
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

GELİŞTİRİLEN BİR YAKICIDA KÖMÜR GAZLARININ YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Serhat KARYEYEN

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2016

Serhat KARYEYEN tarafından hazırlanan "GELİŞTİRİLEN BİR YAKICIDA KÖMÜR GAZLARININ YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Başkan : Prof. Dr. Veli ÇELİK

Makine Mühendisliği, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Üye : Prof. Dr. Adnan SÖZEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Üye : Prof. Dr. İlker YILMAZ

Uçak Gövde-Motor, Erciyes Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Üye : Doç. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum .....

Tez Savunma Tarihi: 23/12/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Serhat KARYEYEN

23.12.2016

GELİŞTİRİLEN BİR YAKICIDA KÖMÜR GAZLARININ YANMA KARAKTERİSTİKLERİNİN DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Serhat KARYEYEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2016

ÖZET

Kömürün uzun yıllar yetecek kadar rezervlerinin bulunduğu ve ülkemiz için yerli kaynak olduğu bilinmektedir. Ancak kömürün doğrudan kullanımı, gerek yakma zorlukları gerekse çevre kirliliği açısından çok uygun olmamaktadır. Bu nedenle, kömürlerin gazlaştırılması veya koklaştırma yan ürünleri ile elde edilen kömür gazlarının kullanımı oldukça yaygın bir hal almaktadır. Bu tez çalışması kapsamında, farklı ısıl değerlere sahip kömür gazlarını yakabilecek yeni tip yakıcılar geliştirilmiş ve imal edilmiş olup, kömür gazları bu yakıcılar ile başarılı bir şekilde yakılmış ve kömür gazlarının, doğalgaza (metan) alternatif olabileceği değerlendirilmiştir. Geliştirilen yakıcılardan düşük kalorili kömür gazları için olan yakıcının merkezine bir boru yerleştirilerek aleve hidrojen beslemesi yapılmış ve böylece düşük kalorili kömür gazlarının yanma performanslarının arttırılması sağlanmıştır. Deneysel çalışmanın yanı sıra, yeni geliştirilen yakıcılar kullanılarak kömür gazları, bir HAD kodu yardımı ile sayısal olarak da modellenmiş, yanma ve emisyon karakteristikleri belirlenmiştir. Çalışmadan elde edilen ilk bulgu, en yüksek alev sıcaklığına metan alevi ile ulaşıldığıdır. Ancak, hidrojence zengin kömür gazları için yapılan alev sıcaklık ölçümleri de metana oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Düşük kalorili kömür gazlarının yanma performanslarının mevcut halleri ile oldukça düşük oldukları belirlenmiş olup, yapılan hidrojen beslemesi ile alev sıcaklıklarının yaklaşık % 13 civarında arttığı deneysel çalışma ile ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmadan elde edilen emisyon verileri değerlendirilecek olursa, hidrojence zengin kömür gazlarının içerdikleri serbest azottan dolayı, alevlerindeki NO_X emisyon seviyeleri metana göre daha yüksek ölçülmüştür. Kömür gazlarının içerdikleri CO ve CO_2, yanma sonu CO ve CO_2 emisyonlarının yüksek olmasına sebep olurken, düşük kalorili kömür gazlarının alevlerine yapılan hidrojen beslemesi sayesinde su gazı değişim reaksiyonu ile CO daha hızlı reaksiyona girmiş ve CO_2'e dönüşmüştür. Çalışmanın sayısal bölümünde ise, kömür gazlarının yanma ve emisyon karakterlerinin belirlenmesi için The PDF/Mixture Fraction yanma modeli, P-1 radyasyon modeli ve standard k-Ɛ türbülans modeli kullanılmıştır. Sıcaklık ve emisyon tahminleri ile deneysel sıcaklık ve emisyon ölçüm sonuçlarının birbirleri ile oldukça uyumlu oldukları görülmüştür. Yapılan hız tahminleri ile de yanma odası içerisindeki resirkülasyon (girdap) bölgeleri, yanma sonu ürünlerinin hızları ve yönleri tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91440
Anahtar Kelimeler : Yakıcı, emisyon, hidrojen, kömür gazı, yanma
Sayfa Adedi : 162
Danışman : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATIONS OF COMBUSTION CHARACTERISTICS OF COAL GASES IN A DEVELOPED COMBUSTOR

(Ph. D. Thesis)

Serhat KARYEYEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2016

ABSTRACT

It is known that coal is an indigenous resource as well as it has large reserves for many years. However, direct usage of coal is not suitable in terms of burning challenges and environmental pollutions. For this reason, the usage of coal gases, which are obtained by coal gasification and carbonization by-products, are becoming common. New types of burners have been developed and manufactured to burn coal gases which have different heating values. These coal gases have been featly burned and it has been revealed that coal gases may be used instead of natural gas (methane). Hydrogen has been supplied into low calorific value coal gas flame via a hydrogen pipe of the center of low calorific value coal gas burner and in this way, combustion performances of the low calorific value coal gases have been improved. In addition to experimental studies, coal gases have been numerically modelled by using a CFD code. So, combustion and emission characteristics of these gases have been determined by modelling. The methane flame temperature is the highest value according to the study. Besides, the hydrogen-rich coal gas flame temperatures are very closer to that of the methane. It has been determined that the low-calorific value coal gas flame temperatures are relatively low in comparison to those of methane and hydrogen-rich coal gases. However, it has been found that the flame temperatures of the low calorific value coal gases increased up to 13 % when the hydrogen has been supplied into their flames. When emission measurements are evaluated, it can be said that NO_X emissions of the hydrogen-rich coal gases are high compared to that of methane due to nitrogen in these coal gases. CO and CO_2 in the coal gases contribute to CO and CO_2 emissions. CO reacts with air and water vapor and generates CO_2 due to water gas shift reaction when the hydrogen was supplied into the flame center of the low calorific value gases. In the numerical part of this study, The PDF/Mixture Fraction Combustion Model, P-1 Radiation Model and k-Ɛ standard turbulence model have been used in order to determine combustion characteristics of coal gases. Numerical results are in satisfactorily good agreement with experimental measurements. Recirculation zones, combustion product velocities and their directions have been determined by numerical results.

Science Code : 91440
Key Words : Burner, emission, hydrogen, coal gases, combustion
Page Number : 162
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

TEŞEKKÜR

İlk olarak, bu çalışmanın her aşamasında (tez konusunun belirlenmesi, proje başvurusunun yapılması, tez çalışmasının proje ile birlikte koordineli olarak yürütülmesi vb.) kıymetli tecrübelerini esirgemeyen, tez çalışmam sırasında ortaya çıkan problemlere sağduyu ve kararlılıkla yaklaşmamı sağlayan ve her türlü yardım ve desteğini gördüğüm, yeri geldiğinde tez danışmanı, yeri geldiğinde de bir baba gibi davranan, uzun yıllardır birlikte çalıştığım tez danışmanım ve çok değerli hocam Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a en içten şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışmasının deneysel kısmında kullanılan deney düzeneğinin kurulması için "Tübitak-1005 Ulusal Yeni Fikirler ve Ürünler" programı kapsamında "114M668" kodlu proje desteği için TÜBİTAK'a, akademik desteğini hiç bir zaman esirgemeyen Prof. Dr. İlker YILMAZ'a, deney düzeneğinin kurulması, işletmeye alınması ve zaman zaman karşılaşılan problemlerin giderilmesinde katkı veren kıymetli arkadaşım Cihan Barbaros PINARCIK'a, deneylerin yapılması sırasında yardımlarını esirgemeyen Murat ŞAHİN'e ve teknisyen Ergül HİÇYILMAZ'a da ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Bütün eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini gördüğüm ve akademik çalışmaya beni teşvik eden annem ve babama ve son olarak, doktora çalışmalarımın her aşamasında anlayış, sabır ve destekleri için hayat arkadaşım, çok kıymetli eşim Çiğdem KARYEYEN'e ayrıca teşekkür etmek isterim. Son olarak, küçük yaşta kaybettiğim değerli kardeşimi büyük bir özlemle anıyor ve bu doktora tez çalışmasını onun aziz hatırasına atfediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. YAKITLAR, YANMA VE HAVA KİRLİLİĞİ 17

2.1. Yakıtlar 17

2.1.1. Gaz yakıtlar 17

2.1.2. Sıvı yakıtlar 18

2.1.3. Katı yakıtlar 18

2.2. Yanma 19

2.2.1. Yanmanın termodinamiği ve reaksiyon kinetiği 20

2.3. Hava Kirliliği 21

2.3.1. Azot oksit (NO_X) oluşumu 21

2.3.2. Karbon monoksit (CO) oluşumu 29

2.3.3. Karbon dioksit (CO_2) oluşumu 29

3. KÖMÜR GAZLARININ ELDE EDİLMESİ 31

3.1. Gazlaştırma ile Kömür Gazı Elde Edilmesi 31

3.1.1. Gazlaştırıcılar 33

Sayfa

3.1.2. Gazlaştırma ürünleri 36

3.2. Koklaştırma ile Kok Fırını Gazı ve Yüksek Fırın Gazı Elde Edilmesi 38

3.2.1. Kok fırını gazı 38

3.2.2. Yüksek fırını gazı 40

4. YANMANIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELLEMESİ 41

4.1. Temel Denklemler 41

4.2. Kimyasal Türlerin Korunumu 43

4.3. Yakıcılarda Türbülanslı Akışın Modellenmesi 43

4.3.1. Standard k-Ɛ türbülans modeli 43

4.3.2. Yanmanın modellenmesi 45

4.4. Sınır Şartları 49

4.5. Fiziksel Özellikler 49

4.6. Çözüm Metodu 50

4.6.1. Çözüm algoritması 51

4.6.2. Artıkların hesaplanması 53

4.6.3. Rahatlatma faktörleri 55

5. DENEY SİSTEMİ VE EKİPMANLARI 57

5.1. Tasarlanan Yakma Sistemi 62

5.1.1. Sıcaklık ölçümlerinin düzeltilmesi 69

5.1.2. Debimetrelerin kalibrasyonu 71

6. SONUÇLAR VE İRDELEME 73

6.1. Sayısal Modelleme Sonuçları 73

6.1.1. Metanın sayısal modelleme sonuçları 73

Sayfa

6.1.2. Hidrojence zengin kömür gazlarının sayısal modelleme sonuçları 85

6.1.3. Düşük kalorili kömür gazlarının sayısal modelleme sonuçları 98

6.2. Deneysel Ölçüm Sonuçları 107

6.2.1. Metanın deneysel ölçüm sonuçları 107

6.2.2. Hidrojence zengin kömür gazlarının deneysel ölçüm sonuçları 112

6.2.3. Düşük kalorili kömür gazlarının deneysel ölçüm sonuçları 121

6.3. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması 131

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 139

7.1. Sonuçlar 140

7.2. Öneriler 142

KAYNAKLAR 145

EKLER 151

EK-1. Hazırlanan gazların sertifikaları 152

EK-2. Baca gazı analizörü 158

ÖZGEÇMİŞ 159

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Koklaştırma esnasında elde edilen kok fırını gazının içeriği (% hacimce) 39

Çizelge 3.2. Bazı gaz yakıtların ısıl değerleri 39

Çizelge 4.1. k-ε modelde kullanılan sabitler 45

Çizelge 4.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler 46

Çizelge 5.1. Metan, hidrojen ve kömür gazlarının bazı fiziksel özellikleri 57

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Petrolden elde edilen ürünler 18

Şekil 2.2. Yakıt NO_X oluşum şeması 27

Şekil 3.1. Gazlaştırma entegreli birleşik güç santrali (IGCC) 32

Şekil 4.1. Kontrol hacmi depolama düzeni 51

Şekil 4.2. P düğümü etrafında hesaplama hücresinin gösterimi 51

Şekil 4.3. Ansys Fluent programı için çözüm yöntemi akış şeması 53

Şekil 5.1. Metan yakıcısının katı model görünümü 58

Şekil 5.2. Metan yakıcısının teknik resmi 58

Şekil 5.3. Hidrojence zengin kömür gazı yakıcısının katı model görünümü 60

Şekil 5.4. Hidrojence zengin kömür gazı yakıcısının teknik resmi 60

Şekil 5.5. Hidrojen beslemeli düşük kalorili kömür gazı yakıcısının katı model görünümü 61

Şekil 5.6. Hidrojen beslemeli düşük kalorili kömür gazı yakıcısının teknik resmi 61

Şekil 6.1. Metan yanmasının akış hacmi 74

Şekil 6.2. Metan yanması için oluşturulan akış hacminin kesiti 74

Şekil 6.3. Metan yanması için oluşturulan akış hacmindeki hücrelerin Skewness değerleri 75

Şekil 6.4. Metan yanması için hücre sayısından bağımsızlaştırma 76

Şekil 6.5. Metan yanması için uygun türbülans modelinin belirlenmesi 77

Şekil 6.6. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının radyal sıcaklık dağılımına etkisi 78

Şekil 6.7. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının eksenel hız dağılımına etkisi 80

Şekil 6.8. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının radyal hız dağılımına etkisi 81

Şekil 6.9. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının teğetsel hız dağılımına etkisi 82

Şekil 6.10. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının CO_2 dağılım tahminine etkisi 84

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.11. Hidrojence zengin kömür gazlarının akış hacmi 85

Şekil 6.12. Hidrojence zengin kömür gazları için oluşturulan akış hacminin ağ yapısı 86

Şekil 6.13. Hidrojence zengin kömür gazları için oluşturulan akış hacmindeki hücrelerin Skewness değerleri 86

Şekil 6.14. Hidrojence zengin kömür gazları için hücre sayısından bağımsızlaştırma .. 87

Şekil 6.15. Hidrojence zengin kömür gazları için uygun türbülans modelinin belirlenmesi 88

Şekil 6.16. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen radyal sıcaklık dağılımları 89

Şekil 6.17. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen eksenel hız dağılımları 91

Şekil 6.18. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen radyal hız dağılımları 92

Şekil 6.19. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen teğetsel hız dağılımları..... 93

Şekil 6.20. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen CO_2 emisyonları 95

Şekil 6.21. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen CO emisyonları 96

Şekil 6.22. Kok fırını gazının tahmin edilen NO_X emisyonları 97

Şekil 6.23. Düşük kalorili kömür gazlarının akış hacmi..... 98

Şekil 6.24. Düşük kalorili kömür gazları için oluşturulan akış hacminin ağ yapısı 99

Şekil 6.25. Düşük kalorili kömür gazları için oluşturulan akış hacmindeki hücrelerin Skewness değerleri 99

Şekil 6.26. Düşük kalorili kömür gazları için hücre sayısından bağımsızlaştırma..... 100

Şekil 6.27. Düşük kalorili kömür gazları için uygun türbülans modelinin belirlenmesi 101

Şekil 6.28. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen radyal sıcaklık dağılımları 102

Şekil 6.29. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen eksenel hız dağılımları 104

Şekil 6.30. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen radyal hız dağılımları 105

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.31. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen teğetsel hız dağılımları 106

Şekil 6.32. Metan için ölçülen radyal sıcaklık dağılımı..... 109

Şekil 6.33. Metan için ölçülen CO_2 emisyonları..... 110

Şekil 6.34. Metan için ölçülen CO emisyonları..... 111

Şekil 6.35. Metan için ölçülen NO_X emisyonları..... 112

Şekil 6.36. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen sıcaklık dağılımı 114

Şekil 6.37. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen CO_2 dağılımı..... 116

Şekil 6.38. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen CO dağılımı..... 118

Şekil 6.39. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen NO_X dağılımı..... 120

Şekil 6.40. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen eksenel sıcaklık dağılımı 122

Şekil 6.41. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 10 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı..... 123

Şekil 6.42. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 30 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı..... 124

Şekil 6.43. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 50 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı..... 124

Şekil 6.44. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 70 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı..... 125

Şekil 6.45. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 90 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı..... 126

Şekil 6.46. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen CO_2 dağılımı 127

Şekil 6.47. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen CO dağılımı 129

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.48. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen NO_X dağılımı 130

Şekil 6.49. Metan için deneysel ve sayısal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması..... 132

Şekil 6.50. Metan için 90 cm eksenel uzaklıktaki deneysel ve sayısal radyal CO_2 dağılımlarının karşılaştırılması..... 133

Şekil 6.51. Kok fırını gazı için deneysel ve sayısal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması..... 134

Şekil 6.52. Kok fırını gazı için 30 cm (a) ve 50 cm (b) eksenel uzaklıklardaki deneysel ve sayısal radyal CO_2 dağılımlarının karşılaştırılması 135

Şekil 6.53. Kok fırını gazı için 10 cm (a) ve 50 cm (b) eksenel uzaklıklardaki deneysel ve sayısal radyal CO dağılımlarının karşılaştırılması..... 135

Şekil 6.54. Kok fırını gazı için 30 cm (a) ve 50 cm (b) eksenel uzaklıklardaki deneysel ve sayısal radyal NO_X dağılımlarının karşılaştırılması 136

Şekil 6.55. Jeneratör gazı için deneysel ve sayısal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması..... 137

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. İmal edilen metan yakıcısı 59

Resim 5.2. İmal edilen hidrojence zengin kömür gazı yakıcısı 60

Resim 5.3. İmal edilen hidrojen beslemeli düşük kalorili kömür gazı yakıcısının türbülatörü 62

Resim 5.4. Yanma odası (1) 62

Resim 5.5. Yanma odası (2) 63

Resim 5.6. Yanma odasının altında bulunan tabla 64

Resim 5.7. Düşük ısıl güçteki metan alevi 65

Resim 5.8. Kontrol panosu 65

Resim 5.9. Deney düzeneğinin genel görünümü 66

Resim 5.10. Hava kompresörü 67

Resim 5.11. Taşınabilir baca gazı analizörü 68

Resim 5.12. Seramik uçlu gaz probu 68

Resim 5.13. Seramik uçlu sıcaklık ölçer 69

Resim 6.1. JG ve JGH1 yanma şartlarının alev fotoğrafları 123

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

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

Simgeler	Açıklamalar
m	Kütlesel oran
m_j	Kütle oranı
MJ	Megajoule
MPa	Megapaskal
MW	Megawatt
N_2	Azot
Nm^3	Normal metreküp
NH_3	Amonyak
NO_X	Azot oksit
NO	Azot monoksit
NO_2	Azot dioksit
N_2O	Diazot oksit
N_2O_3	Diazot trioksit
N_2O_5	Diazot pentaoksit
O_2	Oksijen
OH	Hidroksil
p	Basınç
Q	Isı transferi
Q	Yakıt debisi
R	Universal gaz sabiti
R	Dönüşüm oranı
SO_X	Kükürt oksit
SO_2	Kükürt dioksit
S_j	Oluşmanın kütle oranı
t	ton
T	Sıcaklık
u	Hız
v	Hız
VOCs	Uçucu organik bileşenler
w	Hız
ppm	Parts per million
°C	Santigrad

Simgeler	Açıklamalar
ρ	Yoğunluk
τ	Vizkoz kayma gerilmesi
Γ	Laminer değişim katsayısı
μ	Vizkozite
δ	Kroneker delta tensörü
Ɛ	Yayılma oranı
σ	Prandtl sayısı
$\overline{f'}^2$	Karışım oranı değişimi
σ	Stefan-Boltzman sabiti
α	Emme ve saçılma katsayısı
∅	Eşdeğerlilik oranı

Kısaltmalar	Açıklamalar
CFD	Computational fluid Dynamics
DNS	Direct numerical simulation
DRM	Diffusion reaction model
EDC	Eddy dissipation concept
FGMs	Flamelet generated manifolds
GRI	Gas Research Institute
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
IGCC	Integrated gasification combined cycle
JG	Jeneratör gazı
JGH1	7.5 kW Jeneratör gazı + 2.5 kW Hidrojen
JGH2	5 kW Jeneratör gazı + 5 kW Hidrojen
MILD	Moderate or intense low-oxygen dilution
LES	Large eddy simulation
LHV	Lower heating value
LIF	Laser-induced fluorescence
LPG	Liquefied petroluem gas
PIV	Particle imaginary velocimetry

Kısaltmalar	Açıklamalar
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
RNG	Re-normalization group
RSM	Reynolds stress model
SNG	Substitute natural gas
YFG	Yüksek fırın gazı
YFGH1	7.5 kW Yüksek fırın gazı + 2.5 kW Hidrojen
YFGH2	5 kW Yüksek fırın gazı + 5 kW Hidrojen
yy	Yüzyıl
ß-PDF	ß-Probability density function

1. GİRİŞ

Günümüzde enerjinin üretilmesi, kullanılması ve depolanması gibi konular, insanoğlunun hayat standardını düşürmeden hayatına devam edebilmesi için oldukça önemli bir konumdadır. Özellikle enerji üretimi konusu için, birçok farklı yöntem dile getirilmekte ve fosil yakıtların kullanımlarının azaltılması hedeflenmektedir. Ancak, Dünya enerji tüketiminin hâlâ % 85'inden fazlası fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Özellikle ülkemiz özelinde değerlendirilecek olursa, fosil yakıtların büyük bir çoğunluğu ithal edilmekte ve bu nedenle yerli kaynak kullanımı oldukça sınırlı kalmaktadır. Buna rağmen, ülkemizin önemli ölçüde kömür rezervleri bulunmaktadır. Bu kömür rezervlerinin büyük bir çoğunluğunu ise linyit oluşturmaktadır. Buna karşın, çıkarılan bu linyitleri doğrudan kullanmak veya taşımak, verimli ve ekonomik olmamaktadır. Çünkü, ısıl değerleri oldukça düşük ve çok miktarda inorganik maddeler içermektedirler. Ayrıca, katı yakıt yakma teknolojileri daha maliyetli olmaktadır. Tüm bu gerekçelerin yanı sıra, kömürler yüksek oranda azot ve kükürt içermekte olup, bu durum da yüksek miktarda NO_X ve SO_X emisyonlarına neden olmaktadır. Tüm bu nedenler dikkate alındığında, kömürleri gazlaştırmak veya koklaştırma sırasında ortaya çıkan yan ürünleri gaz yakıt olarak kullanmak ve bu sayede yerli kaynak kömürden faydalanmak daha verimli ve ekonomik olacaktır. Bu tez kapsamında ise, bu gaz yakıtları yakabilecek bir yanma sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiş, böylece, doğalgaza (metan) alternatif olabileceği düşünülen bu yakıtların hem yanma performansları hem de emisyon parametreleri detaylı olarak araştırılmıştır. Çalışmaya başlanmadan önce konuya ilişkin daha önce yapılan çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme, literatürde, doğalgaz (ya da metan), sentetik yakıt, hidrojence zengin ve düşük kalorili yakıtlar şeklindeki sınıflandırmalar dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Literatür araştırması

Yaga, Endo, Yamamoto, Aoki ve Miura, model bir yanma odasında, metan yakıtı için, EDC (Eddy Dissipation concept) kullanarak reaksiyon hızı ile yanma modellemesini, LES (Large Eddy Simulation) türbülans modeli ile gerçekleştirmişlerdir. Yapılan modelleme neticesinde yanma odası ekseninin 0.1 m uzaklığından alınan radyal yön boyunca tahmin edilen sıcaklık ve CH_4 mol oranı, yanma odası ekseninin 0.1 m uzaklığından alınan radyal

yön boyunca ölçülen sıcaklık ve CH_4 mol oranı ile iyi bir uyum gösterirken, CO değerlerinde, özellikle de alev bölgesinde beklenen sonuçlar elde edilememiştir. Yapılan bu çalışmada ortaya çıkan uyumsuzluğun nedeni de yazarlar tarafından, kullanılan CO reaksiyon mekanizmasının oldukça basit olması ile açıklanmıştır [1].

Tomczak, Benelli, Carrai ve Cecchini, yüksek basınçlı bir gaz türbini yanma odasında, farklı içeriklerdeki doğalgaz-hidrojen karışımlarını (% 100 doğalgaz-% 0 hidrojenden % 0 doğalgaz % 100 hidrojene, % 25'lik değişimlerle) deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, yakıttaki hidrojen miktarının artması ile alev sıcaklığında ve yanma odası duvar sıcaklıklarında ve bunların bir sonucu olarak da yanma odası çıkışından ölçülen NO_X emisyonlarında da artış olduğunu göstermektedir. Buna karşın, yakıttaki karbon atomlarının azalmasının bir sonucu olarak da, yanma odası çıkışından ölçülen CO emisyon değerlerinde azalmalar saptanmıştır [2].

Shudo, Omori ve Hiyama, fakir-zengin yakıt karışımlarının ayrı ayrı beslenebildiği eş merkezli bir yakıcı tipinde hidrojen yakmışlar ve bu şekilde, yanma sonu NO_X emisyonlarını azaltmayı hedeflemişlerdir. Yapılan deneysel çalışma neticesinde ölçülen NO_X emisyonları, difüzyon yanması ve metanın zengin-fakir yanması ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlara göre, fakir-zengin yakıt karışımlarının ayrı ayrı beslenebildiği eş merkezli yakıcının zengin-fakir karışım yanma şartlarında NO_X emisyonunu önemli derecede azaltabildiği görülmüştür [3].

Yilmaz ve Ilbas, geliştirdikleri bir yanma odasına bir doğalgaz yakıcısını entegre etmişler ve bu doğalgaz yakıcısını kullanarak, farklı içeriklerdeki metan-hidrojen karışımlarını deneysel olarak yakmışlardır. Yanma sonu ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve emisyon değerlerini, yanma odasının duvarlarına entegre ettikleri ölçüm prob deliklerini kullanarak, yanma odasının içerisindeki farklı eksenel ve radyal konumlardan, ısıl çiftler ve emisyon ölçüm cihazları yardımıyla elde etmişlerdir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, yakıtın bünyesindeki hidrojen miktarı arttıkça, yanma odasının sıcaklık seviyelerinde ve NO_X emisyonlarında yükselme olurken, CO ve CO_2 gibi yanma sonu ürünlerinde de azalmalar olduğu tespit edilmiştir [4].

