
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YÜKSEK İÇ RESİRKÜLASYONLU BİR YANMA ODASI İÇİN RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Alparslan İLBAŞ

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EKİM 2023

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.

Alparslan İLBAŞ
03/10/2023

YÜKSEK İÇ RESİRKÜLASYONLU BİR YANMA ODASI İÇİN RENKSİZ DAĞITILMIŞ YANMA ŞARTLARINDA YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Alparslan İLBAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ekim 2023

ÖZET

Bu çalışmada yüksek iç resirkülasyonlu yanma odasında renksiz dağıtılmış yanma şartlarında yanma karakteristiği araştırılmıştır. Gaz türbini yanma odası karakteristiğine benzer, yüksek termal enerji yoğunluğuna sahip bir yanma odası modeli kullanılarak, oksitleyici olarak gönderilen havadaki oksijen oranının düşürülmesi ile ve hava giriş kısmına eklenen özgün tasarlanan girdap oluşturucular etkisinde yanma analizleri sayısal çözümleme ile gerçekleştirilmiştir. Yakıt olarak metan gazı ve kok fırını gazı kullanılan çalışmada, ilk olarak oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranı %21, %19, %17 ve %15 olarak kademelendirilmiştir ve sonuçlar incelenmiştir. Oksijen oranının %21'den %15'e düşürülmesi ile birlikte yanma odasını içerisinde ulaşılan en yüksek sıcaklıkta %9 oranında düşüş gözlemlenmiştir. Bununla birlikte azot oksit oluşumunda %99 oranında düşüş gözlemlenmiştir. Oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının düşülmesi ile birlikte, havanın farklı girdap sayılarında şartlandırılmasının etkilerini incelemek amacıyla uygun girdap oluşturucular tasarlanmış ve girdap sayısı 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 ve 1 için sonuçlar incelenmiştir. Oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının düşürülmesi ve girdap sayısının dağıtılmış yanma şartlarının elde edilmesine katkısı incelenmiş ve yanma sonu gazlardaki azot oksit oluşumu değerlendirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, oksijen oranındaki düşüş etkisinde yanma odası boyunca sıcaklık dağılımının daha homojen gerçekleştiği, termal ve ani azot oksit oluşum değerlerinde büyük ölçüde azalma meydana geldiği ve ulaşılan en yüksek sıcaklık değerlerinin düştüğü görülmüştür. Girdap oluşturucu etkisinde hava ve yakıt karışımının daha hızlı gerçekleştiği, bunun yanma odası içerisinde akış karakteristiği üzerine etkileri olduğu ve genel olarak dağıtılmış yanma şartlarına yakın koşulların elde edilmesine yardımcı olabilecek şekilde resirkülasyona olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir. %21 oksijen oranı için, girdap sayısının 0'dan 1'e çıkarılması ile azot oksit oluşumu yaklaşık %50 oranında düşürülebilmiştir.

Bilim Kodu : 91440
Anahtar Kelimeler : Yanma, iç resirkülasyon, metan, kok fırını gazı, CDC
Sayfa Adedi : 96
Danışman : Doç. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR
İkinci Danışman : Doç. Dr. Serhat KARYEYEN

INVESTIGATION OF COMBUSTION CHARACTERISTICS ON COLORLESS DISTRIBUTED COMBUSTION CONDITIONS IN A HIGH INTERNAL RECIRCULATIVE COMBUSTOR

(Ph. D. Thesis)

Alparslan İLBAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

October 2023

ABSTRACT

In this study, the combustion characteristics were investigated under colorless distributed combustion conditions in the combustion chamber with high internal recirculation. By using a combustion chamber model with high thermal energy density similar to the gas turbine combustion chamber characteristic, the combustion analyses were carried out by reducing the oxygen ratio in the air sent as the oxidizer and under the influence of uniquely designed vortex generators added to the air inlet part, by numerical analysis. Firstly, in the study which methane gas and coke oven gas as fuel was used, the oxygen ratio in the oxidizing air was graded as 21%, 19%, 17% and 15%, and the results were examined. When the oxygen rate was reduced from 21% to 15%, a 9% decrease in the highest temperature reached in the combustion chamber was observed. In addition, a 99% decrease in nitrogen oxide formation was observed. In order to examine the effects of conditioning the air at different swirl numbers along with the reduction of the oxygen content in the oxidizing air, suitable swirler were designed and the results for swirl numbers 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 and 1 were examined. The contribution of the reduction of the oxygen content in the oxidizing air and the swirl number to obtaining the distributed combustion conditions were investigated and the formation of nitrogen oxides in the produced gases was evaluated. When the results were examined, it was observed that the temperature distribution throughout the combustion chamber was more homogeneous under the effect of the decrease in the oxygen ratio, the thermal and prompt nitrogen oxide formation values were greatly reduced, and the highest temperature values reached were decreased. It has been observed that the air and fuel mixture occurs faster in the swirler effect, which has effects on the flow characteristics in the combustion chamber and has positive effects on recirculation, which can help to obtain conditions close to distributed combustion conditions in general. For 21% oxygen ratio, nitrogen oxide formation could be reduced by approximately 50% by increasing the swirl number from 0 to 1.

Science Code : 91440
Key Words : Cumbustion, internal recirculation, methane, coke oven gas, CDC
Page Number : 96
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR
Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Serhat KARYEYEN

TEŞEKKÜR

Öncelikle, desteğini ve sevgisini sürekli hissettiğim sevgili eşim Sn. Dr. Tuğba YILDIZ İLBAŞ 'a, bu çalışmanın tüm safhalarında yönlendirmeleri, eğitici yaklaşımları ve özverili çalışmaları ile bana destek veren kıymetli hocalarım Sn. Doç. Dr. Mustafa Bahadır ÖZDEMİR ve Sn. Doç. Dr. Serhat KARYEYEN 'e teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca kıymetli tecrübelerini esirgemeden, fedakârca desteklerini göstermişler, çıkan problemlere sağduyulu yaklaşmışlar ve sadece teknik altyapı kazanmamı değil, aynı zamanda akademik bir bakış açısı kazanmam yönünde de beni ziyadesi ile desteklemişlerdir. Bana verdikleri emekleri, kendi çabalarımı da üzerine ekleyerek, Türkiye Cumhuriyeti'mizi ileriye taşıyacak genç mühendislere aktarmak ülküsü ile, kendilerine şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. YAKITLAR VE YANMA 11

2.1. Yakıtlar 11

2.2. Yanma 13

2.3. Hava Kirliliği 14

2.3.1. Azot oksit (NOx) oluşum mekanizmaları 14

2.3.2. Karbon monoksit oluşumu 16

2.3.3. Karbon dioksit oluşumu 17

3. YANMA TEKNOLOJİLERİ 19

3.1. Renksiz Dağıtılmış Yanma 19

3.2. Zayıf Yanma 20

3.3. Hafif veya Orta Yoğunlukta Düşük Oksijenli Seyreltme 20

3.4. Yüksek Sıcaklıkta Hava Yanması 21

3.5. Alevsiz Oksidasyon 21

4. YANMANIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ KULLANILARAK MODELLENMESİ 23

4.1. Temel Denklemler ve Yaklaşım 24

4.1.1. Kütlenin korunumu 24

Sayfa

4.1.2. Kimyasal türlerin korunumu 26
4.1.3. Momentumun korunumu 26
4.1.4. Enerjinin korunumu 27
4.2. Akışın Modellenmesi 28
4.2.1. Türbülans modeli 28
5. MATERYAL VE METOT 31
5.1. Özgün Girdap Oluşturucu Tasarımı 34
6. TARTIŞMA 37
6.1. Doğrulama 37
6.2. Oksitleyici Hava İçerisindeki Oksijen Oranının Düşürülmesinin Etkileri 41
6.2.1. Hız 42
6.2.2. Sıcaklık 48
6.2.3. NOx Emisyonu 53
6.3. Girdap Sayısı (Swirl Number) Değişimi ve Oksitleyici Hava İçerisindeki Oksijen Oranının Düşürülmesinin Yanma Üzerine Etkileri 60
6.3.1. Hız 61
6.3.2. Sıcaklık 71
6.3.3. NOx 80
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 87
7.1. Sonuçlar 88
7.2. Öneriler 90
KAYNAKLAR 91
ÖZGEÇMİŞ 95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Kok fırını gazı içeriğindeki bileşenler 12

Çizelge 4.1. k-Ɛ türbülans modelinde kullanılan sabitler. 29

Çizelge 6.1. Yanma sonu gazlar içerisindeki NOx oranı 60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Çözüm için tanımlanan çok küçük kontrol hacminin tanımı ve gösterimi 24

Şekil 5.1. Yanma odası genel yerleşimi ve genel boyutları (ölçüler mm'dir) 31

Şekil 5.2. Giriş Hattı, Taban Hattı ve Çıkış Hattı izafi hatlarının yanma odası geometrisi üzerinde gösterimi (ölçüler mm'dir)..... 33

Şekil 5.3. Girdap oluşturucu izometrik görünümü..... 34

Şekil 5.4. Girdap oluşturucu genel ölçüleri 35

Şekil 6.1. U yönünde ortalama hız dağılımı grafikleri; (a) Referans deneysel sonuçlar, (b) Referans CFD sonuçlar, (c) Doğrulama analizimizin sonuçları..... 38

Şekil 6.2. V yönünde ortalama hız dağılımı grafikleri; (a) Referans deneysel sonuçlar, (b) Referans CFD sonuçlar, (c) Doğrulama analizimizin sonuçları..... 39

Şekil 6.3. Giriş Hattı boyunca V yönünde ortalama hız profili 39

Şekil 6.4. Taban Hattı boyunca V yönünde ortalama hız profili 40

Şekil 6.5. Çıkış Hattı boyunca V yönünde ortalama hız profili..... 40

Şekil 6.6. Yanma odası içerisinde hız değerleri grafiği; (a) Referans çalışma sonuçları, (b) Doğrulama analizimizin sonuçları 41

Şekil 6.7. Yanma odası içerisinde sıcaklık değerleri grafiği; (a) Referans çalışma sonuçları, (b) Doğrulama analizimizin sonuçları 41

Şekil 6.8. Giriş Hattı üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için hız değerleri..... 44

Şekil 6.9. Taban Hattı üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için hız değerleri..... 45

Şekil 6.10. Çıkış Hattı üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için hız değerleri 46

Şekil 6.11. Yanma odası orta düzleminde, Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) hız değeri grafikleri..... 47

Şekil 6.12. Giriş Hattı çizgisi üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için sıcaklık profili..... 50

Şekil 6.13. Taban Hattı çizgisi üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için sıcaklık profili..... 51

Şekil 6.14. Çıkış Hattı çizgisi üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için sıcaklık profili..... 52

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.15. Yanma odası orta düzleminde, farklı oksijen oranlarında, (a) Metan ve (b) Kok Fırını Gazı için sıcaklık değeri dağılımı grafiği 53

Şekil 6.16. Giriş Hattı üzerindeki NOX kütle oranı Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b) .. 55

Şekil 6.17. Taban Hattı üzerindeki NOx kütle oranı Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b) . 56

Şekil 6.18. Çıkış Hattı üzerindeki NOx kütle oranı Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b)... 57

Şekil 6.19. Yanma odası orta düzleminde, farklı oksijen oranlarında, Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b) için NOx değeri dağılımı grafiği 59

Şekil 6.20. Girdap oluşturucu etkisinde oksitleyici havanın yanma odası içerisindeki dağılımı 61

Şekil 6.21. Orta düzlemde, farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında, Metan için hız değeri dağılımı grafiği 63

Şekil 6.22. Orta düzlemde, farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında, Kok Fırını Gazı için hız değeri dağılımı grafiği 64

Şekil 6.23. Giriş Hattı boyunca hız değerlerindeki değişim grafiği 66

Şekil 6.24. Taban Hattı boyunca hız değerlerindeki değişim grafiği 68

Şekil 6.25. Çıkış Hattı boyunca hız değerlerindeki değişim grafiği 70

Şekil 6.26. Metan yakıtının farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında orta düzlemdeki sıcaklık dağılımı değerleri 72

Şekil 6.27. Kok fırını gazı yakıtının farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında orta düzlemdeki sıcaklık dağılımı değerleri 73

Şekil 6.28. Giriş hattı boyunca Metan ve Kok Fırını Gazı için girdap oluşturucu etkisinde sıcaklık değerleri değişimi grafiği 75

Şekil 6.29. Taban Hattı boyunca Metan ve Kok Fırını Gazı için girdap oluşturucu etkisinde sıcaklık değerleri değişimi grafiği 77

Şekil 6.30. Çıkış Hattı boyunca Metan ve Kok Fırını Gazı için girdap oluşturucu etkisinde sıcaklık değerleri değişimi grafiği 79

Şekil 6.31. Giriş Hattı boyunca girdap oluşturucular etkisinde NOx kütle oranı değeri değişimi grafiği 82

Şekil 6.32. Taban Hattı boyunca girdap oluşturucu etkisinde NOx kütle oranı değişimi grafiği 84

Şekil 6.33. Çıkış Hattı boyunca girdap oluşturucu etkisinde NOx kütle oranı değişimi grafiği 85

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
bar	Bar
C	Deneysel Sabit
$\boldsymbol{CH_4}$	Metan
CO	Karbon monoksit
$\boldsymbol{CO_2}$	Karbon dioksit
$\boldsymbol{c_p}$	Özgül Isı
$\boldsymbol{D}$	Yayılım katsayısı
E	Aktivasyon enerjisi
F	Kuvvet
G	Türbülans kinetik enerjisi üretimi
$\boldsymbol{g}$	Yerçekimi ivmesi
J	Akı
$\boldsymbol{J}$	Difüzyon
h	Isı taşınım katsayısı
H	Entalpi
$\boldsymbol{H_2}$	Hidrojen
$\boldsymbol{H_2O}$	Su buharı
k	Oran sabiti
k	İletkenlik katsayısı
$\boldsymbol{k}$	Kinetik enerji
kcal	Kilo kalori
kW	Kilowatt
m³	Metreküp
m	Kütle
MW	Megawatt
MPa	Megapaskal

Simgeler	Açıklamalar
MJ	Megajoule
$\mathbf{N_2}$	Azot
$\boldsymbol{Nu}$	Nusselt sayısı
$\mathbf{NO_x}$	Azot oksit
$\mathbf{O_2}$	Oksijen
OH	Hidroksil
Q	Isı transferi
R	Evrensel gaz sabiti
R	Dönüşüm oranı
$\boldsymbol{R}$	Kimyasal oluşum oranı
S	Girdap sayısı (swirl number)
$\mathbf{SO_x}$	Kükürt oksit
$\mathbf{S_j}$	Oluşmanın kütle oranı
T	Sıcaklık
t	Zaman
u	Hız
v	Hız
V	Hacim
VOCs	Uçucu organik birleşenler
w	Hız
$\boldsymbol{Y}$	Kütle oranı
ppm	Parts per million
°C	Santigrad derece
K	Kelvin
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk
$\boldsymbol{\tau}$	Viskoz kayma gerilmesi
$\boldsymbol{\delta}$	Kroneker delta tensörü
$\boldsymbol{\mu}$	Viskozite
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Yayılma oranı
$\boldsymbol{\sigma}$	Prandtl sayısı
∅	Eşdeğerlik oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct numerical simulation
DRM	Diffusion reaction model
EDC	Eddy dissipation concept
EGR	Exhaust gas recirculation
FGMs	Flamelet generated manifolds
FGR	Fuel gas recirculation
FLOX	Flameless Oxidation
GRI	Gas Research Institute
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HiTAC	High Temperature Air Combustion
MILD	Moderate or intense low-oxygen dilution
PIV	Particle imaginary velocimety
PPC	Partial Premixed Combustion
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
RSM	Reynolds stress model

1. GİRİŞ

Enerjinin verimli kullanımı ve çevreye olumsuz etkilerinin azaltılması konusundaki ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Her ne kadar yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artsa da günümüzde ve yakın gelecekte yanma yolu ile enerji elde edilmesinin, insanlığın temel enerji üretim metodu olmaya devam edeceği düşünülmektedir. Modern yaşamın sürdürülebilmesi ve elde ettiğimiz refahın devamı için fosil yakıtlardan elde edilen ucuz maliyetli enerjiye, şu aşamada ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gerçeklikle beraber, fosil yakıtların yakılarak enerji elde edilmesine yönelik metotların daha verimli ve çevreye daha az zarar verecek şekilde geliştirilmesi, insanlığın önündeki en önemli ödevler arasında yer almaktadır.

Günümüzde sık kullanılan fosil yakıtların kullanımı incelendiğinde, çevre için en önemli sorunun yanma sonu ürünleri arasında oluşan karbon monoksit (CO), azot oksitler (NOx) ve kükürt oksitler (SOx) gibi emisyonlardan kaynaklı olduğu görülmektedir. Karbon monoksit aktif halde bulunan, canlılar için çok zararlı olan bir maddedir. İnsanlar ve bazı canlılar için ölümcül derecede zehirli olan bu madde, yanma tepkimelerinin tam olarak tamamlanamaması ve bazı verimsizliklerden kaynaklı olarak yanma sonrası ürün olarak çıkmaktadır. Azot oksit bileşikleri hava kirliliği sorunlarına ve solunum yolu hastalıklarına sebep olmaktadır. Bu bileşiklerden bazıları, etkileri ile birlikte şu şekilde değerlendirilebilir; nitrik oksit (NO), uzun süreli maruziyet durumunda solunum sistemine zarar vermektedir. Azot dioksit (NO2), nitrik oksit bileşiğinin oksidasyonu ile oluşur ve yanma sonu yoğun olarak açığa çıkabilmektedir. Bu bileşik solunum yolu ile insan vücuduna girdiğinde akciğerin tahrişine ve solunum yollarının daralmasına yol açabilir. Bunun yanı sıra yapılan çalışmalarda, hava kirliliği ile ilişkilendirilen kalp-damar hastalıkları ile solunum yolu enfeksiyonları ile ilişkilendirilmektedir. Azot trioksit (NO3), diğer azotoksitlerin fotokimyasal reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Güçlü bir sera gazı olarak tabir edilen bu madde küresel ısınma ve ilkim değişikliği ile ilişkilendirilmektedir.

Güncel akademik ve teknik çalışmalarda, yeni yanma metotları ve teknikleri denenerek zararlı emisyonların azaltılması ve verimli yanma koşullarının elde edilmesi ile yakıt tüketiminin azaltılması amaçlanmaktadır.

Bu tez kapsamında; yanma odasına giren havadaki oksijen oranı değişimleri ile, yanma teknolojileri arasında sınıflandırılan renksiz dağıtılmış yanma (CDC - Colorless distributed combustion) koşullarının oluşumu ve etkileri incelenmiş, metan gazı ve kok kömürü gazı yakıtlarının, yanma performansı değerlendirilmiştir. Ayrıca havadaki oksijen oranı değişimi ile birlikte, yanma odası içerisindeki yakıt-hava karışımı koşulu değiştirilerek yine renksiz dağıtılmış yanma koşuluna yakın yanma koşulu elde edilmesi konusunda incelemelerde bulunulmuştur. Renksiz dağıtılmış yanma koşulunun bu farklı yollarla sağlanması, yanma sonu azot oksit oluşumunu azaltması ve oksidasyonun, yanma odasında noktasal bir bölgeden ziyade tüm yanma odası boyunca dağılmasına yardımcı olacağı değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan yanma odası, yapılan analiz sonuçlarını deneysel verilerle doğrulayabilmek ve literatüre somut katkıları olması düşüncesi ile daha önce yapılan çalışmalara benzer olarak seçilmiştir. Çalışmada seçilen yanma odası iç resirkülasyonu sağlamaya yardımcı geometridedir. Bu geometri ısıl enerji yoğunluğu yüksek olan, gaz türbinlerinde ve endüstriyel yanma odalarında tercih edilmektedir. Bu çalışmada, girdap sayısı etkisinin incelendiği kısımlarda, yanma odası hava giriş kısmına çalışma sırasında özgün olarak geliştirilen girdap oluşturucular eklenmiştir. Bu sayede yakıt ve hava karışım hızı düzenlenmiş ve yanma kimyasal reaksiyonunun yanma odası boyunca dağılmasına yardımcı akış mekanizması desteklenmiştir.

Bu çalışmada, metan ve hidrojence zengin kok fırını gazı kullanılmıştır. Gaz türbinlerinde kullanılan yanma odalarına benzer bir yanma odası kullanılarak ve özgün tasarıma sahip girdap oluşturucular ile dağıtılmış yanma koşullarının karakteristiği desteklenmesi yolu ile çalışmaya özgünlük kazandırılmıştır. Bu çalışmada incelenen sonuç matrisi, oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının değişimi, girdap sayısı değişimi ve yakıt türünün değişimi kombine edilerek oluşturulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen sonuçların özellikle havacılık ve enerji dönüşümü alanında kullanılan gaz türbini yanma odalarının tasarımlarında, daha çevreci ve verimli tasarımların yapılması ve var olan sistemler üzerinde iyileştirmeler yapılmasına yardımcı olacağı değerlendirilmektedir. Bununla birlikte bu çalışmada kullanılan hesaplamalı akışkanlar sayısal çözüm yönteminin, karmaşık yanma reaksiyonları için yapılan sayısal çözüm uygulamaları alanında literatüre katkı yapacak düzeyde bilgi içerdiği değerlendirilmektedir.

Literatür araştırması

Arghode, Gupta ve Bryden [1], yüksek ısıl yoğunluklu bir yanma odasında CDC şartlarında yanma performansının iyileştirilmesi ve emisyon seviyesinin düşürülmesine yönelik bir çalışma yapmıştır. Yüksek ısıl yoğunluklu yanma odaları genellikle gaz tribünü gibi yüksek sıcaklık ve basınç uygulamalarında kullanılmaktadır. Çalışmada, daha iyi yanma karakteristiği elde etmek için yanma odası içerisinde ters akış oluşturacak konfigürasyonlar incelenmiştir. Çalışma sonucunda ön karışımlı ve ön karışımsız şartlar için çok düşük azot oksit emisyon değerlerine ulaşılmıştır. CDC şartlarının sağlanması ile, yanma odası basıncındaki %5 'lik kayıp ile birlikte karbon monoksit seviyesi 30 ppm değerinin altına düşmüştür.

Szego, Dally ve Nathan [2], laboratuvar ölçeğinde bir fırında, yanma havası ön ısıtıcısı kullanarak ve kullanmayarak bir paralel jet yakıcı sistemi üzerinde MILD koşulunda yanma incelemesi yapmıştır. Eşdeğerlik oranı değişimi ile karbon monoksit seviyesindeki düşüş gözlemlenmiş ve en iyi operasyonel şartlar tanımlanmıştır. Eşdeğerlik oranındaki değişimin jet momentumu artırdığı ve bunun alev kararlılığı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Çalışmada en düşük azot oksit ve karbon monoksit değerlerine 0.90 eşdeğerlik oranında ulaşıldığı belirtilmiştir.

Karyeyen, Feser ve Gupta [3], hidrojen ile zenginleştirilmiş metan yakıtı kullanarak girdap oluşturucu etkisinde dağıtılmış yanma şartlarının oluşum şartlarını incelemişlerdir. Renksiz dağıtılmış yanma şartı, gönderilen oksitleyiciye azot ve karbon dioksit eklenerek elde edilmiştir. Üç farklı yakıt kompozisyonunun incelendiği bu çalışmada, emisyon ve alev yapısındaki değişim üzerinde yakıt türlerinin etkisi incelenmiştir. Ayrıca eşdeğerlik oranı değerinin alev kararlılığı ve emisyon üzerine etkileri de incelenmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, %10 ila %15 arası oksijen konsantrasyonunda dağıtılmış yanma koşulları elde edilmiştir. Tüm yakıtlar için dağıtılmış yanma koşulunda azot oksit emisyonu kayda değer miktarda düşmüştür. Karbon monoksit emisyonu, dağıtılmış yanma koşullarına yaklaşıldıkça azalmıştır. Azot ile oksitleyici havanın seyreltildiği duruma göre karbon dioksit ile seyreltilen durumlarda karbon monoksit emisyon seviyesi biraz yüksektir. Bu durum yüksek sıcaklık seviyelerinde karbon dioksit 'in ayrışması olmasından kaynaklandığı belirtilmiştir.

Khalil ve Gupta [4], yaptığı “Clean combustion in gas turbine engines using Butyl Nonanoate biofuel” isimli çalışmada; biyo yakıtların çok düşük emisyona sahip gaz türbini uygulamaları için kullanımı incelenmiştir. Çalışmada butil nonanoat yakıtı ile hidrojenle zenginleştirilmiş jet yakıtı ve havacılık endüstrisinde halihazırda kullanılan JP-8 yakıtları karşılaştırılmıştır. Yakıtların atomizasyon karakteristikleri deneysel olarak incelenmiştir. Biyo yakıtın, aynı enjektör ve basınçta, JP-8 yakıtına göre %10-15 daha fazla damlacık çapına sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca girdaplı renksiz dağıtılmış yanma şartlarında ve gaz türbinlerini simüle edecek şekilde yüksek ısıl yoğunlukta yanma odası içerisinde, yakıtların yanma davranışları da incelenmiştir. Çalışma sonucunda butil nonanoat yakıtının CO emisyonu değeri, JP-8 yakıtınkinden daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Fakat biyo yakıtların kullanıldığı durumlarda alev stabilizasyonu sağlanamamıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, gelecekte yanma odası ve enjektörlerinde önemli bir değişikliğe gitmeye gerek olmadan, daha çevreci biyo yakıtların mevcut gaz türbinlerinde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Khalil ve Gupta [5], yaptığı “Fuel property effects on distributed combustion” isimli çalışmada; metan, propan ve hidrojence zenginleştirilmiş metan yakıtlarının renksiz dağıtılmış yanma üzerine etkileri incelenmiştir. Seyreltici olarak Azot ve Karbondioksit karışımı kullanılmış ve sıcak resirkülasyon gazını simüle etmesi için farklı sıcaklıklarda oksitleyici hava içerisine karıştırılmıştır. Metan gazı için oksijen oranının %13.8 ile %11.2 arasında değiştiği durumlarda azot oksit emisyonları %85 oranında düştüğü görülmüştür. Benzer sonuçlar propan ve hidrojence zenginleştirilmiş metan gazı için de elde edilmiştir. Propan için oksijen oranının %13.7 ile %11.6 arasında değiştiği durumlarda azot oksit emisyonları %94 ve hidrojenle zenginleştirilmiş metan için oksijen oranının %12.2 ile %10.5 arasında değiştiği durumlarda azot oksit emisyonları %92 oranında düştüğü görülmüştür. Oksijen oranının yüzdelik değişiminin seyreltici sıcaklığından kaynaklandığı belirtilmiştir. Seyreltici karışımın sıcaklığı 300 K ile 750 K arasında değiştirilmiştir. Deneysel veriler, tüm yakıt tiplerinde, yapılan çalışma ile birlikte, azot oksit emisyonunun 1 ppm değerinin altına düştüğünü göstermektedir. Deneysel çalışma sonuçları incelendiğinde ve sonuçlar enterpolasyon yapıldığında 1800 K sıcaklıkta seyreltici ile %9.5 oksijen konsantrasyonunun elde edilebileceğini göstermektedir. Toplanan verilerin egzoz gazı resirkülasyonu alanında yapılacak çalışmalara referans olacağı değerlendirilmiştir.

Arghod ve Gupta [6], “Effect of flow field for colorless distributed combustion (CDC) for gas turbine combustion” isimli çalışmada; Dağıtılmış yanma şartlarının elde edilebilmesine yönelik olarak dört farklı akış bölgesi konfigürasyonunda yanma ortamı oluşturmuştur. Aynı yakıt ve enjektör boyutu kullanılarak, bu dört farklı konfigürasyon için sayısal ve deneysel sonuçlar incelenmiş ve yanma izi dağılımı, egzoz emisyonları, akustik iz ve sıcaklık dağılımı yönünden karşılaştırılmıştır. 25 kW ısıl güçte metan yakıtı ile normal şartlar altında (atmosfer basıncında ve oda sıcaklığında) hava ve yakıt kullanılarak inceleme gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki konfigürasyonlardan olan ve karşılaştırma amacı ile sonuçları alınan temel difüzyon yanması koşulu ile kıyaslandığında, yanmanın renksiz dağıtılmış yanma şartlarına yakınsaması ile daha düşük azot oksit ve karbon monoksit salınımı yaptığı, daha homojen sıcaklık dağılımına ulaştığı, düşük akustik seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Khalil ve Gupta [7], “Impact of internal entrainment on high intensity distributed combustion” isimli çalışmada; renksiz dağıtılmış yanma şartlarının elde edilebilmesi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada renksiz dağıtılmış yanma şartlarının elde edilebilmesi için yanma odası içindeki akış alanı tasarımının, yanmadan önce iyi bir karışım elde edilmesi için özelleştirilmiştir. Çalışmada renksiz dağıtılmış yanma koşullarının elde edilebilmesi için resirkülasyon ile yanma odası içerisindeki akış, yanma odası geometrisine bağlı olarak yönlendirilmiş ve yakıt-hava karışımının ilk temas ettiği reaksiyon bölgesine, iç sürükleme etkisi ile yanmış reaktif gazlar yönlendirilerek yerel olarak oksijen konsantrasyonu seyreltilmiştir. Bu yaklaşım ile iç resirkülasyon etkisinin alev yapısı üzerine etkisi, dağıtılmış yanmaya oluşumuna etkisi incelenmiş ve dağıtılmış yanma araştırmalarına rehberlik edecek bir bilgi seti hazırlanmıştır. Resirkülasyon gazlarını simüle etmek için oksitleyici hava içerisine azot ve karbondioksit karıştırılarak oksijen oranı seyreltilmiştir. Çalışmada yanma odasına gönderilen hava içerisindeki oksijenin seyrelmesine bağlı olarak, yanma reaksiyonun yanma odası boyunca daha geniş bir bölgede gerçekleştiği ve mavi olan reaksiyon alevinin neredeyse fark edilmeyecek maviye yakın bir renkte görüldüğü deneysel çalışmalar sonucunda rapor edilmiştir. Çalışma sonucunda oksijen oranının %21 ‘den %15’e düşürülmesi azot oksit emisyonunu %80-90 oranında düşürdüğü tespit edilmiştir. Çalışmada oksijen konsantrasyonunun %16 ‘nın altına düştüğü seviyelerdeki emisyon değerlerinin daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir ve bu değer azot oksit emisyonundaki radikal düşüş için teorik bir sınır olarak tanımlanmıştır. Yapılan

deneysel çalışma sonucunda oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının %21'den %16'ya düşürülmesi azot oksit salınımında %75 civarı düşüşe neden olmaktadır.

Khalil, Arghode ve Gupta [8], "Novel mixing for ultra-high thermal intensity distributed combustion" isimli çalışmada; çok yüksek termal yoğunluğa sahip renksiz dağıtılmış yanma koşulunda yanma performansı ve azot oksit emisyonunun düşürülmesi incelenmiştir. 270 ile 420 $MW/m^3 - atm$ değerleri arasında termal yoğunluğa sahip yanma odasında, farklı ters akış konfigürasyonlarının emisyon değerleri ve akış üzerine etkileri araştırılmıştır. Seçilen yanma odası geometrisi gaz türbinlerini simüle edecek şekilde ve basitleştirilmiş bir geometridedir. Bu çalışmada reaksiyon gerçekleşmeden yapılan CFD analizleri kullanılarak farklı konfigürasyonlardaki ters akış davranışı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan yanma odası geometrisi, bizim de bu çalışmada kullandığımız basitleştirilmiş yanma odasına benzer şekildedir. Bu çalışmada yakıt ve hava girişlerinden, yakıt ve havanın ön karışımlı ve ön karışımız olarak farklı konfigürasyonlarda yanma odasına gönderilesi ile yanma performansı üzerine etkileri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışma sonunda azot oksit emisyonu ön karışımsız koşullarda en düşük 5 ppm, ön karışımlı koşullarda en düşük 2 ppm olarak elde edilebilmiştir. Karbon monoksit seviyesi ön karışımlı ve ön karışımsız koşullarda en düşük 100 ppm olarak elde edilebilmiştir. Yanmamış hidrokarbon emisyonları ise 10 ppm değerinden düşük olarak, çok düşük değerlerde elde edilebilmiştir. Çalışmada azot oksit emisyonunu etkileyen en önemli etkilerin, hava ve yakıt karışımı ve momentumu olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Yanma odası içerisindeki yanmanın yoğun olarak gerçekleştiği bölgeyi etkileyen en önemli etkilerin, akışkan momentumu ve eşdeğerlik oranı olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Sonuç olarak çalışma neticesinde uygun hava ve yakıt ön karıştırma tekniği ve enjeksiyon konfigürasyonu ile çok düşük Azot oksit seviyelerine ulaşılabileceği belirtilmiştir.

Colorado, Herrera ve Amell [9], "Performance of a flameless combustion furnace using biogas and natural gas" isimli çalışmada; yakıtın tutuşma sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta yakıt ve havanın karıştırılması ile oluşan alevsiz yanma şartları etkisinin biyokütleden elde edilen gazın yanması üzerine etkileri incelenmiştir. Kendi ürettiği ısı ile yanma odasına gönderilen havayı, yakıtın kendiliğinden tutuşma sıcaklığının üzerine çıkaracak şekilde tasarlanmış bir yanma odası sisteminde doğalgaz ve biyogazın yanma performansı incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, biyogazın içeriğinde bulunan ve

reaksiyonu yavaşlatan karbondioksit inert gazının bulunmasına rağmen hem doğalgaz hem de biyogaz için sıcaklık dağılımı ve homojenliği benzer seviyelerde görülmüştür. Emisyon değerleri benzer trend ve değerlerde görüşmüştür. Enerji dengesi bakımından biyogaz için bir miktar düşüş gözlemlenmiş ve fırının verimi bir miktar düşmüştür. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, konvensiyonel alevsiz yanma mekanizmasına sahip fırınlarda, biyogazın kullanımının kabul edilebilir performans değerlerinde olduğu, mevcut fırınlarda önemli değişiklikler yapılmadan biyogazlarında kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Arteaga Mendez, Tummers, van Veen ve Roekaerts [10], "Effect of hydrogen addition on the structure of natural-gas jet-in-hot-coflow flames" isimli çalışmada; alev ışık şiddeti, hızı ve sıcaklığının, dört farklı hidrojen oranına sahip hidrojen/doğalgaz karışımından oluşan yakıt için (benzer jet Reynold sayılarında) alevsiz yanma şartlarında incelenmesi yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, yakıtının içerisindeki hidrojen miktarının artması ile yanma sırasında görülen kendiliğinden tutuşan alev çekirdeklerinin yanma odası girişine doğru daha yukarı bölgelerde oluşmaya başladığı görülmüştür. Hidrojen seviyesinin yeteri kadar artırıldığı durumlarda kendiliğinden tutuşan alev çekirdekleri gözlemlenmemiş ve alev bölgesi tek bir sürekli bölge halini almıştır.

Roiha, Kaikko, Jaanu, ve Vakkilainen [11], "Analysis of high flue gas recirculation for small energy conversion systems" isimli çalışmada; sıcak egzoz gazlarının ısısı ile yanma odasına gönderilen havanın sıcaklığının artırıldığı HiTAC yöntemine alternatif olarak yanma odası sonu oluşan gazların, yanma bölgesine yönlendirilmesi ile küçük bir enerji dönüşüm sistemi için emisyon değerlerinin düşürülme performansı incelenmiştir. Çalışma sonucunda yanma stabilitesine katkıda bulunan ana faktörün iç resirkülasyon olduğu bulunmuştur. Zararlı emisyonlardaki azalmanın hava ön ısıtması olmadan ve orta derecede baca gazı devir daimi ile elde edilebileceğini göstermektedir. Emisyon sonuçları HiTAC teknolojisi kullanılmasına göre daha az iyileşmiş olsa bile, küçük ölçekli ekonomik kazanlarda bu yöntemin kullanılabileceğini göstermektedir.

