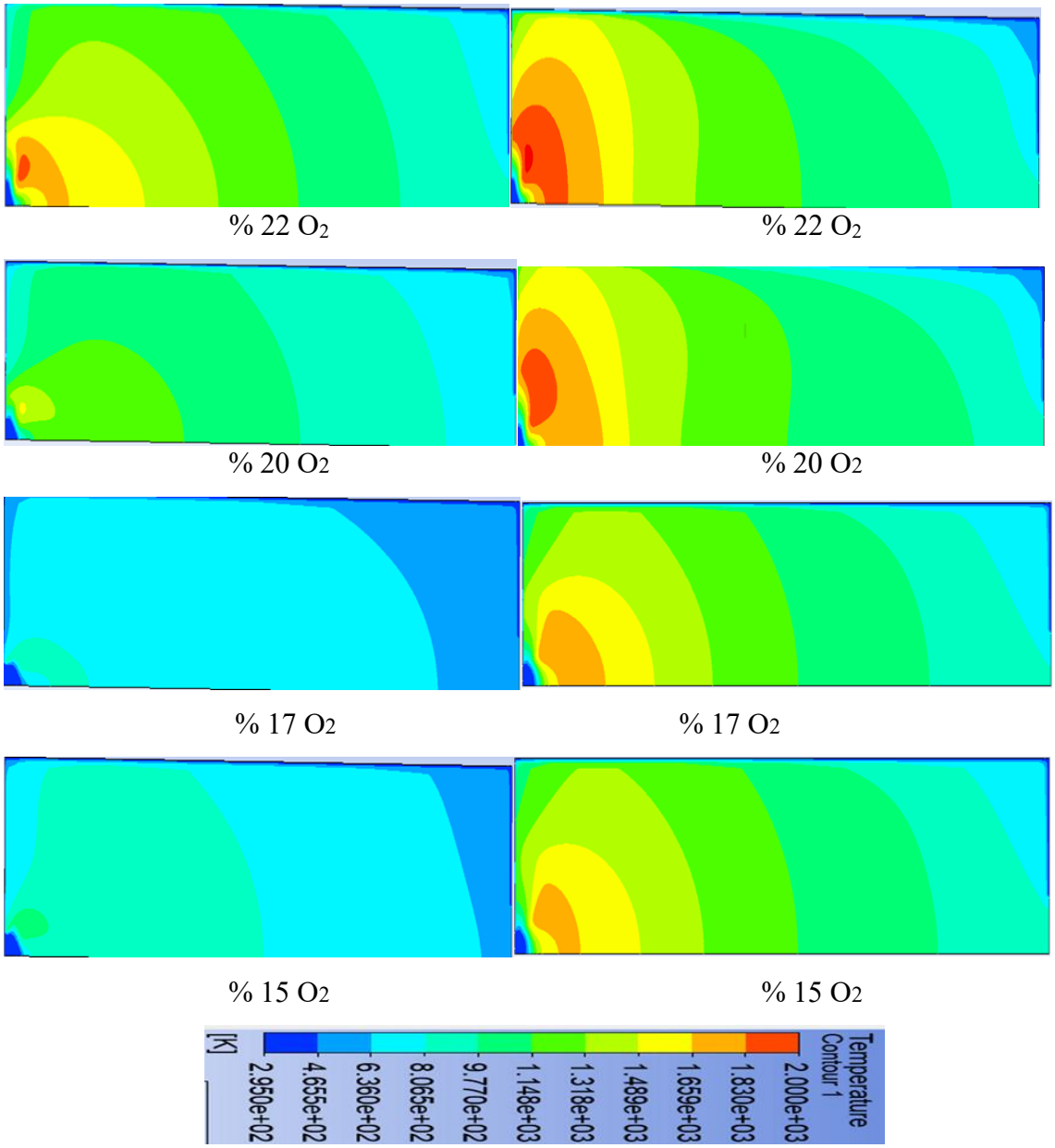
Şekil 5.15'da yanma odasının çıkışını gösteren radyal eksenel 0,85 m noktasında, reaksiyonun hala devam ettiğini ve ısının yanma odalarına iyi dağıldığı gözlemlenmiştir. Seyrelticiler kullanıldığında sıcaklıkların, seyrelticiler olmadan hava/yakıt karışımından gelen sıcaklıktan biraz daha yüksek olduğu görülmüştür. Sıcaklıklar tüm yanma reaksiyonlarında azalmış ve bunu eksenel şekillerde seyreltici olmadan normal yanmanın daha fazla yakıt tükettiğini ve dolayısıyla sıcaklığın yanma odasının sonuna yakın düştüğünü göstermektedir. Hava/yakıt karışımına gelince, seyrelticiler eklendiğinde ve CDC yöntemi uygulandığında, reaksiyonun yanma odasının son noktasına kadar devam ettiğini görülmektedir. Buna rağmen, CDC) uygulandığında ve kullanılan tüm seyrelticilerde sıcaklıkların genel ortalaması, hava/yakıt karışımına seyreltici eklenmediğindeki (CDC yöntemi uygulanmadığında) sıcaklıklardan daha düşüktür. Seyreltme sırasında gönderilen

seyreltici gaz, yoğun yanma reaksiyon alanını dağıtmış ve akış hızının artmasıyla seyreltici gaz, reaksiyon süresinin sonuna kadar en uzak noktaya ulaşmıştır [37].

Son olarak, sıcaklık ve renksiz dağıtılmış yanma (CDC) yönteminin uygulanması sonucunda tüm seyrelticiler kullanıldığında sıcaklıktaki azalmanın görüldüğü tespit edilmiştir. Özellikle de yakıta ilave $H_2$ varlığının sıcaklıkta bir artışa yol açtığı bilinmektedir ($H_2$ gazının yüksek bir tutuşma verimliliğinden) [45,46]. Bu nedenle, CDC yönteminin sıcaklık açısından modellemede kullanılan yakıt karışımı için uygun olduğu anlaşılmaktadır.




Şekil 5.17. a. %30$H_2$+%70$CH_4$ (hacimsel) karışımı için CDC uygulanması sonucunda oluşan sıcaklık eğrileri. (sol $N_2$ ve sağ $CO_2$).



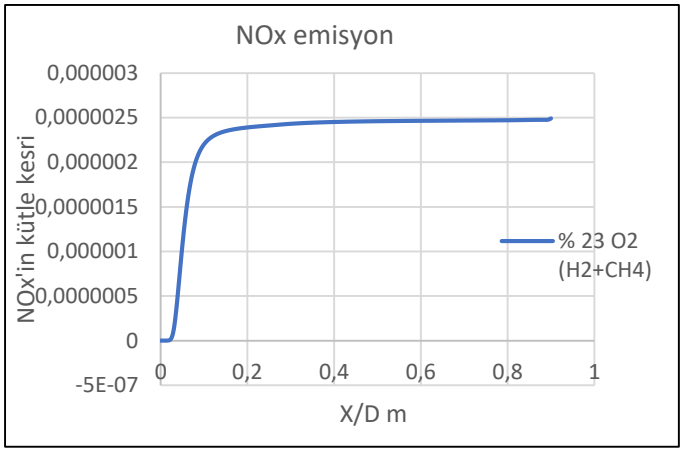

Şekil 5.18. b.%30$H_2$+%70$CH_4$ karışımı için CDC uygulanması sonucunda oluşan sıcaklık eğrileri (sol He ve sağ Ar).

