
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

# RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA SEYRELTİCİNİN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**Kenan Bilgin KEKEÇ**

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2021**

## ETİK BEYAN

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

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

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

Kenan Bilgin KEKEÇ

28/07/2021

# RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA SEYRELTİCİNİN YANMA KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kenan Bilgin KEKEÇ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

## ÖZET

Bu çalışmada, metan ve hidrojence zenginleştirilmiş metan karışımlı yakıtlar kullanılarak yeni bir yakma yöntemi olan renksiz dağıtılmış yanma koşulları (CDC) sayısal olarak incelenmiştir. CDC koşullarını başarılması için oksitleyici %21'den %13'e kadar $N_2$ ve $CO_2$ seyrelticileri kullanılarak azaltılmıştır. Ayrıca oksitleyici ön ısıtma etkisini gözlemleyebilmek için oksitleyici hem 300 K hem de 600 K'e kadar ısıtılarak sayısal analizler yapılmıştır. Seçilen yanma odası simetrik olarak yerleştirilmiş iki yakıt girişi ve iki oksitleyici giriş bölümü sayesinde girdap akışları oluşturmuştur. Yakıt debileri 2 kW ısıl güce göre düzenlenmiştir. Oksitleyici akış hızları farklı eşdeğerlik oranları ve seyreltme oranları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca yakıt giriş ve oksitleyici giriş yapısının yanmaya etkisi hem paralel hem de çapraz akışlı olarak karşılaştırılarak incelenmiştir. Tüm bu analizler Ansys Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği ticari kodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Siklonik bir yakıcıda daha doğru türbülans akış tahmini yapabilmek için Reynold Stress Model kullanılmıştır. Özetle, CDC koşulları, yanma odası boyunca genişletilmiş alev yapısı, alev kararlılığı, daha homojen sıcaklık dağılımı, ultra düşük $NO_X$ ve düşük CO emisyon seviyeleri ile sağlanmıştır. Özellikle hidrojen ilavesi ile birlikte öngörülen alev kararsızlıkları CDC ile elimine edilmiştir.

| | | |
|---|---|---|
| Bilim Kodu | : | 92807 |
| Anahtar Kelimeler | : | Yanma, Emisyon, Enerji, HAD |
| Sayfa Adedi | : | 78 |
| Danışman | : | Doç. Dr. Serhat KARYEYEN |

# NUMERICAL ANALYSES OF DILUENT EFFECT ON COMBUSTION CHARACTERISTICS UNDER COLORLESS DISTRIBUTED COMBUSTION CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Kenan Bilgin KEKEÇ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

## ABSTRACT

In this study, colorless distributed combustion conditions (CDC) which is a novel combustion method have been examined as numerical by using methane and hydrogen enriched methane mixtures fuels. In order to achive CDC conditions, oxidizer has been diluted with $N_2$ / $CO_2$ under different oxygen concentrations, 21% to 13%. Moreover, to be able to observe oxidizer pre-heating effect, numerical analyses have been conducted with 300K and 600K oxidizer temperatures. Selected combustion chamber created swirl flows through symmetrically located two fuel inlet and two oxidizer inlet sections. Fuel flow rates have been arranged based on thermal power of 2 kW. Oxidizer flow rates have been calculated by taking into account various equivalence ratio and dilution ratios. In addition that, fuel and oxidizer inlet structures on combustion have been investigated by comparing as both parallel and cross flows. All these analyses have been implemented by using Ansys Fluent computational fluid dynamics commercial codes. In order to make more accurate turbulence flow predictions, Reynold Stress Model has been used. In summary, CDC conditions have been provided with broadened flame structure throughout cumbustion chamber, flame stability, uniformly temperature distribution, ultra low $NO_X$ and low CO emissions levels. Especially, predicted flame instabilities along with hydrogen addition have been eliminated with CDC.

| | | |
|---|---|---|
| Science Code | : | 92807 |
| Key Words | : | Combustion, Emission, Energy, CFD |
| Page Number | : | 78 |
| Supervisor | : | Assoc. Prof. Dr. Serhat KARYEYEN |

# TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu belirlememde ve yürütülmesinde, kıymetli tecrübelerini esirgemeyen ve her zaman yardım ve desteğini gördüğüm tez danışmanım ve değerli hocam Doç. Dr. Serhat KARYEYEN' e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını hazırlamamı sağlayacak maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen ve eğitim-öğretim hayatım boyunca her zaman yanımda olan çok değerli ve kıymetli aileme şükranlarımı sunuyorum.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv

ABSTRACT ..... v

TEŞEKKÜR ..... vi

İÇİNDEKİLER. ..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ..... x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... xv

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... xvii

1. GİRİŞ ..... 1

2. YAKITLAR YANMA VE HAVA KİRLİLİĞİ ..... 11

2.1. Yakıtlar ..... 11

2.1.1. Gaz yakıtlar ..... 11

2.1.2. Sıvı yakıtlar ..... 12

2.1.3. Katı yakıtlar ..... 12

2.2. Yanma ..... 13

2.2.1. Yanmanın termodinamiği ..... 13

2.3. Hava Kirliliği ..... 15

2.3.1. Azot oksit (NOx) oluşumu ..... 15

2.3.2. Karbon monoksit (CO) oluşumu ..... 22

2.3.3. Karbon dioksit (CO2) oluşumu ..... 23

2.4. Hidrojen, Metan ve Hidrojen Metan Karışımlı Yakıtlar ..... 23

2.4.1. Hidrojen ..... 23

2.4.2. Metan ..... 24

2.4.3. Hidrojen-metan karışımlı kompozit yakıtlar ..... 24

**Sayfa**

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)..... 25

3.1. Hareket Denklemleri..... 26

3.2. Kimyasal Türlerin Korunumu..... 27

3.3. Yakıcılarda Türbilanslı Akışın Modellenmesi..... 27

3.4. Reynolds Gerilme Modeli..... 28

3.4.1. Üretim terimi..... 28

3.4.2. Hızlı basınç-gerilme korelasyonu terimi..... 29

3.4.3. Yavaş basınç-gerilme korelasyonu terimi..... 29

3.4.4. Dağılma terimi..... 30

3.4.5. Difüzyon terimi..... 31

3.4.6. Rotasyonal terim..... 31

3.5. Standard k-ε Türbülans Modeli..... 32

3.6. Yanmanın Modellenmesi..... 33

3.7. Sınır Şartları..... 37

4. MODEL DETAYLARI..... 39

4.1. Ağ Bağımsızlığı ve Model Doğrulaması..... 42

5. SONUÇLAR ..... 45

5.1. %100 Metan için Paralel ve Çapraz Akışlı Yakıcılarda Oksijen Konsantrasyonunun Sıcaklık Dağılımına ve Kirletici Emisyon Değerlerine Etkisi..... 45

5.2. %100 Metan için Paralel Akışlı Yakıcılarda Eşdeğerlik Oranının Sıcaklık Dağılımlarına ve Kirletici Emisyon Değerlerine Olan Etkisinin incelenmesi..... 50

5.3. Farklı Oranlarda Hidrojence Zenginleştirilmiş Metanın Yakıt Olarak Kullanımının İncelenmesi..... 52

6. SONUÇ..... ..... 69

**Sayfa**

6.1. Sonuçlar..... 69

6.2. Öneriler..... . 70

KAYNAKLAR..... 71

ÖZGEÇMİŞ..... 77

# ÇİZELGELERİN LİSTESİ

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 3.1. k-$\varepsilon$ modelde kullanılan sabitler……... 33

Çizelge 3.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler…… 35

Çizelge 4.1. Yanma Şartları..... 41

# ŞEKİLLERİN LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.1. Petrolden elde edilen ürünler..... 12

Şekil 2.2. Yakıt $NO_X$ oluşum şeması..... 20

Şekil 4.1. Paralel akışlı (sol) ve çapraz akışlı (sağ) yakıcıların üstten görünümleri..... 39

Şekil 4. 2. Paralel akışlı (sol) ve çapraz akışlı yakıcıların izometrik görünümleri..... 40

Şekil 4.3. Ağ Bağımsızlık Grafiği..... 43

Şekil 4.4. Model doğrulama grafiği..... 43

Şekil 5.1. Sıcaklık dağılımı (oksijen konsantrasyonları: %15 (üst) ve %21 (alt))..... 45

Şekil 5.2. Farklı oksijen konsantrasyonlarında paralel akışlı yakıcılarda sıcaklık dağılımı..... 46

Şekil 5.3. Farklı oksijen konsantrasyonlarında çapraz akışlı yakıcıda sıcaklık dağılımı..... 47

Şekil 5.4. Farklı oksijen konsantrasyonlarında çapraz akışlı yakıcıda sıcaklık dağılımı..... 48

Şekil 5.5. $NO_X$ emisyon profilleri (paralel-akışlı (Sol), çapraz-akışlı (Sağ)..... 49

Şekil 5.6. NOx ve CO emisyonları (paralel-akışlı, çapraz-akışlı)..... 49

Şekil 5.7. Sıcaklık dağılımı (eşdeğerlik oranları: %60 (üst) ve %90(alt)..... 50

Şekil 5.8. Farklı eşdeğerlik oranlarında paralel akışlı yakıcıda sıckalık profilleri..... 51

Şekil 5.9. Farklı eşdeğerlik oranlarında paralel akışlı yakıcıda NOx emisyon profilleri..... 52

Şekil 5.10. 300 K'de $N_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları..... 54

Şekil 5.11. 600 K'de $N_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları..... 55

Şekil 5.12. 300 K'de $CO_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları..... 56

Şekil 5.13. 600 K'de $CO_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları..... 57

Şekil 5.14. 300 K'de $N_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri..... 59

Şekil 5.15. 600 K'de $N_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri..... 60

Şekil 5.16. 300 K'de $CO_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri..... 61

Şekil 5.17. 600 K'de $CO_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri..... 62

Şekil 5.18. Ortalama $NO_x$ emisyonları (%100 $CH_4$)..... 64

Şekil 5.19. Ortalama CO emisyonları (%100 $CH_4$)..... 64

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 5.20. Ortalama $NO_x$ kirletici emisyonlar (%60 $CH_4$ - %40 $H_2$)..... 65

Şekil 5.21. Ortalama CO kirletici emisyonlar (%60 $CH_4$ - %40 $H_2$)..... 65

Şekil 5.22. Ortalama $NO_x$ kirletici emiyonlar (%50 $CH_4$ - %50 $H_2$)..... 66

Şekil 5.23. Ortalama CO kirletici emisyonlar (%50 $CH_4$ - %50 $H_2$)..... 66

Şekil 5.24. Ortalama $NO_x$ kirletici emisyonlar (%40 $CH_4$ - %60 $H_2$)..... 66

Şekil 5.25. Ortalama CO kirletici emsiyonlar (%40 $CH_4$ - %60 $H_2$)..... 67

# SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| **A** | Arrhenius faktörü |
| **A** | Taşınımla ısı transferi yüzey alanı |
| **Bar** | $10^5$ Pa |
| **C** | Deneysel sabit |
| **$CH_4$** | Metan |
| **CO** | Karbon monoksit |
| **$CO_2$** | Karbon dioksit |
| **$c_p$** | Özgül ısı |
| **E** | Aktivasyon enerjisi |
| ***f*** | Karışım oranı |
| **G** | Türbülans kinetik enerjisi üretimi |
| ***I*** | Toplam yarı küresel şiddet |
| **J** | Akı |
| **h** | Işı taşınım katsayısı |
| **H** | Entalpi |
| **$H_2$** | Hidrojen |
| **$H_2O$** | Su buharı |
| **k** | Oran sabiti |
| **k** | Isı iletim katsayısı |
| **k** | Debimetre kalibrasyonu dönüşüm faktörü |
| **K** | Kelvin |
| **kcal** | Kilokalori |
| **kg** | Kilogram |
| **kW** | Kilowatt |
| **kWh** | Kilowatt-saat |
| **m** | Metre |
| **$m^3$** | Metreküp |

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| $m$ | Kütlesel oran |
| $m_j$ | Kütle oranı |
| **MJ** | Megajoule |
| **MPa** | Megapaskal |
| **MW** | Megawatt |
| $N_2$ | Azot |
| $Nm^3$ | Normal metreküp |
| $NH_3$ | Amonyak |
| $NO_X$ | Azot oksit |
| **NO** | Azot monoksit |
| $NO_2$ | Azot dioksit |
| $N_2O$ | Diazot oksit |
| $N_2O_3$ | Diazot trioksit |
| $N_2O_5$ | Diazot pentaoksit |
| $O_2$ | Oksijen |
| **OH** | Hidroksil |
| P | Basınç |
| **Q** | Isı transferi |
| **Q** | Yakıt debisi |
| **R** | Universal gaz sabiti |
| **R** | Dönüşüm oranı |
| $SO_X$ | Kükürt oksit |
| $SO_2$ | Kükürt dioksit |
| $S_j$ | Oluşmanın kütle oranı |
| **T** | Sıcaklık |
| $VOC_s$ | Uçucu organik bileşenler |
| **w** | Açısal hız |
| **ppm** | Parts per million |
| **ppmv** | Parts per million by volume |
| **°C** | Santigrad |

| Simgeler | Açıklamalar |
|---|---|
| $\boldsymbol{\rho}$ | Yoğunluk |
| $\boldsymbol{\tau}$ | Vizkoz kayma gerilmesi |
| $\boldsymbol{\Gamma}$ | Laminer değişim katsayısı |
| $\boldsymbol{\mu}$ | Vizkozite |
| $\boldsymbol{\delta}$ | Kroneker delta tensörü |
| $\boldsymbol{\varepsilon}$ | Yayılma oranı |
| $\boldsymbol{\sigma}$ | Prandlt sayısı |
| $\overline{f}^2$ | Karışım oranı değişimi |
| $\boldsymbol{\Sigma}$ | Stefan-Boltzman sabiti |
| $\boldsymbol{\alpha}$ | Emme ve saçılma katsayısı |
| $\emptyset$ | Eşdeğerlilik oranı |

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|---|---|
| **CFD** | Computational Fluid Dynamics |
| **CDC** | Colorless Distributed Combustion |
| **DNS** | Direct Numerical Simulation |
| **DRM** | Diffusion Reaction Model |
| **EDC** | Eddy Dissipation Concept |
| **FLOX** | Flameless Oxidation |
| **FGMs** | Flamelet Generated Manifolds |
| **GRI** | Gas Research Institute |
| **HAD** | Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği |
| **HiTAC** | High Temperature Air Combustion |
| **JHC** | Jet in Hot Coflow |
| **KPP** | Kinetic Pre-Processor |
| **MILD** | Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution |
| **LES** | Large Eddy Simulation |
| **LHV** | Lower Heating Value |

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|---|---|
| **LPG** | Liquefied Petroluem Gas |
| **PSRN** | Problem Solving Reasoning and Numeracy |
| **RANS** | Reynolds-Averaged Navier Stokes |
| **RNG** | Re-Normalization Group |
| **RSM** | Reynolds Stress Model |

# 1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfus ile birlikte ısıtma, soğutma ve elektrik ihtiyacında, dolayısıyla enerji talebinde sürekli olarak artış meydana gelmektedir. Yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelişimi son on yılda önemli bir şekilde artmasına rağmen, fosil yakıtlar hala başlıca önemli enerji kaynaklarıdır [1]. Fosil yakıtların yoğun şekilde kullanımı, sera gazı ve diğer kirletici emisyonlar nedeniyle iklim ve çevre üzerindeki endişelerin artmasına neden olmakla birlikte hızlı bir şekilde rezervleri tüketmektedir.

Özellikle son yıllarda küresel iklim değişikliğinin negatif etkileri görünür hale gelmiştir. Yakın gelecekte, karbonsuz yakıtlar kullanılmadıkça ve enerji arz ve talebi azaltılmadıkça sözedilen negatif etkiler artarak devam edecektir [2]. Bu doğrultuda araştırmacılar mevcut kaynakları kullanarak alternatif yakıt bulma ve emisyonları azaltırken enerji çıktısını artırmak için sistem verimliliklerini geliştirme amacıyla çalışmalar yürütmektedir. Fosil yakıt kullanımı sonucu ortaya çıkan $NO_X$, CO, gibi kirletici emisyonlar ve $CO_2$ gibi sera gazı emisyonları yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen hidrojen gibi alternatif yakıt kullanımına geçişi zorunlu kılmaktadır [3-5]. Ancak, yanma sırasında doğrudan hidrojen kullanımı, alev tepmesi gibi bazı dengesizliklere yol açmaktadır. Bunun yerine, var olan doğal gaz hatlarına hidrojen beslemesi umut vadeden bir uygulama olabilir. Yanma ile ilgilinen kişiler açısından, bunu metan ile modellemek, çıkarıldığı bölgeye bakılmaksızın doğal gazın önemli bir bileşeni oluğu için oldukça makuldür. Ancak, hidrojen beslemesi, karbon temelli kirletici emisyonları azaltmasına rağmen, ısıl $NO_X$ mekanizmaları sebebiyle, $NO_X$ emisyonlarını artırabilir. Bu nedenle, hidrojen beslemesinin yanma performansı üzerindeki etkisini azaltmadan, yeni ve özgün bir yanma yöntemi düşünülmelidir.

Literatür taraması

Literatürde Colorless Distributed Combustion (CDC) olarak bilenen genişletilmiş ve hacimsel olarak dağıtılmış alev yapısı oluşturabilen yeni bir yöntem sayesinde, yanma performansı ve veriminden ödün vermeden homojen sıcaklık dağılımı, düşük kirletici emisyonlar, diğer yanma yöntemlerine nazaran azaltılmış yanma gürültüsü ve dengesizlikleri gözlemlenebilmiştir [6-9]. CDC koşulları, reaktif yanma ürünlerinin oksitleyiciye reaktif karışıma kontrollü olarak gönderilmesi veya resirkülasyonu yoluyla başarılır [10]. Bu durum reaksiyon hızının

yavaşlamasını ve alevin genişlemeye başlamasını sağlamaktadır. Ayrıca Moderate or Intense Low Oxygen Dilution (MILD) ve Flameless Oxidation (FLOX) olarak adlandırılan daha birçok yakma tekniği vardır [11-14]. Bu teknikler CDC ile benzerlik göstermelerine rağmen, aralarında bazı farklar vardır. MILD koşullarına yüksek giriş sıcaklığı ile ulaşılabilinir. FLOX genellikle iç resirkülasyon ile tanımlanır. CDC koşullarına, herhangi bir sıcaklıkta oksitleyici içerisindeki oksijen konsantrasyonunun azaltılmasıyla ulaşılabilinir.

Karyeyen ve diğerleri [15], 300 K giriş sıcaklığında CDC koşulları altında hidrojen açısından zengin gaz yakıtları inceledi. OH* görüntülerine ve $NO_X$ ve CO olarak bilinen kirleticilere odaklandılar. OH* tanıtıcı parlaklığı, $NO_X$ ve CO seviyelerinin, seyrelticinin karışıma eklenmesiyle önemli ölçüde azaldığı sonucuna varıldı. Ayrıca bu makalede [15] ateşlemeden önce sıcak reaktif gazların oksitleyici karışımına kontrollü olarak katılması, homojen bir termal alan, ultra düşük emisyonlar, gelişmiş alev kararlılığı, düşük gürültü ile sonuçlanan CDC koşulu elde etmek için kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Makalede [15], hidrojenle zenginleştirilmiş metan gazı kullanılan bir yakıcıda renksiz dağıtılmış yanmanın yakıt esnekliği incelemektedir. CDC koşulu, oksitleyicideki oksijen konsantrasyonunun $N_2$ veya $CO_2$ eklenmesiyle azaltılmasıyla elde edildi. Bu çalışmada üç farklı gaz yakıt bileşimi incelenmiştir. $CO_2$ ve $N_2$ varlığında çeşitli konsantrasyonlarda hidrojenle zenginleştirilmiş metan, kok fırını gazını temsil etmesi amacıyla kullanılmıştır. Yakıt özelliklerinin alev yapısı ve emisyonlar üzerindeki etkisine ilişkin sonuçlar burada rapor edilmiştir. Oksijen konsantrasyonunda değişiklik olmadan seyreltmesinin etkisini belirlemek için eşdeğerlik oranının alev kararlılığı ve emisyonlar üzerindeki etkisi de araştırıldı. Sonuçlar, incelenen farklı gaz bileşimleri için, seyreltici gaz olarak $N_2$ ile %10-12 ve $CO_2$ ile %13 %15 oksijen konsantrasyonlarında dağıtılmış yanma koşullarına geçişin gerçekleştiğini göstermiştir. Gaz karışımındaki hidrojen konsantrasyonundaki artış (veya metan konsantrasyonundaki azalma), azaltılmış oksijen konsantrasyonunda CDC durumuna geçiş ile sonuçlanmıştır. $NO_X$ emisyonu, farklı seyrelticiler kullanılarak incelenen tüm gaz bileşimleri için dağıtılmış yanma koşulu altında normal yanmaya kıyasla önemli ölçüde (1 ppm'den az) azalmıştır. CO emisyonu, CDC koşullarına yaklaşırken kademeli olarak azaldı ve ardından tutuşabilirlik sınırına doğru hafifçe arttı. Tek haneli ppm CO seviyeleri, azot seyreltme altında CDC ile elde edilirken, karbondioksit seyreltme, yüksek sıcaklıklarda $CO_2$'nin ayrışmasına atfedilen biraz daha yüksek CO emisyonu ile sonuçlandı. Yüksek hidrojen içerikli gazlardaki alev geri tepme eğilimi, dağıtılmış durumda elimine edilmiştir. Daha dengeli bir alev yapısı sağlanmıştır. Bu sonuçlar, gelişmiş alev stabilitesi ve ultra düşük emisyon sağlayan CDC koşulları

altında seyreltilmiş hidrojenle zenginleştirilmiş metan gazının (kok fırını gazına benzer) yakıt esnekliğini göstermektedir.

Khalid ve Gupta [16], çalışmalarında kullandıkları yakıt içerisine hidrojen eklediler. Hidrojenle zenginleştirme, CO emisyonunda önemli bir azalma sağlarken tutuşabilirlik sınırlarını genişletti. Bu çalışmada özetle dağıtılmış yanma; tek tip termal alan (geliştirilmiş alev yapısı), ultra düşük kirlilik, gelişmiş stabilite ve daha yüksek verimlilik sağlamak için gaz türbininin karakteristiği olan yüksek yoğunluklu düşük oksijen konsantrasyonlu koşullar altında önemli avantajlar sağlar. Taze hava/yakıt akışı ile sıcak reaktif türlerin karıştırılması, dağıtılmış reaksiyonlar ve kendiliğinden tutuşma ile sonuçlanması açısından kritik öneme sahiptir. Yakıtın hidrojenle zenginleştirilmesi, girdap akış koşulları altında yanma kararlılığı ve emisyonlar üzerinde durularak incelenmiştir. Hidrojen zenginleştirmenin metanla (kütlece %4-15, hacimce %25-58,5) yakıtsız koşullar altında yanma özellikleri üzerindeki rolüne ilişkin sonuçlar sunulmaktadır. CO emisyonu, ön karışımlı yanma koşulları altında $NO_x$ emisyonu üzerinde minimum etki ile hidrojen zenginleştirme ile önemli ölçüde azaltılmıştır. Hidrojen ilavesi, kararlı yanma ve alev dalgalanmaları veya geri tepme olmadan yanma odasının zayıf çalışma sınırlarını genişletti. OH kemilüminesans yoluyla kirletici emisyonu ve alev işaretlemesi sayesinde elde edilen sonuçlar ile yaklaşık dağıtılmış yüksek yoğunluklu yanmanın hacmini, ultra düşük emisyonları (<3 PPM $NO_X$ ve < PPM CO) daha düşük eşdeğerlik oranında yüksek performansı göstermiş oldu. Hibrit yani sayısal ve deneysel yaklaşım, hidrojenle zenginleştirilmiş metan yanmasından kaynaklanan $NO_X$ emisyonunun daha gerçekçi tahminini sağlayabilir.

Karyeyen ve diğeleri [17], diğer bir çalışmada, hidrojence zengin gaz halindeki yakıtların CDC koşulları altında yanma özelliklerini incelemişlerdir. CDC koşullarına ulaşmak için oksitleyici olarak çeşitli $O_2$-$CO_2$ karışım konsantrasyonları kullanıldı. Sonuçlar, farklı hidrojen konsantrasyonlarının tutuşabilirlik limitini etkilediğini göstermiştir. hidrojenin laminer alev hızı nedeniyle en yüksek hidrojen içeriğini barındıran gaz halindeki yakıtta en düşük oksijen konsantrasyonuna ulaşıldığını göstermiştir. Bu çalışma [17] daha detaylı incelendiğinde, renksiz dağıtılmış yanma, daha düzgün ve kontrollü termal alan elde etmek, alev stabilitesini arttırmak ve yanma gürültüsü dahil emisyonları azaltmak için yeni bir yanma tekniği olması nedeniyle üzerinde durulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanma (CDC) koşulları, sıcak reaktif gazların yakıcı içerisinde kontrollü şekilde sirkülasyonu ile elde edilmiştir. Bu, yanma odasının tüm hacmi boyunca dağıtılan reaksiyon bölgesi ile yani dağıtılmış yanma karışımı sağlamak üzere oksijen konsantrasyonunun azaltılmasıyla mümkün olmuştur. Bu çalışmada [17], düşük ısıl değerli

yakıtları temsil etmek üzere her biri %10 $N_2$ ve $CO_2$ ile seyreltilmiş farklı metan ve hidrojen karışımları kullanılarak oksi-renksiz dağıtılmış yanma, yakıt esnekliği açısından incelenmiştir. Kullanılan oksitleyici, yakıcıdan $NO_X$ oluşumunu ortadan kaldıran bir $O_2$-$CO_2$ karışımıydı. Ortaya çıkan OH* kemilüminesans imzaları, dağıtılmış yanma koşulu altında 0,6-0,9 aralığında eşdeğerlik oranlarında yakıttaki çeşitli hidrojen konsantrasyonları için kaydedildi. 0,9 eşdeğerlikte, hidrojen konsantrasyonu %60, %50 ve %40 (hacim bazında) olan yakıtlar için sırasıyla %17, %19 ve %21 oksijen konsantrasyonlarında CDC'ye geçiş başlatıldı. Geçiş noktasındaki farklılıklar, yakıtta daha fazla hidrojen ile ilişkili daha yüksek alev hızına bağlandı. Yüksek hidrojen konsantrasyonuna sahip gaz halindeki yakıt, daha düşük oksijen konsantrasyonunda daha fazla dağılmış OH* alev yapıları sağlarken, daha yüksek oksijen konsantrasyonunda alev kararlılığı arttı. Oksi-renksiz koşullar, yüksek oksijen konsantrasyonunda ve yüksek (0,9) eşdeğerlik oranında bile yalnızca 10-30 ppm CO oluşturdu. Sonuçlar, yüksek hidrojen içeriğinede farklı ısıl değerlere sahip gaz halindeki yakıtlar ile yakıt esnekliği göstermiştir. Sonuçlar, oksitleyici olarak $O_2$ -$CO_2$ karışımı kullanan düşük ısıl değerli yakıtlar için oksi-renksiz dağıtılmış yanma altında çok düşük CO emisyonu ve gelişmiş alev kararlılığı sağladı.

Yu ve diğerleri [18], hidrojen açısından zengin yakıtların dağıtılmış rejim altında yanmasını inceledi. Değişen hidrojen içeriği de dahil olmak üzere farklı yakıtlar kullandılar. Hidrojen içeriğinin CO emisyon oluşum seviyesini etkilediği sonucuna varılmıştır. Ayrıca CDC ile $NO_X$ seviyeleri düşütüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çalışmada daha detaylı bahsetmek gerekirse [18], yüksek hidrojen içerikli yakıtın yanmasında termal-$NO_X$ oluşumunu bastırmak için alevsiz yanma teşvik edilmiştir. PSRN modeli, dört yakıt ile havadaki alevsiz yanmayı modellemek için kullanıldı: $H_2$/$CH_4$ %60/40 (hacimce), $H_2$/$CH_4$ %40/60, $H_2$/$CH_4$ %20/80 ve saf hidrojen. Sonuçlar, dört yakıtın tümü için "alevsiz yanma" rejimindeki deneysel verilerle örtüşen, CO emisyonlarının 50 ppmv altındayken $NO_x$ emisyonlarının 30 ppmv'nin altında olduğunu göstermektedir. Simülasyon ayrıca, hidrojen bileşimi %40 ile %100 arasında değiştiğinde CO'in 48 ppmv'den neredeyse sıfıra düştüğünü, ancak NOx emisyonunun hidrojen bileşimine duyarlı olmadığını ortaya koymaktadır.

Literatürde çok sayıda çalışmanın olduğu belirtilmelidir. Ancak MILD, FLOX ve HiTAC yakma yöntemleri de CDC kapsamında kabul edilebilir. Mardani ve diğerleri [19], MILD koşulları altında türbülanslı hidrojen-metan karışımı olan yakıtları modellediler. Hidrojen zenginleştirmenin, daha yüksek ısı verme oranı ile birlikte daha iyi karışmayı sağladığını gösterdiler. Bu çalışamda [19], yakıtın hidrojen içeriğinin alev yapısı üzerindeki etkisi, iki oksijen

seviyesi üç yakıt karışımı %5 $H_2$ + %95 $CH_4$, %10 $H_2$ + 90 %$CH_4$ ve %20 $H_2$+80%$CH_4$ (kütlece) için dikkate alınarak incelenmiştir. Bu çalışmada konsantrasyonlarının dağılımı, karışım oranları, gerinim hızı, alev sürüklenmesi, türbülanslı kinetik enerji bozulması ve sıcaklık incelenmiştir. Sonuçlar, metan'a hidrojen ilavesinin, karışımı iyileştirdiğini, alev ekseni boyunca türbülanslı kinetik enerji bozulmasında artışa, alev sürüklenmesinde artışa, daha yüksek reaksiyon yoğunluklarına ve karışımın tutuşabilirliğinde ve ısı yayınım hızında artışa yol açtığını göstermektedir. MILD ve FLOX yakma teknikleri [20-29] altında benzer çalışmalar yapılmıştır.