İlbaş ve Karyeyen [12], yüksek enerji yoğunluklu ve gaz türbini yapısını model alan bir yanma odasında farklı kömür gazlarını kullanarak yanma ve emisyon parametrelerini sayısal olarak incelemişleridir. Çalışmada yanma modeli olarak "PDF/Mixture Fraction" yanma modelini kullanmışlardır. Türbülans modeli olarak k-Ɛ türbülans modelini kullanmışlardır. Yanma sırasında oluşan radyasyon etkisinin hesaplamalara katılabilmesi

için radyasyon modeli olarak P-1 radyasyon modeli ile çözümlemeleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçları incelendiğinde, diğer kömür gazı türlerinden ziyade kok fırını gazının, metanın yanma performansına daha yakın performans sergilediği gözlemlenmiştir. NOx oluşumu bakımından sonuçlar değerlendiğinde, yakıt bünyesinde azot barındıran kömür gazı türlerinin yakılması neticesinde daha yüksek NOx oluşumu gerçekleştiği görülmüştür. Bu durumun yakıt azot oksit oluşum mekanizması ile gerçekleştiği değerlendirilmektedir.

Feyz, Esfahani, Pishbin ve Modarres Razavi [13], çalışmada, kısmi ön karışımlı ve düşük girdap sayısına sahip girdap oluşturucuya sahip bir doğalgaz yakıcısını bir yanma odasına entegre ederek, türbülatör derinliği etkisinde artan türbülanslı akışın yanma üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada ısıl güç sabit tutulmuş ve 55 kW gücüdedir. Sonuçlar incelendiğinde türbülatör derinliğinin değişiminin farklı alev rejimleri oluşmasına sebep olduğu görülmüştür. Türbülatörün, yanma odası merkezine yaklaşması etkisinde yanma odası boyunca görülen sıcaklık değerlerinde kayda değer düşüşler gözlemlenmiştir. Yanma odasının merkezinden cidarlarına doğru ölçülen sıcaklık değerlerinde ise kayda değer bir farklılık gözlemlenememiştir. Bu çalışma sonucunda türbülatörün konumunun ve akışı yönlendirme özelliklerinin yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olduğu değerlendirilmiştir.

Mardani ve Tabejamaat [14], metan ve hidrojen karışımı ile elde edilen yakıtın MILD yanma koşullarının oluşumu üzerine etkisini sayısal olarak incelemiştir. Farklı yanma modellemeleri ve algoritmaları ile yürütülen çözümler sonucunda, yakıta ilave edilen hidrojen katkısı etkisinde artan kinetik enerji etkisinde alev bölgesinin bir miktar yer değiştirdiği, hidrojenin hızlı tepkimeye girmesi neticesinde reaksiyon bölgesinin daraldığı ve daha yoğun reaksiyon sonu ısı salınımına sebep olduğu gözlemlenmiştir. Alev hızı ve sıcaklık değerlerinde artış tespit edilmiştir.

Lee, Seo, Yoon, Kim ve Yoon [15], model bir endüstriyel gaz türbininde farklı sentetik yakıtları azot, karbondioksit ve su buharı kullanarak seyreltmiş ve azot oksit ve karbon monoksit salınımları, yanma odası sıcaklık değerleri ve alev yapıları üzerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlar incelendiğinde, seyreltici fark etmeksizin seyreltme miktarı arttıkça yanma sonu oluşan azot oksit miktarlarının azaldığı görülmüştür. En düşük azot oksit salınımı değerleri, su buharı ile yapılan seyreltme sonucu elde edilmiştir. Korbon

monoksit salınımı yönü ile sonuçlar incelendiğinde, su buharı ile seyreltme sonucunda alev sıcaklığının çok düşmesi neticesinde yanmanın tam olarak gerçekleşemediği ve yakıt içerisindeki su buharı oranı arttıkça karbon monoksit miktarında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Diğer seyrelticiler etkisinde karbon monoksit salınımının önemli ölçüde etkilenmediği tespit edilmiştir.

İlbaş ve Karyeyen [16], düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen ile zenginleştirilmesi ile elde edilen yakıtları kullanarak, yanma performansını ve emisyon değerlerini sayısal olarak incelemişlerdir. Yapılan HAD çözümünde yanma modeli olarak "PDF/Mixture Fraction" yanma modelini kullanmışlardır. Farklı türbülans modelleri denemelerine yer verilen çalışmada, en yakın çözümün k-Ɛ türbülans modeli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Sonuçlar incelendiğinde, hidrojen ilavesi etkisinde, alev sıcaklıklarında önemli ölçüde artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Yakıta ilave edilen hidrojenin alev hızını artırdığı ve bölgesel yüksek sıcaklık alanlarının artışına sebep olduğunu çalışma sonucunda gözlemlemişlerdir.

Khalil ve Gupta [17], tarafından yapılan "Swirling distributed combustion for clean energy conversion in gas turbine applications" isimli çalışmada; dağıtılmış yanma şartlarının uygulanması ile gaz türbini yakıcılarında önemli performans artışını sağlayacağı değerlendirilmiştir. Dağıtılmış yanma şartlarının etkisinin gözlemlenmesi için, gaz türbini yanma odasını temsil eden basit silindirik bir yanma odasına, hava ve yakıt ön karışımsız ve ön karışımlı olarak farklı konumlara yerleştirilmiş nozullar ile gönderilmiştir. Deneysel olarak ve sayısal olarak sonuçlar gözlemlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde silindirik yanma odası formunda çok düşük azot oksit emisyon değerlerine ön karışımlı ve ön karşımsız olarak ulaşılabileceği görülmüştür. Ön karışımsız modda azot oksit değeri 3 ppm ve karbon monoksit değeri 70 ppm dolaylarında elde edilebilmiştir. Bu değerler yüksek ısı yayınım oranı olarak kabul edilen 36 MW/m^3-atm değerinde ve 0.7 eşdeğerlik oranında elde edilmiştir.

Khalil ve Gupta [18], tarafından yapılan "Hydrogen addition effects on high intensity distributed combustion" isimli çalışmada; dağıtımış yanma şartlarının gaz türbinleri yanma odasındaki etkileri araştırılmıştır. Temiz yanma havası ile sıcak reaktif yanma sonu gazlarının karışımının, dağıtılmış yanma koşulları oluşturulmasına etkileri araştırılmıştır. Girdaplı akış koşullarında ve yüksek hidrojen içeren yakıt ile yapılan çalışmada alev

stabilitesinin sağlanması hedeflenmiştir. Çalışmada kullanılan yakıtlar farklı seviyelerde hidrojen ile (kütlece %4 - %15 oranında değişen) metan gazının karıştırılması ile elde edilmiştir. Farklı eşdeğerlik oranlarında belirlenen yakıtlar yakılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre düşük eşdeğerlik oranında hidrojen ile zenginleştirilmiş metan yakıtının çok düşük seviyelerde kirletici emisyonlara sahip olduğu görülmüştür. 0,5 eşdeğerlik oranı için 3,2 ppm azot oksit ve 9 ppm karbon monoksit değerlerine ulaşılabilmiştir.

2. YAKITLAR VE YANMA

2.1. Yakıtlar

Yakıtlar, bir oksitleyici ile tepkimeye girdiğinde ısı enerjisi yayabilen maddelerdir. Yaygın olarak fosil yakıtlar, organik (biyokütle yakıtları) ve inorganik (hidrojen, sülfür vs.) olarak bilinmektedir [19]. Gaz, sıvı ve katı formda bulunabilen yakıtların, bulunduğu madde haline göre özellikleri ve kullanımları farklılık göstermektedir [20].

Günümüzde yakıtların kullanımı ile elektrik üretimi, ulaşım ve ısınma gibi en temel ihtiyaçlar karşılanmaktadır. Bu enerji ihtiyaçlarının karşılanması için temel enerji kaynağı olarak fosil yakıtlar kullanılmaktadır. Fosil yakıtlara örnek olarak doğalgaz, petrol ve kömür verilebilir.

Fosil kökenli yakıtların kullanımına dair tartışmalar günümüzde oldukça yaygın olarak yapılmaktadır. Özellikle, fosil yakıtların yenilenebilir kaynaklar olmamaları ve yanma sonu ürünlerin çevre üzerine etkileri, iklim değişikliği ve küresel ısınma gibi konularda büyük endişelere sebep olmaktadır.

Mevcut enerji elde etme yöntemlerimizi kısa vadede değiştiremeyeceğimiz öngörülmekte iken, fosil yakıtların daha verimli şekilde kullanımının araştırılması önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada Metan ve Kok kömürü gazının farklı koşullar altında yanması incelenerek daha verimli ve çevreci yanma ortamının nasıl oluşturulabileceği konusunda incelemeler yapılmaktadır.

Metan gazı

Hidrojen ve karbon atomlarından oluşan bir hidrokarbondur. Renksiz ve kokusuz olan bu gaz, doğalgaz içerisindeki ana birleşenlerden biridir. Doğalgaz yatakları, kömür yatakları, gibi karbon temelli yer altı kaynakları ile bulunmasının yanı sıra, organik bileşiklerin fermantasyonu sonucunda da açığa çıkar. Sera gazı olarak değerlendirilir ve iklim değişikliği üzerine etkileri olduğu değerlendirilir. Diğer karbon temelli yer altı kaynaklarına göre daha temiz bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. Bir karbon atomumun

dört hidrojen atomu ile birleşiğinden meydana gelir. Tam yanması halinde yanma sonu ürünler olarak karbon dioksit ve su buharı açığa çıkmaktadır.

Kok fırını gazı

Bu tez çalışmasında incelenen yakıt türlerinden biri olan kok fırını gazı, kömür madenlerinin koklaştırılması sırasında yan ürün olarak oluşan gazdır. 1400 K ve üzeri sıcaklıklarda gerçekleşen yüksek kalorili kömürün koklaştırılması ile elde edilen karbon içerikli bir yakıttır. Genellikle 1,25 – 1,65 ton kömürden yaklaşık 1 ton kok elde edilirken bu sırada yakalık 300 – 360 metreküp kok fırını gazı elde edilir.

Doğalgaz kullanımının yaygınlaşmasından önce, bazı şehirlerin (Sheffield, Birmingham, İstanbul gibi) enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla kok fırını gazı kullanılmakta idi. Kok fırını gazı, standart bir gaz yakıt olarak dikkate alınmamasına rağmen ısıl değeri doğalgazın yaklaşık yarısı kadardır.

Koklaştırma prosesinin türü, kok fırını gazı üretim miktarını ve özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. 700 °C gibi düşük sıcaklıklarda yapılan koklaştırma işleminde daha az miktarda kok fırını gazı elde edilirken bu gazın ısıl değeri yüksektir. Yüksek sıcaklıkta yapılan koklaştırma işleminde ise daha yüksek miktarda kok fırını gazı elde edilirken elde edilen kok fırını gazının ısıl değeri daha düşüktür. Bu çalışmada kullanılan kok fırını gazı içeriği Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kok fırını gazı içeriğindeki bileşenler

Kok Fırını Gazı İçeriği	Yüzde Değeri (mol) %
Hidrojen (H_2)	55
Metan (CH_4)	27
Azot (N_2)	10
Karbonmonoksit (CO)	6
Karbondioksit (CO_2)	2

2.2. Yanma

Yakıt ve oksitleyicinin, ısı enerjisi açığa çıkarak şekilde kimyasal reaksiyonuna yanma denir. Yanma olayı, fiziksel ve kimyasal etkileşimi olan bir olaydır. Fiziksel etkiler kimyasal reaksiyonların oluşumunu etkiler. Yanma işlemi esnasında kimyasal reaksiyonlar oluşurken ısı transferi ve akışkan hareketleri oluşmaktadır.

Yanma işlemi, fiziksel etkileri de incelenerek şu şekilde sınıflandırılabilir;

- Ön karışımsız (difüzyon) yanma
- Ön karışımlı yanma
- Kısmi ön karışımlı yanma

Ön karışımsız yanmada, yakıt ve oksitleyici hava ayrı kanallardan yanma odasına verilerek yakıt-hava karışımı ve yanma olayı eşzamanlı olarak yanma odası içerisinde gerçekleşmektedir. Bu yöntemde, yakıt ve hava ayrı olarak enjekte edilir ve daha sonra yakıt molekülleri havayla difüzyon yoluyla karışır ve yanma gerçekleşir. Ön karışımsız yanma; dizel motorlarda, gaz türbinlerinde ve geleneksel yakıcılarda kullanılmaktadır. Ön karışımsız yanma, daha yüksek yanma sıcaklıklarına, daha yüksek basınçlara ve daha zengin yakıt/hava oranlarına yol açar. Bu nedenle yüksek tork ile çalışması beklenen dizel motorlarda ve küçük motor hacminde yüksek basınç ve güç beklentisi olan gaz türbinlerinde (genellikle havacılık alanında kullanılan) uygulanır. Yakıtın ani ve yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılarak yakılması ile birlikte, ön karışımsız yanma, daha yüksek azot oksit emisyonlarına ve daha yüksek partikül madde oluşumuna neden olabilir [21]. Bu çalışmanın konusu olan yüksek enerji yoğunluğuna sahip yanma odasında da bu yöntem kullanılmaktadır. Yüksek ısıl yoğunluklu (5 ile 50 $MW/m^3 - atm$) yanma odalarında, yakıt ve havanın yüksek hızlarda ve ayrı girişlerden yanma odasına gönderilmesi ile istenilen ve kontrol edilebilen yüksek iç resirkülasyon ve yanma sonu ürünlerin karışımı uygulanabilir.

Ön karışımlı yanma durumunda ise kimyasal reaksiyon başlangıcından önce yakıt ve oksitleyici tamamen karıştırılır. Daha sonra bu karışım, yanmayı başlatacak enerji ile tetiklenir (genellikle buji gibi bir ateşleyici kullanılır). Ön karışımlı yanma, daha homojen bir karışımın yanmasıyla sonuçlanır, bu da daha verimli ve temiz bir yanma sağlar. Bu

yöntemde, yakıt ve hava karışımının homojen olması, daha iyi yanma kontrolü, daha düşük zararlı emisyonlar (azot oksitler ve partiküler madde) ve daha yüksek motor verimliliği elde etmek için önemlidir.

Kısmi ön karışımlı yanma literatürde "Partial Premixed Combustion (PPC)" olarak adlandırılan bir yanma sürecidir. Kısmi ön karışımlı yanma sırasında, hava ile yakıtın tamamı ön karıştırma aşamasında karıştırılmaz. Bu yöntemde, yakıt ve hava karışımının bir kısmı önceden karıştırılırken, bir kısmı ayrı olarak yanma odasına enjekte edilir. Bu yöntemde, ön karışımlı gaz bulutunun oluşması için bir miktar yakıt önceden karıştırılır ve homojen bir karışım oluşturulur. Bu ön karışım daha sonra yanma odasına enjekte edilir. Bu ön karışımlı gaz bulutu, daha düşük sıcaklık ve basınçlarda ön karışım aşamasında kontrollü bir şekilde yanar. Kısmi ön karışımlı yanma, avantajlarından dolayı yaygın bir araştırma konusudur. Bu yanma tekniği, daha düşük yakıt tüketimi, daha az emisyon (azot oksitler ve partiküler madde) ve genel olarak daha yüksek verim sağlayabilir.

2.3. Hava Kirliliği

Doğaya ve insana zararlı maddelerin havada yoğun olarak bulunması durumuna hava kirliliği denilmektedir. Yanma sonu oluşan ürünler ve yanmamış yakıtlar hava kirliliğine sebebiyet verebilmektedir. Yanma sonu ürünlerden olan azot oksitler (NOx), kükürt dioksit (SO2), Karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO2), uçucu organik bileşikler (VOCs) ve eser miktarda oluşacak diğer maddeler çevre ve insan üzerinde olumsuz etkilere sahiptir. Oluşan bu maddelerin miktarları yakıtın içeriğine göre değişiklik göstermekle birlikte azot oksit ve karbon monoksit oluşumunun kontrol altına alınması, yanma metodunun iyileştirilmesi ile mümkündür.

2.3.1. Azot oksit (NOx) oluşum mekanizmaları

Azot oksitler; azot monoksit (NO), azot dioksit (NO_2), diazot oksit (N_2O), diazot trioksit (N_2O_3) ve diazot pentaoksit (N_2O_5) olarak isimlendirilen bileşiklerdir. Bu bileşikler yanma sırasında çok karmaşık gelişen bir dizi reaksiyon sonucu meydana gelmektedir [22].

Isıl NOx oluşum mekanizması

Yanma odası içerisinde yüksek alev sıcaklıklarının oluştuğu noktalarda, yüksek ısıl enerji ile yakıcı hava veya yakıt içerisinde bulunan azotun oksidasyonu ile oluşur. Zeldovich tarafından önerilen [23] hesaplama yönteminde, alev sıcaklığının pik yaptığı (yaklaşık 1800 K üzeri değerler) sıcaklık değerlerinde aşağıdaki reaksiyonlar sırası ile oluşabilir;

$$O_2 \leftrightarrow 2O \tag{2.1}$$

$$O_2 + M \leftrightarrow O + O + M \tag{2.2}$$

Reaksiyonun bu aşamasından sonra ısıl azot oksit oluşum mekanizması şu şekilde işlemektedir;

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

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{2.4}$$

Reaksiyonda en zor aşama N_2 bağlarının kopmasıdır. Zeldovich bu aşamanın gerçekleşmesinin ancak ani çok yüksek sıcaklık artışının olduğu bölgelerde gerçekleşebileceğini önermektedir [23]. Oksidasyonun gerçekleşmesindeki en önemli unsurlardan bir diğeri oksijene erişim kolaylığıdır. Bu nedenle zengin karışımlarda ısıl azot oksit oluşumunun daha fazla olacağı değerlendirilmektedir. Yanma odası içerisinde aşırı sıcak noktaların oluştuğu küçük alanlarda ısıl yolla azot oksit oluşumu dramatik seviyede artış göstermektedir. Örneğin yaklaşık her 90 K sıcaklık artışının oluşan azot oksit seviyesini iki katına çıkardığı değerlendirilmektedir.

Ani NOx oluşum mekanizması

Yanma reaksiyonun gerçekleştiği sınır bölgelerde azot atomlarının ani oksidasyonu olarak tanımlanmaktadır. Fenimore tarafından önerilen mekanizmada, ısıl NOx oluşum mekanizmasının aksine yakıtın zengin olduğu reaksiyon bölgesinde azotun oksitlenmesi gerçekleşir. Düşük sıcaklıklarda (1800 K ‘den az değerlerde) oluşan NOx miktarının önemli bir kısmı bu mekanizma ile oluşmaktadır. Ani NOx oluşum mekanizması ile oluşan NOx miktarı diğer iki yöntem ile oluşan NOx miktarına göre oldukça düşük seviyededir. Genel olarak kabul gören ani NO oluşum yolu şu şekildedir;

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N \quad (2.5)$$

$$C_2 + N_2 \leftrightarrow 2CN \quad (2.6)$$

$$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2O \quad (2.7)$$

Bu reaksiyonlar sonucu oluşan N ve CN 'in oksidasyonu ile NO oluştuğu varsayılmaktadır;

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \quad (2.8)$$

$$CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO \quad (2.9)$$

Yanma sırasında oluşan CH bileşiği ani NOx oluşumunun en önemli etkenidir. Ayrıca yakıtın parçalanması sırasında açığa çıkabilecek diğer kimyasal yapılar ve maddelerde, örneğin CH_2, C_2, C_2H, ani NOx oluşum mekanizmasının gerçekleşmesine yol açabilir.

Yakıt NOx oluşum mekanizması

Yakıt azotunun NO'ya dönüşmesi yerel azot hava-yakıt oranı ile son derece ilişkilidir. Yakıt damlacıklarının ısınması sonucunda azot içeren bileşikler gaz fazında serbest kalır. HCN, N, CN ve NH gibi azot içeren ara ürünler, bileşenlerin ısıl ayrışması sonucu oluşur ve NOx 'a dönüşebilirler [24].

2.3.2. Karbon monoksit oluşumu

Yanma sırasında CO oluşumunun temel olarak iki nedeni olduğu değerlendirilmektedir. Bunlardan ilki, yetersiz hava ile yanma koşulunda veya yakıtın hava ile yeterince karışamaması durumunda eksik yanma ürünü olarak CO oluşmasıdır. İkinci neden, alev sıcaklığının çok yüksek olması sonucu gerçekleşen reaksiyonlar sonucu CO oluşmasıdır. Tüm bu ana gerekçelerin yanında, kömür gazlarının yakılması durumunda, kömür gazlarının içeriğinde bulunan karbon monoksitin yanma odasından yanmadan çıkması ürünlerle daha fazla CO görülmesine neden olabilir.

2.3.3. Karbon dioksit oluşumu

Karbon dioksit, yanma reaksiyonun tam gerçekleşmesi durumunda karbon atomlarının oksitlenmesi ile ısı açığa çıkarması sonucu ürün olarak meydana gelir. Küresel ısınmaya sebep gösterilen sera gazları arasında yer alda bile esasen doğaya zararlı bir emisyon değildir.

3. YANMA TEKNOLOJİLERİ

Yanma teknolojinin geliştirilmesi ile, daha verimli yakıt kullanımı (yanma odasına gönderilen yakıt miktarı başına alınan enerji miktarının artırılması), yanma sonu ortaya çıkan gazlardaki ısı enerjisinin azaltılarak işe dönüştürülmesi (yoğuşma teknolojisi) ve yanma sonucu ortaya çıkan zararlı gazların miktarının seviyesinin azaltılması amaçlanmaktadır. Yukarda belirtilen faydaların elde edilmesi ile doğrudan ve dolaylı olarak toplam enerji verimliliğinin artırılması ve çevrenin korunması mümkündür. Özellikle yanma sonu zararlı gazların miktarının azaltılmasına yönelik olarak geliştirilen bazı güncel teknolojiler bu bölümde başlıklar halinde tanıtılmaktadır [25].

3.1. Renksiz Dağıtılmış Yanma

Renksiz dağıtılmış yanma, literatürde "Colorless Distributed Combustion (CDC)" olarak isimlendirilir. Renksiz dağıtılmış yanma, oksijen konsantrasyonunun düşürülmesi, yanma sonu oluşan reaktif gazların yanma odası içerisinde yeniden yanma bölgesine doğru iç ve dış resirkülasyon ile sürüklenmesi ve bu sayede tepkime bölgesinde lokal olarak oksijenin seyreltilmesi yolu ile gerçekleşir. Bu sırada yanma odasına gönderilen oksitleyici havanın sıcaklığı da artmaktadır ve bu durum hacimsel anlamda oksijen yoğunluğunun düşürülmesine de yardımcı olmaktadır. Yanma sonucu oluşan renksiz hava çıkışı, gözle görülür bir emisyon gazı oluşumunun oluşmadığını göstermektedir ve bu nedenle bu teknik tanımlanırken renksiz ifadesi kullanılmaktadır [26]. Ayrıca, normal yanma sırasında reaksiyon kaynaklı oluşan maviye yakın renkli ışık salınımının da renksiz dağıtılmış yanma şartlarında neredeyse gözle görülmeyecek seviyede saydamlaştığı ve bu nedenle renksiz olarak isimlendirildiği de belirtilmiştir [7].

Renksiz dağıtılmış yanma teknolojisi yüksek sıcaklıkta hava yanması (HiTAC) ile bazı temel prensipleri paylaşır [27]. Yüksek sıcaklıkta hava yanmasında, renksiz dağıtılmış yanmadan farklı olarak, atmosfer basıncına yakın uygulamalarda çok düşük emisyon değerlerinin elde edilmesini sağlarken, oksijen konsantrasyonu azaltılmış oksitleyici havanın ön ısıtmalı olarak yanma odasına gönderilmesi ile uygulanır.

Renksiz dağıtılmış yanma, normal yanma prosesine göre oluşum süreci ve çıktıları olarak fark göstermektedir. Normal yanma prosesi, küçük, yoğun bir reaksiyon alanında, yüksek

reaksiyon oranı ve yerel sıcak noktaların oluşması olarak tanımlanır [26]. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarında ise sıcaklığın yanma odası boyunca homojen olarak dağılması, yanma odası boyunca daha düşük sıcaklık farklarının gözlemlenmesi esastır. Renksiz dağıtılmış yanma şartlarında yanmanın sağlanması, daha yoğun ısıl enerjiye sahip yanma odalarının tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Yanmanın yanma odası boyunca homojen olarak gerçekleşecek olması çok yüksek sıcaklıklara ulaşan yerel sıcak alanların oluşumunu engelleyeceği için, üretilen yanma odası parçaları için (gaz türbini bıçakları, yanma odası iç parçaları, enjektörler gibi) yüksek sıcaklıkta çalışmaya yönelik limitler düşürülmüş olacak veya daha düşük yanma odası hacminde daha yüksek enerji açığa çıkarılarak daha fazla güç elde etmek mümkün olabilecektir [28]. Özellikle havacılık alanında ağırlığın ve hacmin olabildiğince düşürülmesi gerektiği göz önüne alındığında bu durum ek olarak önem kazanmaktadır [7, 26].

3.2. Zayıf Yanma

Zayıf yanma, literatürde “Lean Combustion” olarak isimlendirilir. Hava-yakıt oranı çok yüksek olan yanma koşullarında, aşırı hava ile yanmanın sağlanması ile elde edilir. Bu sayede tepkime sonunda yanmamış yakıt ve karbon monoksit emisyonları en az sevidedir. Düşük reaksiyon hızları ve buna bağlı daha geniş bir alan boyunca ısı salınımı hedeflenir [29]. Zayıf yanma şartlarının elde edilmesinde, hava ve yakıtın karışımı parametreleri çok etkili ve hassastır. Zayıf yanma, yanma verimliliğini artırırken oluşan düşük yanma sıcakları ile emisyon miktarlarının da düşmesine sebep olmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalarda daha dengeli ve istikrarlı yanma süreci sağladığı belirtilmektedir [30, 31].

3.3. Hafif veya Orta Yoğunlukta Düşük Oksijenli Seyreltme

Hafif veya Orta Yoğunlukta Düşük Oksijenli Seyreltme teknolojisi, literatürde “Moderate or Mildly Intense Low-Oxygen Dilution (MILD)” olarak isimlendirilir. Yanma odasına gönderilen oksitleyici içerisindeki oksijenin yoğunluğunun seyreltilmesi ile elde edilen koşullarda yanmanın gerçekleşmesini tanımlar [32]. Oksijen oranının düşürülmesi reaksiyon süresini uzatır ve alev en yüksek sıcaklığını azaltarak azot oksit oluşumun azalmasına sebebiyet verir. Yapılan araştırmalara yanma sırasında 1800 K sıcaklık değerinin üzerinde azot oksit oluşum mekanizmasının işlediği ve zararlı azot oksit gazlarının oluştuğunu, inert gaz olarak tepkimeye giren azotun yanma odasında zararlı

bileşikler oluşturduğunu göstermektedir [33]. Yapılan çalışmalara göre en yüksek alev sıcaklığının 1800 K altında tutulabildiği durumlarda zararlı azot oksit bileşiklerinin oluşumu daha az olabilecektir [33].

Yanma odasına gönderilen gazlardaki oksijeni seyreltmek için EGR veya FGR metotları ile egzoz gazları kullanılabileceği gibi, başka inert gazlar da kullanılabilir. Inert gazların varlığı ile yanma tepkimelerinin yanma odası boyunca daha geniş bir alan boyunca gerçekleşmesi hedeflenmektedir [34, 35].

3.4. Yüksek Sıcaklıkta Hava Yanması

Yüksek Sıcaklıkta Hava Yanması, literatürde "High Temperature Air Combustion (HiTAC)" olarak isimlendirilir. Yanma odasına gönderilen oksitleyici havanın yüksek sıcaklıklarda yanma odasına gönderilmesi ve yüksek hava-yakıt oranında gönderilmesini tarifler [36]. Yanma odasına gönderilen havanın ısıtılmasının olumlu ve olumsuz etkileri olmakla beraber, bu yanma teknolojisinde yanma stabilitesini sağlamak, ısı transfer oranını artırmak ve kirletici emisyonları düşürmek hedeflenmektedir [37]. HiTAC yanma teknolojisinde genellikle giriş havasının sıcaklığı hava ve yakıt karışımının kendiliğinden tutuşma sıcaklığından daha yüksektir. Bu sebeple gönderilen havanın olması gereken sıcaklığı kullanılan yakıta göre değişmektedir.

Uygulamada yanma sonu gazların sahip olduğu ısı enerjisi, bir ısı dönüştürücüsü ile yanma odasına gönderilen havanın sıcaklığını artırmak için kullanılır. Enerji geri kazanımı sağlamanın yanında adyabatik alev sıcaklığının artması neticesinde yanma verimi artmaktadır [27, 38].

3.5. Alevsiz Oksidasyon

Alevsiz oksidasyon yanma tekniği, literatürde "Flameless Oxidation (FLOX)" olarak isimlendirilir. Yakıtın ve oksijenin homojen bir şekilde karıştığı, alevin gözlemlenmediği ve yanmanın görece düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği yanma tekniğidir. Bu tekniğin temel amacı, yanma kimyasal tepkimesinin yanma odası boyunca dağılarak gerçekleştirilmesidir [39]. Bu amaca yönelik olarak yakıt ve havanın hızlı ve homojen karışımı, görünür alev oluşumunu azaltırken, reaksiyonun daha geniş bir hacimde gerçekleşmesini sağlar. Yanma

reaksiyonu normal koşullar altında, hava ve yakıtın ilk temas ettiği alanda gerçekleşmektedir. Bu alan hava ve yakıtın momentumu, yakıtın kimyasal ve fiziksel özellikleri, yakıt ve havanın karıştırılma hızı gibi faktörlerden etkilenir. Alevsiz oksidasyon tekniğinin sağlanabilmesi için bu parametreler üzerinde değişiklikler yapmak gereklidir. Alevsiz oksidasyon şartlarının sağlandığı koşullarda, yanma reaksiyonu, hava ile yakıtın ilk temas ettiği noktadan başlayarak daha ileri noktalara kadar devam eder [40].

Alevsiz oksidasyon tekniği, endüstriyel ısıtma sistemleri, gaz türbinleri, ısıl işlem fırınları gibi alanlarda uygulanmaktadır. Düşük emisyon değerleri, yüksek verimlilik ve stabil yanma süreci alevsiz oksidasyon tekniğinin sağladığı avantajlardır [41].

4. YANMANIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ KULLANILARAK MODELLENMESİ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), belirli bir kontrol hacmi içerisinde kütle ve enerji korunumu denklemlerinin uygulanması ile akışın sayısal simülasyonunun oluşturulması tekniğidir. Bu yöntemde oluşturulacak simülasyon için önceden tanımlamalar yapılarak ve çeşitli varsayımlar belirtilerek incelenmek istenilen sistem, sayısal olarak modellenir. Sisteme kontrol hacminin geometrisi, sınır şartları, akışkanların fiziksel özellikleri, türbülans modeli gibi parametreler girilir. Yapılan sayısal simülasyonda çözdürülmek istenen denklemler seçilir ve çözümün zamanın fonksiyonu olarak mı yoksa herhangi bir andaki sabit koşullarda mı elde edilmek istendiği tanımlanır. Çözüm çok basamaklı iterasyonlar neticesinde elde edilir. Kurulan modelin gerçek şartlara ne kadar yakın olduğu, uygun çözüm denklemlerinin kullanılması ve çözüm için belirlenen kabuller/varsayımlar, elde edilen çözümün hassasiyetini doğrudan etkilemektedir [42, 43].

Hesaplamalı akışkanlar mekaniği ile yapılan çalışmalarda, tüm diğer sayısal simülasyon türlerinde de olması gerektiği gibi doğrulama faaliyetlerinin yapılması gerekmektedir. Doğrulama faaliyeti, aranan çözüme benzer şartlarda fiziksel olarak yapılan test veya testler ile buna uygun sayısal simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması ile gerçekleştirilir [44].

HAD yöntemi ile elde edilen sonuçları kıyaslamak, çözümü optimize etmek ve çözüm matrisi içerisindeki olası en iyi koşulları belirlemek, oldukça hızlı ve düşük maliyetli çözümler elde etmek için en geçerli yöntemdir. Bu kapsamda HAD modellemesi, teknik uygulamaların yanı sıra, bilimsel çalışmalar için de oldukça kullanışlıdır [44].

Yanma modellemeleri hakkında yapılan bilimsel çalışmalarda, yanma bölgesinde oluşan reaksiyonların ve sıcaklık-kütle değişimlerinin belirlenmesinde büyük oranda HAD kullanılmaktadır. Bunun başlıca nedeni, fiziksel testlerde alev bölgesinin incelenmesinin zorluğu ve reaksiyonların hızı ve karmaşıklığıdır. Ortaya atılan önerilerin HAD yöntemi ile modellenmesi ve optimize edilmesi yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı günümüzde en geçerli metotlarda biridir [45]. Bu tez çalışmasında da ANSYS Fluent isimli HAD modelleme aracı kullanılarak sayısal çözümler elde edilmiştir.

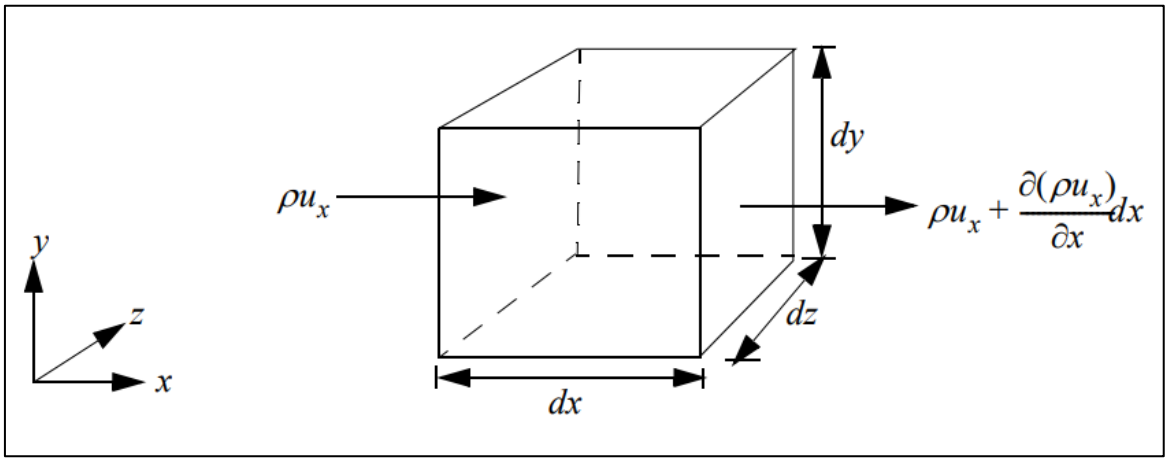
Yapılan çalışmada türbülans modeli seçimi, kütle, momentum ve enerjinin korunumu ile birlikte yanma denklemleri de hesaplamalara dahil edilmektedir. Çalışma kapsamında k-Ɛ türbülans modeli kullanılmıştır. Burada türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisinin dağılım oranı (Ɛ) için eşitlikler çözülmüştür. Ayrıca yanma modeli olarak ön karışımsız yanma şartlarında daha iyi sonuçlar verdiği literatürde bilinen olasılık yoğunluk fonksiyonu (mixture fraction/PDF) yanma modeli kullanılmıştır [46].