%30$H_2$- %70 $CH_4$ yakıt karışımında seyrelticiler ($N_2$, $CO_2$,He ve Ar) kullanıldığında sıcaklıkların arttığını ve girişte sıcaklık artışını gösteren renkli alanların fazlalığı tespit edilmiştir. Bu durum ortamda bulunan yanma verimi yüksek olan $H_2$ varlığı nedeniyle yanma odasındaki sıcaklıkları yükselmekte ve yanma odası girişine yakınlığını artırmaktadır [45,46]. Bu nedenle $O_2$ konsantrasyonunu azaltarak $O_2$ ile $H_2$ arasındaki reaksiyonun olasılığını düşürmek ve aynı zamanda sıcaklıkların düşmesine neden olan yanma reaksiyonunu azaltmak için renksiz dağıtılmış yanma yöntemi CDC uygulanmıştır. Seyreltici olarak $N_2$ kullanıldığında sıcaklıktaki azalma %22 $O_2$ derişiminde başlar. Ancak

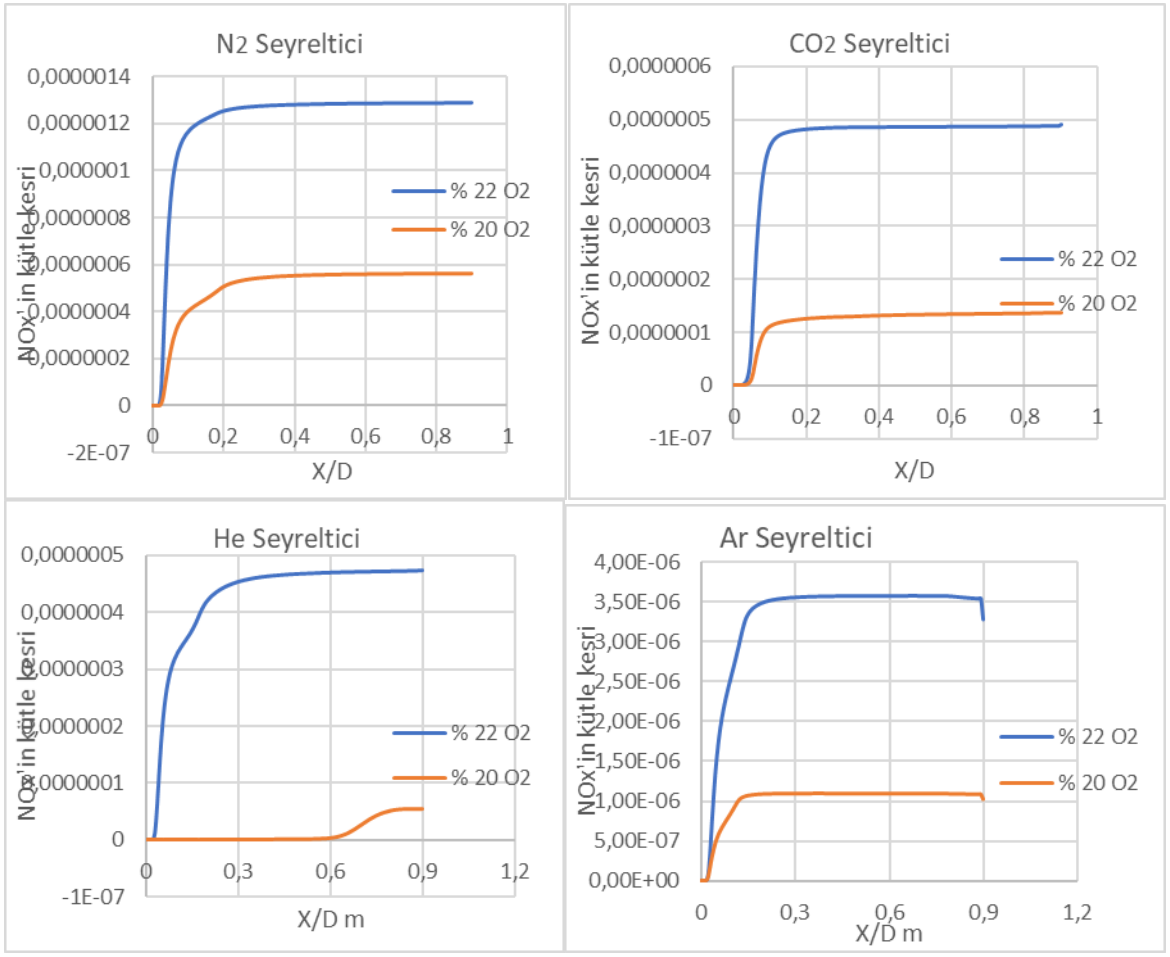
seyrelticinin $N_2$ konsantrasyonunun düşük olması nedeniyle azalma belirgin değildir ve bu nedenle $O_2$ konsantrasyonu fazla azalmamıştır. Ortama seyreltici $N_2$ eklemeye devam edildiğinde sıcaklıktaki azalmanın devam ettiği görülmüştür (% 20 $O_2$). % 17 $O_2$ derişminde azalmanın çok belirgin olduğu tespit edilmiştir. Konsantrasyon %15 $O_2$ seviyelerinde alevin sönme eğiliminde olduğu belirlenmiştir (39). $CO_2$ seyreltici olarak kullanıldığında (Şekil 5.16.a, sağ taraf) azalmanın % 22 $O_2$ derişiminden itibaren başladığını ve yanma odasının girişindeki sıcaklık seviyelerinin $N_2$ ile benzer şekilde olduğu anlaşılmıştır. $CO_2$ eklemeye devam edildiğinde %15 $O_2$ değerine ulaşana kadar sıcaklıktaki azalmanın $N_2$ durumunda olduğundan daha belirgin ve fazla olması alevin sönme eğiliminde olduğunu göstermektedir. He seyrelticisini gösteren sıcaklık eğrilerinde (Şekil 5.16.b., sol taraf) % 22 $O_2$ derişiminde sıcaklıktaki azalma net bir şekilde görülmektedir. %20 O2 derişiminde ise helyumun fiziksel özelliklerinden dolayı sıcaklıktaki azalma daha şiddetlidir. %17 $O_2$ ve %15 $O_2$ derişimlerinde, He ilavesinin güçlü etkisi nedeniyle alev sönme ve yanma reaksiyonu durma eğilimi gösterir. Ar seyrelticisi ortama eklendikçe $O_2$ konsantrasyonunun azalmasına sebebiyet verdiği sıcaklık profillerinden görülmektedir (Şekil 5.16.b. sağ taraf). He seyrelticisi eklendiğinde $O_2$ ile $H_2$ arasındaki etkileşimin azalmasına bağlı olarak sıcaklıklarda bir düşüş olmuştur. %20 $O_2$ derişiminden %15 $O_2$ derişimine kadar sıcaklık eğrilerinden görüleceği üzere sıcaklığın düştüğü görülmüştür.

<u>$NO_X$ emisyonu (Hacimsel, %30$H_2$+%70$CH_4$)</u>

%30$H_2$+%70$CH_4$ yakıt karışımı için $NO_X$ emisyonlarına ait sonuçlar birbirinden farklı olduğu ve çok küçük değerlere kadar indiği için grafiksel sonuçları bu bölümde ayrı ayrı olarak değerlendirilmiştir. Yakıt karışımı için referans olarak sadece %23 O2'de $NO_X$ emisyonlarını çizilmiştir. Sadece $CH_4$ yakıtı ile oluşan $NO_X$ emisyonu (5.1.2.1. )detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Yakıt karışımında gözlemlenen $NO_X$ emisyonu sadece CH4 ile yapılan emisyonla karşılaştırıldığında $NO_X$ emisyonu daha fazla çıkmıştır (Şekil 5.17.). Bu durumun sebebi yakıt karışımına eklenen $H_2$ kaynağı olabilir. Çünkü modellemede kullanılan yeni yakıt karışımında bulunan serbest $H_2$, oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek yüksek enerji üreterek $NO_X$ oluşumunu artırmaktadır.