Ayoup ve diğerleri [20], Bu makale, ön ısıtmalı veya ısıtmasız laboratuvar ölçekli bir pilot fırında metan/hidrojen karışımlarına uygulanan hafif alevsiz yanma rejiminin deneysel bir çalışmasını sunmaktadır. Sonuçlar, $CH_4/H_2$ oranı ne olursa olsun, saf metandan saf hidrojene hafif alevsiz yanma rejiminin elde edildiğini göstermektedir. Esas olarak ani $NO_X$ oluşumunun azalması nedeniyle daha büyük miktardaki hidrojen için NOx emisyonlarında bir azalma ölçülmüştür. Hava ön ısıtması olmadan, CO emisyonlarını kontrol etmek için fazla hava oranında hafif bir artış gerekir. Hava ön ısıtması olmayan saf hidrojen yakıtı için, zayıf alevsiz yanma rejimiyle ultra düşük $NO_X$ emisyonlu ve herhangi bir karbonlu tip emisyon olmadan "sıfır emisyonlu fırına" yakın çalışma koşullarını oluşturur [20].

Frassoldati ve diğerleri [21], bu çalışmalarında, orta ve yoğun düşük oksijen seyreltme (MILD) yanma rejimini taklit etmek için tasarlanmış bir Jet in Hot Coflow (JHC) yakıcının matematiksel ve sayısal modellemesini analiz etmiştir [21]. Bu makale başlangıçta, HAD kodu FLUENT 6.3.26 kullanılarak JHC alev yapısının üzerindeki çeşitli modelleme stratejilerinin etkilerini tartışmaktadır. Çeşitli türbülans modellerinin etkileri ve sınır koşulları incelenmiştir. Ayrıca, HAD simülasyonlarında benimsenen ayrıntılı kinetik mekanizma, nitrojen seyreltmesinin çeşitli $CH_4/H_2$/ zayıf hava karışımlarının alev hızları üzerindeki etkisine ilişkin güncel literatür verileri [21] kullanılarak ilgili koşullarda başarıyla doğrulanmıştır. Bu makalenin [21] amaçlarından biri de MILD yanma rejimine uygulanabilirliğini doğrulamak için sürekli türbülanslı akışlarda, kirletici emisyon oluşumunu hesaplamak için bir metodoloji tanımlamaktır. HAD sonuçları, Kinetik Son İşlemci (KPP) adı verilen sayısal bir araç kullanılarak $NO_X$'in hesaplanması için sonradan işlenir. Modelleme sonuçları, deneysel sonuçlar [21] ile uyumludur ve önerilen yaklaşım, MILD yanma rejiminde de yeni yakıcıların tasarımını optimize etmek için yararlı bir araç olarak desteklenebileceği bu çalışmada belirtilmektedir [21].

Derudi ve diğerleri [22], bu çalışmalarında, geleneksel olmayan yakıtların, alevsiz teknoloji ile yakılması için ana tasarım parametrelerini belirlemek üzere laboratuvar ölçekli bir yakıcıda elde edilen deneysel sonuçların nasıl kullanılabileceğini göstermeyi amaçlamışlardır. Özellikle, kok fırını gazı ($CH_4/H_2$ hacimce %40/60) olarak adlandırılan endüstriyel bir yan ürün ele alınmıştır. Hidrojen içeren endüstriyel yan ürünlerin verimli hafif yanma koşullarının sürdürülmesine izin verdiği görülmüştür. Metanın iyi bilinen alevsiz yanması ile ilgili olarak, hidrojen içeren yakıtlar daha yüksek bir jet hızı gerektirir [22] ve daha düşük ortalama fırın sıcaklıklarıyla çalışmak için alevsiz koşullarda sönme olmaksızın yanma havasının ön ısıtmasını azaltabildiği görülmüştür

[22]. Ayrıca, hidrojenin, çok yüksek oranda seyreltilmiş koşullarda da hidrokarbon oksidasyonunun tamamlanabileceği gösterilmiştir [22]. Bu çalışma, kurum çökme durumları için MILD koşulların uygunluğu ile birlikte, düşük kalorili kirli yakıtların hidrojen destekli alevsiz yanmasını gerçekleştirme olasılığını ortaya koymaktadır [22].

Khalil ve Gupta bu çalışmalarında [23], Renksiz Dağıtılmış Yanmanın (CDC) ultra düşük kirletici emisyonu, gelişmiş stabilite ve termal alan homojenliği üzerinde faydalar sağladığı gösterilmiştir. Yakıt türünün (metan, propan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan) dağıtılmış yanmanın sağlanması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. $N_2$ ve $CO_2$ karışımı, farklı sıcaklıklarda, yeniden sirküle edilen sıcak gazları simüle etmek için yanma odasının üst tarafındaki akış içersindeki normal hava ile karıştırıldı. Azot ve karbondioksit miktarlarının arttırılması, yakıcı içindeki oksijen konsantrasyonunu azaltmıştır. Dağıtılmış yanma, yanma odası boyunca $OH*$ kemilüminesans dağılımı yoluyla tanımlandı. Metan için, oksijen konsantrasyonu %13,8 ile %11,2 arasında (karışım sıcaklığına bağlı olarak) değişirken, sürüklenmesiz olana kıyasla $NO_X$ emisyonlarında %85 azalma meydana gelmiştir. Benzer davranış, propan ve hidrojen ile zenginleştirilmiş metanda görülmüştür. Aynı zamanda düşük oksijen konsantrasyonu (%13,7-11,6 ve %12,2-10,5), yüksek %94 ve %92 seyreltme oranında $NO_X$ emisyonunu azaltmıştır. Karıştırılmış gazların sıcaklığı 300 K ile 750 K arasında değişiyordu. Çeşitli yakıtların kullanıldığı deneysel veriler, 1 PPM veya daha az $NO_X$ emisyonu gösterdi. Elde edilen verilerin analizi ve ekstrapolasyonu, 1800 K sıcaklığa sahip sirküle edilen reaktif gazlar için %9.5'lik bir oksijen konsantrasyonunda dağıtılmış yanmanın elde edilebileceğini göstermektedir. Bu değer, ultra düşük emisyonlu dağıtılmış yanma elde etmek için bir kılavuz olarak kkullanılabileceği yazarlar tarafından önerilmektedir. [23].

Cavaliere ve Joannon inceleme makalesinde [24], MILD Yanma, hem reaktantların yüksek sıcaklığı hem de yanma işleminde düşük sıcaklık artışı ile karakterize edilir. Bu özellikler, farklı uygulama alanlarından gelen birçok teknolojik talebin sonucu olduğu belirtilmektedir. Bu inceleme makalesinde [24], MILD Yanmanın temellerini ve uygulamalarını anlamada faydalı olabilecek bilgileri toplamayı amaçlandığı söylenmektedir. Prosesin girdi değişkenlerini sabitlemek için ilk olarak MILD Yanmanın titiz bir tanımı verilmiştir. Bu kısıtlamalar altında, fiziksel, termodinamik ve kimyasal değişkenlerin, çıkış parametreleri üzerindeki etkisi bu çalışmada [24] analiz edilmiştir. Dikkate alınan fiziksel yönler atomizasyon, buharlaşma, karıştırma ve ışınımla ısı transferidir. Özellikle, yüksek sıcaklıkta seyreltilmiş oksitleyici için karıştırma katmanının gelişimi analiz edilmiştir. Stokiyometrik eş yüzeylerden geçen kütle akışlarının seyreltilmemiş koşullarda olanlardan daha düşük olduğu ve bu eş yüzeylerin yok edilmesinin MILD yanma koşullarında arttığı gösterilmiştir. Her iki etki de literatürde rapor edilen deneysel sonuçlara göre düşük ısı yayınım oranlarına işaret eder. Termodinamik açıdan, seyreltilmiş ve seyreltilmemiş durumlar için mümkün olan tüm aralıktaki karışım oranları; minimum, maksimum ve denge sıcaklık profillerinin karşılaştırmalı analizi yoluyla ele alınır. Kimyasal açıdan, farklı oksitleyici yöntemleri için kimyasal kinetik oranları ve kendiliğinden tutuşma sürecinin zamansal evrimi ile ilgili olarak analiz edilmiştir. Oksijen ilavesi, hidroperoksit ayrışması ve hidrojen oksidasyonu, geniş basınç ve sıcaklık aralıklarında değerlendirmiştir. Bu şekilde, farklı kimyasal kinetik yollara dayanan kendi kendine tutuşma rejimleri tanımlanır ve sabit bir değerlendirme süresi için seyreltilmiş/seyreltilmemiş koşullar arasında karşılaştırma yapılmıştır. MILD yanma koşullarının basınç sıcaklık aralığı oksidasyonun bastırıldığı, nispeten düşük basınca genişletilirken; yüksek basınçta MILD yanma koşulu için 'tavan sıcaklığının' daha düşük sıcaklığa kaydırıldığı gösterilmiştir. İncelemenin ikinci kısmı, bir birincil yakma sisteminin baca gazı akışı boyunca kirleticilerin azaltılmasının yanı sıra termal üretimin hem verimliliği hem de kirliliği ile ilgili uygulamalarda seyreltilmiş yüksek sıcaklıkta hava yanmasının potansiyellerini göstermektedir. Kara tabanlı gaz türbinleri, kazan yanma odası ve evsel ısıtma sistemleri gibi bu alanlarda seçilmiş bazı örnekler sunulmaktadır. Bunlarda, bu hedef zımnen dikkate alınsa da, kirliliğin azaltılmasından çok verimlilikle ilgili hususlara ön planda vurgu yapılmaktadır. Daha sonra, gaz/sıvı yanmasında üretilebilen organik veya inorganik ana ve küçük türlerle ilgili çevresel faydalar ele alınmaktadır. Bunlar arasında karbonlu malzeme, yanmamış hidrokarbonlar, nitrojen oksitler ve kükürt oksitler bulunur.

Weber, Gupta ve Mochida bu incelemesinde [25], Son otuz yılda, Yüksek Sıcaklıkta Hava Yakma (HiTAC)'ın, endüstriyel fırınlarda fosil yakıt dönüşümü için lider teknoloji haline

gelmesine çok katkıda bulunduğu vurgulanmaktadır. O zamandan beri diğer birkaç araştırmacı bunu MILD, Alevsiz veya Dağıtılmış yanma olarak adlandırdı ve hepsi HiTAC ile çok benzerlik gösteriyor. HiTAC teknolojisinin geliştirmesi, önemli ölçüde enerji tasarrufu (yaklaşık %25), küçültülmüş ekipman boyutu, çok daha düşük kirlilik ($CO_2$ dahil %50) ve endüstriyel fırınlardaki gürültünün azaltılması açısından devrim niteliğindeydi. Bu teknoloji artık dünya çapında birçok modern endüstriyel fırında yaygın olarak kullanılmaktadır. Dünya çapında 7867 endüstriyel fırına 39.000 HiTAC yakıcı kuruldu ve bu da 1721 milyar litre ham petrol/yıl yakıt tasarrufu sağladı [25]. HiTAC teknolojisinin endüstriyel fırınlarda kullanılmasıyla 2030 yılına kadar 68 Milyar litre/yıl akaryakıt tasarrufu ve 180 Milyar ton/yıl $CO_2$ azaltımının sağlanacağı tahmin edilmektedir [25]. Bu devrim niteliğindeki teknoloji, dünya çapında birçok ülke tarafından uyarlanmaya devam ediyor. Yazarlar, HiTAC teknolojisinin gelişimi hakkında kısa bir inceleme sunmakta ve endüstriyel fırınların yanı sıra diğer birçok uygulamada da daha temiz ve verimli yanmaya katkıda bulunacak ufuktaki potansiyel uygulamaları hakkında görüşlerini bildirmektedir. Bunlara yüksek yoğunluklu gaz türbini yanması, taşınabilir güç ve motorlar dahildir.

Bu teknikler ile ilgili diğer çalışamalar şöyle sıralanabilir. Sabia ve diğerleri, özetle propan [30], metan [31] ve $CO_2$, $H_2O$ ile seyreltilmiş propan [32] üzerinde sayısal ve deneysel çalışmalar yürütmüştür. MILD koşulu altında kendiliğinden tutuşma süresi bu çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmaların amacı detaylı incelenirse [30], MILD koşulları altında kontrollü şekilde deneysel referans data toplamaktır. MILD koşulları altında gelişen bu yanma süreçleri mevcut kinetik mekanizmalar kullanılarak tahmin edilemeyen benzersiz çalışma koşullarında kendine özgü davranışlar göstermiştir. Deneysel testler, propan/oksijen [30], karışımlarının nitrojen ile seyreltilmiş MILD yanma koşulları altında karışım bileşenlerini (zayıf yakıt içerikliden, zengin yakıt içerikli koşullara) ve seyreltme seviyesini çeşitlendirerek geniş aralıkta sıcaklıklarda (850-1250 K) atmosferik basınçta gerçekleştirilmiştir. Bir çok yanma rejimleri, bu dış parametreler dikkate alınarak tanımlanmıştır. Kendiliğinden tutuşma gecikme süreleri, çeşitli seviyelerde sistem giriş sıcaklıklarına (orta sıcaklıktan yüksek sıcaklıklara) bağlı olarak değerlendirilip gösterilmiştir. MILD yanma koşulları altında, birkaç mevcut kinetik modele dayanan sayısal simülasyonlar, özellikle yakıt açısından zengin, yüksek oranda seyreltilmiş koşullar altında, deneysel verilerle zayıf korelasyonlarla sonuçlar öngörmüştür. Modellerin geçerliliğini daha geniş çalışma koşullarına uyarlamak için ayarlanması gereken kontrol reaksiyon yollarını belirlemek amacıyla duyarlılık ve reaksiyon akış analizleri kullanıldığı belirtilmektedir. Ancak bu konu mevcut çalışmanın kapsamı dışındadır. Bu çalışma, yeni koşullar altında bir referans sistemi için tekrarlanabilir deneysel veriler sağlamıştır.

Sidey ve diğerleri [33], belirli MILD koşulları altında laminar ön karışımsız metan alevleri ile ilgili sayısal bir çalışma gerçekleştirdi. Bu çalışmada özetle termal ve hızlı $NO_X$ oluşumu sonuçları incelenmiştir. Çalışmaya detaylı bir şekilde bakıldığında [33], MILD yanmanın çeşitli özelliklerine odaklanan, oksitleyici olarak sıcak yanma ürünleri kullanılan $CH_4$'ün laminer ön karışımsız alevlerinin davranışını araştırmak için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Oksitleyici akımı, %60, %70, %80 ve %90 eş değerlik oranlarında laminer önceden karıştırılmış alevden gelen sıcak yanma ürünleriydi, bu nedenle 1650 K'nin üzerinde sıcaklıklara ve % 8'in altında oksijen içeriğine sahipti ve alevler MILD yanma rejimindeydi. Simülasyonlar, bir kemilüminesans kinetik alt mekanizması ile GRI-Mech 3.0 kimyasal şemasını kullandı. MILD alevlerinde ısı yayınımı hızı profilleri karışım oranları geniş bir alana yayıldığı belirtilmektedir. Bu deneysel belirteçler, hem gerçek hem de karışım oranında sunulan bununla birlikte MILD ısı yayınım hızının genişletilmiş yapısı nedeniyle, MILD alevlerinde en yüksek ısı yayınım hızının konumunu geleneksel alevlerde olduğu kadar doğru bir şekilde tahmin edilememesine neden olmuştur. Alevdeki şekil değiştirme hızı, yanma sırasındaki sıcaklık artışı ve ısı yayınım hızı üzerindeki etkisi, bir sönümlenme davranışı analizi ile tartışılmıştır. MILD alevleri hem termal hem de hızlı NOx mekanizmaları yoluyla $NO_X$ ürettiği ve oksitleyicideki hem yüksek sıcaklıklar hem de başlangıç $NO_X$ konsantrasyonları reaksiyon hızı davranışını önemli ölçüde etkilediği bu çalışmada belirtilmiştir. Simülasyonlar, genellikle MILD yanması ile ilişkili bazı deneysel gözlemlere ilişkin bilgiler sağlamıştır [33].

Li ve diğerleri [34], hem sayısal hem de deneysel olarak MILD koşulu altında metan içine $H_2$ ilavesinin $NO_X$ oluşumu üzerindeki etkisini inceledi. Bu çalışma sonucunda $NO_X$ oranı sabit kalmaktadır. Bu sonuçlar, $H_2$ ilavesiyle yakıcı sıcaklığının arttığı termal $NO_X$ oluşumu ile açıklanamaz. Costa ve diğerleri [35], gaz türbini için yeni bir yanma odası modeli tasarladı. Bu çalışma, giriş havası konfigürasyonunun verimlilikle ilişkili olduğunu göstermiştir Lammerl ve diğerleri [12], düşük kirletici emisyonları ile 2000 K'e kadar yüksek alev sıcaklığına ulaşmanın mümkün olduğunu göstermiştir.

Çalışmanın amacı

Yukarıda sunulan ve tartışılan çalışmaların ışığında, metan ve hidrojence zenginleştirilmiş metan gazlarının siklonik bir yakıcı kullanılarak yanması, CDC koşulları altında incelenmiştir. Bu amaçla, Sorrentino ve diğerleri [14] tarafından MILD koşullarında gerçekleştirilen çalışmada kullanılan siklonik yakıcının seçilmesine yüksek dahili resirkülasyon gücü gözetilerek karar

verilmiştir. Daha sonra, CDC koşullarında metan ve hidrojence zenginleştirilmiş metan yanması sırasında sıcaklık ve $NO_X$ ve CO gibi kirletici emisyon seviyelerini tahmin etmek için Ansys Fluent HAD kodu kullanılmıştır. Bu şekilde, ultra düşük $NO_X$ ve daha düşük CO kirletici emisyon seviyeleri elde etmek için oksitleyici ve yakıt giriş tasarımı hem çapraz, hem de paralel akışa sahip yakıcı tasarımıyla birlikte, farklı eşdeğerlilik oranlarının ve oksitleyici giriş sıcaklıklarına hidrojence zenginleştirilmiş yakıtın sıcaklık ve emisyon profillerine etkisi incelenmiştir.

Hidrojen kullanımı ve çevresel kısıtlamalar ile ilgili zorluklar ve yukarıda bahsedilen çalışmalar ışığında metanın hidrojen ile zenginleştirilmesinin daha faydalı olduğu görülmektedir. Ayrıca, CDC yöntemi, özellikle gaz türbini uygulamaları için önemli olan, daha homojen termal alan ile birlikte kirletici emisyonları azaltmak için makul olabilir. Bu nedenle metan ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan yakıtları, dağıtılmış rejim araştırmak için seçilmiştir. Ayrıca, daha fazla dahili resirkülasyonu mümkün kıldığından ve daha uzun kalma süresini sağlayabildiği için, yakıcı olarak çift girişli bir yakıcı seçilmiştir. Bu doğrultuda, oksijen konsantrasyonunu azaltmak için seyreltici olarak $N_2$ veya $CO_2$ kullanılmıştır. İncelenen tüm durumlara ek olarak, HiTAC'a ulaşmak adına, baca gazı resirkülasyonunu simüle etmek amacıyla seyreltilmiş oksitleyici sıcaklığı 300 K ve 600 K olarak iki farklı şekilde incelenmiştir.

# 2. YAKITLAR, YANMA VE HAVA KİRLİLİĞİ

Bu kısımda yanmanın temel prensipleri ve hava kirliliği hakkında temel kavramlardan bahsedilmiştir.

## 2.1. Yakıtlar

Yakıtlar, diğer moleküller (çoğunlukla oksijen) ile tepkimeye girerek ısı ve iş üretmek amacıyla kullanılan maddelerdir. Bu konsept genellikle kimyasal enerji üretimi yapabilen materyallere uygulanır. Yaygın olarak kulanılan yakıtlar karbon, hidrojen ve bunların ısı enerjisi üretebilecek olan bileşenleridir. Faz durumuna göre yakıtlar katı, sıvı, gaz olarak gruplandırılabilirlerken doğada bulunma durumlarına göre birincil (doğal yakıtlar), ikincil yapay yakıtlar olarak da sınıflandırılabilirler. Bahsedilen fazlara göre her biri farklı özelliklere sahiptir [36].

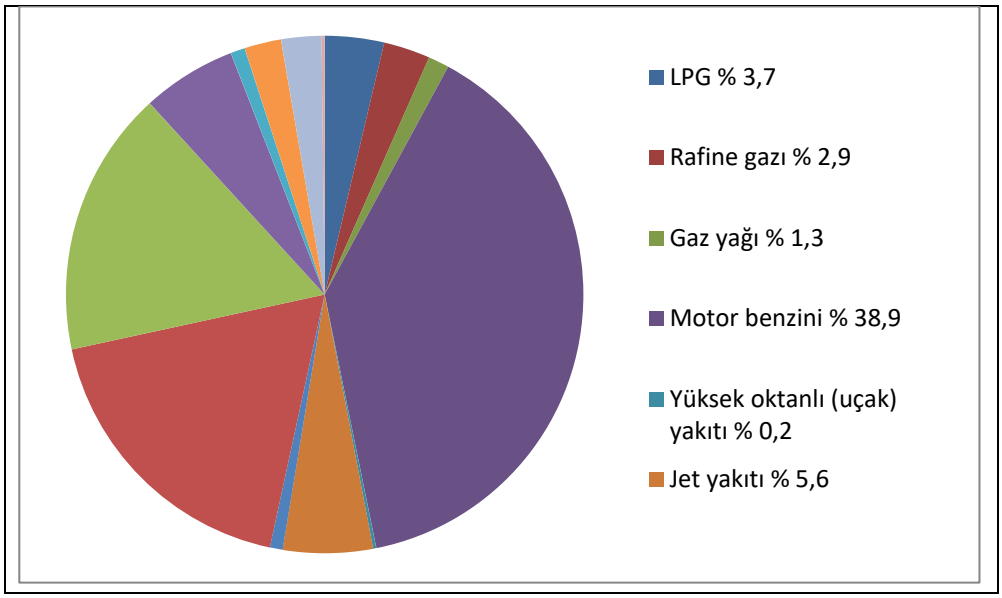
Kullanılan yakıtların büyük çoğunluğu fosil kökenlidir. Fosil yakıtlar zamanla tükenebilen (yenilenebilir olmayan) kaynaklardan elde edilir. Fosil yakıtlar doğalgaz, petrol ve kömür olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca ağaçlardan, zirai ve diğer bazı atıklardan oluşan biyokütle literatürde genelde yenilenebilir olan bir yakıt türü olarak kabul göremektedir [36].

### 2.1.1. Gaz yakıtlar

Normal şartlar altında gaz halinde olan yakıtlardan herhangi biridir. Gaz yakıtlar çoğunlukla metan, propan ve benzer kimyasal moleküllerden meydana gelen hidrokarbonlardan, hidrojenden, karbon monoksitten veya bunların karışımından oluşur. Doğalgaz, çıkarıldığı yerlere göre yoğunlukla metan bulundururken metan yoğunluğu ile kıyaslandığında daha az oranlarda etan, propan, bütan ve pentan içerir. Sülfür ve organik azot ihmal edilebilir oranda az miktardadır. Bu gazlar potansiyel enerji kaynakları olması nedeniyle üretildikleri yerlerden tüketilecekleri yerlere sürekli olarak taşınması ve dağılması gerektiği için boru hatları yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer sıvı ve katı yakıtların aksine, gaz yakıtlar taşıma ve depolama amacıyla sıvılaştırılabilirler [36].

### 2.1.2. Sıvı yakıtlar

Yaygın olarak kullanılan sıvı yakıtların çoğu, petrolden yani yerkabuğunun içindeki ısı ve basınca maruz kalan ölü bitki ve hayvanların fosilleşmiş kalıntılarından elde edilir. Gelecete bitümlü şistten, katranlı kumdan, kömürden ve biyo kütleden üretilmesi beklenmektedir. Petrol, az miktarda kükürt, azot, oksijen, eser miktarda metal ve mineralleri bulunan ve sıvı hidrokarbonlardan meydana gelen doğal bir karışımdır. Petrol çıkarıldıktan sonra kullanıma hazır hale getirilebilmesi için belirli işlemlerden geçirilmesi gereklidir. Şekil 2.1'de [36] ham petrolden, LPG'ye kadar kullanılan petrol türevleri gösterilmiştir. Rafineri sonrası elde edilen ürünlerin miktarı oransal olarak gösterilmiştir [36].




Şekil 2.1. Petrolden elde edilen ürünler.

### 2.1.3. Katı yakıtlar

Katı yakıtlar arasında odun ve biyo kütlenin başka biçimleri, turba, linyit, bitümlü kömür ve antrazittir. Kentesel ve belirli endüstriyel atıklar da katı atık olarak değerlendirilirler. Hidrojen ve karbon katı yakılardaki temel yanıcı maddeler olarak sıralanabilir. Ek olarak azot, kükürt, oksijen, subuharı ve kül gibi materyallerde içerirler. Antrasitler yaklaşık ortalama olarak %2, odunlar yaklaşık ortalam olarak %45 oranında kimyasal olarak bağlanmış bir şekilde oksijen içermektedirler [36].

Katı yakıtlar diğer yakıt tiplerinden farklı olarak nem içermektedirler. Nem hem bağlı hem de serbest olarak katı yakıtların bünyesinde bulunmaktadır. Bağlı nem kömürlerin bünyseinde fiziksel absorbsiyonla tutulmaktadır. Bağlı nem ısıyı emmektedir. Yeşil odunun %50'si sudan meydana gelmektedir. Liniyit kömürleri %20-40 yoğunlukla serbest nem bulundururken bitümlü kömür yaklaşık %5 nem bulundurmaktadır [36].

Diğer yakıt tiplerinden katı yakıtın farklı olan diğer bir hususu ise içerisinde kül içermesidir. Yanma işlemi tamamdığında geriye kalan inorganik partiküllere denilmektedir. Odun içerisinde %10 civarında kül bulunurken kömürde bu oran daha fazladır [36].

## 2.2. Yanma

Yanma, ısı ve elektrik enerjisi üretmek için, yakıt ve oksitleyicinin (genellikle hava) kimyasal bir reaksiyon yoluyla bir araya gelme işlemidir. Bu olay, kimyasal ve fiziksel işlemlerin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Yanma işleminin kimyasal reaksiyonları oluşurken ısı transferi gerçekleşmekte ve akışkan hareketi meydana gelmektedir [66]. Yanmanın en yaygın sınıflandırma şekli havanın ve yakıtın yanma odasına besleme şekline göre belirlernir. Sınıflandırmalar ön-karışımsız (difüzyon) yanması, ön-karışımlı yanma ve kısmi ön karışımlı yanma olarak sıralanabilir. Ön-karışımsız yanmada, yakıt ve oksitleyici ayrı olup, yanma, türbülanslı karışım işlemi ile eş zamanlı olmaktadır. Ön-karışımsız yanma, dizel motorların silindirlerinde, bazı gaz türbinlerinde ve konvansiyonel yakıcılarda görülmektedir. Ön karışımlı yanma, yakıt ve oksitleyicinin yanma bölgesine girmeden önce tamamen karışmasıyla gerçekleşmektedir [37].

### 2.2.1. Yanmanın termodinamiği

Yanma, ayrı ayrı reaksiyona girenlerin ve ürünlerin enerjilerinden elde edilen kimyasal reaksiyonları devam ettirici olarak serbest enerjileri içerir. Yanma işlemi ile açığa çıkan enerjiyi hesaplamak için, her bir kimyasal türün enerjisi, ya onun iç enerjisi ya da entalpisi yoluyla aşağıdaki gibi verilebilir [38].

$$H = U + pV \tag{2.1}$$

Burada H entalpiyi, U iç enerjiyi ve pV sistem üzerinde yapılan mekanik enerjiyi göstermektedir. İç enerjinin ve entalpinin ölçülmesi mümkün değildir. Bundan dolayı diğer tüm enerjiler ile ilgili standart bir durum seçilmesi gerekmektedir.

Bir reaksiyon aşağıdaki gibi tanımlanırsa;

$$S_A A + S_B B + \cdots = S_p P + S_q Q + \cdots \tag{2.2}$$

Burada $S_A$ ve $S_B$ A ve B reaktantlar için stokiyometrik katsayıları, $S_P$ ve $S_q$ ise P ve Q ürünleri için stokiyometrik katasayıları temsil etmektedir.

Genel kimyasal reaksiyon için entalpi değişimi, reaksiyona girenlerin ve ürünlerin standart oluşum entalpilerinin farkı olarak aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir:

$$\Delta H^{\emptyset}_{298} = \sum S_x \, \Delta H^{\emptyset}_{f298}(X) \tag{2.3}$$

Buradaki $\Delta H^{\emptyset}_{298}$, Standart şartlarda reaksiyondaki entalpi değişimidir. $S_x$, reaksiyona girenler için negatif, ürünler için pozitif olan stokiyometrik faktördür. $\Delta H^{\emptyset}_{298}$, ise, reaksiyona girenlerin ve ürünlerin kJ/kmol biriminde standart oluşum entalpileridir. Kimyasal reeaksiyonun davranışını miktar olarak tanımlamak için ürünlerin konsantrasyon ve oran sabitleri biçiminde, kimyasasl türlerin konsantrasyonundaki değişim oranını belirten bir oran kanunu aşağıdaki gibi tanımlanır [39]:

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

Burada k, oran sabitini, a ve b reaksiyonun derecesini göstermektedir. Oran sabiti k, genellikle sıcaklığa bağımlı ve konsatrasyondan bağımsız bir ifadedir. Bu sabit , genellikle Arhenius formunda ve şöyle yazılır.

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

Burada A, Arrhenius faktörünü (k'nın birimle aynı birimde), E, reaksiyonun aktivasyon enerjisini (kJ/kmol), R üniversal gaz sabitini ve T sıcaklığı (K ) temsil etmektedir.