4.1. Temel Denklemler ve Yaklaşım

HAD modellemesinde temel yaklaşım, belirlenen bir kontrol hacmini çok küçük hacimlere bölerek, hacimler arasındaki kütle ve enerji transferini ayrı ayrı modellemek yolu ile çözümü elde etmeyi kolaylaştırmaktır. Bu metodun kullanımında en temel unsur fiziğin temel yasalarından olan kütlenin korunumu, türlerin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemlerini tüm çözüm parçaları için uygulanmasını sağlamaktır. Bilgisayar ortamında her bir çözüm parçacığı için korunum denklemleri, sürekli yapılan iterasyonlarla sağlanmaya çalışılır.

4.1.1. Kütlenin korunumu

Akışkanlar dinamiğinde en temel prensip kütlenin oluşturulamayacağı veya yok edilemeyeceğidir. Bu ifade çözüm için bölünen küçük hacimler için süreklilik denklemini türetmek için kullanılabilir. Burada bahsi geçen küçük hacimler $V = d_x d_y d_z$ olarak tanımlanmaktadır ve Şekil 4.1 ’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çözüm için tanımlanan çok küçük kontrol hacminin tanımı ve gösterimi [47]

Tanımlamaların daha kolay anlaşılması için, sol kısımdan X doğrultusunda kontrol hacmi içerisine giren zamana bağlı kütle transferi denklem (4.1) ile ifade edilir.

$$\dot{m}_x = \rho u_x d_y d_z \tag{4.1}$$

Eğer x yönündeki hız ve yoğunluk değişirse, Taylor's teoremine göre sağ kısımdan çıkan kütle transferi denklem (4.2) ile ifade edilir [47].

$$\dot{m}_{x+d_x} = \left[\rho u_x + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} d_x\right] d_y d_z \tag{4.2}$$

(4.1) ve (4.2) numaralı denklemlerin farkı, belirlenen hacimdeki net kütle transferini göstermektedir. Belirtilen hacimde x doğrultusunda gerçekleşen net kütle transferi denklem (4.3) ile ifade edilir.

$$\Delta\dot{m}_x = \left[\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x}\right] d_x d_y d_z \tag{4.3}$$

Üç boyutlu bir geometri için kütlenin korunumu denklemleri çözülürken, tüm yönlerdeki kütle transferleri denkleme dahil edilir. Tüm yönlerdeki kütle transferlerinin denkleme eklenmesi ile, net kütle transferi denklemi (4.4) numaralı denklem ile ifade edilir.

$$\Delta\dot{m}_{net} = \left[\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z}\right] d_x d_y d_z \tag{4.4}$$

Hacim içerisindeki zamana bağlı kütle değişimi (4.5) numaralı denklem ile ifade edilir.

$$\Delta\dot{m}_{net} = -\frac{\partial\rho}{\partial t} d_x d_y d_z \tag{4.5}$$

Eşitlik (4.4) ve (4.5) numaralı denklemlerin eşitliğin iki tarafına yazılarak sadeleştirilmesi ile süreklilik denkleminin diferansiyel formu elde edilir.

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial\rho}{\partial t} \tag{4.6}$$

Çözümü yapılacak problemin zamandan bağımsız olması durumunda $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ olarak denklemden çıkarılabilir. Bu çalışmada zamandan bağımsız, değişen sıcaklık ve yoğunlukta akışkan ile çözüm yapılmıştır. Kütlenin konumunu ilkesi gereği belirlenen her bir diferansiyel hacim için (4.6) numaralı denklem çözüm için kullanılmaktadır.

4.1.2. Kimyasal türlerin korunumu

Birden fazla kimyasal tür içeren akışkanlar için, her bir tür için süreklilik denklemi ayrıca çözülmelidir. "n" sayıdaki kimyasal tür için yerel kütle oranı Y_n (4.7) numaralı denklem ile ifade edilir.

$$\frac{\partial(\rho Y_n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_n)}{\partial x_i} = -\frac{\partial J_{n,i}}{\partial x_i} + R_n \tag{4.7}$$

Burada R_n kimyasal reaksiyon neticesinde n türünün oluşum oranı ve $J_{n,i}$ tür konsantrasyonundaki gradyanlardan dolayı ortaya çıkan n türünün difüzyon akışıdır. Laminer akışlarda $J_{n,i}$ tanımı denklem (4.8) de olduğu gibi Fick's kanunu ile çözülebilir [47].

$$-J_{n,i} = \rho D_n \frac{\partial Y_n}{\partial x_i} \tag{4.8}$$

Burada D_n karışım içerisindeki n türünün yayılım katsayısıdır.

4.1.3. Momentumun korunumu

Newton'un ikinci yasasında yer alan "Yapıyı etkileyen net kuvvet, momentumundaki değişime eşittir" ifadesi ile momentumun korunumu açıklanmaktadır. Sıkıştırılamaz akışkanlar için i yönündeki momentum denklemi denklem (4.9) deki gibi ifade edilir [47].

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho u_i u_j\right)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \tag{4.9}$$

Burada ρ statik basınç, ρg_i i yönündeki yer çekimi kuvveti, F_i i yönündeki dış kuvvetler ve τ_{ij} ise gerilme tensörü olarak ifade edilmektedir. Bu denklem Navier-Stokes momentumun korunumu denklemi olarak literatürde yer almaktadır.

4.1.4. Enerjinin korunumu

Enerjinin korunumu denklem (4.10) ile ifade edilebilir [24].

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial\left(u_i(\rho E+p)\right)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i}-\sum_k h_n J_n+u_j\left(\tau_{ij}\right)_{eff}\right]+S_h \tag{4.10}$$

Burada k_{eff} efektif iletkenliktir ve iletkenlik ile türbülanslı iletkenliğin toplamıdır. J_n n türünün yayılımı, $\left(\tau_{ij}\right)_{eff}$ efektif gerilme tensörüdür. (4.10) numaralı denklemde eşitliğin sağ kısmındaki üç terim iletim kaynaklı, tür yayılımı kaynaklı ve viskozite dağılımı kaynaklı enerji transferini temsil etmektedir. S_h ise kimyasal reaksiyon ve diğer ısı kaynaklarından gelen ısıdır. E ile gösterilen enerji denklemi (4.11)'de ifade edilmektedir [47].

$$E=h-\frac{p}{\rho}+\frac{{u_i}^2}{2} \tag{4.11}$$

Burada h ile gösterilen entalpi değeridir ve ideal gazlar için (4.12)numaralı denklem ile ifade edilebilir.

$$h=\sum_n Y_n h_n \tag{4.12}$$

(4.12) numaralı denklemde ifade edilen Y_n n türünün kütlesel oranıdır ve denklemdeki h_n (4.13) numaralı denklemdeki gibi ifade edilebilir. Denklemde yer verilen referans sıcaklık T_{ref} değeri 298.15 K'dir [47].

$$h_n=\int_{T_{ref}}^{T} c_{p,k}\,dt \tag{4.13}$$

Yukarıda bahsi geçen korunum denklemleri yardımı ile HAD problemlerinin sayısal olarak çözümü mümkün olmaktadır. Sayısal çözüm için özelleşmiş yazılım araçları ile geometri mesh ismi verilen ve diferansiyel hacimleri temsil eden hacim parçacıklarına bölünmekte ve her bir parçacık arasında kütle ve ısı transferi modellenmektedir [47].

4.2. Akışın Modellenmesi

Akışın laminer veya türbülanslı olması, HAD çözüm metodunun belirlenmesi üzerine etkilidir. Önceki deneysel çalışmalardan görülebileceği üzere yanma odasını içerisinde gerçekleşen akış, kimyasal ve mekanik etkiler altında yüksek hızlarda gerçekleşmektedir ve oldukça dağınık olarak türbülanslı olarak gerçekleşmektedir. Yanma odası içerisinde belirlenen herhangi bir noktadaki hız ortalama ve değişen bileşenlerin toplamı olarak ($u_i = \bar{u}_i + u_i'$) dikkate alınmaktadır [48].

4.2.1. Türbülans modeli

Yanma odası içerisinde gerçekleşen akışın karmaşık ve türbülanslı olması sebebi ile literatürde sıklıkla kullanılan standart k-Ɛ türbülans modeli en uygun çözümlerin elde edilmesine yardımcı olmaktadır [45]. Eddy-viskozite modeli olarak da anılan çözüm modeli, Reynolds gerilmesinin, ana hız grandyanı ile orantılı olduğu varsayımı ile oluşturulmuştur. Bu varsayım Boussinesq hipzet olarak bilinir [48]. Bu türbülans modelinde i ve j yönündeki gerilmeler denklem (4.14)'de verilmektedir.

$$-\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] - \rho\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{4.14}$$

Burada μ_t türbülans viskozitesini, δ_{ij} kroneker delta tensörünü, u_i ve u_j i ve j doğrultusundaki ortalama hızları, u_i' ve u_j' değişen hızları ve denklemdeki k ifadesi türbülans kinetik enerjisini temsil etmektedir [48].

Türbülans girdap viskozitesi laminer akışta moleküler vizkoziteden farklı olsa da moleküler vizkozite ile aynı görevi görür. Denklemde moleküler vizkozite yerine efektif vizkozite kullanılır. Türbülans viskozitesinin (μ_t) türbülans hızı ve uzunluk skalası ile orantılı olduğu kabul edilir. Bu skalalar türbülans kinetik enerjisi (k) ve yayılma oranı (Ɛ)

kullanılarak hesaplanabilir. Bu hesaplama denklem (4.15) ‘de verilmiştir. Denklemde verilen C_μ deneyler sonu elde edilen bir sabittir.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4.15}$$

Türbülans viskozitesi değerini belirlemek için ihtiyaç duyulan türbülans kinetik enerjisi (k) denklem (4.16) ile hesaplanabilir [46].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right) + G_k - \rho\varepsilon \tag{4.16}$$

Türbülans kinetik enerjisinin yayılma oranı (Ɛ) ise denklem (4.17) ile hesaplanabilir [48].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{1\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4.17}$$

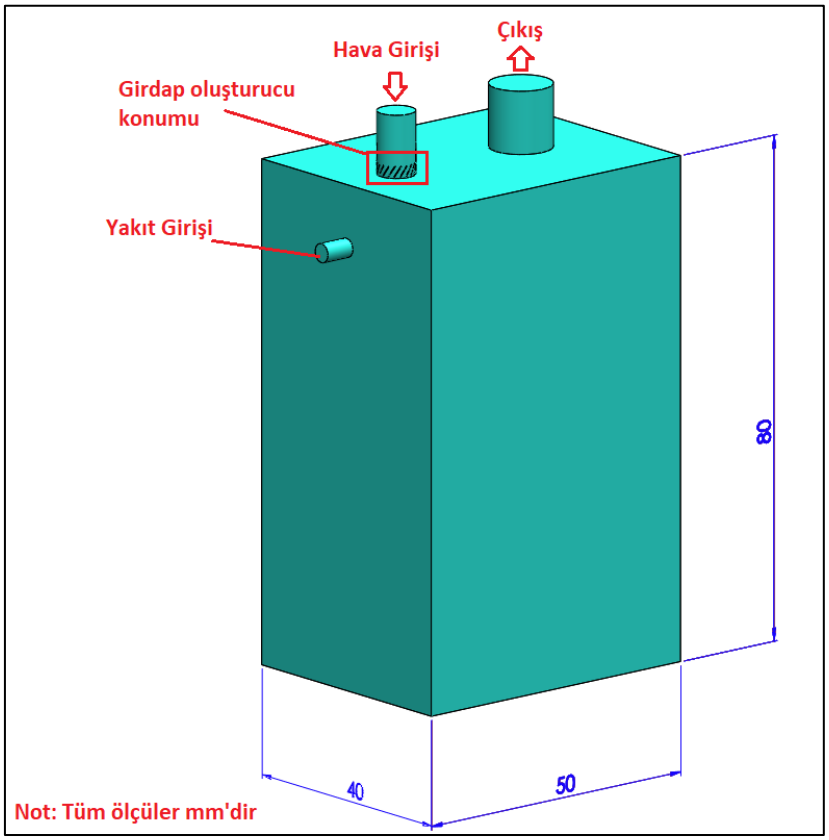
Burada belirtilen G_k ortalama hız gradyanından dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimini, $C_{1\varepsilon}$ deneysel sabiti, σ_k ve σ_ε ise Prandtl sayılarını temsil etmektedir. k-Ɛ türbülans modelinde kullanılan sabitler Çizelge 4.1’de verilmektedir [48].

Çizelge 4.1. k-Ɛ türbülans modelinde kullanılan sabitler [48].

Tanım	C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
Sabit Alınan Değer	0,09	1	1,3	1,44	1,92

5. MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında yüksek iç resirkülasyon özelliği olan bir yanma odası tasarımı kullanılmıştır. Yanma odasının genel görünümü ve boyutları Şekil 5.1'de verilmiştir. Bu yanma odasının çalışmada tercih edilmesinin sebebi, doğalgaz enerji dönüşüm santrallerinde ve havacılık alanında kullanılan gaz türbinlerinde kullanılan yüksek enerji yoğunluğu ve iç resirkülasyon yapısını temsil edebilmesi, literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan yanma odalarının benzer yapıda olması ve bu sebeple bu çalışmanın çıktılarının diğer çalışmalar ile karşılaştırılmasının kolay olabileceği ve literatüre somut katkısının daha fazla olacağının değerlendirilmesidir. Bu yanma odası, yakıt ve havanın, yanma odası boyunca daha iyi karışmasını sağlayacak şekilde iç resirkülasyona uygun bir geometriye sahiptir. Literatürde benzer yanma odası geometrisi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda, yanma odasının ısıl enerji yoğunluğunun gaz türbinlerine yakın olarak belirlendiği koşullar değerlendirilmiştir. Bu kapsamda esasen mikro düzeyde yanma incelenirken, yüksek enerji yoğunluklu gaz türbini yanma odalarının modellemesine ve bu türbinlerde yanmanın daha iyi araştırılmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 5.1. Yanma odası genel yerleşimi ve genel boyutları (ölçüler mm'dir)

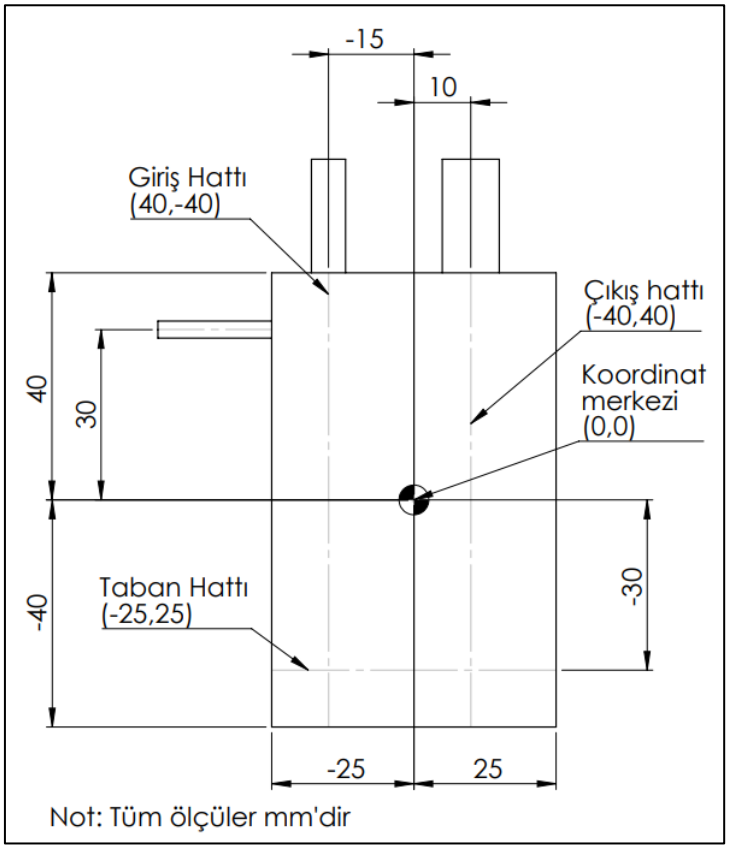
Şekil 5.1'de belirtildiği gibi; yanma odasına, ön karışım olmaksızın, hava ve yakıt ayrı kanallardan aktarılmaktadır. Hava yanma odasının üst kısmından yanma odasına girmekte iken, yakıt buna doksan derece açı yapacak şekilde verilen ölçü ve mesafelerden yanma odasının yan duvarından gönderilmektedir. Yanma sonu ürünler, hava giriş kanalına paralel konumlandırılmış çıkış kısmından dışarı atılmaktadır.

Yanma odasına gönderilen tüm yakıtın yanması neticesinde 10 kW gücünde ısı enerjisi elde edilebilecek şekilde yakıt debileri metan ve kok fırını gazı yakıtları için hesaplanmıştır. Eşdeğerlik oranı 0,83 olacak şekilde gönderilen yakıta göre hava miktarı hesaplanmış ve hava girişinden yanma odasına gönderilmiştir. Yapılan çalışma boyunca bu değerlerde bir değişiklik olmamıştır.

Çalışmanın ilk safhasında metan gazı ve kok fırını gazı için; yanma odasına gönderilen havanın oksijen oranı değiştirilerek, renksiz dağıtılmış yanma koşulu elde edilmek istenmiştir. Bu kapsamda öncelikle havadaki oksijen oranı %21 olarak (standart hava koşulu) alınmış, daha sonra %19, %17, %15 oksijen oranına sahip hava, yanma odasına gönderilmiştir. Burada dikkat edilen husus, oksijen miktarının eşdeğerlik oranına göre sabit tutulup, havanın içindeki azotun artırılarak toplam hava içindeki oksijen yüzdesinin azaltılmasıdır. Oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranı düştükçe gönderilen hava debisi artmaktadır. Yapılan çalışma ile aynı güç değerinin elde edildiği koşullarda yanma odası boyunca sıcaklık dağılımı, hız dağılımı ve NOx oluşan bölgelerin tespiti ile yanma odasından çıkan emisyonların değişimi gözlemlenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında metan gazı ve kok fırını gazı için; yanma odasında gönderilen hava ve yakıt debisi ve içeriği değiştirilmeden, sadece yanma odasındaki yakıt-hava karışımı girdap oluşturucular yolu ile artırılarak, renksiz dağıtılmış yanma koşulu yakınsanmak istenmiştir. Bu kapsamda hava girişine farklı kanat açılarında ve kanat açısı üzerinden hesap edilen girdap sayısı değerlerinde (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1) girdap oluşturucu eklenmiştir. Bu sayede yanma odasına gönderilen havaya üç farklı eksende momentum kazandırılmıştır. Bu durum yakıt-hava karışımının fiziksel olarak daha iyi olmasını ve bu yolla alevin küçük bir bölgede oluşup yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılması yerine yanma odası boyunca daha geniş bir alanda yanmanın gerçekleşmesine katkı sağlamıştır. Yanmanın yanma odası boyunca daha iyi dağılması, yüksek sıcaklık değerlerinin

görüldüğü küçük alev çekirdeklerinin oluşması durumunu azaltmış ve termal NOx oluşumunu önemli ölçüde düşürebileceği görülmüştür.



Şekil 5.2. Giriş Hattı, Taban Hattı ve Çıkış Hattı izafi hatlarının yanma odası geometrisi üzerinde gösterimi (ölçüler mm'dir)

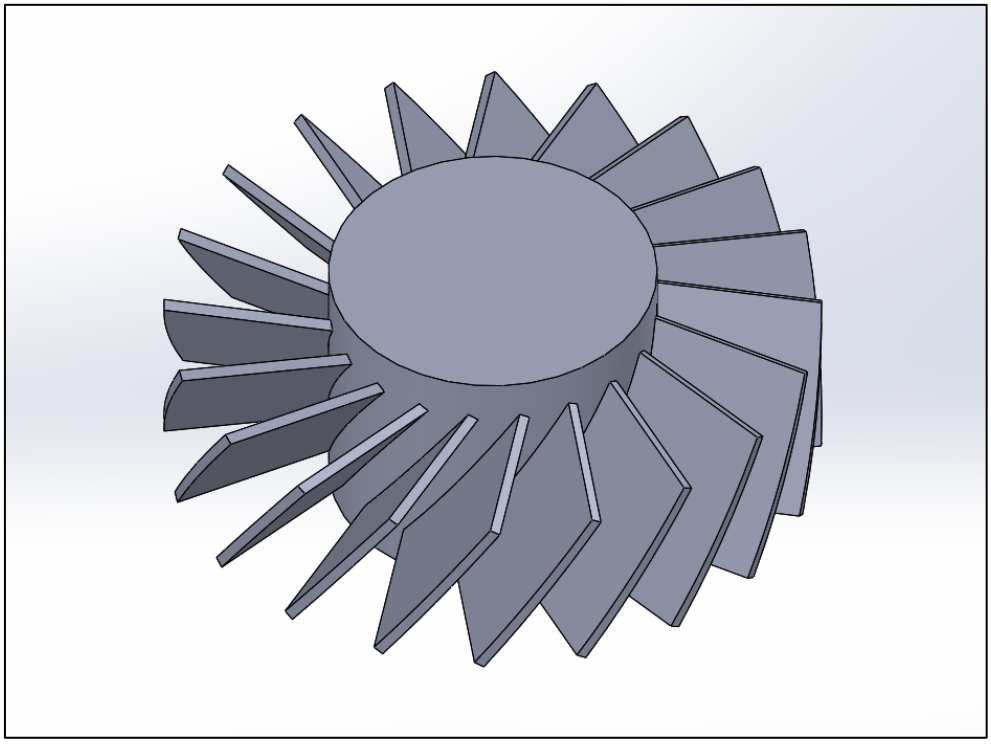
Yanma odası içerisinde karşılaştırmalı grafiklerin oluşturulması amacı ile, iç resirkülasyon oluşum hattı olarak üç ana izafi hat belirlenmiştir. Şekil 5.2'de Giriş Hattı olarak isimlendirilen izafi hat, hava girişi kısmından yanma odası tabanına kadar, hava giriş kısmının ortasından başlayan bir veri toplama hattıdır. Bu hat, Bölüm 6'da verilen grafikler üzerinde +40 mm mesafesi ölçüsünden başlayarak -40 mm ölçüsüne kadar devam etmektedir. Taban Hattı olarak isimlendirilen izafi hat, yanma odası tabanından 10 mm yukarıda olan, yanma odası tabanına paralel ve yanma odası yan duvarları arasında boydan boya yer alan veri toplama hattıdır. Bu hat, Bölüm 6'da verilen grafikler üzerinde -25 mm mesafesi ölçüsünden başlayarak +25 mm ölçüsüne kadar devam etmektedir. Çıkış Hattı olarak isimlendirilen izafi hat, yanma odası tabanından hava çıkış kısmına doğru uzanan, hava çıkış kısmını ortasından geçen bir veri toplama hattıdır. Bu hat, Bölüm 6'da verilen grafikler üzerinde -40 mm mesafesi ölçüsünden başlayarak +40 mm ölçüsüne kadar devam

etmektedir. Yanma odasının merkezi koordinat merkezi olarak tanımlanmıştır ve tüm grafik ve görsellerde ölçü dağılımları buna noktaya göre belirlenmiştir.

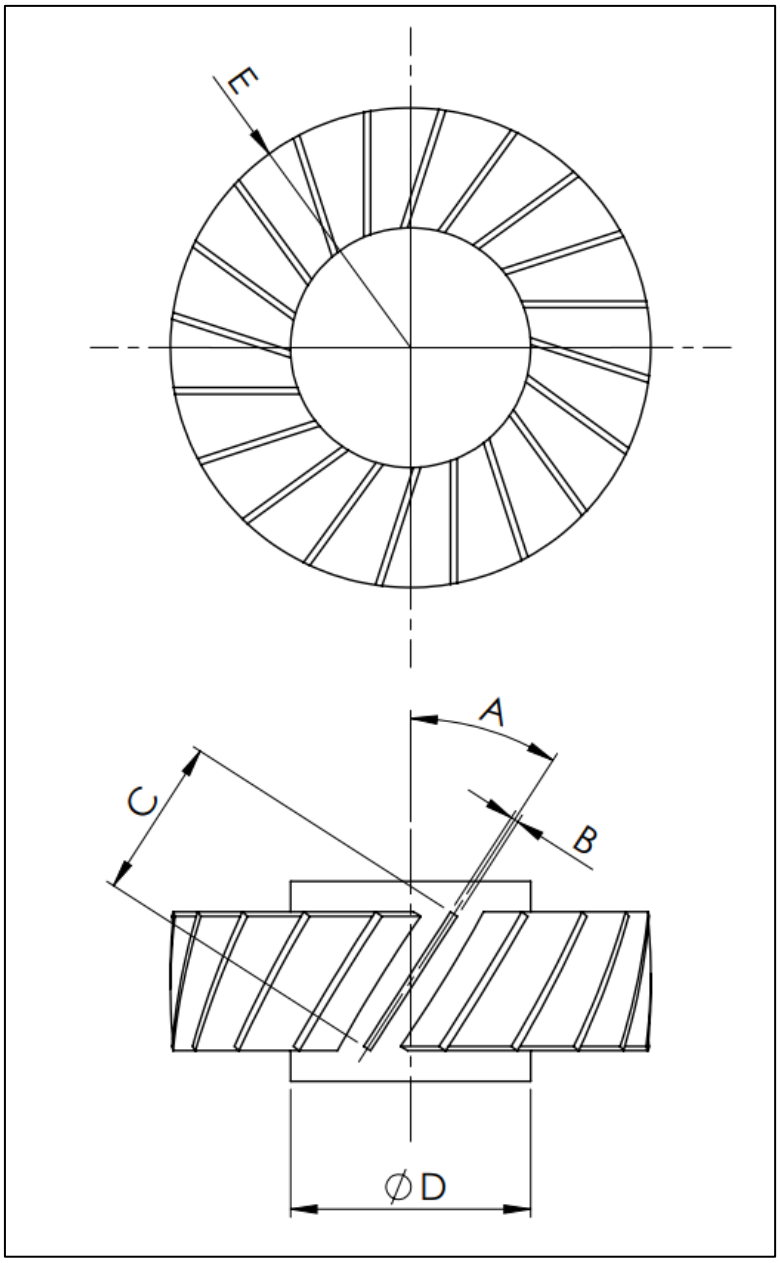
Giriş Hattı, Taban Hattı ve Çıkış Hattı olarak belirtilen doğrultular boyunca sıcaklık, hız ve NOx kütle oranı (mass fraction) değerleri toplanarak grafikler halinde birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Bu yolla sayısal veriler arasındaki değişimleri, kolay değerlendirilebilir ve kıyaslanabilir hale getirmek amaçlanmıştır.

5.1. Özgün Girdap Oluşturucu Tasarımı

Çalışma kapsamında daha iyi dağıtılmış yanma koşulunun elde edilmesine yönelik olarak özgün girdap oluşturucu tasarımları yapılarak yanma odası geliştirilmiştir. Yanma odasına oksitleyici hava girişi kısmına girdap oluşturucu eklenerek yanma odasına gönderilen havanın girdaplar oluşturarak yanma odası boyunca dağılması, bu sırada akış hattına dik doğrultuda yerleştirilmiş yakıt girişinden gelen yakıtı yanma odası boyunca daha iyi dağıtması hedeflenmiştir. Tasarlanan girdap oluşturucuların izometrik görünümü Şekil 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Girdap oluşturucu izometrik görünümü



Şekil 5.4. Girdap oluşturucu genel ölçüleri

Şekil 5.4'de tasarımı yapılan girdap oluşturucuların genel ölçüleri verilmiştir. A ölçüsü, girdap oluşturucu kanatlarının açı değerini vermektedir ve girdap sayısı hesaplanarak (5.1) numaralı denkleme göre altı farklı girdap sayısı için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. B ölçüsü kanatların kalınlığını temsil etmektedir ve tüm durumlarda 0,1 mm değerindedir. C ölçüsü kanatların yükseklik ölçüsüdür ve tüm durumlarda 2 mm değerindedir. D ölçüsü göbek çapı ölçüsüdür ve tüm durumlarda 3 mm değerindedir. E ölçüsü hava giriş kısmı ile aynı ölçüdedir ve yarıçap olarak belirtilen bu ölçü tüm durumlarda 3 mm değerindedir.

Tasarımı yapılan girdap oluşturucular, girdap sayısı S=0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 olacak şekilde kanat açıları (Şekil 5.4 – A ölçüsü) ile boyutlandırılmıştır. Girdap sayısı değeri (5.1) numaralı denklem ile hesaplanmıştır [47].

$$S = \frac{2}{3}\left(\frac{1-\left(\frac{d_h}{d}\right)^3}{1-\left(\frac{d_h}{d}\right)^2}\right)\tan\beta \tag{5.1}$$

Burada S girdap sayısını, d_h girdap oluşturucu merkezinde yer alan göbek kısmı çapını, d girdap oluşturucu dış çapını ve β girdap oluşturucu kanatçıklarının yerleşim açısını temsil etmektedir.

6. TARTIŞMA

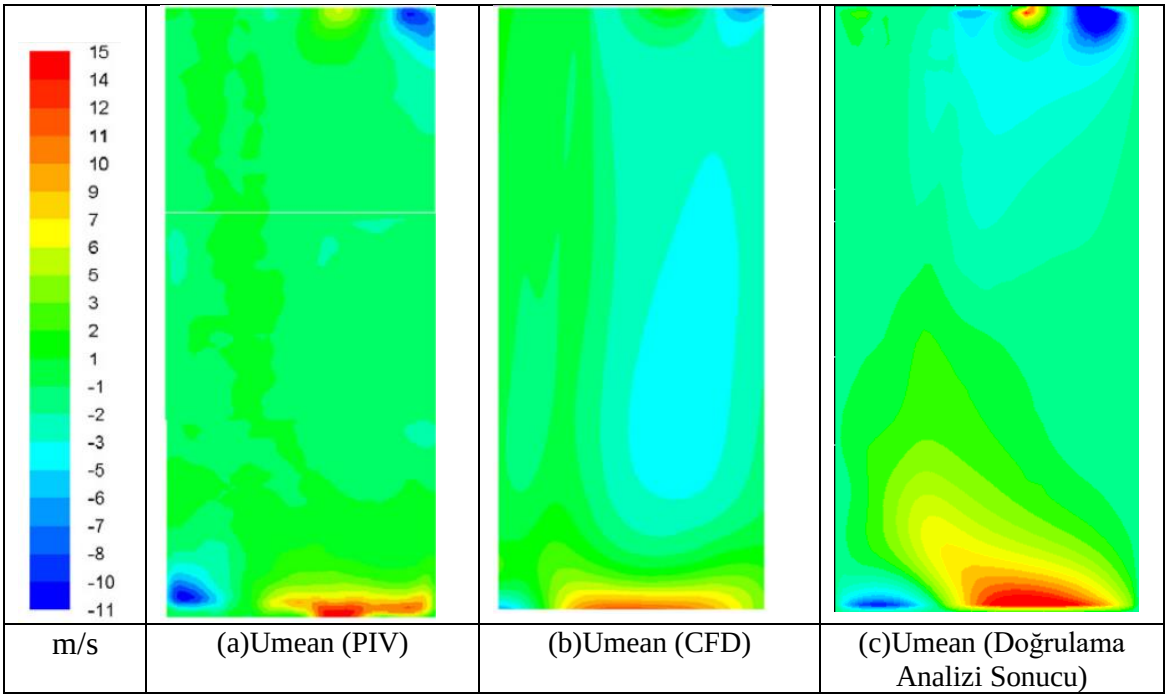
Bu çalışmanın ilk aşamasında, yanma odasına gönderilen havadaki oksijen oranındaki azalmanın, yüksek iç resirkülasyona sahip yanma odası içerisindeki yanma performansına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda; metan ve kok fırını gazı yakıtları, belirlenen yanma odasına 10 kW ısıl güç oluşturabilecek kütlesel debi değerinde ve 0,83 eşdeğerlik oranında, değişen oranlarda (havadaki oksijen oranları sırası ile %21, %19, %17 ve %15) oksijen içeren hava ile tepkimesi incelenmiştir.

Bu çalışmanın ilerleyen kısmında, oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranı ve iki farklı yakıt türünün etkisi ile beraber, yanma odasına gönderilen oksitleyici havanın farklı girdap sayılarına sahip olmasının, yanma üzerine etkileri incelenmiştir. Bu aşamada, hava giriş kısmına eklenen ve özgün olarak tasarlanan girdap oluşturucular çözüm geometrisine eklenerek sayısal çözümlemeler koşturulmuştur. Geri kalan analiz değerleri aynı tutulmuş, girdap sayıları (0; 0,2, 0,4; 0,6; 0,8; 1) olan girdap oluşturucular eklenerek daha geniş bir alanda tüm etkiler incelenmiştir.