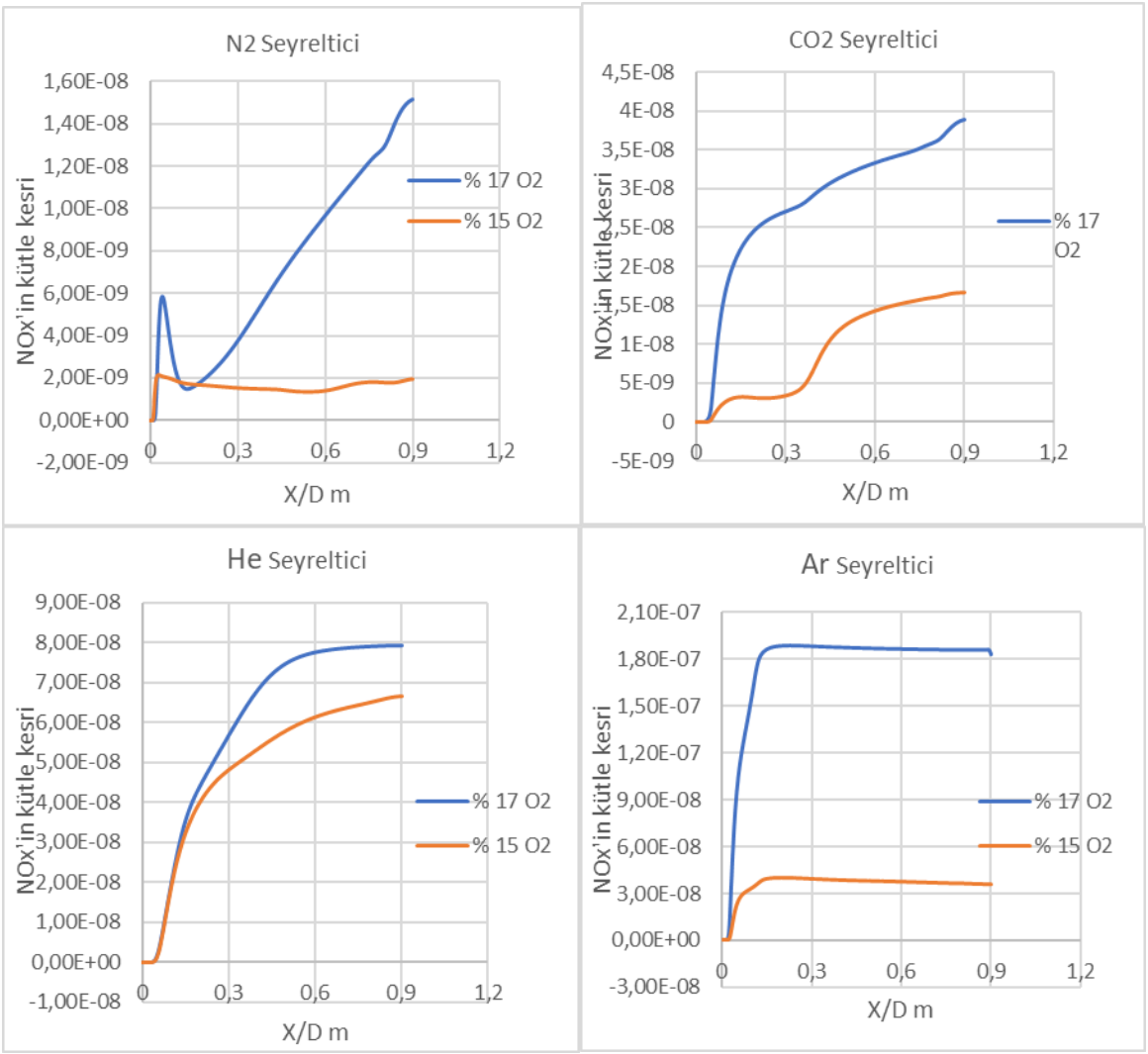

Şekil 5.19. $H_2$ eklenmeden önce $NO_X$ emisyonu (CDC).




Şekil 5.20. Yüksek $O_2$ derişimlerinde %30$H_2$+%70$CH_4$karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ ,b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profilleri

Yakıt karışımında yüksek derişimli $O_2$ modellemesinde %22 oranında $NO_X$ emisyonlarında az miktarda bir azalma görülmüştür. Sıcaklık düşüşüsün hafif olması ile bu durum paralellik göstermektedir (Şekil 5.18.a.). $NO_X$ oluşum mekanizması temelinde seyreltme sonucunda

emisyonlardaki azalama %20 $O_2$ derişimine kadar devam etmiştir. Ancak yüsek tutuşma verimliliğine sahip yeni yakıt karışımında bol miktarda bulunan $H_2$'nin varlığıyla bu azalma olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmiştir [45,46]. Seyreltici $CO_2$ olduğunda ise $N_2$ durumundaki azalmadan biraz daha büyük bir $NO_X$ emisyonu azalması gözlemlenmiştir. Ayrıca, seyreltici malzemenin girişi ara bileşiklerin oluşumunda bir engele neden olan $CO_2$ seyrelticisi $NO_X$ emisyonlarını azaltarak %22 $O_2$ ve %20 $O_2$ derişimlerinde emisyonda bir azalmaya sebebiyet vermiştir (Şekil 5.18.b.). Yanma odasına He seyrelticisi eklendiğinde sıcaklıklardaki düşüş nedeniyle $NO_X$ emisyonlarında bir azalma görülmüştür. $NO_X$ emisyonları He seyrelticisinin eklenmesiyle birlikte azot oksitlerin oluşumu için termal mekanizmaya göre azalmıştır (Şekil 5.18.c.) [5]. Seyreltici Ar olması durumunda, azot oksit oluşumunun sıcaklıklarla ilişkisi nedeniyle küçük de olsa bir azalma vardır. Özellikle Ar eklenmesinin sıcaklıklardaki artışa etkileri olduğu için metan yakıtına eklenen hidrojenin varlığı nedeniyle bu durum oluşmaktadır (Şekil 5.18.d).