Frassoldati, Frigerio, Colombo, Inzoli ve Faravelli, oldukça yüksek seviyede girdap sayısına sahip doğalgaz yakan bir yakıcıdan elde edilen deneysel sonuçları kullanarak,

yalnız CFD kodu ile elde edilen NO_X emisyonlarındaki problemleri aşmak için, bir CFD yazılımı ile entegre olacak şekilde, oldukça detaylı ve kapsamlı bir reaksiyon şemasını NO_X emisyonlarının belirlenmesi için araştırmışlardır. Yapılan bu çalışmada, CFD programı ile, NO_X emisyonları bakımından hesaplamalı benzer hücreler entegre şekilde çözdürülmüştür. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, hem CFD hem de kimyasal analiz sonuçları, ölçülen deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum göstermiştir [5].

Tabet, Sarh ve Gökalp, model bir yanma odasında, metan yakıtına, farklı oranlarda hidrojen karıştırmış ve bu yakıtların yanma ve emisyon karakteristiklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan sayısal çalışmada, akış alanı ile kimyasal etkileşim, flamelet modeli sayesinde birlikte çözülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre, yakıtın içerisindeki hidrojen miktarı arttırıldıkça, yakıtın havayı, yanma odası merkez bölgesine doğru daha iyi sürüklediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, bu kompozit yakıt daha hızlı yanmakta ve bunun sonucunda bekleme zamanı (residence time) azalmakta, alev uzunluğu (flame length) ve kalınlığı (thickness) kısalmaktadır [6].

Asai ve diğerleri, kömürün gazlaştırılması neticesinde elde edilen üç farklı içeriğe sahip sentetik yakıtların yanmaları esnasında meydana gelen salınımları ve yüksek NO_X emisyonlarını azaltmak için çoklu-püskürtmeli bir yakıcı geliştirmişler ve bu yakıcıyı hem düz hem de dışbükey olacak şekilde kullanarak bu yakıtları atmosferik şartlarda yakmışlardır. Yakıcı çıkışından alınan sıcaklık değeri 1775 K olmuştur. Ayrıca, dışbükey şekilde çoklu-püskürtmeli yakıcı, yanma salınımlarını azaltmada daha etkin bir rol oynamıştır. Üstelik bu yakıcı, yanma sonu NO_X emisyonlarını 10 ppm'in altına indirmeyi başarmıştır. Çalışmadan elde edilen en önemli bulgu, çoklu-püskürtmeli bu yakıcının, gazlaştırma sonu ürünü olan sentetik yakıtların yakılması konusunda oldukça başarılı olduğunu göstermiştir [7].

Gobbato, Masi, Toffolo ve Lazzaretto, tek şaftlı bir gaz türbininin difüzyon alevli yanma odası için hidrojen yanmasını sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan modellemede, yanma havası için kompresörden beslenen hava dikkate alınmış olup, modelleme 3-boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, doğalgazla çalışan gaz türbinleri için daha önemli parametre olmalarından dolayı, yanma odası duvar ve türbin giriş sıcaklıklarının tespitine daha çok odaklanılmıştır. Ayrıca, aynı yanma şartları için yapılan deneysel bir çalışmada yanma odası ekseni boyunca belirlenen sıcaklık değerleri de doğrulama için kullanılmıştır.

Mevcut deneysel çalışma ile yapılan modellemenin de oldukça iyi uyum göstermesinden dolayı, geliştirilen sayısal modelin bu tip bir modellemeye oldukça uygun olduğu belirlenmiştir [8].

Hashemi, Fattahi, Sheikhzadeh, Hajialigol ve Nikfar, eksenel simetrik ve ani genişlemeli olan bir yanma odasında, ön-karışımsız metan alevi için NO_X emisyonlarının azaltılmasının hedeflendiği sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. NO_X emisyonlarını azaltılması için kullanılan yöntem, yanma odasına beslenen yakma havasının türbülans yoğunluğunun ve giriş açısının değiştirilmesi olmuştur. Sayısal modellemede kullanılan yanma modeli ß-PDF yanma modeli ve kullanılan türbülans modeli de k-Ɛ türbülans modelidir. Çalışmadan elde edilen tahmin sonuçlarına göre, hava türbülans yoğunluğunun artmasıyla NO oluşumu önemli derecede azalmıştır. Ayrıca, hava giriş açısının arttırılması da, girdap dayanımını yükseltmesinden dolayı NO azaltımında rol oynamaktadır [9].

Ghenai, Zbeeb ve Janajreh, girdap tutmalı bir yanma odasında, metan yakıtının yanı sıra hidrojen ve sentetik yakıtların alev sıcaklıklarını, akış alanlarını, reaktant ve ürünlerin yanma öncesi, sırası ve sonrası konsantrasyonlarını araştırmışlardır. Yapılan bu çalışma sayısal bir çalışma olup kullanılan yanma modeli Karışım Oranı/Olasılıklı Yoğunluk Fonksiyonu (The Mixture Fraction/PDF) yanma modelidir. Ayrıca, yapılan modellemelerin doğruluğu deneysel verilerle de desteklenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilecek olursa, yakıttaki hidrojen miktarının artması, daha yüksek alev sıcaklığı (metana göre yaklaşık % 14'lük bir artış) ve NO_X emisyonu ortaya çıkarırken, buna karşın, daha düşük CO_2 emisyonuna (% 75 hidrojen içeren yakıt için metana göre % 50'lik bir düşüş) neden olmaktadır. Ayrıca, girdap tutmalı yanma odası için, metan alevi, birincil girdap bölgesinde oluşurken, hidrojen alevi için bu bölge ikincil girdap bölgesine kaymıştır [10].

Zhou, Tao, Lin ve Kong, giriş sıcaklık ve basınçların CO/H_2/hava karışımları seyreltme sınırlarına olan etkilerini, 1 boyutlu laminer ön-karışımlı alev şartları için sayısal olarak araştırmışlardır. Seyreltme sınırlarına yakın şartlar için, yapılan çalışmada, en yüksek alev sıcaklıkları, laminer alev hızları, yakıt yanma hızları ve alev kalınlıkları analiz edilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, giriş sıcaklığının yükseltilmesinin seyreltme sınırlarını genişlettiği belirlenmiştir. Ayrıca bu sıcaklık değerinin artmasıyla, seyreltme sınırlarındaki

laminer alev hızları ve yakıt yanma hızları da artmıştır. Ancak, buna karşın, giriş basınç ve sıcaklık değerlerinin arttırılması, seyreltme sınırlarındaki alev kalınlığını azaltmıştır [11].

Whitty, Zhang ve Eddings, sentetik yakıtların yanması neticesinde ortaya çıkan emisyonların nasıl ve ne şekilde oluştukları, sentetik yakıt bünyesinde bulunan gazların, yanma sonu oluşan emisyonlara nasıl ve ne şekilde etki ettiklerine ilişkin bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan araştırma çalışmasında, yanma sonu emisyonları, yanmamış yakıt bileşenleri ve kısmen yanmış bileşenler, azot ve kükürt içeren gazlar, uçucu organik gazlar ve eser miktardaki diğer bileşenler olarak sınıflandırılmıştır. Sentetik yakıtların bünyesinde bulunan hidrojen ve karbon monoksit seviyelerinin, yanma sonu yüksek sıcaklık ve yüksek NO emisyonu seviyelerini önemli derecede etkilediği belirtilmiştir. Buna karşın, yanma odasının sıcaklığının artması ile organik uçucuların seviyelerinin azaldığı saptanmıştır. Diğer parçacıkların, metalik bileşenlerin ve tahmin edilemeyen kirleticilerin ise, ısıtma ve güç üretim sistemlerine sentetik yakıt beslenmeden önce sentetik yakıttan uzaklaştırıldığından bahsedilmiştir [12].

Mardani ve Tabejamaat, metana karıştırılan hidrojenin, MILD (moderate or intense low-oxygen dilution) yanma şartlarındaki etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Modelleme, EDC (eddy dissipation concept) ile gerçekleştirilmiş olup, hidrojen/metan jet alevinin kimyasal reaksiyonunu tanımlamak için de DRM-22 azaltılmış mekanizma ve GRI2.11 tam mekanizma kullanılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, metana hidrojen ilavesi ile karışımın daha iyi olduğu, türbülans kinetik enerjisindeki artışla alev eksenin bozulduğu, dolayısıyla alevin bir miktar sürüklendiği, daha yüksek reaksiyon yoğunluğu oluştuğu, karışımın alevlenebilirliğinin ve ısı salınımının arttığı gözlemlenmiştir [13].

Ranga Dinesh, Jiang ve van Oijen, detaylı kimyasal kinetiği temel alan, 3-boyutlu DNS (direct numerical simulation) ve FGMs (flamelet generated manifolds) modelleme yöntemlerini kullanarak H_2/CO sentetik yakıtının ön-karışımsız çarpmalı jet alevlerini modellemişlerdir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, sentetik yakıtta bulunan H_2 ve CO oranının, duvar dibindeki alev yapısı ve karakteristiğini ciddi derecede etkilediği belirtilmiştir. Bununla beraber, hidrojence zengin sentetik yakıtın yüksek yayınabilirliği, daha zayıf vortekslerin ve daha ince bir alevin oluşmasına neden olduğu ortaya konulmuştur [14].

Saqr, Aly, Sies ve Wahid, türbülanslı ön-karışımsız metan alevi için serbest akım türbülansının NO_X ve is oluşumlarına olan etkisini sayısal olarak araştırmıştır. Yapılan sayısal çalışmada RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes) sayısal model yaklaşımı kullanılarak, modelleme 2-boyutlu eksenel simetrik olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapılan sayısal modelleme sonuçları, mevcut deneysel verilerle de karşılaştırılmış ve kabul edilebilir düzeyde bir uyum olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde ise, beslenen havanın serbest akım türbülans yoğunluğundaki artışın, metan alevinde oluşan NO konsantrasyonunu önemli seviyede azalttığı belirlenmiştir. Bununla beraber, aynı artış sayesinde, is oluşumunda da göz görülür bir azalma olduğu bu çalışma sayesinde tahmin edilmiştir [15].

Feyz, Esfahani, Pishbin ve Modarres Razavi, düşük girdap sayılı ve kısmen ön-karışımlı olan 55 kW'lık bir doğalgaz yakıcısını, bir yanma odasına entegre etmiş ve bu yakıcının türbülatör derinliğini değiştirerek, doğalgazın yanma karakteristiklerine olan etkilerini araştırmışlardır. Sonuçlar, türbülatör derinliğindeki değişimin farklı alev rejimleri ortaya çıkardığını göstermiştir. Türbülatörün konumu, çapın iki katı uzaklığından üç katı uzaklığına getirildiğinde, yanma odası boyunca ölçülen sıcaklık değerlerinde ciddi azalmalar olduğu belirlenmiştir. Ancak, buna rağmen, radyal yönde alınan sıcaklık ölçümlerinde, yanma odası merkezinden duvarına doğru olan sıcaklık dağılımındaki değişimlerin nispeten azaldığı da belirlenmiştir [16].

Khanafer ve Aithal, model bir yanma odasında, girdap hızı ve yanma odası duvar sıcaklığının, metan yanması neticesinde ortaya çıkan NO_X emisyonlarına olan etkisini sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan analizde kullanılan kimyasal mekanizmada 16 reaksiyon ve 20 tür bulunmaktadır. Lineer olmayan denklemlerin çözümünde Newton-Raphson yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar değerlendirilecek olursa, girdap sayısının arttırılması ile CO ve yanmamış hidrokarbon seviyelerinde azalmalar tespit edilmiştir. Çalışmanın asıl hedefi olan NO_X emisyonlarında ise girdap sayısı arttırıldıkça NO_X değerleri önce artmış daha sonra azalma göstermiştir [17].

Khelil, Naji, Loukarfi ve Mompean, RSM (Reynolds Stress Model) ile birlikte PDF modeli kullanarak ön-karışımsız doğalgaz alevinin NO_X emisyonlarını tahmin etmek için modelleme gerçekleştirmişlerdir. Modellemede kullanılan kimyasal reaksiyonlarda 9 tür ve 8 reaksiyon tanımlanmıştır. Yapılan modelleme sonuçları, mevcut deneysel sonuçlarla

karşılaştırılmış ve birçok yönden oldukça iyi bir uyum içerisinde oldukları belirlenmiştir. Elde edilen tahmin sonuçlarına göre, en yükse sıcaklık seviyelerine iç resirkülasyon bölgesinde ulaşılmıştır. Diğer bir sonuç olan NO_X oluşumları ise, ısıl NO_X mekanizmasından dolayı, yüksek sıcaklık bölgelerinde yüksek ve düşük sıcaklık bölgelerinde daha düşük olacak şekilde tahmin edilmiştir [18].

Keramida, Liakos, Founti, Boudouvis ve Markatos, ön-karışımsız girdaplı bir doğalgaz fırınını, eksenel simetrik olarak modellemiş ve bu modellemede ayrık transfer (discrete transfer) ve 6-akım (six-flux) radyasyon modellerinin performanslarını araştırmışlardır. Yapılan tahminler ayrıca radyasyon modeli kullanılmadan da gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, mevcut deneysel verilerle karşılaştırılmış ve radyasyon modeli olmadan yapılan modelleme sonuçlarının oldukça kötü tahminler verdiği belirlenmiştir. Her iki radyasyon modelinin kullanımı neticesinde elde edilen sıcaklık dağılımlarının sonuçları değerlendirildiğinde ise, ayrık transfer için en yüksek sıcaklık 1825 K olarak tahmin edilirken, 6-akım için bu değer 1835 K dolaylarında tahmin edilmiştir [19].

Lee, Yoon, Joo ve Yoon, Kore'deki Taean santralinde ve Hollanda'daki Buggenum santralinde üretilen sentetik yakıtların içeriklerine uygun olacak şekilde hazırlanan sentetik yakıtların yanma karakteristiklerini gaz türbini yanma şartları için deneysel olarak araştırmışlardır. Bahsi geçen şartlarda beslenen hava sıcaklığı yüksek iken (yaklaşık 200 °C) yanma odası basıncı atmosferik olarak tutulmuştur (1.1 bar – 1.4 bar). Ayrıca, bu yakıtlara seyreltme de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, seyreltme yokken, Buggenum sentetik yakıtının kararlı rejimi, Taenan sentetik yakıtınınkinden daha geniştir. Azot ile seyreltme yapılması durumunda ise, Taean sentetik yakıtı, Buggenum sentetik yakıtına göre daha kararlı bir yanma göstermiştir. Buggenum sentetik yakıtı için azot seviyesindeki artış, bu yakıtın alev kararlılığını olumsuz yönde etkilemiştir. Ayrıca, her iki sentetik yakıt için elde edilen NO_X emisyonları değerlendirildiğinde, özellikle azot ile yapılan seyreltme neticesinde, her iki sentetik yakıtın da NO_X emisyon seviyeleri 5 ppm'in altına kadar gerilemiştir [20].

Lee ve diğerleri, model bir gaz türbini yanma odasında, metanı, % 100 CO içeren sentetik yakıttan % 100 H_2 içeren sentetik yakıta kadar, yakıt bünyesinde % 20'lik değişimlerin ve farklı ısıl güçlerin etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan araştırma neticesinde yanma odasının çıkışından alınan sıcaklık ölçümlerine göre, ısıl güç arttırıldıkça ölçülen

sıcaklık değerleri artmıştır. Ayrıca, en yüksek sıcaklık ölçümü metan yanması ile ortaya çıkmış olup, % 100 hidrojen yakıtındaki sıcaklık seviyesi de metandan hemen sonra gelmektedir. Yapılan NO_X ölçümleri değerlendirilecek olursa, 45 kW ısıl güç için ölçülen en yüksek değer yaklaşık 60 ppm olarak % 100 hidrojen yanması sonucu ortaya çıkmıştır. CO emisyonlarında ise, en yüksek seviyeler metan yanmasında gözlemlenmiştir. Ancak, ısıl güç arttırıldıkça, farklı yakıt tipleri için ölçülen CO seviyelerinin birbirine oldukça yakın oldukları belirlenmiştir [21].

Ilbas, hidrojen ve hidrojen-metan karışımlı yakıtların türbülanslı yanma modellemesini radyasyon modeli kullanmadan ve P-1 ve ayrık transfer radyasyon modellerini kullanarak ayrı ayrı gerçekleştirmiştir. Ilbas, yaptığı modellemede kimyasal yanma reaksiyonlarını 7 tür ve 3 aşama olarak belirlemiştir. Modellemede kullanılan bir CFD (Computational Fluid Dynamics) programının son işlemci kısmını da kullanmış ve NO_X oluşumlarını da ortaya koymuştur. Elde edilen sayısal sonuçlara göre, radyasyon modeli kullanmadan yapılan modelleme sonuçlarında oldukça yüksek sıcaklık seviyeleri gözlemlenmiş ve bu sonuçların deneysel verilerle hiçbir şekilde uyum göstermediği, ancak, radyasyon modeli kullanılması durumunda, mevcut deneysel verilerle oldukça iyi bir uyumun olduğu saptanmıştır [22].

Delattin, Lorenzo, Rizzo, Bram ve Ruyck, mikrotürbin şeklindeki bir yakıcıda basınçlı şartlarda buharla karıştırılmış sentetik yakıt yakmışlar ve yanma karakteristiklerini araştırmışlardır. Ölçülen duvar sıcaklıklarına, doğalgaz yanması neticesinde ölçülen sıcaklık seviyelerinden çok farklı olmamıştır. Yanma ön-karışımlı şartlarda gerçekleştirildiği için, ortaya çıkabilecek en önemli alev kararsızlıklarında alev geri tepmesinin de araştırılması gerekmekte olup, deneyler sırasında böyle bir durum ile karşılaşılmamıştır. Bunun yanında, kendinden ateşleme, dinamik kararsızlık veya alev kopması gibi diğer alev kararsızlıklarına da rastlanmadığı belirtilmiştir. Ayrıca, emisyon ölçümleri değerlendirildiğinde ise, CO ve NO_X seviyelerinde ciddi anlamda düşüşler olduğu da tespit edilmiştir [23].

Ranga Dinesh, Jiang, Kirkpatrick ve Malalasekera, model bir yanma odasında, yanıcı olarak hidrojen ve/veya karbon monoksit, inert gaz olarak da ve/veya azot bulunduran sentetik yakıtları laminar flamelet yanma modeli ile birlikte 3-boyutlu olacak şekilde LES (Large Eddy Simulation) kullanılarak modellemişlerdir. Yapılan modelleme sonuçları, mevcut deneysel bir çalışma ile de karşılaştırılmış ve sonuçların oldukça uyumlu olduğu

tespit edilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek alev sıcaklığına % 70 H_2 - % 30 CO içeren sentetik yakıt yanmasında ulaşılmıştır. Ayrıca, sentetik yakıtların bünyesinde bulunan hidrojenin, oldukça iyi yayınabilirliğe sahip olmasından dolayı, sentetik yakıtların alev karakteristiklerini önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. Hidrojence daha zengin olan sentetik yakıt alevinin, karbon monoksitçe daha zengin olan sentetik yakıt alevine göre daha ince olduğu belirlenmiştir [24].

Ge, Zang, Guo ve Tian, farklı içeriklerdeki sentetik yakıtları azot ile seyreltmişler, hem hava tarafında hem de yakıt tarafında girdap oluşturucu bulunan ön-karışımsız bir yakıcıda yakmışlar ve bu yakıtların yanma karakteristiklerini araştırmışlardır. Yapılan seyreltmenin yakıcı çıkışına yakın bölgelerde reaksiyona girmemiş bölgeler oluşmasına neden olduğunu belirlemişlerdir. Yazarlar, sentetik yakıtlarda bulunan azot seviyelerinin artmasıyla birlikte alev açılma açısının büyüdüğünü ve ana reaksiyon bölgesinin genişlediğini de bu çalışmalarında tespit etmişlerdir. Son olarak, sentetik yakıta azot ile yapılan seyreltme neticesinde, sentetik yakıtın alev sıcaklığında azalma olduğu ve buna bağlı olarak da ısıl NO_X'un azaldığı, ayrıca yakıttaki karbon atomlarının azalması ile birlikte CO oluşumlarında da azalmalar meydana geldiği deneysel çalışma neticesinde belirlenmiştir [25].

Huang ve diğerleri, kömürden elde edilen sentetik yakıtı MILD yanma şartları altında yakmışlar ve bu durumda hava/yakıt enjektörlerinin etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma ayrıca, soğuk akış şartlarında sayısal olarak da incelenmiş ve yanma odası içerisinde akım yönleri ve hızlar tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmada dört farklı hava/yakıt enjektör şekli araştırılmış, fakir karışımlı yanmaya daha uygun olan hava/yakıt enjektör tipinin, yanma odası çıkışının karşı tarafından beslenen hava/yakıt enjektör tipi olduğu yapılan araştırmalar neticesinde Huang ve diğerleri tarafından saptanmıştır [26].

Wang ve diğerleri, model bir sentetik yakıcı yanma odasının cidar sıcaklıklarına basıncın etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Kullanılan sentetik yakıtın ısıl değeri 10 MJ/Nm^3 olup, bu sentetik yakıtın kullanıldığı deney düzeneğinin ısıl gücü en yüksek 180 kW'a kadardır. Etkisi araştırılan basınç aralığı ise 0.1 – 0.35 MPa şeklindedir. Araştırılan tüm işletme basınçları için yanma odası çıkış sıcaklığı 1073 K olacak şekilde sabit tutulmuştur. Yapılan çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, sentetik

yakıtın işletme basıncı arttırıldıkça, yanma odasının seyreltme bölümünün cidar sıcaklığı artarken birincil bölgesinin cidar sıcaklığının azaldığı ortaya konulmuştur. Yapılan çalışmada işletme basıncındaki değişim ile ortaya çıkan bu durumun nedeni, alev yapısının değişmesi, cidar ısı akısındaki değişim ve taşınımla ve ışınımla olan ısı transferindeki değişimler olarak açıklanmıştır [27].

Ghenai, model bir gaz türbini yanma odasında, farklı içeriklere sahip olan sentetik yakıtları ve metanı sayısal olarak yakmış ve yanma sonu sıcaklık ve emisyon parametrelerini ortaya koymuştur. Yapılan sayısal modellemede Ghenai, The PDF/Mixture Fraction yanma modelini, k-Ɛ türbülans modelini ve P-1 radyasyon modelini kullanmıştır. Yapılan tahmin sonuçlarına göre en yüksek alev sıcaklığına metan yanması ile ulaşılırken, sentetik yakıtlardaki H_2/CO oranına bağlı olarak, bu oran ne kadar yüksek ise, sentetik yakıtların alev sıcaklıkları da o kadar yüksek olacak şekilde tahmin edilmiştir. Yanma sonu emisyonları değerlendirildiğinde ise, alev sıcaklıklarına bağlı olarak NO_X oluşum seviyeleri belirlenmiştir. Yapılan modellemeler neticesinde, gaz türbini yanma odalarında doğalgaz yerine sentetik yakıt kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [28].

Ranga Dinesh, Jiang, Malalasekera ve Odedra, hidrojence zengin dört farklı sentetik yakıtı, ön-karışımsız model bir sistemde yakmış ve yakıt çeşitliliğinin etkilerini ve alev dinamiklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan sayısal çalışma, laminar flamelet modeli kullanılarak LES ile gerçekleştirilmiştir. Yakıtta bulunan H_2, N_2 ve CO oranlarının yanma sonu alev sıcaklıklarını ve yanma sonu ürünlerinin miktarlarını önemli derecede etkilediği, elde edilen tahmin sonuçlarından ortaya konulmuştur. Ayrıca, LES ile yapılan modelleme sonuçları, mevcut deneysel bir çalışma ile de karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların oldukça iyi bir uyum içerisinde oldukları da saptanmıştır. Yapılan sayısal çalışmadan elde edilen bir başka çıktı da, sentetik yakıtta bulunan hidrojenin yüksek yayınım ve reaksiyona girme kapasitesinden dolayı, yanma sonu alev sıcaklığını oldukça fazla etkiliyor olmasıdır. Son olarak, laminar flamelet modelle birlikte LES'in türbülanslı ön-karışımsız sentetik yakıt yanma modellemesinde oldukça iyi sonuç verdiği belirtilmiştir [29].

Habib, Mokheimer, Sanusi ve Nemitallah, 200 MW gücünde ve 2 yakıcısı bulunan paket tipi bir kazanda, doğalgaz yerine kullanılabilecek olan sentetik yakıt yanmasını sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışma için 21 aşama ve 11 tür içeren detaylı bir kinetik

mekanizma geliştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, metan yanması sırasında, sentetik yakıt yanmasına göre yanma gecikmesinin olduğu gözlemlenmiştir. % 33 CO: % 67 H_2 içeren sentetik yakıt için elde edilen sonuçlar diğer sentetik yakıtlar için elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, en kısa alevin bu sentetik yakıtın yanması ile ortaya çıktığı saptanmıştır. En yüksek ve en düşük kazan sıcaklıklarının ise, sırasıyla, % 67 CO: % 33 H_2 ve % 50 CO: % 50 H_2 içeren sentetik yakıtların yanması ile açığa çıktığı belirlenmiştir. Tahmin edilen başka sonuçlarda ise, sentetik yakıttaki hidrojen miktarının artması ile kazan çıkış sıcaklığının arttığı, hava fazlalık katsayısındaki değişim ile yanma sonu CO ve NO_X emisyonlarının önemli derece değiştiği ve en düşük emisyonların % 50 CO: % 50 H_2 içeren sentetik yakıtın yanması ile meydana geldiği belirtilmiştir [30].