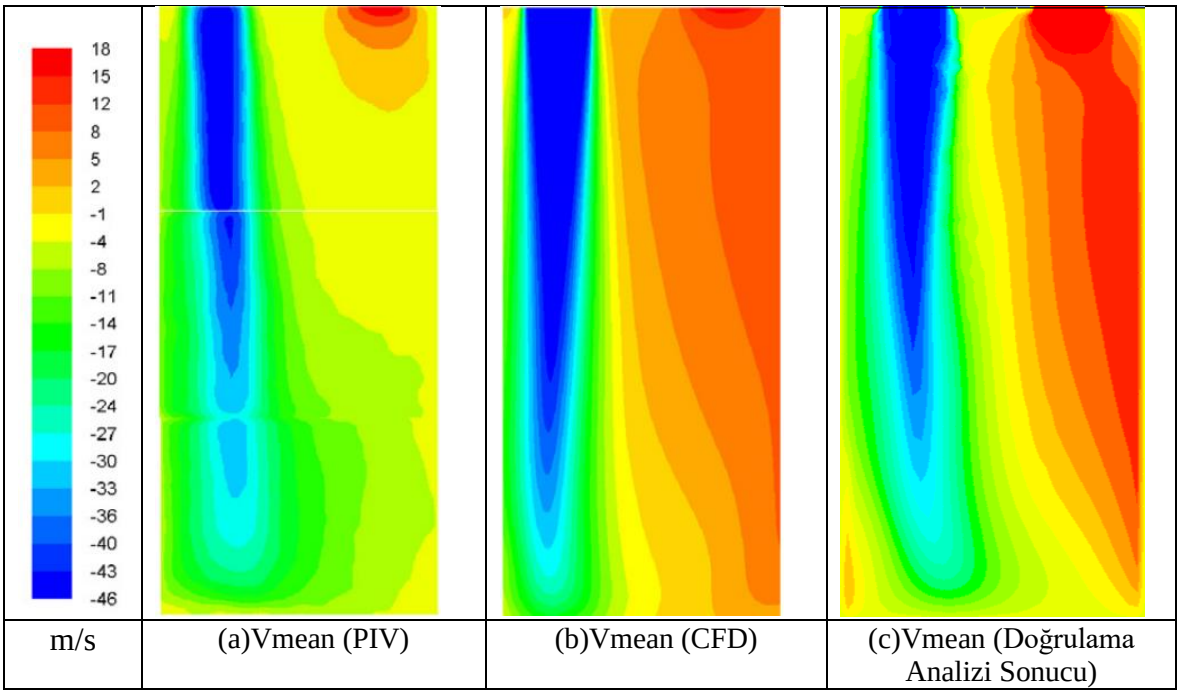
6.1. Doğrulama

Yapılan çalışma sayısal yöntemler ile sonuçların elde edilmesi ve karşılaştırılmasını baz almaktadır. Çalışmada kullanılan yanma odası, Şekil 5.1'de belirtilen ölçülerdedir. Bu çalışmada kullanılan yanma odası, deneysel verilerle doğrulama yapılabilmesine olanak sağlaması amacıyla, Arghode V.K. ve diğerleri, tarafından yapılan deneysel ve sayısal çözüm içeren çalışmada kullanılan yanma odasına benzer ölçülerde seçilmiştir. Çözüm yönteminin doğrulanması amacıyla referans çalışmada [1] belirtilen koşullarda bir doğrulama analizi yapılmıştır. Yapılan doğrulama faaliyeti kapsamında; 6,25 kW ısı gücüne eşdeğer metan gazını 0,8 eşdeğerlik oranında yakmak için gerekli olan hava miktarı hesaplanmış ve 46 m/s olarak yanma odasına gönderilmiştir. Gönderilen havanın sıcaklığı 300 K ve basıncı 1 atm 'dir. Doğrulama faaliyeti kapsamında sadece hava girişinden gönderilen havanın yanma odası boyunca etkisi deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış olup Şekil 6.1'de ve Şekil 6.2'de ilgili referans çalışmanın CFD ve PIV yöntemleri ile, sırası ile U ve V yönlerinde hız grafikleri çözümü ile yapılan doğrulama çalışmasının sırası ile U ve V yönlerinde hız grafikleri çözümü karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Burada görülen hız dağılımları; elde edilen sonuçlar ile referans çalışma

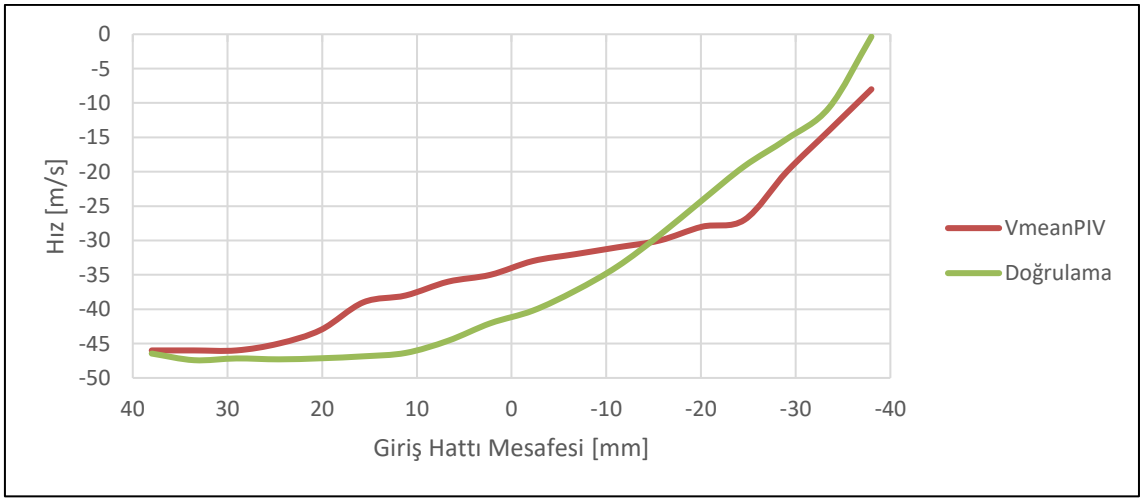
sonuçları arasında iyi bir eşleşme gerçekleştiğini göstermektedir. Bununla birlikte oksitleyici girişinden yanma odası tabanına kadar olan izafi hatta Giriş Hattı, yanma odası tabanına paralel izafi bir hatta Taban Hattı ve yanma odası tabanından çıkış kısmına dik uzanan izafi hatta Çıkış Hattı ismi verilerek, yapılan doğrulama faaliyeti ile deneysel sonuçlar grafikler haline getirilip karşılaştırılmıştır (Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5). Grafiklerde görüleceği üzere tüm hatlar boyunca doğrulama analizi sonuçları ile referans alınan deneysel çalışma sonuçları çok iyi uyum göstermektedir.



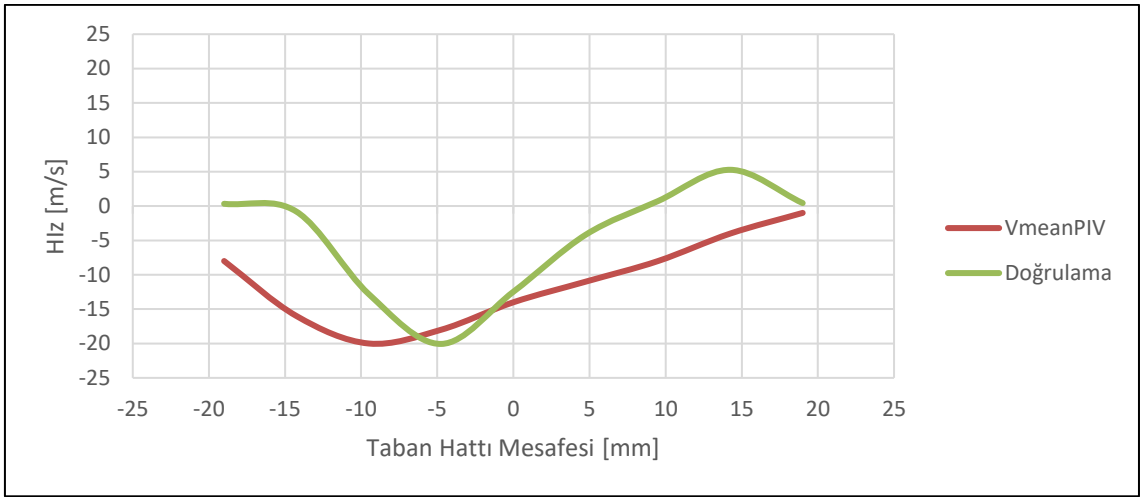
Şekil 6.1. U yönünde ortalama hız dağılımı grafikleri; (a) Referans deneysel sonuçlar [1], (b) Referans CFD sonuçlar [1], (c) Doğrulama analizi sonuçları



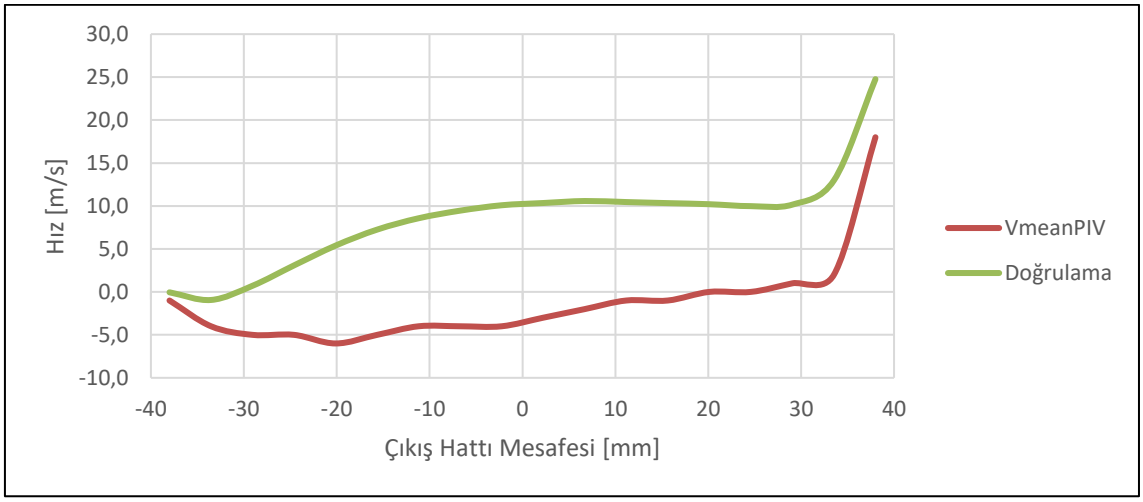
Şekil 6.2. V yönünde ortalama hız dağılımı grafikleri; (a) Referans deneysel sonuçlar [1], (b) Referans CFD sonuçlar [1], (c) Doğrulama analizi sonuçları



Şekil 6.3. Giriş Hattı boyunca V yönünde ortalama hız profili

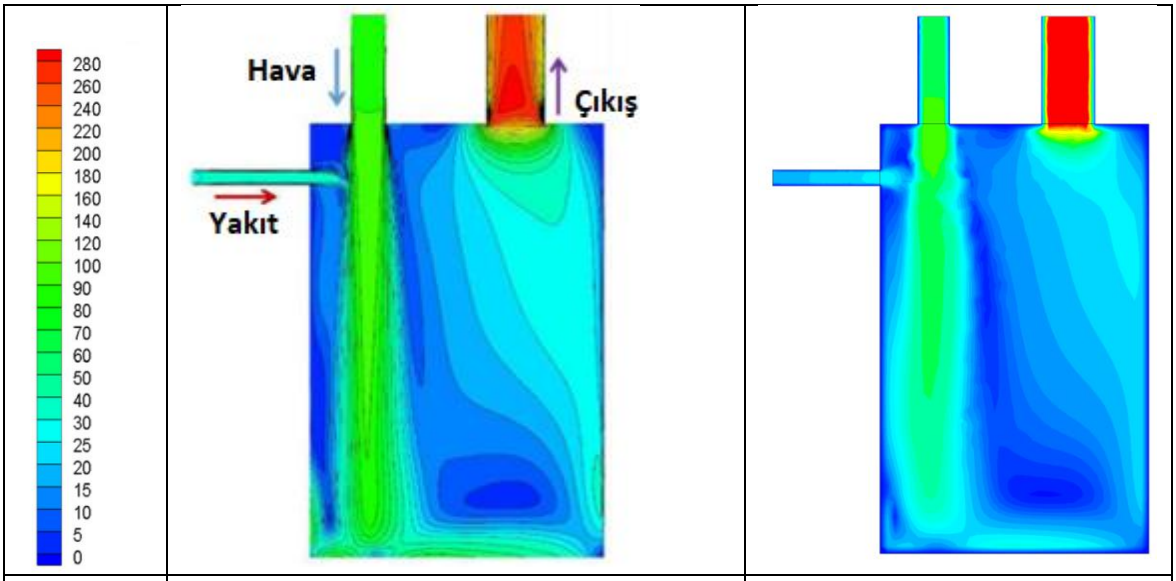


Şekil 6.4. Taban Hattı boyunca V yönünde ortalama hız profili



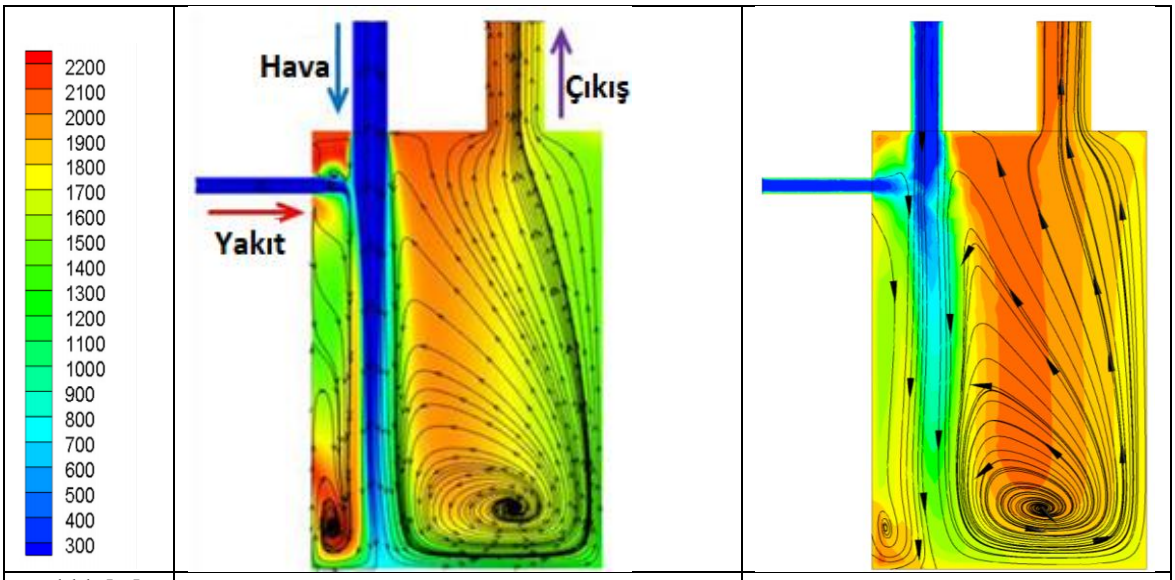
Şekil 6.5. Çıkış Hattı boyunca V yönünde ortalama hız profili

Yanma reaksiyonu olmadan yapılan doğrulama faaliyetlerine ek olarak, yanma reaksiyonu ile yapılacak olan çalışmanın doğruluğunu teyit etmek amacı ile Gupta S. K. ve diğerleri, tarafından yapılan [49] çalışma referans alınarak bir doğrulama faaliyeti daha yürütülmüştür. Bu doğrulama faaliyetinde benzer özelliklerdeki yanma odasında yanma reaksiyonu ile çözüm alınmıştır ve referans çalışmanın ve doğrulama analizi sonuçlarının karşılaştırıldığı hız grafikleri Şekil 6.6'de ve sıcaklık grafikleri de Şekil 6.7'de gösterilmektedir. Hem hız hem de sıcaklık grafikleri incelendiğinde, yapılan doğrulama analizi ile, literatürdeki referans çalışma arasında iyi bir uyum gösterdiği görülmektedir.



Hız [m/s]	(a)	(b)

Şekil 6.6. Yanma odası içerisinde hız değerleri grafiği; (a) Referans çalışma sonuçları [49], (b) Doğrulama analizi sonuçları



Sıcaklık [K]	(a)	(b)

Şekil 6.7. Yanma odası içerisinde sıcaklık değerleri grafiği; (a) Referans çalışma sonuçları [49], (b) Doğrulama analizi sonuçları

6.2. Oksitleyici Hava İçerisindeki Oksijen Oranının Düşürülmesinin Etkileri

Çalışmanın ilk aşamasında, oksitleyici olarak kullanılan hava içerisindeki oksijen oranının, her iki yakıt için, belirtilen yüksek iç resirkülasyonlu yanma odası için yanma üzerine etkileri incelenmiştir. Doğal şartlarda havanın yaklaşık olarak %79'u azot ve %21'i oksijenden oluştuğu varsayılabilir. Buna istinaden çalışmaya %21 oksijen içeren hava

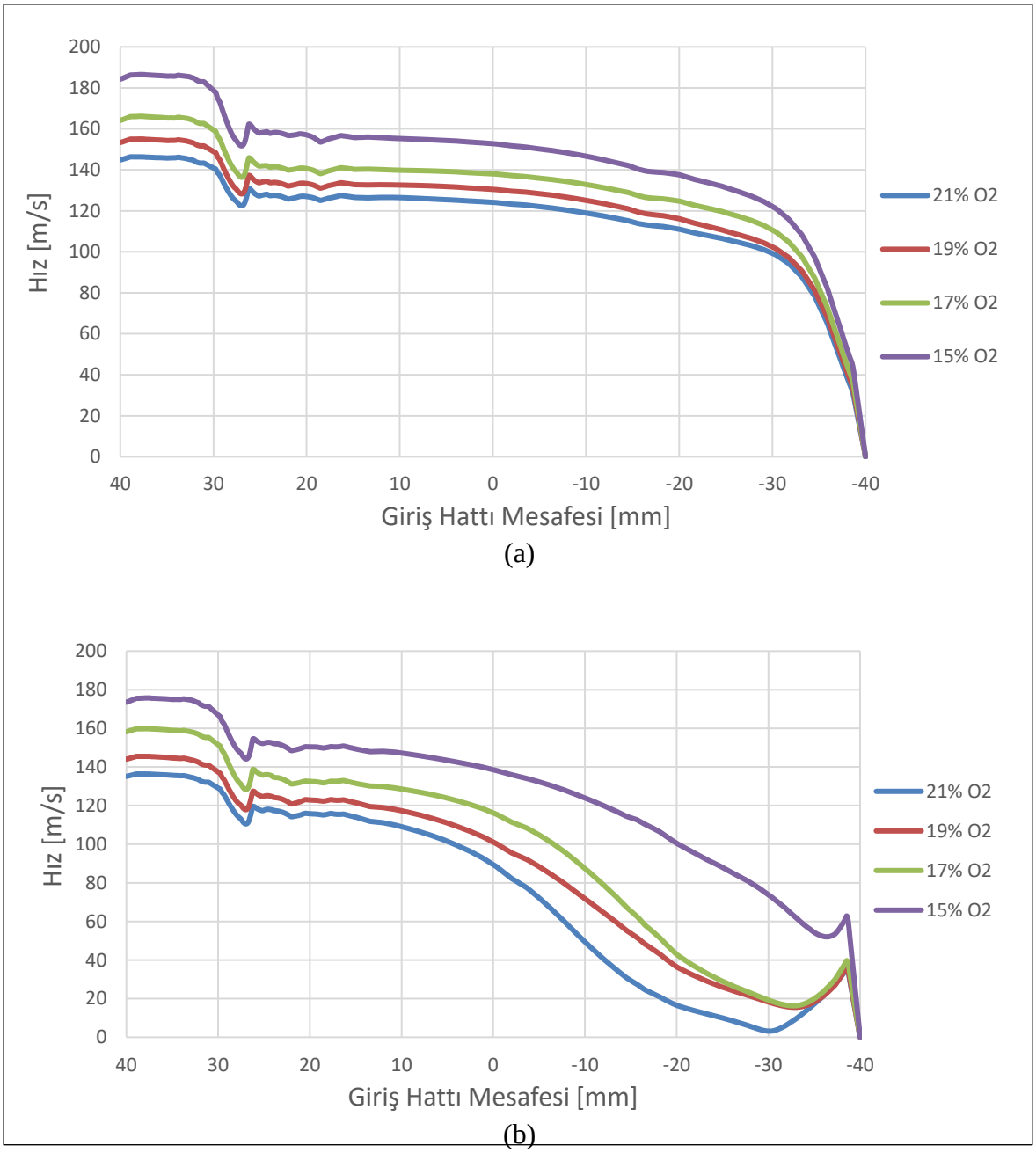
kullanılarak başlanmıştır. Yanma odasına gönderilen havadaki oksijen oranının düşürülmesi için, 10 kW gücündeki ısıl gücü elde etmek için gerekli olan oksijen miktarı değiştirilmemiş olup, hava içerisindeki azot miktarı ve yanma odasına gönderilen hava debisi artırılarak kademeli olarak havadaki oksijen seyreltilmiştir. Hava içerisindeki azot inert gaz olarak değerlendirilmektedir. Havadaki oksijen oranı her iki yakıt için de sırası ile %21, %19, %17, %15 olacak şekilde uygulanmış ve 8 farklı sayısal çözüm sonucu karşılaştırmalı olarak bu bölümde değerlendirilmiştir.

6.2.1. Hız

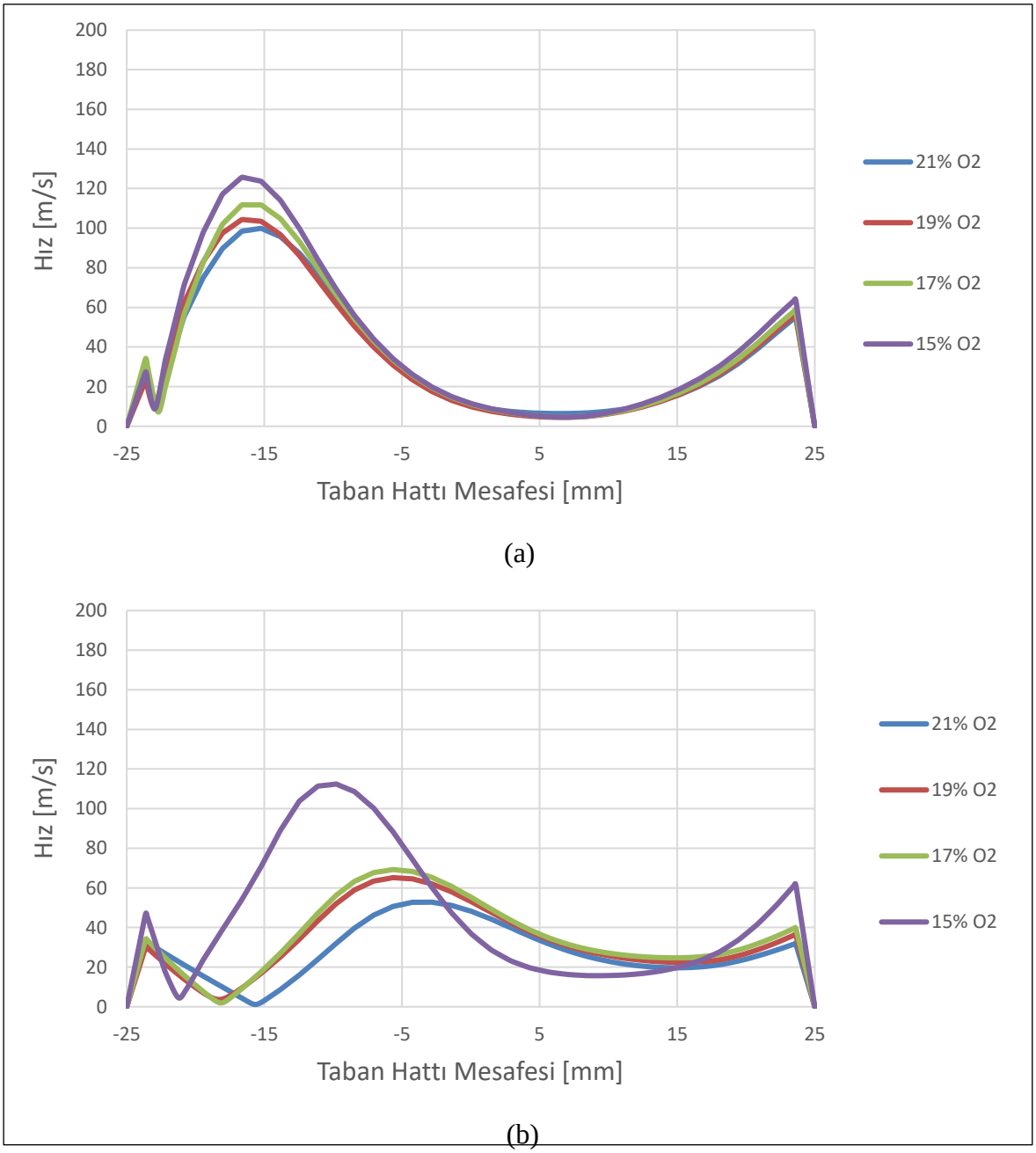
Metan ve kok fırını gazının yanma odası içerisindeki hız değeri dağılımları Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Renkli grafikler incelendiğinde; yanma odasının alt kısmına doğru tüm durumlarda hız değerleri zayıflamıştır. Fakat yanma odası hava giriş hattının 30 mm mesafesinde hız değerlerinin arttığı ve bunun sebebinin yakıtın, hava ile teması ve bu sırada gerçekleşen ani yanma reaksiyonu neticesinde gerçekleştiği değerlendirilmektedir. Tüm durumlar için bu etki görülürken, hız değerleri ani reaksiyon hızına göre farklılaşmıştır. Hattın devam eden mesafelerinde ise hız değerleri azalarak ilerleme göstermiştir. Bunun sebebi, yanma odası tabanına yakın bölgede, yanma odasının sol köşesinde oluşan resirkülasyon etkisinde yerel olarak oksijen konsantrasyonu düşmesi ve yanma reaksiyonu yavaşlamasıdır. Bu tespiti şu durum daha iyi izah etmektedir; aynı eşdeğerlik oranının korunması için gönderilen yakıt debisi ve bunu yakmak için oksitleyici havadaki oksijen debisi sabit tutulmuştur. Fakat oksitleyici havadaki oksijenin seyreltilmesi için azot miktarı artırılmış ve bu durum oksitleyici havadaki oksijenin seyreltilmesini sağlamıştır. Seyreltme sonrasında oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranı düştükçe, havanın toplam debisi artmıştır. Grafikler incelendiğinde %15 oksijen oranına sahip koşulda bile %21 oksijen oranına sahip yanma koşuluna benzer şekilde giriş hattının yanma odası tabanına yakın kısımlarında hız değerlerinin paralellik gösterdiği görülmektedir. Bu bölgedeki hız değerlerinin yakın olması, oksitleyici havanın debisinden değil, yanma reaksiyonunun iç resirkülasyon neticesinde yavaşlamasından kaynaklı olduğu tespitini desteklemektedir.

Yanma odası taban hattı boyunca hız grafikleri Şekil 6.9'de gösterilmiştir. Taban hattının ilk kısımlarına (+25 mm değerine yakın kısımlar) hız değerlerinin tüm grafiklerde yüksek olduğu, orta kısımlarda azaldığı ve mesafenin sonlarına doğru (-25 mm değerine yakın kısımlar) yeniden arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, ilk kısımda reaksiyon ve resirkülasyon kaynaklı hızların görülmesi ve son kısımda akışın çıkış hattına yönelmesi ile hız kazanması olarak değerlendirilebilir. Metan yakıtı ile kok fırını gazı arasında görülen küçük korelasyon farklılıklarının, yakıtların termal güçlerinin farklı olması ve yerel eşdeğerlik oranı farklılıklarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

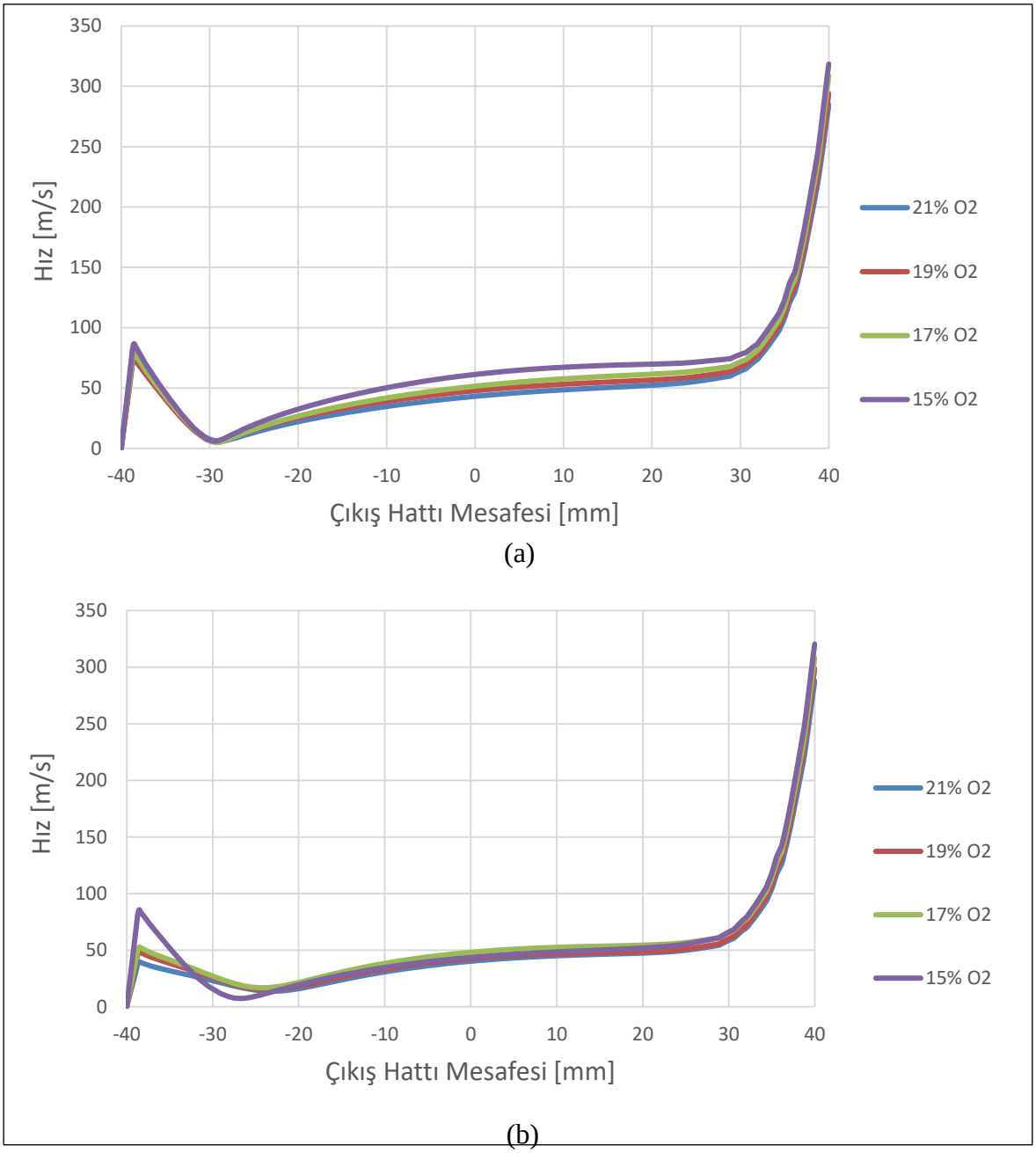
Yanma odası çıkış hattı boyunca hız grafikleri Şekil 6.10'de gösterilmiştir. Çıkış hattının ilk kısmındaki -40 'dan -30'a kadar olan kısımlarda hız değerleri ani değişimler göstermektedir. Yanma odası tabanına yakın olan bu bölgede iç resirkülasyon kaynaklı değişimler görülmektedir. -30'dan +30 'a kadar olan kısımda akış hızı değerleri daha dengeli şekilde artarak ilerlemiş ve +30'dan +40'a kadar olan mesafede çıkış kısmına yaklaştıkça akış hızı artmıştır. Her iki yakıt için de, %15 oksijen konsantrasyonuna sahip durum için, çıkış bölgesinde hız değerleri 320 m/s değerine kadar çıkmaktadır.



Şekil 6.8. Giriş Hattı üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için hız değerleri



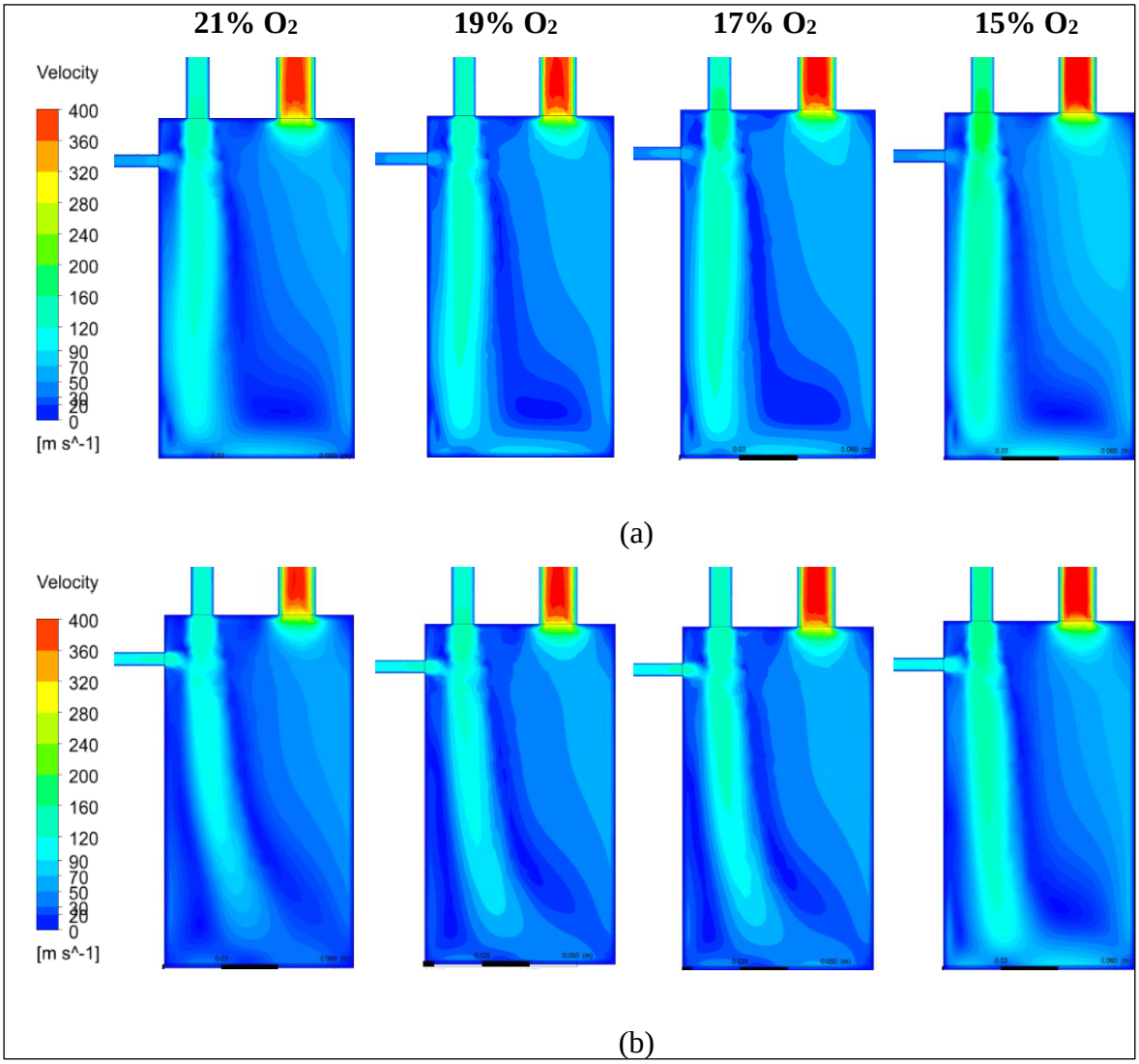
Şekil 6.9. Taban Hattı üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için hız değerleri



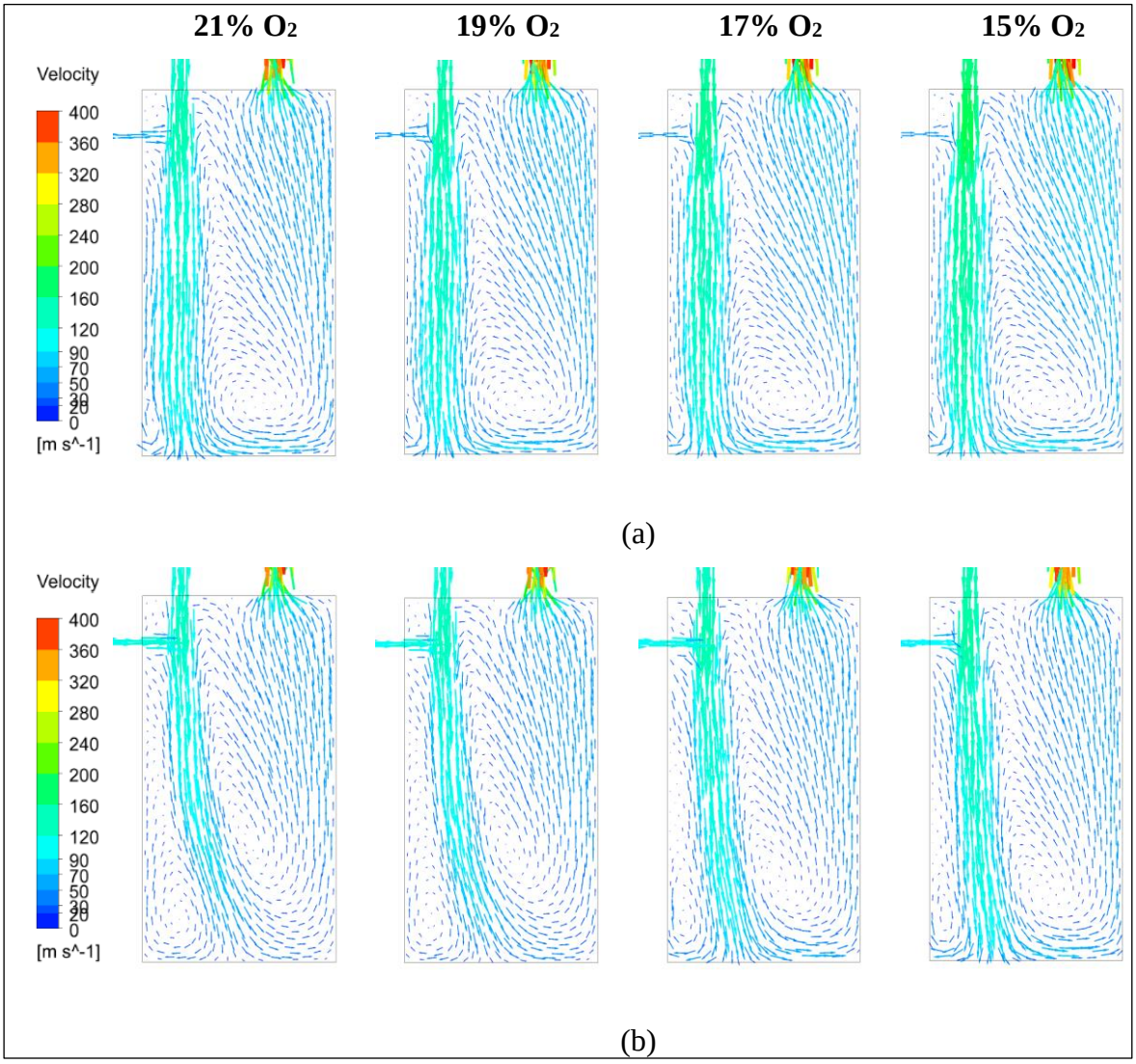
Şekil 6.10. Çıkış Hattı üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için hız değerleri

Şekil 6.11'de ve Şekil 6.12'de yer alan renkli grafikler incelenerek genel bir yorum yapılmak istenirse; yanma odası içerisindeki birçok alanda iç ve dış resirkülasyonlar oluştuğu görülmektedir. Bu resirkülasyon bölgeleri renksiz dağıtılmış yanma şartlarının oluşabilmesine destek vermektedir. Ayrıca oksijen konsantrasyonunun azaltılması etkisinde hız grafiklerinde her iki yakıt için de dikkate değer farklılaşmalar görülmektedir. Bu farklılaşmalar hava debisinin artmasının yansıra, reaksiyon süresinin uzamasından ve reaksiyonun daha geniş bir bölge boyunca gerçekleşmesinden de kaynaklanmaktadır. En çok dikkate değer sonuçlardan biri ise; yanma odası içerisindeki en yüksek hız

değerlerindeki değişimdir. En yüksek hız bölgesi %21 oksijen konsantrasyonunda, metan gazı için giriş hattının başlangıcından bitişine doğru düz bir hat olarak görülürken, kok fırını gazında bu şekilde değildir. Fakat renksiz dağıtılmış yanma rejimine yaklaştıkça, her iki yakıt için de en yüksek hız bölgesi giderek birbirine yakın bir hal almaktadır. Bu, durum dağıtılmış yanma şartlarına yaklaştıkça, yakıt türü ve akışkan momentumu değerlerinin etkisinin azaldığını ve yanma odası içerisindeki hız dağılımlarının yakınsadığını göstermektedir. Yine de dağıtılmış yanma şartlarında yakıt etkisi ile bir miktar farklılıklar gözlemlenmektedir. Özellikle kok fırını gazının içeriğindeki yüksek hidrojen miktarı, ani yanma reaksiyonu kaynaklı hız artışının gözlemlenmesine sebep olmaktadır.