Şekil 5.21. Düşük $O_2$ derişimlerinde %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $NO_X$ emisyon profilleri

Daha düşük $O_2$ oranlarına geçildiğinde, seyrelticilerin $NO_X$ emisyonları üzerindeki etkisini daha net bir şekilde fark edilmektedir. İlk olarak $N_2$'de, yanma bölgesine $N_2$ girişi ve ısının homojen dağılımı sonucu emisyonlarda devam eden azalmayı, ara bileşiklerin oluşumunun engellenmesini ve sıcaklıkların düşmesi bu süreçte de devam etmiştir. Bu durum %17 O2 ve %15 $O_2$'de düşük emisyonlar elde edilmesine yol açmıştır (Şekil 5. 19.a.). Aynı durum $CO_2$ seyrelticisi ile yanma odasına $CO_2$ girişinin artması ve oksijen konsantrasyonunun azalması sayesinde sıcaklıkların düşmesi ve ara bileşiklerin oluşumunun azalması sonucu azot oksit emisyonlarındaki azalmanın devam ettiği söz konusudur (Şekil 5.19.b.). Her iki seyreltici içinde %17 $O_2$ ve %15 $O_2$ derişimlerinde düşük $NO_X$ emisyonları görülmektedir. Seyreltici olarak He kullanıldığında $NO_X$ emisyonlarındaki azalma eğilimi devam etmektedir (Şekil 5.19.c.). Seyreltici olarak Ar kullanıldığında, emisyonlardaki azalma Şekil 5.19.d.'de

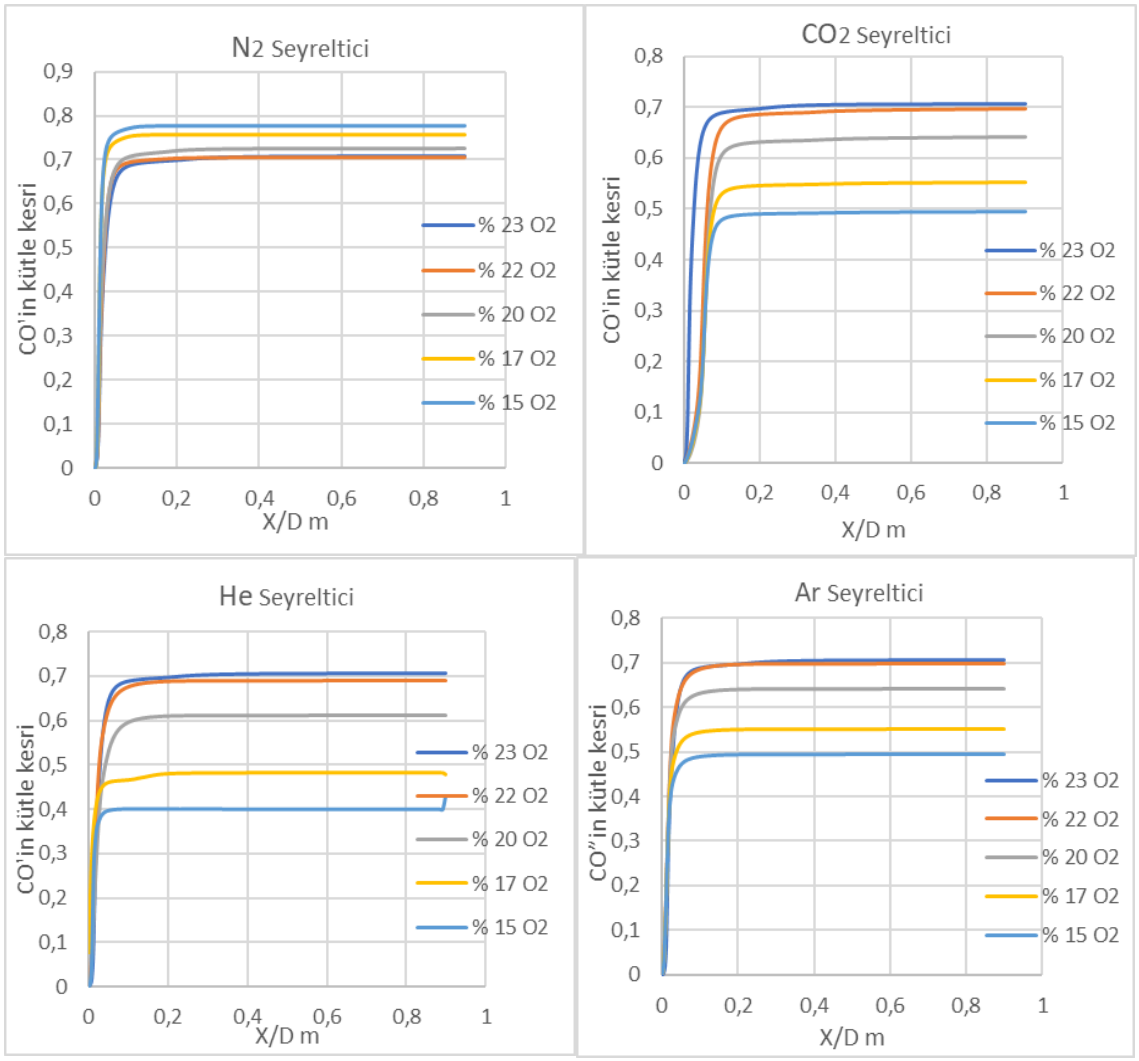
gösterilmiştir. %15 $O_2$ konsantrasyonunda diğer seyrelticilere yakın sonuçlar Ar için elde edilmiştir.

Sonuç olarak, modelleme kullanılan yakıt karışımında (%30$H_2$-%70 $CH_4$) $NO_X$ emisyonları ve tüm seyrelticilerde bir azalma olduğu görülmektedir. Yalnızca metan içeren yakıtlara göre modellemede kullanılan yakıt karışımının daha az sıcaklık azalışına sebebiyet verildiği anlaşılmıştır. Modellemede kullanılan yeni yakıt karışımında bulunan serbest hidrojen oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek yüksek enerji oluşturmakta bu durumda ortamdaki azot oksitlerin oluşumunda bir artışa neden olmaktadır [47]. $H_2$'nin tutuşma için yüksek verimliliği [45,46], $H_2$'nin $O_2$ ile yüksek hızda reaksiyona girmesi ve dar bir alanda yüksek sıcaklık alanlarına neden olması da bu durumu da etkilemektedir. Yani yüksek oranda $H_2$ içeren yakıt oksitleyici hava ile karıştırıldığında yüksek sıcaklıklar oluşumu sonucunda $NO_X$ emisyonu miktarı yalnız $CH_4$ yakıtına göre nispeten artmaktadır [47]. Tüm durumlara rağmen modelleme $NO_X$ emisyonlarında bir azalma ortaya çıkarmıştır. Modellemeye seyreltici ekleyerek emisyonların azaltıldığı görülmüştür [44].

CO emisyonu (Hacimsel %30 $H_2$ + %70 $CH_4$)

Metan yakıtına $H_2$ eklenmesiyle oluşan CO emisyonlarında ilk üç konsantrasyonun birbirine çok yakın olduğunu ve bu sonuçların kabul edilebilir olabileceğini, ancak %17 $O_2$ ve %15 $O_2$ konsantrasyonuna indiğimizde CO emisyonlarında bir artış olduğu görülmüştür (Şekil 5.20.a.). Bu durumun nedeni (daha önce 5.1 açıklandığı gibi) $O_2$ konsantrasyonunda bir azalma veya yakıt- hava karışımının zayıf gerçekleşmesidir [7]. Bu durumun yanı sıra $N_2$'nin yanma bölgesindeki bazı bileşiklerle gelişmiş kimyasal reaksiyonları yoluyla CO' da bir artışa yol açmış olabilir. Çalışmada kullanılan ikinci seyreltici $CO_2$ seyrelticisinin CO emisyonlarında bir azalma olduğu görülmüştür. %22 $O_2$'den başlayarak %15 $O_2$'ye kadar CDC yönteminin uygulanması yanma odasının çoğu alanında sıcaklıkların neredeyse eşit bir şekilde dağılmasına ve tutarlı bir aleve yol açarak CO emisyonlarında bir azalmaya yol açmıştır[43]. Ayrıca ara bileşiklerin oluşumunu engellemenin de CO emisyonlarını azaltmaya yardımcı olmuştur. Seyreltici He olduğunda akış hızının artmasına ve dolayısıyla yanma bölgesinin dışına reaksiyon süresine ulaşmayan ara bileşiklerin çıkışına yol açarak CO emisyonunu azaltmıştır [3]. Dördüncü seyreltici Ar da ise CO emisyonlarının azaldığını ve seyreltici $CO_2$ kullanımı durumundaki azalma değerlerine yakın olduğunu görülmüştür.