## 2.3. Hava Kirliliği

Yanma sonucunda hava kirliliğine neden olan emisyonlar meydana gelmektedir.Yanma sırasında azor oksit ($NO_x$), karbon monoksit (CO), karbon dioksit ($CO_2$), kükürt dioksit ($SO_2$), uçucu organik bileşenler (VOCs), partikül maddeler ve çok az miktarda oluşabilecek diğer kimyasal bileşikler bulunmaktadır. Yakıt içeriğine, yakıcı tasarımına ve işletme koşullarına göre emisyon içeriği ve miktarı değişkenlik gösterebilmektedir [40].

### 2.3.1. Azot oksit ($NO_x$) oluşumu

Azot oksit tipleri, azot monoksit (NO), azot dioksit ($NO_2$), diazot oksit ($N_2O$), diazot trioksit ($N_2O_3$) ve diazot pentaoksit ($N_2O_5$) gibi kominbasyonlardan meydana gelmektedirler. Bunlar içerisinde azot monoksit (NO), azot dioksit ($NO_2$), diazot oksit ($N_2O$) en çok görülen kirleticilerdir. NO zehirli ve renksiz bir yanma ürünüdür. Yanma sırasında oluşan toplam $NO_x$ ürünlerinin %95'inin NO olduğu kabul edilir.

Çalışmamızda metan ve hidrojen yakıt olarak kullanılması nedeniyle azot okist ($NO_x$) oluşumuna neden olan azot kaynağı %79 oranında azot ($N_2$) içeren havadır. Bu çalışmada yakıttan gelen azot bulunmamaktadır [38].

<u>Isıl $NO_x$ oluşum mekanizması</u>

Zeldovich tarafından önerilen ısıl $NO_x$ oluşum mekanizması, pik alev sıcaklıklarında meydana gelen yüksek ısı enerjisi sonucunda havadaki ve yakıttaki azotun oksidasyonunu gösterir. Isıl $NO_x$ oluşum mekanizmasını, pik alev sıcaklığına ve oksijenin kullanılabilirliğine son derece bağımlıdır. Oksijen atomların meydana gelmesi [37]:

$$O_2 \leftrightarrow 2O \tag{2.6}$$

$$O_2 + M \leftrightarrow O + O + \mathrm{M} \tag{2.7}$$

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

$$O_2 + N_2 \leftrightarrow \mathrm{NO} + \mathrm{N} \tag{2.8}$$

$$O_2 + \mathrm{N} \leftrightarrow \mathrm{NO} + \mathrm{O} \tag{2.9}$$

Zeldovich meknaizmasında $N_2$ bağlarının parçalanması en zor adım olması nedeniylereaksiyon (2.8) genellikle oran kontrollü gerçekleşir. Reaksiyon (2.8) ve (2.9) NO oluşumunda zengin ve fakir yanma şartlarına bakılmaksızın çok önemlidir. İlave olarak Lavoie ve ark. tarafından aşağıdaki reaksiyon önerilmiştir [37]:

$$\mathrm{N} + \mathrm{OH} \leftrightarrow \mathrm{NO} + \mathrm{H} \tag{2.10}$$

Zengin yanma şartlarında reaksiyon (2.10) çok önemli bir role sahiptir. Fakir karışımlı yanma şartlarında NO hesaplarının genelinde bu denklem ihmal edilebilir. Isıl NO oluşum oranı sadece yüksek sıcaklıklarda (T >1800 K) önemlidir. Ayrıca, her 90 K sıcaklık artışında NO seviyesi yaklaşık olarak iki kat artmakatadır [38].

Reaksiyonlar (2.8), (2.9), (2.10) ısıl mekanizmasına ait reaksiyonlardır. Reaksiyon (2.8), radikallerin yeniden bileşimini tamamlandığı ve sıcaklığın tanımladığı yanma sonrası gazlarda NO'nun hemen hemen tamamının oluşumunda belirleyici adım oranı olarak kabul edilmektedir. Reaksiyon (2.8),(2,9) ve (2.10) için oran sabitleri şöyledir [38]:

$$k_1 = 1{,}8x10^8 \exp(-\frac{38370}{T}) \tag{2.11}$$

$$k_{-1} = 1{,}8x10^7 \exp(-\frac{425}{T}) \tag{2.12}$$

$$k_2 = 1{,}8x10^4 \mathrm{T}\exp(-\frac{4680}{T}) \quad (2.13)$$

$$k_{-2} = 3{,}8x10^3 \mathrm{T}\exp(-\frac{20820}{T}) \quad (2.14)$$

$$k_3 = 7{,}1x10^7 \exp(-\frac{450}{T}) \quad (2.15)$$

$$k_{-3} = 1{,}7x10^8 \exp(-\frac{24560}{T}) \quad (2.16)$$

Yukarıdaki denklemlerde $k1$, $k2$ ve $k3$, reaksiyon (2.8), (2.9) ve (2.10) için ileri oran sabitlerini, $k-1$, $k-2$ ve $k-3$ ise ters oran sabitlerini göstermektedir. Reaksiyon (2.10)'un aşağıdaki durum için ihmal edilebileceği kabul edilirse;

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

Isıl NO mekanizması ile NO oluşum oranı aşağıdaki gibi verilmektedir [38].

$$\frac{d[NO]_T}{dt} = \frac{2[O]\{k_1k_2[O_2][N_2] - k_{-1}k_{-2}[NO]^2\}}{k_2[O_2] + k_{-1}[NO]} \quad (2.18)$$

Yukarıdaki denklemde tüm kimyasal türlerin birimi mol.m$^{-3}$ şeklindedir. $O_2$ ve $N_2$ konsantrasyonları, yanma çözümünde hesaplanır. O radikal konsantrasyonu, kısmi denge kabulü ile aşağıdaki gibi belirlenebilmektedir.

Reaksiyon (2.6) ve (2.7)'ye göre O atom konsantrasyonu aşağıdaki gibi elde edilebilir [38]:

$$[O] = 36{,}64T^{1/2}[O_2]^{1/2}\exp(-\frac{27123}{T}) \quad (2.19)$$

Isıl NO oluşumu için birçok global NO modelleri önerilmiştir. N atomu için daimi durum yaklaşımı alınır ve O atomunun konsantrasyonu denge göz önüne alınarak

hesaplanabileceği kabul edilirse en yüksek NO oluşum oranı aşağıdaki gibi elde edilebilir [38]:

$$\frac{d[NO]_T}{dt}=1{,}45x10^{17}T^{-1/2}\exp\left(-\frac{69460}{T(K)}\right)(O_2)_{eq}^{1/2}(N_2)_{eq} \quad (2.20)$$

Bu denklemde NO oluşum oranının yanmış gaz sıcaklığına (T) yoğun olarak bağlı olduğu ve yanmış gazlarda O2 konsantrasyonuna ve basınca daha az bağımlı olduğu görülmektedir [37].

Ani $NO_x$ oluşum mekanizması

Fenimore tarafından ilk olarak önerilen ani $NO_X$ mekanizması, ya devam eden NO oksidasyonundan ya da yakıt $NO_X$ ile olduğu gibi N2'nin azaltılmasından önce hidrokarbon yakıt parçalanması ile atmosferik azotun reaksiyonunu tanımlar [40]. Yakıt $NO_X$'un tersine, ani $NO_X$ oluşumu hidrokarbon yakıt parçalanmasının çok olduğu yakıt zengin bölgelerde önemlidir. Alevlerde oluşan ani $NO_X$ miktarının diğer iki mekanizma ile karşılaştırıldığında düşük olduğuna inanılmaktadır. Bunun yanı sıra düşük sıcaklıkta gaz alevlerde yayılan NO miktarının çok önemli bir kısmını ani NO oluşturabilir. Düşük sıcaklıklarda (T < 1800 K), ısıl NO mekanizması ile oluşan NO, toplam NO oluşumu ile karşılaştırıldığında oldukça azdır. $N_2$-$O_2$-NO bilinen kinetik kanunları, hidrokarbonlar tüketildikten sonra alev sonrası gazlardaki azot oksit oluşumunu tanımlar. Genellikle kabul edilen ani NO oluşum yolu aşağıdaki gibidir [37].

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N \quad (2.21)$$

$$C_2 + N_2 \leftrightarrow 2CN \quad (2.22)$$

$$HCN + OH \leftrightarrow CN{+}H_2O \quad (2.23)$$

Bu reaksiyonlar, N ve CN'nin oksidasyonu ile ilk olarak NO oluşturur.

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \quad (2.24)$$

$$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO \quad (2.25)$$

Hidrokarbon alevlerinde, CH ani $NO_X$ oluşumunun ana kaynağıdır. Bunun yanı sıra, ani $NO_X$ kaynağı, yakıt parçalanması ile oluşan çok sayıda kimyasal türlere (CH, $CH_2$, C, $C_2$, $C_2H$) katkı sağlayabilir [37].

Ani NO yukarıda tanımlanan basit denge ısıl NO mekanizması ile hesaplanandan daha hızlı bir oranda oluşan NO olarak tanımlanabilmektedir. Bu tanım ile, hidrokarbon yakıt yanmasında ani $NO_2$'nin üç kaynağı tanımlanabilir. Birincisi, reaksiyon bölgesinde ve yanmış gazlarda ısıl NO mekanizmasının oranını hızlandıran, dengede olmayan O ve OH konsantrasyonu, ikincisi, moleküler azot ile reaksiyon bölgesinde ve yakınlarında bulunan hidrokarbon radikal reaksiyonları ile başlatılan ardışık reaksiyon (Fenimore ani NO mekanizması) ve üçüncüsü ise, üçüncü cisim birleşmesi reaksiyonu ile $N_2$ ve O atomlarının reaksiyonu sonucu oluşan $N_2O$'dur [37].

$$O + N_2 + \mathrm{M} \leftrightarrow N_2O + M \quad (2.26)$$

$N_2O$ ardışık reaksiyonu ile oluşan NO [42] aşağıdaki reaksiyon ile belirlenebilir:

$$N_2O + \mathrm{O} + \mathrm{M} \leftrightarrow NO + NO \quad (2.27)$$

NO oluşumunda bu reaksiyonların ve oluşan ani NO'nun toplam miktarı yakıcıdaki şartlara bağlıdır. Dengede olmayan radikal konsantrasyonu ile NO oluşumunun hızlanması ön-karışımsız alevlerde ve düşük basınçlı ön-karışımlı alevlerde toplam NO oluşumunun % 80'den fazlasını oluşturduğu görülmektedir [43]. Hidrokarbon radikali moleküler azot mekanizması ile ani NO oluşumu, toplam NO oluşumunun % 50'den fazlasını oluşturan yakıt zengin ön karışımlı hidrokarbon yanmasında ve ön-karışımsız hidrokarbon alevlerinde hakimdir. $N_2O$ mekanizması ile NO oluşumu, yakıt-hava oranı ve yanmış gaz sıcaklığı azalırken ya da basınç artarken önemli derecede artar. Hidrokarbon yanması bir çok karmaşık reaksiyon ve kimyasal türleri içermektedir ve sayısal olarak bunları belirlemek oldukça zordur. Bu nedenle birçok araştırmacı, ani NO oluşumunu hesaplamak

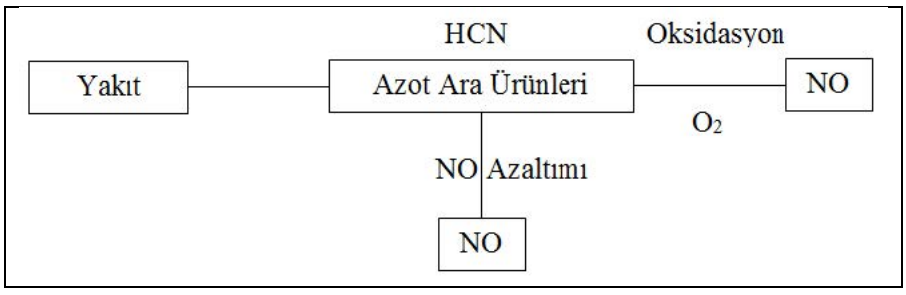
için tahmin edici genel modeller önermişlerdir. DeSoete [44] tarafından önerilen eşitlik şöyledir:

$$\frac{d[NO]_{pr}}{dt}=1{,}2x10^{7}[N_2][O][CH_4]\exp\left(-\frac{60000}{T(K)}\right) \quad (2.28)$$

Bu formül, 2000 K dolaylarındaki sıcaklıklarda elde edilmiş deneysel bilgilerinanalizinden türetilmiştir.

Yakıt $NO_x$ oluşum mekanizması

Yakıt $NO_X$ mekanizması, yakıt moleküllerindeki azot bağlarının oksidasyonunu tanımlar. Bu geçici reaksiyonların meydana geldiği bölgelerde oksijenin bulunması ve ara radikal reaksiyonuna bağlı olarak, ya $N_2$'ye ya da NO'ya dönüşür. Ayrıca, bu mekanizma, CH radikalleri ile azot molekülünün yerine NO moleküllerinin azaltılmasını da içermektedir. Bu nedenle, yakıt azotunun NO'ya dönüşümü yerel azot stokiyometrisine son derece bağlıdır. Yakıt damlacıkları ısıtıldığında azot içeren bileşenler gaz fazında serbest kalır. HCN, N, CN ve NH gibi azot ara ürünleri, bileşenlerin ısıl ayrışması sonucu meydana gelir ve $NO_X$'a dönüşebilir [37]. Genellikle kabul edilen yakıt $NO_X$ mekanizması Şekil 2.2'de [45] verilmiştir.




Şekil 2.2. Yakıt $NO_X$ oluşum şeması.

HCN, yakıt azotundan oluşmaktadır ve onun üretim oranı, damlacık buharlaşması süresince gaz fazında yakıtın serbest kalma oranına eşittir. HCN, iki reaksiyon ile tüketilmektedir. Birincisi, üretilen NO'ya oksitlenir. İkincisi, $N_2$'yi azaltmak için NO ile reaksiyona girer. Bu iki reaksiyondan HCN'nin tüketim oranı aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir [46]:

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

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

Eş. (2.29) ve Eş. (2.30)'da $R1$ ve $R2$, HCN'nin dönüşüm oranlarını (1/s), T anlık sıcaklığı (K), X mol kesrini, A oksijenin reaksiyon üssünü göstermektedir ve $A_1$ = 3,5$x$1010 (1/s), $A_2$ = 3$x$1012 (1/s), $E_1$ = 67000 $cal/mol$, $E_2$ = 60000 $cal/mol$'dür [37].

$NO_2$ reaksiyon mekanizması

Yanma boyunca oluşan NO'un azot içeren ara ürünler ile $N_2$ oluşturmak için sonradan reaksiyona girebileceği bilinmektedir. İlave olarak, bu reaksiyonlarda NO, değişik oksijen içeren kimyasal türler ile $NO_2$ oluşumu için reaksiyona girebilir. Temel $NO_2$ oluşum reaksiyonu [38]:

$$NO + HO_2 \leftrightarrow NO_2 + OH \quad (2.31)$$

ve temel çıkarılma adımı onun hidrojen radikalleri ile aşağıdaki reaksiyonudur.

$$NO_2 + H \leftrightarrow NO + OH \quad (2.32)$$

Alevin düşük sıcaklık bölgelerinde $HO_2$ kısmen kararlıdır. Yüksek sıcaklık bölgesinde oluşan NO ile reaksiyona girebilir ve düşük sıcaklık bölgesine difüzyon ile taşınır. Yüksek radikal konsantrasyonundan dolayı $NO_2$ taşınması hızlıdır ve $NO_2$'ye geri dönüşebilmektedir. $NO_2$'nin miktarı sisteme bağlı olarak fazlasıyla değişebilir. Fakat genellikle toplam $NO_X$'un yaklaşık % 5'i kadardır [38].

Kimyasal denge göz önüne alındığında 1500 K'den daha yüksek, tipik alev sıcaklıkları için $NO_2$/NO oranı ihmal edilebilir derecede azdır. Bu dönüşümde $NO_2$ ömrü, tipik olarak 10 ms'den daha azdır. Yanmada, azotoksit oluşumu için bazı kinetik modeller $NO_2$ emisyonunun sadece düşük sıcaklıkta çalıştırılan cihazlarda ya da $NO_2$ taşıma işleminde soğuk ısı transfer yüzeyleri ile yok edilebildiğini önermektedir [38].

$N_2O$ reaksiyon mekanizması

$N_2O$ (diazot oksit), ozon tabakasının delinmesine neden olan ve asit yağmurlarına katkı sağlayan bir kirletici türüdür. Yanma gazlarında $N_2O$'nun ardışık reaksiyonlarla oluşumu ve tahribi iyi bilinmektedir. Gaz fazında, yanma sırasında esas olarak NCO ve NH ile NO'nun reaksiyonu ile oluşmaktadır Yakıt yanmasında temel gaz fazında $N_2O$ oluşturan reaksiyonlar [37]:

$$NCO + \mathrm{NO} \leftrightarrow N_2\mathrm{O} + CO \tag{2.33}$$

$$NH + \mathrm{NO} \leftrightarrow N_2\mathrm{O} + CO \tag{2.34}$$

NO yakıt azotundan oluştuğu zaman, radikal türler NCO ve NH, alevin oksidasyon bölgesinde onların en yüksek konsantrasyonuna ulaşır. Bundan dolayı, $N_2O$ alev önündeki bölgeye ya da içerisine yerleşmiştir [44]. Birincil $N_2O$ taşıma adımı reaksiyon (2.35)'te yazıldığı üzere hidrojen radikalleri ile $N_2O$'nun reaksiyonudur.

$$H + N_2\mathrm{O} \leftrightarrow N_2 + OH \tag{2.35}$$

1500 K'den daha yüksek sıcaklıklarda $N_2O$'nun ömrü 10 ms'den daha azdır. Genel kabul, $N_2O$ emisyonunun akışkan yataklı yakıcılarda olduğu üzere düşük sıcaklık yanmasının dışında önemli olmadığıdır [37].

### 2.3.2. Karbon monoksit (CO) oluşumu

Yanma sonu ürünleri arasında CO'in ortaya çıkmasında iki neden vardır. Bunlardan birincisi havanın yeterli olmaması sonucunda eksik yanma ya da hava ile yakıtın iyi bir şekilde karışmaması sebebiyle ortaya çıkan CO emisyonudur. İkinci neden yanma odası sıcaklığının çok yüksek olması durumunda CO emisyonunun görülmesidir. Bunun dışında yakıt içerisinde bulunan CO emisyonunun yanmadan yanmada odasından ayrılması da emisyon nedenleri arasında gösterilebilir. Bunlara ilaveten, kömür gazlarının pistonlu motorlarda yanması sırasında motor yağının ayrışması da karbon monoksit oluşumuna

katkı sağlayabilmektedir [47]. Pistonlu motorlarda hidrojen-karbon monoksit karışımının yakılması ile de oluşan karbon monoksit miktarlarının aynı şartlarda yakılan benzinin veya doğalgazın yanma sonu ürünlerinde görülen karbon monoksit seviyelerinden daha az olduğu ortaya koyulmaktadır [48, 49].

### 2.3.3. Karbon dioksit ($CO_2$) oluşumu

$CO_2$, karbon temelli birleşiklerin tam hava karışımı ile yanması sonucunda yanma ürünü olarak ortaya çıkar.

## 2.4. Hidrojen, Metan ve Hidrojen Metan Karışımlı Yakıtlar

### 2.4.1. Hidrojen

Hidrojen aslında tam olarak yenilenebilir bir enerji kaynağı olmamakla birlikte, birincil enerji kaynaklarından yararlanılarak su, fosil yakıtlar ve biyokütle gibi değişik hammaddelerden üretilebilen sentetik bir yakıttır [37].

Üretilmesi aşamasında buhar iyileştirme, atık gazların saflaştırılması, elektroliz, fotosüreçler, termokimyasal süreçler gibi alternatif birçok hidrojen üretim teknolojileri mevcuttur. Günümüzde hidrojen ağırlıklı olarak doğal gazdan buhar reformasyonu sonucu elde edilmektedir. Suyun elektrolizi bilinen bir yöntem olmakla beraber ekonomik hale getirilmesi konusunda çalışmalar ve güneş enerjisinden biyoteknolojik yöntemlerle hidrojen üretimi konusunda geliştirme çalışmaları devam etmektedir [37].

Hidrojen kullanımında karşılaşılan en büyük engellerden birisi düşük kütlesel yoğunluğu ve uçuculuğu sebebiyle depolama sorunudur. Bu konuda sıkıştırılmış gaz, karyojenik (dondurulmuş) sıvı, metal hidrit ve karbon absorpsiyonu yöntemleri bulunmaktadır. Hidrojenin son kullanımda depolama teknikleri her bir uygulama için farklıdır [37].

### 2.4.2. Metan

Doğal gaz, enerji talebinde önemli kaynaklardan biridir. Doğal gazın en önemli bileşeni metandır. Doğada en kararlı en küçük yapıda bulunan hidrokarbon olması nedeniyle

yanma açısından çok önemli bir elementtir. Yanma ve ateşleme çalışmalarında en sık kullanılan yakıtlardan birisidir. Yanma sonucunda kül ve duman bırakmaması önemli avatajlarındandır [37].

### 2.4.3. Hidrojen-metan karışımlı kompozit yakıtlar

Iki veya daha fazla farklı yakıt karışımı kompozit yakıt olarak adlandırılmaktadır. Birçok durumda kompozit yakıt terimi iki homojen faz yakıtın karışımını (sıvı-sıvı, gaz-gaz gibi) ifade etmesine rağmen, bazen doğalgaz ile pülverize (toz) kömürün birlikte yanması gibi heterojen kompozit yakıtlarda geniş pratik uygulamalara sahiptir. Kompozit yakıtlar üzerine odaklanan önceki çalışmaların çoğu ya benzin-etanol gibi sıvı-sıvı kombinasyon yada onların pratik yakıcılarında artan öneminden dolayı kömür-doğalgaz gibi gaz-katı kompozit yakıtlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit gaz yakıtların yanma özellikleri üzerine literatürde çok az bilgi vardır. Bunun nedeni, muhtemelen kompozit gaz yakıtların pratik öneminin bulunmamasındandır [50].

Saf metan, hidrojen ve diğer hidrokarbonlar ile karşılaştırıldığında ateşleme gecikmesi, alevlenme limitleri, laminer yanma hızı, ateşleme ve difüzyon alevlerinin gerilme oranları bakımından en zayıf özellik göstermektedir. Aynı zamanda, daha önceki araştırmacılar tarafından önerildiği üzere bu özellikler çok az hidrojen ilavesi yada daha fazla kompleks hidrokarbon ilavesi ile önemli derecede düzeltilebilir [37].

# 3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD)

Akışı içeren mühendislik sistemlerinin tasarımı ve analizi için iki temel yaklaşım vardır: Deney ve hesaplama. İlki tipik olarak test edilen modellerin inşasını içerirken, ikincisi analitik veya hesaplamalı olarak diferansiyel denklemlerin çözümünü içerir. Bu bölümde, bir bilgisayar (veya daha yakın zamanlarda, bir bilgisayar ortamında çalışan çeşitli bilgisayarlar) kullanılarak sıvı akışı denklemlerinin çözümüne ayrılmış çalışma alanı olan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) hakkında kısa bir giriş sunulacaktır. Modern mühendisler hem deneysel hem de HAD analizlerini uygular ve ikisi birbirini tamamlar. Örneğin mühendisler kaldırma, sürükleme, basınç düşüşü veya güç gibi genel özellikleri deneysel olarak elde edebilirler, ancak kesme gerilmeleri, hız ve basınç profilleri gibi akış alanıyla ilgili ayrıntıları elde etmek için HAD'ı kullanırlar. Ek olarak, deneysel veriler genellikle hesaplamalı ve deneysel olarak belirlenmiş global miktarları eşleştirerek HAD çözümlerini elde etmek için kullanılır. HAD daha sonra dikkatlice kontrol edilen parametrik çalışmalar yoluyla tasarım döngüsünü kısaltmak için kullanılır, böylece gerekli deneysel test miktarını azaltır [51].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesi, çalışılacak kontrol hacmi için temel koruma denklemlerinin çözülmesini ve ilgilenilen akış hacminin sayısal simülasyonunun gerçekleştirilmesini içerir. Bu simülasyon için gerekli tüm faktörler (geometri, sınır koşulları, akışkanın fiziksel özellikleri, türbülans vb.) HAD modellemesi için gereklidir. HAD modellemesinden elde edilen sayısal tahminler, deneysel bir çalışmaya göre daha hızlı ve daha ekonomiktir ve sonuçların bazı deneysel sonuçlarla uyumlu olması beklenir [52].

Gaz halindeki yakıtların yakıldığı yanma sistemlerinde HAD modellemesi, yanma sürecinin ve akış alanının (özellikle alev bölgesinin) karmaşıklığı nedeniyle araştırmacılar ve tasarımcılar için yüksek ilgi olmaya devam etmektedir. Bu çalışmada, ANSYS Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılarak yanmanın sayısal modellemesi yapılmış ve ilgili yakıtların yanma karakteristikleri elde edilmiştir.

Bu çalışmada türbülansı modellemek için (RSM) Reynold Stress Model kullanılmıştır. *k*-ε ve *k*-*w* gibi iki denklemli büyük girdap simülasyonları çalışmamızdaki yüksek girdap yoğunluğunu doğru modelleyemeyeceği için seçilmemiştir. Çünkü *k*-ε ve *k*-*w* modelleri gibi girdap viskozitesi tabanlı modeller, karmaşık, gerçek hayattaki türbülanslı akışlarda önemli eksikliklere sahiptir.

Örneğin, akım çizgisi eğriliği, akış ayrımı, yeniden sirkülasyon akış bölgeleri olan akışlar veya ortalama dönme etkilerinden etkilenen akışlarda bu modellerin performansı yetersizdir. Bu tür bir ve iki denkleme dayalı kapanışlar, azalan türbülanslı akışlarda gözlemlenen türbülansın dönüşünü açıklayamayabilir. Girdap viskozitesine dayalı modeller, türbülanslı akışın esasen (viskoz yerine) elastik bir ortam gibi davrandığı hızlı bozulma sınırındaki türbülanslı akışların davranışını kopyalayamamaktadır [53, 54]. Çalışmada kullanılan yanma modeli, ön-karışımsız yanma koşulları için kompozit yakıtlarda daha iyi sonuçlar veren karışım oranı/PDF yanma modelidir.

### 3.1. Hareket Denklemleri

Sıkıştırılamaz, viskoz, serbest yüzey etkileri olmayan Newton tipi akışkanın hareket denklemi, süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial \mathrm{p}}{\partial \mathrm{t}} + div(\rho u) = 0 \tag{3.1}$$

Bu denklem, zamanla sıkıştırılabilir bir akışta bir noktada üç boyutlu kütlenin korunumu veya süreklilik denklemini temsil eder. Bu denklemdeki ilk ifade yoğunluğun zamanla değişimini ifade eder. Bu çalışmadaki modeller zamandan bağımsız olarak çözüldüğü için bu ifade sıfırdır. İkinci ifade, akışkan elementin sınırı boyunca meydana gelen net kütle akışıdır ve konvektif terim olarak da bilinir [55].

Üç boyutlu akışlarda bir akışkan için x, y ve z yönlerindeki momentum eşitlikleri de şöyle Verilebilir [55].

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-\rho + \tau xx)}{\partial x} + \frac{\partial \tau yx}{\partial y} + \frac{\partial \tau zx}{\partial z} + S_{Mx} \tag{3.2}$$

$$\rho \frac{D\vartheta}{Dt} = \frac{\partial \tau yx}{\partial x} + \frac{\partial(-\rho + \tau yy)}{\partial y} + \frac{\partial \tau zx}{\partial z} + S_{My} \tag{3.3}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau yz}{\partial y} + \frac{\partial(-\rho + \tau zz)}{\partial z} + S_{Mz} \tag{3.4}$$

Enerjinin korunumu ile ise, bu program kapsamında statik entalpinin korunumu çözülmektedir. Basınç ve dış kuvvetlerin neden olduğu türlerin difüzyonunun ihmal edildiği kabul edilecek olursa, enerji denklemi de şu şekilde ifade edilebilir [56].

$$\frac{\partial_{(ph)}}{\partial t} + \frac{\partial_{(pu_i h)}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}(k\frac{\partial T}{\partial x_i}) - \frac{\partial}{\partial x_i}\sum{}_{j'} h_{j'} J_{j'} + \frac{\partial_p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij}\frac{\partial_{u_i}}{\partial x_i} + S_h \quad (3.5)$$

Burada da $T$ sıcaklığı, $\tau ij$ viskoz gerilme tensörünü, $J_j^{'}$ her bir $j'$ kimyasal türün akısını, $k$ ısıl iletkenliğini ve $Sh$'da, kimyasal reaksiyonun, radyasyonun ve faz değişiminin neden olduğu ısı değişiminin entalpisi için kullanılın kaynak terimini temsil eder [56].

### 3.2. Kimyasal Türlerin Korunumu

İşlemi kolaylaştırmak için, yoğunluğu içeren tüm korelasyonlar, zaman ortalamalı eşitliğin dışında tutulacak olursa, her bir kimyasal tür j'nin kütle oranı $m_j$ için eşitlik şöyle tanımlanır [56].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(pu_i m_j) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_{m_j}\frac{\partial m_j}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\overline{\rho u'_{\imath} m'_{J}}\right) + R_J + S_J \quad (3.6)$$

Burada, $Rj$ , oluşmanın ya da tükenmenin kütle oranını (gaz fazında), $Sj$ , oluşmanın oranını ve $\Gamma_{mj}$ laminer değişim katsayısını temsil etmektedir [56].