Şekil 6.11. Yanma odası orta düzleminde, Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) hız değeri grafikleri

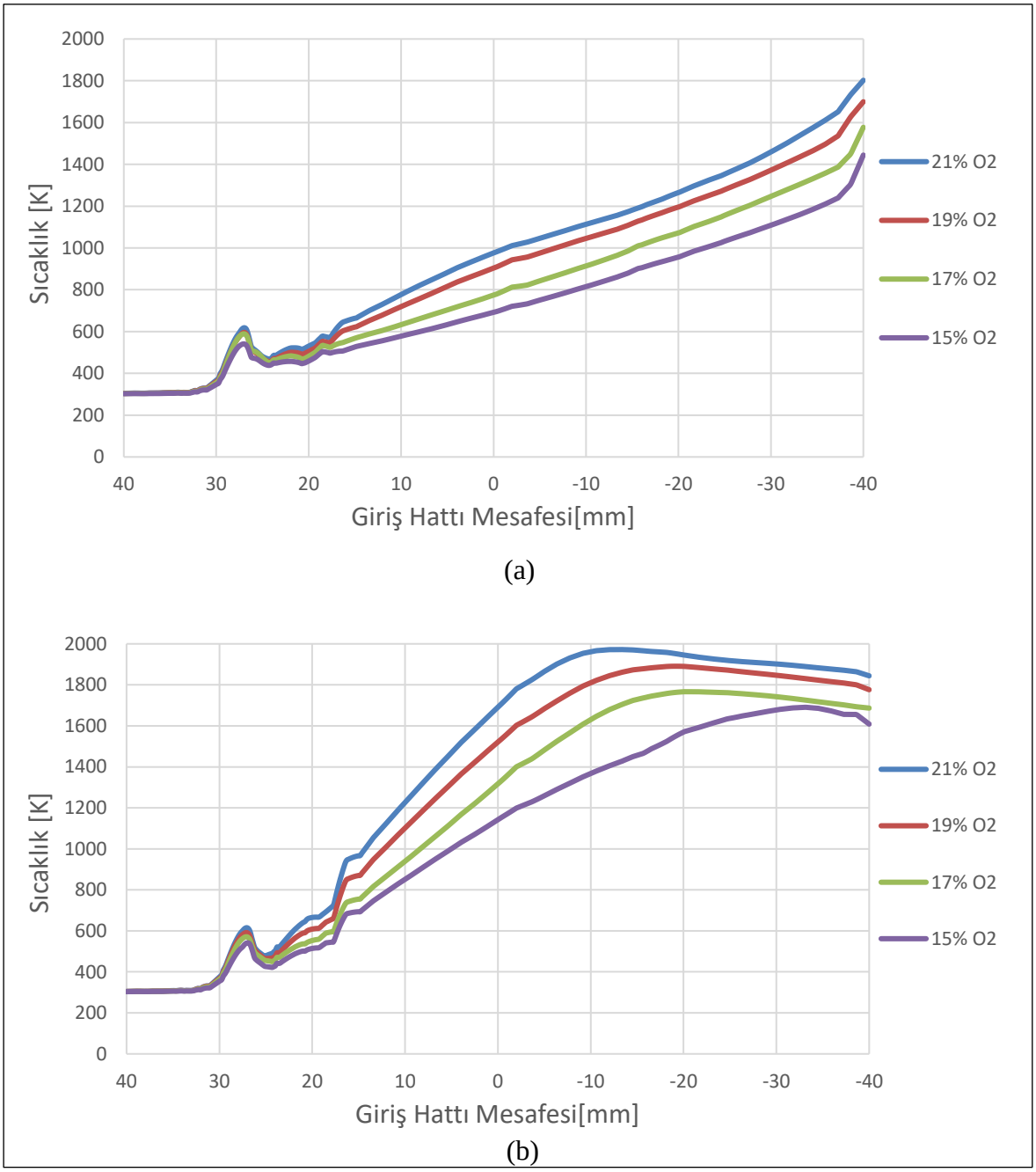


Şekil 6.12. Yanma odası orta düzleminde, Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) hız vektörü grafikleri

6.2.2. Sıcaklık

Şekil 6.13'de giriş hattı boyunca sıcaklık değerlerindeki değişim metan ve kok fırını gazı için, oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak incelenmiştir. Tüm koşularda giriş havası sıcaklığı 300 K değerinde sabit tutulmuştur. Her iki yakıt için de sıcaklık değeri, yakıt ile havanın ilk karşılaştığı bölgeden yanma odası taban kısmına doğru artmıştır. Fakat metan ve kok fırını gazı yakıtlarının sıcaklık grafikleri karşılaştırıldığında, kok fırını gazının kullanıldığı durumda +20 mesafesinden -10 mesafesine kadar sıcaklık artışının daha hızlı gerçekleştiği gözlemlenmektedir. -10 mesafesinden -40 mesafesine doğru gidildikçe sıcaklık değerinde düşüş gözlemlenmektedir. Buna karşın metan gazında ise +20 mesafesinden -40 mesafesine kadar devamlı sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Her iki yakıt

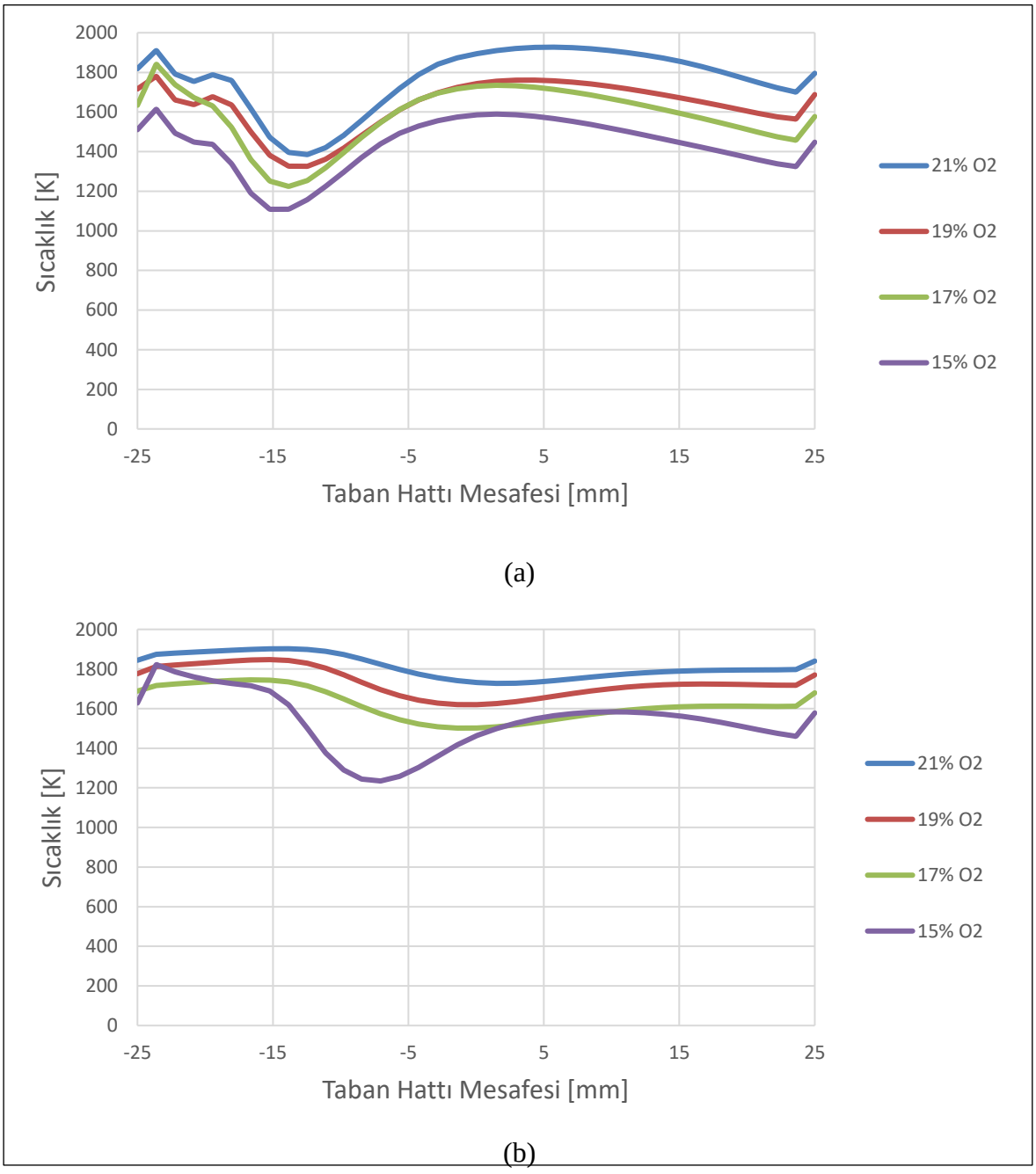
için yanma odasın tabanına yaklaştıkça (-40 mesafesi) sıcaklık değerleri birbirine yaklaşmıştır. Burada gerçekleşen farkın kok fırını gazı içerisindeki hidrojen gazlının etkisinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Kok fırını gazı %55 oranında hidrojen gazından oluşmaktadır. Hidrojen, oksijen ile yüksek reaksiyon hızlarında tepkimeye girmesi ve kütle başına verebileceği ısı enerjisi miktarının daha fazla olması sebebi ile daha yüksek sıcaklık değerleri elde edilmesine neden olmaktadır. Kok fırını gazının sıcaklığının, -10 mesafesinden -40 mesafesine kadar düşmesinin sebebi akışkanların momentumu ile yüksek sıcaklık bölgesinin yanma odası merkezine doğru taşınması ve resirkülasyon etkisinde belirlenen bölgede lokal olarak renksiz dağıtılmış yanma rejiminin oluşmasıdır. Oksijen seviyesinin yanma üzerine etkisi incelendiğinde; her iki yakıt için de oksitleyici hava içerisindeki oksijen konsantrasyonunun düşmesi ile giriş hattı boyunca sıcaklık değerlerindeki artış miktarı azalmıştır. Her iki yakıt için %15 oksijen konsantrasyonuna sahip hava için grafikler karşılaştırıldığında, oldukça yakın bir korelasyon gösterdikleri görülmektedir. Bu sonuçlar, dağıtılmış yanma tekniği ile yakıtların türlerinden bağımsız olarak oluşacak en yüksek sıcaklık değerlerinin düşürülebileceğini göstermektedir.



Şekil 6.13. Giriş Hattı çizgisi üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için sıcaklık profili

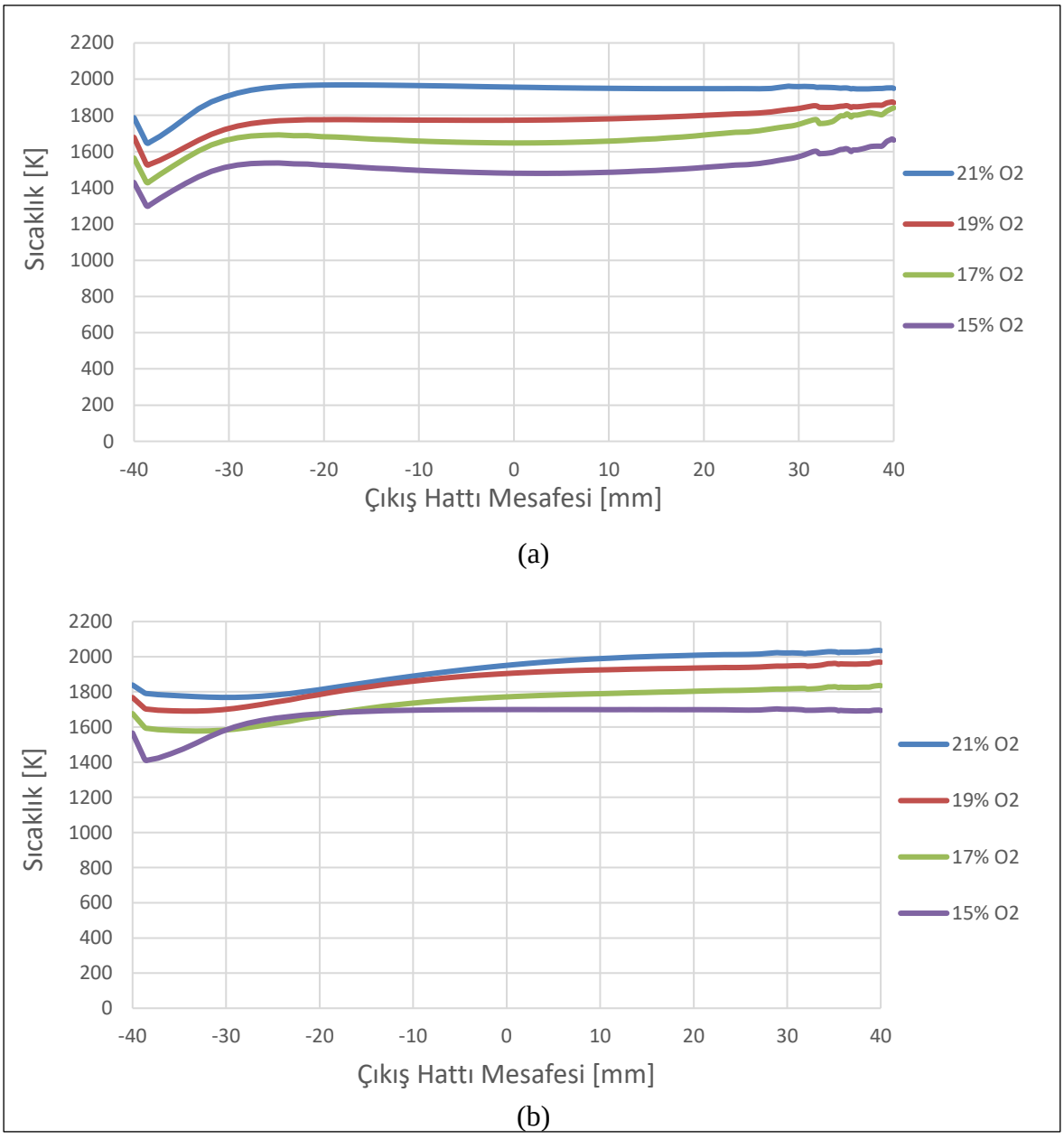
Şekil 6.14'de yanma odası taban hattı boyunca sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere her iki yakıt için de genel olarak taban hattı boyunca sıcaklık değerlerindeki değişim sınırlı olmuştur. Fakat taban hattı boyunca, metan gazının sıcaklık değişim grafikleri kendi içinde uyumlu görünürken, kok fırını gazı için sadece %15 oksijen konsantrasyonu grafiğinde, metan gazı grafikleri ile uyumlu bir grafik deseni gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, yanma odasının, dağıtılmış yanma rejiminin oluşmasını destekleyecek şekilde iç resirkülasyonlu olmasıdır. İç resirkülasyon etkisinde metan gazı, taban hattının -20 mm mesafesinden -10 mm mesafesine kadar, yanma hızının

yavaşlamasına neden olacak ters akım ile karşılaşmaktadır. Kok fırını gazı içerisindeki yüksek hidrojen miktarı sebebi ile dağıtılmış yanma rejimi etkisine, daha düşük oksijen konsantrasyonuna sahip oksitleyici hava ile girebilmektedir. Sonuç olarak genel oksijen konsantrasyonunda azalma ve yanma odası tasarımı kaynaklı iç resirkülasyonlu akış etkisinde dağıtılmış yanma şartları yakınsanabilmiştir.

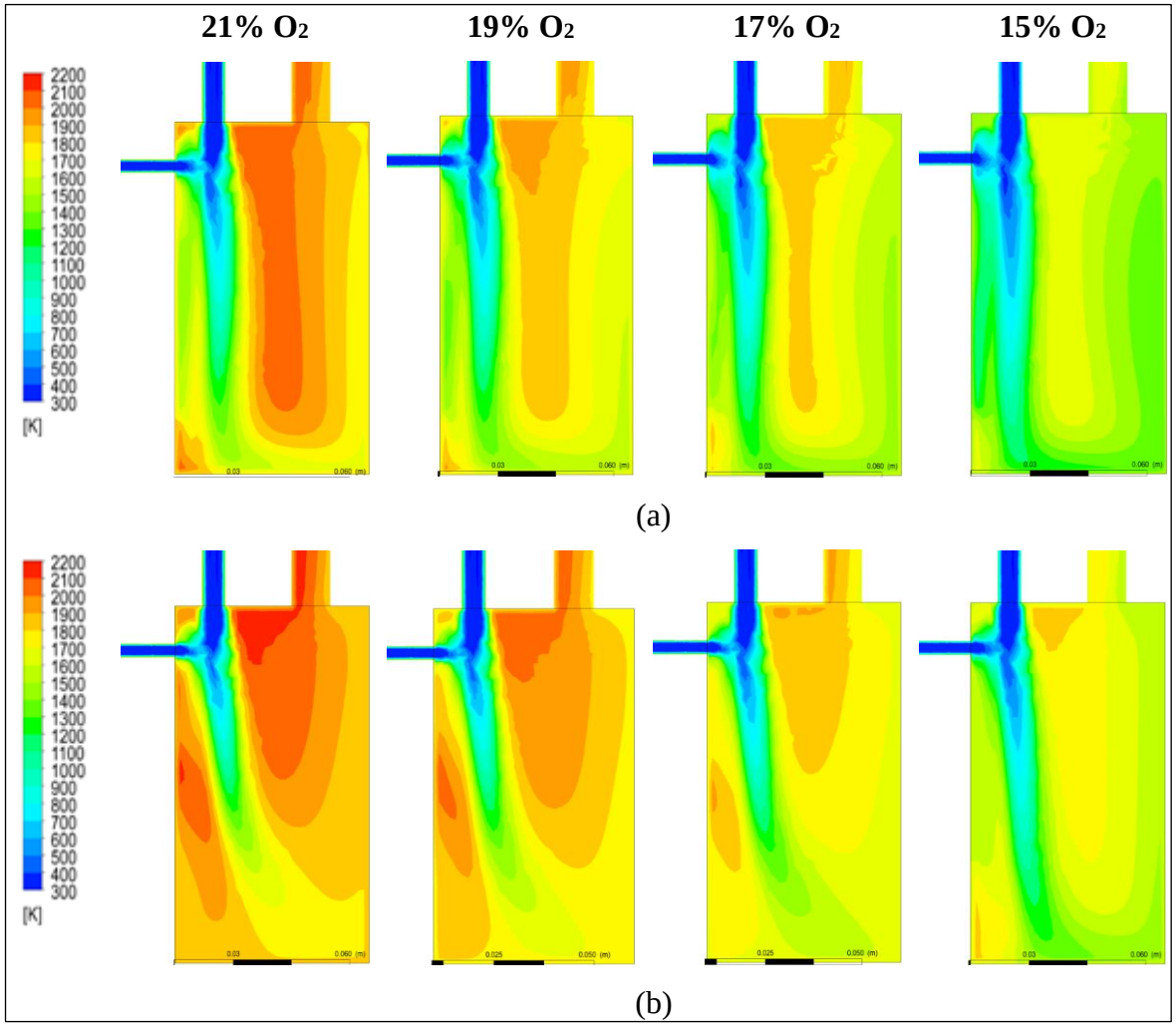


Şekil 6.14. Taban Hattı çizgisi üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için sıcaklık profili

Şekil 6.15‘de çıkış hattı boyunca sıcaklık değerlerindeki değişim görülmektedir. Özellikle çıkış hattı boyunca oluşan benzer sıcaklık değerleri trendleri, sadece oksitleyici içerisindeki oksijen seviyesinin düşüşünden kaynaklı sıcaklık seviyesi olarak farklılık göstermekte birlikte, genel grafik formu, dağıtılmış yanma şartlarının oluştuğuna işaret etmektedir. Bu etki yanma odası tasarımı dolayısı ile resirkülasyonun artması neticesinde elde edilmiştir. Sonuçlar literatürde yer alan benzer konularda yapılmış çalışmalar ile paralellik göstermektedir [49, 50].



Şekil 6.15. Çıkış Hattı çizgisi üzerinde Metan (a) ve Kok fırını gazı (b) için sıcaklık profili



Şekil 6.16. Yanma odası orta düzleminde, farklı oksijen oranlarında, (a) Metan ve (b) Kok Fırını Gazı için sıcaklık değeri dağılımı grafiği

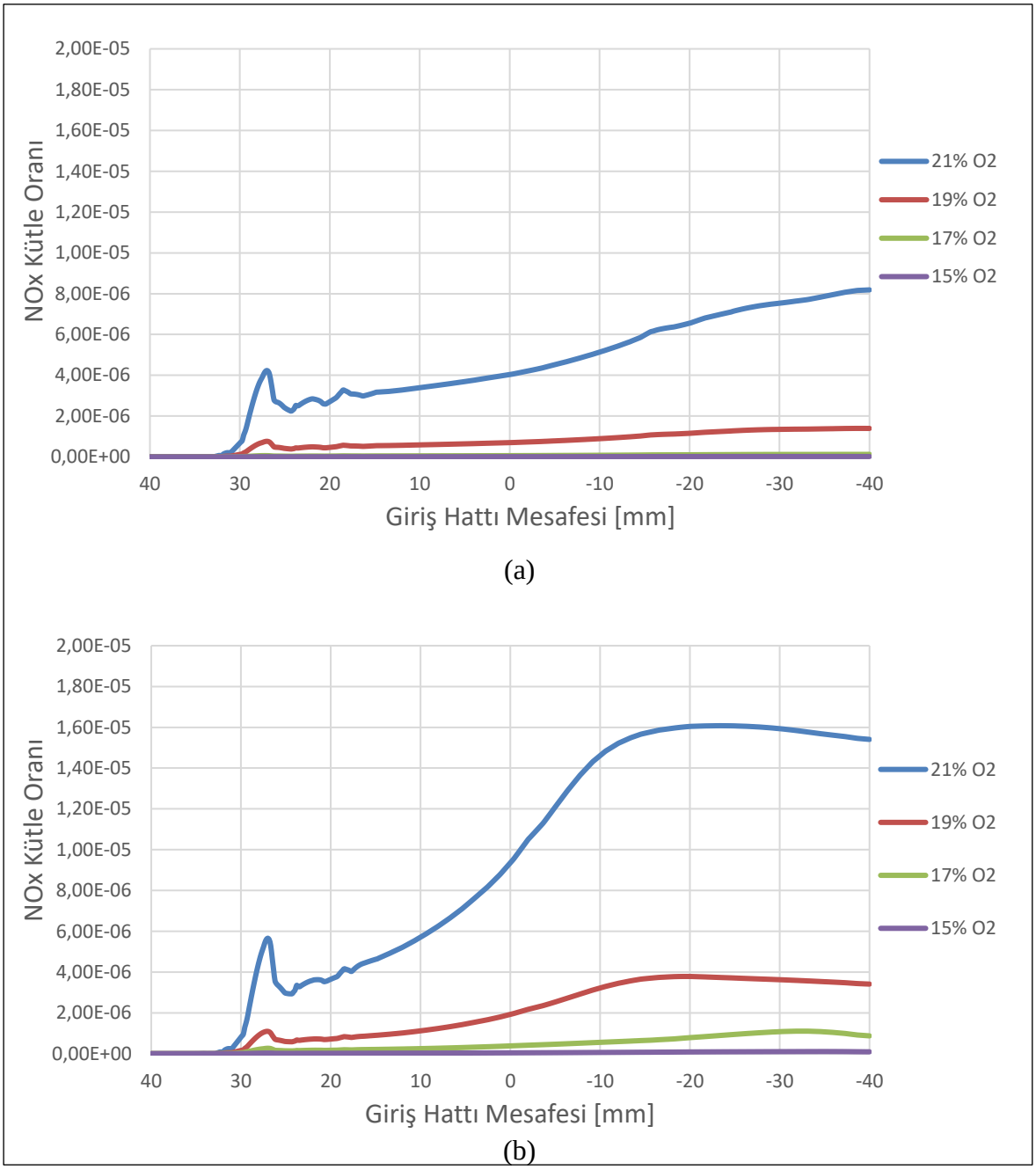
6.2.3. NOx Emisyonu

NOx oluşum değerlerinin incelenmesi, yüksek sıcaklık etkisinde ve alev hızı etkisinde NOx oluşum bölgelerinin daha iyi anlaşılması amacı ile önemlidir. Azot oksit oluşumu temel olarak üç farklı oluşum mekanizması ile tanımlanır. Bunlardan ilki ve en fazla azot oksit oluşumuna sebep olan mekanizma termal NOx oluşum mekanizmasıdır ve reaksiyon anında ulaşılan sıcaklık ile ilişkilidir [23]. Bir diğer önemli NOx oluşum mekanizması ise ani NOx oluşum mekanizması olup alev hızı ile ilişkilidir [51]. Üçüncü NOx oluşum mekanizması ise yakıt NOx oluşum mekanizması olup yakıta bağlı azot atomları ile ilişkilidir.

Termal NOx olum mekanizması, yakıt ve hava içerisindeki serbest azot atomlarının yüksek sıcaklık etkisinde yanma reaksiyon zincirine dahil olması ile oluşur. Ani NOx oluşumu ise

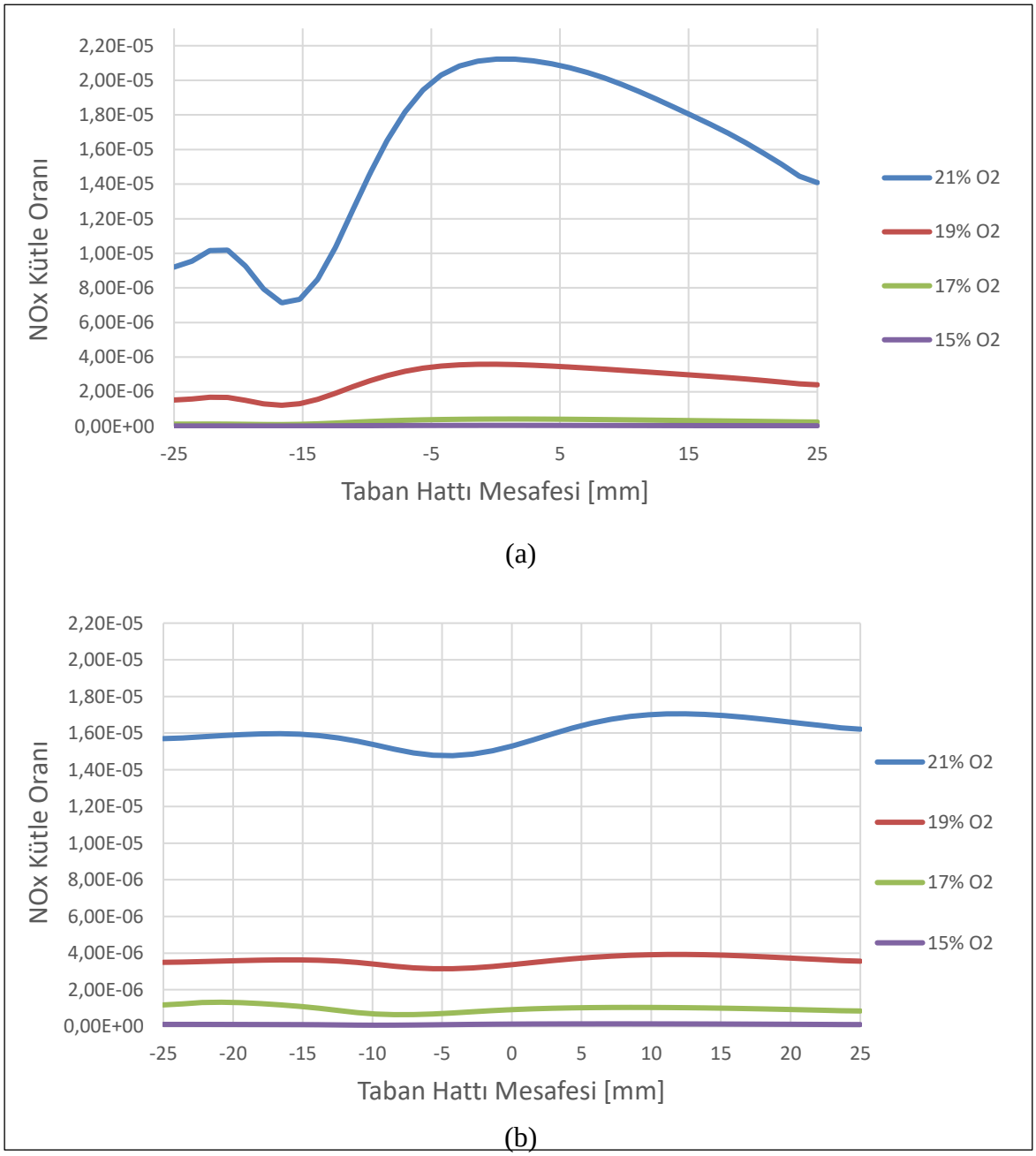
genellikle zengin yanma bölgelerinde yüksek alev hızlarında oluşmaktadır. Çalışmada, azot oksit atomlarının kütlelerinin o noktadaki toplam kütleye oranları grafiklerde gösterilmiştir.

Şekil 6.17 ‘de giriş hattı boyunca NOx kütle oranı değerlerindeki değişim metan ve kok fırını gazı için, oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak incelenmiştir. Giriş hattı grafikleri incelendiğinde, hava girişinin olduğu +40 mm mesafesinden +30 mm mesafesine kadar reaksiyon olmadığı için NOx oluşumu gözlemlenmemektedir. Metan ve kok fırını gazı grafikleri karşılaştırıldığında, kok fırını gazının genel olarak tepkime bölgesi boyunca daha fazla azot oksit oluşturduğu görülmektedir. Bunun, iki çok önemli nedeni vardır. İlki kok fırını gazı yakıtı içeriğinde bulunan serbest azot atomlarının yanma odası içerisindeki toplam azot atomu miktarını artırması ve bu durumun tepkimeye girebilecek azot miktarını artırmasıdır. Bir diğer önemli husus, kok fırını gazı içerisinde bulunan hidrojen atomlarının çok yüksek ısıl enerji yayarak ve yüksek alev hızlarında ani olarak oksijen ile tepkimeye girmesi ile lokal olarak sıcaklık değerlerinin yükselmesi ve termal NOx oluşum mekanizmasının kurulmasına yardımcı olmasıdır.