Bu durumun He seyrelticisinin modellemede oluşturduğu benzer etkiler ile açıklanabilir [3].

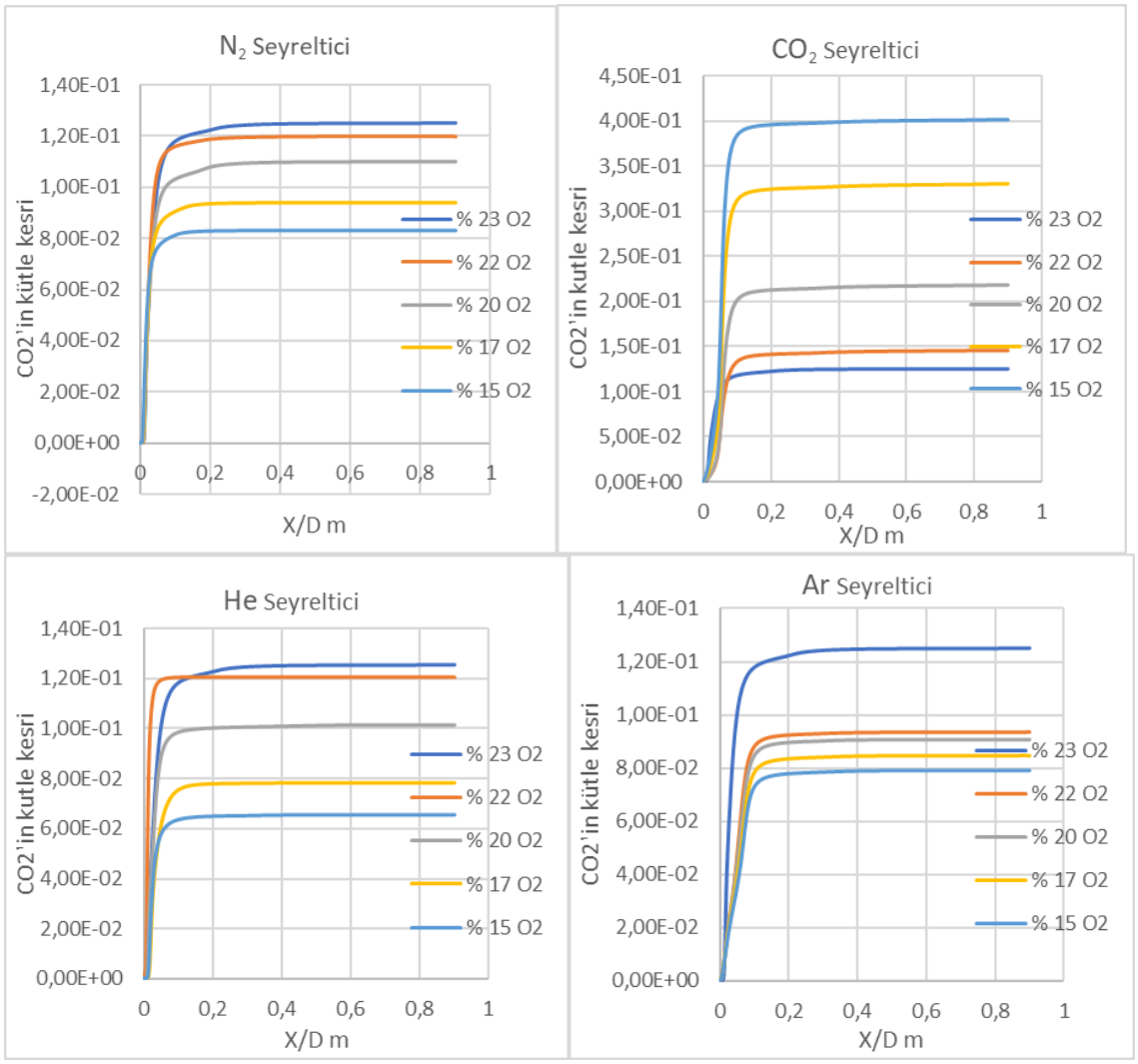



Şekil 5.22. %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$ , b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin CO emisyon profilleri

<u>$CO_2$ emisyonu (Hacimsel,% 30 $H_2$ + % 70 $CH_4$)</u>

$H_2$+$CH_4$%30 hidrojen içeren hidrojen/metan yakıt karışımı için $CO_2$farklı seyreltici tipleri uygulanması sonucunda tahmin edilen $CO_2$ emisyonları bu bölümde sunulmuştur. Seyreltici $N_2$ kullanıldığında %22 $O_2$ konsantrasyonunda $CO_2$ emisyonlarındaki azalmanın başladığını ve%15 $O_2$ konsantrasyonuna ulaşana kadar devam ettiği görülmüştür. Bu durum yanma odasının çoğu alanında sıcaklıkların eşit dağılmasının ve alevin homojenliğinin tam yanmaya yol açtığını göstermektedir (Şekil 5.21.a). $O_2$ derişimi yeterli olmadığında $H_2$'nin $O_2$ ile reaksiyona girerek $CO_2$ emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir. Seyreltici olarak $CO_2$

kullanılması durumunda %22'lik $O_2$ konsantrasyonundan %15'lik $O_2$ konsantrasyonuna kadar $CO_2$ emisyonlarında bir artış görülmektedir (Şekil 5.21.b.). Bu artışın kaynağının, yanma odasına seyreltici olarak $CO_2$ girişi olduğu ve debideki artışa bağlı olarak bir kısmının yanma odasından çıkabileceği sonucuna varılmıştır. Yanma odasına giren seyreltici gazın yanma odasının içinde en uzak mesafeye kadar hareket ettiği ve bu nedenle seyreltici $CO_2$ bir kısmının dışarı çıkabileceği, bunun da emisyonlardaki bu artışın nedeni olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.21.c. seyreltici He olduğunda ise, özellikle %22'lik bir $O_2$ konsantrasyonundan sonra azalmanın devam ettiğini görülmüştür. Başlangıç konsantrasyonlarında ilk başta azalmanın küçük bunun nedeni hafifliği ve hızlı yayılması ile karakterize edilen az miktarda seyreltici He'nin girmesi ile açıklanmaktadır. Bu nedenle emisyonlardaki azalma miktarı nispeten düşmüştür. Ancak geri kalan $O_2$ konsantrasyonunda belirgin bir azalma fark edilmiş ve seyreltici olarak He kullanılarak CDC yönteminin uygulanmasının etkisine ilişkin sonuçlar desteklenmiştir. CDC yönteminde kullanılan son seyreltici Ar'a ait sonuçları Şekil 5.21.d.'te görülmüştür. Ar eklenmesi modellemede $CO_2$ emisyonlarının azaltılmasına sebebiyet vermiştir.