Martinez, Jiang, Moulinec ve Emerson, sentetik yakıtların bünyesinde bulunan gazların çeşitliliğinin hidrojen ve sentetik yakıtların çarpmalı alevlerinin dinamiklerine olan etkilerini LES tekniği ile sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan sayısal çalışmada, saf hidrojen, % 20 CO: % 80 H_2 içeren sentetik yakıt, % 40 CO: % 60 H_2 içeren sentetik yakıt ve % 20 CO: % 20 CO_2 : % 60 H_2 içeren sentetik yakıt araştırılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlara göre, sentetik yakıt alevleri, itme ve kesme tabaka kararsızlığı ile ilişkili olarak birincil akımda girdaba benzeyen yapılar ortaya çıkarmıştır. Örneğin, H_2/CO oranı daha düşük olan sentetik yakıtlar, daha küçük alev kalınlığı olan duvar bölgesinde daha kararsız ve girdaba benzeyen yapıların ortaya çıkmasına neden olmuştur [31].

Rohani ve Saqr, etrafı dışarıya açık bir yanma odası modelinde türbülanslı girdaplı metan alevine hidrojen ilavesi yaparak, hidrojenin bu alevin sıcaklık ve emisyon parametrelerine olan etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Sürekli laminar flamelet yanma ve realizable k-Ɛ türbülans modelleri ile birlikte türbülans-yanma etkileşiminde de “ß-shaped presumed PDF” kullanmışlardır. Sonuçlara bakıldığında, yakıt içerisindeki hidrojen miktarının artmasıyla alev yapısında önemli ölçüde değişiklikler olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, en yüksek alev bölgesinin büyüklüğü azalmış, buna karşın en yüksek sıcaklık değeri artmış ve bunun bir sonucu olarak NO emisyonlarında da artış gözlemlenmiştir [32].

Williams, Shaddix ve Schefer, ön-karışımlı, girdap kararlı bir yakıcıda saf metan, hidrojence zengin ve hidrojence fakir karışım sentetik yakıt karışımlarını deneysel olarak yakmışlardır. Yapılan çalışmada yakıcı olarak CO_2 ile seyreltilmiş oksijen kullanılmıştır. Çalışmada, CO ve NO_X emisyonları, fakir karışım alev kopma limitlerinden nispeten

zengin karışımlara kadar araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, sentetik yakıttaki hidrojenin, daha yüksek alev sıcaklıkları ortaya çıkardığı, daha iyi alev kararlığına ve daha yüksek NO_X emisyonlarının oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, fakir karışım alev kopma limitinin stokiyometrisi, sentetik yakıttaki hidrojenin artmasıyla azalmaktadır. Benzer şekilde, CO emisyonlarında belirleyici olan fakir karışım stokiyometrisinin, hidrojen miktarının artmasıyla azaldığı bu çalışma kapsamında tespit edilmiştir [33].

Ziani, Chaker, Chetehouna, Malek ve Mahmah, model bir yanma odasında, metan, hidrojen ve azottan oluşan bir sentetik yakıtı, hidrojenle zenginleştirmeden ve hidrojenle zenginleştirerek sayısal olarak yakmışlardır. Sayısal modellemede, yanma modeli olarak PDF yaklaşımı kullanılmış olup, üç farklı türbülans modeli deneyerek en uygun olanı da tespit etmişlerdir. Elde edilen tahmin sonuçlarına, daha önce yapılan deneysel ve sayısal bazı çalışmalarla da karşılaştırarak yaptıkları sayısal tahminlerin doğruluğunu ortaya koymuşlardır. Elde edilen modelleme sonuçlarına göre, değiştirilmiş k-Ɛ türbülans modelinin, bu modelleme için en uygun türbülans modeli olduğuna karar vermişlerdir. Ayrıca, bahsi geçen sentetik yakıt, hidrojenle zenginleştirildikçe sentetik yakıtın alev sıcaklığı ve buna bağlı olarak NO_X emisyonları yükselmiş, buna karşın, CO ve CO_2 emisyonlarında azalma olduğu tespit edilmiştir [34].

İlbaş ve Karyeyen, yaptıkları sayısal bir çalışmada, düşük kalorili kömür gazları hidrojenle zenginleştirmişler ve bu yakıtların yanma performanslarını ve emisyon parametrelerini araştırmışlardır. Yaptıkları sayısal modelleme için yanma modeli olarak The PDF/Mixture Fraction yanma modeli kullanmışlardır. Türbülans modeli olarak üç farklı türbülans modeli denemişler ve deneysel sonuçlarla daha iyi bir uyum içerisinde olan k-Ɛ türbülans modelini kullanmışlardır. Elde edilen modelleme sonuçları değerlendirildiğinde, hidrojenle zenginleştirilen düşük kalorili kömür gazlarının alev sıcaklıklarında önemli derecede artış olduğu belirlenmiştir. Bun bağlı olarak, çok önemli seviyelerde olmamakla beraber NO_X değerlerinde de bir miktar artış olduğu bu çalışmada saptanmıştır [35].

Hasegawa, Sato ve Nakata, farklı tipteki kömürlerin farklı yöntemler ile gazlaştırılması sonucu elde edilen sentetik yakıtları deneysel ve sayısal olarak (reaksiyon kinetiği) yakmışlar ve özellikle yanma sonu NO_X ve CO emisyonlarını belirlemişlerdir. Yapılan çalışmada kullanılan sentetik yakıtlardan bazılarının NH_3 bulundurmasından dolayı, yakıt NO_X etkisiyle yanma sonu NO_X emisyonlarında bir miktar daha artış olduğu bu çalışmada

belirlenmiştir. Ayrıca, sentetik yakıtların bünyesinde bulunan CH_4 miktarının artması, sentetik yakıttaki NH_3'ün NO_X'a dönüşümünü arttırdığı belirlenmiştir [36].

Hasegawa ve Takeharu, oksijen püskürtmeli gazlaştırma çevrim santrallerinde üretilen sentetik yakıtların kullanımları esnasında ortaya çıkan yüksek NO_X seviyelerinin azaltılmasına ilişkin deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma ile hem ısıl hem de yakıt NO_X mekanizmaları ile oluşan NO_X emisyonlarının azaltılması hedeflenmiştir. Bunun için sentetik yakıt çift kademeli olarak yakılmış ve azot beslemesi yapılarak NO_X emisyonlarının azaltımı sağlanmıştır. Azotun doğrudan püskürtüldüğü çift kademeli yakma yapabilen ön-karışımsız bir yakıcı sayesinde NO_X seviyeleri 34 ppm'e kadar geriletilmiştir. Ayrıca, beslenen azot sayesinde, santralin ısıl verimi yaklaşık % 0.3 kadar arttırılmıştır. NO_X seviyelerinin düşürülmesini sağlamak için geliştirilen bu yakıcı, ayrıca CO emisyonlarının da çok hızlı bir şekilde 20 ppm seviyelerine gerilemesini de sağladığı tespit edilmiştir [37].

Liu ve Sanderson, Siemens tipi düşük emisyonlu gaz türbini tipi bir yakıcıda, gerçek gaz türbini işletme şartlarında, doğalgazı, CO_2 ve N_2 gibi seyrelticilerle seyreltmişler ve bu seyreltmenin ve farklı işletme yüklerinin yanma karakteristiklerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışma neticesinde, doğalgaza yapılan bu seyreltmelerin alev sıcaklıklarını ve buna bağlı olarak da yanma sonu NO_X emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Çalışmada araştırılan bir diğer parametre de çalışma yüküdür. Gaz türbininin çalışma yükü % 5'ten tam yüke kadar değiştirilmiş olup, % 40'lık yüklemelere kadar, CO_2 ve N_2 ile yapılan seyreltmenin özellikle CO emisyonlarında bir değişikliğe neden olmadığı, % 40'tan tam yüke kadar yük arttırıldıkça, her iki seyrelticinin de CO emisyonlarının azalmasına neden olduğu Liu ve Sanderson tarafından belirlenmiştir [38].

Dattarajan, Kaluri ve Sridgar, biyokütle gazlaştırması neticesinde elde edilen ve içeriği yaklaşık olarak % 15 H_2, % 20 CO, % 1,5 CH_4, % 10 CO_2, % 3,5 H_2O ve % 50 N_2 şeklinde olan üreteç gazını (veya havagazı) daha verimli bir şekilde yakabilmek için siklon tipi bir yanma odası geliştirmişler, imal etmişler ve bu yakıtın bu yanma odasındaki yanma performansını deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, yakıt ve havanın, yanma odası çıkışına gelmeden önce oldukça iyi karışarak yandıkları ve bu şekilde de geliştirilen yanma odasının bu yakıt için oldukça

uygun olduğu tespit edilmiştir. Sayısal ve deneysel veriler karşılaştırıldığında ise, bazı noktalardan alınan ölçümlerde farklılıklar oluşsa bile genel dağılımın uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yanma odası çıkışından ölçülen partikül madde seviyelerinin de, çalışmanın yapıldığı Hindistan'da belirlenen sınırlar içerisinde kaldığı da tespit edilmiştir [39].

Kutne, Boxx, Stöhr ve Meier, model bir gaz türbini yanma odasında, hidrojence zengin sentetik yakıt karışımının yanma davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışma, üç farklı ısıl yükte ve 0.4 ila 0.6 arasında değiştirilen eşdeğerlilik oranlarında gerçekleştirilmiştir. Sentetik yakıtın yanma davranışlarını belirlemek için PIV gibi hız belirleyen, OH-LIF ve OH* gibi ışıldamayı gösteren optik görüntüleme teknikleri kullanılmıştır. Elde sonuçlar değerlendirildiğinde, tüm yanma şartları için sentetik yakıtın kararlı bir şekilde ve herhangi bir termoakustik dalgalanmaya yol açmadan yandığı belirlenmiştir. Kullanılan yakıcı için iç resirkülasyon bölgelerinin oluştuğu da yapılan bu çalışma kaspamında saptanmıştır. Isıl güçte ve eşdeğerlilik oranından yapılan değişimlerin ise, sentetik yakıtın tüm alev yapısına ve yanma davranışına çok az etki ettiği tespit edilmiştir [40].

İlbaş ve Karyeyen, model bir gaz türbini yanma odasında, farklı içeriklere sahip kömür gazlarını sayısal olarak modellemişler ve bu gazların yanma ve emisyon parametrelerini araştırmışlardır. Araştırmada, yanma modeli olarak The PDF/Mixture Fraction yanma modelini, türbülans modeli olarak standard k-Ɛ türbülans modelini ve radyasyon modeli olarak da P-1 radyasyon modelini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, metanın yanma performansına en yakın yanma performansına kok fırını gazı yanması neticesinde ulaşılmıştır. NO_X emisyonları açısından değerlendirildiğinde ise, bünyesinde yanıcı gazların yanı sıra azot da bulunduran kok fırını gazının NO_X emisyonları oldukça yüksek çıkmış olup, bu durum, aynı çalışmada İlbaş ve Karyeyen tarafından, yanma odasına ikincil ve seyreltme havası beslenerek aşılmıştır [41].

Joo, Yoon, Kim, Lee ve Yoon, model bir gaz türbini yanma odasında, kısmi ön-karışımlı yanma şartlarında, $H_2/CO/CH_4$ karışımlı sentetik yakıtların yanma karakteristiklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan çalışmada ayrıca, optik görünteleme teknikleri de kullanılmıştır. Yürütülen deneysel çalışmalara ilaveten yanma sonu NO_X seviyelerini tahmin etmek için yapay sinir ağları da kullanılmıştır. Optik görüntüleme sonuçlarına göre,

$H_2/CO/CH_4$ sentetik yakıtının içeriğine bağlı olarak her bir ara radikalin önemli seviyelerde değiştiği belirlenmiştir. Sentetik yakıttaki hidrojen miktarının artmasıyla, hidrojenin daha hızlı yanmasının bir sonucu olarak alev uzunluğunun azaldığı tespit edilmiştir. NO_X emisyonları bakımından sonuçlar irdelenecek olursa, alev sıcaklığının ve uzunluğunun NO_X oluşumlarını doğrudan etkilediği saptanmıştır. Son olarak, çalışma kapsamında gerçekleştirilen yapay sinir ağlarında, girdi olarak alev sıcaklığı, alev uzunluğu hava debisi verilmiş ve bu verilerden NO_X emisyonlarının tahmini sağlanmıştır [42].

Lee, Seo, Yoon, Kim ve Yoon, model endüstriyel bir gaz türbini yanma odasında, farklı içeriklere sahip sentetik yakıtları N_2, CO_2 ve buhar ile seyreltmiş ve bu seyreltmenin NO_X ve CO emisyonlarına, yanma kararsızlıklarına, alev yapılarına ve bazı noktalardan alınan sıcaklık ölçümleri sonucu elde edilen yanma performanslarına olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, sentetik yakıtlar seyrelticiler ile seyreltilme oranları arttırıldıkça NO_X emisyonlarının azaldığı, bu azalmanın da en fazla buhar ile seyreltme neticesinde başarıldığı tespit edilmiştir. Seyrelticilerin CO emisyonlarına olan etkileri irdelendiğinde ise, buharla yapılan seyreltmenin, alev sıcaklığını düşürmesi ve yanmanın tamamlanamaması nedeniyle CO emisyonlarının artmasına neden olduğu, diğer seyrelticiler ile yapılan seyreltmelerin CO emisyonlarını önemli derecede etkilemediği de bu çalışma kapsamında ortaya konulmuştur [43].

Tian, Zang ve Ge, yaptıkları bir çalışmada, yakma havası olarak nemli hava kullanmışlar ve ayrıca, yakıt olarak kullandıkları sentetik yakıtın içerisine farklı oranlarda N_2 ilave ederek azotun seyreltme etkisini araştırmışlardır. Araştırmada OH-PLIF ölçüm ekipmanı ile de alev yapısını incelemişlerdir. Yanma odası çıkışından ölçülen sıcaklık ve emisyon değerlerine göre, kuru hava şartlarında, N_2 ile yapılan seyreltme ile NO_X emisyonlarının açık bir şekilde azaldığı, CO emisyonlarının ise 10 ppm'nin altında aynı seviyelerde kaldığı tespit edilmiştir. Havanın nemli olduğu şartlarda ise, N_2 ile seyreltme yapıldıkça, CO emisyonlarında önemli ölçüde artış olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, NO_X emisyonlarında ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Ayrıca, PLIF ölçüm sonuçları değerlendirilecek olursa, N_2 ile yapılan seyreltmenin alev sıcaklığı düşürdüğü saptanmıştır [44].

Yukarıda, konuya ilişkin daha önce yapılmış çalışmalar sunulmuştur. Sunulan çalışmalar incelendiğinde, kömür gazları ya da sentetik yakıtların yakılmasına ilişkin çalışmaların oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Özellikle literatürde bulunan deneysel çalışmalar oldukça azdır. Çünkü, kömür gazlarını, bilinen doğalgaz yakıcıları ile yakmak güçtür. Ayrıca, yapılan deneysel çalışmaların bile çoğunda, yanma sonu emisyonlar üzerinde durulmaktadır. Yanma odası içerisi ve özellikle alev bölgesi üzerine çalışmalar yapmak, ölçüm zorluklarından dolayı çok fazla gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen yakma sistemi gibi bir yakma sistemine de literatürde rastlanmamıştır. Daha önce yapılan sayısal çalışmalar değerlendirilecek olursa, bu tip bir yakıcı ile ilgili de herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bahsi geçen gerekçeler dikkate alındığında, bu çalışma ile literatüre önemli ölçüde katkı sağlanmıştır.

2. YAKITLAR, YANMA VE HAVA KİRLİLİĞİ

2.1. Yakıtlar

Yakıtlar, bir oksitleyici (genellikle havadaki oksijen) ile reaksiyona maruz kaldıklarında ısı enerjisi üretebilen maddelerdir. Yaygın olarak bilinenleri karbon, hidrojen ve bunların ısı enerjisi verebilecek olan bileşenleridir. Yakıtlar, gaz, sıvı ve katı olarak sınıflandırılabilirler. Her fazdaki yakıtın karakteristikleri birbirinden farklıdır [45].

Yakıtlar, genellikle fosil kökenli olarak bilinirler. Fosil kökenli yakıtların en önemli özelliği ise yenilenebilir olmamalarıdır. Bunun yanında, biyokütle de bir yakıt türü olup, literatürde bu yakıt türü genellikle yenilenebilir olarak kabul edilmektedir. En çok bilinen fosil kökenli yakıtlar doğalgaz, petrol ve türevleri ve kömürdür. Biyokütle ise ağaçtan, zirai ve diğer bazı atıklardan oluşmaktadır [45].

Fosil kökenli yakıt kaynaklarına ilişkin tartışmalar günümüzde de devam etmektedir. Doğalgaz ve petrol kaynaklarının, kömüre göre daha sınırlı olduğu bilinmektedir. Bunun anlamı, jeolojik veriler ışığında, mevcut ekonomik ve işletme şartları için, gelecek yıllardaki makul tüketim miktarlarının tahmin edilmesidir. Çünkü, henüz keşfedilmemiş yeni fosil yakıt kaynaklarının da bulunabileceği unutulmamalıdır [45].

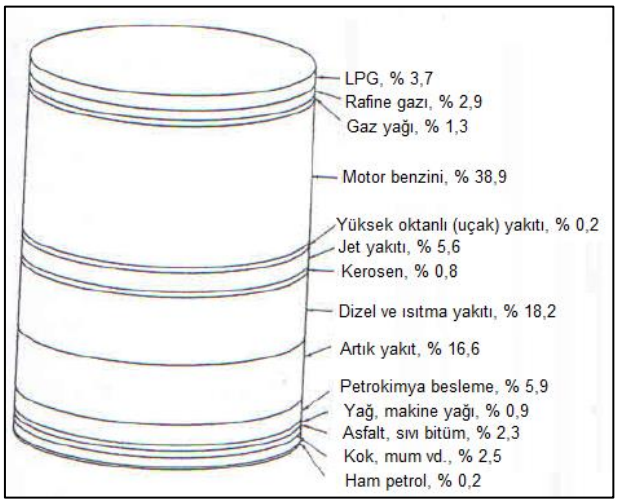
2.1.1. Gaz yakıtlar

Bilinen gaz yakıtlar doğalgaz ve sıvılaştırılmış petrol gazıdır (LPG). Bunun yanı sıra kömürden ve ağaçtan veya petrolden ve doğalgazdan elde edilebilecek başka gaz yakıtlar da bulunmaktadır. Gaz yakıtlar, doğalgaz özelinde değerlendirildiğinde, doğalgaz, gaz fazında bulunan birçok hidrokarbon ve az miktarda da hidrokarbon olmayan bileşenlerin karışımından meydana gelmektedir. Doğalgaz, çıkarıldığı yere bağlı olarak, yüksek oranda metan bulundurmaktadır. Metana göre nispeten daha az oranlarda etan, propan, bütan ve pentan da içerir. Sülfür ve organik azot genellikle ihmal edilebilecek kadar az miktardadır. Doğalgaz, basınçlandırılarak uzun mesafelere taşınmaktadır. Bir diğer gaz yakıt tipi sıvılaştırılmış petrol gazıdır. Sıvılaştırılmış petrol gazı, etan, propan ve bütandan oluşmaktadır [45].

Diğer bir gaz yakıt tipi ise kömür gazlarıdır. Bu gazlar, kömürlerin gazlaştırılmasında, koklaştırma sırasında veya demir cevherinin metalik demire dönüşmesi sırasında üretilen yüksek fırın ürünlerinden elde edilmektedir. Bu gazlardaki yanabilir ana bileşenler CH_4, H_2 ve CO olup, bazılarında ise yüksek oranda N_2 bulunmaktadır [45].

2.1.2. Sıvı yakıtlar

Sıvı yakıtlar ilk olarak petrolden elde edilmektedir. Gelecekte ise sıvı yakıtların bitümlü şiştten, katranlı kumdan, kömürden ve biyokütleden üretilmesi beklenmektedir. Petrol, az miktarda kükürt, azot, oksijen, eser miktarda metal ve mineralleri bulunan ve sıvı hidrokarbonlardan meydana gelen doğal bir karışımdır. Petrol, genellikle okyanusun dibinde bulunan bazı kaya oluşumlarında bulunmaktadır. Petrol, burada yüksek basınç ve sıcaklığın etkisiyle, milyonlarca yıllık bir süreçte oluşmuştur. Bilindiği gibi petrol çıkarıldığı gibi kullanılmaz. Kullanım alanına göre belirli işlemlerden geçirilir. Şekil 2.1'de aşağıdan yukarıya ham petrolden LPG'ye kadar kullanılan petrol türevleri gösterilmiştir. Rafineri sonrası hangi üründen ne kadar elde edildiği ise % olarak verilmiştir. [45].



Şekil 2.1. Petrolden elde edilen ürünler [45]

2.1.3. Katı yakıtlar

Doğal olarak meydana gelen katı yakıtlar, odun ve biyokütlenin başka biçimleri, turba, linyit, bitümlü kömür ve antrazittir. Kentsel ve belirli endüstriyel atıklar da katı birer yakıt olarak değerlendirilirler. Katı yakıtlarda bulunan temel yanıcı maddeler karbon ve

hidrojendir. Bunun yanı sıra, azot, kükürt, oksijen, su buharı ve kül gibi maddeler de bulundururlar. Oksijen, yakıta kimyasal olarak bağlıdır ve ağırlıkça % olarak odun için % 45'ten başlar ve antrazit için % 2'ye kadar değişkenlik gösterir [45].

Katı yakıtları diğer yakıtlardan ayıran bir özellik olarak da nem içermeleri gösterilebilir. Nem, katı yakıtlarda serbest ve bağlı olarak iki şekilde bulunmaktadır. Serbest nem bağlı değildir. Bağlı nem ise katı yakıtlarda fiziksel adsorbsiyonla tutulmaktadır ve bu nem ısıyı az miktarda emmektedir. Yeşil odunun % 50'si sudan oluşmaktadır. Linyit kömürleri % 20'den % 40'a kadar, çoğunluğu serbest olan nem içermektedir. Bitümlü kömür ise yaklaşık % 5 nem içermektedir [45].

Katı yakıtlarda bulunan diğer bir madde de küldür. Yanma işlemi tamamıyla gerçekleştikten sonra arta kalan inorganik bir maddedir. Odun genellikle % 10 civarında kül içerir. Ancak kömürde bu oran daha fazladır. Katı yakıtlarda bulunan kül, 1200 °C'ta yumuşamaya başlar ve yakıttan yakıta farklı olmakla birlikte genellikle 1300 °C civarında ergimektedir [45].

2.2. Yanma

Yanma, ısı ve elektrik enerjisi üretmek için, yakıt ve oksitleyicinin (genellikle hava) kimyasal bir reaksiyon yoluyla bir araya gelme işlemidir. Bu olay, kimyasal ve fiziksel işlemlerin etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Yanma işleminin kimyasal reaksiyonları oluşurken ısı transferi gerçekleşmekte ve akışkan hareketi meydana gelmektedir [46]. Yanma işlemi, değişik biçimlerde sınıflandırılabileceği gibi, bilinen en yaygın sınıflandırma şekli, yakıt ve havanın reaksiyon bölgesine beslenme şekillerine göre olanıdır. Bunlar; ön-karışımsız (difüzyon) yanması, ön-karışımlı yanma ve kısmi ön-karışımlı yanmadır. Ön-karışımsız yanmada, yakıt ve oksitleyici ayrı olup, yanma, türbülanslı karışım işlemi ile eş zamanlı olmaktadır. Ön-karışımsız yanma, dizel motorların silindirlerinde, bazı gaz türbinlerinde ve konvansiyonel yakıcılarda meydana gelmektedir. Ön-karışımlı yanmada ise, yakıt ve oksitleyici, yanma bölgesine girmeden önce tamamen karışır. Daha sonra, kimyasal reaksiyon oranı, bir ateşleme yüzeyi ile sıcak yanma bölgesinden soğuk reaksiyon olmayan bölgeye doğru bir yayılma olur [47].

2.2.1. Yanmanın termodinamiği ve reaksiyon kinetiği

Yanma, ayrı ayrı reaksiyona girenlerin ve ürünlerin enerjilerinden elde edilen kimyasal reaksiyonları devam ettirici olarak serbest enerjileri içerir. Yanma işlemi ile açığa çıkan enerjiyi hesaplamak için, her bir kimyasal türün enerjisi, ya onun iç enerjisi ya da entalpisi yoluyla aşağıdaki gibi verilebilir [46].

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

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

Bir reaksiyon aşağıdaki gibi tanımlanacak olursa;

$$s_A A + s_B B + \ldots = s_P P + s_q Q + \ldots \tag{2.2}$$

Burada s_A ve s_B, A ve B reaktantların için stokiyometrik katsayıları, s_P ve s_q ise P ve Q ürünleri için stokiyometrik katsayıları temsil etmektedir.