### 3.3. Yakıcılarda Türbülanslı Akışın Modellenmesi

Türbülanslı akışın HAD simülasyonları, akış alanının ortalamada sabit olduğu durumlarda bile (istatistikçiler bu durumu durağan olarak adlandırır) laminer akıştan çok daha zordur. Bunun nedeni, türbülanslı akış alanının özelliklerinin her zaman kararsız olması ve türbülanslı bir akışta tüm yönlerde ortaya çıkan türbülanslı yapılar olarak adlandırılan üç boyutlu rastgele, dönen, girdaplı yapıların ortaya çıkmasıdır. Bazı HAD hesaplamaları, türbülanslı akışın tüm ölçeklerinin kararsız hareketini çözme girişiminde bulunulan, doğrudan sayısal simülasyon (DNS) adı verilen bir teknik kullanır. Bununla birlikte, en büyük ve en küçük girdaplar arasındaki boyut farkı ve zaman ölçeği farkı olabilir. Ayrıca, bu farklar Reynolds sayısı arttıkça artar [51]. Reynolds sayısı arttıkça türbülanslı akışların

DNS hesaplamalarını daha da zorlaştırır. DNS çözümleri, son derece hassas, büyük bilgisayarlar ve çok büyük miktarda CPU zamanı gerektirir. Günümüz bilgisayarlarında DNS sonuçları, tam ölçekli bir uçak üzerindeki akış gibi mühendislikle ilgili pratikteki yüksek Reynolds sayılı türbülanslı akışlar için henüz uygun değildir. Bilgisayar gelişiminin olağanüstü hızı bugünün hızında devam etse bile, bu durumun birkaç on yıl daha değişmesi beklenmemektedir [51].

### 3.4. Reynolds Gerilme Modeli

Reynolds gerilim modelleri, Reynolds Gerilim Taşıyıcı Denklemlerine dayanır. Kinematik Reynolds gerilmenin taşınması için denklem [57]:

$$R_{ij} = \left(u'_i u'_j\right) = \frac{-\tau_{ij}}{\rho} \tag{3.7}$$

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = D_{ij} + P_{ij} + \pi_{ij} + \sigma_{ij} + \epsilon_{ij} \tag{3.8}$$

$R_{ij}$'in değişim oranı + Konveksiyonla $R_{ij}$'in Taşınması = Difüzyonla $R_{ij}$'in Taşınması + Türbülanslı basınç-gerilme (viskoz kuvvetler) etkileşimleri nedeniyle $R_{ij}$'in üretim hızı + Dönme nedeniyle $R_{ij}'$in taşınması + $R_{ij}$'in dağılma hızı olarak yukardaki fromülasyon açıklanabilir [57].

Yukarıdaki altı kısmi diferansiyel denklem, altı bağımsız Reynolds gerilimini temsil eder. Üretim terimi $P_{ij}$ kapalıdır ve modelleme gerektirmezken, basınç gerilim korelasyonu $\pi_{ij}$ terimler ve dağılma $\varepsilon_{ij}$, kapatılmaz ve kapatma modelleri gerektirir.

#### 3.4.1. Üretim Terimi

Reynolds gerilme transport denklemleri ile HAD hesaplamalarında kullanılan Üretim terimi:

$$P_{ij} = -(R_{im}\frac{\partial U_j}{\partial x_m} + R_{jm}\frac{\partial U_i}{\partial x_m}) \tag{3.9}$$

Fiziksel olarak üretim terimi, Reynolds gerilmelerine karşı çalışan ortalama hız gradyanlarının hareketini temsil eder. Bu, ortalama akıştan dalgalanan hız alanına geçerken kinetik enerjinin transferini açıklar. Büyük ölçekli ortalama hareketlerden küçük ölçekli dalgalı hareketlere bu enerji transferi yoluyla akıştaki türbülansın sürdürülmesini tanımlamaktan sorumludur. Bu, Reynolds Gerilme Taşıyıcı Denklemlerinde kapalı olan tek terimdir. Doğrudan değerlendirmesi için model gerektirmez. Reynolds Gerilme Taşıyıcı Denklemlerindeki diğer terimler kapalı değildir ve değerlendirmeleri için kapatma modelleri gerektirir.

### 3.4.2. Hızlı basınç-gerilme korelasyonu terimi

Hızlı basınç-gerilme korelasyon terimi, enerjiyi Reynolds gerilim bileşenleri arasında yeniden dağıtır. Bu, koordinat eksenlerinin ortalama hız gradyanına ve dönüşüne bağlıdır. Fiziksel olarak bu, dalgalanan hız alanı ile ortalama hız gradyan alanı arasındaki etkileşimden dolayı ortaya çıkar. Model ifadesinin en basit doğrusal biçimi:

$$\frac{\pi_{ij}^{R}}{k} = C_2 S_{ij} + C_3 \left( b_{ik} S_{jk} + b_{jk} S_{ik} - \frac{2}{3} b_{mn} S_{mn} \delta_{ij} \right) + C_4 (b_{ik} W_{jk} + b_{jk} W_{ik}) \qquad (3.10)$$

İşte $b_{ij} = \frac{u_i u_j}{2k} - \frac{\delta_{ij}}{3}$ Reynolds stres anizotropi tensörü, $S_{ij}$ ortalama hız alanı için gerinim oranı ve $W_{jk}$ ortalama hız alanı için dönme hızı terimidir. $C_2, C_3, C_4,$Geleneksel olarak, hızlı basınç gerinim korelasyon modelinin katsayılarıdır. Hızlı basınç gerinim korelasyonu terimi için simülasyonlarda kullanılan birçok farklı model vardır. Bunlar arasında Launder-Reece-Rodi modeli, [58] Speziale-Sarkar-Gatski modeli, [59] Hallback-Johanssen modeli, [60] Mishra-Girimaji modeli [61] ve diğerleri sayılabilir.

### 3.4.3. Yavaş basınç-gerilme korelasyonu terimi

Yavaş basınç-gerinim korelasyon terimi, enerjiyi Reynolds gerilimleri arasında yeniden dağıtır. Bu, Reynolds gerilimlerindeki anizotropiyi azaltmak için enerjiyi yeniden dağıttığı, azalan türbülansın izotropisine dönüşten sorumludur. Fiziksel olarak bu terim, dalgalanan alan arasındaki kendi kendine etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Bu terim için model ifadesi şu şekilde verilir [62]:

$$\pi_{ij}^{S} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k}\left(R_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij}\right) - C_2(P_{ij} - \frac{2}{3}P\delta_{ij}) \tag{3.11}$$

Yavaş basınç gerinim korelasyonu terimi için simülasyonlarda kullanılan birçok farklı model vardır. Bunlara Rotta modeli [63], Speziale-Sarkar modeli [64] ve diğerleri dahildir.

### 3.4.4. Dağılma Terimi

Yayılma hızı tensörünün geleneksel modellemesi, küçük enerji tüketen girdapların izotropik olduğunu varsayar. Bu modelde dağılma sadece normal Reynolds gerilmelerini etkiler [65].

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3}\varepsilon\delta_{ij} \text{ or } \varepsilon_{ij} = 0 \tag{3.12}$$

Burada $\varepsilon$ türbülanslı kinetik enerjinin dağılma oranıdır, $\delta_{ij}$=1 olduğunda i=j ve 0 olduğunda i≠ $j$ ve $e_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon} - \frac{2\delta_{ij}}{3}$ olarak tanımlanan dağılma oranı anizotropisidir.

Bununla birlikte, örn. Rogallo, [66] Schumann & Patterson, [67] Uberoi, [68, 69] Lee & Reynolds [70] ve Groth, Hallbäck & Johansson [71] dağılma oranı tensörünün bu basit modelinin yetersiz olduğu birçok durum vardır. çünkü küçük enerji tüketen girdaplar bile anizotropiktir. Dağılma hızı tensörünün bu anizotropisini hesaba katmak için Rotta [72], yayılma hızı stres tensörünün anizotropisini, stres tensörünün anizotropisi ile ilişkilendiren doğrusal bir model önerdi.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3}\varepsilon\delta_{ij} \; or e_{ij} = \sigma a_{ij} \tag{3.13}$$

$$a_{ij} = \frac{\overline{u_i u_j}}{k} - \frac{2\delta_{ij}}{3} = 2b_{ij} \tag{3.14}$$

$\sigma$ parametresinin, türbülanslı Reynolds sayısı, ortalama gerinim hızı vb. gibi bir fonksiyon olduğu varsayılır. Fiziksel hususlar, türbülanslı Reynolds sayısı sonsuz olma eğilimindeyken $\sigma$ 'nın sıfıra ve türbülanslı Reynolds sayısı sıfır olma eğiliminde

olduğunda bire doğru eğilim göstermesi gerektiğini ifade eder. Bununla birlikte, güçlü gerçekleştirilebilirlik koşulu, s $\sigma$ aynı şekilde 1'e eşit olması gerektiğini ifade eder.

### 3.4.5. Difüzyon terimi

Difüzyon teriminin modellemesi, Reynolds gerilmelerinin difüzyonla taşınma hızının Reynolds gerilmelerinin gradyanlarıyla orantılı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu, değişen hız alanı nedeniyle Reynolds gerilimlerinin uzaysal yeniden dağılımının etkisini modellemek için gradyan difüzyon hipotezi kavramının bir uygulamasıdır. Bunun en basit şekli ticari HAD kodları tarafından takip edilir [73].

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_m}\left(\frac{v_t}{\sigma_k}\frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m}\right) = div(\frac{v_t}{\sigma_k}\nabla(R_{ij}) \tag{3.15}$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}\ , \sigma_k = 1\ and\ C_\mu = 0{,}09 \tag{3.16}$$

### 3.4.6. Rotasyonal terim

Rotasyon terimi verilmiştir [74]. Bu terim dönüş hareketlerini tanımlar.

$$\Omega_{ij} = -2\omega_k(R_{jm}e_{ikm} + R_{im}e_{jkm}) \tag{3.17}$$

$\omega_k$: $Rotasyon\ vektör$ü

i,j,k döngüsel sıradadır ve farklıdırlar :

$$e_{ijk} = 1 \tag{3.18}$$

i,j,k ters döngüsel sıradadır ve farklıdırlar :

$$e_{ijk} = -1 \tag{3.19}$$

i,j,k herhangi ikisi aynı olduğu durum :

$$e_{ijk} = 0 \tag{3.20}$$

Reynold Gerilme Modelinin Avantajları:

Yalnızca başlangıç ve/veya sınır şartlarının belirlenmesi yeterlidir. İzentropik eddy-viskozite modeli kullanan $k-\varepsilon$ modelinin tersine RSM türbülans transportun bütün bileşenlerini çözer. Bu sayede hem en genel türbülans modeli olmakla birlikte çoğu mühendislik akış problemlerinde mantıklı sonuçlar verir.

### 3.5. Standard k-$\varepsilon$ Türbülans Modeli

Standart k-ε türbülans modeli eddy-viskozite modeli olarak da bilinmektedir. Reynolds gerilmesinin, ana hız gradyanı ile orantılı olduğu varsayılır. Bu Boussinesq hipotezi olarak bilinir [75]. Gerilmeler;

$$-\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right]-\rho\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{3.21}$$

Eşitlik denklem 4.21 'de $\mu_t$ türbülans viskozitesini, $\delta_{ij}$ kroneker delta tensörünü, $u_i$ ve $u_j$ ortalama hızları, $u_i'$ve $u_j'$ değişen hızları ve denklemdeki $k$ ifadesi de türbülans kinetik enerji $\left(\frac{1}{2}\sum_i \overline{u_i'^2}\right)$'yi temsil etmektedir [73].

Türbülans girdap viskozitesi laminar akışta moleküler viskoziteden farklıdır. Fakat, moleküler viskozite ile aynı tolü oynar. Moleküler viskozite yerine efektif viskozite ($\mu_{eff}$) kullanılır.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{3.22}$$

Türbülasn viskozitesinin ($\mu_t$), türbülans hızı ve uzunluk skalası ile orantılı olduğu varsayılır. Bu skalalar türbülans kinetik enerjisinden $k$ ve yayılma oranı $\varepsilon$ elde edilir. Türbülans viskozitesi formülü aşağıdaki gibidir [73].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.23}$$

$C_\mu$ deneysel bir sabittir. $k$-$\varepsilon$ türbülans modelinde türbülans viskozitesinin $(\mu_t)$ hesaplanması için $k$ ve $\varepsilon$ değelerine ihtiyaç duyulmaktadır.Bu değerler ise aşağıda verilen denklemden elde edilmektedir [75].

Türbülans kinetik enerjisi k'nın değeri:

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t\, \sigma_k}{\sigma_k \sigma x_i}\right) + G_k - \rho\varepsilon \tag{3.24}$$

Türbülans kinetik enerjisinin dağılım oranı $\varepsilon$'nın değeri;

$$\frac{\partial}{\partial_t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t\, \sigma_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon \sigma x_i}\right) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{1\varepsilon}\rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{3.25}$$

Burada $G_k$ortalama hız gradyentinden dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimi, $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$deneysel sabitleri, $\sigma_k$ve $\sigma_k$Prandlt sayılarını göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisi üretim oranı $G_k$ aşağıdaki ifade ile elde edilmektedir [75]:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{3.26}$$

Çizelge 3.1. k-$\varepsilon$ modelde kullanılan sabitler.

| Sabit | $C_\mu$ | $\sigma_k$ | $\sigma_k$ | $C_{1\varepsilon}$ | $C_{2\varepsilon}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Değer | 0,09 | 1,0 | 1,3 | 1,44 | 1,92 |

### 3.6. Yanmanın Modellenmesi

Türbülanslı reaksiyon akışlarının modellenmesi, yalnızca türbülans ve kimya arasındaki etkileşimleri değil, aynı zamanda birçok reaksiyon ve kinetik modeli de tanımlamayı gerekli kılar. Akış denklemlerine ek olarak, tüm kimyasal türler için kütle fraksiyonunun taşınım denklemlerinin de çözülmesi gerekir. Tüm kimyasal türlerin taşınım denklemlerinde, bir kimyasal türün hacimsel oluşum veya tüketim hızı kaynak terim (Sj) olarak bulunur. Tüm yakıt, oksitleyici ve inert türlerin kütle ve hacim fraksiyonlarının

toplamı 1'e eşittir. Yanma işlemi sırasında ısı olarak kimyasal enerji açığa çıkar. Bu işlemdeki entalpi, taşıma denkleminin çözülmesi sonucunda elde edilir [75].

Sıcaklık ve yoğunluk açısından değişimgöstermesi nedeniyle akış hacmi için kimyasal tür ve entalpi denklemleri çözülmelidir [75].

Yanma modeli olarak Mixture Fraction/PDF yanma modeli seçilmiştir.

The Mixture Fraction/ PDF yanma modeli

Çalışmada kullanılan The Mixture Fraction/PDF yanma modeli skaler konumlu tek bir karışım için taşıyıcı eşitliklerin çözümünden meydana gelir [56]. Bu yanma modelinde ayrı ayrı türler için taşıyıcı eşitlikler çözülmez. Onun yerine, ilgili tür için tek tek bileşim konsantrasyonu, karışım oran dağılımı tahmin edilen formda türetilmiştir. Kimya ve türbülansın etkileşimi, imkan dahilindeki yoğunluk fonksiyonunun yardımı ile açıklanabilir [56].

PDF model yaklaşımı türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için özel olarak geliştirilmiştir. Yakıt/Oksitleyici bir sistem için, karışım oranı $f$, yerel yakıt kütlesel oranı bakımından şöyle yazılabilir [56]:

$$f = \frac{m_F}{m_F + m_O} \tag{3.27}$$

Burada $m_F$ ve $m_O$, yakıt ve havanın kütle oranlarını göstermektedir. Karışım oranı $f$, türbülanslı akış alanının zaman ortalamalı değeri için korunum denklemlerinin çözüldüğü akış alanındaki her noktada korunan bir nicelik değeridir [56].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i}\right) + S_m \tag{3.28}$$

$S_m$, sıvı yakıt damlacığından gaz fazına, yalnızca zamanı gelmiş kütlenin transferinin kaynak terimidir.

Anlamlı karışım oranı için çözüme ek olarak, bir korunum denklemi karışım oranı değişimi için çözülür. $\overline{f'}^2$ türbülans kimya etkileşimini tanımlayan kapama modelinde kullanılır [43].

$$\frac{\partial(\rho\overline{f'}^2)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i\overline{f'}^2)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial\overline{f'}^2}{\partial x_i}\right)+C_g\mu_t\left(\frac{\partial\overline{f'}^2}{\partial x_i}\right)^2-C_d\rho\frac{\varepsilon}{k}\overline{f'}^2 \quad (3.28)$$

Çizelge 3.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler.

| Sabit [43] | $\sigma_t$ | $C_g$ | $C_d$ |
|---|---|---|---|
| Değer | 0,7 | 2,86 | 2,0 |

Sistem kimyasını tanımlamak için, modelde iki seçenekli varsayım yapılır; alev tabakası (karışım yakılır (mixed is burned)) yaklaşımı ve denge varsayımı. Alev tabakası ya da 'karışım yakılır' benzerliği, kimyasal etkileşimin sonsuz hızda ve tersinmez olduğunu varsayar. Bununla beraber yakıt ve oksitleyici türleri boşlukta asla birlikte görünmezler ve tek aşamada yanma sonu ürünlerine dönüşürler. Bu basit sistem, türlerin kütle ve karışım oranları arasında düz çizgi ilişkisi sağlar. Bu benzerliğin hesaplanması kolaydır ve reaksiyon ve reaksiyon oranına ihtiyaç duyulmaksızın hızlıdır. Fakat ''karışım yakılır'' modeli, tek aşama reaksiyonlarının tahmininde yetersiz olup ara türlerin tahminini gerçekleştirememektedir. Sonuç olarak, denge varsayımı, sistemdeki ara türlerin hesaplamasını yapmaktadır. Bu varsayım, moleküler seviyede her zaman var olan kimyasal denge için yeterli kimyasal hızı işaret etmektedir [56]. Karışım oranındaki ($f$) türlerin mol oranları, Gibbs free enerji [75]' nin azaltılması temelli bir algoritma ile hesaplanır. Bu model, detaylı bir kimyasal kinetik oran verisini gerektirmez. Kimyasal türler için özellik verisi, kodlarla belirlenmiş kimyasal bir veritabanından tanımlanır [56].

Türbülans-Kimyasal etkişleşimi

Türbülans ve kimyasalın etkileşimi, olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF)' nun uygulaması ile modellenir. PDF, p($f$), dalgalı değişken $f$ değerinin $f$ + $\Delta f$ arasında bir değer almasının zaman oranını tanımlar [56].

$$p(f)\Delta f=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\sum_i\tau_i \quad (3.29)$$

$\tau_i$burada $f'$nin $\Delta f$ aralığında harcadığı zamanın oranıdır [56].

Radyasyon Modeli

Yüksek sıcaklıklarda radyasyonla gerçekleşen ısı transferi meydana gelmektedir.Stokiyometrik yanma koşullarında genellikle yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımı yaklaşık olarak 1000-1800 °C arasındadır. Bu nedenle yanma odasında ısı trasnferi dikkate alınması gereken önemli konulardan biridir. Sıcaklık dağılımının daha iyi tahmin edilebilmesi için radyasyon modeli kullanılmaktadır [56].

Işınımla ısı transferi aşağıdaki denklemle ifade edilmektedir.

$$Q_{rad}=\sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4) \tag{3.30}$$

Burada taşınım ya da iletim ısı transfer miktarı, radyasyonla ısı transfer moeli simülasyonu içinde yer almaktadır.

Bir $d_x$yolu süresince radyant yoğunluğu da aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir.

$$\frac{dI}{dx} = (\alpha_\alpha + \alpha_s)I + \frac{\alpha_\alpha \delta T^4}{\pi} \tag{3.31}$$

$\alpha_\alpha$ ve $\alpha_s$ sırasıyla emme ve saçılma katsayıları , I, toplam yarı küresel şiddet , $\sigma$ Stefan-Boltzman sabitidir (5,672x$10^{-8}$ W/$m^2K^4$). Bu modelde, Bu modelde, eşitlik 4.30, bir yüzeyde her ayrık kontrol hacminde tek bir noktadan çıkan ışınların serileri boyunca entegre edilir. Bu ışınlar, bu nokta civarında yarı küresel katı açı kaplarlar [43]. Entegre edilmiş ışıma yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$I(x) = \frac{\sigma T^4}{\pi}\left(\frac{\alpha_\alpha}{\alpha_\alpha+\alpha_s}\right)(1\text{-}\exp[\text{-}(\alpha_\alpha + \alpha_s)x]) + I_o \exp[-(\alpha_\alpha + \alpha_s)x] \tag{3.32}$$

$I_o$ devam eden dx mesafesinin başındaki ışıma yoğunluğudur. Bu yeni durumda entalpi kaynağı, ‘Işıma izleme’ tekniğinin kullanıldığı akışkan kontrol hacmi boyunca takip edilen her ışıma mesafesi yolu boyunca,yoğunluktaki değişimin toplamı olarak hesaplanır [44].

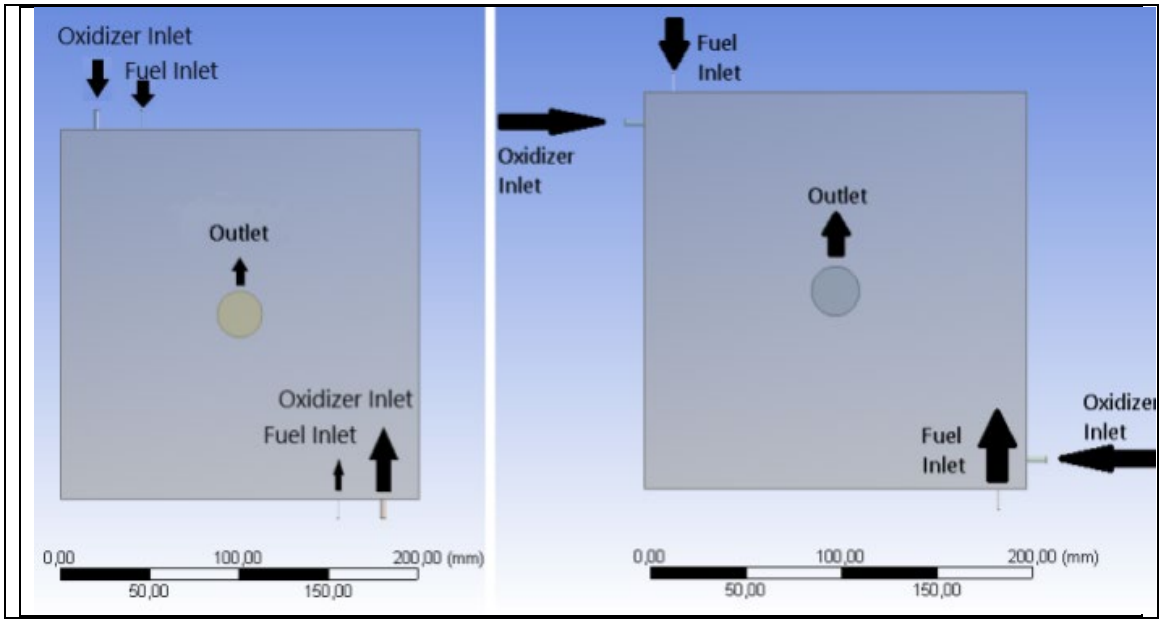
### 3.7. Sınır Şartları

Modellemenin doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için sınır şartları belirlenmelidir. Bu kısımda çalışmaya dair sınır şartları paylaşılmıştır.

Modellemede yakıt ve hava giriş hızları gerekli olan hava ve yakıt hacimsel debilerine göre belirlenmiştir. Modelde sırasıyla ortam sıcaklığı 298 K, Yanma odasına yakıt giriş sıcaklığı 298 K, yanma odası basıncı 1 atm, oksitleyicinin sıcaklığı 300K ve 600 K olacak şekilde belirlenmiştir.

# 4. MODEL DETAYLARI

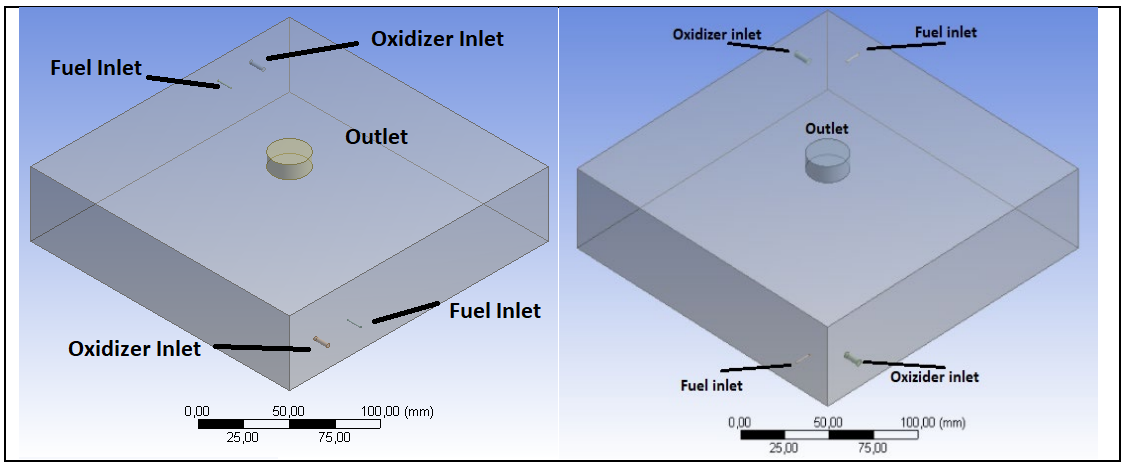
Daha önce bahsedildiği gibi, paralel konfigürasyona sahip olan yakıcı, sonraki çalışmaları doğrulamak için Sorrentino'nun çalışmasının neredeyse aynısı olarak seçilmiştir [14]. Daha sonra oksitleyici giriş konfigürasyonu çapraz akış olarak değiştirilmiş ve hem sıcaklık hem de emisyon seviyeleri modellenmiştir. Ancak yakıt ve hava giriş çapları ve egzoz çapı gibi yanma odasının boyutları, bu çalışmada seçilen hava ve yakıt hızları ve debiler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Yanma odasının boyutları ve geometrisi, yakıt ve oksitleyici akış hızları dikkate alınarak Ansys dizayn modelleme kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan paralel akışlı ve çapraz akışlı yakıcıların üstten görünümleri Şekil 4.1.'de, izometrik görseli şekil 4.2.'de verilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi paralel akışlı yakıcıda yakıt ve oksitleyici girişleri aynı yan yüzeylere yerleştirilirken çapraz akışlılarda durum bunun tam tersidir. Her iki yakıcıda da yakıcı egzozu Şekil 4.1.ve 4.2.'de yakıcının üst kısmına yerleştirildiği görülmektedir. Bu sayede yanma ürünleri, atılmadan önce yakıcıda daha uzun süre kalır.




Şekil 4.1. Paralel akışlı (sol) ve çapraz akışlı (sağ) yakıcıların üstten görünümleri

Yakıt akış hızı, incelenen tüm koşullar için 2 kW'lık bir ısıl güce karşılık geldiği düşünülerek belirlenmiştir. Sonrasında, seçilen ısıl güç dikkate alınarak yakıt giriş çapı 0,89 mm olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde, oksitleyici giriş çapı da 0,83 eşdeğerlik oranı ve seçilen ısıl güç dikkate alınarak 3,39 mm olarak hesaplanmıştır. Daha sonra, hangi eşdeğerlik oranı ve oksijen

konsantrasyonunun çalışıldığı dikkate alınarak her koşul için tüm oksitleyici akış hızları hesaplanmıştır. (Çizelge 4.1.) Oksitleyici içerisine $N_2$ veya $CO_2$ seyreltici eklendikçe oksitleyicideki oksijen konsantrasyonunun azaldığı anlamına gelmektedir. Yakıcı çıkış çapı 25 mm olarak belirlenmiştir. Yakıcı yüksekliği, genişliği ve uzunluğu sırasıyla 50 mm, 200 mm, 200 mm'dir.




Şekil 4. 2. Paralel akışlı (sol) ve çapraz akışlı (sağ) yakıcıların izometrik görünümleri

Yakıt olarak %100 metan kullanılarak farklı eşdeğerlik oranları, seyreltici kullanılarak elde edilen farklı oksijen konsantrayonlarıyla çapraz ve paralel akışlı yakıcıların sıcaklık dağılımları ve emisyon değerleri incelenmiştir. Bu çalışmalara ek olarak, Çizelge 4.3.'de gösterilen farklı oranlarda hidrojence zenginleştirilmiş metan yakıt karışımları 2 kW düzeyinde ısıl gücü karşılayacak şekilde belirlenmiştir. Eşdeğerlik oranı da 0,83 olarak seçilmiştir. Bu başlangıç parametrelerine ek olarak, oksitleyici sıcaklığı önce 300 K'de sabit tutulmuştur. Daha sonra HiTAC koşullarını gözlemleyebilmek için baca gazı sıcaklığını temsil eden bu değer 600 K'e yükseltilmiştir. Dağıtılmış rejime ulaşmak için, oksitleyici karışımına $N_2$ veya $CO_2$ seyreltici eklenmesiyle oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu %21 $O_2$'den %13 $O_2$'ye kadar düşürülmüştür. Başlangıç koşullarının genel bir açıklaması Çizelge 4.1.'de görülebilir.

Yakıt olarak %100 metan kullanılarak farklı eşdeğerlik oranları, seyreltici kullanılarak elde edilen farklı oksijen konsantrayonlarıyla çapraz ve paralel akışlı yakıcıların sıcaklık dağılımları ve emisyon değerleri incelenmiştir. Bu çalışmalara ek olarak, Çizelge 4.1.'de gösterilen farklı oranlarda hidrojence zenginleştirilmiş metan yakıt karışımları 2 kW düzeyinde ısıl gücü karşılayacak şekilde belirlenmiştir. Eşdeğerlik oranı da 0,83 olarak seçilmiştir. Bu başlangıç

parametrelerine ek olarak, oksitleyici sıcaklığı önce 300 K'de sabit tutulmuştur. Daha sonra HiTAC koşullarını gözlemleyebilmek için baca gazı sıcaklığını temsil eden bu değer 600 K'e yükseltilmiştir. Dağıtılmış rejime ulaşmak için, oksitleyici karışımına $N_2$ veya $CO_2$ seyreltici eklenmesiyle oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu %21 $O_2$'den %13 $O_2$'ye kadar düşürülmüştür. Başlangıç koşullarının genel bir açıklaması Çizelge 4.1.'de görülebilir.