Şekil 5.23. %30$H_2$+%70 $CH_4$ karışımı için farklı seyrelticiler (a. $N_2$, b. $CO_2$, c. He ve d.Ar) ile uygulanan CDC'nin $CO_2$ emisyon profilleri

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, $CH_4$/hava yakıt karışımı ve $CH_4/H_2$/Hava yakıt karışımı üzerinde seyrelticiler ($N_2$, $CO_2$, Ar, He) kullanılmasının etkisi, karıştırılmamış yakıtın yanması durumunda renksiz dağıtılmış yanma (CDC) yöntemi uygulanarak sayısal çalışmalar yapılmıştır. Modellemede, ticari CFD kullanılmış ve deneysel sonuçlar ile sayısal veriler arasındaki benzerliği sağlamak için uygun yanma modeli (Eddy-dissipation) ile Türbülans modeli (K-epsilon) ve radyasyon modeli (p-1) de kullanılmıştır. Modelleme başlangıçta metan yakıtı üzerinde yapılmış ve seyrelticiler kademeli olarak eklenmiş, başlangıçta ($N_2$) oksitleyicide sabit miktarda $O_2$ ile ve seyrelticinin eklenmesinin sıcaklık profilleri ve kirleticiler $NO_X$, $CO_2$, CO emisyonları üzerindeki etkisi gösterilmiştir. He ve Ar seyrelticileri de aynı yöntemle eklenmiştir. İlk yakıtın sonuçlarının toplanması tamamlandıktan sonra metan yakıtına $H_2$+$CH_4$ %30 oranında $H_2$ eklenerek $H_2$ eklenmesinin sıcaklık ve $NO_X$, CO ve $CO_2$ emisyonları üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Ardından $CH_4$ yakıtı için kullanılan seyrelticiler eklenerek daha az emisyonlu ve çevreye daha az zararlı olacak şekilde bir yanma odası modellenmiştir. Bu yanma odası gelecekte yapılacak olan yanma odaları için önemli veriler oluşturduğu için birçok çalışmada bu modelin kullanılma potansiyeli olacağı düşünülmektedir.

## 6.1. Sonuçlar

- Çalışma kapsamında belirlenen işletme koşullarında tüm seyrelticiler için CDC yönteminin etkisiyle yanma odasındaki sıcaklık değerlerinde bir azalma ve daha homojen bir ısıl alan gözlemlenmiştir.
- Farklı seyrelticiler yanma odası içerisinde farklı sıcaklık profilleri oluşmasına neden olmuştur. Özellikle He ve $CO_2$ gibi seyrelticiler yanma odası içerisindeki sıcaklık düşüşleri üzerinde daha etkili olmuştur. En düşük sıcaklık değerlerine He ile seyreltme durumunda ulaşılmıştır.
- $NO_X$ emisyonlarının tüm seyrelticilerde azaldığı, ancak farklı seyreltici tiplerinde azalmanın değiştiği gözlemlenmiştir. Bu durum, renksiz dağıtılmış yanma yönteminin $NO_X$ emisyonlarını azaltmada başarılı olduğunu göstermekle birlikte, emisyonların azaltılmasında seyreltici tipinin önemini de göstermektedir.
- Seyrelticiler (He, Ar) $NO_X$, $CO_2$, CO ve her iki yakıttan gelen tüm kirleticileri azaltmada daha olumlu sonuçlar göstermiştir.

- (CDC) yönteminde seyreltici olarak kullanılan ($CO_2$)'in, insan ve doğa için zararlı olan $NO_X$ ve CO emisyonlarını azaltmada ve sıcaklıkları düşürmede iyi sonuçlar verdiği, ancak $CO_2$ emisyonlarında olumlu sonuçlar vermediği görülmüştür.
- Azot seyreltici olarak kullanıldığında, $NO_X$ ve $CO_2$ emisyonlarını azaltmada karbondioksitten daha az iyi performans gösterirken, azot CO emisyonlarını azaltmadı.
- Genel olarak, $CO_2$,$N_2$her iki yakıt karışımı için de seyreltici olarak He kullanılması, hem sıcaklık dağılımı hem de kirleticilerin azaltılması açısından en olumlu sonuçları meydana getirmiştir. Ancak, $O_2$ konsantrasyonunun %19 ve altına düşmesi durumunda yanma reaksiyonunun durması ve alevin sönme eğilimi göstermesi ihtimali olduğu da dikkate alınmalıdır.

## 6.2. Öneriler

Bu tez çalışması sırasında elde edilen sonuçlara dayanarak, modelleme ve analiz sonucunda, özellikle renksiz dağıtılmış yanma yönteminin uygulanması durumunda, sayısal yanma analizi çalışmalarında yararlı olacağı düşünülen bazı noktalar aşağıda önerilmektedir.

- Sayısal çalışmada kullanılan CDC koşulları ve elde ettiğimiz sonuçlar göz önüne alındığında, bu çalışmada seyreltici (He, Ar) kullanıldığında iyi ve önemli sonuçlar gördüğümüzden, seyreltici için kullanılan konsantrasyona dikkat edilerek, gelecekteki çalışmalarda bu seyrelticilerin kullanılmasını önerilmektedir.
- Sıcaklıkları ve tüm emisyonları azaltmadaki etkinliği, yanma reaksiyonunun sürekliliğini sağlaması ve pahalı bir gaz olması nedeniyle ekonomik açıdan tasarruf sağlaması nedeniyle seyrelticinin (He) düşük konsantrasyonda kullanılması önerilmektedir.
- Özellikle yakıtın bol miktarda H2 içermesi durumunda, tutarlı bir alev elde edilmesiyle birlikte kullanıldığında tüm kirleticileri azaltma etkisi nedeniyle, (CDC) yöntemini uygularken iyi bir seyreltici olarak gelecekteki çalışmalarda (Ar) kullanılmasını önerilmektedir.
- Gelecekteki çalışmalarda, giriş ve çıkış sıcaklığı, yakıt türü veya yakıta katılan $H_2$ miktarı gibi parametrelerde bazı değişiklikler yapılması, hatta yanma odasının tasarımının değiştirilmesi ve değişikliklerden sonra nasıl sonuçlar elde edilebileceğinin araştırıldığı çalışmalar yapılabilir.

# KAYNAKLAR


1. İnternet: World Energy Outlook 2016. URL: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2016. Son Erişim Tarihi: 05.11.2024.

2. Akin, G., (2006) Küresel Isınma, Nedenleri ve Sonuçları, *Ankara Üniversitesi Dil Ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 46(2), 2.

3. İlbaş, M., Karyeyen, S., Yılmaz, İ. (2016). Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor. *International Journal of Hydrogen Energy,* 41(17), 7185-7191.

4. Versteeg, H.K, Malalasekera, W. (2007). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine giriş.* İngiltere: Pearson Prentice Hall.

5. Karyeyen, S., Feser, J. S., Gupta, A. K. (2019). Swirl assisted distributed combustion behavior using hydrogen-rich gaseous fuels. *Applied Energy,* 251(1), 113354-113362.

6. Salem, E. (2018). *Çok Bileşenli Yakıt/Hava Karışımlarının Önceden Karıştırılmış Alevlerinin Sayısal Simülasyonları ve Uygulamaları,* Yüksek Lisans Tezi, Kentucky Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Lexington, 23-99.

7. Laguillo, S., Ochoa, J. S., Tizné, E., Pina, A., Ballester, J., Ortiz, A., (2021). Bir Pişirme Kabına Çarpan Kısmen Önceden Karıştırılmış Metan Alevlerinin Deneysel ve Sayısal Çalışmasından CO Emisyonları ve Sıcaklık Analizi, *Doğal Gaz Bilimi ve Mühendisliği Dergisi,* 88, 103771.

8. İlbaş, M., Yılmaz, İ. (2010). Hidrojen-metan karışım yanmasında yanma model sabitinin değerlendirilmesi, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi,* 30(1), 45-57.

9. Karyeyen, S. (2018). Combustion characteristics of a non-premixed methane flame in a generated burner under distributed combustion conditions: A numerical study, *Fuel,* 230, 163-171.