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

$$\Delta H^{\phi}_{298} = \Sigma s_x \Delta H^{\phi}_{f298}(X) \tag{2.3}$$

Burada ΔH^{ϕ}_{298}, standart şartlarda reaksiyondaki entalpi değişimidir. s_x, reaksiyona girenler için negatif, ürünler için pozitif olan stokiyometrik faktördür. ΔH^{ϕ}_{f298} ise, reaksiyona girenlerin ve ürünlerin kJ/kmol biriminde standart oluşum entalpileridir. Kimyasal reaksiyonun davranışını miktar olarak tanımlamak için ürünlerin konsantrasyon ve oran sabitleri biçiminde, kimyasal türlerin konsantrasyonlarındaki değişim oranını belirten bir oran kanunu aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$-\frac{1}{s_A}\frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{s_B}\frac{d[B]}{dt} = -\frac{1}{s_P}\frac{d[P]}{dt} = -\frac{1}{s_q}\frac{d[Q]}{dt} = k[A]^a[B]^b \quad (2.4)$$

Bu eşitlikte k, oran sabitini, a ve b reaksiyonun derecesini göstermektedir. Oran sabiti k, genellikle sıcaklığa bağımlı ve konsantrasyondan bağımsız bir ifadedir. Bu sabit, genellikle Arrhenius formunda ve şöyle yazılır:

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

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

2.3. Hava Kirliliği

Herhangi bir yakıtın yanması neticesinde hava kirliliğine neden olan kirleticilerin oluştuğu herkes tarafından bilinmektedir. Tıpkı bu durumda olduğu gibi, herhangi bir kömür gazının yanması sonucunda da azot oksit (NO_X), kükürt dioksit (SO_2), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2) uçucu organik bileşenler (VOCs), partikül madde ve eser miktarda oluşabilecek diğer kimyasal türler de oluşmaktadır. Oluşan bu emisyonların miktarları, yakılan kömür gazının içeriğine, kullanılan yakıcıya ve işletme şartlarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [48]. Sonraki bölümlerde, bu çalışma kapsamında yakılan kömür gazlarının oluşturduğu yanma sonu ürünleri hakkında daha detaylı bilgiler sunulmuştur.

2.3.1. Azot oksit (NO_X) oluşumu

Azot oksit ailesi, azot monoksit (NO), azot dioksit (NO_2), diazot oksit (N_2O), diazot trioksit (N_2O_3) ve diazot pentaoksit (N_2O_5) olmak üzere beş kararlı gazdan oluşmaktadır. Ancak, bunlarda sadece ilk üçü (NO, NO_2, N_2O) hava kirliliği bakımından önemli etkiye sahiptir. NO, renksiz ve insan sağlığı üzerinde zehirli etkiye sahip bir yanma sonu ürünüdür. Bu gaz, fotokimyasal duman oluşumunda aktif bir rol oynar. Birçok yanma işleminde toplam NO_X oluşumunun en az % 95'inin NO olduğu kabul edilmektedir. NO, çevre üzerinde birçok kirletici etkiye sahiptir. Yakıt-hava yanma reaksiyonlarında azotoksit (NO_X) oluşumuna katkı yaptığı bilinen temelde iki kaynak bulunmaktadır.

Birinci ve en çok bilinen kaynak, hacimsel oran olarak % 79 azot içeren havadır. İkinci kaynak ise, yapısında bağıl durumda azot bulunduran yakıttır. Ancak, bu çalışma kapsamında yakılan kömür gazlarının da tıpkı havada olduğu gibi serbest azot içerdiği bilinmektedir. Bu nedenle, havadaki azotun yanı sıra NO_X oluşumuna kömür gazlarındaki serbest azotun da katkı yapacağı unutulmamalıdır [46].

Genel olarak alevlerde, NO_X emisyonlarının üç yolla oluştuğu kabul edilmektedir. Bunlar, ısıl (thermal) NO_X oluşum mekanizması, ani (prompt) NO_X oluşum mekanizması ve yakıt (fuel) NO_X oluşum mekanizmasıdır [46].

Isıl NO_X oluşum mekanizması

Zeldovich tarafından önerilen ısıl NO_X oluşum mekanizması, pik alev sıcaklıklarında bulunan yüksek ısıl enerji yoluyla yanma havasındaki ve kömür gazındaki azotun oksidasyonunu hesaplar. Isıl NO_X oluşum mekanizması, pik alev sıcaklığına ve oksijenin kullanılabilirliğine son derece bağımlıdır. Oksijen atomları aşağıdaki işlemler ile oluşur [47]:

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

$$O_2 + M \longleftrightarrow O + O + M \tag{2.7}$$

Daha sonra, serbest azotun oksidasyonu ısıl NO_X (Zeldovich) mekanizması ile aşağıdaki gibi oluşur:

$$O + N_2 \longleftrightarrow NO + N \tag{2.8}$$

$$N + O_2 \longleftrightarrow NO + O \tag{2.9}$$

Zeldovich mekanizmasında N_2 bağlarının parçalanması en zor adım olduğundan, reaksiyon (2.8) genellikle oran kontrollüdür. Reaksiyon (2.8) ve (2.9)'un her ikisi de fakir ve kısmen zengin yanma şartlarında NO oluşumu bakımından çok önemlidir. İlave olarak Lavoie ve ark. tarafından aşağıdaki reaksiyon önerilmiştir [47]:

$$N + OH \longleftrightarrow NO + H \quad (2.10)$$

Reaksiyon (2.10), zengin karışımlı yanma şartları için önemlidir. Fakir karışımlı yanma şartlarında NO hesaplarının çoğunda bu denklem ihmal edilebilir. Yukarıdaki durumda, ısıl NO oluşum oranı sadece yüksek sıcaklıklarda (T > 1800 K) önemlidir. Ayrıca, her 90 K sıcaklık artışında NO seviyesi yaklaşık olarak iki kat artmaktadır [46].

Reaksiyon (2.8), reaksiyon (2.9) ve reaksiyon (2.10) ısıl NO mekanizmasına ait reaksiyonlardır. Reaksiyon (2.8), radikallerin yeniden birleşiminin tamamlandığı ve sıcaklığın tanımlandığı yanma sonrası gazlarda NO'nun hemen hemen tamamının oluşumunda belirleyici adım oranı olarak kabul edilmektedir. Reaksiyon (2.8), (2.9) ve (2.10) için oran sabitleri ise şöyledir [47]:

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

$$k_{-1} = 3{,}8x10^7 exp\left(-\frac{425}{T}\right) \quad (2.12)$$

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

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

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

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

Yukarıdaki denklemlerde k_1, k_2 ve k_3, reaksiyon (2.8), (2.9) ve (2.10) için ileri oran sabitlerini, k_{-1}, k_{-2} ve k_{-3} ise ters oran sabitlerini göstermektedir. Reaksiyon (2.10)'un aşağıdaki durum için ihmal edilebileceği kabul edilirse;

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

Isıl NO mekanizması ile NO oluşum oranı aşağıdaki gibi verilmektedir [47].

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

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

Reaksiyon (2.6) ve (2.7)'ye göre O atom konsantrasyonu aşağıdaki gibi elde edilebilir [47]:

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

Isıl NO oluşumu için birçok global NO modelleri önerilmiştir. N atomu için daimi durum yaklaşımı alınır ve O atomunun konsantrasyonu denge göz önüne alınarak hesaplanabileceği kabul edilirse en yüksek NO oluşum oranı aşağıdaki gibi elde edilebilir [46]:

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

Bu denklemde NO oluşum oranının yanmış gaz sıcaklığına (T) yoğun olarak bağlı olduğu ve yanmış gazlarda O_2 konsantrasyonuna ve basınca daha az bağımlı olduğu görülmektedir [47].

<u>Ani NO_X oluşum mekanizması</u>

Fenimore tarafından ilk olarak önerilen ani NO_X mekanizması, ya devam eden NO oksidasyonundan ya da yakıt NO_X ile olduğu gibi N_2'nin azaltılmasından önce hidrokarbon yakıt parçalanması ile atmosferik azotun reaksiyonunu tanımlar [49]. Yakıt NO_X'un tersine, ani NO_X oluşumu hidrokarbon yakıt parçalanmasının çok olduğu yakıt zengin bölgelerde önemlidir. Alevlerde oluşan ani NO_X miktarının diğer iki mekanizma ile karşılaştırıldığında düşük olduğuna inanılmaktadır. Bunun yanı sıra düşük sıcaklıkta gaz

alevlerde yayılan NO miktarının çok önemli bir kısmını ani NO oluşturabilir. Düşük sıcaklıklarda (T < 1800 K), ısıl NO mekanizması ile oluşan NO, toplam NO oluşumu ile karşılaştırıldığında oldukça azdır. N_2-O_2-NO bilinen kinetik kanunları, hidrokarbonlar tüketildikten sonra alev sonrası gazlardaki azot oksit oluşumunu tanımlar. Genellikle kabul edilen ani NO oluşum yolu aşağıdaki gibidir [47]:

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

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

$$HCN + OH \longleftrightarrow CN + H_2O \quad (2.23)$$

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

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

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

Hidrokarbon alevlerinde, CH ani NO_X oluşumunun ana kaynağıdır. Bunun yanı sıra, ani NO_X kaynağı, yakıt parçalanması ile oluşan çok sayıda kimyasal türlere (CH, CH_2, C, C_2, C_2H) katkı sağlayabilir [47].

Ani NO yukarıda tanımlanan basit denge ısıl NO mekanizması ile hesaplanandan daha hızlı bir oranda oluşan NO olarak tanımlanabilmektedir. Bu tanım ile, hidrokarbon yakıt yanmasında ani NO_2'nin üç kaynağı tanımlanabilir. Birincisi, reaksiyon bölgesinde ve yanmış gazlarda ısıl NO mekanizmasının oranını hızlandıran, dengede olmayan O ve OH konsantrasyonu, ikincisi, moleküler azot ile reaksiyon bölgesinde ve yakınlarında bulunan hidrokarbon radikal reaksiyonları ile başlatılan ardışık reaksiyon (Fenimore ani NO mekanizması) ve üçüncüsü ise, üçüncü cisim birleşmesi reaksiyonu ile N_2 ve O atomlarının reaksiyonu sonucu oluşan N_2O'dur [47].

$$O + N_2 + M \longrightarrow N_2O + M \quad (2.26)$$

N_2O ardışık reaksiyonu ile oluşan NO [50] aşağıdaki reaksiyon ile belirlenebilir:

$$N_2O + O \longrightarrow NO + NO \quad (2.27)$$

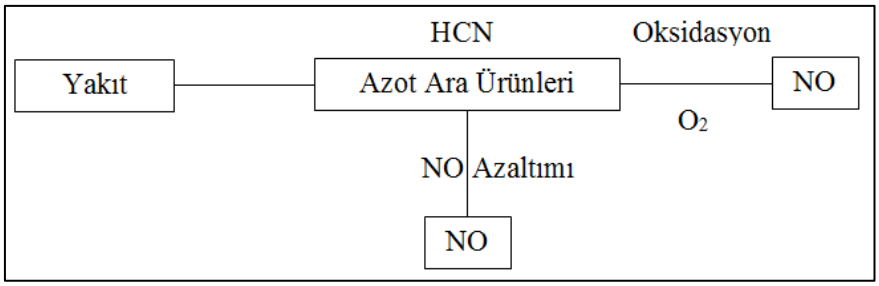
NO oluşumunda bu reaksiyonların ve oluşan ani NO'nun toplam miktarı yakıcıdaki şartlara bağlıdır. Dengede olmayan radikal konsantrasyonu ile NO oluşumunun hızlanması ön-karışımsız alevlerde ve düşük basınçlı ön-karışımlı alevlerde toplam NO oluşumunun % 80'den fazlasını oluşturduğu görülmektedir [51]. Hidrokarbon radikali moleküler azot mekanizması ile ani NO oluşumu, toplam NO oluşumunun % 50'den fazlasını oluşturan yakıt zengin ön-karışımlı hidrokarbon yanmasında ve ön-karışımsız hidrokarbon alevlerinde hakimdir. N_2O mekanizması ile NO oluşumu, yakıt-hava oranı ve yanmış gaz sıcaklığı azalırken ya da basınç artarken önemli derecede artar. Hidrokarbon yanması bir çok karmaşık reaksiyon ve kimyasal türleri içermektedir ve sayısal olarak bunları belirlemek oldukça zordur. Bu nedenle birçok araştırmacı, ani NO oluşumunu hesaplamak için tahmin edici genel modeller önermişlerdir. DeSoete [52] tarafından önerilen eşitlik şöyledir:

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

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

Yakıt NO_X oluşum mekanizması

Yakıt NO_X mekanizması, yakıt moleküllerindeki azot bağlarının oksidasyonunu tanımlar. Bu geçici reaksiyonların meydana geldiği bölgelerde oksijenin bulunması ve ara radikal reaksiyonuna bağlı olarak, ya N_2'ye ya da NO'ya dönüşür. Ayrıca, bu mekanizma, CH radikalleri ile azot molekülünün yerine NO moleküllerinin azaltılmasını da içermektedir. Bu nedenle, yakıt azotunun NO'ya dönüşümü yerel azot stokiyometrisine son derece bağlıdır. Yakıt damlacıkları ısıtıldığında azot içeren bileşenler gaz fazında serbest kalır. HCN, N, CN ve NH gibi azot ara ürünleri, bileşenlerin ısıl ayrışması sonucu meydana gelir ve NO_X'a dönüşebilir [47]. Genellikle kabul edilen yakıt NO_X mekanizması Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2. Yakıt NO_X oluşum şeması

HCN, yakıt azotundan oluşmaktadır ve onun üretim oranı, damlacık buharlaşması süresince gaz fazında yakıtın serbest kalma oranına eşittir. HCN, iki reaksiyon ile tüketilmektedir. Birincisi, üretilen NO'ya oksitlenir. İkincisi, N_2'yi azaltmak için NO ile reaksiyona girer. Bu iki reaksiyondan HCN'nin tüketim oranı aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir [53]:

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

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

Eş. (2.29) ve Eş. (2.30)'da R_1 ve R_2, HCN'nin dönüşüm oranlarını (1/s), T anlık sıcaklığı (K), X mol kesrini, a oksijenin reaksiyon üssünü göstermektedir ve $A_1 = 3{,}5x10^{10}$ (1/s), $A_2 = 3x10^{12}$ (1/s), $E_1 = 67000\ cal/mol$, $E_2 = 60000\ cal/mol$'dür [46].

<u>NO_2 reaksiyon mekanizması</u>

Yanma boyunca oluşan NO'un azot içeren ara ürünler ile N_2 oluşturmak için sonradan reaksiyona girebileceği bilinmektedir. İlave olarak, bu reaksiyonlarda NO, değişik oksijen içeren kimyasal türler ile NO_2 oluşumu için reaksiyona girebilir. Temel NO_2 oluşum reaksiyonu [46]:

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

ve temel çıkarılma adımı onun hidrojen radikalleri ile aşağıdaki reaksiyonudur.

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

Alevin düşük sıcaklık bölgelerinde HO_2 kısmen kararlıdır. Yüksek sıcaklık bölgesinde oluşan NO ile reaksiyona girebilir ve düşük sıcaklık bölgesine difüzyon ile taşınır. Yüksek radikal konsantrasyonundan dolayı NO_2 taşınması hızlıdır ve NO_2'ye geri dönüşebilmektedir. NO_2'nin miktarı sisteme bağlı olarak fazlasıyla değişebilir. Fakat genellikle toplam NO_X'un yaklaşık % 5'i kadardır [46].

Kimyasal denge göz önüne alındığında 1500 K'den daha yüksek, tipik alev sıcaklıkları için NO_2/NO oranı ihmal edilebilir derecede azdır. Bu dönüşümde NO_2 ömrü, tipik olarak 10 ms'den daha azdır. Yanmada, azotoksit oluşumju için bazı kinetik modeller NO_2 emisyonunun sadece düşük sıcaklıkta çalıştırılan cihazlarda ya da NO_2 taşıma işleminde soğuk ısı transfer yüzeyleri ile yok edilebildiğini önermektedir [46].

N_2O reaksiyon mekanizması

N_2O (diazot oksit), ozon tabakasının delinmesine neden olan ve asit yağmurlarına katkı sağlayan bir kirletici türüdür. Yanma gazlarında N_2O'nun ardışık reaksiyonlarla oluşumu ve tahribi iyi bilinmektedir. Gaz fazında, yanma sırasında esas olarak NCO ve NH ile NO'nun reaksiyonu ile oluşmaktadır Yakıt yanmasında temel gaz fazında N_2O oluşturan reaksiyonlar [47]:

$$NCO + NO \longrightarrow N_2O + CO \qquad (2.33)$$

$$NH + NO \longrightarrow N_2O + H \qquad (2.34)$$

NO yakıt azotundan oluştuğu zaman, radikal türler NCO ve NH, alevin oksidasyon bölgesinde onların en yüksek konsantrasyonuna ulaşır. Bundan dolayı, N_2O alev önündeki bölgeye ya da içerisine yerleşmiştir [52]. Birincil N_2O taşıma adımı reaksiyon (2.35)'te yazıldığı üzere hidrojen radikalleri ile N_2O'nun reaksiyonudur.

$$H + N_2O \longrightarrow N_2 + OH \qquad (2.35)$$

1500 K'den daha yüksek sıcaklıklarda N_2O'nun ömrü 10 ms'den daha azdır. Genel kabul, N_2O emisyonunun akışkan yataklı yakıcılarda olduğu üzere düşük sıcaklık yanmasının dışında önemli olmadığıdır [47].

2.3.2. Karbon monoksit (CO) oluşumu

Bilinen yakıt türleri için yanma sonu ürünü olarak karbon monoksitin oluşumunda iki neden bulunmaktadır. Birinci, yetersiz hava ile veya havanın yeterli olması durumunda bile hava ile yakıtın yeterince iyi karışamamasından dolayı eksik yanma ürünü olarak oluşan karbon monoksit, ikincisi ise yanma odası alev sıcaklığının fazla olması durumlarında ortaya çıkan karbon monoksittir. Kömür gazlarının yanma sonu ürünlerinde ise karbon monoksit görülmesine üçüncü bir neden daha ilave edilebilir. Bilindiği gibi kömür gazları belirli oranlarda karbon monoksit içermektedir ve bu karbon monoksitin bir kısmı, kömür gazının yanması esnasında karbon dioksite dönüşmeden yanma odasından ayrılabilir [48]. Bunlara ilaveten, kömür gazlarının pistonlu motorlarda yanması sırasında motor yağının ayrışması da karbon monoksit oluşumuna katkı sağlayabilmektedir [54]. Gaz türbini entegre kömür gazlaştırmalı birleşik güç santrallerinde yakılan sentetik yakıtlardan açığa çıkan karbon monoksit seviyelerinin bilinen yakma sistemlerinde açığa çıkan karbon monoksit seviyelerinden daha az olduğu belirtilmektedir [55]. Pistonlu motorlarda hidrojen-karbon monoksit karışımının yakılması ile de oluşan karbon monoksit miktarlarının aynı şartlarda yakılan benzinin veya doğalgazın yanma sonu ürünlerinde görülen karbon monoksit seviyelerinden daha az olduğu ortaya koyulmaktadır [56].

2.3.3. Karbon dioksit (CO_2) oluşumu

Yeterince hava olduğunda ve yakıt-hava karışımı istenen seviyelerde sağlandığında, karbon içeren tüm yakıtların yanması neticesinde karbon dioksit açığa çıkar. Diğer yakıtların yanması ile karbon dioksit oluşma durumu, diğer yakıtlarda olduğu gibi, karbon bileşikleri içeren kömür gazları için de geçerlidir. İlaveten, karışımında karbon dioksit bulunan kömür gazlarının yanması sonucunda, bu karbon dioksitin de yanma sonu ürünlerindeki karbon dioksite katkı sağlayacağını tahmin etmek zor değildir [48].

3. KÖMÜR GAZLARININ ELDE EDİLMESİ

15. yy.'dan itibaren kömürün kullanımındaki hızlı artışla birlikte [57], yanabilir bileşenli gaz yakıt üretmek için de kömür kullanılmaktadır [58]. Aslında, kömürden gaz yakıt üretimi, birçok araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin sürdürüldüğü kömür teknolojileri alanını da genişletmektedir. Farklı gazlaştırma teknolojileri ile kömürler gazlaştırılarak veya kömürden elde edilen diğer ürünlerin (kok vb.) elde edilmesi sırasında oluşan/oluşturulan yan ürünler ile yanabilir bileşenli gaz karışımları elde edilmektedir. Kömürün gazlaştırılması veya koklaştırılması (yan ürünler) neticesinde elde edilen kömür gazlarının düşük, orta veya yüksek ısıl değere sahip olmaları, kömürün nihai analizinin yanı sıra gazlaştırma ve koklaştırma/ilave proses teknolojilerine de önemli derecede bağlıdır [59]. Kömürden farklı yöntemler ile elde edilen tüm yanabilir gaz karışımları bu çalışma kapsamında kömür gazı olarak tanımlanmıştır. Tezin bu bölümünde ise, bu kömür gazlarının nasıl ve ne şekilde elde edildiğine dair bilgilere yer verilmiştir.

3.1. Gazlaştırma ile Kömür Gazı Elde Edilmesi

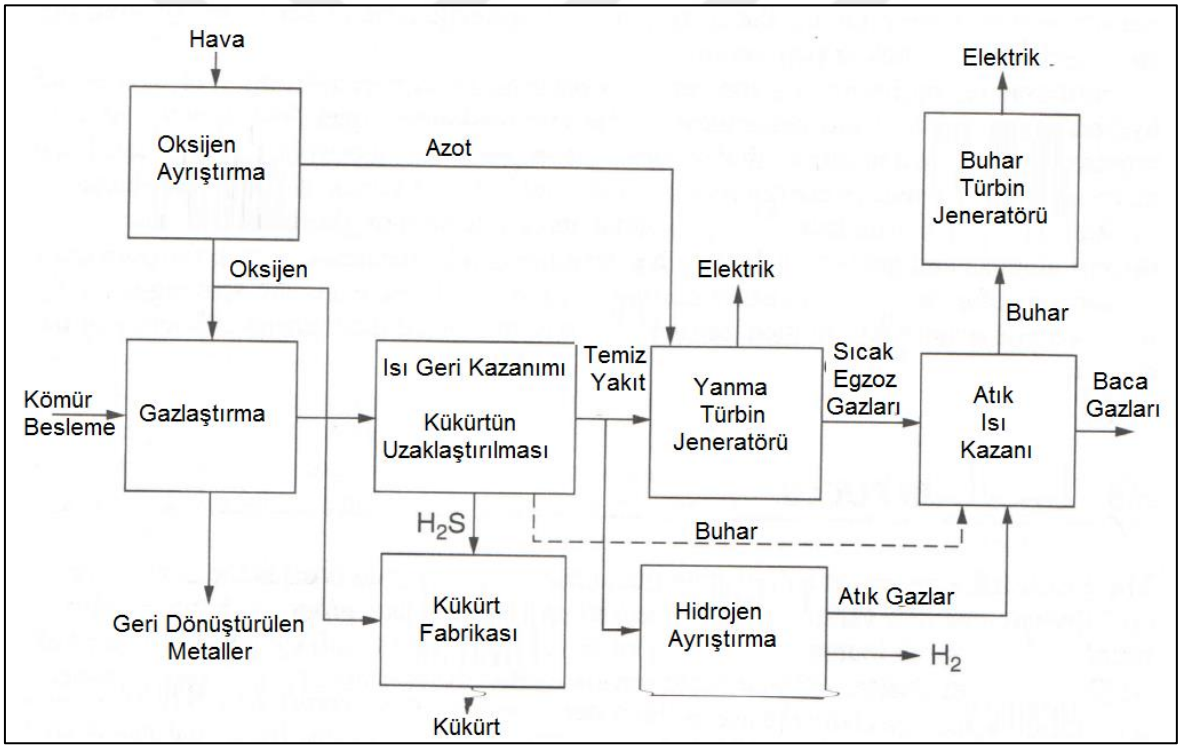
Kömürlerin gazlaştırılması, kömürde bulunan enerjiyi elektriğe, hidrojene veya diğer enerji kaynaklarına dönüştürmek için daha temiz ve çok yönlü bir yöntem olarak bilinmektedir. Kömürü, sentetik yakıta dönüştürmek yeni bir durum değildir. Aksine, bu teknolojinin tarihi II. Dünya Savaşı'na dayanmaktadır [59].

Kömür gazlaştırma santralleri, duman ve asit yağmurlarına neden olan kükürt ve azot gibi yan ürünlere sahip standart pülverize kömür yakan santrallerden daha temizdir. Bu nedenle, kömür gazlaştırılması teknolojileri, kömürün çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak için, pahalı olan ya da olmayan kömür kaynaklarının farklı bir kullanım şeklidir [59].

Kömür gazlaştırma teknolojilerine yönelik ortaya çıkan ilgi sayesinde elektrik üretim piyasasındaki iki değişkenin birbirine olan yakınlığı da giderek artmaktadır: a) gazlaştırma teknolojilerinin ilerlemesi ve b) gazlaştırma entegreli birleşik santrallerden (IGCC) ortaya çıkan oldukça düşük emisyonlar. Ayrıca, diğer önemli bir konuda bu teknolojilerin ekonomik olup olmadığıdır. Kömür temelli santrallerin en büyük rakibi olan doğalgaz

temelli güç santrallerine bağlı olarak fiyatlarda meydana gelen dalgalanmalar da bu ekonomik şartların değişiminde çok önemli rol oynamaktadırlar [59].

Gazlaştırma entegreli birleşik bir santralin temel proseslerini gösteren basit şematik bir plan Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Gazlaştırıcı, kömürü, doğalgazın yaklaşık yarısı kadarlık bir enerjiye sahip olan yakıta dönüştürmektedir. Ardından, standart temizleme işlemi ile gaz içerisindeki kükürt arındırılır. Kükürtten arındırılmış yakıt, bir gaz türbininin yanma odasında yakılır ve bir alternatör vasıtası ile elektriğe dönüştürülür. Üçüncü proseste ise, gazlaştırıcıdan ve türbinin egzozundan geri kazanılan ısı enerjisi ile, yeniden elektrik üretebilecek buhar çevriminde kullanılan buhar türbini için sudan buhara dönüştürme işlemi gerçekleştirilir [59].