Çizelge 4.1. Yanma şartları

| **Yakıt** | **Seyreltici** | **Oksitleyici Sıcaklıkları** | **Yakıcı Tipi** | **Eş Değerlik Oranı** | **Oksijen Konsantrasyonları** |
|---|---|---|---|---|---|
| %100 $CH_4$ | $N_2$ | 300 K | Paralel Akışlı | %90 / %80 / %70 / %60 | %21 $O_2$ |
| | | | | %83 | %21 $O_2$ / %20 $O_2$ / %19 $O_2$ / %18 $O_2$ / %17 $O_2$ / %16 $O_2$ / %15 $O_2$ |
| %100 $CH_4$ | $CO_2$ / $N_2$ | 300 K / 600 K | Çapraz Akışlı | %83 | %21 $O_2$ / %19 $O_2$ / %17 $O_2$ / %15 $O_2$ / %13 $O_2$ |
| %60 $CH_4$ - %40 $H_2$ | | | | | %21 $O_2$ / %19 $O_2$ / %17 $O_2$ / %15 $O_2$ / %13 $O_2$ |
| %50 $CH_4$ -%50 $H_2$ | | | | | %21 $O_2$ / %19 $O_2$ / %17 $O_2$ / %15 $O_2$ / %13 $O_2$ |
| %40 $CH_4$ - %60 $H_2$ | | | | | %21 $O_2$ / %19 $O_2$ / %17 $O_2$ / %15 $O_2$ / %13 $O_2$ |
| %100 $CH_4$ | $N_2$ | 300 K | Çapraz Akışlı | %83 | %21 $O_2$ / %20 $O_2$ / %19 $O_2$ / %18 $O_2$ / %17 $O_2$ / %16 $O_2$ / %15 $O_2$ |

Ansys Fluent ticari programı (ANSYS Fluent Release 18.0) türbülanslı akışın sayısal analizi için kullanılmıştır. Akışın modelleme algoritması, kararlı hal ve üç boyutlu olarak kabul edildi. Süreklilik, enerji, momentum ve türlerin transport denklemleri yinelemeli olarak çözülmüştür. Lineer basınç-gerinim Reynolds Stress Model (RSM) ve Non-Equilibrium Wall Funciton, yüksek oranda türbülanslı akışlar için daha yüksek doğruluk kapasiteleri nedeniyle seçilmiştir. Çünkü türbülans modelleme bilgisine göre, Reynolds Stres Modeli, bu çalışmadaki gibi yüksek oranda girdaplı akışlar içerdiğinde, ortalama akışa nazran diğerlerinden daha iyi sonuçlar verir [75]. türlerin trasnport denklemleri için, model daha az hesaplama süresi sağlayan bir dizi basitleştirici

varsayım içerdiğinden, β olasılık yoğunluk fonksiyonu ön karışımsız yanma modeli difüzyon giriş seçeneği ile birlikte tercih edilmiştir. Basınç hızı bağlantısı için basit şema seçilmiştir. Diğer bileşenler sırasıyla şu şekilde belirlendi: Basınç: Presto; Gradyan: Least Square Cell-Based; Momentum ve Türbülanslı Kinetik Enerji: Second Order Upwind. Her bir denklem için yakınsama kriterleri en az $10^{-4}$ seçilmiştir.

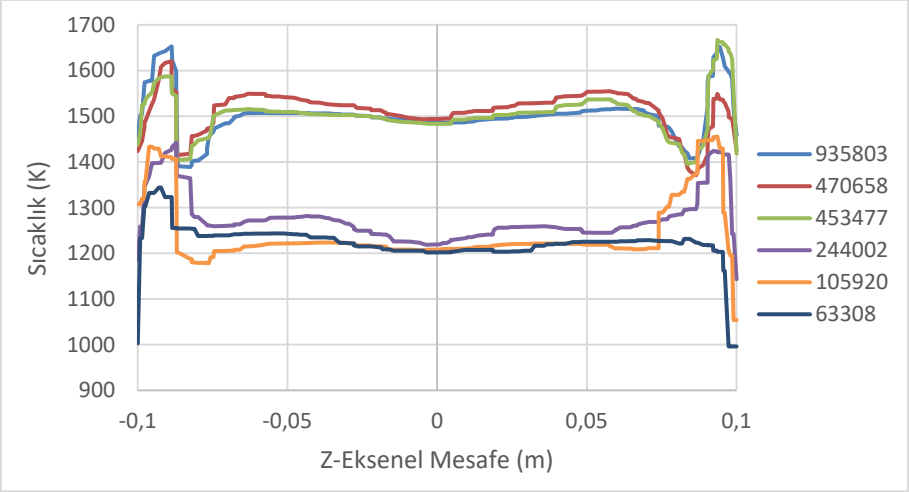
Bu çalışmada $NO_X$ kirletici emisyonunun tahmini için Ansys Fluent Post-Processor kullanılmıştır. Termal (yüksek sıcaklıkta havadaki azotun oksidasyonu), hızlı (hidrokarbon yakıt ayırma reaksiyonları nedeniyle yakıt açısından zengin bölgelerde üretilen) ve yakıt-$NO_X$ olarak adlandırılan üç $NO_X$ oluşum mekanizmasının olduğu iyi bilinmektedir. Ancak bu çalışma için, $NO_x$ seviyelerini tahmin etmek amacıyla termal ve hızlı $NO_X$ mekanizmaları etkinleştirilmiştir. Metan ve hidrojence zengin metanda yakıta bağlı azot bulunmadığından yakıt $NO_X$ etkinleştirilmemiştir.

### 4.1. Ağ Bağımsızlığı ve Model Doğrulaması

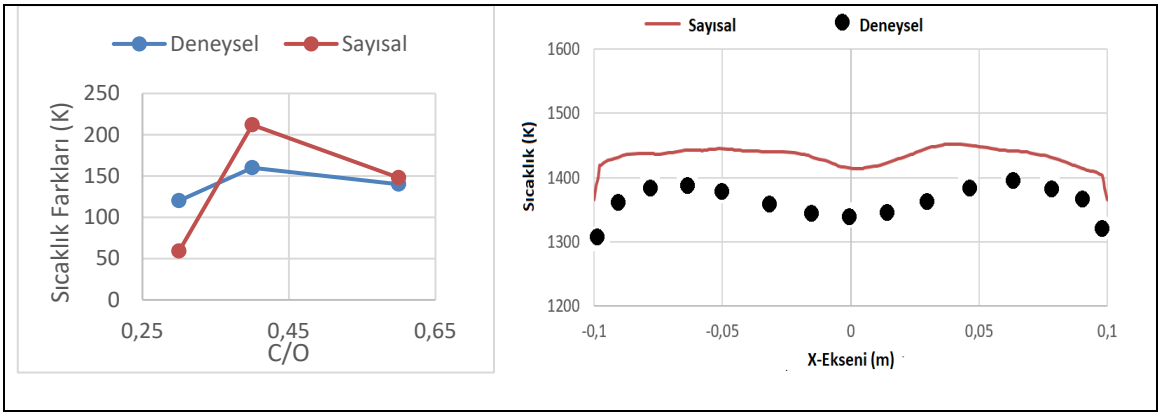
Modelleme çalışmalarında en iyi ağ yapısını bulmak çok önemlidir. Çünkü daha fazla veya daha az eleman kullanmak, daha fazla hesaplama süresine veya yanlış sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle, en iyi ağ yapısını belirlemek çok önemlidir. Bu çalışmada, doğruluk ve hesaplama süresi açısından hangisinin en iyi olduğunu belirlemek için farklı elemanlara sahip beş farklı ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 4.3., altı farklı ağ yapısı kullanılarak tahmin edilen eksenel sıcaklık profillerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi, 453 477, 470 658 ve 935 803 elemanlı ağ yapıları seçilerek tahmin edilen eksenel sıcaklık profilleri arasında önemli farklılıklar bulunmamaktadır. Bu, 453 477 elemandan sonra eleman numaralarını yükseltmeye gerek olmadığı anlamına gelir. Bu nedenle 453 477 elemanlı ağ yapısının, doğrulama ve sonraki modellemeler için en iyi ağ yapısı olarak kabul edilebileceği söylenebilir.

Modelleme çalışmalarında bir diğer önemli adım, modelleme sonuçlarının deneysel ölçümlerle doğrulanmasıdır. Bu şekilde anlamlı ardışık çalışmalar yapılabilir. Bu nedenle, Sorrentino ve diğerleri [14] tarafından bildirilen çalışmada kullanılan yakıcı ve mevcut modelleme sonuçlarını deneysel verilerle doğrulamak için aynı başlangıç parametreleri seçilmiştir. Bu çalışmada, Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi farklı C/O oranları için maksimum ve oksitleyici giriş sıcaklıkları arasındaki farkı temsil eden sonuçlar bulunmaktadır. Tahmin edilen sonuçların, ölçülen sonuçlarla tatmin

edici derecede iyi bir uyum içinde olduğu söylenebilir [14]. Bu doğrulama, mevcut çalışmada daha ileri modellemelere geçişe izin verebilir.




Şekil 4.3. Ağ Bağımsızlık Grafiği

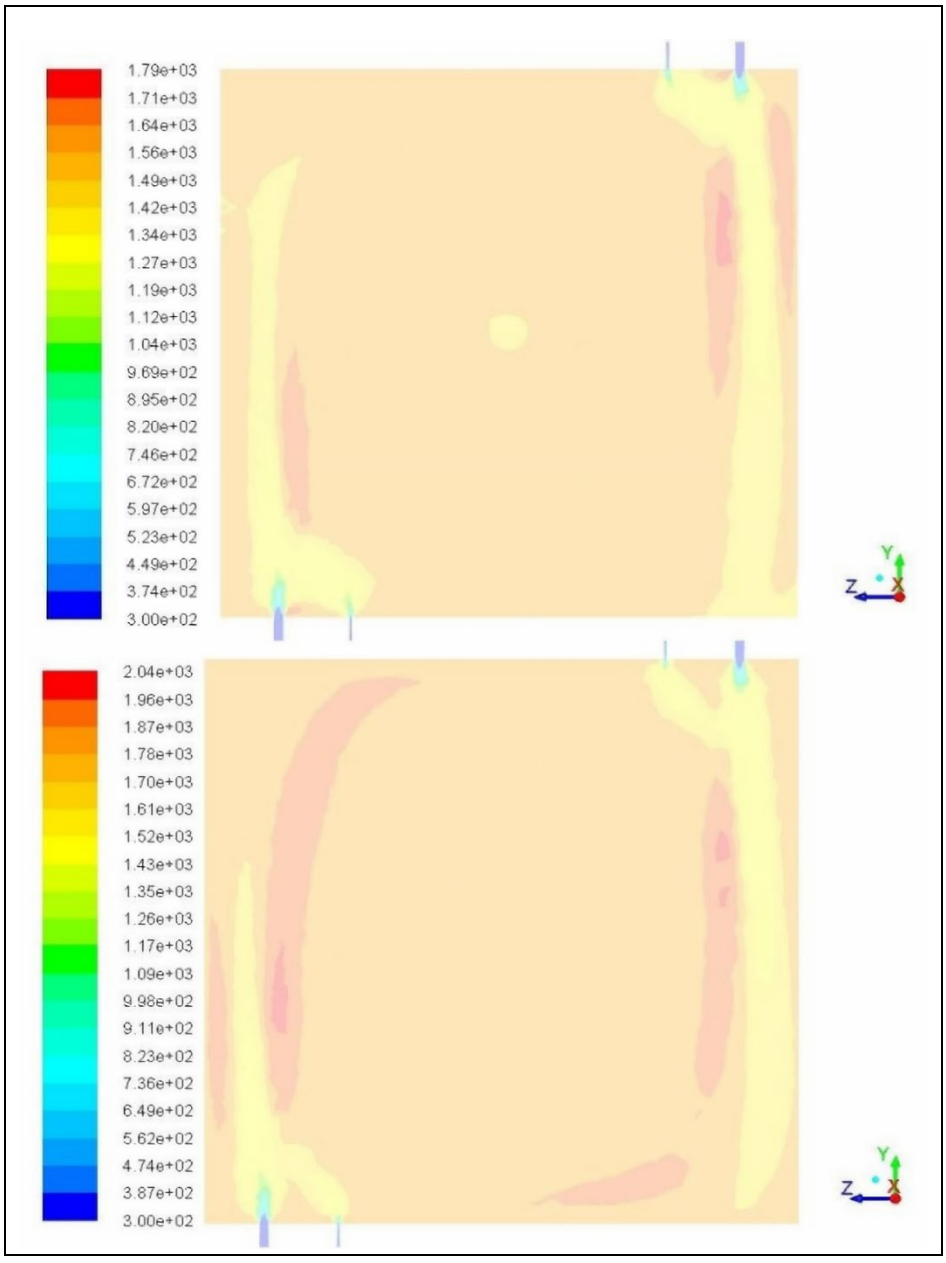



Şekil 4.4. Model doğrulama grafiği

# 5. SONUÇLAR

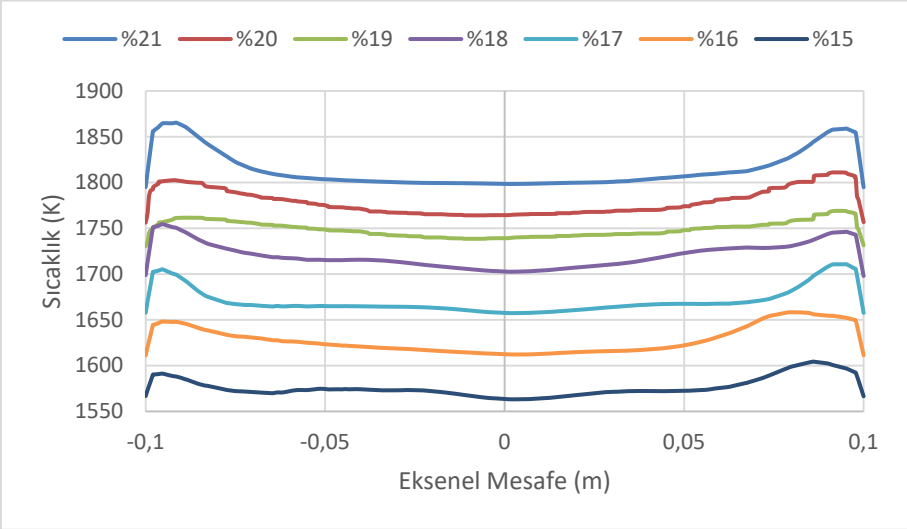
## 5.1. %100 Metan için Paralel ve Çapraz Akışlı Yakıcılarda Oksijen Konsantrasyonunun Sıcaklık Dağılımına ve Kirletici Emisyon Değerlerine Etkisi

%100 metan yakıtlı senaryo kapsamında sıcaklık dağılımı ve emisyon değerleri incelenmiştir. Azot seyreltici eklentisiyle beraber oksijen konsantrasyonu %21'den, %15'e kadar azaltılmıştır.

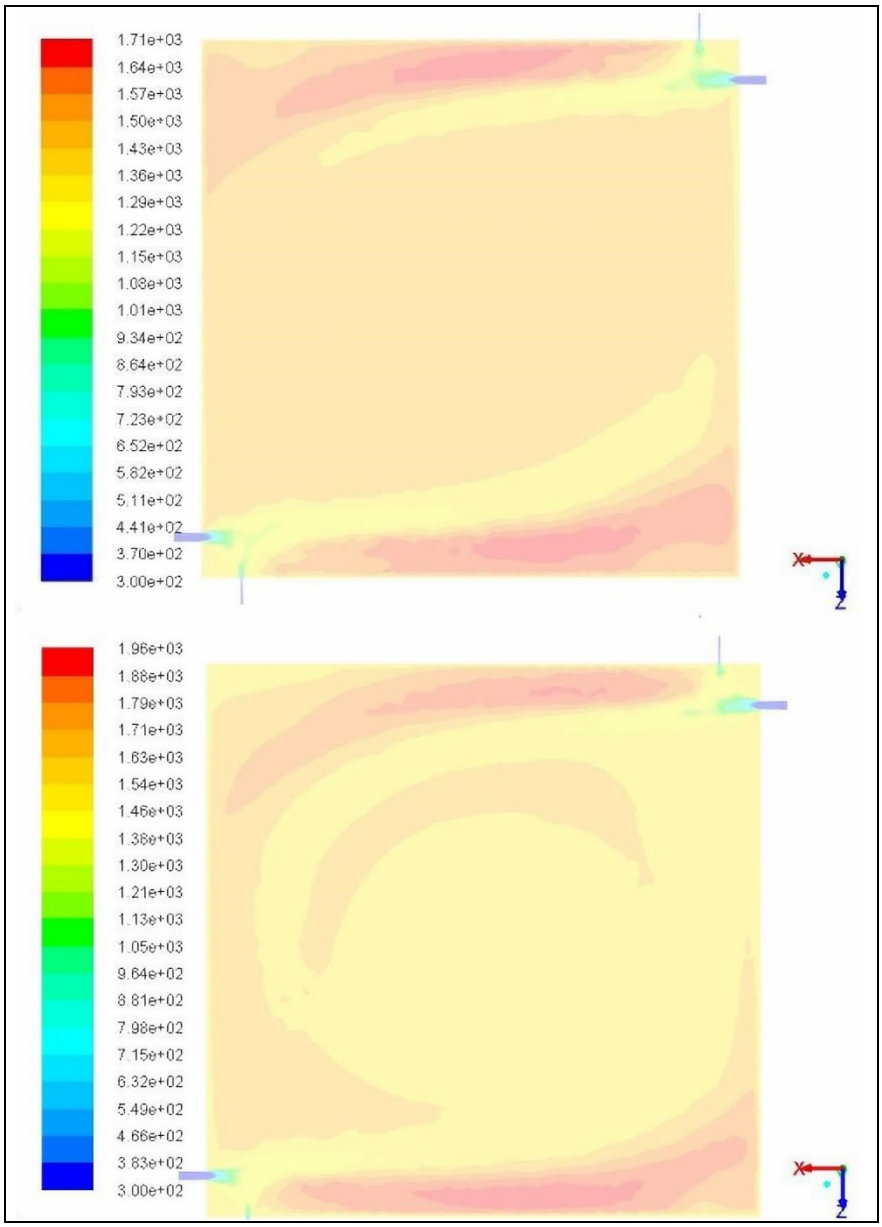



Şekil 5.1. Sıcaklık dağılımı (oksijen konsantrasyonları: %15 (üst) ve %21 (alt))

Şekil 5.1., oksijen konsantrasyonunun paralel akışlı yakıcıdaki sıcaklık alanı üzerindeki etkisini göstermektedir. Maksimum sıcaklık seviyesi, %21 oksijen konsantrasyonunda yaklaşık 2040 K olarak tahmin edilmiştir. Ardından, oksitleyiciye $N_2$ seyreltici eklenerek oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu azaldıkça tahmin edilen maksimum sıcaklık değerleri azalmıştır. %15'lik oksijen konsantrasyonunda tahmin edilen maksimum sıcaklık değeri 1790 K'dir. Sıcaklık dağılımlarına gelince, oksitleyicideki oksijen konsantrasyonunun azalmasıyla yakıcıda yüksek sıcaklık bölgelerinin yer değiştirdiği söylenebilir. Bunun nedeni, daha yüksek akış hızı ve daha düşük oksijen konsantrasyonlarında yavaşlayan reaksiyon hızıdır. Bununla birlikte, siklonik yakıcı için, yakıcı içinde biraz daha düzgün bir termal alan elde edilse bile, CDC koşulları sıcaklık alanlarını önemli ölçüde değiştirmedi. %15'lik bir oksijen konsantrasyonundan sonra, tahmin edilen $NO_x$ değerleri 1 ppm'nin altına düştüğü için modellemeye devam edilmemiştir, bu da CDC'nin elde edildiğini gösterir. Paralel akışlı yakıcının merkez hattı boyunca çeşitli oksijen konsantrasyonlarındaki sıcaklık profilleri Şekil 5.2. 'de gösterilmektedir. Şekil 5-2'ye bakıldığında, ilk sonuç, oksijen konsantrasyonu azaldıkça sıcaklık seviyelerinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Buradaki diğer önemli sonuç, CDC altında daha düzgün bir termal alan elde edilmesidir. Özellikle duvarlara yakın ve yakıcı merkezindeki değerler arasındaki sıcaklık farklarının çok fazla olmadığı sonucuna varılmıştır. Şekil 5.2'den anlaşılacağı gibi örneğin %15 oksijen konsantrasyonunda duvar ve merkez sıcaklıkları arasında yaklaşık 20-25 K fark vardır. Dolayısıyla daha homojen bir termal alan ile CDC'nin başarıldığı söylenebilir.



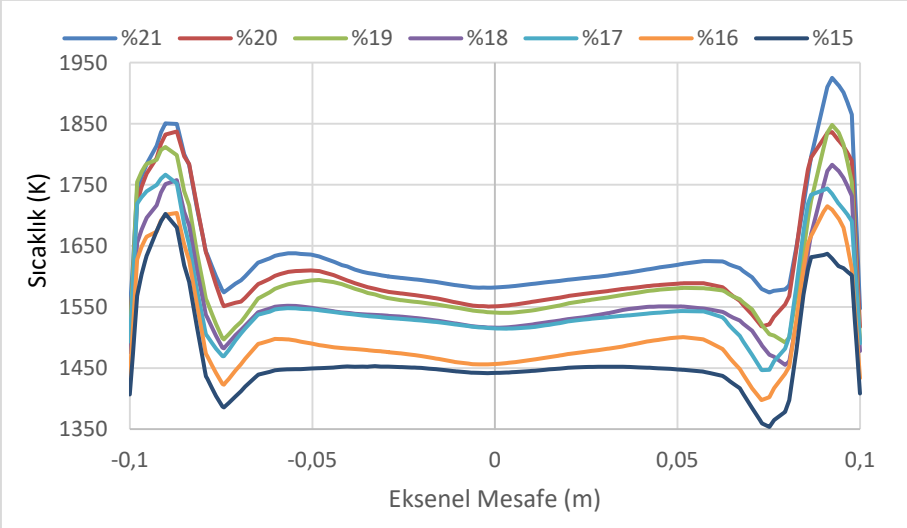

Şekil 5.2. Farklı oksijen konsantrasyonlarında paralel akışlı yakıcılarda sıcaklık dağılımı




Şekil 5.3. Farklı oksijen konsantrasyonlarında çapraz akışlı yakıcıda sıcaklık dağılımı

Şekil 5.3. çapraz akışlı yakıcıda oksijen konsantrasyonunun sıcaklık alanı üzerindeki etkisini göstermektedir. Maksimum sıcaklık seviyesi, %21 oksijen konsantrasyonunda 1960 K civarında tahmin edilmiştir. Ardından, oksitleyiciye $N_2$ seyreltici eklenerek oksijen konsantrasyonu azaldıkça tahmin edilen maksimum sıcaklık değerleri de azaldı. %15'lik bir oksijen konsantrasyonunda tahmin edilen maksimum sıcaklık değeri 1710 K'dir. Çapraz akışlı yakıcıda tahmin edilen maksimum sıcaklık seviyeleri, paralel akışlı yakıcılarla karşılaştırıldığında, maksimum sıcaklık seviyesinin çapraz akışlı yakıcıda daha yüksek olduğu söylenebilir. Bunun nedeni alevde daha fazla yakıt-oksitleyici karışımının elde edilebilmesi olabilir. Ayrıca en yüksek

ve en düşük sıcaklık değerleri arasındaki farkın paralel akışlı yakıcıda tahminlere göre düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

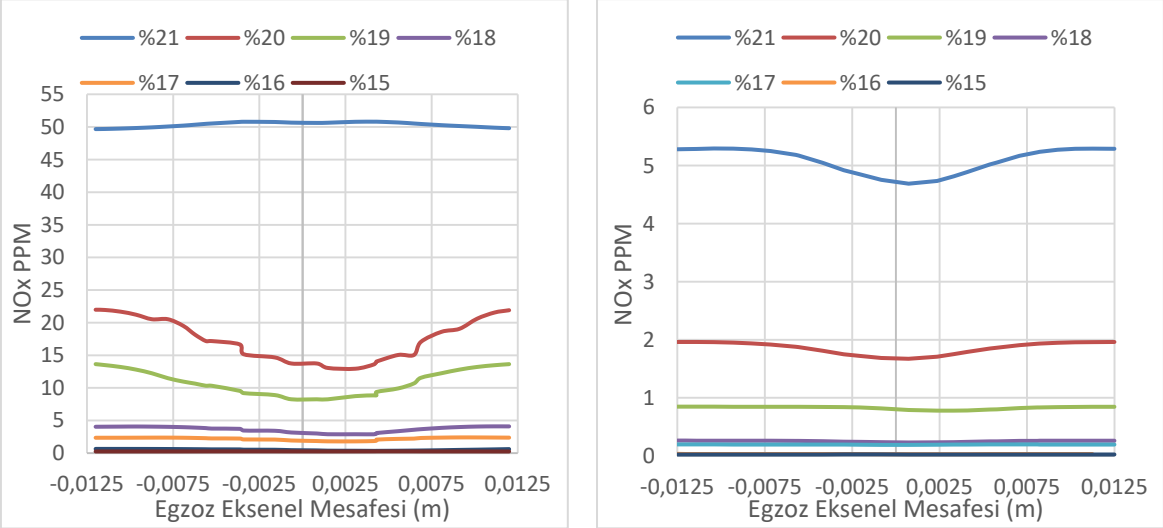



Şekil 5.4. Farklı oksijen konsantrasyonlarında çapraz akışlı yakıcıda sıcaklık dağılımı

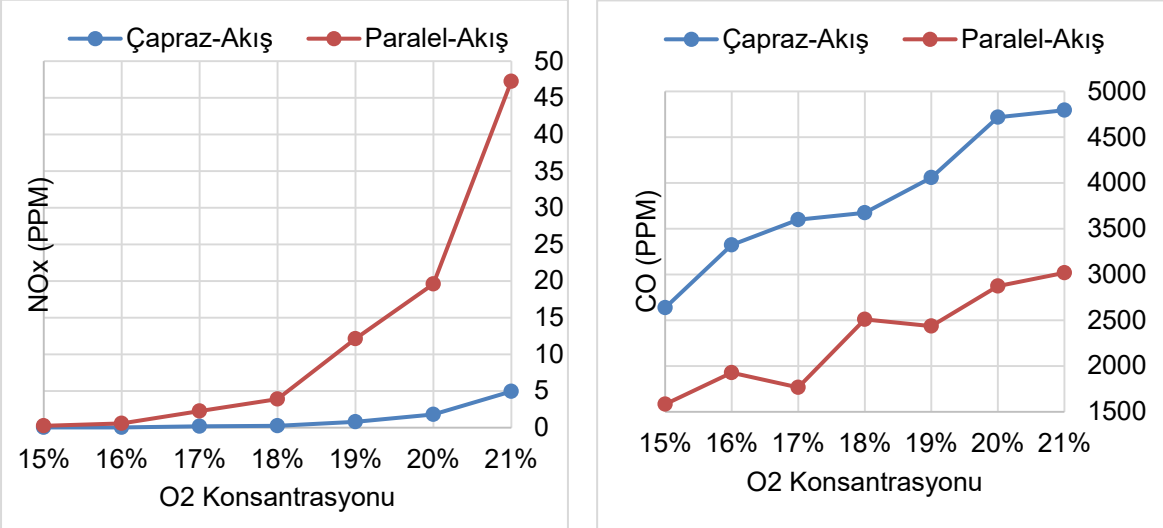
Çapraz akışlı yakıcının merkez hattı boyunca çeşitli oksijen konsantrasyonlarındaki sıcaklık profilleri Şekil 5.4.'de gösterilmektedir. Tıpkı paralel akışlı yakıcılarda olduğu gibi çapraz akışlı yakıcıda de oksijen konsantrasyonu azaldıkça sıcaklık seviyeleri kademeli olarak azaldı. Ancak öngörülen profillerden paralel akışlı yakıcıya kıyasla daha az termal alan homojenliği ortaya çıktığı görülmektedir. Özellikle duvarların yakınında tahmin edilen sıcaklık değerleri, yakıcının merkezi etrafındakilerden çok daha fazladır (her koşul için 300-350 K'ye kadar sıcaklık farkı vardır). Bu sonucun ana nedenlerinden birisi, oksitleyici akış yönünün, çapraz akış sayesinde yakıt akış akışını sağ taraf yerine yakıcının karşı tarafına doğru sürüklemesidir. Ayrıca, çapraz akış sayesinde oksitleyici akışını doğrudan yakıt ile buluşmasıdır.

CDC'ye geçişi daha iyi anlamak için, azaltılmış oksijen konsantrasyonunun $NO_X$ ve CO gibi kirletici emisyonlar üzerindeki etkisi burada sunulmaktadır. Paralel akış ve çapraz akışlı yakıcı çıkışlarının çapı boyunca farklı oksijen konsantrasyonlarındaki NOx profilleri sırasıyla Şekil 5.5. ‘de gösterilmektedir. Ayrıca yakıcı çıkışında tahmin edilen ortalama $NO_X$ ve CO seviyeleri Şekil 5.6.'da verilmiştir. Şekil 5.5'e göre oksijen konsantrasyonunun düşürülmesinin tahmin edilen $NO_X$ seviyelerini önemli ölçüde etkilediği söylenebilir. Bu şekilden, oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu azaldıkça tahmin edilen $NO_X$ seviyelerinin büyük ölçüde azaldığı görülebilir. Öyle ki, %15'lik bir oksijen konsantrasyonunda, tahmin edilen $NO_X$ değeri yaklaşık 0,2 ppm'dir,

bu da CDC'ye ultra düşük $NO_X$ seviyesi açısından ulaşıldığını gösterir. Bu, yavaşlatılmış reaksiyon hızı ile termal $NO_X$'un baskılanmasıyla ilişkilendirilebilir. [6-9] çalışmalarda benzer sonuçlar bildirilmiştir.