Şekil 6.17. Giriş Hattı üzerindeki NOx kütle oranı Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b)

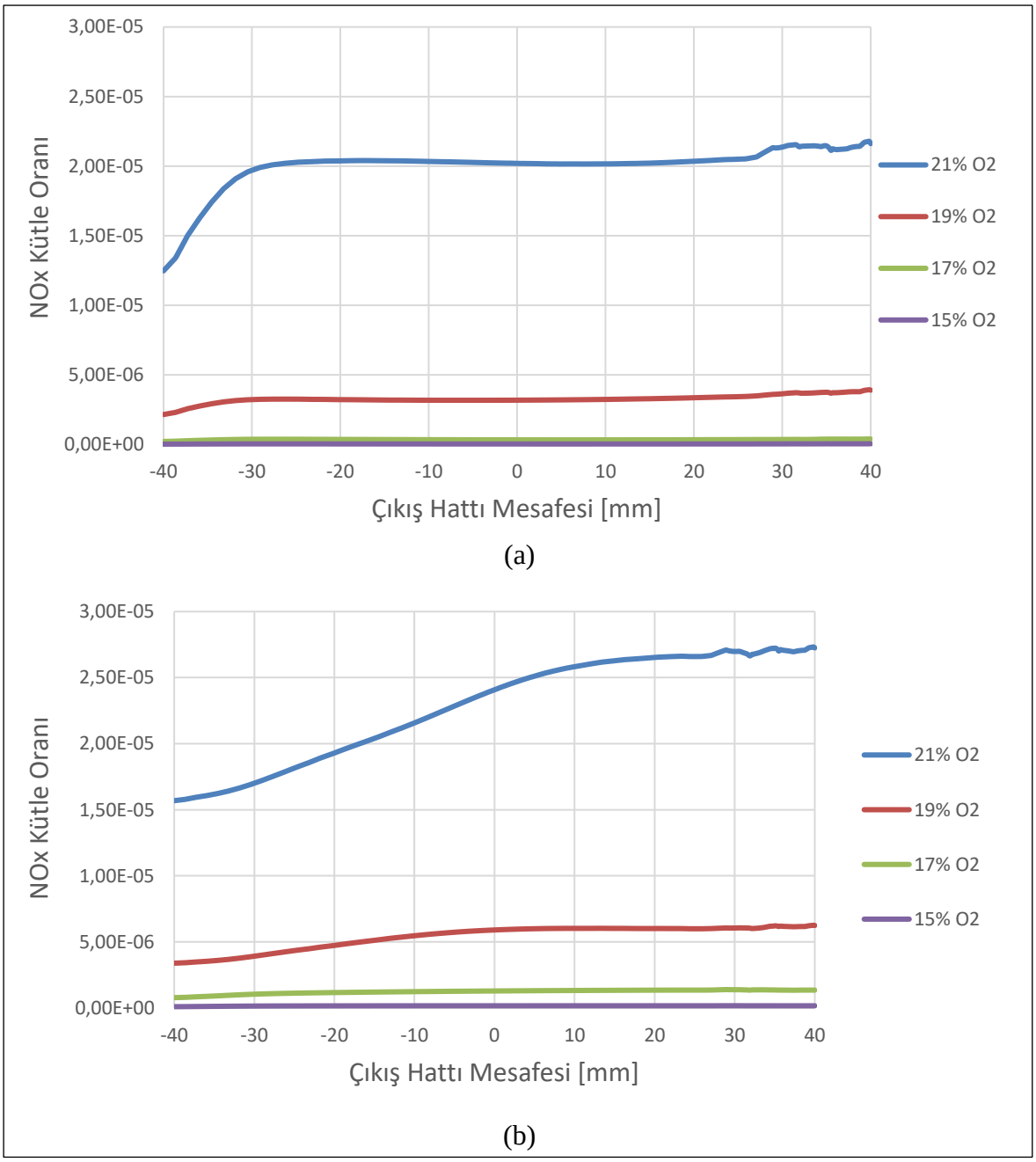
Taban hattı boyunca NOx oluşumu Şekil 6.18'de incelenmiştir. Taban hattı boyunca grafiklerin genel olarak stabil olduğu görülmektedir. Grafiklerde görülen hafif dalgalanmaların sebebi, yanma odası geometrisi kaynaklı resirkülasyon etkisi ile giriş hattı taban bölgesinde, yerel düşük oksijen oranı kaynaklı olduğu değerlendirilmişti.



Şekil 6.18. Taban Hattı üzerindeki NOx kütle oranı Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b)

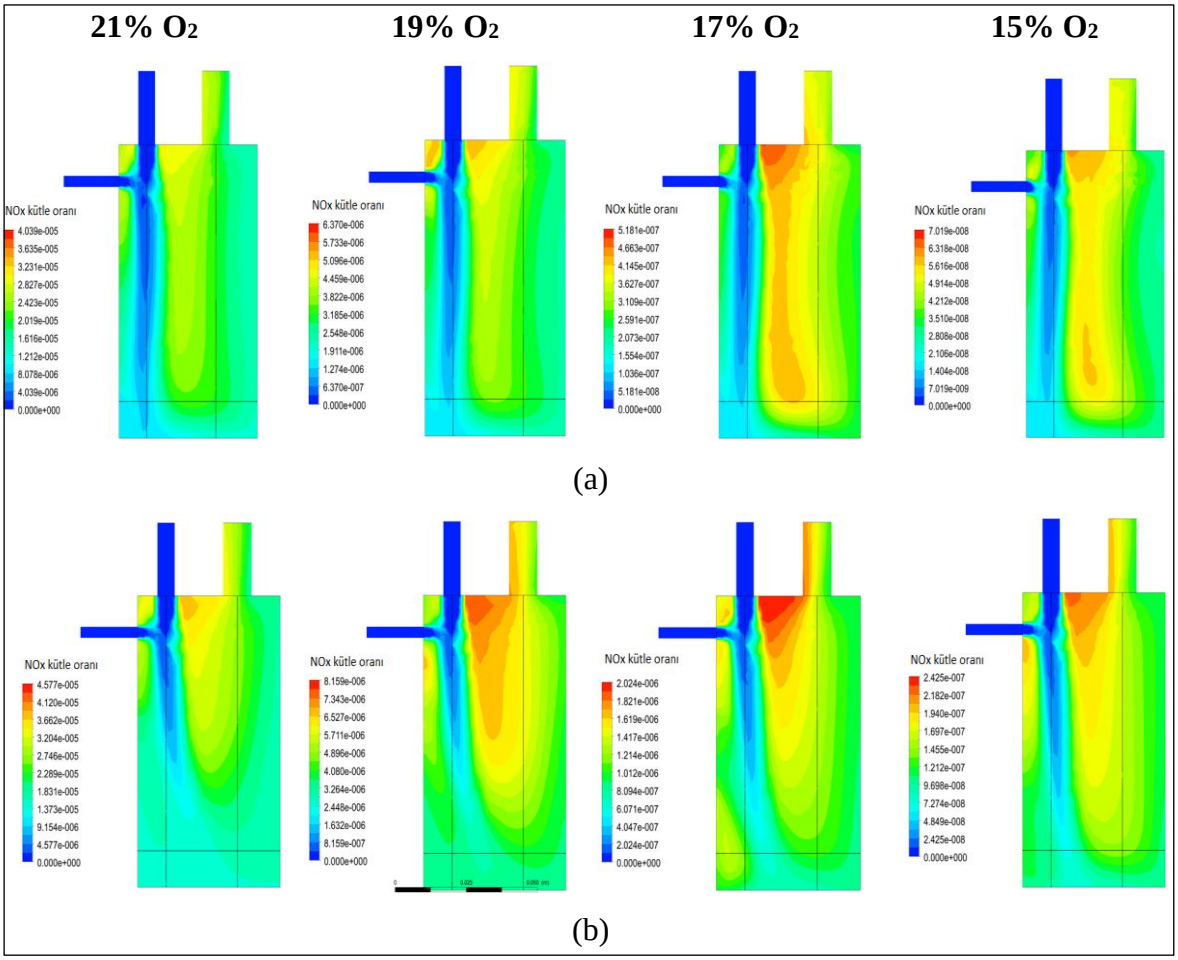
Çıkış hattı boyunca NOx oluşum grafikleri Şekil 6.19'de görülmektedir. Metan gazı için tüm durumlarda oldukça kararlı bir NOx oluşum formasyonu görülmektedir. Kok fırını gazı için ise yanma odası çıkışına yakın olan +40 mm mesafesine doğru gidildikçe NOx oluşum seviyesi artmaktadır. Grafikler, Şekil 6.11'de verilen hız grafikleri birlikte değerlendirildiğinde, bu grafik eğrisinin, akışın momentum farkından kaynaklandığı görülmektedir. Oksijen konsantrasyonunu düşürmek için oksitleyici hava içerisine eklenen azot ile birlikte akışkan debisi artmakta grafik daha yatay seyir göstermektedir. Fakat bu durumda da dağıtılmış yanma şartlarına yakın koşullarda yanma gerçekleştiği için üretilen

NOx miktarı azalmaktadır ve kok fırını gazı grafiğinde oksijen oranına bağlı grafiklerdeki değişim bu şekilde izah edilebilmektedir. Burada elde edilen önemli bulgulardan biri, havanın içerisindeki azot miktarının artmasından kaynaklı, yanma odasına daha fazla tepkimeye girmesi muhtemel azot gönderilmesine rağmen, tepkime hızı azaltılabilmiş ve bu sayede aynı ısıl güç için, zararlı azot oksit salınımı azaltılabilmiştir.



Şekil 6.19. Çıkış Hattı üzerindeki NOx kütle oranı Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b)

Şekil 6.20’de yanma odası genelinde NOx oluşumu kütle oranı olarak renkli grafikler üzerinden gösterilmiştir. Burada belirtilen grafiklerin renklendirme skalası her bir grafik için farklıdır. Bunun nedeni, dağıtılmış yanma şartlarına yaklaştıkça üretilen NOx miktarındaki radikal düşüş ve buna bağlı ortak renk skalasında uygun görsellerin oluşturulamamasıdır. Fakat bu hali ile NOx oluşum bölgeleri her bir grafik için kendi içinde incelenebilir. Metan gazı için tüm oksijen konsantrasyonlarında genel NOx oluşum yapısı ortak olarak gözlemlenmektedir. Bu durum yanma odası iç resirkülasyon etkisinde, havanın momentumundan bağımsız genel trendin korunabildiğini göstermektedir. Kok fırını gazı için; oksijen konsantrasyonunun yüksek (oksitleyici hava debisinin düşük) olduğu durumlarda, akış hızı grafiklerine paralel olarak NOx oluşumunun yanma odası üst kısmında yoğunlaştığı görülmektedir. Oksijen konsantrasyonu giderek azaldıkça NOx oluşumunun gerçekleştiği alan, yanma odası içerisinde artmaktadır. Sıcaklık grafikleri ile değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklık bölgelerinde gerçekleşen termal NOx oluşumunun etkili olduğu ve dağıtılmış yanma koşuluna yaklaştıkça sıcaklık dağılımı ile birlikte NOx oluşumunun da yanma odası boyunca daha geniş bir alanda meydana geldiğini göstermektedir.



Şekil 6.20. Yanma odası orta düzleminde, farklı oksijen oranlarında, Metan (a) ve Kok Fırını Gazı (b) için NOx değeri dağılımı grafiği

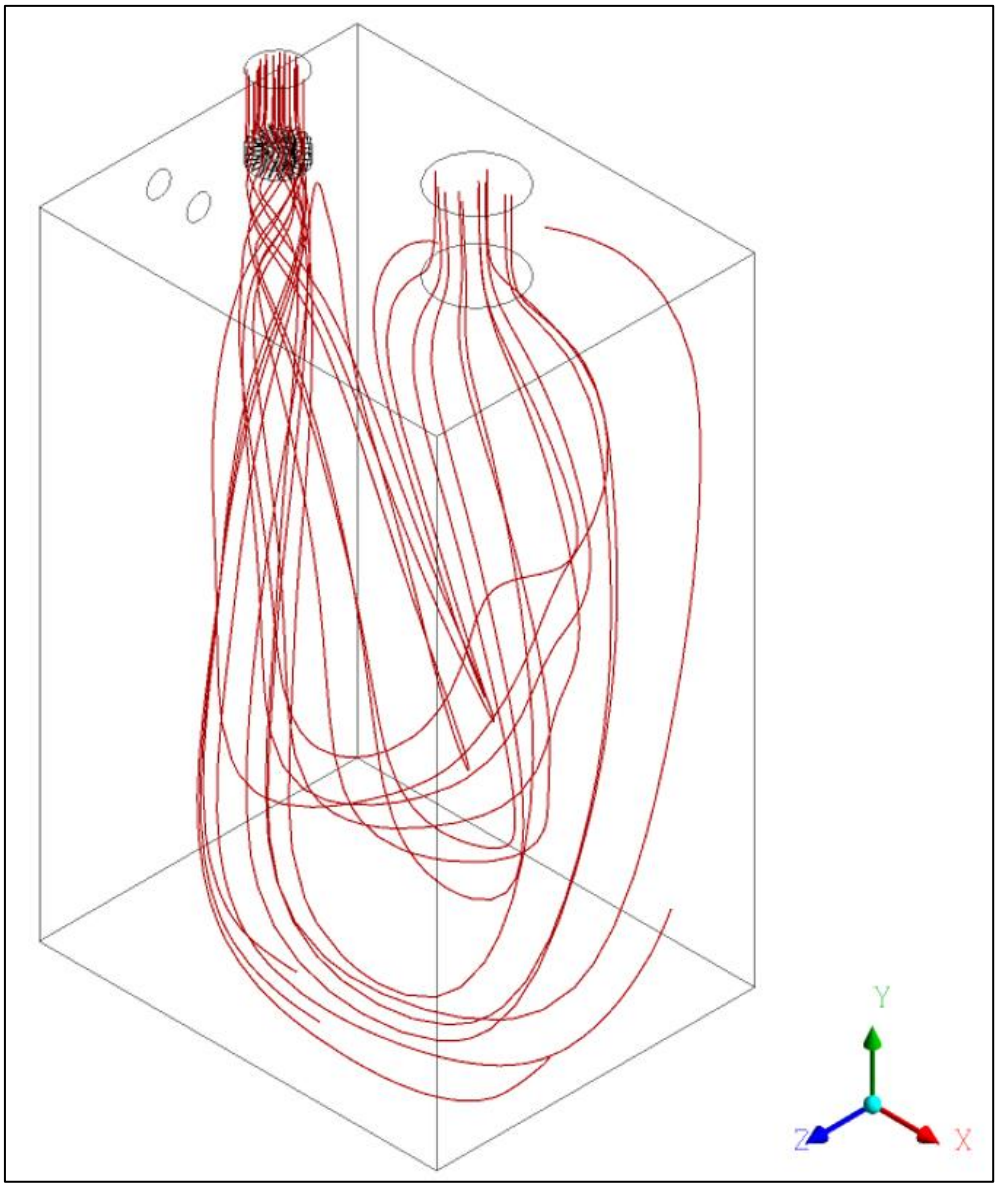
Çizelge 6.1‘de, yanma sonu gazlar içerisindeki NOx oranı her iki yakıt için %21 ve %15 oksijen konsantrasyonuna göre karşılaştırılmıştır. Bu oran ppm olarak ifade edilmektedir ve 1 milyon parçacıktan kaçının NOx olduğunu göstermektedir. Kok fırını gazı için yanma sonu gazlar içerisindeki NOx oranı bir milyonda 0,19 iken, metan gazı için bu değer bir milyonda 0,05 mertebesine düşürülebilmiştir. Dağıtılmış yanma koşulunun bir şartı olarak bilinen düşük emisyon değerine, ulaşılan çok düşük NOx salınım değerleri ile ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Yukarda detaylı olarak açıklandığı üzere, kok fırını gazı içerindeki hidrojen ve azot miktarının etkisi ile metan gazına göre daha fazla NOx salınımına sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.1. Yanma sonu gazlar içerisindeki NOx oranı

Yakıt ve Oksijen Oranı	NOx (ppm)
Metan Gazı ve 21% O_2	27,60
Metan Gazı ve 15% O_2	0,05
Kok Fırını Gazı ve 21% O_2	32,47
Kok Fırını Gazı ve 15% O_2	0,19

6.3. Girdap Sayısı (Swirl Number) Değişimi ve Oksitleyici Hava İçerisindeki Oksijen Oranının Düşürülmesinin Yanma Üzerine Etkileri

Çalışmanın ilerleyen aşamasında, hava giriş kısmına eklenen ve farklı kanat açılarına sahip girdap oluşturucuların etkisi altında ve hava içerisindeki oksijen oranının, her iki yakıt için, belirtilen yüksek iç resirkülasyonlu yanma odası için yanma üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışmanın ilk fazında yanma odasına gönderilen hava, düz bir hat boyunca eksenel yönde gönderilirken, ikinci fazında yanma odası girişine daha önce tariflenen girdap oluşturucular eklenmiştir. Bu yol ile özgün ve gelişmiş bir yanma odası tasarımı oluşturulmuştur. Girdap oluşturucular etkisinde havanın, eksenel momentumun yanında radyal ve tanjant yönlerde de momentum kazanarak, yanma odası boyunca daha hızlı dağıtımı sağlanmak istenmiştir. Eklenen girdap oluşturucuların etkisinde havanın yanma odası boyunca dağılımı Şekil 6.21 ‘de gösterilmektedir. Hava giriş kısmına doksan derece açı ile yerleştirilmiş olan (Şekil 5.1) yakıt girişinden püskürtülen yakıt, girdaplar etkisi ile yanma odasına daha hızlı dağılabilecek ve iç resirkülasyon ile elde etmek istenilen dağıtışmış yanma koşullarının oluşumu destekleyecektir. Girdap oluşturucuların genel geometrisi ve girdap sayısı (swirl number) hesaplamaları 5’inci bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın bu kısmında girdap sayısı değeri 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 ve 1 değerleri ile her iki yakıt türü için ve %21, %19, %17 ve %15 oksijen oranına sahip hava ile toplam 48 farklı sayısal çözüm sonucu karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

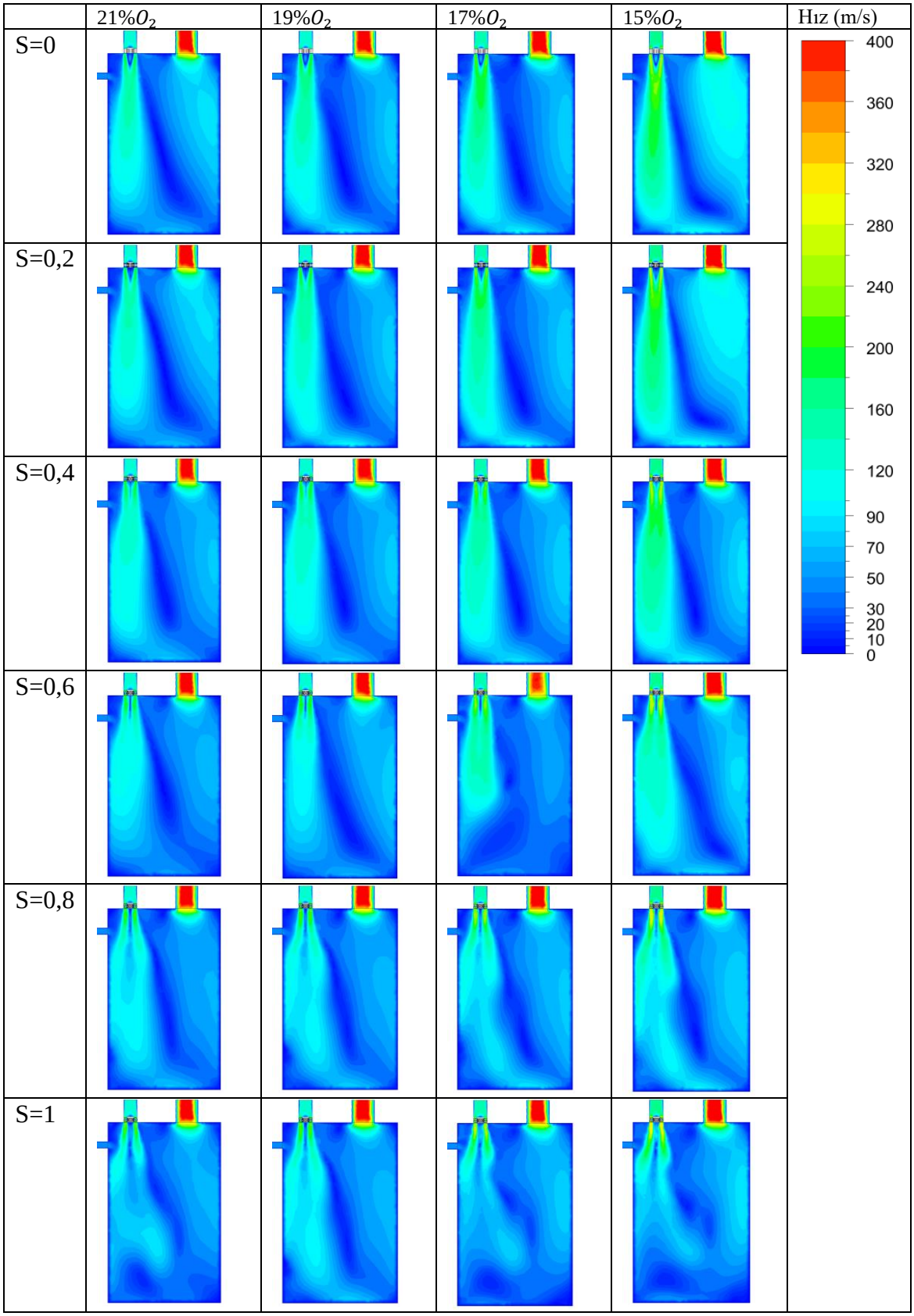


Şekil 6.21. Girdap oluşturucu etkisinde oksitleyici havanın yanma odası içerisindeki dağılımı

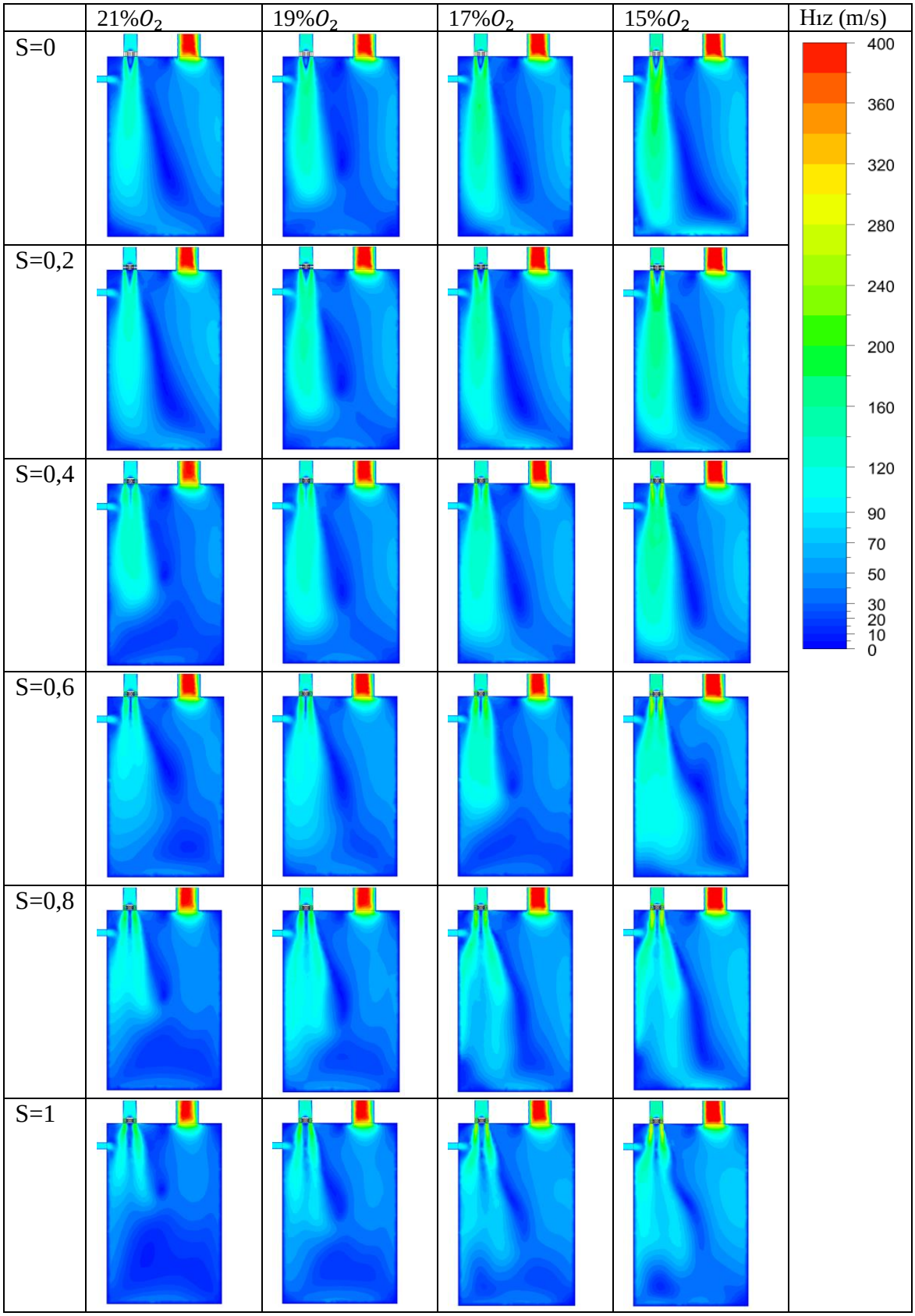
6.3.1. Hız

Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'de yanma odası içinde, girdap oluşturucu etkisinde ve oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranı etkisinde hız dağılımı, renkli grafikler üzerinden gösterilmektedir. Kullanılan yanma odası içerisinde genel hız dağılımı karakteristiği, hava giriş kısmından yanma odası tabanına doğru yüksek hızla hava çıkışının olması, yakıt giriş kısmında hava ile yakıtın karışarak birlikte hareket etmesi, yanma orası tabanına doğru akışın yön değiştirerek taban hattına paralel ilerlemesi, yakıtın çıkış hattına doğru yönelerek yanma sonu oluşan iç basınç etkisi ve daha önce kazandığı momentum etkisinde hızının artması, yakıtın bir kısmının tekrar giriş hattına doğru resirküle olması ve büyük

bölümünün yanma odasından hızlanarak ayrılması olarak tariflenebilir. Grafiklerde, oksijen oranının azalmasına bağlı olarak gönderilen hava debisi artışından kaynaklı, oksitleyici havanın oksijen oranının azalması ile giriş hattının tabana yakın bölgelerine ulaşan havanın hızı artmaktadır. Bu da çıkış hattı üzerinde, çıkışa yakın bölgelerdeki havanın hızında da artışa sebep olmaktadır. Oksijen oranının düşmesi ile artan oksitleyici hava debisi, yanma odası içerisindeki resirkülasyonu da artırmaktadır. Bu durum dağıtılmış yanma koşulunu desteklemektedir. Bununla birlikte grafikler incelendiğinde, hız değerlerinin girdap oluşturucu etkisinde, girdap sayısının artışı ile daha fazla resirkülasyon oluşturduğu görülebilmektedir. Özellikle girdap sayısı S=1 değerine yaklaştıkça, grafik üzerinde yanma odası boyunca dağılan yüksek hız alanları görülmekte ve bu akış hızı dağıtılmış yanma şartlarını desteklemektedir. Sıcaklık ve NOx oluşum grafileri ile birlikte değerlendirildiğinde, hız grafiklerinin uyumlu olduğu görülmektedir. Özellikle girdap sayısının artışı, ani yakıt ve hava karışımına sebebiyet vermekte, bu durumda reaksiyon hızının yüksek olduğu yakıtlar için yüksek sıcaklık bölgelerinde değişime sebebiyet vermektedir.

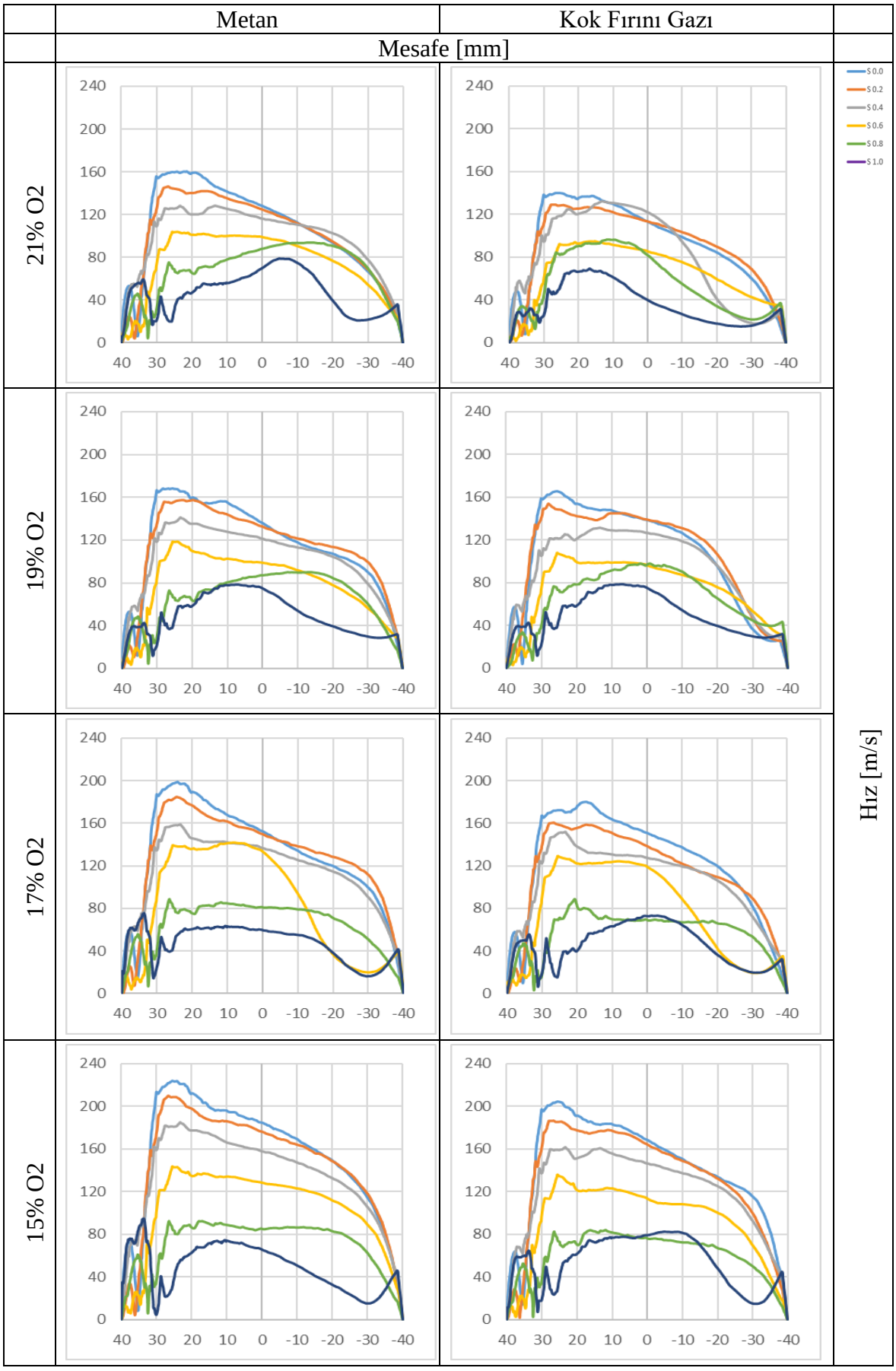


Şekil 6.22. Orta düzlemde, farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında, Metan için hız değeri dağılımı grafiği



Şekil 6.23. Orta düzlemde, farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında, Kok Fırını Gazı için hız değeri dağılımı grafiği

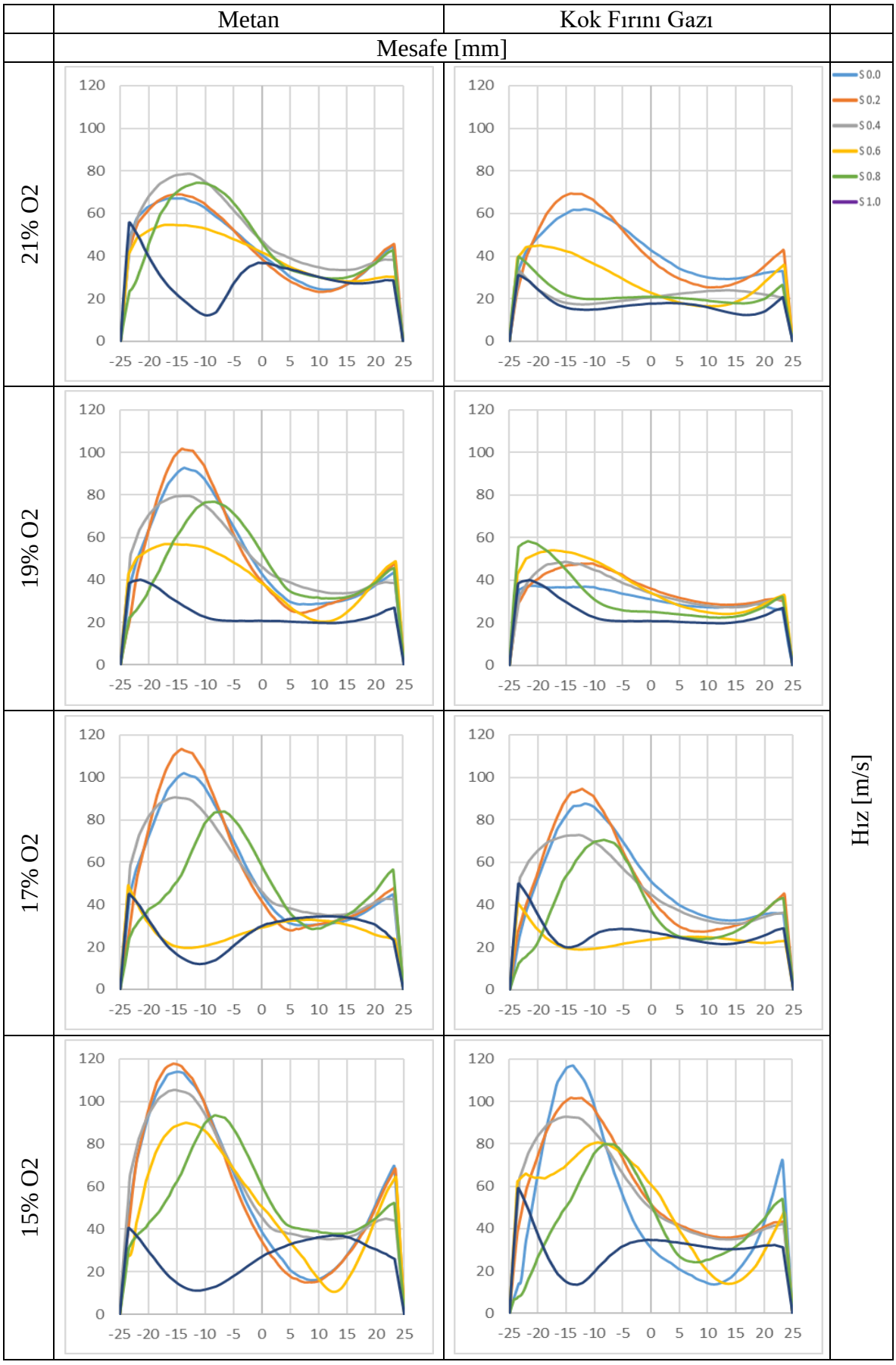
Şekil 6.24'de giriş hattı boyunca hız dağılımı değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikte yanma odası hava girişinden (+40 mm noktası) yanma odası tabanına doğru (-40 mm noktası) hız değeri değişimleri gösterilmektedir. Grafiklerde oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranına göre (21%, 19%, 17% ve 15% O2 için) grafikler, her iki yakıt için listelenmiştir. +40 ve +30 mm mesafesi arasında, hava ile buna dik yönde gönderilen yakıt karışmaktadır ve tüm grafiklerde bu bölgedeki hız değerleri dalgalı olarak görülmektedir. Her iki yakıt için de oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının azalmasına bağlı olarak ulaşılan en yüksek hız değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, eşdeğerlik oranının sabit olması nedeni ile, yanma odasına gönderilen oksijen miktarının sabit tutulması, fakat oksijen oranının düşürülmesi amacı ile seyreltici gaz olarak azot ilavesi yapılması sonucu oksitleyici hava debisinin, oksijen oranının düşmesine bağlı olarak yükselmesidir. Grafiklerdeki genel trend bu şekilde olsa da girdap sayısının artması ile giriş havasındaki debi artışının, hız değerleri üzerindeki etkisinin azaldığı ve daha yataya yakın ve homojen hız dağılımı grafikleri elde edildiği görülmektedir. Özellikle S=0,8 ve S=1,0 grafileri incelendiğinde, giriş havasındaki debi artışının hız grafikleri üzerinde çok sınırlı etkisi olduğu görülmektedir. Girdap sayısının artışına bağlı olarak görülen bu etkinin, girdap oluşturucu etkisinde hava akımının girdaplar oluşturacak şekilde yanma odası boyunca dağılması ve akış hızının eksenel, tanjant ve normal yönde vektörlere bölünmesi nedeni ile meydana geldiği değerlendirilmiştir. Girdap oluşturucu tasarımı ile, daha homojen ve hızlı yakıt-hava karışımı elde edilmesi amaçlanmıştır. Grafiklerde bunun sonucu oluşan etki görülmektedir. Ayrıca girdap sayısının artışı ile -20 ve -40 mm mesafeleri arasında hız değerinde azalma ve daha sonra bir artış ve yeniden azalma görülmektedir. Burada akışın momentumuna bağlı olarak ve akış birleşmelerine bağlı olarak bir resirkülasyon etkisi daha görülmektedir. Yanma odası içerisindeki bu gelişen resirkülasyon etkisinde bölgesel olarak yanma hızının yavaşlayacağı ön görülmektedir. Nitekim Şekil 6.29'deki sıcaklık grafikleri incelendiğinde, girdap sayısı arttıkça, özellikle S=0,6, S=0,8 ve S=1 grafiklerinde, bu gölgede sıcaklık değerlerinin azaldığı, -30 mm mesafesinden itibaren termal NOx oluşumu için belirleyici olan 1800 K altına gerilediği ve Şekil 6.32'deki NOx oluşumu grafikleri incelendiğinde bu bölgelerde NOx oluşum değerlerinin de ciddi oranda azaldığı görülmektedir.