10. Guo, L., Zhai, M., Shen, Q., Guo, H., Dong, P. (2021). Kısmen Önceden Karıştırılmış Metan Alevinin İyonlaşması Üzerine Hidrojen İlavesinin Etkisi, *Yakıt Dergisi,* 285, 119141.

11. İlbaş, M., Yılmaz, İ., Özkan, F. (2006). Gaz türbini yanma odasında hidrojen ve hidrokarbon yanmasının modellenmesi ve nox oluşumunun incelenmesi, *Mühendis ve Makine Dergisi,* 47(559), 35-44.

12. Zhou, Z., Tao, Z. Q., Lin, B. Y., Kong, W. J. (2013). Seyreltme sınırına yakın CO/H2/Hava karışımlarının alev davranışı üzerinde yüksek başlangıç sıcaklıklarının ve basınçlarının etkilerinin sayısal araştırması, *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi,* 38(1), 274-281.

13. Khalil, A.E.E, Gupta, A.K. (2017). Towards colorless distributed combustion regime, *Fuel,* 195, 113-122.

14. Karyeyen, S., Feser, JS, Gupta, A.K. (2019). Hydrogen concentration effects on swirlstabilized oxy-colorless distributed combustion*, Fuel,* 253, 772-780

15. Greco, A., Mira, D., Jiang, X. (2017). Effects of fuel composition on biogas combustion in premixed laminar flames, *Energy Procedia,* 105, 1058-1062.

16. Khalil, A.E.E., Gupta, A.K. (2016). Fuel property effects on distributed combustion. *Fuel,* 171(1), 116-124.

17. İlbaş, M., Karyeyen, S., Çilingir, K. (2016). Ön-karışımsız ve ön-karışımlı metan alevlerinin baca yanma parametrelerinin deneysel olarak incelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 19(3), 357-365.

18. Li, Z., Yi, Q., Zhang, Y., Zhou, H., Zhao, Y., Huang, Y., Gao, D., Hao, Y. (2020). Kok fırını gazının oksijenli yakıtla yakılmasıyla düşük emisyonlu bir kok fırını sistemi için sayısal çalışma ve tasarım stratejisi, *Temiz Üretim Dergisi*, 252, 119656.

19. Hashemi, S. A., Skeikhzadeh, G. A., Hajialigol, N. Nikfar, M. (2012). Eğimli türbülanslı hava jetli ani genleşmeli bir yanma odasında NOX azaltımının sayısal araştırması, *Mekanik Bilim ve Teknoloji Dergisi,* 26(11), 3723-3731.

20. Öztürk, S. (2020). CO2, h2o ve n2 seyreltmelerinin kaya gazının yanmasından kaynaklanan kirleticiler üzerindeki etkileri, *Isı Bilimi ve Teknik Dergisi*, 40(1), 15-25.

21. Zaidi, Z., Gupta, Y., Gayatri, S.L., Singh, A. (2023). A comprehensive discussion on fuel combustion and desulfurization Technologies. *Inorganic Chemistry Communications,* 154, 110964.

22. Yılmaz, İ. (2006). *Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal ve Deneysel İncelemesi,* Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 24-27.

23. Karyeyen, S. (2016). *Geliştirilen bir yakıcıda kömür gazlarının yanma karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması,* Doktara Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-71.

24. Ziani L, Chaker A, Chetehouna K, Malek A, Mahmah B. (2013). PDF yaklaşımı kullanılarak CH[4]-H[2] karışımlarının önceden karıştırılmamış türbülanslı yanmasının sayısal simülasyonları. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38, 8597e603.

25. Çengel, Y. A., Boles, M. A., (2012). *Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik* (5. Baskı), İstanbul: Güven Bilimsel Yayıncılık, 751-817.

26. Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (2007). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine giriş: sonlu hacim yöntemi* (İkinci Baskı). İngiltere: Pearson eğitimi, 9-112.

27. Lieuwen, T.C., Yang, V., Yetter, R. (2010). *Sentez gazı yanması: temeller ve uygulamalar* (Birinci Baskı), Amerika Birleşik Devletleri: Taylor ve Francis Grubu, 169-188.

28. Zeldovich Y.A. (1947). *Yanmada azotun oksidasyonu*. Moskova: SSCB Bilimler Akademisi Yayınevi, 22-38.

29. Ilbas, M. (1997). *Ultra düşük NOX Brülörlerinin çalışmaları*, Doktora Tezi, Mühendislik Fakültesi, Galler Üniversitesi, Cardiff, İngiltere.

30. Chakravarthy, S. (2008). Akışkanlar dinamiği olaylarının yüksek doğruluklu hesaplamalı simülasyonlarının gerçekleştirilmesi, *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Dergisi*, 16-356.

31. İnternet: Ansys Fluent Tutorial Guide 18.0 Cipec URL: http://users.abo.fi/rzevenho/ansys%20fluent%2018%20tutorial%20guide.pdf, Son Erişim Tarihi: 20.06.2022.

32. İnternet: Ansys Fluent Theory Guide 15.0 Cipec URL: http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%2Theory%20Guide%2015, Son Erişim Tarihi: 19.06.2022.

33. 33- Sayma, A. (2009). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiği,* (Birinci basım), Londra, BookboonCompany, 16-107.

34. Spangelo, Ø. (2004). *Lox NOX girdap brülörünün deneysel ve teorik çalışmaları*, Doktora Tezi, Norveç Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Trondheim, Norveç, 7491.

35. Çengel, Y., (2013). *Pratik bir yaklaşımla ısı ve kütle transferi* (Üçüncü Basım), Güven Bilimsel Yayıncılık, İstanbul, 61-866.

36. Arslan, E. (2013). *İki zamanlı motorda değişken supap zamanlamasının motor performansına etkisinin sayısal incelenmesi,* Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 45-47.

37. Taşdemir, S., Karyeyen, S. (2022). *Önceden Karıştırılmış Bir Yanıcıda Kok Fırını Gazının Renksiz Dağıtılmış Yanma Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi.* Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 50-70.

38. Wang, L., Jiang, Y., Qiu, R. (2021). OH-PLIF Kullanılarak Türbülanslı Önceden Karıştırılmış Metan/Hava Alevlerinde Trimetil Fosfat ile Yanmanın İnhibisyonunun Deneysel Çalışması, *Yakıt Dergisi,* 294, 120324.

39. Kumuk, O. (2024). CO2, Ar, and He dilution effects on combustion dynamics and characteristics in a laboratory-scale combustor. *Fuel*, 369, 131745.

40. Aktaş, F., Karyeyen, S. (2022). Colorless distributed combustion (CDC) effects on a converted spark-ignition natural gas engine. *Fuel,* 317.

41. Çağrı T, Karyeyen. S. (2023). *Renksiz Dağıtılmış Yanmanın Ön Karışımlı Metan Alev Karakteristiklerine Olan Etkisinin Sayısal Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 33-56.

42. Olsson, H, (2019). Simulation of Colorless Distributed Combustion, *Department of Energy Sciences,* 19, 5444.

43. Bilgin, K. Karyeyen, S, (2020). Siklonik Brülörde Renksiz Dağıtılmış Yanmada (CDC) Yanma Karakteristikleri. *Uluslararası Enerji Çalışmaları Dergisi,* 5(1);43-55.

44. Ilbaş, M., Kumak, O., Karyeyen, S. (2022). Modelling of the gas-turbine colorless distributed combustion: An application to hydrogen enriched – kerosene fuel, *International Journal of Hydrogen Energy,* 47(24). 12354-12364.