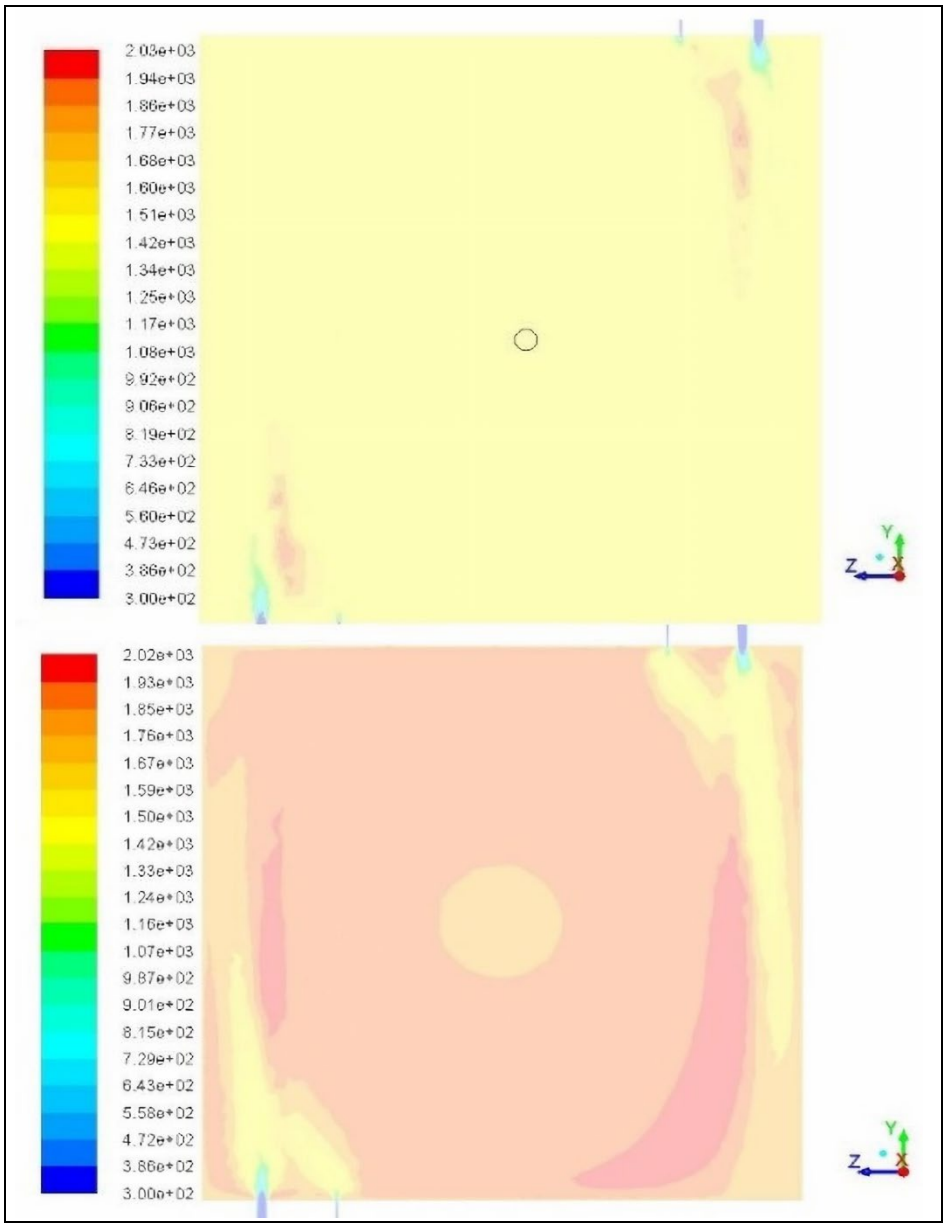

Şekil 5.5. $NO_X$ emisyon profilleri (paralel-akışlı (Sol), çapraz-akışlı (Sağ))




Şekil 5.6. NOx ve CO emisyonları (paralel-akışlı, çapraz-akışlı)

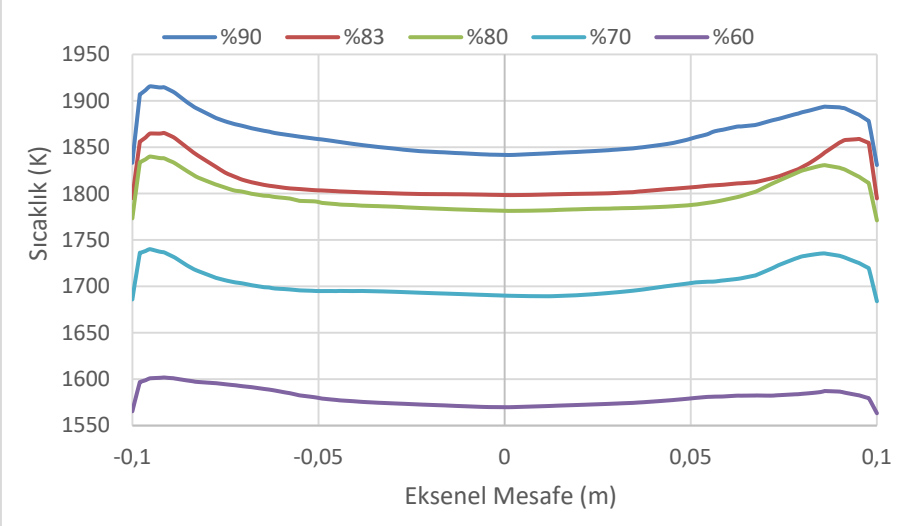
## 5.2. %100 Metan için Paralel Akışlı Yakıcılarda Eşdeğerlik Oranının Sıcaklık Dağılımlarına ve Kirletici Emisyon Değerlerine Olan Etkisinin İncelenmesi

Eşdeğerlik oranındaki değişim sonucundaki sıcaklık dağılımları burada sunulmaktadır. Bu amaçla %90 ve %60 eşdeğerlik oranlarında daha fazla modelleme yapılmış ve bunların sıcaklık alanları Şekil 5.7.'de verilmiştir. Şekilden, maksimum sıcaklık seviyesinin yaklaşık stokiyometrik koşulda (%90'lık bir denklik oranı) ortaya çıktığı söylenebilir. Eşdeğerlik oranı %60'a düşürüldüğünde sıcaklık alanının daha düzgün hale geldiği de görülmektedir. Siklonik yakıcıda daha homojen bir termal alan elde etmek için eşdeğerlik oranını düşürmenin daha etkili olduğu sonucuna varılabilir.



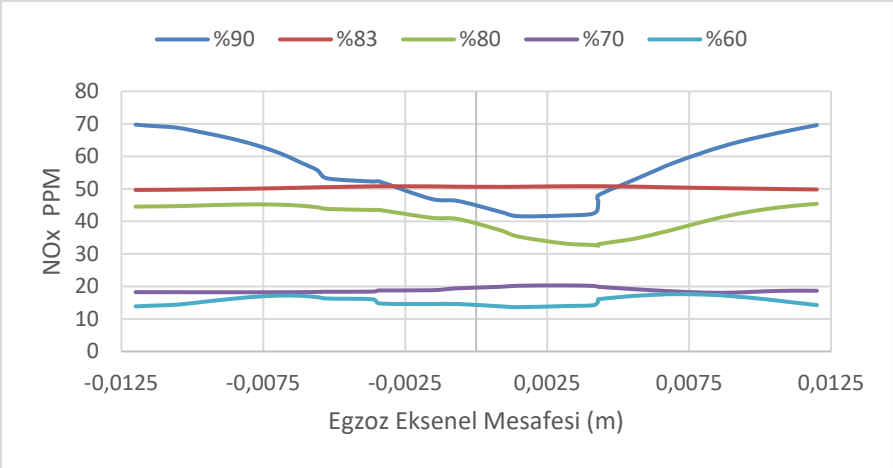

Şekil 5.7. Sıcaklık dağılımı (eşdeğerlik oranları: %60 (üst) ve %90(alt))

Yakıcının merkez hattı boyunca farklı eşdeğerlik oranlarındaki sıcaklık profilleri Şekil 5.8.'da gösterilmiştir. Şekil 5.8.'a göre, eşdeğerlik oranı düşürülerek maksimum sıcaklık değerlerinin düştüğü anlaşılmaktadır. Ayrıca eşdeğerlik oranının düşürülmesi, oksijen konsantrasyonunun azaltılması gibi CDC'ye geçişin sağlanmasına yardımcı olduğundan, duvarlara yakın çevrede ve yakıcı merkezinde okunan değerler arasındaki sıcaklık farklarının daha az olmasına neden olmuştur.




Şekil 5.8. Farklı eşdeğerlik oranlarında paralel akışlı yakıcıda sıckalık profilleri

Tahmin edilen $NO_X$ değerlerinde, eşdeğerlik oranındaki azalmanın etkisi değerlendirildiğinde, eşdeğerlik oranındaki azalmanın $NO_X$ değerlerini azalttığı sonucu açıkca şekil 5.9.'dan anlaşılmaktadır. Ancak ultra düşük $NO_X$ seviyelerine ulaşılamadığı belirtilmelidir. Tahmin edilen $NO_X$ değeri, %60 eşdeğerlik oranında yaklaşık 15 ppm'dir. Bu gözlemler, CDC'ye geçişin başarılmasıyla sonuçlanması için, reaksiyon hızını yavaşlatmak amacıyla oksijen konsantrasyonunun azaltılmasının gerekli olduğunu kanıtlamaktadır.




Şekil 5.9. Farklı eşdeğerlik oranlarında paralel akışlı yakıcıda NOx emisyon profilleri

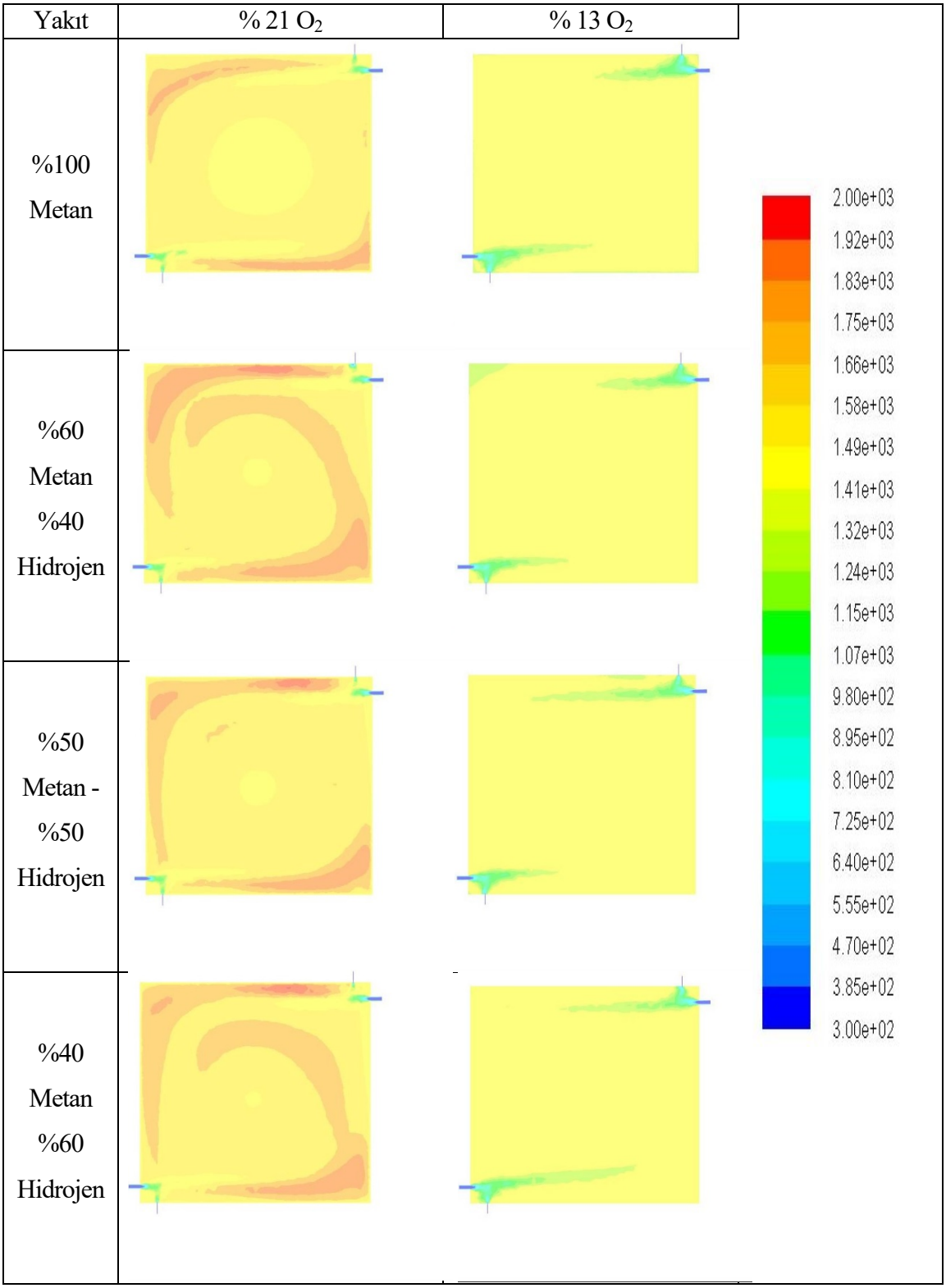
## 5.3. Farklı Oranlarda Hidrojence Zenginleştirilmiş Metanın Yakıt Olarak Kullanımının İncelenmesi

300 K ve 600 K tüm oksijen konsantrasyonlarında, tüm yakıtlar için $N_2$ veya $CO_2$ seyreltici ile sıcaklık konturları ve eksenel sıcaklık profilleri burada sunumultur. Yakıtları, oksijen konsantrasyonlarını, giriş sıcaklıklarını ve seyrelticilerin termal alan üzerindeki etkisini netleştirmek için sonuçlar farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Örneğin Şekil 5.10. tüm yakıtlar için 300 K'de $N_2$ seyreltme ile sıcaklık konturlarını verir. Şekil 5.10.'a göre, ilk olarak, oksijen içeriğindeki azalmanın, yakıcı içinde tahmin edilen termal alanı önemli ölçüde değiştirdiği söylenebilir. Yani bazı belirli bölgelerde maksimum sıcaklık seviyesi %21 $O_2$ konsantrasyonunda 2000 K civarında olmuştur. Tersine, %13 $O_2$ konsantrasyonunda giriş bölgeleri dışında termal alan daha düzgün hale geldi. Böylece, yanma odası içindeki termal alan açısından CDC koşullarının sağlandığı sonucuna varılmıştır. Yakıttaki hidrojen konsantrasyonunun artmasıyla konturlarda görülen termal alanlar daha kırmızı bölgelerle görülmüştür, bu da alev sıcaklığının arttığını gösterir. Bu durum, kütle başına daha yüksek hidrojen ısıtma değeri ile ilişkilendirilebilir. Yakıt içersindeki molar bazlı hidrojen miktarının artmasıyla, metana nazaran daha düşük yoğunluklu hidrojenin kapladığı alan artmıştır. Böylece, yakıt giriş hızları artmıştır. Ancak diğer taraftan yakıttaki hidrojenin artmasıyla alev konumu girişlere doğru yakşlaşmaya başlamıştır. Bu durum hidrojenin tutuşabilirliğinin metana göre daha yüksek olması nedeniyle yorumlanabilir [76].

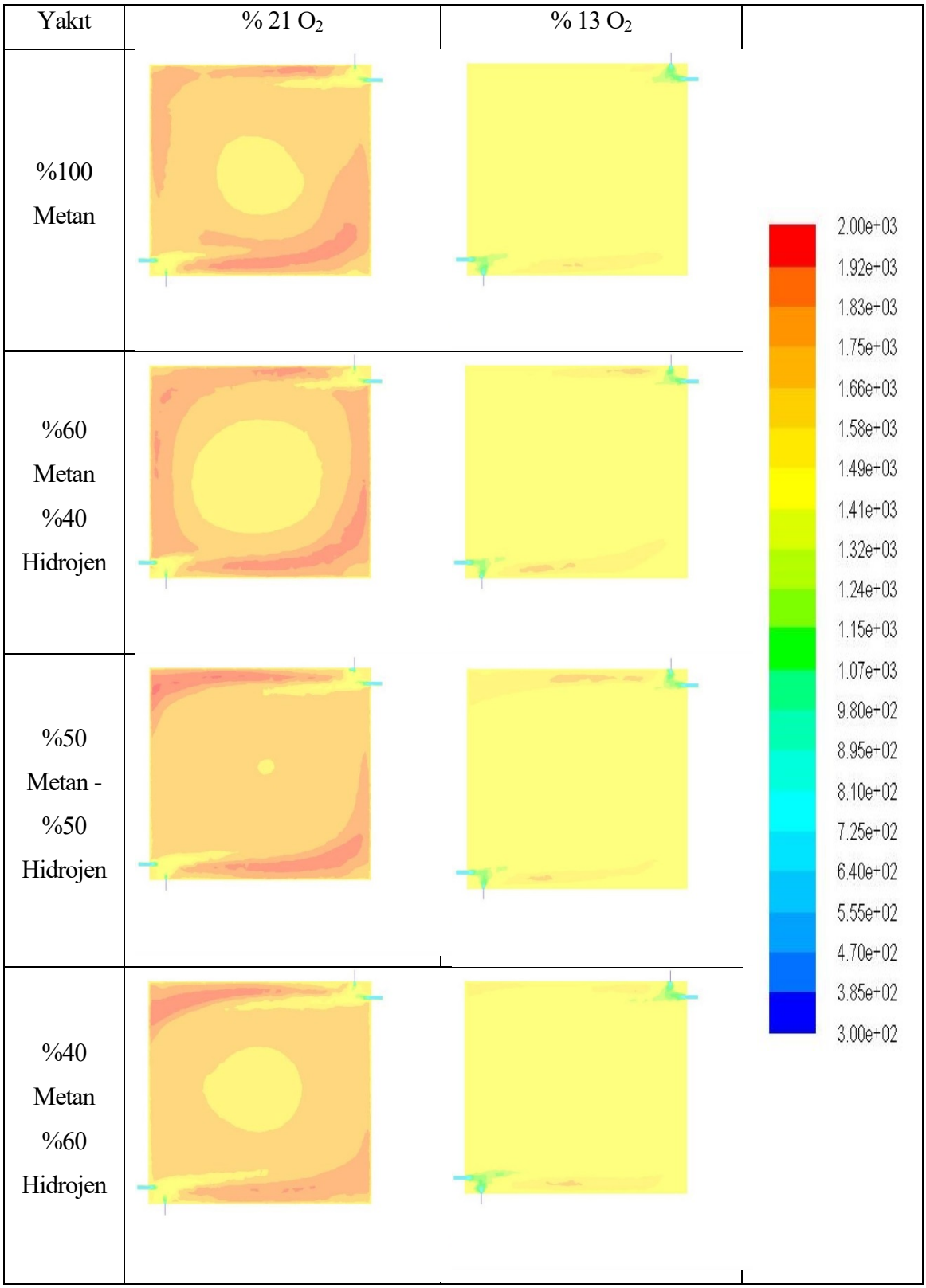
Şekil 5.11. baca gazı resirkülasyonunu simüle etmek için tüm yakıtlar 600 K'de $N_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları verilmektedir. Şekil 5.11.'e göre, geleneksel koşullar altında giriş

sıcaklığındaki artışla maksimum sıcaklık seviyesi bölgelerindeki sıcaklık aralıkları yükseldi. Bu beklenen bir sonuç olmakla birlikte, %13 $O_2$'de dikkat çekici sonuçlar ortaya çıktı. %13 $O_2$ konsantrasyonunda, 600 K'lik oksitleyici giriş sıcaklığı ile neredeyse tamamen homojen bir termal alan elde edildi. CDC koşulları altında da benzer sonuç elde edilir [29]. Bunun nedeni, daha yüksek giriş sıcaklığının daha yüksek alev hızına yol açması olabilir.

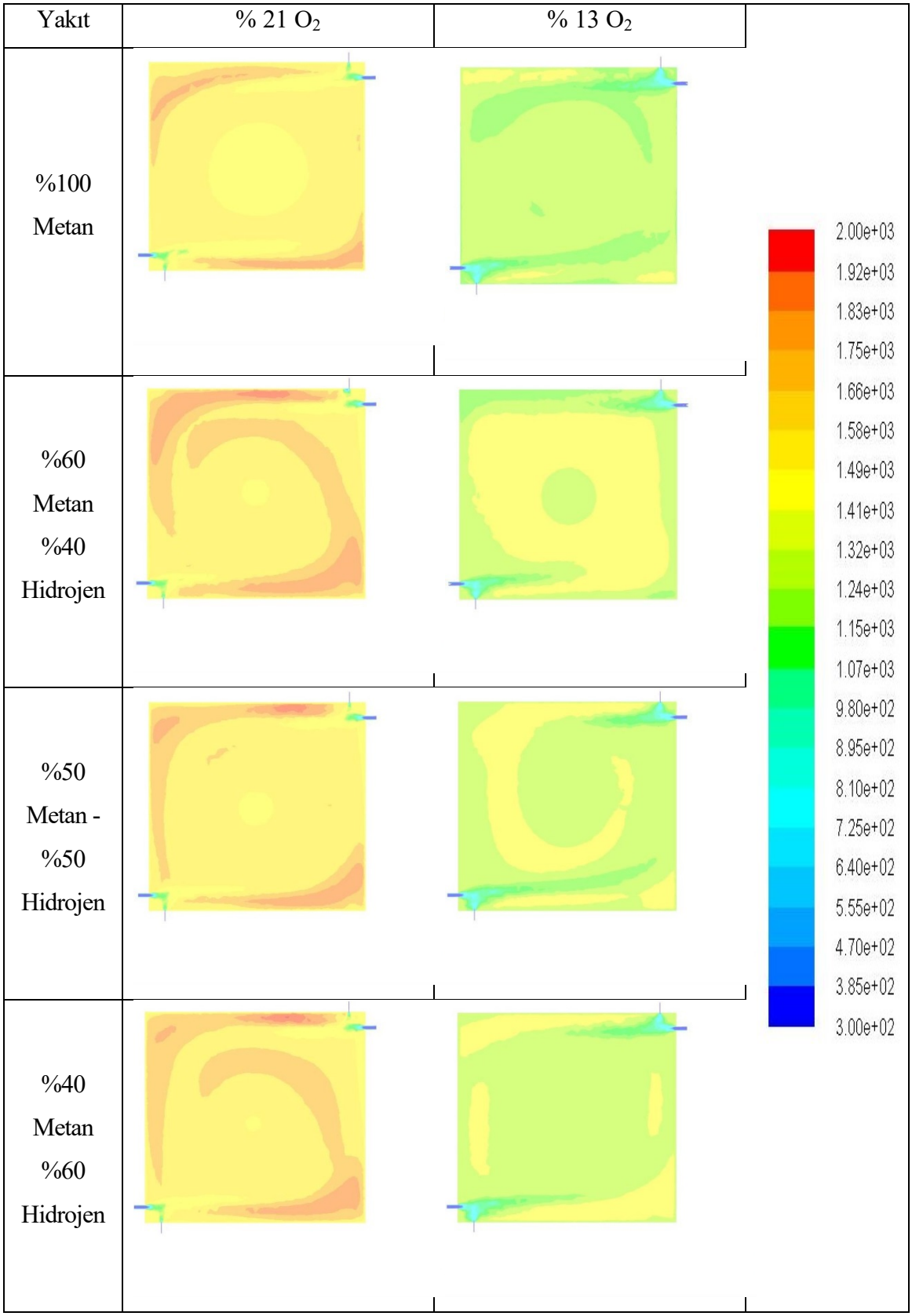
Şimdiye kadar $N_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları tartışıldı. $CO_2$ seyreltmeleriyle ilgili termal alan sonuçları Şekil 5.12. ve Şekil 5-13.'de tartışılmaktadır. $CO_2$ seyreltici ile %13 $O_2$ konsantrasyonlarında, tüm yakıcıdaki sıcaklık seviyelerinin daha düşük olduğu söylenebilir. Bu sonuç, $CO_2$'in $N_2$'ye kıyasla daha yüksek ısı kapasitesine sahip olmasıyla açıklanabilir. Benzer sonuçlar, girdap stabilize edilmiş bir yakıcıda incelenmiştir [15, 17].



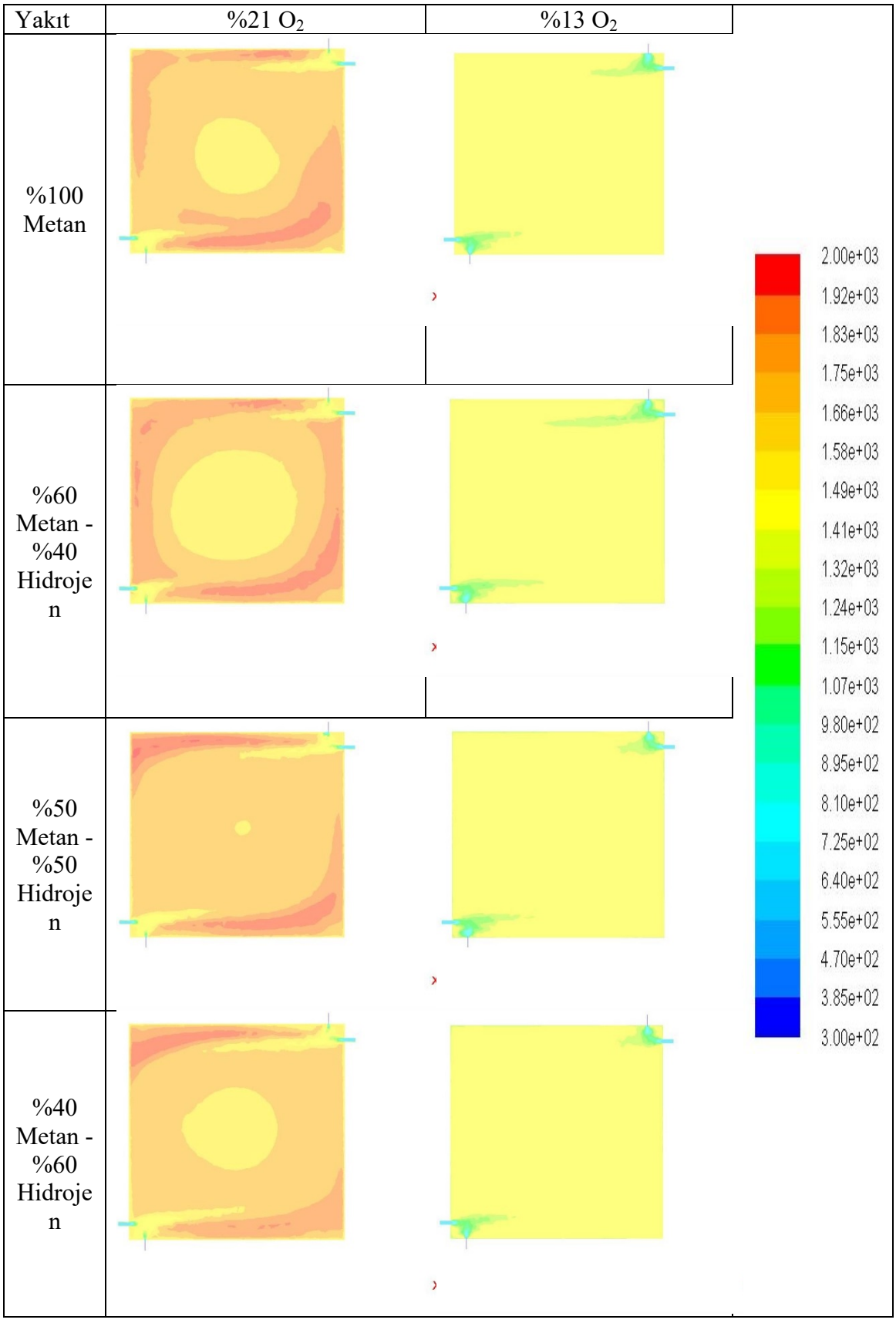

Şekil 5.10. 300 K'de $N_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları




Şekil 5.11. 600 K'de $N_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları

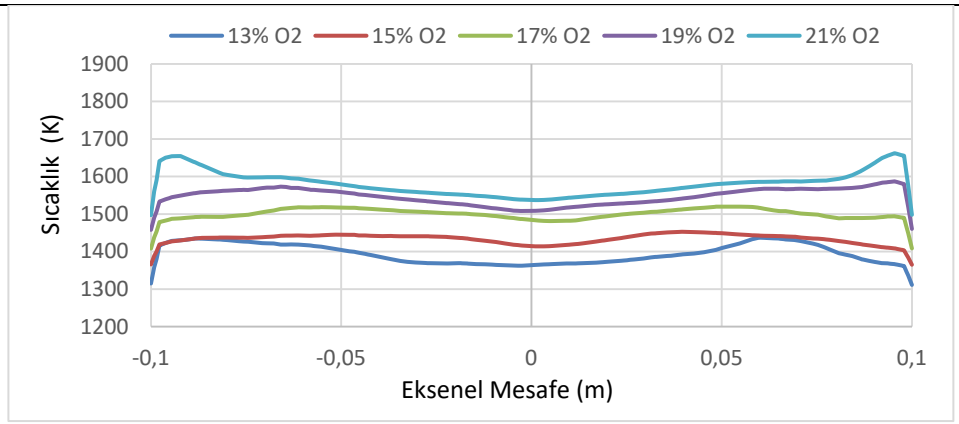
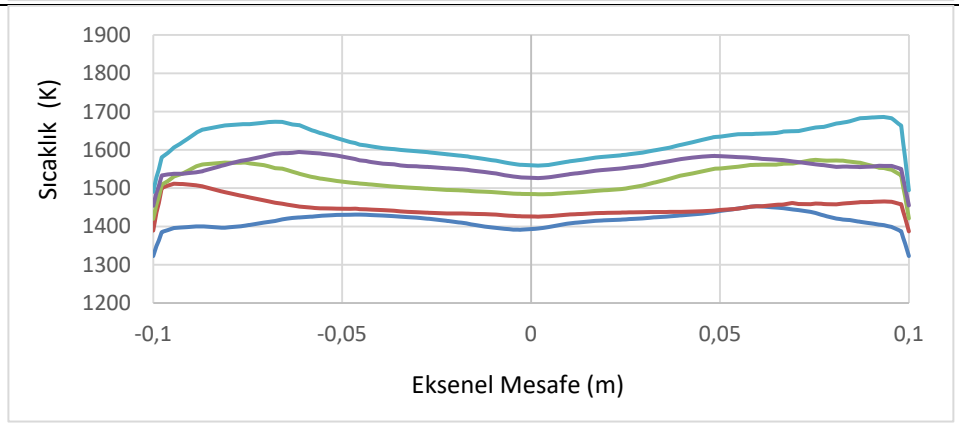
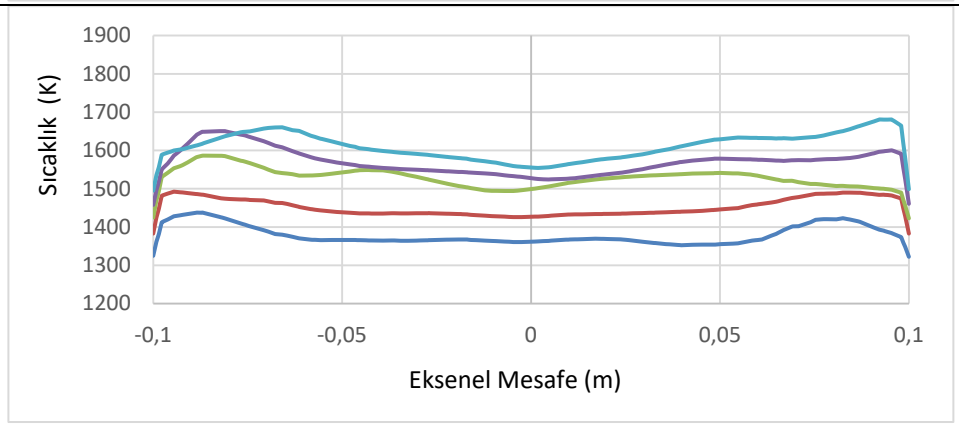
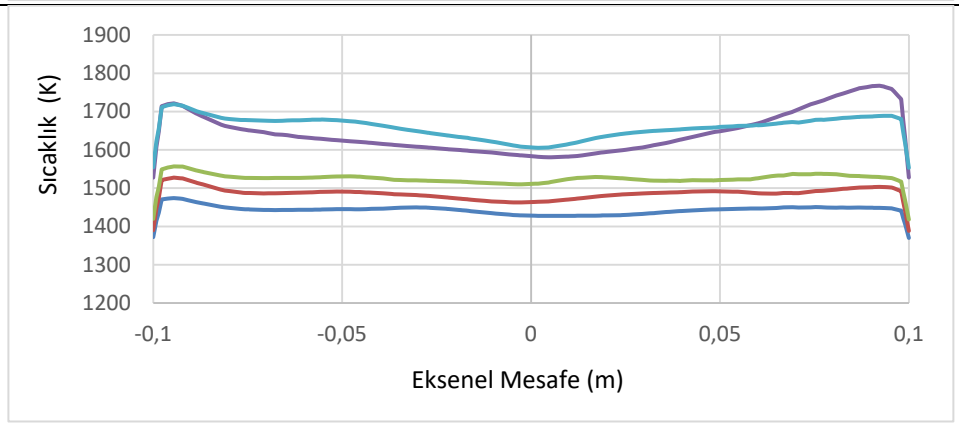



Şekil 5.12. 300 K'de $CO_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları



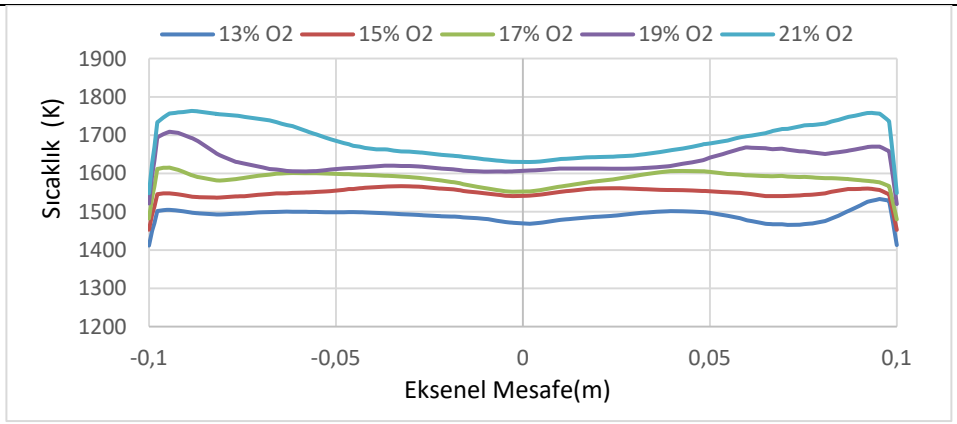
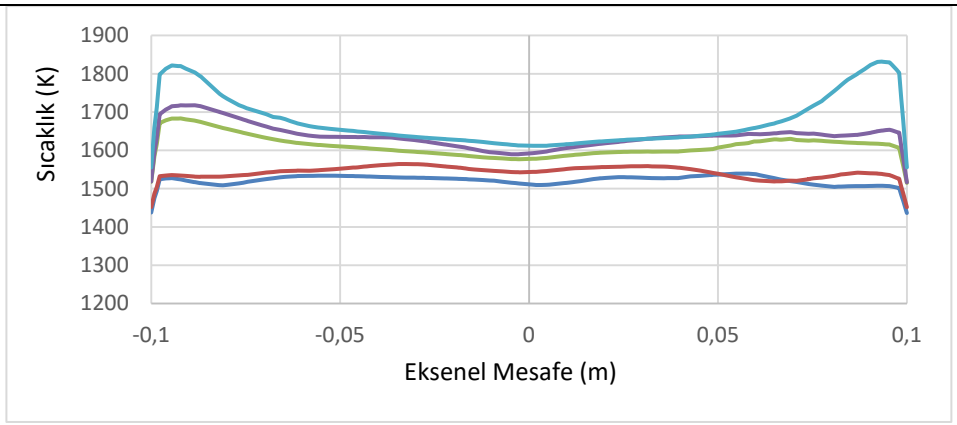
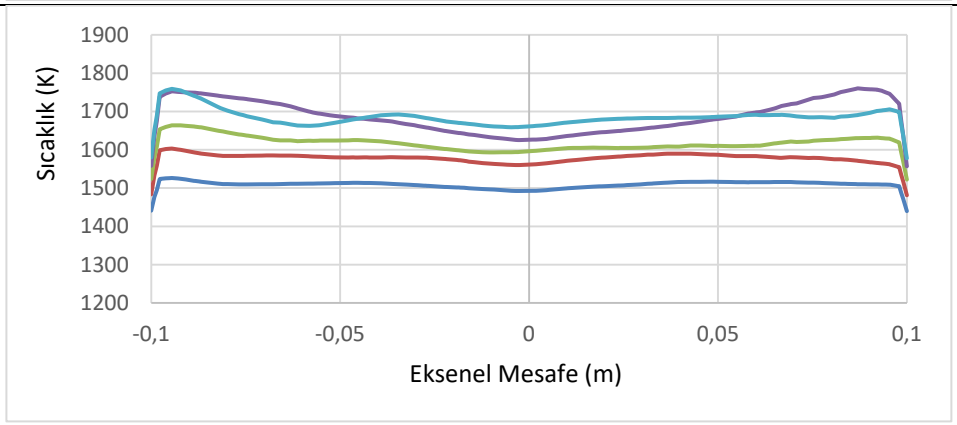
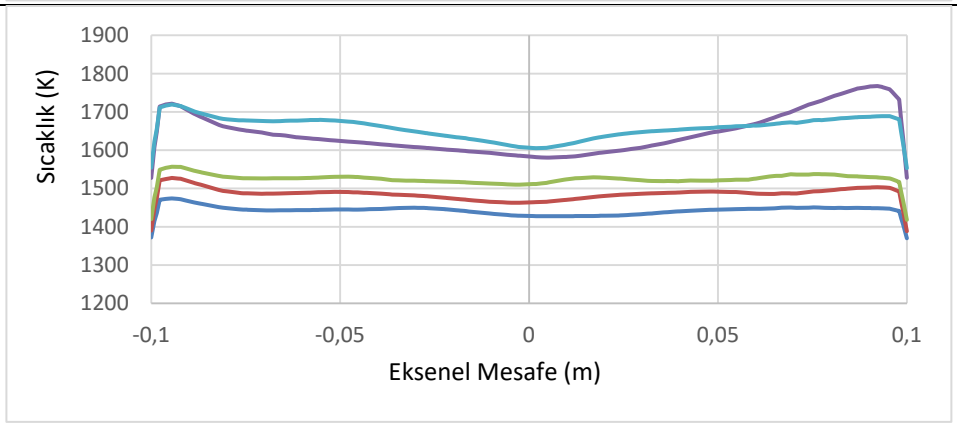

Şekil 5.13. 600 K'de $CO_2$ seyreltme ile sıcaklık konturları

Yakıtların, giriş sıcaklıklarının ve CDC'ye geçişin termal alan üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için sıcaklık profilleri detaylı olarak tartışılabilir. Bu amaçla öngörülen eksenel sıcaklık profilleri Şekil 5.14., Şekil 5.15., Şekil 5.16. ve Şekil 5.17.'de sunulmuştur. Şekil 5.14., 300 K'de N2 seyreltme ile eksenel sıcaklık profillerini göstermektedir. Oksitleyici içerisindeki oksijen konsantrasyonundaki azalma, sıcaklık seviyelerinde önemli bir düşüşe yol açar. %21 $O_2$'de yaklaşık 1650 K olan maksimum sıcaklık seviyesi, %13 $O_2$'de yaklaşık 1400 K'e düşmüştür. Ayrıca oksijen konsantrasyonunun azalmasıyla sıcaklık profillerinin düzleşmeye başladığı söylenebilir. Daha yüksek sıcaklık seviyelerine sahip hidrojen içeren yakıtlar için de benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, tüm yakıtlar için %13 $O_2$'de, sıcaklık seviyeleri hemen hemen aynıydı, bu da bize hidrojenle zenginleştirmenin azaltılmış oksijen konsantrasyonlarıyla birlikte yapılabileceğini açıklıyor. $N_2$ seyreltme ile daha yüksek giriş sıcaklığı etkilerinin değerlendirilmesine gelince (Şekil 5.15.'da), çalışılan tüm durumlar için ilk olarak öngörülen sıcaklık seviyelerinin yükseldiği görülmektedir. %13 $O_2$ konsantrasyonlarında, tüm yakıtlar için sıcaklık seviyeleri yaklaşık 1500 K olarak tahmin edilmiştir. Bu değer, daha yüksek hidrojen içerenlerde bile 300 K'de elde edilen değerlerden çok uzak değildir. Buradan, CDC koşulları aranırken, gerçek yanma proseslerinde baca gazı sıcaklıklarını simüle eden daha yüksek oksitleyici karışım sıcaklıklarında, termal alan üzerindeki hidrojen zenginleştirme etkisinin kontrol edilebileceği sonucuna varılabilir. Termal alanda $CO_2$ seyreltme etkisi söz konusu olduğunda. Şekil 5.16. ve Şekil 5.17.'den, oksitleyicide oksijen konsantrasyonu düşürüldüğü sürece tüm yakıtlar için daha düşük sıcaklık seviyelerine ulaşıldığı kesinlikle söylenebilir. Bunun nedeni, $CO_2$'nin $N_2$'ye kıyasla daha yüksek ısı tutma kapasitesine sahip olmasıdır. Burada böyle bir karbon yakalama ve depolama teknolojisinin (CCD), $CO_2$ elde edilmesini sağlayabileceği ve daha sonra dağıtılmış rejim elde etmek için yakma sistemlerinde daha etkili bir seyreltici olarak kullanılabileceği önerilebilir.

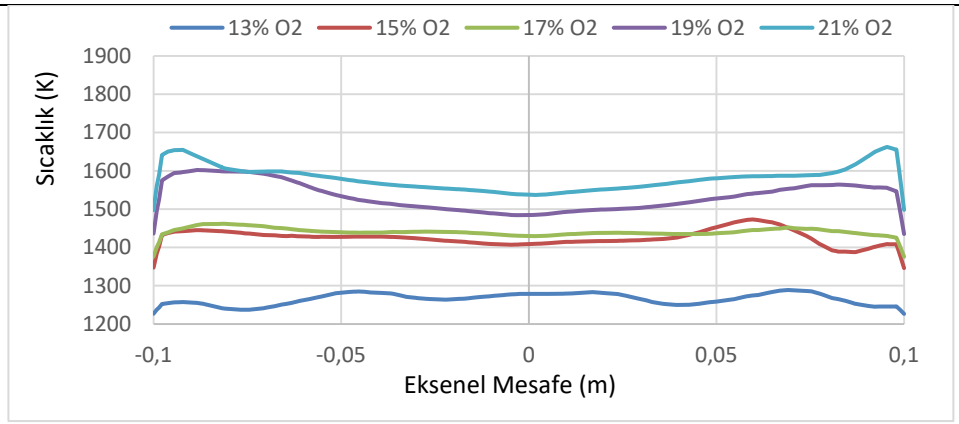
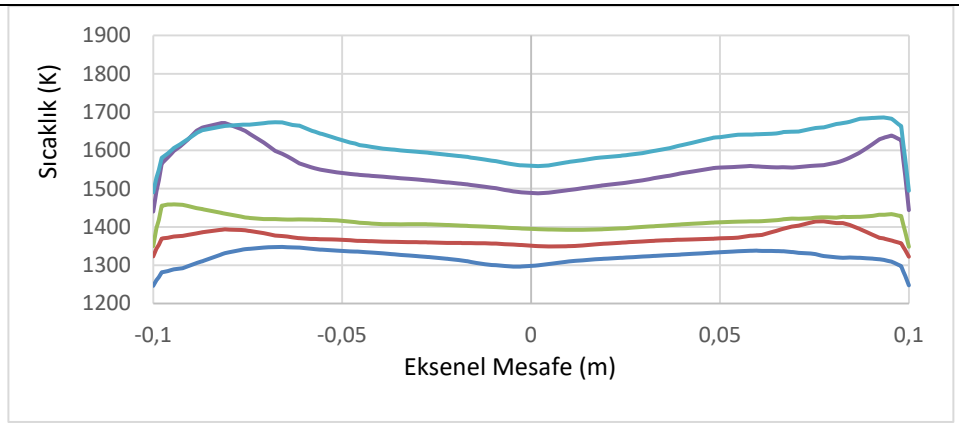
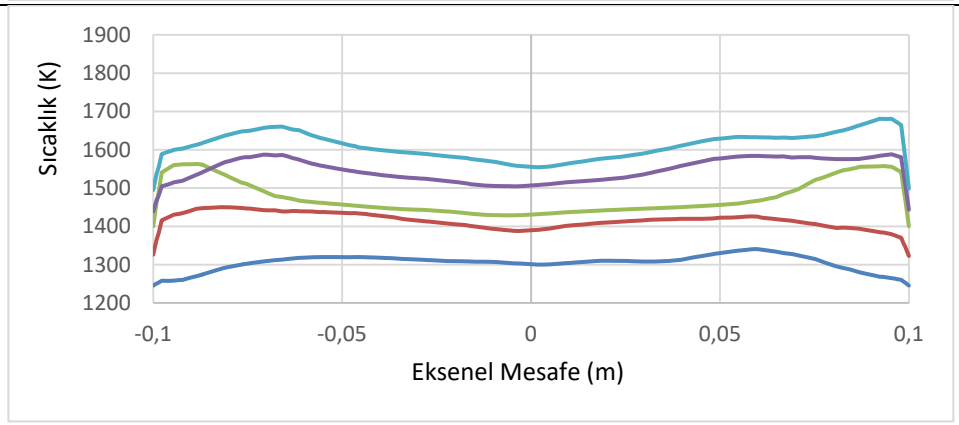
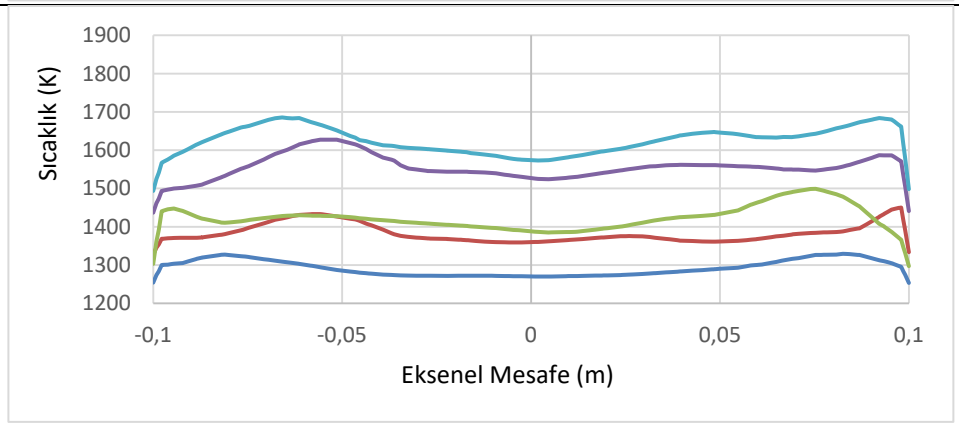
| | |
|---|---|
| %100 Metan |  |
| %60 Metan - %40 Hidrojen |  |
| %50 Metan - %50 Hidrojen |  |
| %40 Metan - %60 Hidrojen |  |



Şekil 5.14. 300 K'de $N_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri

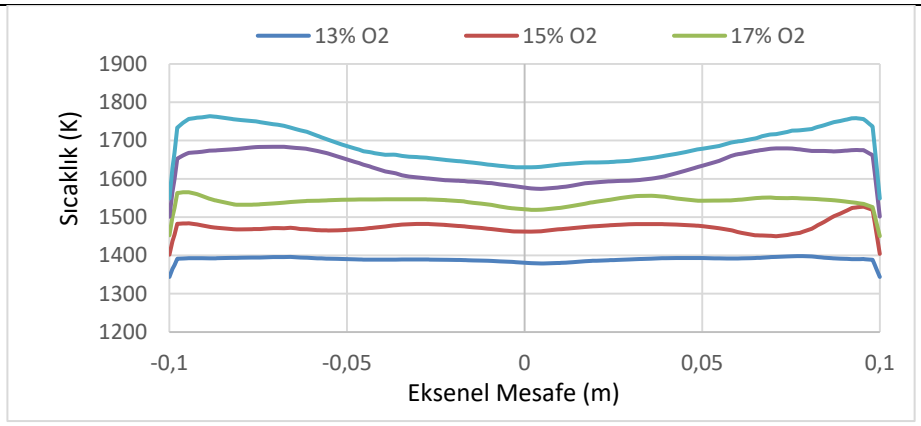
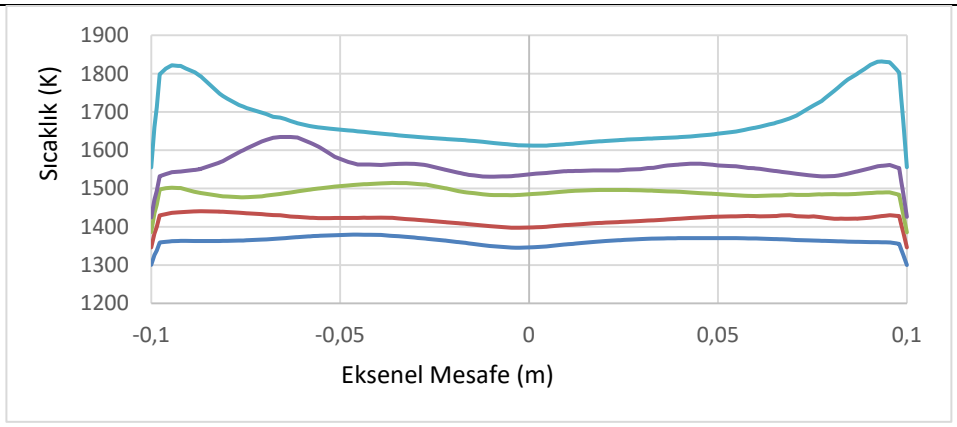
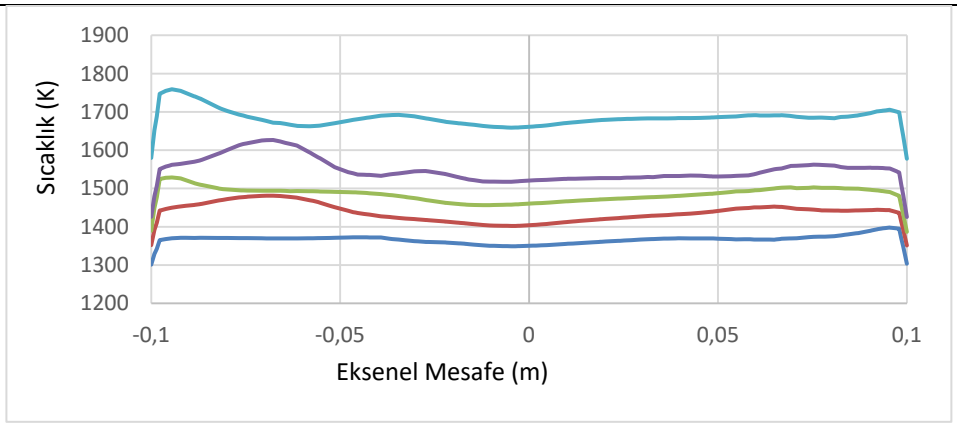
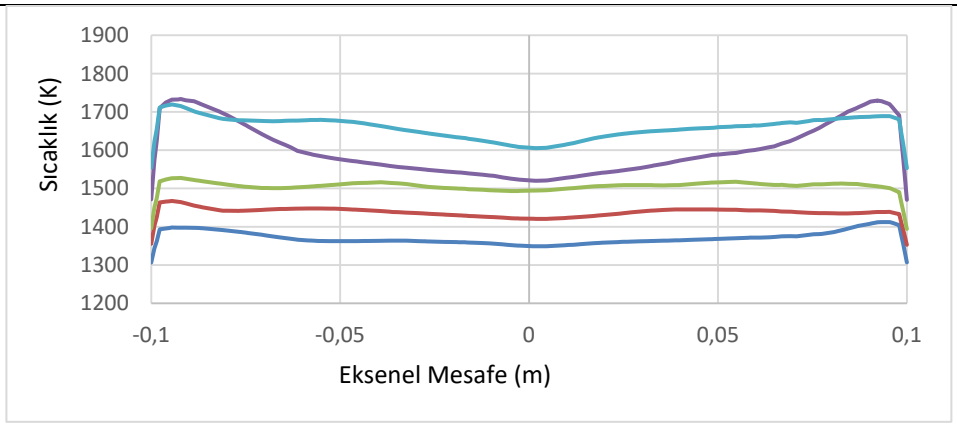
| | |
|---|---|
| %100 Metan |  |
| %60 Metan - %40 Hidrojen |  |
| %50 Metan - %50 Hidrojen |  |
| %40 Metan - %60 Hidrojen |  |

Şekil 5.15. 600 K'de $N_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri

| | |
|---|---|
| %100 Metan |  |
| %60 Metan - %40 Hidrojen |  |
| %50 Metan - %50 Hidrojen |  |
| %40 Metan - %60 Hidrojen |  |



Şekil 5.16. 300 K'de $CO_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri

| | |
|---|---|
| %100 Metan |  |
| %60 Metan - %40 Hidrojen |  |
| %50 Metan - %50 Hidrojen |  |
| %40 Metan - %60 Hidrojen |  |

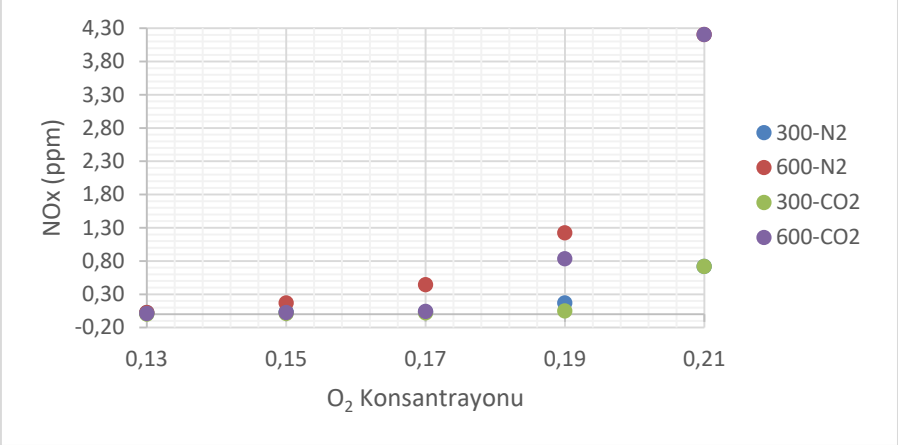
Şekil 5.17. 600 K'de $CO_2$ seyreltme ile eksenel sıcaklık profilleri

Kirletici emisyonlar yakma çalışmalarında çok önemli parametrelerdir. Çevresel sınırlamalar nedeniyle mümkün olduğunca düşük olmalıdırlar. CDC'nin bu nedenle umut verici bir yöntem olduğu daha önce belirtilmişti. Bu nedenle, bu çalışmanın bu bölümünde, $NO_X$ ve CO kirletici emisyon sonuçları ayrıntılı olarak sunulmuş ve tartışılmıştır. Örneğin Çizelge 5.1., %100 $CH_4$ yakıtı için çıkışta tahmin edilen $NO_X$ emisyonlarını verir. Konvansiyonel koşullar altında, çıkışta NOx seviyesi yaklaşık 4 ppm olarak tahmin edilmiştir. Daha sonra, CDC koşullarına ulaşmak için oksijen konsantrasyonunda azalma yapıldı. Öngörülen $NO_X$ seviyelerinin 1 ppm'nin önemli ölçüde altına düştüğünü söyleyebiliriz ki bu, oksijen konsantrasyonundaki azalma ile ultra düşük $NO_X$ hedefi için oldukça elverişlidir. Bu azalma Şekil 5.18 'de de görülmektedir. Oksitleyici giriş sıcaklığının $NO_X$ üzerindeki etkilerine gelince, termal $NO_X$ mekanizması nedeniyle %100 $CH_4$ yakıtı için tüm $NO_X$ seviyelerinde hafif bir artış olduğu kesinlikle söylenmektedir. $N_2$ ve $CO_2$ seyrelticiler $NO_X$ indirgeme etkinliği açısından karşılaştırıldığında $CO_2$'nin $NO_X$'u azaltmada daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun iki nedeni olabilir. Birincisi, $N_2$ girişi, yanma odası içinde $NO_X$ kaynağı olarak daha fazla $N_2$'ye yol açabilir ve ikincisi, $CO_2$'nin $N_2$'ye kıyasla daha yüksek ısı kapasitesine sahip olmasıyla ilgili olabilir. Bu sonuca aynı zamanda termal alanın incelenmesinde de varılmıştır.

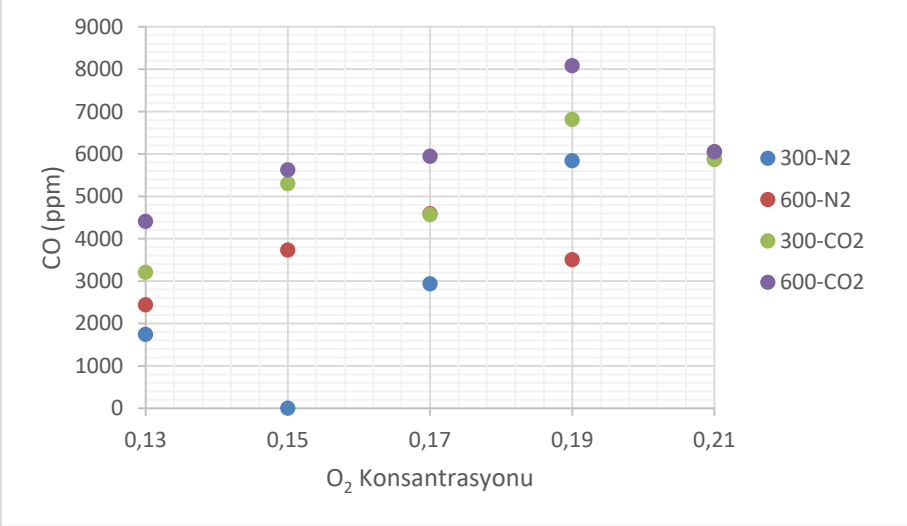
CO emisyonlarının incelenmesi söz konusu olduğunda, %100 $CH_4$ yakıtı için yanma odası çıkışında tahmin edilen CO seviyelerini veren iki Çizelge 5.2. ve Şekil 5.19. vardır. Sonuçlar, $N_2$ veya $CO_2$ seyreltme ile CO emisyonlarında makul düşüşlere yol açtığı görülmüştür. Dolayısıyla, $CO_2$'nin $NO_X$ kirleticilerini azaltmak için daha etkili olmasına rağmen, tahmin edilen CO seviyelerinin daha yüksek olduğu söylenebilir. Yakıcıda $CO_2$ ayrışması olabileceği düşünülmektedir. Daha yüksek giriş sıcaklıklarına geçişte, CO seviyelerine göre değerlendirildiğinde $CO_2$ ve $N_2$ seyreltme ile sırasıyla %17 $O_2$ ve %15 $O_2$'de CDC koşullarına geçiş gözlemlendi. Daha sonra bu değerler yeniden büyük ölçüde yükseldi. Bunun nedeni, muhtemelen zayıf tutuşabilirlik sınırlarına yakın olmalarıdır. Ayrıca, kalma süresi de gereğinden fazla yüksektir.