Şekil 6.24. Giriş Hattı boyunca hız değerlerindeki değişim grafiği

Şekil 6.25'de Taban hattı boyunca hız değeri değişimi grafikleri gösterilmektedir. Grafik, yanma odasının hava girişi kısmına yakın yan duvarından (-25 mm mesafesi) çıkış kısmına yakın yan duvarına (+25 mm) kadar hız değerlerindeki değişimi göstermektedir. Taban hattı boyunca, yanma odası tabanına yakın hız dağılımı değerleri, yanma odası resirkülasyonu üzerine girdap sayısındaki artış ve oksijen oranındaki azalışın etkilerini gözlemlemek için bu grafikler kullanılmıştır. Yanma odası tasarımı gereği, ana jet akımını oluşturan hava girişi ve yanma sonu gazların çıkışı aynı duvar üzerindedir. Yanma odası tabanında hava akımının yön değiştirerek çıkışa yönelmesi ve bu sırada iç resirkülasyonu destekleyerek, yanmış gazlarının tekrar hava girişine karışıp yanma odası tabanına doğru, oksijeni seyreltici etkide bulunması hedeflenmiştir.

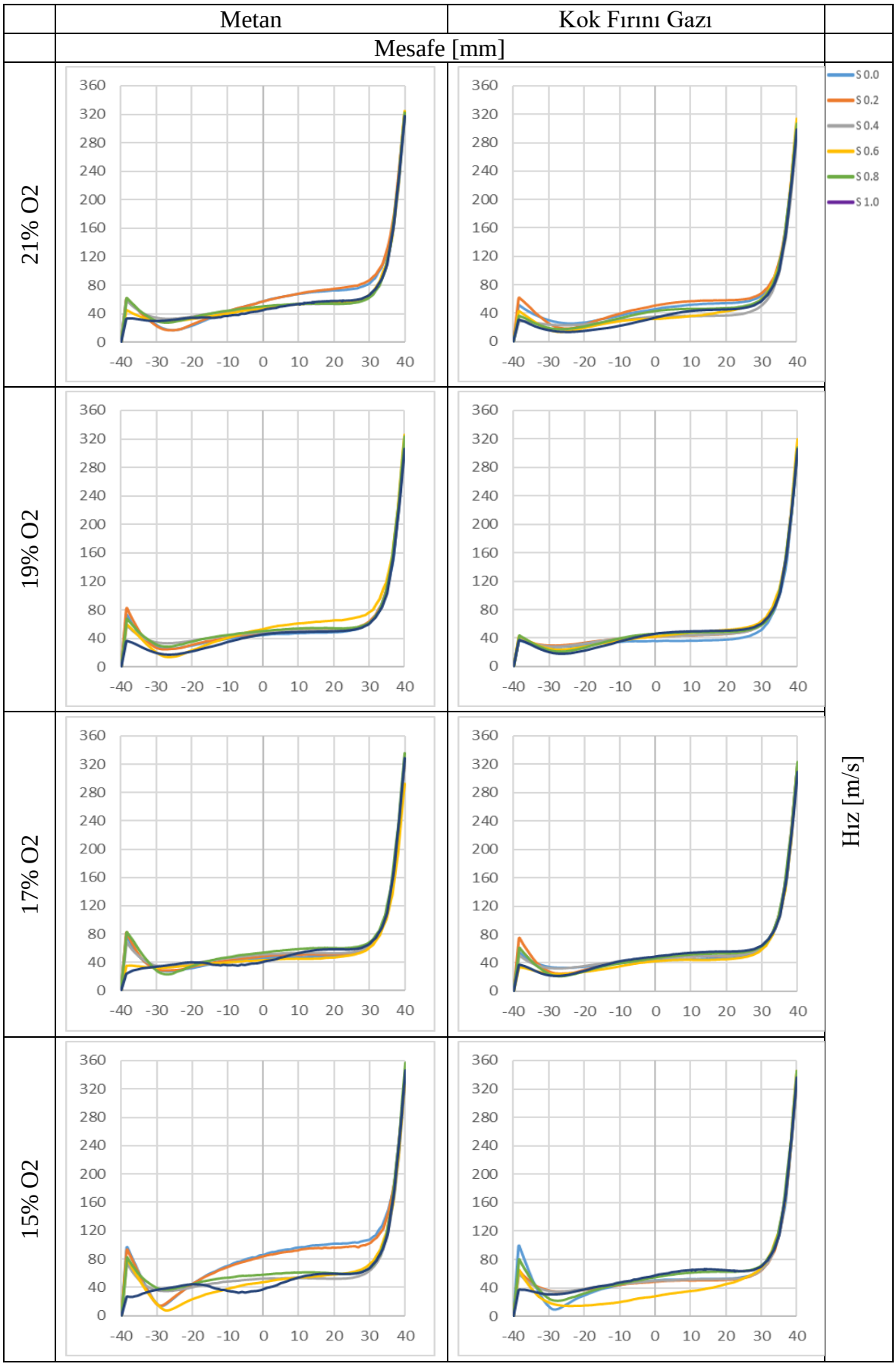
Grafikler incelendiğinde hava giriş kısmına yakın olan -20 ve -5 mm mesafeleri arasında, hız değerlerinin genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, hava girişine yakın olan bu bölgenin hızının, oksitleyici havanın momentumu ektisinde ve iç resirkülasyon sonucu ilave olarak yönlenen yanma sonu ürünler etkisinde, artması olduğu değerlendirilmiştir. Grafiklerde girdap sayısındaki değişimin etkilerini ayırmak zor olsa da S=1 için hız, diğer koşullardakine göre daha yatay bir seyir içerisindedir. Sonuçlar Şekil 6.30'de verilen sıcaklık grafikleri ile beraber incelendiğinde, bu bölgede hız azalmasına rağmen sıcaklık değerinin bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum girdapların oluşturduğu akımın, yanma sonu gazların yanma odası tabanına ulaşamadan dağılmasına sebep olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Girdap sayısındaki atışın, yanma odası boyutları ile uyum içinde belirlenmesi gerektiği açıkça görülmektedir.



Şekil 6.25. Taban Hattı boyunca hız değerlerindeki değişim grafiği

Şekil 6.26'de çıkış hattı boyunca hız dağılımı değerleri karşılaştırılmıştır. Grafikte yanma odası tabanından (-40 mm noktası) yanma odası çıkışına doğru (+40 mm noktası) hız değeri değişimleri gösterilmektedir. Grafiklerde oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranına göre (21%, 19%, 17%, 15%) grafikler, her iki yakıt için de listelenmiştir. +40 ve +30 mm mesafeleri arasında yanma odası çıkışına yaklaştıkça, akışkan hızı, çıkış kısmının daralmasına bağlı olarak artmaktadır. Bu etki tüm durumlarda benzerdir. Oksijen oranının azaldığı durumlarda, yanma odasına gönderilen havanın debisinin artmasından kaynaklı yanma odası çıkış kısmında ulaşılan en yüksek hız değerinin arttığı görülmektedir. Yanma odası taban kısmına yakın -30 ve -40 mm mesafeleri arasında, tüm durumlarda hızda artış ve azalış görülmektedir. -40 mesafesi yanma odası tabanına çok yakın olması sebebi ile burada hız sıfıra yakınken, -30 ve – 40 mesafeleri arasında hızda artış ve yeniden azalış görülmektedir. Bunun nedeni yanma odası tabanına yakın bu bölgede, yanma odası içerisinde dolaşan hava ve yakıt jet akımı etkisinde hızın artmasıdır. -20 ve +30 mesafeleri arasında tüm durumlarda kademeleri olarak hızda artış görülmektedir.

Yanma odası tabanına yakın -30 ve -40 mm mesafeleri arasındaki hız artışı, oksijen oranının düşürülmesine yönelik giriş havası debi artışı ile artmakla birlikte, girdap oluşturucu etkisinde azalmaktadır. Girdap sayısının artışına bağlı olarak belirtilen bölgede hız değerinin azalması, girdaplar etkisinde akışın teğet ve normal yönlerde dağılması sonucu gerçekleştiği değerlendirilmiştir.

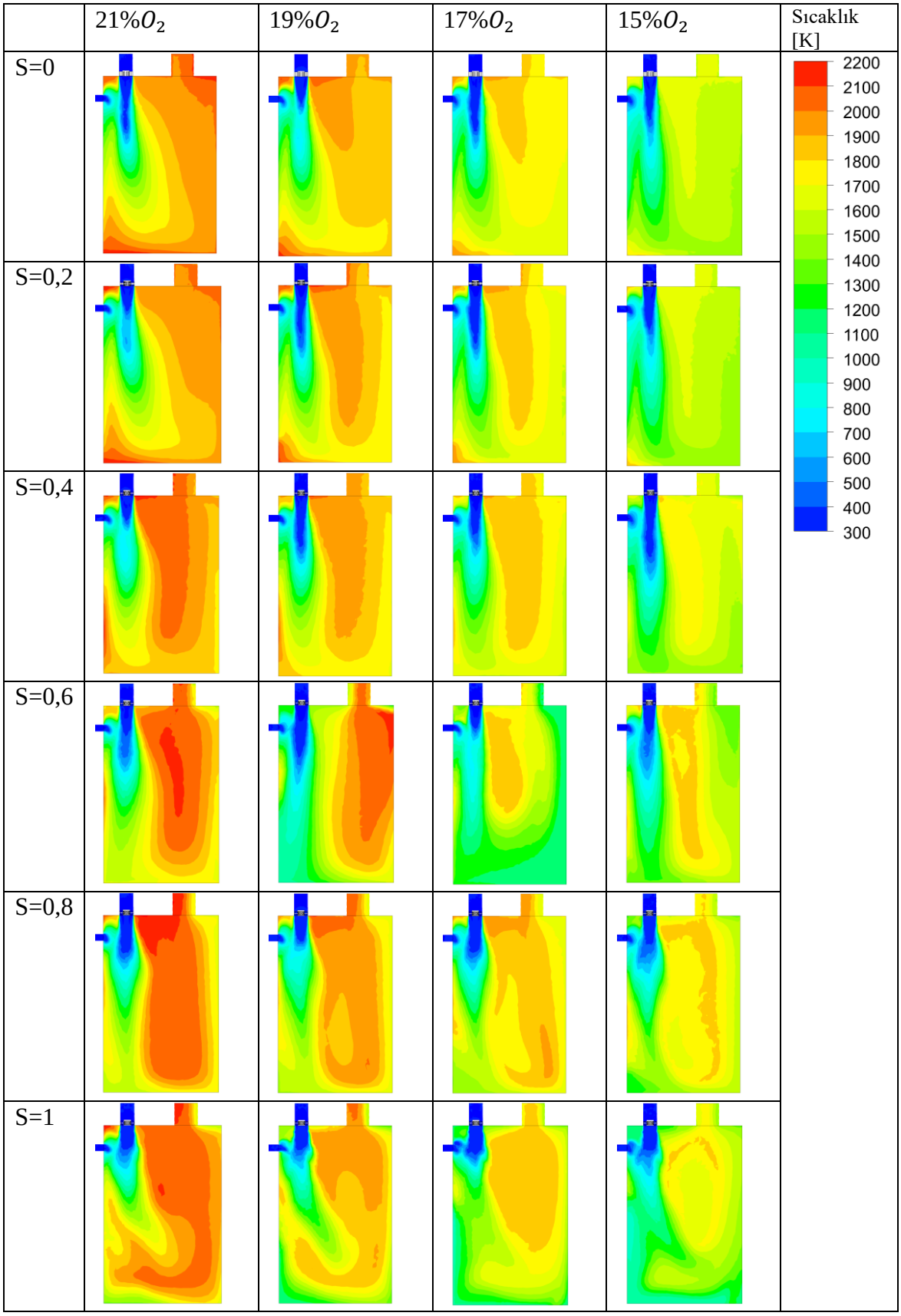


Şekil 6.26. Çıkış Hattı boyunca hız değerlerindeki değişim grafiği

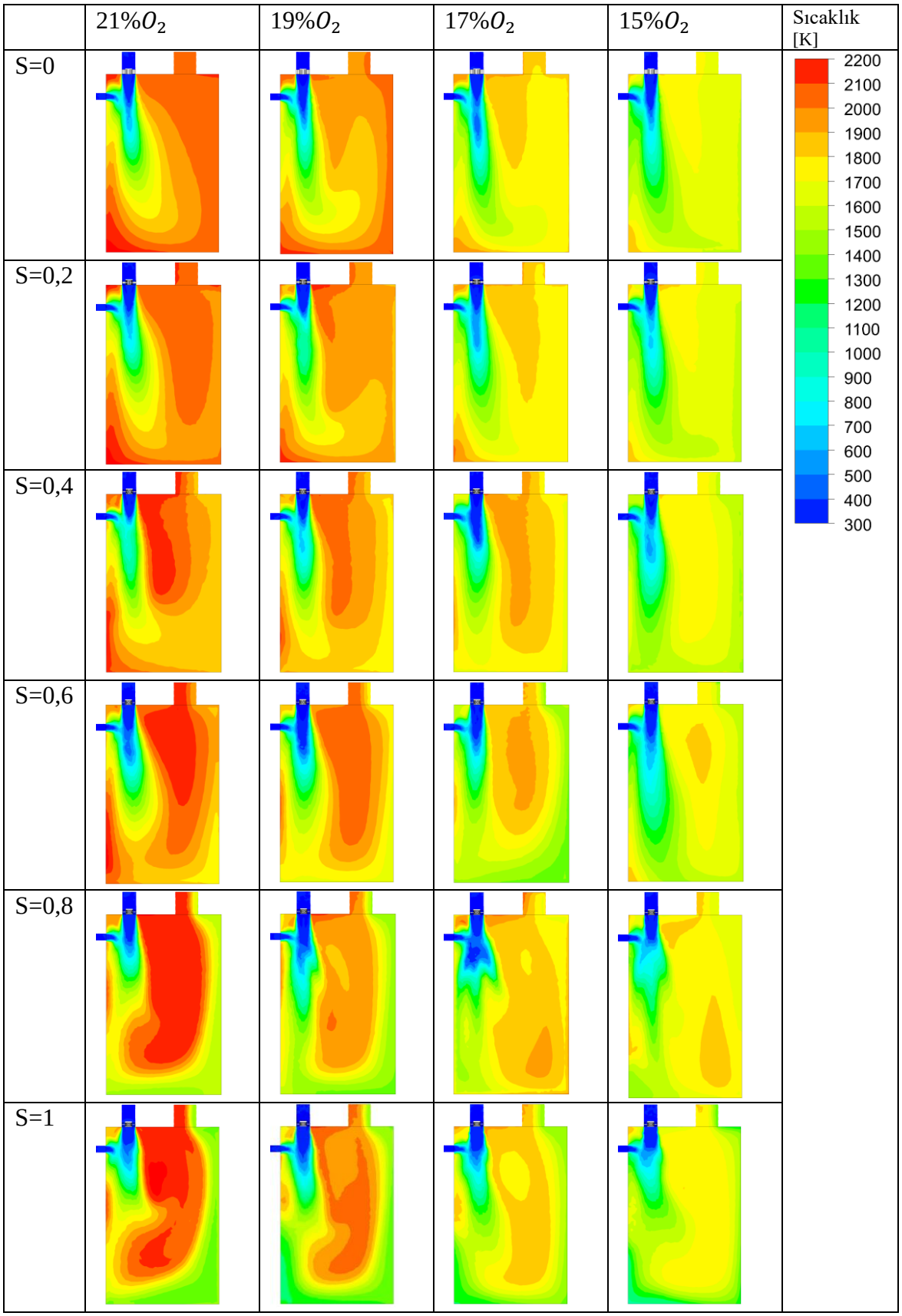
6.3.2. Sıcaklık

Şekil 6.27'de Metan yakıtı için değişen oksijen oranlarında ve girdap sayılarında yanma odası orta düzlemi boyunca sıcaklık dağılımı grafikleri gösterilmiştir. Tüm girdap sayıları için oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının azalmasının, yanma odası boyunca ulaşılan en yüksek sıcaklık değerini düşürdüğü değerlendirilmektedir. Aynı oksijen oranı seviyelerinde girdap oluşturucu etkisi incelendiğinde; özellikle girdap sayısı S=0,4 değerine yaklaştıkça, girdap oluşturucu etkisinde, oksijen oranı yüksek olan %21 ve %19 O2 koşulu için, sıcaklık bölgelerinin azaldığı, daha homojen sıcaklık dağılımı elde edildiği tespit edilmiştir. %17 ve %15 oksijen oranına sahip durumlarda ise, sıcaklık değerleri yanma odasının merkezine doğru bir miktar artış göstermektedir. Fakat grafikler Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'de verilen NOx oluşumu grafikleri ile birlikte incelendiğinde, girdap oluşturucu etkisinde, özellikle S=0,4 ve üzeri değerler için giriş hattı, taban hattı ve çıkış hattı boyunca NOx oluşumunda ciddi düşüşler elde edildiğini göstermektedir. Girdap oluşturucular, yakıt ve hava karışımını yanma odasının belirli bölgelerine sürüklese bile ani yanma etkisinde oluşan NOx azaltılabilmiş ve termal NOx oluşumu da ciddi oranda artmamıştır. Tüm bu durum, özellikle yüksek oksijen oranına sahip oksitleyici hava için, girdap oluşturucu etkisinde dağıtılmış yanma şartlarına yaklaşılabildiğini göstermektedir.

Şekil 6.28'de Kok fırını gazı yakıtı için değişen oksijen oranlarında ve girdap sayılarında yanma odası orta düzlemi boyunca sıcaklık dağılımı grafikleri görülmektedir. Metan gazından farklı olarak, kok fırını gazı, yüksek oranda hidrojen içermektedir. Hidrojen oksijen ile çok hızlı reaksiyona girmesi sebebi ile yerel yüksek sıcaklık bölgeleri oluşumunda daha etkilidir. Grafikler incelendiğinde metan gazına benzer şekilde; aynı oksijen oranları için girdap sayısı S=0,4 değerine kadar %21 ve %19 oksijen oranlarında girdap oluşturucu etkisinde daha homojen sıcaklık dağılımları elde edilebilmiştir. %17 ve %15 oksijen oranına sahip durumlarda ise, sıcaklık değerleri yanma odasının merkezine doğru bir miktar artış göstermektedir. Fakat grafikler, Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34'de verilen NOx oluşumu grafikleri ile karşılaştırıldığında, girdap oluşturucu etkisinde, giriş hattı, taban hattı ve çıkış hattı boyunca NOx oluşumunda ciddi düşüşler elde edildiğini göstermektedir. Metan gazından farklı olarak kok fırını gazı, içerdiği yüksek hidrojenin tepkime hızından dolayı, ani NOx oluşumuna daha yatkındır. NOx oluşum grafiklerinde daha kararsız NOx oluşum desenleri görülse de özellikle yüksek oksijen oranına sahip koşullarda girdap oluşturucu etkisinde dağıtılmış yanma şartlarına yaklaşılabildiği görülmektedir.

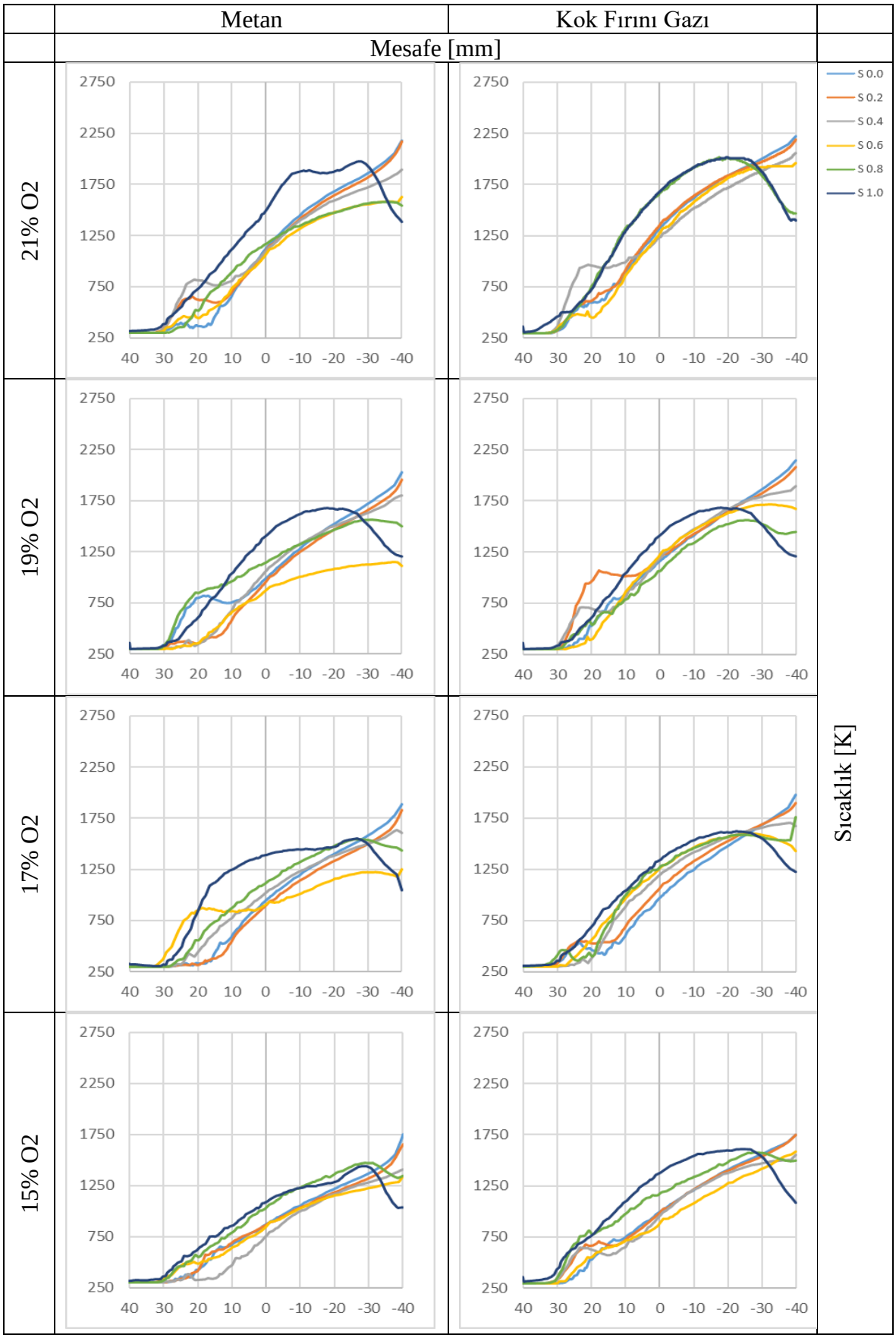


Şekil 6.27. Metan yakıtının farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında orta düzlemdeki sıcaklık dağılımı değerleri



Şekil 6.28. Kok fırını gazı yakıtının farklı girdap sayılarında ve oksijen oranlarında orta düzlemdeki sıcaklık dağılımı değerleri

Şekil 6.29’de giriş hattı boyunca sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Grafikte yanma odası hava girişinden (+40 mm noktası) yanma odası tabanına doğru (-40 mm noktası) sıcaklık değeri değişimleri görülmektedir. Grafiklerde oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranına göre 21%, 19%, 17%, 15% O2 grafikleri, her iki yakıt için de listelenmiştir. Her iki yakıt için ve farklı oksijen oranlarında olsa bile, girdap oluşturucu sayısı arttıkça sıcaklık artışına başlama noktasının, yanma odası girişine daha yakın hale geldiği (+40 mm mesafesi değerine yaklaştığı) görülmektedir. Bunun nedeni olarak, girdap oluşturucu etkisinde havanın teğet ve radyal yönlerde daha fazla momentum kazanması ve eksenel yönde hızını kaybetmesi neticesinde, yanmanın, yanma havası girişi bölgesine daha yakın başlaması olarak değerlendirilmektedir. Girdap oluşturucu etkisi incelendiğinde, girdap sayısının S=1 olduğu durumda, giriş hattı boyunca sıcaklık dağılımının daha dengeli olduğu görülmektedir. Dengeli sıcaklık dağılımından kastedilen, grafiklerin yataya daha yakın seyretmesi ve mesafeye göre sıcaklık değeri değişimlerinin daha az olmasıdır. Ayrıca tüm grafiklerde girdap oluşturucu sayısındaki artış ile beraber ulaşılan en yüksek sıcaklık değerinde azalma da görülmektedir. Özellikle S=1 için oluşturulan grafiklerin tamamında en yüksek sıcaklık değeri, diğer koşullara göre azalmaktadır. Burada, hava girişine eklenen girdap oluşturucuların dağıtılmış yanma şartlarını desteklediği açıkça görülmektedir.



Şekil 6.29. Giriş hattı boyunca Metan ve Kok Fırını Gazı için girdap oluşturucu etkisinde sıcaklık değerleri değişimi grafiği

Şekil 6.30'de taban hattı boyunca sıcaklık değeri değişimi grafikleri gösterilmektedir. Grafik, yanma odasının hava girişi kısmına yakın yan duvarından (-25 mm mesafesi) çıkış kısmına yakın yan duvarına (+25 mm) kadar sıcaklık değerlerindeki değişimi göstermektedir. Hem metan hem de kok fırını gazı için, oksijen oranındaki azalma ile birlikte, taban hattı boyunca ortalama sıcaklık değerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum tüm girdap sayısı değerleri için paralellik göstermektedir. Taban hattı üzerindeki eğri profilleri incelenerek özellikle resirkülasyon bölgelerinin tespiti mümkündür. Yanma sonu gazların yakıt ile havanın karışımının devam ettiği aktif bölgelere (-20, -5 mm değerleri arasında kalan bölge) doğru sürüklenmesi ile bu bölgelerde yanma reaksiyonunun dağıtılmış yanma şartlarına yakınsaması ve yanmanın daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi beklenmektedir. Grafiklerde, girdap sayısını arttıkça yanma odası kenarlarından ziyade yüksek sıcaklık bölgelerinin yanma odası merkezine yakın -15 ve +15 mm mesafesi aralığında yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle girdap sayısı S=0,6; 0,8 ve 1 değerlerinde bu etki görülürken, S=0; 0,2 ve 0,4 grafiklerinde tersine orta bölgede sıcaklık değerleri düşük iken kenarlara yaklaştıkça sıcaklıkta artış görülmüştür. Oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranı azaldıkça bu etki azalmaktadır. Oluşan ektinin oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranı ve oksitleyici havanın momentumu ve yönü kaynaklı olduğu değerlendirilmiştir.

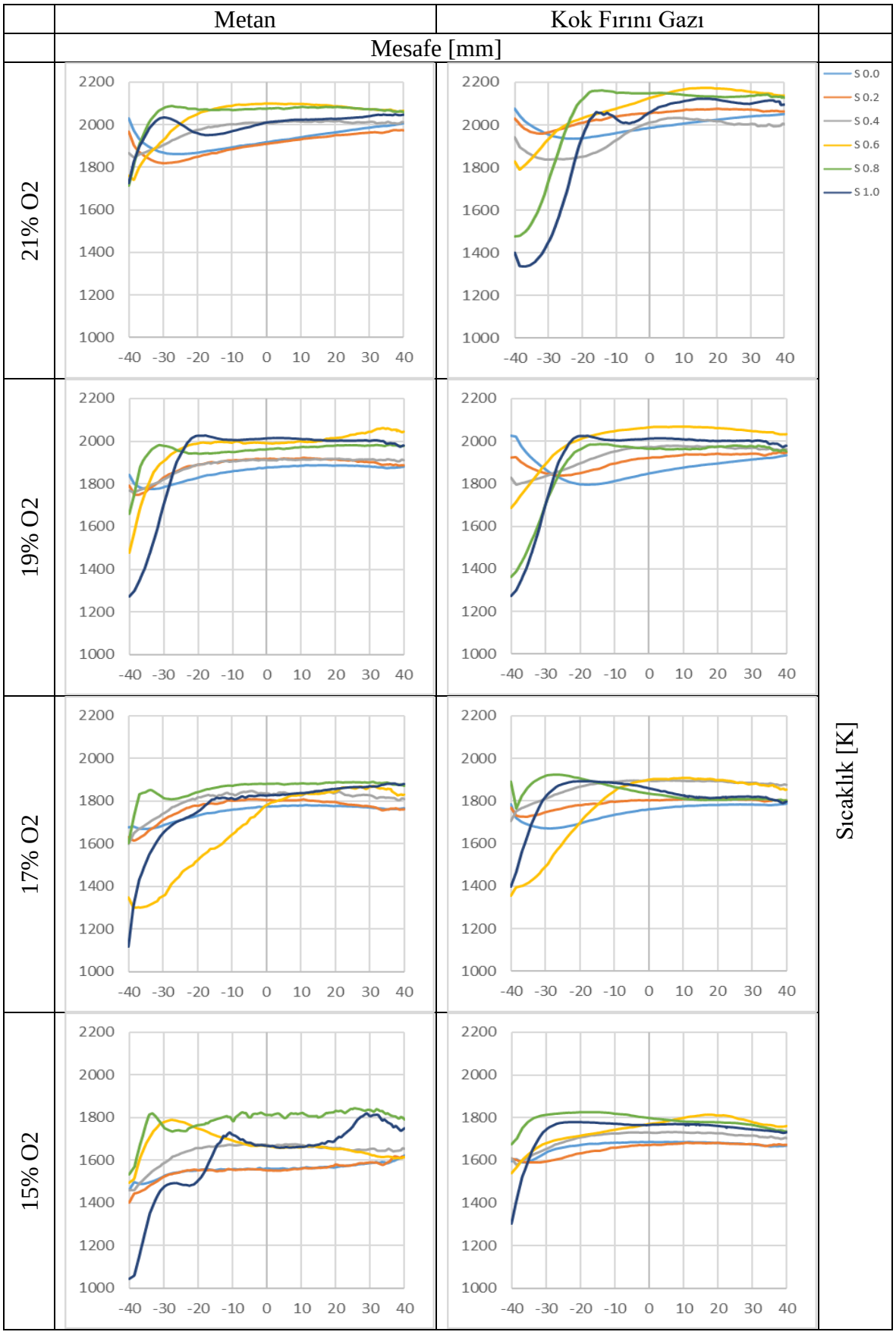


Şekil 6.30. Taban Hattı boyunca Metan ve Kok Fırını Gazı için girdap oluşturucu etkisinde sıcaklık değerleri değişimi grafiği

Şekil 6.31'de çıkış hattı boyunca sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Grafikte yanma tabanından (-40 mm noktası) yanma odası çıkışına doğru (+40 mm noktası) sıcaklık değeri değişimleri görülmektedir. Tüm koşullarda, oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının azalması ile birlikte çıkış hattı boyunca ulaşılan en yüksek sıcaklık değerlerinde azalma gözlemlenmektedir. Yanma odası genelinde görülen ve dağıtılmış yanma şartlarına yakınsandığını gösteren bu durum, çıkış hattında da görülmektedir. Grafiklerin genel seyrine bakıldığında, yanma odası tabanında sıcaklık değerlerinde dalgalanma görülmekte, yanma odası çıkışına doğru ilerledikçe grafiklerde daha yatay bir seyir görülmektedir. Yanma odası taban kısmına yakın bölgelerde grafiğin seyri oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranına ve girdap sayısına bağlı olarak değişmektedir.

Girdap sayısının göreceli olarak düşük kabul edilebileceği S=0; 0,2 ve 0,4 değerlerinde yanma odası tabanına (-40 mm mesafesine) yakın bölgelerde sıcaklık değerinin önce azaldığı ve sonra yeniden bir miktar arttığı görülmektedir. Bu etki oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının azalmasına bağlı olarak devam etmekte fakat taban noktasında oluşan sıcaklık değerleri giderek düşmektedir. Girdap sayısının göreceli olarak yüksek kabul edilebileceği S=0,6; 0,8 ve 1 değerlerinde ise çıkış bölgesine doğru sıcaklık değerleri daha fazla düşmekte ve yanma odası tabanına yaklaştıkça grafiklerin formu aşağı yönde değişmektedir.

Girdap oluşturucu etkisinde girdap sayısındaki artışa bağlı olarak yanma odası tabanındaki sıcaklık değeri azalmaktadır. Aynı etki oksijen oranının azalması ile de gerçekleşmektedir. Bu sonuçların paralellik göstermesi ile girdap oluşturucunun, oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının azaltılması sonucu oluşan etkiye benzer şekilde, renksiz dağıtılmış yanma şartlarını destekleyici etkisi olduğu ve bu etkinin girdap sayısındaki artış ile birlikte yanma odası taban bölgesi için artırdığı söylenebilir. Ayrıca grafiklerde oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının göreceli olarak yüksek olduğu durumlarda, girdap oluşturucunun taban bölgesindeki sıcaklığı düşürücü etkisinin daha fazla olduğu tespit edilmektedir.