Şekil 3.1. Gazlaştırma entegreli birleşik güç santrali (IGCC) [59]

Birleşik çevrim, yüksek giriş sıcaklıklı gaz türbini çevrimini düşük giriş sıcaklıklı buhar türbin çevrimine bağlayan bir çevrimdir. Daha geniş olan bu sıcaklık aralığı, yakıtın elektriğe dönüştürülmesi esnasındaki toplam verimin daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Konvansiyonel bir güç santralinin verimi % 36'lar civarında iken gazlaştırma entegreli bir güç santralinin verimi % 40'ın üzeri değerlere kadar çıkabilmektedir [59].

Gazlaştırma entegreli birleşik güç santrali tasarımı, kademeli imalat açısından uygundur ve doğası gereği modülerdir. Elektrik kullanım talebine bağlı olarak bu santrallerin kapasitesi kademeleri olarak yükseltilebilmektedir. Gazlaştırma entegreli birleşik güç santrallerinde kullanılan gaz türbinleri öncelikle doğalgaz veya sıvı bir yakıtla işletmeye alınır. Daha sonra yükleme arttırıldıkça, ve kullanım talebi yükseldikçe, bahsi geçen bu yakıtların kullanımı pahalı olmaya başlar ve kömür besleyiciden gazlaştırıcıya kömür beslenerek gazlaştırma gerçekleştirilmeye başlanır. Böylece, gazlaştırılmış kömür gazı da yakıt olarak sisteme entegre edilmiş olur [59].

3.1.1. Gazlaştırıcılar

Ticari olarak kullanımda olan dört farklı gazlaştırıcı tipleri şunlardır: karşıt akımlı sabit yatak, aynı yönde akımlı sabit yatak, akışkan yatak ve sürüklemeli akışlı. Tüm durumlarda, kömür gazı oluşum reaksiyonlarına su buharı da katıldığından tam yanma sağlamak için gerekli oksijen miktarı ve su yetersiz kalmaktadır. Buna karşın, bir santralin verimini yükseltmek için, ticari gazlaştırıcılar, gazlaştırma esnasında açığa çıkan ısıyı geri kazanabilecek şekilde olmalıdır. Buhar ve kömür gazı elde edilen su soğutmalı birçok gazlaştırıcı tasarımı bunu sağlayabilmektedir [59].

Karşıt akımlı sabit yataklı (yukarı çekişli) gazlaştırıcı; karşıt akım konfigürasyonunda "gazlaştırma sağlayan" (buhar, oksijen ve/veya hava) akışı boyunca karbon içeren yakıtların (örneğin, kömür ya da biyokütle) sabit olarak bulunduğu bir yataktan meydana gelmektedir. Kül, ya kuru bir şekilde ya da cüruf (ergimiş) haline buradan uzaklaştırılır. Külün ergime durumu olan bu gazlaştırıcılarda, kül ergime sıcaklığından daha yüksek sıcaklık seviyelerine ulaşmak için kullanılan katı yakıt bünyesinde daha yüksek buhar ve oksijen/karbon oranı bulunması gerekmektedir. Son dönemde yaşanan gelişmeler, bazı kısıtlamaları genişletmiş olmakla birlikte, gazlaştırıcılarda kullanılan yakıtlar genellikle, geçirgen bir yatak oluşturabilmek için, yüksek mekanik dayanıma sahip ve yapışkanlaşmayacak şekilde olmalıdır. Bu gazlaştırıcı tiplerinde üretilen kömür gazı seviyeleri nispeten daha azdır. Buna karşın, gaz çıkış sıcaklıkları nispeten az olduğundan ısıl verimleri de daha yüksek olmaktadır. Bununla beraber, bu durum, katran ve metan üretiminin tipik çalışma sıcaklıklarında önemli derecede olduğu anlamına gelmektedir. Yani, gazlaştırılmış kömür gazının, kullanılmadan veya reaktöre geri gönderilmeden önce oldukça iyi bir şekilde temizlenmesi gerekmektedir [59].

Bu tip gazlaştırıcıların en önemli avantajları, basitlikleri, kömür vb. yakıtları tüketebilmeleri ve düşük gaz çıkış sıcaklıkları ve yüksek gazlaştırma verimi sağlayan içten ısı değiştirme olanaklarına sahip olmalarıdır. Bu şekilde, ağırlıkça % 50'ye kadar yüksek oranda nem içeren yakıtlar bile bu gazlaştırıcılarda kullanılabilmektedir [59].

Aynı yönde akımlı sabit yataklı (aşağı çekişli) gazlaştırıcı, karşıt akımlı tip ile benzerdir. Ancak, karşıt akımlı tipten farklı olarak aynı yönde akımlı sabit yataklı gazlaştırıcıda gazlaştırma sağlayan akışkan ile yakıt aynı yönde akmaktadır (aşağı yönlü, bu durumda ismi de aşağı çekişli gazlaştırıcı). Yatağın üst kısmında ısı ihtiyacı bulunmaktadır. Bu ihtiyaç, yakıtın bünyesinde bulunan küçük parçacıkların yakılması ile sağlanabileceği gibi dışarda bulunan bir ısı kaynağı ile de sağlanabilir. Gazlaştırıcıda üretilen kömür gazı gazlaştırıcıdan yüksek bir sıcaklıkta ayrılır ve bu ısının büyük bir bölümü, karşıt akımlı gazlaştırıcı tipinde elde edilen enerji verimliliği seviyelerindeki seviyelere ulaşacak şekilde, yatağın üst bölümünden gazlaştırıcıya beslenen "gazlaştıran akışkan" a aktarılır. Bu konfigürasyonda tüm katran, kömürsünün sıcak bir yatağı boyunca geçmek zorunda olduğundan, katran seviyeleri, karşıt akımlı gazlaştırıcı tipindekinden daha düşük olmaktadır [59].

Aşağı çekişli gazlaştırıcıların en önemli eksiklikleri şöyle sıralanabilir: (a) gaz içerisinde fazla miktarda kül ve toz zerrecikleri, (b) işlenmemiş birçok yakıt tipi için işletme yetersizliği, özellikle, biyokütlenin peletlenmesi veya briketlenmesi için gerekli, (c) üretilen gaz, daha düşük gazlaştırma verimine neden olan yüksek sıcaklığa sahiptir, (d) biyokütlenin nem miktarı, yüksek sıcaklığı sürdürebilmek için % 25'ten az olmalı ve ayrıca mineral içeriği (kül) nin de az ve ergimeyecek şekilde olmasında fayda vardır, ve (e) kömür veya biyokütle, uniform parçacık boyutlarında beslenmelidir [59].

Akışkan yataklı gazlaştırıcılarda, yakıt, oksijenin (ya da havanın) ve buharın içerisinde akışkanlaştırılır. Kül, ya kuru olarak ya da akışkanlığı giderilip bir yere toplanarak gazlaştırıcıdan uzaklaştırılır. Kuru kül gazlaştırıcılarında sıcaklıklar nispeten daha azdır. Bu yüzden, yakıt oldukça reaktif olmalıdır. Bilhassa, düşük kalorili kömürler uygundur. Akışkan yataklı reaktörler, iyi ısı ve kütle transferi neticesinde oldukça iyi karışım olanağı sağlamaktadır. Gazlaştırma, verimli gerçekleşir. Genellikle, biyokütle ya da kömürün % 90'ı aşılır. Kül, gazla taşınır ve siklonlardaki gazdan ayrıştırılır [59].

Toplamalı gazlaştırıcılar, biraz daha yüksek sıcaklıklara sahiptirler ve yüksek kalorili kömürler için daha uygundurlar. Üretilen gaz verimliliği, sabit yataktakinden daha fazladır. Ancak, sürüklemeli akışlı ile kıyaslanacak olursa durum bu şekilde değildir. Bilakis, dönüşüm verimi daha azdır. Bu yüzden, dönüşümü arttırmak için, yeniden çevrime ya da katıların ardışık olarak yakılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Kül ergimesinin gazlaştırıcı duvarlarına aşırı derecede korozif etki yaratmasından dolayı, yakıtlar için en uygun ve yararlı gazlaştırıcı tipi akışkan yataklı gazlaştırıcılardır. Örneğin, biyokütle, yüksek oranda kül içeren bileşenler bulundurmaktadır [59].

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılarda, kuru bir pülverize katı, püskürtülmüş sıvı bir yakıt, ya da bir yakıt bulamacı, aynı yönde akımlı oksijenle (sık veya değil: hava) gazlaştırılır. Gazlaştırma reaksiyonları, oldukça ince parçacıkların olduğu yoğun bir toz bulutunun içerisinde meydana gelir. Kömür parçacıkları, birbirlerinden oldukça iyi şekilde ayrıldığından ve yüksek işletme şartları nedeniyle birçok kömür tipi, bu tip gazlaştırıcılar için daha uygundur. Ayrıca, daha yüksek sıcaklık ve basınç da daha verimli gaz eldesi anlamı gelmektedir. Buna karşın, elde edilen gazın, mevcut teknolojilerle temizlenmeden önce soğutulması gerektiğinden, ısıl verim bir miktar düşük olmaktadır. Yüksek sıcaklığın diğer bir anlamı da katran ve metanın, elde edilen gazın içerisinde olmamasıdır. Bununla beraber, diğer gazlaştırıcı tiplerine kıyasla bu gazlaştırıcıda gerçekleştirilen gazlaştırma işleminde kullanılan oksijen gereksinimi daha fazladır. Tüm sürüklemeli akışlı gazlaştırıcıların işletme şartları, kül ergime sıcaklığından daha yüksek olduğundan, külün büyük bir bölümü gazlaştırıcıdan ergimiş olarak uzaklaştırılır. Külün oldukça küçük bir bölümü, ya çok ince kuru uçucu kül olarak ya da siyaha boyanmış uçucu kül bulamacı olarak üretilir. Bazı yakıtlar, bilhassa belirli biyokütle tipleri, gazlaştırıcının dış duvarını koruma görevi üstlenen seramik iç duvarlar için korozif olan ergimiş kül oluştururlar. Ancak, bazı sürüklemeli yataklı gazlaştırıcı tipleri, seramik iç duvara sahip değildirler. Bu gazlaştırıcılar, kısmen katılaşmış ergimiş kül ile kaplı içten su – veya buhar – soğutmalı duvara sahiptirler [59].

Bu tip gazlaştırıcılarda, korozif ergimiş kül yönünde problem yaşanmamaktadır. Bazı yakıtlar, oldukça yüksek kül ergime sıcaklığına sahip kül bulundurmaktadırlar. Bu durumda, çoğunlukla, gazlaştırmadan önce yakıtla kireç taşı karıştırılmaktadır. Az miktarda kireç taşı ilavesi, kül ergime sıcaklığının düşmesi için yeterli olmaktadır. Yakıt parçacık boyutları, diğer gazlaştırıcı tiplerinde kullanılan boyutlardan daha da küçük

olmalıdır. Bu durum, diğer gazlaştırıcı tipleri için gereken enerjiden bir miktar daha fazla enerji gereksinimine ihtiyaç duyan, yakıtın pülverize hale dönüştürülmesi anlamına gelmektedir. Burada bahsedilen enerji gereksinimi, yakıtın pülverize hale getirilmesi için istenen enerji olmayıp, gazlaştırma işleminde kullanılan oksijenin elde edilmesi için gerekli olan enerji gereksinimidir [59].

3.1.2. Gazlaştırma ürünleri

Kömürlerin gazlaştırılması neticesinde elde edilen gaz yakıtlar, gazlaştırılan kömürün cinsine, bir önceki bölümde bahsedilen gazlaştırma prosesine ve gazlaştırma şartlarına bağlıdır. Özellikle, elde edilen kömür gazının kullanımından önce, su gaz dönüşüm reaksiyonu veya metanlaştırma prosesleri sırasında bazı parçacıklar ve kükürt bileşenleri gibi bazı kirleticiler kömür gazından ayrıştırılır [60, 61].

Düşük kalorili kömür gazları

Hava ile gerçekleştirilen oksitleme ile kömürlerin gazlaştırılması esnasında, oksijen havadan ayrılarak oksitleme yapılmaz. Bunun sonucunda da elde edilen kömür gaz beklenen şekilde daha düşük kaloriye sahip olur (5,6 – 11,2 MJ/m^3). Bu tip gazlaştırma işlemi, genellikle, kömürün bulunduğu yerde gerçekleştirilir. Çünkü, burada madencilik işlemi ekonomik değildir veya madenciliğin gerçekleştirilemediği bir ortam bulunmaktadır ve burada kömür madenciliğine gerek duyulmaz [59].

Yüksek sıcaklık şartlarında, düşük kalorili kömür gazı üretiminin gerçekleşmesi için birçok önemli kimyasal reaksiyona ve bazı yan reaksiyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Düşük kalorili kömür gazları, dört ana bileşen dışında bazı bileşenleri de bünyesinde barındırmaktadır. Beşinci bileşen olarak da metan gösterilebilir. Bu bileşenler, kullanılan kömürün cinsine, gazlaştırma şekline ve gazlaştırma şartlarına bağlı olarak farklılıklar gösterebilir [59].

Düşük kalorili kömür gazlarının bünyesinde % 33 ila % 50'den nispeten daha fazla aralığa kadar azot bulunmaktadır. Bu tip kömür gazlarında, yüksek oranda azot bulunduğu için bu kömür gazlarının kalorili daha düşük olmakta ve bu nedenle bu kömür gazları, düşük kalorili kömür gazı olarak bilinmektedir. Bu kömür gazlarında bulunan azot, ayrıca, gazı

kimyasal senteze olan uygunluğunu da sınırlamaktadır. Bu tip kömür gazlarında, azottan başka yanmayan bileşen olarak su buharı ve karbon dioksit de bulunmakta olup su buharı buharlaşma ile, karbon dioksit ise bazı farklı kimyasal proseslerle uzaklaştırılabilmektedir [59].

Bu kömür gazlarında yanabilir olarak bulunan iki önemli bileşen hidrojen ve karbon monoksittir. H_2/CO oranı, yaklaşık olarak 2:3'ten 3:2'ye kadar değişiklik göstermektedir. Ayrıca, kömür gazının bünyesinde olması muhtemel metan da yakıtın ısıl değerine belli bir derecede katkı sunabilir. Küçük bir bileşen olarak hidrojen sülfür de önemli bir belirleyicidir ve bu bileşen genellikle beslenen kömürün kükürt içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Gazda bulunan hidrojen sülfürün, bir veya daha fazla işlem ile yakıttan uzaklaştırılması gerekmektedir [62].

Orta kalorili kömür gazları

Orta kalorili kömür gazları nispeten orta dereceli ısıl değere sahiptir (11,2 – 20,5 MJ/m^3). Bu tip kömür gazlarının içerikleri düşük kalorili kömür gazlarının içerikleri ile benzer olup, yalnızca, düşük kalorili kömür gazlarında bulunan azot kadar yüksek oranda azot bulundurmamaktadırlar. Orta dereceli kömür gazlarında yanabilir olarak bulunan gazlar hidrojen ve karbon monoksittir [63]. Orta kalorili kömür gazlarının düşük kalorili kömür gazlarına göre daha yönlü oldukları bir gerçektir. Örneğin, orta kalorili kömür gazları, buhar kazanlarında buhar elde etmek için doğrudan kullanılabilir veya kombine bir çevrim santralinin gaz türbininde güç üretebilir ve yanma sonu ürünlerinin sıcaklığı da bir atık kazanında buhar elde etmeye yarayabilir. Bunlara ilaveten, orta dereceli kömür gazları, metanı sentezleme (metanlaştırma), daha fazla hidrokarbonu sentezleme (Fischer - Tropsch sentezi ile), metanolü ve bazı sentetik kimyasalları sentezleme gibi durumlardan da sorumludur [59].

Orta kalorili kömür gazı elde etmek için uygulanan reaksiyonlar, düşük kalorili elde etmek için uygulanması gereken reaksiyonlar ile aynı olup, aralarındaki temel fark olarak azotun yakıt bünyesine girmesinin engellenmesi (saf oksijenin kullanılması gibi) gösterilebilir. Orta kalorili kömür gazlarında, H_2/CO oranı yaklaşık olarak 2:3'ten 3:1'e kadar değişiklik göstermekte olup, ısıl değer, daha düşük karbon dioksit ve daha yüksek metan ve hidrojen oranlarıyla artış göstermektedir [59].

Yüksek kalorili gazlar

Yüksek kalorili gazlar genellikle saf metandır ve çoğu zaman sentetik doğal gaz ya da SNG (substitute natural gas) olarak bilinir [63]. Bir gaz karışımını yüksek kalorili gaz olarak nitelendirebilmek için bu gazın bünyesinden en az % 95 metan bulunmalıdır ve bu gazın ısıl değeri oldukça yüksektir (36,5 – 40,2 MJ/m^3). Yaygın olarak kabul edilen yüksek kalorili gazın oluşumu, hidrojen ve karbon dioksitin katalitik reaksiyonu olarak bilinir [59]:

$$3H + CO \longrightarrow CH_4 + H_2O \quad (3.1)$$

3.2. Koklaştırma ile Kok Fırını Gazı ve Yüksek Fırın Gazı Elde Edilmesi

Kömürlerin gazlaştırılması neticesinde kömür gazlarının nasıl elde edildiğinden bir önceki bölümde bahsedilmiştir. Bu bölümde ise, kömürlerin, karbon oranı oldukça yüksek olan kok üretimi esnasında elde edilen yan ürünlerin (kok fırını gazı ve yüksek fırın gazı) nasıl elde edildiğinden bahsedilmiştir.

3.2.1. Kok fırını gazı

Kok fırını gazı veya daha basit olduğu için "kok gazı" olarak bilinen gaz karışımı, kok fırını gazı olarak uçucu kömür maddelerinin üretildiği koklaştırma prosesinin yan ürünüdür. Kok, 1400 K ve üzeri sıcaklıklarda, belirli bir kalorideki kömürün veya farklı kömür karışımlarının koklaştırılması ile üretilen son derece ağır oldukça gözenekli karbon içerikli bir malzemedir [64]. Koklaştırılan kömürün karışımından elde edilen elde edilen kokun yaklaşık % 90'ı, bir yüksek fırında demir üretim prosesini sürdürmek için kullanılır [65]. Genellikle, 1,25 – 1,65 ton kömürden yaklaşık 1 ton kok elde edilirken bu esnada da yaklaşık 300 – 360 m^3'lük kok fırını gazı üretimi sağlanmış olur [64].

Kok fırını gazının özellikleri

Doğalgaz kullanımının yaygınlaşmasından önce, Sheffield ve Birmingham gibi endüstriyel şehirlerdeki kullanım enerji ihtiyacını karşılamak için kok fırını gazı kullanılmaktaydı. Ancak, yakın zamanda bu ihtiyacın neredeyse tamamına yakını doğalgazdan karşılanmaya

başlandı. Kok fırını gazı, yanabilir bileşenler olarak CO, H_2 ve CH_4'ten, yanabilir olmayan bileşenler olarak da CO_2 ve N_2'den oluşmaktadır [66]. Koklaştırma esnasında elde edilen kok fırını gazının içeriği, koklaştırma için kullanılan kömürün içeriğine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çizelge 3.1'de kok fırını gazının içeriği verilmiştir.

Çizelge 3.1. Koklaştırma esnasında elde edilen kok fırını gazının içeriği (% hacimce) [67, 68]

Kok Fırını Gazı Bileşenleri	*% Hacimce*
H_2	*55 – 60*
CH_4	*23 – 27*
CO	*5 – 8*
CO_2	*1 – 2*
N_2	*3 – 6*
C_2H_4	*1 – 1,5*
C_2H_6	*0,5 – 0,8*
C_3H_8	*≤ 0,07*
H_2S	*≤ 3,2E-5*

Kok fırını gazı, standart bir gaz yakıt olarak dikkate alınmamasına rağmen, kullanılan kömüre ve koklaştırma şekline bağlı olarak önemli bir enerji içeriği ve ısıl değere sahiptir. Hidrojen oranı fazla olan kok fırını gazının ısıl değeri (19,9 MJ/m^3), yüksek fırın gazının ısıl değerinden (3,9 MJ/m^3) yaklaşık 5 kat daha fazladır [64]. Çizelge 3.2'de doğalgazın ve diğer bazı kömür gazlarının yaklaşık ısıl değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.2. Bazı gaz yakıtların ısıl değerleri [64]

Yakıt Tipi	*Isıl Değeri*	
	(MJ/m^3)	*(MJ/kg)*
Doğalgaz	*40,6*	*56,6*
Kok Fırını Gazı	*19,9*	*41,6*
Su Gazı	*18,9*	*21,9*
Yüksek Fırın Gazı	*3,9*	*2,7*
Havagazı	*5,8*	*5,2*

Daha önceden de bahsedildiği gibi, koklaştırma prosesinin tipi, kok fırını gazının üretimini ve özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. 700 ºC gibi düşük bir sıcaklıkta gerçekleştirilen koklaştırma işlemi neticesinde yarıkok üretilir ve bunun bir sonucu olarak da daha az kok fırını gazı elde edilirken amonyak ve yüksek oranda katran ortaya çıkar. Bu işlem neticesinde açığa çıkan kok fırını gazı, daha düşük miktarda H_2 içerirken ısıl değer

olarak daha yüksek olmaktadır. Yüksek sıcaklık koklaştırmasında ise daha fazla miktarda kok fırını gazı, daha az katran ve daha fazla NH_3 elde edilir. Bu proses sonrası elde edilen kok fırını gazında ise daha yüksek miktarda H_2 bulunmakta olup, ısıl değer olarak daha düşük kalmaktadır [64].

3.2.2. Yüksek fırını gazı

Yüksek fırın gazı, demir cevherinin kok ile metalik demire indirgenmesi esnasında üretilen yüksek fırınların yan bir ürünüdür. Yanmayan bileşen olarak % 60 civarında azot bulundurmasından dolayı oldukça düşük bir ısıl değere sahiptir. İçeriğinde yanabilir bileşen olarak belli bir oranda (yaklaşık % 30'a kadar) karbon monoksit ve oldukça düşük bir oranda da (% 2 – 4) hidrojen bulundurmaktadır. Demir işlerinden yakıt olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak, gerekli yakma sistemi geliştirildikten sonra kazanlarda ya da santrallerde de kullanılabilir [69].

Yüksek fırın gazı genellikle, modern bir yüksek fırında, 100 – 150 ºC sıcaklıkta ve yüksek basınçta elde edilir. Bu basınç, herhangi bir yakıt tüketimi olmadan, dökme demirden 35 kWh/t'lık elektrik üretebilecek bir jeneratörü çalıştırma için kullanılır. Yüksek fırın gazlarının kendinden ateşleme sıcaklığı yaklaşık olarak 630 – 650 ºC aralığında olup daha normal sıcaklık ve basınçtaki hava-gaz karışımı için düşük patlama sınırı % 27 iken yüksek patlama sınırı % 75 dolaylarındadır. Bünyesinde yüksek oranda karbon monoksit bulundurması, bu gazı tehlike yapmaktadır [69].

4. YANMANIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELLEMESİ

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesi, çalışılmak istenen kontrol hacmi için temel korunum denklemlerinin çözülmesi ve ilgilenilen akış hacminin sayısal simülasyonunun gerçekleştirilmesi işlemlerini kapsamaktadır. Bu simülasyon için gerekli tüm faktörler (geometri, sınır şartları, akışkanın fiziksel özellikleri, türbülans vb.) HAD modellemesi için gereklidir. HAD modellemesi neticesinde ortaya çıkan sayısal tahminler, deneysel bir çalışmaya göre daha hızlı ve ekonomik olmakla beraber, elde edilen sonuçların yapılmış bazı deneysel sonuçlarla da uyum içerisinde olması beklenir [70].

Gaz yakıtların yakıldığı yakma sistemlerinde HAD modellemesi, yanma işleminin ve akış alanının (özellikle alev bölgesi) karmaşıklıkları nedeniyle, araştırmacılar ve tasarımcılar için oldukça yüksek bir şekilde ilgi odağı olmaya devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında da, Sheffield Üniversitesi'nde geliştirilen ve NO_X son işlemcisi ile de bütünleştirilmiş ANSYS Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanılarak yanmanın sayısal modellemesi gerçekleştirilmiş ve ilgili yakıtların yanma karakteristikleri elde edilmiştir [70].

Doğalgaz ya da kömür gazları için, türbülans ve yanma gibi diğer ilave eşitliklerle birlikte kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu eşitliklerini temel alan eşitlikler bu bölümde sunulmuştur. Çalışma kapsamında, metan ve tüm kömür gazları için standart k-Ɛ türbülans modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda, türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisinin dağılım oranı ($\mathcal{E}$) için eşitlikler çözülmüştür. Çalışmada kullanılan yanma modeli ise, ön-karışımsız yanma şartları için karışım yakıtlarda daha iyi sonuçlar veren the mixture fraction/PDF yanma modelidir.

4.1. Temel Denklemler

Bir akışkan parçacığı akışı için geliştirilen eşitlikler, fiziğin korunum kanunlarının matematiksel olarak ifade edilmesini temsil etmektedir. Kütlenin korunumunun en genel ifade şekli şöyledir [71]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + div(\rho u) = 0 \qquad (4.1)$$

Bu eşitlik, zamana bağlı sıkıştırılabilir bir akıştaki bir noktada, üç boyutlu olarak kütlenin korunumu ya da süreklilik denklemini temsil eder. Bu eşitlikteki ilk ifade, yoğunluğun zamana bağlı olarak değişimini ifade eder. Bu çalışmada yapılan modellemeler zamandan bağımsız olarak çözüldüğü için bu ifade sıfır olmaktadır. İkinci ifade ise, akışkan elemanının sınırları boyunca meydana gelen net kütle akışıdır ve konvektif terim olarak da bilinir [71].