45. Dimopoulos, P., Bach, C., Soltic, P. ve Boulouchos, K. (2008). Binek araç motorlarını besleyen hidrojen doğal gaz karışımları: Yanma, emisyonlar ve kuyudan tekerleğe değerlendirme, *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi,* 33(23), 7224–7236.

46. Ji, C., Wang, S. (2010). Rölanti ve zayıf koşullarda hibrit hidrojen benzinli bir motorun yanma ve emisyon performansı, *Uluslararası Hidrojen Enerjisi Dergisi,* 35(1), 346–355.

47. İlbaş, A., Karyeyen, S. (2023). *Yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odası için renksiz dağıtılmış yanma şartlarında yanma karakteristiklerinin araştırılması.* Doktora Tezi Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 33-85.

48. İnternet: .Simulation, n. meanings, etymology and more | Oxford English Dictionary. URL: https://www.oed.com/dictionary/simulation_n?tab=factsheet&tl=true. Son Erişim Tarihi: 03.09.2024.

49. İnternet: Simulation. URL: https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/simulation Son Erişim tarihi: 20.09.2023.

50. İnternet: Discrete-Event System Simulation. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Simulation. Son Erişim Tarihi: 23.10.2024.

51. İnternet: Computer simulation is particularly well suited to address these questions. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Simulation. Son Erişim Tarihi: 13.07.2024.

52. İnternet: Universal Turing Machine. URL: https://web.mit.edu/manoli/turing/www/turing.html. Son Erişim Tarihi: 20.09.2024.

53. Anderson, J. D., Wendt, J. (1995). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiği*. New York, NY: McGraw-Hill. 178-187.

54. Andersson, B, Andersson, R, Håkansson, L, Mortensen, M, Sudiyo, R, Van Wachem, B. (2011). *Mühendisler için hesaplamalı akışkanlar dinamiği*. Cambridge, İngiltere: Cambridge University Press.

55. Kamyar, A., Saidur, R., Hasanuzzaman, M. Nanofluidler için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin (HAD) uygulanması. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 55(16), 4104–4115.

56. Zakaria, M.S, Ismail, F, Tamagawa, M, Azi, AF, Wiriadidjaya, S, Basri, AA, (2018). OpenFOAM kullanılarak aorttaki kan akışının hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışması. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences,* 43,81–9.

57. Kozelkov, AS, Kurulin, VV, Lashkin, SV, Shagaliev, RM, Yalozo, AV. (2016). Endüstriyel uygulamalarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin ölçeklenebilir sayısal simülasyonu için süper bilgisayar yeteneklerinin araştırılması. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 56(8), 1506–1516.

58. Mader, C.A, Kenway, G.K, Yildirim, A, Martins, J.R. (2020). ADflow: aerodinamik ve disiplinler arası optimizasyon için açık kaynaklı bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü. *Journal of Aerospace Information Systems,* 17, 1–20.

59. Keramida, E., Liakos, H., Founti, M., Boudouvis, A., Markatos, N. (2000). Doğal gazla çalışan fırınlarda radyatif ısı transferi, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 43, 1801–1809.

60. Wilkes, N. Guilbert, P. Shepherd, C. Simcox, S. (1989). Harwell-Flow 3D'nin Yanma Modellerine Uygulanması, Atom Enerjisi Kurumu Raporu, Harwell, İngiltere, Makale No AERE-R13508,

61. Magnussen, B. F., Hjertager, B. H. (1977). On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. *Symposium (International) on Combustion.* 16(1), 719-729.

62. Centeno, F.R., Brittes, R., França, F.H.R., Silva, C.V. (2016). Silindirik bir yanma odası içindeki türbülanslı, önceden karıştırılmamış metan-hava alevindeki gaz-is radyasyonunun hesaplanması için WSGG modelinin uygulanması, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 742–753.

63. Khanafer, K. Aithal, S. M., (2011). Girdap Brülörlerde Akışkan Dinamiği ve NOx Hesaplaması, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, 5030–5038.

64. Chuang, S. H., Yang, C. S. Wu, N. J., (1999). İki Adımlı Yanma Modeli Kullanılarak Alev Tutucu Yan Girişli Ani Genleşmeli Boşaltma Yanma Odasında Dönen Akışın Tahminleri, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid,* 9, 764–787.

65. Saqr, K. M., Aly, H. S., Sies, M. M. Wahid, M. A., (2010). Effect of free stream turbulence on NOx and soot formation in turbulent diffusion CH4-air flames. *International Communications in Heat and Mass Transfer.* 37(6), 611-617.

66. Al-Omari, S. A. B., Kawajiri, K. Yonesawa, T., (2001). Metan Yakıtlı Bir Fırında İs Prosesleri ve Fırın Duvarlarına Radyasyon Isı Transferi Üzerindeki Etkileri, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, 2567–2581.

67. İlbaş, M., Yılmaz, İ., Veziroğlu, T. N., Kaplan, Y. (2005). Brülör Yakıtı Olarak Hidrojen: Küçük Bir Brülörde Hidrojen-Hidrokarbon Kompozit Yakıt Yanması ve NOx Oluşumunun Modellenmesi, *International Journal of Energy Research*, 29, 973–990.

68. Ilbas, M. Yılmaz, I., (2012). “Hidrojen İlavesinin Metan Yanması Üzerindeki Etkilerinin Deneysel Analizi, *International Journal of Energy Research*, 36, 643–647.

69. Lopes, J., Semiao, V., Carvalho, M. G., (2002). Difüzyon Alevlerinin Karıştırma Oranı Üzerindeki Yerel Türbülans Ölçeklerinin Etkisi Üzerine: İki Farklı Yanma Modelinin Değerlendirilmesi, *International Journal of Energy Research,* 26, 893–920.

70. Liakos, H. H., Founti, M. A. Markatos, N. C., (2001). Endüstriyel Propan-Oksijen Karışımında Basıncın Etkisi, *International Journal of Energy Research,* 25, 17–28.

71. Ma, C. Y., Mahmud, T., Gaskell, P. H., Hampartsoumian, E., (1999). Numerical Predictions of a Turbulent Diffusion Flame in a Cylindirical Com bustor Using Eddy Dissipation and Flamelet Combustion Models, *Journal of Mechanical Engineering Science*, 213, 697–705.

72. Orsino, S., Weber, RD., Bollettino, U., (2001). “Yüksek Sıcaklıktaki Hava ile Doğal Gazın Yanmasının Sayısal Simülasyonu”, *Combustion Science and Technology*., 170, 1–34.

73. Morvan, D., Porterie, B., Loraud, J. C., Larini, M., (2000). “Metan/Hava Yayılımlı Türbülanslı Difüzyon Alevinin Sayısal Simülasyonu,” *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid,* 10, 196–227.

74. Lewars, E.G. (2008). *Modelling Marvels. Computational Anticipation of Novel Molecules.* Springer, Springer Science and Business Media B.V., The Netherlands, 70-71.

75. İnternet: Helium sell-off risks future supply. URL: https://physicsworld.com/a/helium-sell-off-risks-future-supply/. Son Erişim Tarihi: 03.11.2024.

76. Gase-Handbuch der Firma Messer Griesheim, 3. Auflage, korrigierter Nachdruck 1989, S. 226.

77. Iancu, C. V., Wright, E. R., Heymann, J. B., Jensen, G. J. (2006). "Elektron kriyotomografisi için kriyojen olarak sıvı nitrojen ve sıvı helyumun karşılaştırılması". *Yapısal Biyoloji Dergisi.* 153(3), 231–40.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*