Şekil 5.20., Şekil 5.21., Şekil 5.22., Şekil 5.23., Şekil 5.24. ve Şekil 5.25.'de 300 K ve 600 K oksitleyici sıcaklıklarında %60 $CH_4$ - %40 $H_2$, %50 $CH_4$ - %50 $H_2$, %40 $CH_4$ - %60 $H_2$ karışım yakıtları için çıkışta tahmin edilen CO ve NO grafikleri gösterilmiştir. Çalışılan tüm durumların karşılaştırılmasıyla hidrojenle zenginleştirmenin $NO_X$ emisyonlarında artışa yol açtığı söylenebilir. Bu, kütle başına daha yüksek ısıl değer nedeniyle daha yüksek sıcaklık bölgelerine bağlanabilir. Ayrıca, CDC koşullarına geçişle birlikte ultra

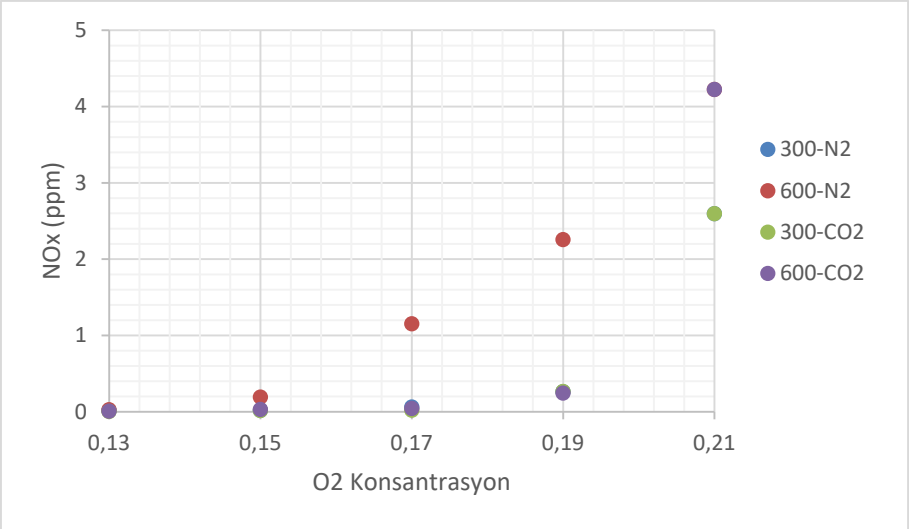
düşük $NO_X$ seviyelerine ulaşıldı. Oksitleyici giriş sıcaklığının $NO_X$ emisyonları üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, daha yüksek giriş sıcaklığının daha yüksek $NO_X$ seviyelerine yol açtığı sonucuna varılabilir. CO emisyonlarında da benzer eğilimler gözlendi. 300 K'de oksijen konsantrasyonunun azaltılmasıyla CO değerleri azaldı. Ancak, 600 K'de her iki seyreltici ile CO emisyonlarında önemli farklılıklar vardı. Aslında, $CO_2$ veya $N_2$ seyreltme ile sırasıyla %17 $O_2$ ve 19 $O_2$'de değerler hemen hemen %60 $CH_4$ - %40 $H_2$ için sıfır. Bu konsantrasyonlardan sonra CO değerleri hızla tekrar neredeyse başlangıç değerlerine yükseldi. Bu, $CO_2$ ayrışması ve beklenmeyen daha fazla kalma süresi ile açıklanabilir. Bu sonuçlara ek olarak, yakıt karışımına hidrojen eklendikçe öngörülen CO değerlerinin nispeten azaldığı söylenebilir.



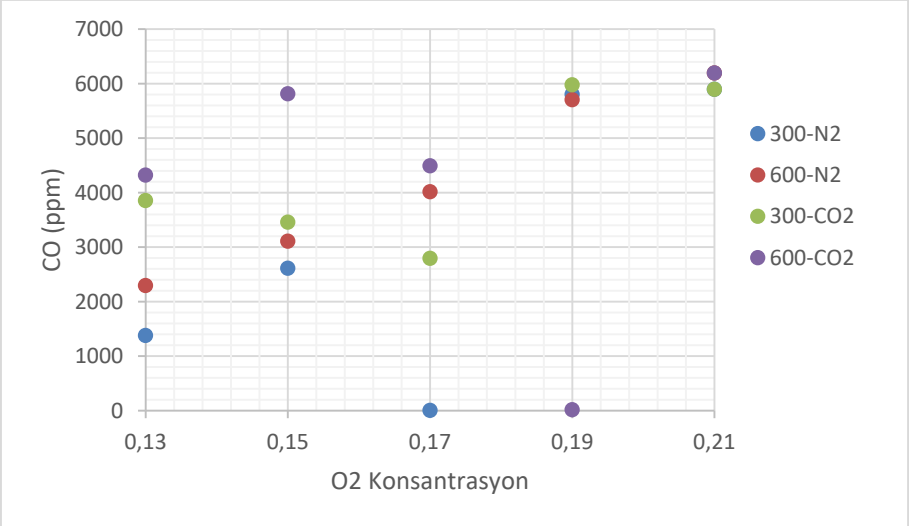

Şekil 5.18. Ortalama $NO_x$ emisyonları (%100 $CH_4$)



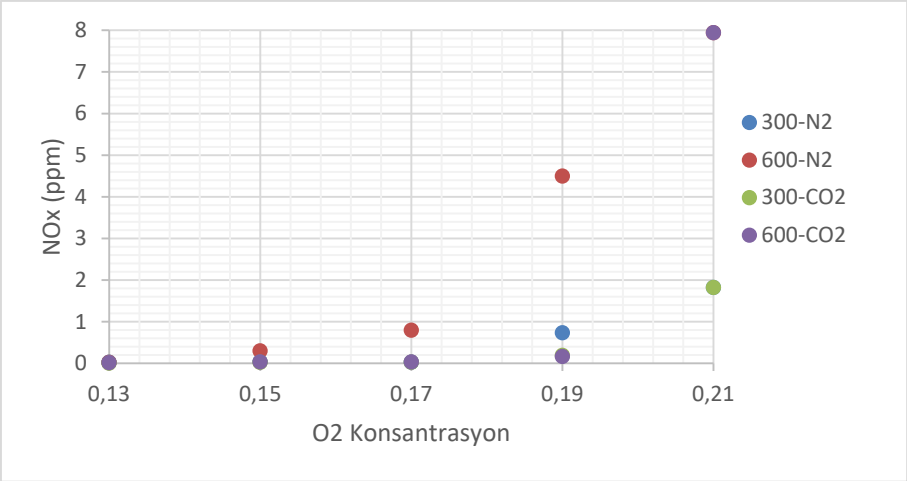

Şekil 5.19. Ortalama CO emisyonları (%100 $CH_4$)



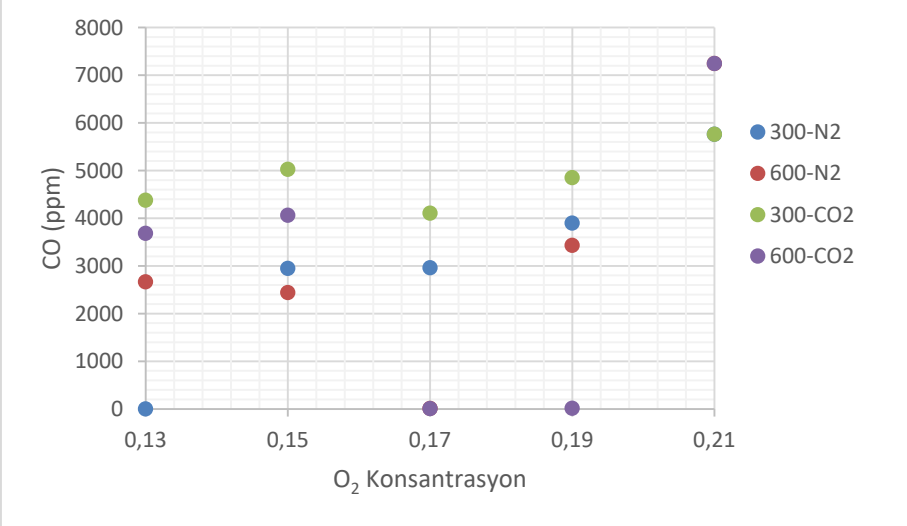

Şekil 5.20. Ortalama $NO_x$ kirletici emisyonlar (%60 $CH_4$ - %40 $H_2$)



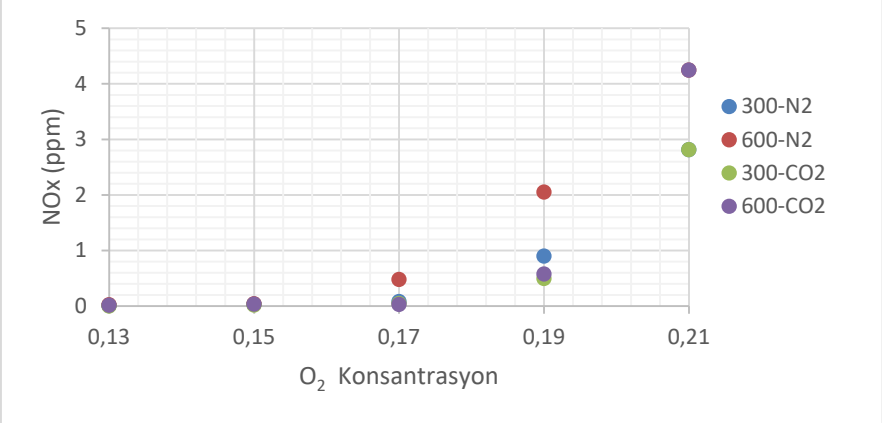

Şekil 5.21. Ortalama CO kirletici emisyonlar (%60 $CH_4$ - %40 $H_2$)



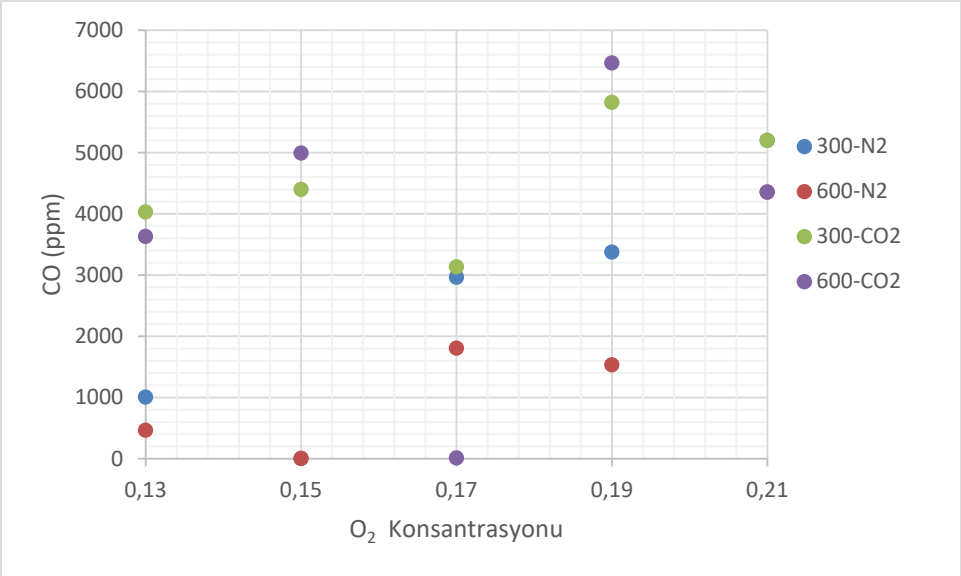

Şekil 5.22. Ortalama $NO_x$ kirletici emiyonlar (%50 $CH_4$ - %50 $H_2$)




Şekil 5.23. Ortalama CO kirletici emisyonlar (%50 $CH_4$ - %50 $H_2$)




Şekil 5.24. Ortalama $NO_x$ kirletici emisyonlar (%40 $CH_4$ - %60 $H_2$)




Şekil 5.25. Ortalama CO kirletici emsiyonlar (%40 $CH_4$ - %60 $H_2$)

# 6. SONUÇ

## 6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada CDC koşulları altında paralel ve çapraz akışlı siklonik yakıcılar kulanılarak difüzyon metan alevinin yanma özellikleri, hem harici hem de dahili resirkülasyon elde etmek için Ansys Fluent ticari kodu ile modellenmiştir. Sonuçlara göre, paralel akışlı yakıcıda metan %83 eşdeğerlik oranında yakıldığında, %15 civarında bir oksijen konsantrasyonunda CDC koşullarına geçişin sağlandığı gözlemlenmiştir. CDC koşullarına geçiş farklı eşdeğerlik oranları açısından değerlendirildiğinde, CDC koşullarına geçiş açısından çok fazla etkilenmese de eşdeğerlik oranının düşürülmesinin sıcaklık ve kirletici emisyon düzeylerini etkilediği söylenebilir. % eşdeğerlik oranında diğerlerine nazaran daha istikrarlı bir termal alan elde edilmiştir. Kirletici emisyonlar incelendiğinde oksijen konsantrasyonunun azaltılmasının öngörülen $NO_X$ seviyelerini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılabilir (ultra düşük $NO_x$ seviyesi yaklaşık 0,2 ppm olarak tahmin edilmiştir). Kullanılan yakıcının yüksek dahili resirkülasyon kapasitesi nedeniyle, CDC koşulları altında %21 ila %15'lik oksijen konsantrasyonlarından CO seviyeleri de yaklaşık 3000 ppm'den 1500 ppm'nin altına kadar düştüğü modellenmiştir. Daha sonra, yakıt ve oksitleyici giriş konumunun CDC koşulları üzerindeki etkisini incelemek için oksitleyici girişi, yakıt girişinin çapraz tarafına yerleştirilmiştir. Daha sonra oksitleyici giriş pozisyonundaki değişikliğin sıcaklık seviyelerini, $NO_x$ ve CO kirletici emisyonlarını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, yüksek dahili resirkülasyon sağlayan siklonik paralel ve çapraz akışlı yakıcıların, CDC koşulları altında fırınlar, gaz türbinleri ve diğer yakıcılar gibi daha pratik uygulamalara, daha homojen bir termal alan elde edilmesine düşük $NO_x$ ve daha az CO kirletici emisyonu ile yardımcı olabileceği düşünülmektedir.

%100 $CH_4$ ve $CH_4$-$H_2$ karışımlı yakıtların yanma ve emisyon özellikleri, iki girişli siklonik bir yakıcıda CDC koşulları altında incelenmiştir. Bu amaca ulaşmak için, oksitleyicideki oksijen konsantrasyonu, baca gazı resirkülasyonu/sürüklenmesini simüle etmek için $N_2$ veya $CO_2$ seyreltici ile azaltıldı. Ayrıca, gerçek yanma ürünleri daha yüksek sıcaklığa sahip olduğundan, oksitleyici giriş sıcaklığı 300 K ile birlikte 600 K olarak seçilmiştir. Bu nedenle, bahsedilen yakıtlar için birçok yanma koşulu, CDC aramak için incelenmiştir.

Özellikle hidrojenle zenginleştirilmiş yakıtlar için daha az yanma kararsızlığı, ultra düşük kirletici emisyonlar, daha düzgün termal alanlar vb. sağlayabilmiştir.

Oksijen içeriğindeki azalmanın, yakıcı içinde incelenen tüm durumlar için öngörülen termal alanları önemli ölçüde değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Bazı alanlarda %21 $O_2$ konsantrasyonunda saf metan yanması için maksimum sıcaklık seviyesi yaklaşık 2000 K idi. Oksijen konsantrasyonundaki azalmayla birlikte, termal alan tüm yakıcı çapında daha homojen hale gelmeye başladı. Hidrojen zenginleştirmesi de önemli ölçüde termal alanları etkiledi. Sıcaklık seviyeleri, yakıttaki hidrojen içeriğinin artmasıyla artarken alev konumu, neredeyse yakıt girişine kadar yaklaştı. Bunun nedeni, hidrojen alev hızının metandan daha yüksek olmasıdır. Bu sonuçlara ek olarak, giriş sıcaklığının CDC üzerindeki etkisi de ortaya çıkarılmıştır. Öyle ki, her iki seyreltici ile %13 $O_2$ konsantrasyonunda, tüketilen tüm yakıtlar için termal alanlar oldukça istikrarlı hale geldi. Bu sonuçlar, eksenel sıcaklık profillerinden de çıkarılabilir. Oksijen konsantrasyonunun azalmasıyla duvar ve merkez arasındaki sıcaklık farklarının azalmaya başladığı gösterilmiştir. Bu şekilde CDC'ye geçiş gözlemlenebilmiştir.

## 6.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında yapılan analizler sonucunda yakıcı içerisindeki hava yakıt sirkülasyonun yanma karakteristiklerine etkisi açık şekilde görülmüştür. Bu doğrultuda yakıcının içerisinde yakıt ve havanın daha iyi karışabilmesi için yakıt ve oksitleyici giriş set sayısı artırılabilir. Hem kirletici emisyonlar hem de yakıcı içerisindeki sıcaklık dağılımı açısından olumlu sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.

# KAYNAKLAR


1. U.S. Energy Information Administration. (2016). *International Energy Outlook*. Report Number: DOE/EIA-0484 (2016). Washington DC, USA: U.S. Department of Energy.

2. Russ, M. (1994). *Cost-effective strategies for an optimised allocation of carbon dioxide emission reduction measures.* Aachen: Verlag-Shaker.

3. Ausfelder, F. ve Bazzanella, A. (2016). Hydrogen in the chemical industry., D. Stolten and B. Ermonts. (Editörler). *hydrogen science and engineering: materials, processes, systems and technology*. Birinci Baskı.Weinheim. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, s. 19-40.

4. Karakaya, E., Nuur, C. and Assbring, L. (2018). Potential transitions in the iron and steel industry in Sweden: towards a hydrogen based future. *Journal of Cleaner Production*, 195(1), 651-663.

5. Otto, A., Robinius, M., Grube, T., Schiebahn, S., Praktiknjo, A. and Stolten, D. (2017). Power-to-steel: reducing $CO_2$ through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry. *Energies,* 10(4), 451-452.

6. Arghode, V.K. and Gupta, A.K.. (2010). Effect of flow field for colorless distributed combustion (CDC) for gas turbine combustion. *Applied Energy,* 87(5), 1631–1640.

7. Arghode, V.K. and Gupta, A.K. (2013). Role of thermal intensity on operational characteristics of ultra-low emission colorless distributed combustion. *Applied Energy,* 111(1), 930–956.

8. Khalil, A.E.E. and Gupta A.K. (2011). Swirling distributed combustion for clean energy conversion in gas turbine applications. *Applied Energy,* 88(11), 3685–3693.

9. Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2011). Distributed swirl combustion for gas turbine application. *Applied Energy*, 88(12), 4898–48907.

10. Boyarkin, M.S., Kovalnogov, V.N, Karpukhina, T.V. and Fedorov, R.V. (2016). Development and research of the technology of enriching low-grade solid fuels with recirculating flue gases for boiler plants. *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 17(2-4), 145-163.

11. Wunning, J.A. and Wunning, J.G. (1997). Flameless oxidation to reduce thermal NO formation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23(1), 81–94.

12. Lammerl, O., Schmitz, H.G., Luckerath, R., Stohr, M. and Noll, B. (210). FLOX combustion at high power density and high flame temperature. *Journal Of Engineering For Gas Turbines And Power,* 132(12), 121503-121513.

13. Weber, R., Smart, J.P. and Vd Kamp, W. (2005). On the (MILD) combustion of gaseous, liquid and solid fuels in high temperature preheated air. *Proceedings of the Combustion Institute,* 30(2), 2623–2629.

14. Sorrentino, G., Sabia, P., de Joannon, M., Cavaliere, A. and Ragucci, R. (2016). The effect of diluent on the sustainability of mıld combustion in a cyclonic burner. *Flow, Turbulence and Combustion*, 96(1), 449–468.

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

16. Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2013). Hydrogen addition effects on high intensity distributed combustion. *Applied Energy,* 104 (1), 71-79.

17. Karyeyen. S., Feser, J.S. and Gupta, A.K. (2019). Hydrogen concentration effects on swirl-stabilized oxycolorless distributed combustion. *Fuel*, 253(1), 772-780.

18. Yu, Y., Gaofeng, W., Qizhao, L., Chengbiao, M. and Xianjun, X. (2010). Flameless combustion for hydrogen containing fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(1), 2694-2697.

19. Mardani, A. and Tabejamaat, S. (2010). Effect of hydrogen on hydrogen-methane turbulent nonpremixed flame under MILD condition. *International Journal of Hydrogen Energy,* 35(1), 11324-11331.

20. Ayoub, M., Rottier, C., Carpentier, S., Villermaux, C., Boukhalfa, A.M. and Honoré, D. (2012). An experimental study of mild flameless combustion of methane/hydrogen mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy,* 37(1), 6912-6921.

21. Frassoldati, A., Sharma, P., Cuoci, A., Faravelli, T. and Ranzi, E. (2010). Kinetic and fluid Dynamics modeling of methane/hydrogen jet flames in diluted coflow. *Applied Thermal Engineering,* 30 (1), 376-383.

22. Derudi, M., Villani, A. and Rota, R. (2007). Sustainability of mild combustion of hydrogen-containing hybrid fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31(2), 3393-3400.

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

24. Cavaliere, A. and De Joannon, M. (2004). MILD combustion. *Progress in Energy and Combustion Science,*30(4), 329–366.

25. Weber, R., Gupta, A. K. and Mochida, S. (2020). High temperature air combustion (HiTAC): How it all started for applications in industrial furnaces and future prospects, *Applied Energ*y, 278(1), 115551.

26. Tsuji, H., Gupta, A.K., Hasegawa, T., Katsuki, M., Kishimoto, K. and Morita, M. (2003). *High temperature air combustion: from energy conservation to pollution reduction* (1. Baskı). Boca Raton: CRC Press, 424.

27. Lv, X., Cui, Y., Fang, A., Xu, G., Yu, B. and Nie, C. (2010, 14-18 Haziran). *Experimental test on a syngas model combustor with flameless technology*. Proceedings of ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea and Air, Glasgow, UK.

28. Amaduzzi, R., Ferrarotti, M. and Parente, A. (2021). Strategies for hydrogen-enriched methane flameless combustion in a quasi-industrial furnace. *Frontiers in Energy Research*, 8(1), 353-363.

29. Khalil, A.E.E. and Gupta, A.K. (2015). Thermal field investigation under distributed combustion conditions. *Applied Energy,* 160(1), 477-488.

30. Sabia, P., De Joannon, M., Lavadera, M.L., Giudicianni, P. and Ragucci, R. (2014). Auto Ignition Delay Times of Propane Mixtures under Mild Conditions at Atmospheric Pressure, *Combustion and Flame*, 161(1), 3022–3030.

31. Sabia, P., De Joannon, M., Picarelli, A. and Ragucci, R.(2013). Methane Auto-Ignition Delay Times and Oxidation Regimes in MILD Combustion at Atmospheric Pressure, *Combustion and Flame,* 160(1), 47–55.

32. Sabia, P., Lavadera, M. L., Giudicianni, P., Sorrentino, G., Ragucci, R. ve de Joannon, M. (2014). $CO_2$ and $H_2O$ Effect on Propane Auto-Ignition Delay Times under Mild Combustion Operative Conditions, *Combustion and Flame*, 162(3), 533–543.

33. Sidey, J.A.M. and Mastorakos, E. (2016). Simulations of Laminar Non-premixed Flames of Methane with Hot Combustion Products as Oxidiser, *Combustion and Flame,* 163(1), 1–11.

34. Li, P., Wang, F., Mi, J., Dally, B.B., Mei, Z., Zhang, J. and Parente, A. (2014) Mechanisms of NO Formation in MILD Combustion of CH4/H2 Fuel Blends. *International Journal of Hydrogen Energy,* 39(1), 19187–19203.

35. Costa, M., Melo, M., Sousa, J. and Levy, Y. (2009). Experimental Investigation of a Novel Combustor Model for Gas Turbines. *Journal of Propulsion and Power,* 25(1), 609–617.

36. Borman, G. L. and Ragland, K. W. (1998). *Combustion engineering*. (1. Baskı) Singapore: McGraw-Hill Companies, 25-48.

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

38. Ilbas, M. (1997). *Studies of Ultra Low NOX Burners*, PhD Thesis, School of Engineering, University of Wales, Cardiff, UK, 10-28.

39. Jones, J.C. (1993). *Combustion Science, Principle, and Practice* (1. Baskı), Australia: Millennium Books, 306.

40. Lieuwen, T. C., Yang, V. and Yetter, R. (2010). *Synthesis Gas Combustion: Fundamentals and Applications* (1. Baskı). United States of America: Taylor and Francis Group, 169-188.

41. Fenimore, C. P. (1971). *Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames*, 13th Symposium (International) on Combustion, Pittsburg, 373.

42. Al-Sharifi, F. A. (1980). The measurement and correction of mean temperature in swirling flames. *UWCC Department Report*, 563.

43. Mirzaie, H. (1990). *Ultra Low NOX Combustors*. PhD Thesis, School of Engineering, University of Wales, Cardiff.

44. DeSoete, G. G. (1990) Fundamental Chemistry of NOX and N2O formation and destruction. *Lecture 6: Third Flame Research Course*, IFRF, Netherland.

45. Karyeyen, S. (2016). *Geliştirilen Bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayılsal olarak Araştırılması,* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-159.

46. DeSoete, G. G. (1975). *Overall reaction rates of NO and N2 formation from fuel nitrogen*. 15th Symposium (International) on Combustion, Tokyo, Japan, 1093-1102.

47. Li, H. ve Karim, G. (2005). Exhaust emissions from an SI engine operating on gaseous fuel mixtures containing hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(13-14), 1491-1499.

48. Amick, P. (2004). Wabash river coal gasification repowering project overview, *Workshop on Gasification Technologies*, *Indianapolis*, 8-9.

49. Mustafi, N. N., Miraglia, Y. C., Raine, R. R., Bansal, P. K. and Elder, S. T. (2006). Spark-ignition engine performance with "powergas" fuel (mixture of CO/H2): A comparison with gasoline and natural gas. *fuel*, 85(12-13), 1605-1612.

50. Choudhuri, A.R. (2000). *An Experimental and Numerical Investigation on Hydrogen-Hydrocarbon Composite Fuel Combustion*, Ph.D. Thesis, University of Oklahoma, Norman.

51. Cengel, Y. and Cimbala, J. (2006). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications* (1. Basım). New Yor: McGraw-Hill Companies, 817-869.

52. Yılmaz, İ. (2006). *Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal ve Deneysel İncelenmesi*, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 40-65.

53. Lumley, J. and Newman, G, (1977). The return to isotropy of homogeneous turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 82(1), 161–178.

54. Mishra, A. and Girimaji, S. (2013). Intercomponent energy transfer in incompressible homogeneous turbulence: multi-point physics and amenability to one-point closures. *Journal of Fluid Mechanics*, 731(1), 639–681.

55. Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, (Second Edition). England: Pearson Education Limited, 9-20.

56. Ilbas, M. (1997). *Studies of Ultra Low $NO_X$ Burners*, PhD Thesis, School of Engineering, University of Wales, Cardiff, 84-87, 107-137.

57. Bengt, A. and Ronnie, A. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers* (1. Baskı). New York: *Cambridge University Press*, 97.

58. Launder, B. E., Reece, G. and Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of Fluid Mechanics*, 68(3), 537–566.

59. Speziale, C.G., Sarkar, S. and Gatski, T.B. (1991). Modelling the pressure--strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach. *Journal of Fluid Mechanics*, 227(1), 245–272.

60. Johansson, A.V. and Hallback, M. (1994). Modelling of rapid pressure strain in Reynolds-stress closures. *Journal of Fluid Mechanics,* 269(1) 143–168.

61. Mishra, A.A. and Girimaji, S.S. (2017). Toward approximating non-local dynamics in single-point pressure-strain correlation closures. *Journal of Fluid Mechanics*, 811(1), 168–188.

62. Hallbäck, M., Henningson, D.S., Johansson, A.V. and Alfredsson, P.H., (1996). *Turbulence and Transition Modelling* (1. baskı). Stockholm: Kluwer Academic Publishers, 117.

63. Rotta, J. (1951). Statistical theory of nonhomogeneous turbulence. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, 131(1) 51–77.

64. Sarkar, S. and Speziale, C.G. (1990). A simple nonlinear model for the return to isotropy in turbulence. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 2(1), 84–93.

65. Bernard, P.S. and Wallace, J.M. (2002). *Turbulent Flow: Analysis, Measurement & Prediction* (1. Baskı). New York: John Wiley & Sons, 324.

66. Rogallo, R. (1981). Numerical experiments in homogeneous turbulence. *NASA technical Momerandum,* 81 (315),94.

67. Schumann, U. and Patterson, G.S. (1978). Numerical study of the return of axisymmetric turbulence to isotropy, *Journal of Fluid Mechanics*, 88(4), 711–735.

68. Uberoi, M.S. (1956). Effect of wind-tunnel contraction on free-stream turbulence. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(8), 754–764.

69. Uberoi, M.S. (1978). Equipartition of energy and local isotropy in turbulent flows. *Journal of Applied Physics,* 28(10), 1165–1170.

70. Lee, M. J. and Reynolds, W.C. (1987). On the structure of homogeneous turbulence., Durst, F., Launder B.E., Lumley J.L., Schmidt F.W. ve Whitelaw, J.H. (Editörler). *Turbulent Shear Flows 5.* (1. Baskı) Berlin: Springer-Verlag, 54-66.

71. Groth, J., Hallbäck, M. and Johansson, A.V. (1989). Measurement and modelling of anisotropic turbulent flows., Fernholz, H.H. ve Fiedler, H.E. (Editörler). *Advances in Turbulences,*(1. Baskı) Berlin: Springer-Verlag, 84-89.

72. Rotta, J.C (1951). Statistical theory of nonhomogeneous turbulence. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and nuclei*, 129(6), 547–572.

73. Ansys incorporated. (2017). *Fluent 18.0 user's guide.* Pennsylvania: Canonsburg.

74. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (2013). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (2. Baskı). Harlow: Pearson Education Limited. 96.

75. Karyeyen, S. (2013). *Model Bir Gaz Türbini Yanma Odasında Kömür Gazları Yanma Davranışının Sayısal Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 69-76.

76. Cashdollar, K.L., Zlochower, I.A., Green, I.A., Thomas, R.A. and Hertzberg, M. (2000). Flammability of methane, propane, and hydrogen gases, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3–5), 2000, 327-340.



*GAZİ GELECEKTİR...*