Üç boyutlu akışlarda bir akışkan için x, y ve z yönlerindeki momentum eşitlikleri de şöyle verilebilir [71]:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \tag{4.2}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \tag{4.3}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \tag{4.4}$$

Enerjinin korunumu ile eşitlik ise, bu program kapsamında statik entalpinin korunumu yönünden çözülmektedir. Basınç ve dış kuvvetlerin neden olduğu türlerin difüzyonunun ihmal edildiği kabul edilecek olursa, enerji denklemi de şu şekilde ifade edilebilir [72]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \sum_{j'} h_{j'} J_{j'} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \tag{4.5}$$

Burada da T sıcaklığı, τ_{ij} vizkoz gerilme tensörünü, $J_{j'}$ her bir j' kimyasal türün akısını, k karışımın ısıl iletkenliğini ve S_h'da, kimyasal reaksiyonun, radyasyonun ve faz değişiminin neden olduğu ısı değişiminin entalpisi için kaynak terimini temsil etmektedir [72].

4.2. Kimyasal Türlerin Korunumu

İşlemi kolaylaştırmak için, yoğunluğu içeren tüm korelasyonlar, zaman ortalamalı eşitliğin dışında tutulacak olursa, her bir kimyasal tür j'nin kütle oranı m_j için eşitlik şöyle tanımlanır [72]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i m_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_{m_j}\frac{\partial m_j}{\partial x_i}\right) - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\overline{u'_i m'_j}\right) + R_j + S_j \tag{4.6}$$

Burada, R_j, oluşmanın ya da tükenmenin kütle oranını (gaz fazında), S_j, oluşmanın oranını ve Γ_{m_j} laminer değişim katsayısını temsil etmektedir [72].

4.3. Yakıcılarda Türbülanslı Akışın Modellenmesi

Türbülans, ifadesinden de anlaşılacağı üzere oldukça karmaşık bir tanımdır. Türbülanslı akışlarda birbirini izleyen birçok karmaşık olay meydana gelmektedir. Akışın davranışı gelişigüzel ve oldukça karmaşıktır. Türbülanslı akışlarda akışın özellikleri (hız vb.) sürekli değişiklik gösterir. Bu nedenden dolayı, türbülanslı akışlarda bir noktadaki hız, ortalama ve değişen bileşeninin toplamı olarak ($u_i = \bar{u}_i + u'_i$) dikkate alınmaktadır [73].

4.3.1. Standard k-Ɛ türbülans modeli

Standart k-ε türbülans modeli eddy-viskozite modeli olarak da bilinmektedir. Reynolds gerilmesinin, ana hız gradyanı ile orantılı olduğu varsayılır. Bu Boussinesq hipotezi olarak bilinir [73]. Gerilmeler;

$$-\rho\overline{u_i' u_j'} = \mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] - \rho\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{4.7}$$

Eşitlik Denklem 4.7' de μ_t türbülans viskozitesini, δ_{ij} kroneker delta tensörünü, u_i ve u_j ortalama hızları, u_i' ve u_j' değişen hızları ve denklemdeki k ifadesi de türbülans kinetik enerji $\left(\frac{1}{2}\sum_i \overline{u_i'^2}\right)$' yi temsil etmektedir [73].

Türbülans girdap vizkozitesi laminar akışta moleküler viskoziteden farklıdır. Fakat, moleküler viskozite ile aynı rolü oynar. Moleküler viskozite yerine efektif viskozite (μ_{eff}) kullanılır.

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \tag{4.8}$$

Türbülanslı viskozitesinin (μ_t), türbülans hızı ve uzunluk skalası ile orantılı olduğu varsayılır. Bu skalalar türbülans kinetik enerjisinden k ve yayılma oranı ε elde edilir. Türbülans vizkosite ifadesi aşağıdaki gibidir [73].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4.9}$$

C_μ, deneysel bir sabittir. k-ε türbülans modelinde türbülans vizkozitesinin (μ_t) hesaplanması için k ve ε değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerler ise aşağıda verilen denklemlerden elde edilmektedir [73]:

Türbülans kinetik enerjisi k' nın değeri;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial_k}{\partial x_i}\right) + G_k - \rho\varepsilon \tag{4.10}$$

Türbülans kinetik enerjisinin dağılım oranı ε' nun değeri;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial_\varepsilon}{\partial x_i}\right) + C_{1\varepsilon}G_k\frac{\varepsilon}{k} - C_{1\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4.11}$$

Burada G_k ortalama hız gradyentinden dolayı türbülans kinetik enerjisi üretimi, $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ deneysel sabitleri, σ_k ve σ_ε Prandtl sayılarını göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisi üretim oranı G_k aşağıdaki ifade ile elde edilmektedir [73]:

$$G_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{4.12}$$

Çizelge 4.1. k-ε modelde kullanılan sabitler [73]

SABİT	c_μ	σ_k	σ_ε	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$
DEĞER	0,09	1,0	1,3	1,44	1,92

4.3.2. Yanmanın modellenmesi

Türbülanslı reaksiyon akışlarının modellemesi hem türbülans ve kimya arasındaki etkileşimlerin hem de bir çok reaksiyon ve kinetik modellerin tanımlanmasını gerekli hale getirmektedir. Akış denklemlerine ek olarak tüm kimyasal tür için kütle kesrinin taşınım denklemlerinin çözümlenmesi gerekmektedir. Tüm kimyasal türlerin taşınım denklemlerinde bir kimyasal türün oluşumu ya da tüketilmesinin hacimsel oranı kaynak terimi (Sj) olarak bulunmaktadır. Yakıt, oksitleyici ve inert türlerin hepsinin kütle ve hacim kesirlerinin toplamı 1'e eşittir. Yanma işlemi boyunca kimyasal enerji ısı olarak açığa çıkmaktadır. Bu işlemdeki entalpi, taşınım denkleminin çözümü sonucunda elde edilir [73].

Yanmanın gerçekleştiği akış hacmi sıcaklık ve yoğunluk değişimlerinden etkilenmektedir. Bundan dolayı kimyasal tür ve entalpi denklemleri çözülmelidir. Sonuçta, oluşan denklemler oldukça büyüktür [73].

Bu çalışmada kullanılan kömür gazları genel olarak beş farklı gazı bünyelerinde bulundurmalarından dolayı yanma modeli Mixture Fraction/PDF yanma modeli seçilmiştir. Bu model özellikle karışım yakıtlar için daha iyi sonuçlar vermektedir.

<u>The Mixture Fraction/PDF yanma modeli</u>

Çalışmada kullanılan The Mixture Fraction/PDF yanma modeli skaler korunumlu tek bir karışım için taşıyıcı eşitliklerin çözümünden meydana gelir [72]. Bu yanma modelinde ayrı ayrı türler için taşıyıcı eşitlikler çözülmez. Onun yerine, ilgili tür için tek tek bileşim konsantrasyonu, karışım oran dağılımı tahmin edilen formda türetilmiştir. Kimya ve türbülansın etkileşimi, imkan dahilindeki yoğunluk fonksiyonunun yardımı ile açıklanabilir [72].

PDF model yaklaşımı türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için özel olarak geliştirilmiştir. Yakıt/Oksitleyici bir sistem için, karışım oranı f, yerel yakıt kütlesel oranı bakımından şöyle yazılabilir [72]:

$$f = \frac{m_F}{m_F + m_O} \tag{4.13}$$

Burada m_F ve m_O, yakıt ve havanın kütle oranlarını göstermektedir. Karışım oranı f, türbülanslı akış alanının zaman ortalamalı değeri için korunum denklemlerinin çözüldüğü akış alanındaki her noktada korunan bir nicelik değeridir [72].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i}\right) + S_m \tag{4.14}$$

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

Anlamlı karışım oranı için çözüme ek olarak, bir korunum denklemi karışım oranı değişimi için çözülür. $\overline{f'}^2$ türbülans-kimya etkileşimini tanımlayan kapama modelinde kullanılır [72].

$$\frac{\partial(\rho\overline{f'}^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \overline{f'}^2)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial \overline{f'}^2}{\partial x_i}\right) + C_g\mu_t\left(\frac{\partial \overline{f'}^2}{\partial x_i}\right)^2 - C_d\rho\frac{\varepsilon}{k}\overline{f'}^2 \tag{4.15}$$

Çizelge 4.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler [72]

SABİT	σ_t	C_g	C_d
DEĞER	0,7	2,86	2,0

Sistem kimyasını tanımlamak için, modelde iki seçenekli varsayım yapılır; alev tabakası (karışım yakılır (mixed is burned)) yaklaşımı ve denge varsayımı. Alev tabakası ya da ‘’karışım yakılır’’ benzerliği, kimyasal etkileşimin sonsuz hızda ve tersinmez olduğunu varsayar. Bununla beraber yakıt ve oksitleyici türleri boşlukta asla birlikte görünmezler ve tek aşamada yanma sonu ürünlerine dönüşürler. Bu basit sistem, türlerin kütle ve karışım

oranları arasında düz çizgi ilişkisi sağlar. Bu benzerliğin hesaplanması kolaydır ve reaksiyon ve reaksiyon oranına ihtiyaç duyulmaksızın hızlıdır. Fakat ‘’karışım yakılır’’ modeli, tek aşama reaksiyonlarının tahmininde yetersiz olup ara türlerin tahminini gerçekleştirememektedir. Sonuç olarak, denge varsayımı, sistemdeki ara türlerin hesaplamasını yapmaktadır. Bu varsayım, moleküler seviyede her zaman var olan kimyasal denge için yeterli kimyasal hızı işaret etmektedir [72]. Karışım oranındaki (*f*) türlerin mol oranları, Gibbs free enerji [73]’ nin azaltılması temelli bir algoritma ile hesaplanır. Bu model, detaylı bir kimyasal kinetik oran verisini gerektirmez. Kimyasal türler için özellik verisi, kodlarla belirlenmiş kimyasal bir veritabanından tanımlanır [72].

Türbülans-Kimyasal etkileşimi

Türbülans ve kimyasalın etkileşimi, olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF)’ nun uygulaması ile modellenir. PDF, p(*f*), dalgalı değişken *f* değerinin $f + \Delta f$ arasında bir değer almasının zaman oranını tanımlar [72].

$$p(f)\Delta f = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \tag{4.16}$$

τ_i burada f’ nin Δf aralığında harcadığı zamanın oranıdır [72].

Radyasyon modeli

Radyasyonla gerçekleşen ısı transferi yüksek sıcaklıklarda olmaktadır. Yanma odalarının gaz alev sıcaklıkları, stokiyometrik yanma koşullarında genellikle 1000-1600 °C’ den yüksektir. Bundan dolayı yanma odalarında ısı transferi önemlidir ve yanma odalarındaki sıcaklık dağılımlarının daha iyi tahmin edilebilmesi adına, çözümlemelerde radyasyon modeli kullanılmalıdır [72].

Işınımla ısı transferi aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$Q_{rad} = \sigma \, (T_{max}^4 - T_{min}^4) \tag{4.17}$$

Burada taşınım ya da iletim ısı transfer miktarları, radyasyonla ısı transfer modeli simülasyonu içinde yer almalıdır.

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

$$\frac{dI}{dx} = (\alpha_a+\alpha_s)I + \frac{\alpha_a \delta T^4}{\pi} \quad (4.18)$$

α_a ve α_s sırasıyla emme ve saçılma katsayıları, I, toplam yarı küresel şiddet, T yerel sıcaklık (K) ve σ Stefan-Boltzman sabitidir (5,672x10^{-8} W/m^2K^4). Bu modelde, eşitlik 4.18, bir yüzeyde her ayrık kontrol hacminde tek bir noktadan çıkan ışınların serileri boyunca entegre edilir. Bu ışınlar, bu nokta civarında yarı küresel katı açı kaplarlar [51]. Entegre edilmiş ışıma yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$I(x) = \frac{\sigma T^4}{\pi}\left(\frac{\alpha_a}{\alpha_a+\alpha_s}\right)(1 - \exp[-(\alpha_a+\alpha_s)x]) + I_0 \exp[-(\alpha_a+\alpha_s)x] \quad (4.19)$$

I_0 devam eden dx mesafesinin başındaki ışıma yoğunluğudur. Bu yeni durumda entalpi kaynağı, ‘’ışıma izleme’’ tekniğinin kullanıldığı akışkan kontrol hacmi boyunca takip edilen her ışıma mesafesi yolu boyunca, yoğunluktaki değişimin toplamı olarak hesaplanır [52].

Fluent radyasyon modelinde radyasyon, modeldeki tüm yüzeylerin radyasyonda dalga boyuna bağlı olmadığı anlamına gelen gri radyasyon olarak kabul edilir. Yani, yukarıdaki eşitlikten tahmin edilen radyasyon yoğunluğu, tüm dalga boylarında entegre edilmiş bir yoğunluğa eşittir. Sonuç olarak, Fluent radyasyon modeli gri-yayılmalı bir radyasyon modelidir [73].

Karbondioksit ve su buharı gibi, yanma sistemlerindeki gazların çoğu ağır emici ve yayıcı olmalarına rağmen, radyasyonu belirgin bir şekilde saçamazlar. Dağıtma katsayısı bir ihmal etkisine sahip olmak için bulunur. Değişken bir emme katsayısı, alevdeki emisyona ve emmeye katkı sağlayan karbondioksit ve su buharıyla beraber yanma sisteminde radyasyon emişinin bileşim bağımlığının öneminden dolayı olanak sağlar. Radyasyon özelliklerinin bir program vasıtasıyla hesaplanabilmesine imkan sağlar. Duvar yayıcılığı

0,6’ ya ayarlanır (gaz yakıt yanması için bilinen değer). Akış giriş ve çıkışındaki yayıcılık katsayısı 1,0 olarak alınır (siyah cisim emmesi) [72].

4.4. Sınır Şartları

Sayısal modellemeler gerçekleştirilmeden önce, modellemenin doğru bir şekilde yapılabilmesi için bazı sınır şartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bölümde, çalışmada kullanılan sınır şartlarına ilişkin detaylar sunulmuştur.

Sayısal modellemelerde yakıt ve hava giriş hızları, gerekli yakıt ve hava hacimsel debilerinden yola çıkılarak belirlenmiştir. Yakıt ve hava giriş sıcaklıkları, deneysel çalışmalarda kullanılan ortam sıcaklığı (20 ºC), basınçları, deneysel çalışmalarda kullanılan yanma odası giriş basınçları (21 mbar) olarak seçilmiştir. Yanma odası duvarları ise, malzeme olarak, deneysel çalışmada kullanılan çelik olacak şekilde seçilmiş olup, yanma odasının iç kısmından yanma odasının iç cidar yüzeyine ışınımla ve taşınımla ısı transferi, yanma odası cidar kalınlığında iletimle ısı transferi ve yanma odasının dış cidar yüzeyinden ortama taşınımla ısı transferi olacak şekilde tanımlanmıştır. Yanma odasının bulunduğu ortam sıcaklığı da deneylerin yapıldığı laboratuvar sıcaklığı olarak (20 ºC) seçilmiştir. Ayrıca, yanma odasının bulunduğu ortamdaki havanın ısı taşınım katsayısı da 20 W/m^{2}K olarak girilmiştir.

4.5. Fiziksel Özellikler

Bir akış problemini çözmek için akışkanın fiziksel özelliklerini ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen sayısal simülasyonlarda kullanılan Ansys Fluent programı, akışkanın fiziksel özelliklerini sabit sıcaklığın ya da oluşturulan bir gaz karışımı için kompozisyonun bir fonksiyonu olarak tanımlamaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan kömür gazlarının hepsi, 5 farklı gaz karışımından oluştuğu için, bu gaz karışımının bazı fiziksel özellikleri tespit edilmelidir. Gaz karışımlarının yoğunlukları, eşitlik (4.20)’de verilen ideal gaz kanunu kullanılarak belirlenmiştir.

$$\rho = \frac{P_{op}+P}{RT\sum_{i'}\frac{m_{i'}}{M_{i'}}} \tag{4.20}$$

Bahsi geçen kömür gazlarının özgül ısı değerleri eşitlik (4.21), ısıl iletkenlikleri eşitlik (4.22) ve vizkoziteleri de eşitlik (4.23) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$c_P = \sum_{i'} m_{i'} c_{P,i'} \tag{4.21}$$

$$k = \sum_{i'} \frac{X_{i'} k_{i'}}{\sum_{j} X_{j'} \emptyset_{i',j'}} \tag{4.22}$$

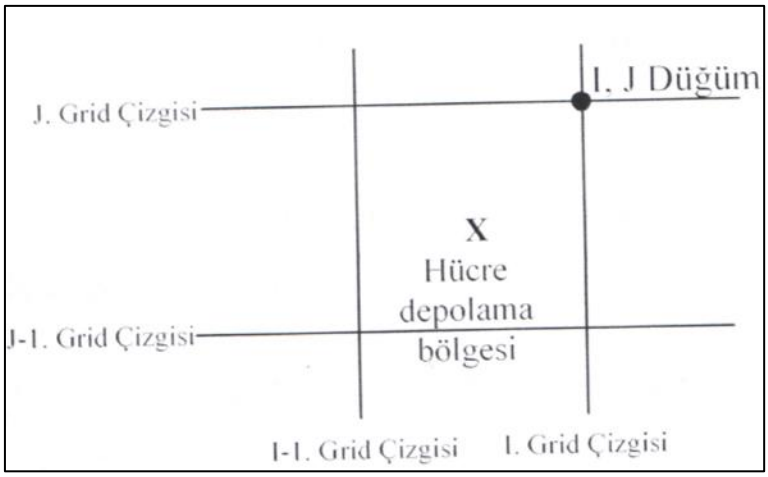
$$\mu = \sum_{i'} \frac{X_{i'} \mu_{i'}}{\sum_{j} X_{j'} \emptyset_{i',j'}} \tag{4.23}$$

Yukarıda verilen eşitliklerde bulunan P_{op} işletme basıncını, R, üniversal gaz sabitini, $M_{i'}$, i' kimyasal türünün molekül ağırlığını, $X_{i'}$, i' kimyasal türünün mol kesrini göstermektedir. Ayrıca, $\emptyset_{i',j'}$ değeri de eşitlik (4.24)'te verilmiştir.

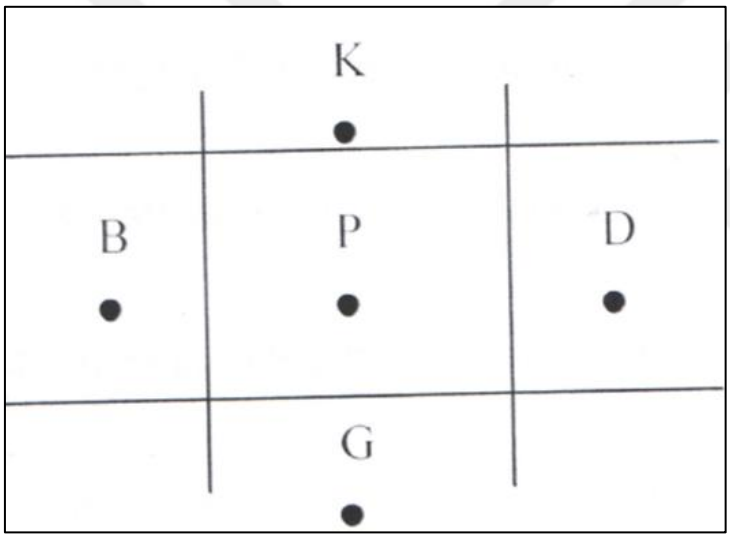
$$\emptyset_{i',j'} = \frac{\left[1+\left\{\frac{\mu_{i'}}{\mu_{j'}}\right\}\left\{\frac{M_{i'}}{M_{j'}}\right\}^{1/4}\right]^2}{\left[8\left(1+\frac{M_{i'}}{M_{j'}}\right)\right]^{1/2}} \tag{4.24}$$

4.6. Çözüm Metodu

Bu çalışma kapsamında kullanılan Ansys Fluent programı ile kömür gazlarının yanma modellemesinde, kütle, momentum, enerji, kimyasal tür ve türbülans denklemlerini içeren korunum denklemleri, kontrol hacim metodu kullanılarak çözülmüştür. Bu yöntemde, öncelikle, modellemenin yapıldığı akış hacmi, genel bir hesaplama ağı kullanılarak ayrıklaştırılmış kontrol hacimlerine bölünmektedir. Daha sonra, bahsi geçen bu korunum denklemleri, ayrıklaştırılmış bilinmeyenler (hızlar, basınç ve diğer skaler büyüklükler vb.) için cebirsel denklemler oluşturularak her bir denklem kontrol hacimleri üzerinde bütünleştirilir. Sonuç olarak, ayrıklaştırılmış denklemler çözülür. Şekil 4.1'de şaşırtmasız grid depolama düzeni kullanılarak ayrık kontrol hacimlerinin tanımlanması ve Şekil 4.2'de ise bir P düğümü etrafında hesaplama hücresi gösterilmiştir. Burada, aynı kontrol hacmi, tüm korunum denklemlerinin bütünleştirilmesi için kullanılmaktadır. Tüm değişkenler (hız bileşenleri, basınç vb.) ve bütün skaler değerler, kontrol hacminin hücre merkezinde depolanır.



Şekil 4.1. Kontrol hacmi depolama düzeni



Şekil 4.2. P düğümü etrafında hesaplama hücresinin gösterimi

4.6.1. Çözüm algoritması

Korunum denklemleri hesaplama hücreleri üzerinde integre edilerek sonlu farklar yaklaşımlarına indirgenir. Kütle, momentum, enerji ve kimyasal türler için korunum denklemlerinin genel formunun (eşitlik (4.25)) integrasyonundan sonra oluşan cebirsel denklemler (eşitlik (4.26)) aşağıdaki genel formda yazılabilir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \emptyset) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \emptyset) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x_i}\right] + S_\emptyset \tag{4.25}$$

$$\emptyset P \sum_i (A_i - S_P) = \sum_i (A_i \emptyset_i) + S_c \tag{4.26}$$

Burada toplam, komşu sonlu fark hücrelerindedir. A, konvektif ve difüzyon akılarından gelen katkıları içeren katsayılardır. S_c ve $S_\emptyset$, lineerleştirilmiş kaynak teriminin elemanlarıdır. Akış değişkenlerinin türevlerini hesaplamak ve grid noktaları arasına enterpolasyon yapmak için bir güç kanunu fark yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, aşağıda verilen adımları elde ederek doğru çözümlere ulaşmak için yarı kapalı iteratif yöntem (semi implicit iterative scheme) kullanılmıştır [74].

1. x, y ve z yönlerindeki tüm mesafelerde momentum denklemleri hız alanını güncellemek için tahmin edilen basınçlar ile çözülmüştür.

2. Basınç düzeltmeleri için basınç korelasyon denklemi çözülmüştür. Basınç alanı ve hız alanı daha sonra güncellenmiştir.

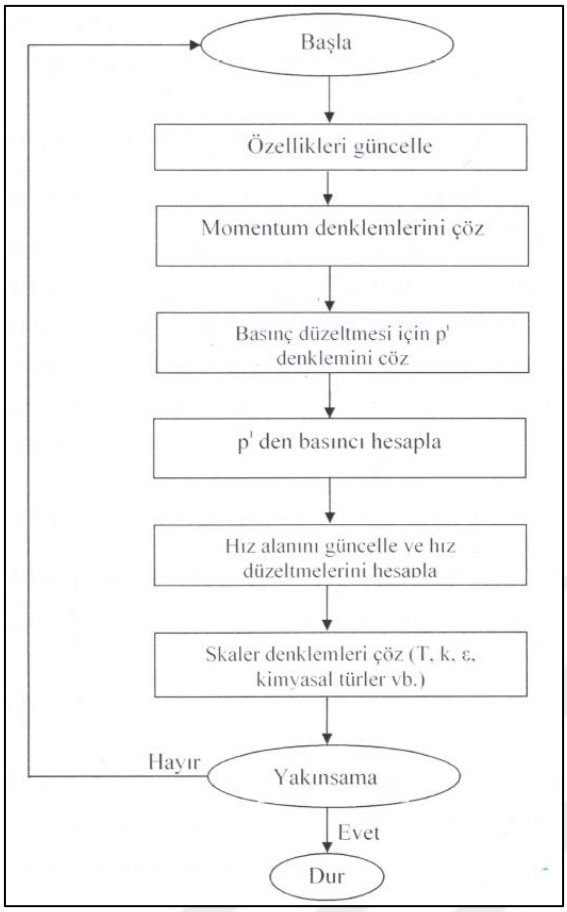
3. Hız alanını güncellemek için k ve Ɛ denklemleri çözülmüştür. Ardından, kalan denklemler (entalpi, kimyasal tür korunumu, ilave türbülans denklemleri vb.) diğer değişkenlerin güncellenmiş değerlerini öncelikli kullanarak çözülmüştür.

4. Hesaplamayı tamamlamak için akışkan özellikleri güncellenmiştir.

5. İyi yakınsayan çözümlere ulaşmak için problemin yakınsaması kontrol edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen iteratif çözüm adımları, bir problemin yakınsaması sağlanana kadar devam ettirilir. Bu işleme ait akış diyagramı da Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı, hesaplama alanında her hücre için artıkları hesaplamakta, her bir denklem için bir artık rapor ederek bunları çözmektedir. Her akış değişkeni için bu artıklar her iterasyonda kullanıcıya çözümdeki hata derecesinin bir ölçüsünü vermektedir. İyi yakınsayan çözüm, normalleştirilmiş artıkların $1x10^{-3}$ mertebelerinde olduğu bir çözüm olarak tanımlanmaktadır. Ancak, entalpi ve kimyasal türler için bu değer $1x10^{-6}$'dır [70].