Şekil 6.31. Çıkış Hattı boyunca Metan ve Kok Fırını Gazı için girdap oluşturucu etkisinde sıcaklık değerleri değişimi grafiği

6.3.3. NOx

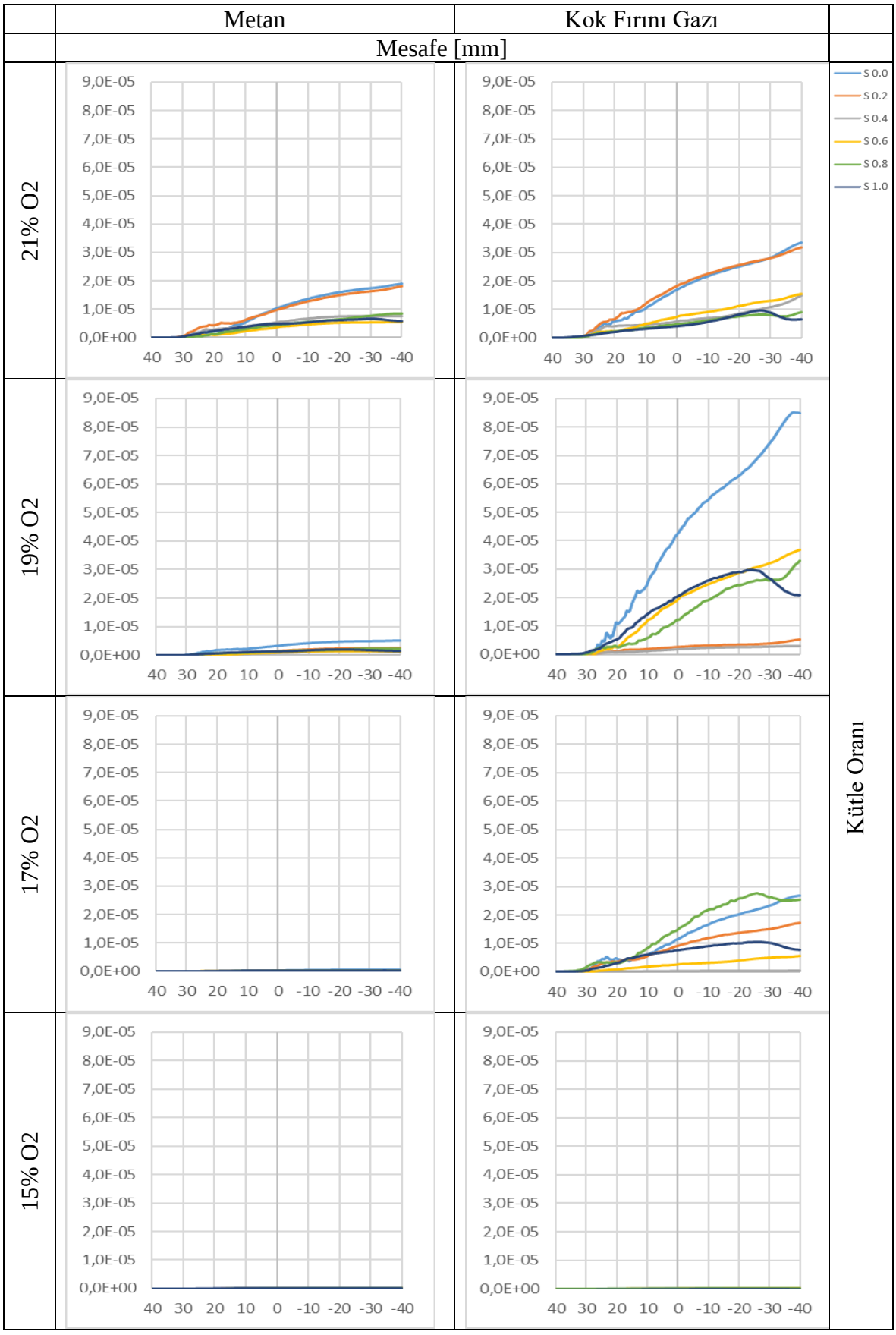
NOx oluşum değerleri giriş hattı, taban hattı ve çıkış hattı boyunca Şekil 6.32, Şekil 6.33 ve Şekil 6.34‘de incelenmiştir. Grafikler incelendiğinde, Metan yakıtı için tüm oksijen oranlarında giriş hattı, taban hattı ve çıkış hattında girdap oluşturucu etkisi ile NOx oluşumunun belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Özellikle girdap sayısı S=0,4 değeri ve üzeri koşullarda NOx oluşumu önemli ölçüde azalmaktadır. Sıcaklık grafikleri ile birlikte değerlendirildiğinde, yüksek girdap sayılarında yüksek yerel sıcaklık bölgeleri görülmesine rağmen, girdap sayısının artışı ile birlikte genel olarak NOx oluşumunun azalığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, girdapların, yakıt ve hava karışımını yanma odası boyunca dağıtmasından dolayı yanma hızının azalması ve ani NOx oluşumunun azalması olarak değerlendirilmiştir.

Kok fırını gazı için, metan yakıtına benzer, genel bir eğilim görülmesine rağmen, grafikler daha karmaşıktır. Bunun nedeni, yakıt içeriğindeki hidrojenin reaksiyon hızının yüksek olması ve gönderilen hava debisinin metan yakıtına göre daha fazla olması olarak açıklanabilir. Yine de genel eğilim, girdap sayısının artması ile NOx oluşumunun azalması yönündedir. Giriş hattı, taban hattı ve çıkış hattı grafikleri birlikte değerlendirildiğinde, tüm oksijen oranları için girdap sayısının S=0,4 olduğu durumda en düşük NOx oluşumu bakımından en iyi durumun oluştuğu gözlemlenmektedir.

Şekil 6.32’de giriş hattı boyunca NOx değerleri gösterilmektedir. Grafikte yanma odası hava girişinden (+40 mm noktası) yanma odası tabanına doğru (-40 mm noktası) NOx değeri değişimleri görülmektedir. Grafiklerde oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranına göre 21%, 19%, 17%, 15% O2 grafikler, her iki yakıt için de listelenmiştir. Grafiklerde +30 ve +20 mm mesafeleri arasında NOx oluşumunun başladığı görülmektedir. Bu aralıkta yanma reaksiyonu ürünler arasında NOx oluştuğu görülmektedir. Hava ile yakıtın ilk karşılaştığı bu alanda NOx oluşum grafiğinde görülen küçük dalgalanmaların, reaksiyon hızı ve sıcaklığına bağlı olarak oluştuğu değerlendirilmiştir. Girdap sayısındaki artış ile birlikte bu bölgede ve hat boyunca NOx oluşumunun önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Oluşan girdapların etkisinde yanma odası boyunca havanın yakıtı sürüklemesi neticesinde reaksiyon sürelerinin uzadığı ve dağıtılmış yanma şartlarının yakınsandığı düşünülmektedir.

Metan gazı grafikleri incelendiğinde girdap oluşturucu etkisinde hat boyunca NOx oluşumundaki azalma görülmektedir. Ayrıca oksitleyici hava içerisindeki oksijenin de azalması ile birlikte, NOx oluşumunun çok düşük seviyelere ulaştığı ve bu durumun daha önce incelenen sıcaklık grafikleri ile de uyumlu olduğu görülmektedir.

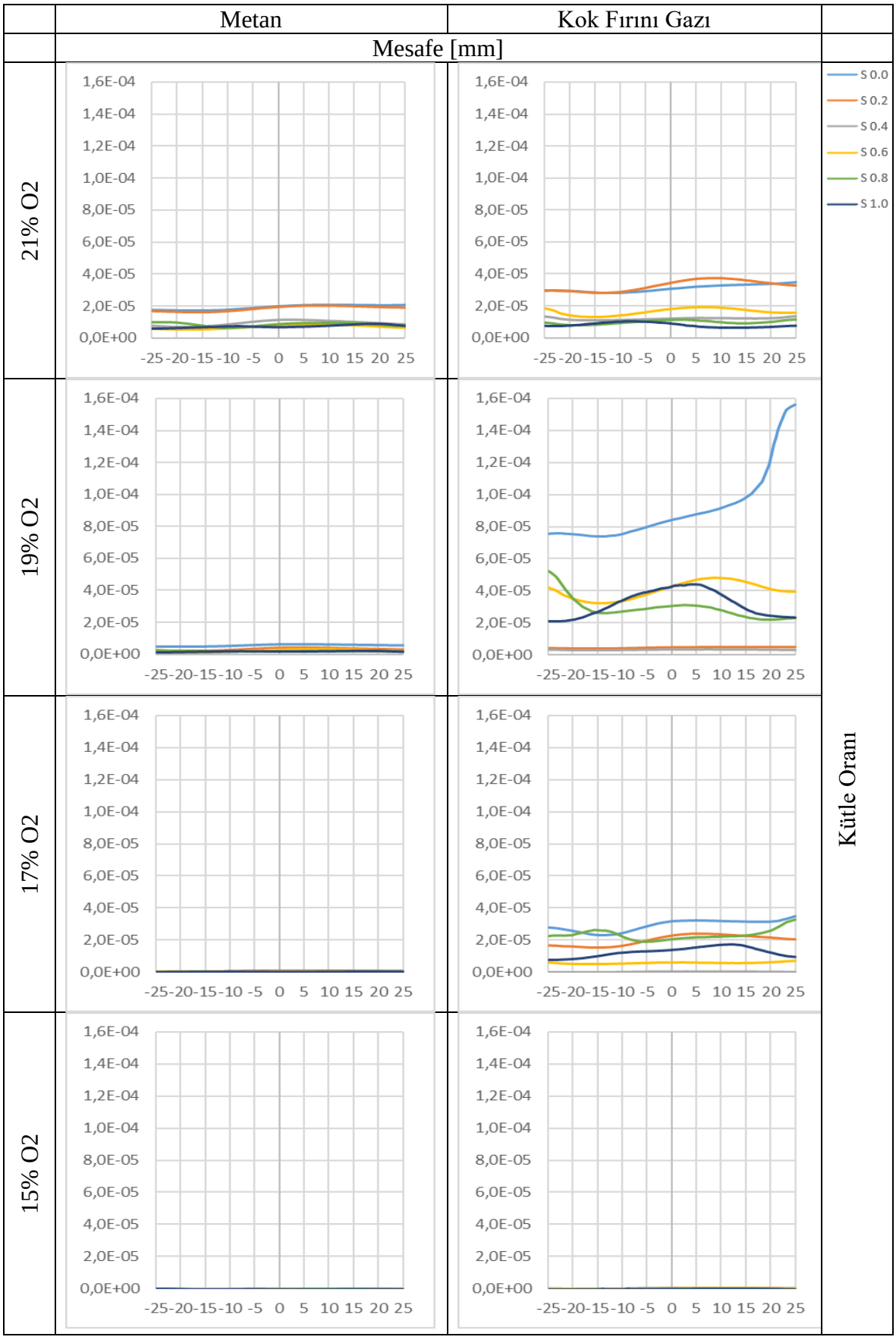
Kok fırını gazı için grafiler incelendiğinde ise metan gazı sonuçları ile paralellik görülmesine karşın, oksijen oranındaki değişimin daha dalgalı sonuçları olmuştur. Grafikler metan gazı ile karşılaştırıldığında; %21 oksijen durumunda, üretilen en yüksek NOx değerleri yüksektir. Bunun nedenin kok fırını gazı içeriğinde bulunan hidrojen olduğu değerlendirilmiştir. Yakıt içerisinde serbest halde bulunan hidrojen, oksijen ile çok hızlı ve yüksek ısı enerjisi yayarak tepkimeye girmektedir ve bu durum termal ve ani NOx oluşumunu arttırmaktadır. Oksijen oranı %19 'a düşürüldüğünde ise NOx miktarları, metan gazı sonuçlarının aksine giderek artmaktadır. Bunun gerekçesi olarak oksitleyici havadaki oksijenin seyreltilmesi için inert gaz olarak ilave edilen azotun yanma odası içerisinde tepkimeye hazır azot miktarını artırması olarak gösterilebilir. %19 oksijen oranında, tepkime hala renksiz dağıtılmış yanma şartlarına tam olarak yakınlaşamamıştır. Bu esnada ortama gönderilen ilave azot ile NOx miktarı artmaktadır. Sırası ile %17 ve %15 oksijen oranlarında ise NOx miktarı kademeli olarak tekrar düşmekte, %15 oksijen oranında çok düşük NOx miktarları görülmektedir. %17 oksijen oranında dağıtılmış yanma şartları yakınsandığı için NOx oluşum miktarı azalmış, %15 oksijen oranında ise tamamen renksiz dağıtılmış yanma şartlarına ulaşılmıştır.



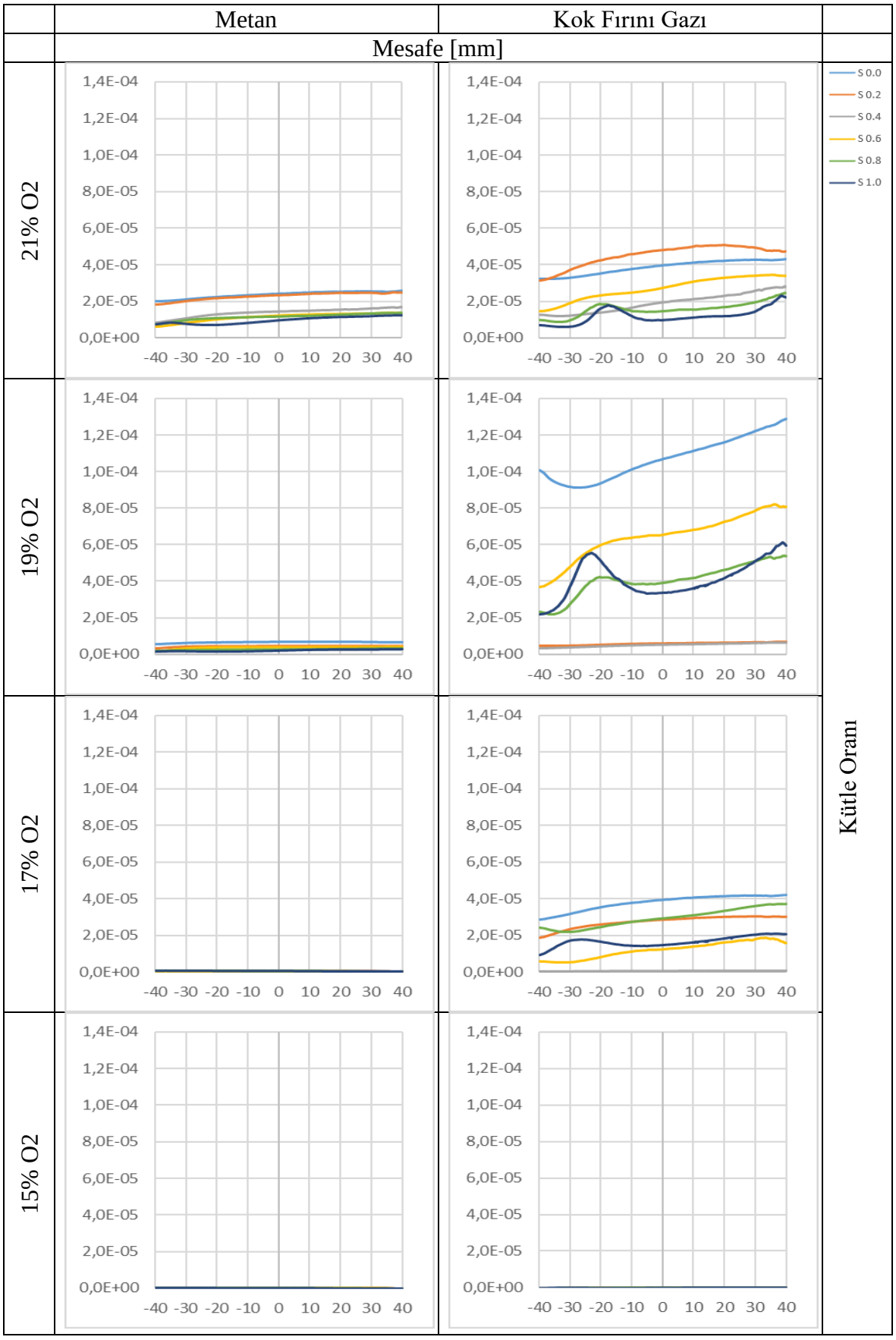
Şekil 6.32. Giriş Hattı boyunca girdap oluşturucular etkisinde NOx kütle oranı değeri değişimi grafiği

Şekil 6.33'de Taban hattı boyunca NOx değeri değişimi grafikleri gösterilmektedir. Grafik, yanma odasının hava girişi kısmına yakın yan duvarından (-25 mm mesafesi) çıkış kısmına yakın yan duvarına (+25 mm) kadar sıcaklık değerlerindeki değişimi göstermektedir. Grafiklerin genel seyri takip edildiğinde oldukça yatay devam eden, oksijen oranının azalması ile azalan NOx oluşumu formu görülmektedir. Metan gazı grafilerinde çok ufak farklar dışında genel olarak NOx oluşumu değerleri tüm mesafelerde yakındır. Oksijen oranının azalması ile birlikte yatay seyir değişmemiş fakat dağıtılmış yanma koşulunun sağlandığını gösterir şekilde hat boyunca oluşan NOx miktarı kademeli olarak düşmüştür.

Kok fırını gazı grafikleri incelendiğinde ise, metan gazı ile elde edilen sonuçlara benzer şekilde genel olarak yatay grafikler görülmektedir. Fakat kok fırını gazı içerindeki hidrojen atomlarının oksijen ile hızlı ve yüksek ısıl enerji yayarak tepkimeye girmesi neticesinde termal ve ani NOx oluşumu metan gazına göre daha fazladır. %19 oksijen oranına sahip hava ile yakılan kok fırını gazı grafiği incelendiğinde, giriş hattında görülen sonuçlara benzer şekilde NOx oluşumu artmaktadır. Bunun nedeni, henüz renksiz dağıtılmış yanma şartlarına yaklaşılamamasına karşın, oksitleyici hava içerisindeki oksijeni seyretmek için ilave edilen azotun, yakıt içerisindeki hidrojenin de etkisi ile daha fazla oranda tepkimeye dahil olması ve buna bağlı olarak daha fazla NOx oluşmasıdır. Bu görülen durum %17 oksijen oranında azalmakta ve %15 oksijen oranında renksiz dağıtılmış yanma şartlarına ulaşılarak çok düşük NOx oluşum değerlerine ulaşılmaktadır.



Şekil 6.33. Taban Hattı boyunca girdap oluşturucu etkisinde NOx kütle oranı değişimi grafiği



Şekil 6.34. Çıkış Hattı boyunca girdap oluşturucu etkisinde NOx kütle oranı değişimi grafiği

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında metan ve kok fırını gazı yakıtlarının yüksek ısıl yoğunluğa ve iç resirkülasyona sahip bir yanma odası içerisinde yanma performansı araştırılmıştır. Çalışmanın ilk kısmında, her iki yakıt için de yanma odasına gönderilen oksijen oranı kademeli olarak seyreltilmiş hava ile yanma gerçekleştirilmiş ve yanma odası içerisindeki etkileri incelenmiştir. Her iki yakıt tipi için de oksijen oranının düşürülmesinin 1800 K üzeri sıcaklık bölgelerinin oluşumunu azalttığı, bunun etkisinde NOx ve CO emisyonlarını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise yanma odası hava giriş kısmına ek olarak farklı girdap sayılarına uygun girdap oluşturucular eklenerek, hem oksijen oranının kademeli olarak düşürülmesinin hem de girdap yoğunluğunun kademeli olarak artırılmasının, yüksek enerji yoğunluklu ve iç resirkülasyona sahip yanma odası için, yanma üzerine etkileri incelenmiştir. Girdap sayısı değerindeki artış ile yanma odası içerisindeki yüksek sıcaklık bölgeleri yer değiştirmekle birlikte, her iki yakıt için de özelikle girdap sayısı S=0,6 olduğu durum için sıcaklık dağılımına olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Bu durum girdap sayısının her ayrı durum için optimize edilmesi gerekliliğini göstermektedir.

Sayısal olarak yürütülen çalışmada, ANSYS Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılarak çözümler alınmıştır. Çözümlemede, literatürde sıklıkla yer verilen PDF yanma modeli kullanılmış olup, k-ε türbülans modeli kullanılmıştır [52]. Yapılan sayısal çalışma, doğrulama amacı ile, daha önce yapılan deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak sonuçlar arasında iyi bir uyum yakalanabilmiştir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile, kok fırını gazının renksiz dağıtılmış yanma şartlarında kullanımı ile ilgili bilgi eksikliği giderilmiştir. Metan ve kok fırını gazının renksiz dağıtılmış yanma şartlarına ulaşabilmesi için; oksitleyici havadaki oksijen oranı, iç resirkülasyon etkisi ve girdap sayısı etkisi bilgileri ile literatüre katkı sağlanmıştır. Yüksek oranda hidrojen içeren yakıtların, oksitleyici hava içerisindeki seyreltici azot etkisinde belirli oranlar için azot oksit emisyonunun arttığı, daha sonra renksiz dağıtılmış yanma şartlarının yakınsanması ile azot oksit emisyonlarının azaldığı tespiti yapılmış ve bu bilgi ile literatüre ve uygulamaya yönelik somut katkılar sağlanmıştır.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bilgiler, havacılık endüstrisindeki motorlar ve doğalgaz enerji dönüşüm santrallerindeki gaz türbinleri gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip yanma odalarının tasarımlarında kullanılabilecektir. Bu çalışmada bahsedilen ve teknikler kullanılarak yeni geliştirilecek yanma odaları ile çevreci enerji kullanımı yaygınlaştırılabilecektir. Ayrıca kok fırını gazlarının enerji dönüşüm santrallerinde, çevreci olarak nasıl kullanılabileceği konusuna bu çalışmada ışık tutulmaktadır. Çalışma sonucu elde edilen önemli bulgular aşağıda sunulmuştur.

7.1. Sonuçlar

- Çalışmada her iki yakıt için de eşdeğerlik oranı 0,83 olarak alınmıştır. Bu eşdeğerlik oranını elde etmek için kok fırını gazı yakıtı için daha yüksek debide hava gönderilmesi gerekliliği vardır. Kok fırını gazı yakıtının yanması neticesinde, metan gazına göre daha yüksek ve yaygın yerel sıcaklıkların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin kok fırını gazı içeriğindeki yüksek orandaki hidrojen olduğu değerlendirilmiştir. Hidrojen, oksijen ile yüksek hızda tepkimeye girmekte ve çok dar bir alanda yüksek sıcaklık bölgeleri oluşumuna sebep olmaktadır. Bu nedenle hidrojen oranı yüksek yakıtların oksitleyici hava ile ani karışımı, yüksek sıcaklık bölgeleri oluşumunu desteklemektedir. Nitekim, NOx oluşum grafikleri incelendiğinde kok fırını gazı için NOx oluşum değerleri metandan daha yüksek olduğu görülmektedir. Giriş hattı grafikleri incelendiğinde kok fırını gazının yakılması ile ulaşılan NOx oluşumunun meta gazının yakılması ile ulaşılan NOx oluşumuna göre yaklaşık %50 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.
- Tüm koşullarda oksitleyici hava içerisindeki oksijen yoğunluğunun düşürülmesi için, gönderilen hava içerisindeki azot miktarı artırılmıştır. Geri kalan tüm koşullar sabit tutulduğu için, yanma odasına gönderilen oksitleyici hava debisi, oksijen oranının düşüşüne bağlı olarak artmaktadır. Bu durumun, yüksek debi etkisinde iç resirkülasyonu artırması neticesinde renksiz dağıtılmış yanma şartlarının oluşumunu desteklediği değerlendirilmiştir.
- Oksitleyici hava içerisinde oksijen oranının düşürülmesi ile tüm durumlarda yanma odası boyunca daha dengeli sıcaklık dağılımı gerçekleşmiştir. Oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranının düşürülmesi, yanma tepkimesinin daha geniş bir bölge boyunca gerçekleşerek, homojen sıcaklık dağılımına ulaşılmasını desteklediği belirlenmiştir. %21 oksijen oranına sahip hava ile yapılan çalışmalara göre, %15

oksijen oranına sahip hava ile yapılan çalışmalarda ulaşılan en yüksek sıcaklık değeri yaklaşık %9 oranında düşürülebilmiştir.

- Oksitleyici hava içerisindeki oksijen seviyesinin düşürülmesi için gönderilen havaya eklenen inert gazların etkisinde debi artmaktadır. Debinin artmasının, iç resirkülasyon etkisinde, yanma sonucu oluşan gazların yanma odası içerisinde resirkülasyon ile tekrar yanmanın yoğun olduğu bölgeye yönlendirilmesini desteklemektedir. Resirkülasyonun artması neticesinde yanmanın yoğun olarak gerçekleştiği bölgelerde oksijen yoğunluğu daha da düşmekte ve bu durum dağıtılmış yanma şartlarının elde edilmesine yardımcı olmaktadır.
- Bu çalışmada oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranını azaltmak için azot gazı ilavesi yapılmıştır. Azot ilavesi etkisi ile, özellikle %19 ve %17 oksijen oranına sahip kok fırını gazı için yapılan çözümlemelerde, azot oksit oluşumunda artışa sebebiyet verdiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak yanma odasına gönderilen ilave azotun ortamdaki tepkimeye girmeye hazır azot miktarını artırması ve aynı zamanda yakıt içerisindeki yüksek oranda hidrojen etkisinde gerçekleşen hızlı yanma reaksiyonunun ani ve termal NOx oluşumunu hızlandırması olduğu çıkarımı yapılmıştır. Özellikle %19 ve %17 oksijen oranına sahip koşullarda, ortamdaki oksijen oranının renksiz dağıtılmış yanma şartlarının oluşmasına yetecek kadar az olmadığı değerlendirilmiştir. Bu bulgumuzu destekler şekilde oksijen oranının %15'e düştüğü durumlarda NOx oluşumu hızla azalmıştır. Ayrıca girdap oluşturucu etkisinde, bazı durumlar için, iç resirkülasyonun artması ile NOx oluşumunda bir miktar azalma sağlanabildiği gözlemlenmiştir.
- Girdap oluşturucu etkisinde genel olarak yanma odası boyunca sıcaklık dağılımının daha homojen gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Girdap oluşturucu etkisinde sıcaklık dağılımı arasında ve girdap oluşturucu etkisinde NOx oluşumu arasında genel bir korelasyon görülse bile oksitleyici hava debisi, yakıt ve oksitleyici hava içerisindeki oksijen oranına bağlı olarak sonuçlarda farklılaşmalar görülmektedir. Girdap sayısının artması ile yanma odasında ulaşılan en yüksek sıcaklık değeri yaklaşık %13 düşmüştür. Aynı durum için azot oksit miktarında %50 civarında düşüş gözlemlenmiştir.
- Girdap oluşturucunun sıcaklık dağılımının daha homojen olmasına yönelik olumlu katkısı, yüksek oksijen oranına sahip oksitleyici hava kullanıldığında daha fazla olduğu görülmektedir. %21 oksijen oranına sahip hava için en yüksek sıcaklık değerinde

%13'lük düşüş gözlemlenirken, %15 oksijen oranına sahip hava için %11'lik düşüş gözlemlenmiştir.

- Yakıt içerisinde reaksiyon hızı yüksek serbest hidrojen gibi birleşenlerin yoğun olması durumunda, girdap sayısındaki artışın, ani NOx oluşumu mekanizmasının gerçekleşmesini artırıcı etkisinin olduğu görülmüştür. Çalışmada girdap sayısı değerinin 0,4 'ün üzerinde olduğu durumlarda, NOx üretimi artmaktadır.

7.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar neticesinde, bundan sonra yapılacak akademik ve teknik çalışmalara faydası olması amacı ile aşağıdaki öneriler sunulmaktadır.

- Yanma odası tasarımlarında, yanma sonu gazların bir kısmının yanma odası içerisinde, yanmanın yoğun olarak oluştuğu bölgelere doğru, iç resirkülasyon etkisinde yönlendirilmesi, yerel olarak oksijen oranını düşürecek ve dağıtılmış yanma şartlarının oluşumunu destekleyecektir.
- Serbest hidrojen molekülleri içeren yakıtların, hidrojen ile oksijenin hızlı tepkimeye girme eğilimleri fazladır ve bu nedenle ani ve termal NOx oluşumu daha yüksektir. Bu yakıtlar için ani karışımı destekleyici akışkan mekanizmalarından ziyade yanma sonu gazların resirkülasyonu ile yerel olarak oksijenin seyreltilmesi daha faydalıdır. Bu konu genişletilerek incelenebilir.
- Girdap sayılarına uygun olarak tasarlanan girdap oluşturucuların geometrisi ve konumu için araştırma çalışmaları derinleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Arghode, V.K., Gupta, A.K. and Bryden, M.K. (2012). High intensity colorless distributed combustion for ultra low emissions and enhanced performance. *Applied Energy*, 92, 822-830.

2. Szego, G.G., Dally, B.B. and Nathan, G.J. (2009). Operational Characteristics of a Parallel Jet MILD Combustion Burner System. *Combustion and Flame,* 156(2), 429-438.

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

4. Khalil, A. E., Gupta, A. K. (2014). Clean combustion in gas turbine engines using Butyl Nonanoate biofuel. *Fuel*, 116, 522-528.

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

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

7. Khalil, A.E.E., Gupta, A.K. (2015). Impact of internal entrainment on high intensity distributed combustion. *Applied Energy,* 156, 241-250.

8. Khalil, A.E.E., Arghode, V.K., and Gupta, A.K. (2013). Novel mixing for ultra-high thermal intensity distributed combustion. *Applied Energy*, 105, 327-334.

9. Colorado, A.F., Herrera, B.A. and Amell, A.A. (2010). Performance of a flameless combustion furnace using biogas and natural gas. *Bioresource Technology,* 101(7), 2443-2449.

10. Arteaga Mendez, L.D., Tummers, M.J., van Veen, E.H. and Roekaerts, D.J.E.M. (2015). Effect of hydrogen addition on the structure of natural-gas jet-in-hot-coflow flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3), 3557-3564.

11. Roiha, I., Kaikko, J., Jaanu, K. and Vakkilainen, E. (2014). Analysis of high flue gas recirculation for small energy conversion systems. *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 218-226.

12. İlbaş, M., Karyeyen, S. (2014). Modelling of combustion performances and emission characteristics of coal gases in a model gas turbine combustor. *International Journal of Energy Research,* 38(9), 1171-1180.

13. Feyz, M. E., Esfahani, J. A., Pishbin, I. and Modarres Razavi, S. M. R. (2015). Effect of recess length on the flame parameters and combustion performance of a swirl burner. *Applied Thermal Engineering,* 89, 609-617.

14. Mardani, A., Tabejamaat, S. (2010). Effect of hydrogen on hydrogen-methane turbulent non-premixed flame under MILD condition, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(20), 11324-11331.

15. Lee, M. C., Seo, S. B., Yoon, J., Kim, M. and Yoon, Y. (2012). Experimental study on the effect of N2, CO2, and steam dilution on the combustion performance of H2 and CO synthetic gas in an industrial gas türbine. *Fuel*, 102, 431-438.

16. İlbaş, M., Karyeyen, S. (2015). A numerical study on combustion behaviours of hydrogen-enriched low calorific value coal gases, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(44), 15218-15226.

17. Khalil, A.E.E., Gupta, A.K. (2011). Swirling distributed combustion for clean energy conversion in gas turbine applications. Applied Energy, 88, 3685 - 3693.

18. Khalil, A.E.E., Gupta, A.K. (2013). Hydrogen addition effects on high intensity distributed combustion. Applied Energy, 104, 71–78.

19. Zaidi, Z., Gupta, Y., Gayatri, S.L., Singh, A. (2023). A Comprehensive Discussion on Fuel Combustion and Desulfurization Technologies. *Inorganic Chemistry Communications*, 154, 110964.

20. Solomon, Y., Natan, B., Cohen, Y. (2009). Combustion of Gel Fuels Based on Organic Gellants, Combustion and Flame, 156 (1), 261-268.

21. Correa, S. M. (1992). A review of NOx Formation Under Gas-Turbine Combustion Conditions. *Combustion Science and Technology*, 87, 329-362.

22. Miller, J. A., Bowman C.T. (1989). Mechanisms and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 15, 287– 338.

23. Zeldovich Y.A. (1947). *Oxidation of nitrogen in combustion*. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of USSR, 22-38.

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

25. Perpignan, A.A.V., Rao, A.G. and Roekaerts, D.J.E.M. (2018). Flameless combustion and its potential towards gas turbines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 28-62.

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

27. 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.* (First Edition) Boca Raton: CRC Press, 78-92.

28. Khidr, K.I., Eldrainy, Y.A. and El-Kassaby, M.M. (2017). Towards lower gas turbine emissions: Flameless distributed combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 1237-1266.

29. Fierro, M., Carmona, N. and Toledo, M. (2023). Experimental analysis and performance of refinery fuel gas on lean and rich fuel–air premixed combustion. *Energy Reports*, 9, 3096-3103.

30. Dunn-Rankin, D., Therkelsen, P. (2016). *Lean Combustion*. (Second Edition) Cambridge: Academic Press, 203-229.

31. Liu, Y., Deng, Y., Shi, J., Liu, Y., Wang, X., Ge, B. and Min, Z. (2023). Experimental investigation on flame stability and emissions of lean premixed methane–air combustion in a developed divergent porous burner. *Journal of Cleaner Production*, 405, 137070.

32. Cavaliere, A., de Joannon, M. (2004). Mild Combustion. P*rogress in Energy and Combustion Science*, 30, 329-366.

33. Szego, G. G., Dally, B. B., and Nathan, G. J. (2008). Scaling of NOx Emissions from a Laboratory-Scale Mild Combustion Furnace. *Combustion and Flame*, 154, 281-295.

34. Cavaliere, A., de Joannon, M. (2004) Mild Combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(4), 329-366.

35. Ye, J., Medwell, P.R., Varea, E., Kruse, S., Dally, B.B. and Pitsch, H.G. (2015). An experimental study on MILD combustion of prevaporised liquid fuels. *Applied Energy*, 151, 93-101.

36. Choi, G-M., Katsuki, M. (2000). New Approach to Low Emission of Nitric Oxides from Furnaces using Highly Pre-Heated Air Combustion. *Journal of the Energy Institute*, 73, 18-24.

37. Gupta, A. K. (2004). Thermal Characteristics of Gaseous Fuel Flames using High Temperature Air. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 126, 9-19.

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

39. Verissimo, A. S., Rocha, A. M. A. and Costa, M. (2011). Operational, Combustion and Emission Characteristics of a Small Scale Combustor. *Energy and Fuels*, 25, 2469-2480.

40. Luckerath, R., Meier, W. and Aigner, M. (2008). FLOX® Combustion at High Pressure with Different Fuel Compositions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 130(1), 011505-011512.

41. Wünning, J.A., Wünning, J.G. (1997). Flameless oxidation to reduce thermal no-formation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 23(1), 81-94.

42. Chen, L., Yong, Z.Y., Ghoniem, A.F. (2012). Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 156-214.

43. Hosseini, S.E., Bagheri, G. and Wahid, M.A. (2014). Numerical investigation of biogas flameless combustion. *Energy Conversion and Management,* 81, 41-50.

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

45. Romero-Anton, N., Huang, X., Bao, H., Martin-Eskudero, K., Salazar-Herran, E. and Roekaerts, D. (2020). New extended eddy dissipation concept model for flameless combustion in furnaces. *Combustion and Flame,* 220, 49-62.

46. Karyeyen, S. (2016). *Geliştirilen Bir Yakıcıda Kömür Gazlarının Yanma Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak Araştırılması,* Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 41-42.

47. Spangelo, Ø. (2004) *Experimental and theoretical studies of a lox NOX swirl burner*, PhD Thesis, The Norwegian University of Science and Technology Trondheim, Norway, 7491.

48. 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.

49. Gupta, S.K., Arghode, V.K. (2019). Investigation of a reverse-cross flow combustor with varying fuel injection momentum. *Thermal Science and Engineering Progress,* 10, 232-244.

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

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

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



Gazili olmak ayrıcalıktır…