Bu çalışmada yapılan sayısal modellemelerde, modellemeler 3-D olmasına rağmen iyi yakınsayan çözümler elde edilmiştir. Yanma modellemelerinde, özellikle türbülanslı yanmada iyi yakınsayan çözümlere ulaşmak oldukça zordur. Ancak, bu çalışmada elde edilen sonuçlar için yakınsama kriteri olarak, enerji ve radyasyon için $1x10^{-6}$ ve diğer değişkenler içinse $1x10^{-4}$ değerleri kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Ansys Fluent programı için çözüm yöntemi akış şeması

4.6.2. Artıkların hesaplanması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesinde iyi yakınsayan çözümlerin elde edilmesi oldukça önemlidir. Çalışmanın sayısal modelleme bölümünde kullanılan Ansys Fluent programı, hesaplama alanındaki bütün hücrelerde, denklemlerdeki dengesizliğin toplamı yoluyla her bir korunum denklemi için artıkları hesaplamaktadır. Daha sonra program her bir iterasyondaki her bir denklem için artıkların raporunu vermektedir. Bu işlemin kullanıcı tarafından ekrandan görüntülenmesine de müsaade etmektedir. Bu artıklar, akış alanında her bir denklemin uygun uygun çözümler sağlanma derecesini göstermektedir. Örneğin, iki boyutlu bir çözüm durumu için genel değişken ($\emptyset_P$) ayrıklaştırmadan sonra aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$A_P\emptyset_P = A_E\emptyset_E + A_W\emptyset_W + A_N\emptyset_N + A_S\emptyset_S + S_C \quad (4.27)$$

Burada Ø miktarı herhangi bir bağımlı değişken (hız, entalpi vb.) olabilir. S_C denklemde herhangi bir terimi dahil eden ve konvektif/difüzyon biçimde olmayan doğrusallaştırılmış kaynak teriminin elemanını göstermektedir. Eşitlik (4.27)'de A terimleri bir P noktası etrafında kontrol hacminde konvektif ve difüzyonu birleştiren sonlu fark katsayısıdır. Bir P düğümü çevresinde komşu düğümler ile birlikte bir hesaplama hücresi Şekil 4.2'de gösterilmiştir. A terimleri arasındaki ilişki eşitlik (4.28) ile verilmiştir.

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S - S_P \tag{4.28}$$

Burada, S_P, eşitlik (4.26)'daki S_C gibi doğrusallaştırılmış kaynak teriminin bir elemanıdır. Artıklar, program tarafından aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$R = \sum_{düğümler} |[A_E Ø_E + A_W Ø_W + A_N Ø_N + A_S Ø_S + S_C - A_P Ø_P]| \tag{4.29}$$

Yukarıdaki denklemde R, hesaplama noktalarının tümündeki toplamdır. R, doğrusallaştırılmamış artıklardır. Program tarafından rapor edilen doğrusallaştırılmış artıklar $(\bar{R})$ aşağıdaki denklemden hesaplanmaktadır.

$$\bar{R} = \frac{\sum_{düğümler} |[A_E Ø_E + A_W Ø_W + A_N Ø_N + A_S Ø_S + S_C - A_P Ø_P]|}{\sum_{düğümler} |(A_P Ø_P)|} \tag{4.30}$$

Eşitlik (4.30)'dan hesaplanan doğrusallaştırılmış artıklar, basınç dışında bütün değişkenler içindir. Basınç için artık, süreklilik denkleminde (basınç korelasyonu) aşağıda verildiği üzere dengesizliktir.

$$R = \sum_{düğümler} |(C_W - C_E + C_S - C_N)| \tag{4.31}$$

Burada C_W, C_E, C_S ve C_N, P noktası çevresinde kontrol hacminin her bir yüzeyi boyunca kütle yayılımıdır. Basınç artıklarının doğrusallaştırılması, ikinci iterasyonda artık (ya da süreklilik dengesizliği) yoluyla ayrılma ile eşitlik (4.32)'den elde edilmektedir.

$$\bar{R} = \frac{R_{N.\ iterasyon}}{R_{2.\ iterasyon}} \tag{4.32}$$

4.6.3. Rahatlatma faktörleri

Lineer olmayan denklemlerin çözümünden dolayı her zaman kolaylıkla yakınsayan çözümlere ulaşmak mümkün olmayabilir. Yetersiz rahatlatma faktörleri, uygun olmayan sınır şartlarının seçimi gibi nedenlerden dolayı problemin yakınsayamaması meydana gelebilir. Her iterasyon süresince elde edilen her bir değişkendeki değişimin azaltılması ile yakınsayan çözümler elde edilebilir ve yakınsamayan çözümlerin önüne geçilebilir. P düğümündeki Ø değişkeninin eski ($Ø_{P,eski}$) ve yeni ($Ø_{P,yeni}$) değerleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir [74]:

$$Ø_P = Ø_{P,eski} + \alpha \Delta Ø_P \tag{4.33}$$

Eşitlik (4.33)'te α rahatlatma faktörü, $\Delta Ø_P$, $Ø_P$'de hesaplanan değişimi göstermektedir. Rahatlatma faktörünün uygun değerinin bulunması genellikle tecrübe ile açıklanabilir. Ayrıca, akış yapısı, kullanılan hesaplama gridi vb. çok sayıda parametreye bağlıdır. Her bir değişken için α'nın değeri her problem için değişmektedir.

5. DENEY SİSTEMİ VE EKİPMANLARI

Bu tez çalışmasının deneysel kısmının gerçekleştirilmesinde kullanılan deney düzeneği ve ekipmanlarına ilişkin detaylar bu bölümde sunulmuştur. Kurulan deney düzeneği ve kullanılan yakıcıların detayları verilmeden önce, sistemde kullanılan kömür gazlarının bazı özellikleri sunulmalıdır. Çünkü, bu kömür gazlarını yakabilmek için tasarlanan yakıcılar, bu kömür gazlarının temel özellikleri dikkate alınarak tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Çalışmada kullanılan metan (doğalgaz) ve kömür gazlarının içeriğine ilişkin bazı temel özellikleri gösteren bilgiler Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Ayrıca, bu yakıtların içeriklerini gösteren sertifikalar da Ek-1'de sunulmuştur.

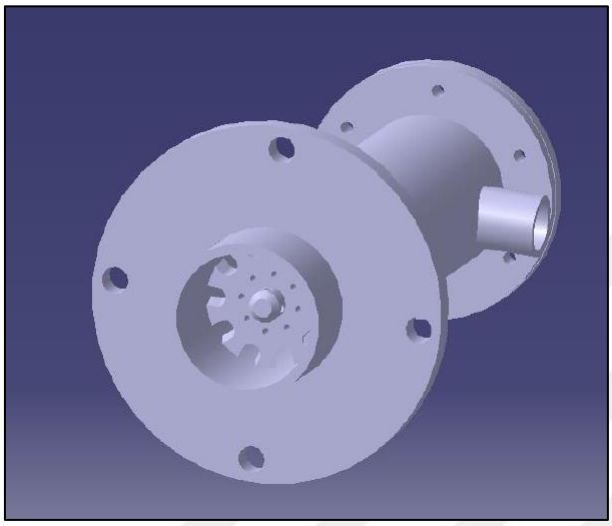
Çizelge 5.1. Metan, hidrojen ve kömür gazlarının bazı fiziksel özellikleri

	% H_2	% CH_4	% CO	% CO_2	% N_2	LHV ($kcal/m^3$)	$Yoğunluk$ (kg/m^3)
Metan	-	*100*	-	-	-	*8040*	*0,67*
Kok Fırını Gazı	*55*	*27*	*6*	*2*	*10*	*3678*	*0,45*
Şehir Gazı, I	*51*	*21*	*18*	*4*	*6*	*3434*	*0,54*
Şehir Gazı, II	*44*	*24*	*12*	*4*	*16*	*3335*	*0,60*
Su Gazı	*50*	*0,5*	*40*	*5*	*4,5*	*2385*	*0,66*
Jeneratör Gazı	*12*	*0,5*	*28*	*5*	*54,5*	*1124*	*1,07*
Yüksek Fırın Gazı	*2*	-	*30*	*8*	*60*	*900*	*1,20*
Hidrojen	*100*	-	-	-	-	*2422*	*0,08*

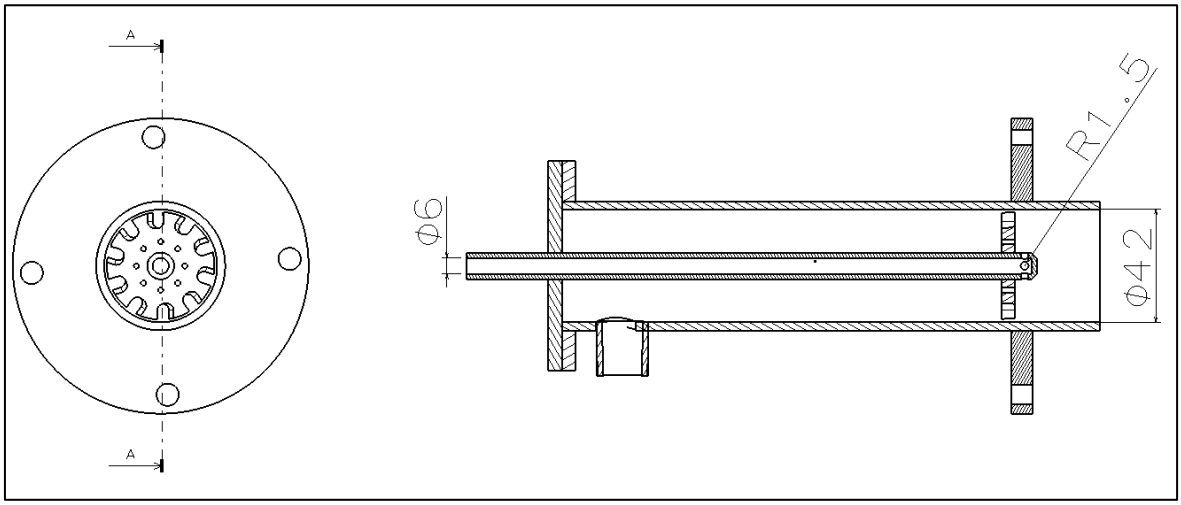
Çizelge 5.1'deki sıralama, görüldüğü gibi ısıl değer büyüklüklerine göre yapılmıştır (hidrojen hariç). Bunun nedeni, yeni geliştirilen yakma sisteminde kullanılan yakıcılar için yapılan sınıflandırmanın daha doğru anlaşılmasını sağlamaktır. Bilindiği gibi, yakıcı tasarımı yapılırken, dikkat edilmesi gereken önemli parametreler, kullanılacak olan yakıtın ısıl değeri ve yoğunluğudur. Ayrıca, bu tasarım yapılırken, çalışılması düşünülen yanma şartları da (ısıl güç ve hava fazlalığı gibi) doğru değerlendirilmelidir. Bu çalışmada geliştirilen yakma sistemi, en yüksek 15 kW ısıl güce kadar olacak şekilde geliştirilmiş olup, çalışma, daha düşük ısıl güçlerde gerçekleştirilmiştir (10 kW). Metan, kok fırını gazı, şehir gazı I ve II ve su gazının yoğunlukları birbirine yakın değerler olmasına rağmen, metan yakıtının ısıl değeri, kok fırını gazı, şehir gazları ve su gazının ısıl değerlerinden yaklaşık olarak 2-3 kat daha fazladır. Bundan dolayı, geliştirilen yakıcılarda metan için

ayrı, kok fırını gazı, şehir gazları ve su gazı (hidrojence zengin olan kömür gazları) ve jeneratör gazı yüksek fırın gazı için (düşük kalorili kömür gazları) ayrı türbülatör ölçüleri bulunmaktadır.

Metan alevi için tasarlanan yakıcıya ait teknik resimler ve imalat sonrası çekilen fotoğraf Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Resim 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Metan yakıcısının katı model görünümü



Şekil 5.2. Metan yakıcısının teknik resmi



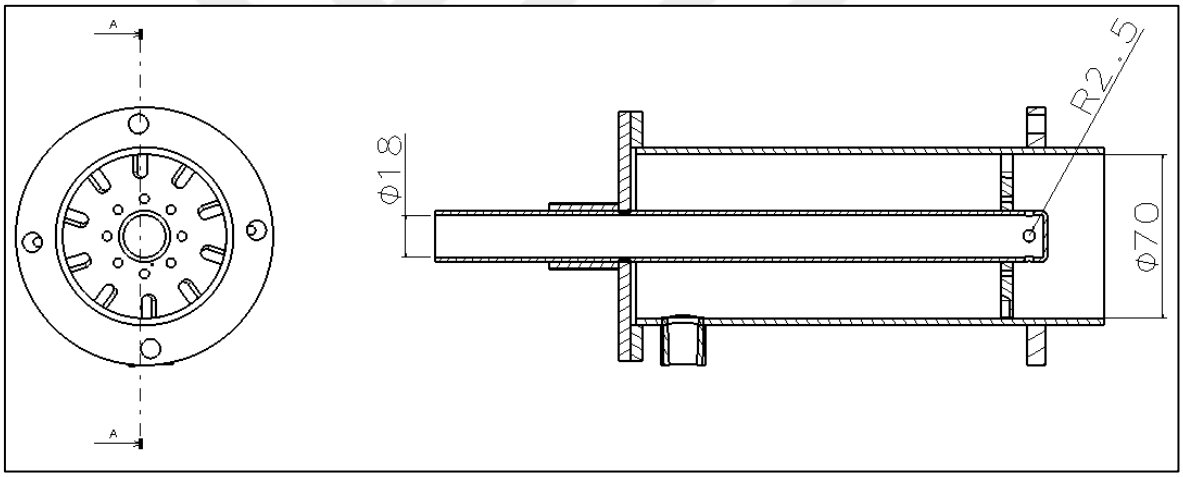
Resim 5.1. İmal edilen metan yakıcısı

Şekillerde gösterilen yakıcıda, hava hattı çıkışında 2 farklı çıkış bulunmaktadır. Birincisi gövde kenarında yarım ay ve dikdörtgene benzeyen çıkışlardır ve bu çıkışlar için türbülatör açısı 15°'dir. Diğer çıkışlar ise, 2,6 mm çapındaki düz deliklerdir. Yakıt hattı ise, yakıcının merkezinde olup, yanma bölgesine radyal olarak giren deliklerden oluşmaktadır. Yakıcı gövdesinin dış tarafında bulunan 4 adet deliğin amacı da yakıcının yanma odasına sökülüp takılmasını sağlamaktır. Bilindiği gibi, bu yakma sistemi, bahsi geçen tüm gaz yakıtları yakabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tüm gazların özellikleri birbirlerinden farklı olduğundan dolayı her bir yakıcı gövdesinin ölçüsü de birbirinden farklı olmaktadır.

Geliştirilen diğer yakıcı tipi, hidrojence zengin olan kok fırını gazı, şehir gazları ve su gazı içindir. Bu yakıcının gövde ve türbülatör kesitleri de, 15 kW'a kadar ısıl gücü ve yaklaşık 0,75 eşdeğerlilik oranındaki yanma şartlarını gerçekleştirebilmek üzere, hesaplanan yakıt ve hava miktarları dikkate alınarak oluşturulmuştur (çalışılan değerler 10 kW ve 0,83). Bahsi geçen yakıcıya ilişkin teknik resimler ve imalat sonrası çekilen fotoğraf Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Resim 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Hidrojence zengin kömür gazı yakıcısının katı model görünümü

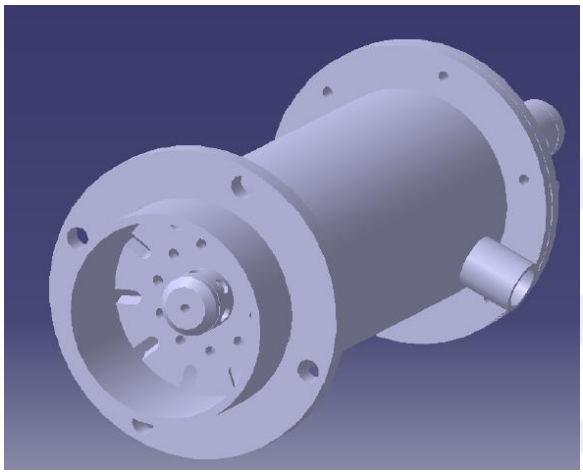


Şekil 5.4. Hidrojence zengin kömür gazı yakıcısının teknik resmi

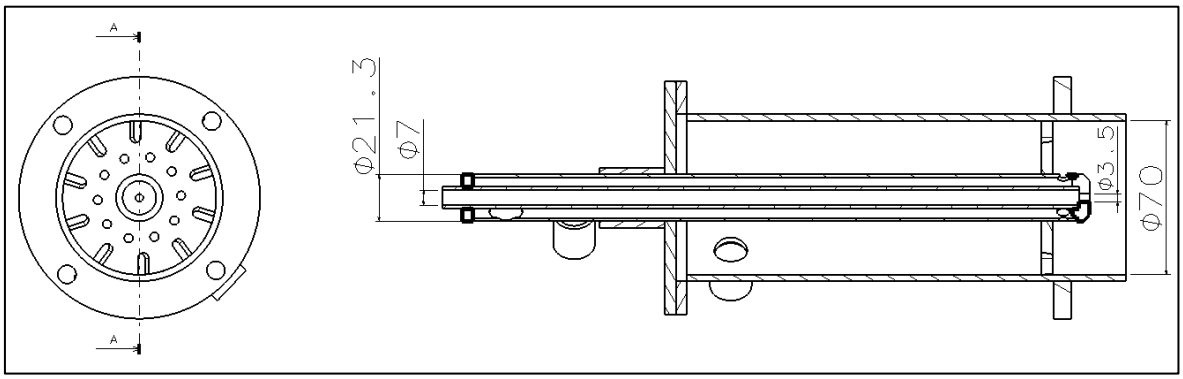


Resim 5.2. İmal edilen hidrojence zengin kömür gazı yakıcısı

Diğer bir türbülatör tipi de düşük kalorili kömür gazları olarak bilinen jeneratör ve yüksek fırın gazları içindir. Bu gazlar için de geliştirilen türbülatör tipi, tıpkı diğer yakıtlarda olduğu gibi yanma şartları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu gazların ısıl değerlerinin çok düşük olması ve iyi bir yanma performansı beklenmemesi nedeniyle, bu gazlar için geliştirilen yakıcının türbülatör kısmında, yakıt merkezinden hidrojen beslemesi yapılabilecek bir çıkış da verilmiştir. Bahsi geçen hidrojen beslemeli yakıcıya ait teknik resimler ve imalat sonrası çekilen fotoğraf Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Resim 5.3'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Hidrojen beslemeli düşük kalorili kömür gazı yakıcısının katı model görünümü



Şekil 5.6. Hidrojen beslemeli düşük kalorili kömür gazı yakıcısının teknik resmi



Resim 5.3. İmal edilen hidrojen beslemeli düşük kalorili kömür gazı yakıcısının türbülatörü

5.1. Tasarlanan Yakma Sistemi

Bu çalışma kapsamında, metanı (doğalgaz) ve farklı ısıl değer aralıklarına sahip olan kömür gazlarına yakabilecek bir yakma sisteminin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bir önceki bölümde, tasarlanan ve imalatı yapılan yakıcılardan bahsedilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde ise, bahsi geçen yanma odası ve tüm sistem detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Metan ve kömür gazlarının yanabilmesi için imal edilen yanma odasının resimleri Resim 5.4 ve Resim 5.5'te gösterilmiştir.



Resim 5.4. Yanma odası (1)

Resim 5.4'te gösterilen yanma odasının boyutları uzunluk olarak 1 m ve çap olarak da 0.4 m'dir. Yanma odası, paslanmaz çelikten imal edilmiş ve daha estetik bir görünüme sahip olması için kumlama yaptırılmıştır. Resim 5.4'ten de görülebileceği gibi yanma odası

üzerinde, yanma odası girişinden itibaren 0.1 m'de, 0.3 m'de, 0.5 m'de, 0.7 m'de, 0.9 m'de ve bacada olmak üzere 6 adet ölçüm noktası bulunmaktadır. Bu ölçüm noktaları sayesinde, yanma odası içerisindeki eksenel ve radyal yöndeki sıcaklık ve emisyon değerleri alınabilmekte ve metan ve kömür gazlarının yanma karakteristikleri belirlenebilmektedir. Resim 5.4 ve Resim 5.5'te görüldüğü gibi, yanma odası içerisindeki alevin yanma deneyleri sırasında gözlenebilmesi için, yanma odası üzerine bir adet gözetleme camı yerleştirilmiştir. Bu gözetleme camı, yüksek sıcaklıklara dayanabilen temperli bir camdan imal ettirilmiştir.



Resim 5.5. Yanma odası (2)

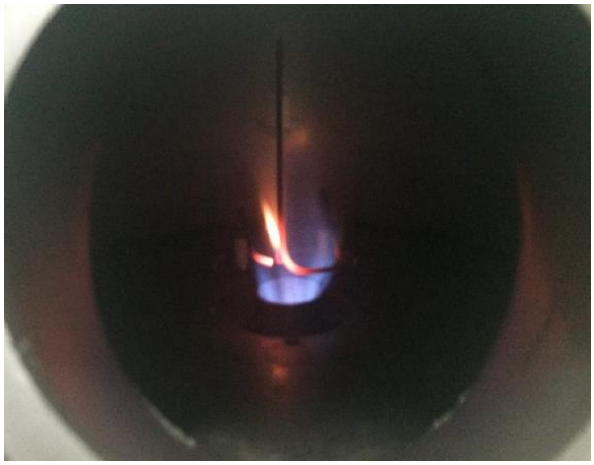
Resim 5.6'da ise, yanma odasının üzerinde bulunduğu tabla detaylı olarak gösterilmiştir. Bu tabla üzerinde, gaz ve hava hattından gelen hortumlar, pilot ateşleme hattı, yakıcı girişleri öncesinde bulunan yakıt-yakıt ve hava-yakıt karıştırıcıları ve bazı kontrol vanaları bulunmaktadır. Ayrıca bu tablanın sağ kısmında bir adet elektrik panosu bulunmaktadır. Bu panoya, gaz ve hava hattı geçiş noktalarında bulunan selenoid ventiller bağlıdır ve

Resim 5.7’de gösterilen alev resmi üzerinde bulunan ve kızarmış olarak görülen iyonizasyon çubuğundan alevi algılamadığı sürece bu selenoid ventiller, gaz geçişine izin vermemekte ve bu şekilde sistem güvenliği sağlanmaktadır.



Resim 5.6. Yanma odasının altında bulunan tabla

Resim 5.7’de gösterilen metan alevi üzerinde bulunan diğer iki çubuk ise ateşleme elektrotlarıdır. Bu elektrotlar da, ateşleme esnasında ark oluşturulmakta ve ateşlemenin gerçekleştirilmesini sağlanmaktadır. Mevcut sistem üzerinde, LPG ile çalışan ve kontrol panosuna bağlı olan bir adet pilot ateşleme hattı da bulunmaktadır. Sistemin pilot ateşlemeli olarak yapılmasının temel nedeni ise, çalışma kapsamında tüketilen kömür gazlarından bazılarının ısıl değer olarak çok düşük olması ve bu nedenle kendi kendine ateşleyememe riskinin alınmamasıdır. Ancak, yapılan tüm deneyler dikkate alındığında, yalnızca ısıl değer olarak çok düşük olan yüksek fırın gazının yakılması esnasında pilot hattı kullanılmıştır. Diğer kömür gazlarının ateşlenmesi sırasında herhangi bir problem ile karşılaşılmamıştır.



Resim 5.7. Düşük ısıl güçteki metan alevi

Yanma odasının üzerinde bulunan tabla üzerinde, Resim 5.5'te sağ tarafta görülen ve amacı, sistemin güvenliğini sağlamak olan kontrol panosuna ilişkin detaylar Resim 5.8'de gösterilmiştir. Sistemde bulunan bu kontrol panosunun, gaz hattında bulunan selenoid ventillerin açma/kapama işlemlerini gerçekleştirmekten başka bazı görevleri de bulunmaktadır. Bunlardan birisi, sistemde bulunan pilot hattını devreye almak ve devreden çıkarmaktır. Bu kontrol panosunun diğer bir işlevi de yanma odasının baca kısmına bağlanabilecek/bağlanmış olan PT-100 tipi bir ısıl çiftten aldığı verilere göre, set edilen değer doğrultusunda sistemi, aşırı ısınma durumunda güvenlik nedeniyle kapatmaktır.



Resim 5.8. Kontrol panosu

Resim 5.9'da, yakıcılara gaz beslemesi yapmak için tasarlanan gaz hatları ve bu hatlarda kullanılan armatürler gösterilmiştir. Resim 5.9'da gösterilen hattın en arka kısmı metan, orta kısım, hidrojence zengin olan kömür gazları ve en öndeki kısım da düşük kalorili

kömür gazları için ayrı ayrı tasarlanmıştır. Burada kullanılan hatların farklı boru çaplarında tasarlanmasının nedeni, her bir yakıtın aynı ısıl gücü sağlayabilmesi için gerekli olan yakıt debilerinin birbirlerinden farklı olması (ısıl değer azaldıkça beslenmesi gereken yakıt miktarı artmaktadır) ve bu nedenle de bu hatlarda kullanılan boru çaplarının birbirlerinden farklı olması gereğidir. Resim 5.9'a bakıldığında, arka tarafta bulunan metan hattına, metan yakıtı bulunduran tüpün bağlı olduğu görülmektedir. Bu tüp üzerinde, 200 bar'da depolanmış metan yakıtının basıncını 0-2,5 bar aralığına düşürebilecek regülatör bulunmakta ve bu regülatör çıkışı ile beraber, imal ettirilen gaz hattına bir hortum yardımıyla metan yakıtının girişi sağlanmaktadır. Gaz hattına giriş kısmındaki basıncı ölçmek için hatta yerleştirilen manometreyi geçtikten sonra, gelen gazın basıncını 40 mbar seviyelerine indirmek için başka bir regülatör daha bulunmaktadır. Regülatörden sonra, hattaki gaz basıncını gözlemlemek için hatta tekrar manometre yerleştirilmiştir. Bu manometreden sonra, toplam tüketilen yakıt miktarını belirleyebilmek için bir sayaç bulunmaktadır. Sayaçtan sonra, yukarıda bahsedilen elektrik panosu tarafından kontrol edilen selenoid ventil, selenoid ventilden sonra, anlık debi ölçümlerinin yapıldığı debimetre ve yakıcıdan önce yerleştirilmiş olan karıştırıcıya girmeden önce son kez basıncın ölçüldüğü manometre bulunmaktadır. Bahsi geçen armatürlerin hepsi, üç gaz hattı için de (metan, hidrojence zengin kömür gazları, düşük kalorili kömür gazları) bulunmaktadır.



Resim 5.9. Deney düzeneğinin genel görünümü

Resim 5.9'da ayrıca, yakma havası ve düşük kalorili kömür gazlarına yapılacak hidrojen beslemesi için hidrojen hattı görülmektedir (yanma odasının sağ tarafı). Bir önceki paragrafta bahsedilen tüm gaz yolu armatürleri, yakma havası ve hidrojen besleme hattında da bulunmaktadır. Hidrojen hattı ile ilgili olarak, hatta yapılan kaynak ile birleştirme işlemlerinde, diğer hatlarda yapılan kaynaklardan farklı olarak çift dikişli kaynak bağlantıları yapılmıştır. Bunun nedeni, hidrojen, havaya göre oldukça düşük yoğunluğa sahip bir gazdır ve hidrojenin, hattan yakıcıya iletimi sırasında, boru dışına sızma ihtimalinin göz önünde bulundurulmasıdır.

Resim 5.10'da ise, yakma havasının beslenmesini sağlamak için, sisteme entegre edilmiş kompresörün resmi gösterilmiştir. Bu kompresör sayesinde, yüksek basınçta hava depolanabilmekte ve yanma işlemi sırasında hatta beslenebilmektedir. Hava hattının girişinde bulunan pnömatik regülatör sayesinde, yüksek basınçta gelen hava, hatta olması gereken basınca düşürülmektedir.



Resim 5.10. Hava kompresörü

Resim 5.11'de, çalışmada kullanılan kömür gazlarının yanma odası içerisinden eksenel ve radyal yönlerden ve bacadan emisyon parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan NOVA plus RCU tipi baca gazı analizör cihazı gösterilmiştir. Bu cihaz, O_2 (% 0-21, ± 0,2), CO (0-4000 ppm (istenirse 10000 ppm'e kadar), ± 10 ppm), NO (0-1000 ppm, ± 5 ppm), NO_2 (0-200 ppm, ± 5 ppm), SO_2 (0-2000 ppm, ± 10 ppm), CO_2 (% 0-40, ± 0,3) emisyonlarının ölçümünü belirtilen doğruluklarda yapabilmektedir. Bu analizöre ait kalibrasyon sertifikası Ek-2'de sunulmuştur.



Resim 5.11. Taşınabilir baca gazı analizörü

Resim 5.12'de gösterilen seramik uçlu gaz probu, Resim 5.11'de gösterilen taşınabilir baca gazı analizörüne entegre edilebilmekte ve bu sayede alevin içerisinden emisyon ölçümleri alınabilmektedir.



Resim 5.12. Seramik uçlu gaz probu

Uzunluğu, yanma odasının yarıçapından oldukça büyük, seramik kaplı, tel iç çapı 0,5 mm olan, R tipi ve 0-1760 ºC aralığında ± % 0,3 hassasiyetle ölçüm yapabilen yüksek sıcaklığa dayanıklı sıcaklık ölçerler sayesinde kömür gazlarının alev sıcaklıkları ve yanma odası içerisinde eksenel ve radyal yöndeki sıcaklık seviyeleri belirlenmiştir. Bahsi geçen sıcaklık ölçer Resim 5.13'te gösterilmiştir.



Resim 5.13. Seramik uçlu sıcaklık ölçer

5.1.1. Sıcaklık ölçümlerinin düzeltilmesi

Deneysel çalışmalar neticesinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri, gerçek sıcaklık değerlerini yansıtmamaktadır. Yanma odası içerisindeki yüksek sıcaklık seviyeleri nedeniyle ışınımla ısı transferi ile bir miktar kayıp olmaktadır. Sıcaklık ölçümlerinin bu kayıplar da dikkate alınarak düzeltilmesi gerekmektedir. Sıcaklık düzeltmelerini geliştirmek için sıcaklık ölçümlerinde düzeltmeler ve korelasyonlarla ilgili yapılan bazı çalışmalar literatürde bulunmaktadır [72, 75, 76]. Isıl çiftler, ısıl ve kimyasal dengede yüksek sıcaklıktaki gaz akımına yerleştirildikleri zaman, çevre ortam sabit sıcaklıkta kabul edilirse, gazdan tele taşınım ve ışınımla toplam ısı transferi, telden iletimle koruyucu tabakaya ve ışınımla duvara olan ısı transferi toplamına eşittir [72].

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \tag{5.1}$$

Burada; Q_1, gazdan tele taşınımla olan ısı transferini, Q_2, gazdan tele ışınımla olan ısı transferini, Q_3, telden koruyucu tabakaya (seramik) iletimle olan ısı transferini ve Q_4, telden duvara ışınımla olan ısı transferini temsil etmektedir.

Gazın yayınım katsayısı çok küçük olduğundan gazdan tele ışınımla ısı transferi ihmal edilebilir. Ayrıca, koruyucu tabaka (seramik) için iletimle ısı kaybı, telin ısıl iletkenliği ve boyutları ve koruyucu tabaka ile ilgilidir. Bundan dolayı, ısıl çiftler için bu ısı kayıpları, ısıl çiftin uç kısmı ile doğrudan ilgili olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda, ısıl çift için ısıl denge eşitliği şöyle olmalıdır:

$$Q_1 = Q_4 \tag{5.2}$$

Gazdan tele taşınımla olan ısı kayıpları (Q_1) şöyle yazılabilir:

$$Q_1 = hA(T_g - T) \tag{5.3}$$

Burada, h (W/m^2.K), taşınım ısı transfer katsayısını, A (m^2), telin yüzey alanını, T_g (K), gaz sıcaklığını ve T (K) tel sıcaklığını göstermektedir.

Telden yanma odasının duvarlarına ışınımla ısı kaybı (Q_4) aşağıdaki eşitlikle açıklanabilir:

$$Q_4 = \sigma A\left(\varepsilon T^4 - a{T_W}^4\right) \tag{5.4}$$

Burada, σ, Stefan-Boltzman sabitini, ε, telin yayma katsayısını, a, telin emme ya da yutma katsayısını, T_W, duvar sıcaklığını göstermektedir. Kirchoff kanununa göre, ısıl dengedeki bir cismin yayma ve yutma katsayısı eşittir. Bu ifadeden hareketle eşitlik (5.4) şöyle yazılabilir:

$$Q_4 = \sigma A\varepsilon\left(T^4 - {T_W}^4\right) \tag{5.5}$$

$Q_1 = Q_4$ eşitliğinden hareketle,

$$hA\left(T_g - T\right) = \sigma A\varepsilon\left(T^4 - {T_W}^4\right) \tag{5.6}$$

eşitlik (5.6) elde edilir. Eşitlik (5.6) düzenlenecek olursa,

$$T_g = \frac{\sigma\varepsilon\left(T^4 - {T_W}^4\right)}{h} + T \tag{5.7}$$

eşitliği elde edilir. Eşitliğin sağ taraftaki ilk terimi, ısı kayıplarından dolayı azalan ısıl çift sıcaklığını karşılamak için bir düzeltme faktörünü temsil etmektedir. Bu çalışmanın deneysel kısmında yapılan ölçümlerin düzeltilmesi için de eşitlik (5.7) kullanılmıştır. Eşitlik (5.7)'de, Stefan-Boltzman sabiti $\sigma = 5{,}67x10^{-8}$ ve ısıl çiftlerin yayma katsayısı

$\varepsilon = 0{,}22$ [77] şeklindedir. T (K) deneyler sırasında ölçülen hatalı değeri, T_W (K) deneyler sırasında ölçülen duvar sıcaklığını göstermektedir. h değeri ise, bir silindir etrafındaki akış dikkate alınarak, Nu sayısına [78] bağlı olarak ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Nu = 0{,}8.(Re)^{0{,}25} \tag{5.8}$$

$$Nu = \frac{h.D}{k} \tag{5.9}$$

$$Re = \frac{U.D}{v} \tag{5.10}$$

Eşitlik (5.9)'da verilen Reynolds sayısının hesaplanmasında kullanılan hız değeri, teorik olarak hesaplanan yakıt hızlarıdır (hidrojen beslemeli deneyler için hidrojen hızıdır). Hidrolik çap (D) değeri de, ısıl çiftin tel çapıdır (0,5 mm). Bu değerler kullanılarak, her bir yakıt karışımı için Reynolds sayısı belirlenmiş olup, bu sayı kullanılarak da Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan Nusselt sayıları kullanılarak ise, her bir kömür gazı için ısı taşınım katsayısı (h) belirlenmiştir. Eşitlik (5.9)'da bulunan, yanma sonu ürünlerinin ısı iletim katsayısı (k), yanma sonu ürünlerinin tamamının hava kabulü ile, 800ºC'deki havanın ısı iletim katsayısı değeri olan 0,051 W/m.K olarak alınmıştır [77].

5.1.2. Debimetrelerin kalibrasyonu

Deneylerde kullanılacak gazların miktarlarını, debimetrelerden doğru şekilde ayarlayabilmek için, her bir yakıt için ne kadar yakıt tüketileceğinin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir [70]:

$$Q\left(\frac{Nm^3}{h}\right) = \frac{Isıl\ Güç}{LHV\left(\frac{kJ}{Nm^3}\right) x \frac{1(h)}{3600(s)}} \tag{5.11}$$

Bu denklemde, LHV yakıtların alt ısıl değerini, Q hacimsel olarak beslenmesi gereken yakıt debisini göstermektedir.

Sistemde kullanılan debimetreler hava debimetreleridir (kömür gazları için tasarlanmış özel debimetreler bulunmamaktadır). Bu nedenle, gaz hatlarında bulunan debimetreler, ilgili kömür gazının veya metanın yoğunluğuna göre kalibre edilmeli ve deneyler esnasında okunan değerlerin, aşağıdaki eşitlik sayesinde bulunan değerlere göre okunması gerekmektedir [70]:

$$Q_{çalışma\ akışkanı} = k\ x\ Q_{kalibrasyon\ akışkanı} \tag{5.12}$$

$$k = \sqrt{\frac{kalibrasyon\ akışkanının\ yoğunluğu}{çalışma\ akışkanının\ yoğunluğu}} \tag{5.13}$$

Yukarıdaki eşitlikte bahsedilen çalışma akışkanı çalışılan gazı, k dönüşüm faktörünü, kalibrasyon akışkanı ise kullanılan debimetrenin hangi akışkan için tasarlandığını (bu çalışmada hava) göstermektedir.

Yukarıda gösterilen eşitlik (5.11), eşitlik (5.12) ve eşitlik (5.13), basit bir örnekle daha iyi anlaşılacaktır. Örneğin; metan gazı kullanılarak 10 kW ısıl güç elde etmek için (LHV_{metan} = 33607.574 kJ/Nm^3) 1,0712 m^3/h metan gazı gereklidir. Ancak, bu değerin elde edilebilmesi için debimetreden okunması gereken değer (20°C'de ρ_{hava} = 1,204 kg/m^3 ve ρ_{metan} = 0,67148 kg/m^3) yaklaşık olarak 0,8 m^3/h'tir. Deneyler yapılırken de tüm gazlar için bu değerler hesaplanmış ve debimetrelerden hesaplanan değerler okunmuştur.

6. SONUÇLAR VE İRDELEME

Tezin bu bölümünde, kömür gazlarının yanma parametreleri için sayısal ve deneysel olarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Daha sonra, yapılan sayısal modellemelerde elde edilen sıcaklık dağılımları ile deneysel çalışmadan elde edilen ve radyasyon kaybına karşı düzeltilen sıcaklık ölçümleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın deneysel bölümünün gerçekleştirilmesi için imal ettirilen yakıcı tiplerinin, yakıtların karakteristik özelliklerine göre üç tip olarak yapıldığından daha önce bahsedilmişti. Bu nedenle, çalışmadan elde edilen sayısal ve deneysel sonuçlar da bu şekilde analiz edilmiş ve her bir yakıt tipi kendi içerisinde karşılaştırılmıştır.

Sayısal modellemelerde, deneysel çalışmada kullanılan yanma şartları kullanılmıştır. Tüm yakıtların yakılması, 10 kW ısıl güçte ve $\varnothing$ = 0,83 eşdeğerlilik oranında, yakıt ve hava basınçları 18-21 mbar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. ANSYS Fluent programına, bu sınır şartları veya sınır şartlarından hesaplanan başka sınır şartları (örneğin yakıt ve hava hızları gibi) girilerek sınır şartları programa entegre edilmiştir. Yapılan modellemelerin tamamında, enerji ve radyasyon modellleri 10^{-6} yakınsama kriterini sağlarken diğer denklemler için bu değerler 10^{-4} civarlarında olmuştur. Böylece, tüm modellemeler bu kriterleri sağlayarak yakınsamıştır.

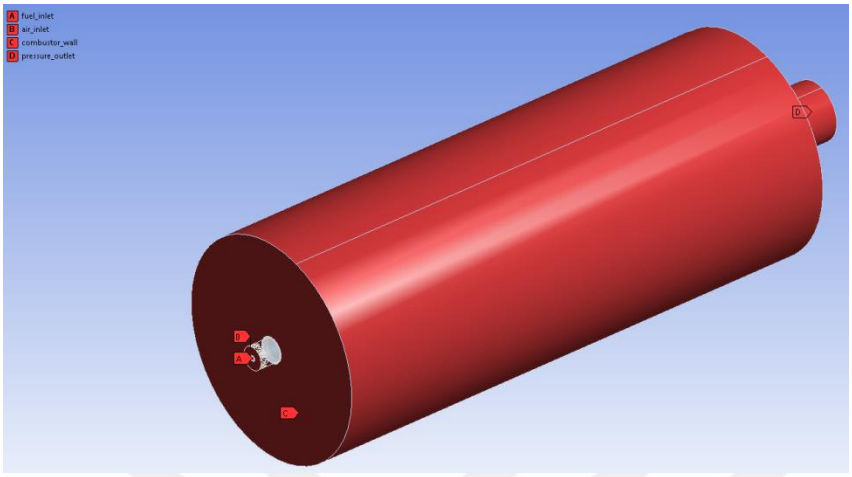
6.1. Sayısal Modelleme Sonuçları

Sayısal modelleme sonuçlarına geçmeden önce, her bir yakıt grubu (metan, hidrojence zengin ve düşük kalorili kömür gazları) için ayrı ayrı ağ yapısından bağımsızlaştırma ve doğru türbülans modelinin belirlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

6.1.1. Metanın sayısal modelleme sonuçları

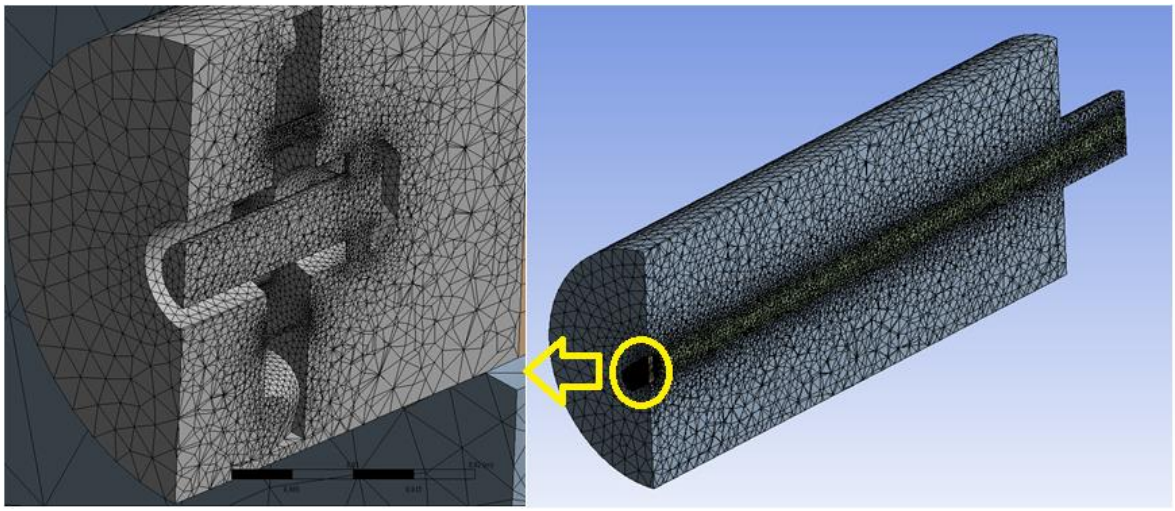
Bu çalışma kapsamında, kömür gazlarının yanma parametrelerinin araştırılmasından önce, metanın yanma parametreleri araştırılmış ve bu şekilde, kömür gazları ile doğalgazın karşılaştırılması sağlanmıştır. Şekil 6.1'de metan yakıcısının yanma odasına entegre edilmesi neticesinde oluşturulan akış hacmi gösterilmiştir. Şekil 6.1'de, akış hacmi

üzerindeki yakıt ve hava girişleri, yanma odasının duvarları ve yanma odası çıkışı da belirtilmiştir.

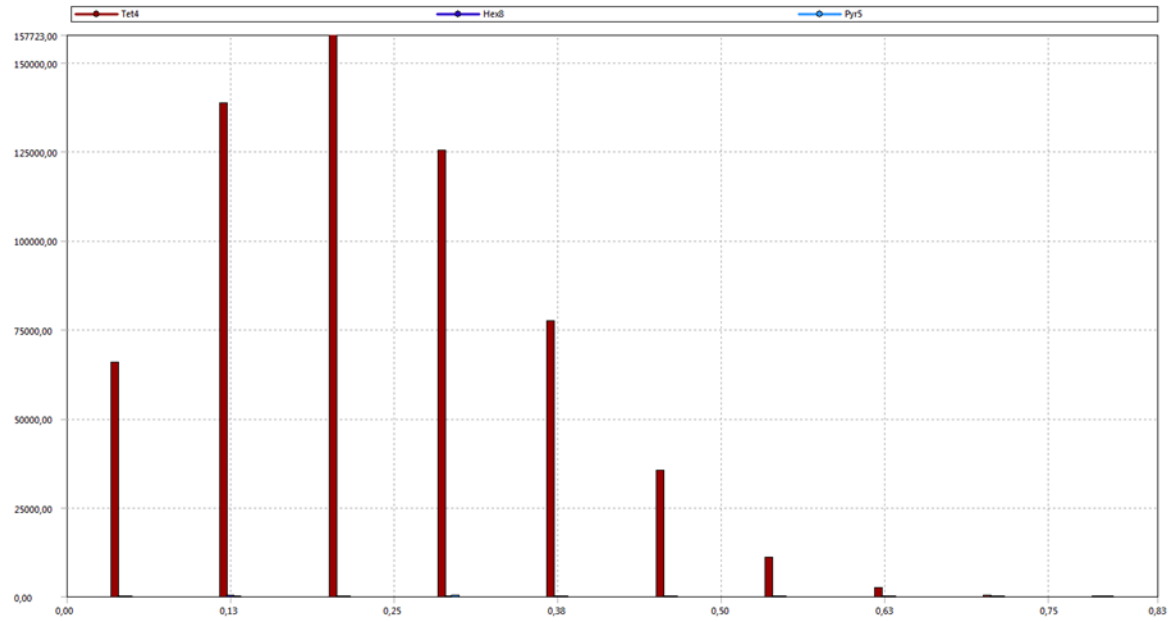


Şekil 6.1. Metan yanmasının akış hacmi

Şekil 6.2'de ise metan yanması için oluşturulan akış hacminin ağ yapısı sunulmuştur. Burada, özellikle metan yakıcısının ve türbülatörünün bulunduğu bölgede ağ yapısı oldukça sıklaştırılmıştır. Yanma reaksiyonlarının bu bölgede başlaması nedeniyle bu sıklaştırma oldukça önemlidir. Bu ağ yapısında 613947 adet tetrahedron şeklinde hücre ve 112719 adet de düğüm noktası bulunmaktadır. Bu ağ yapısı için en yüksek "Skewness" değeri 0,83, ortalama "Skewness" değeri 0,23 ve en düşük "Orthogonal Quality" değeri de 0,2 şeklindedir. Ayrıca, metan yanması için kullanılan ağ yapısındaki hücrelerin Skewness dağılımları Şekil 6.3'te gösterilmiştir.

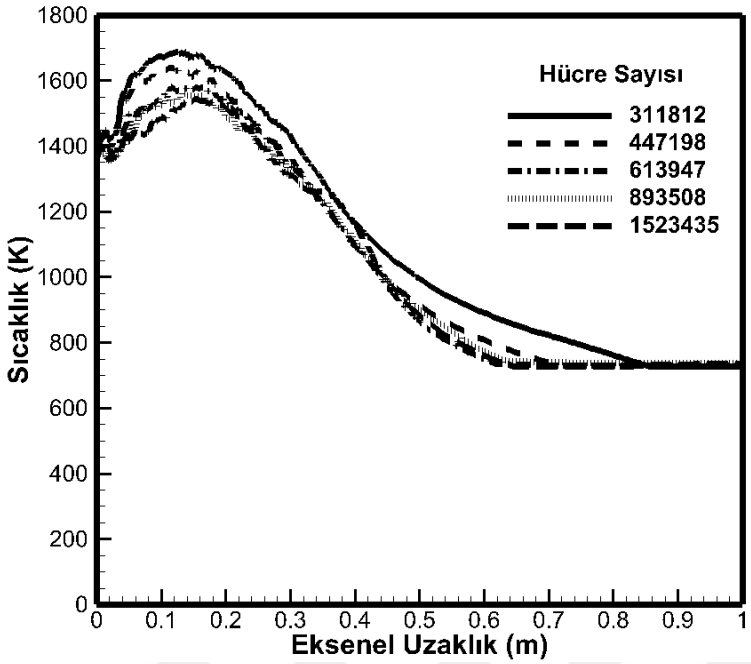


Şekil 6.2. Metan yanması için oluşturulan akış hacminin kesiti



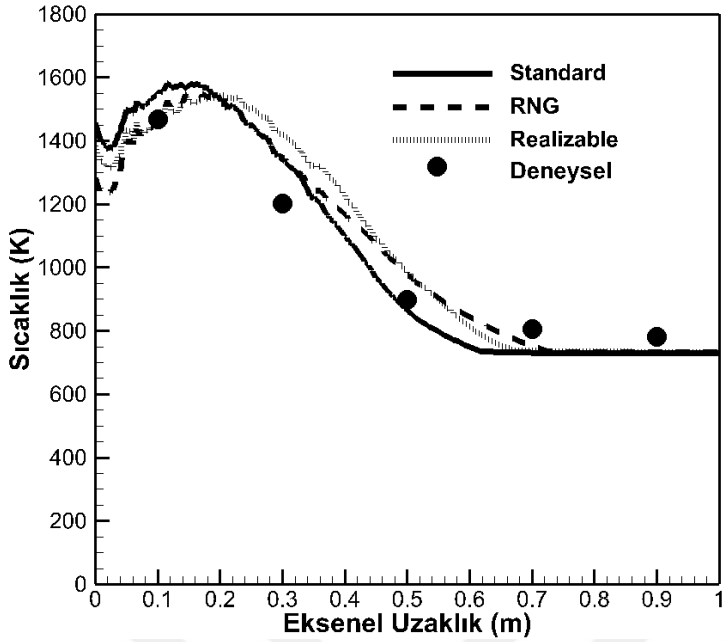
Şekil 6.3. Metan yanması için oluşturulan akış hacmindeki hücrelerin Skewness değerleri

613947 hücre sayılı ağ yapısının belirlenmesinden önce, farklı sayılarda hücre sayısına sahip farklı ağ yapıları ile de sayısal modellemeler gerçekleştirilmiş ve bu sayede hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı hücre sayıları için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Farklı hücre sayıları için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları değerlendirildiğinde, özellikle 613947 adet hücre içeren ağ yapısından sonraki ağ yapıları için sıcaklık dağılımlarında önemli derecede değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu nedenle, 613947 adet hücre içeren ağ yapısından daha fazla sayıda hücre içeren ağ yapıları ile sayısal modellemelere devam etmek zaman açısından kayıp teşkil edecektir. Sonuç olarak, metan yanması için 613947 adet hücre bulunduran ağ yapısı seçilmiş ve bundan sonraki modellemelere bu ağ yapısı ile devam edilmiştir.



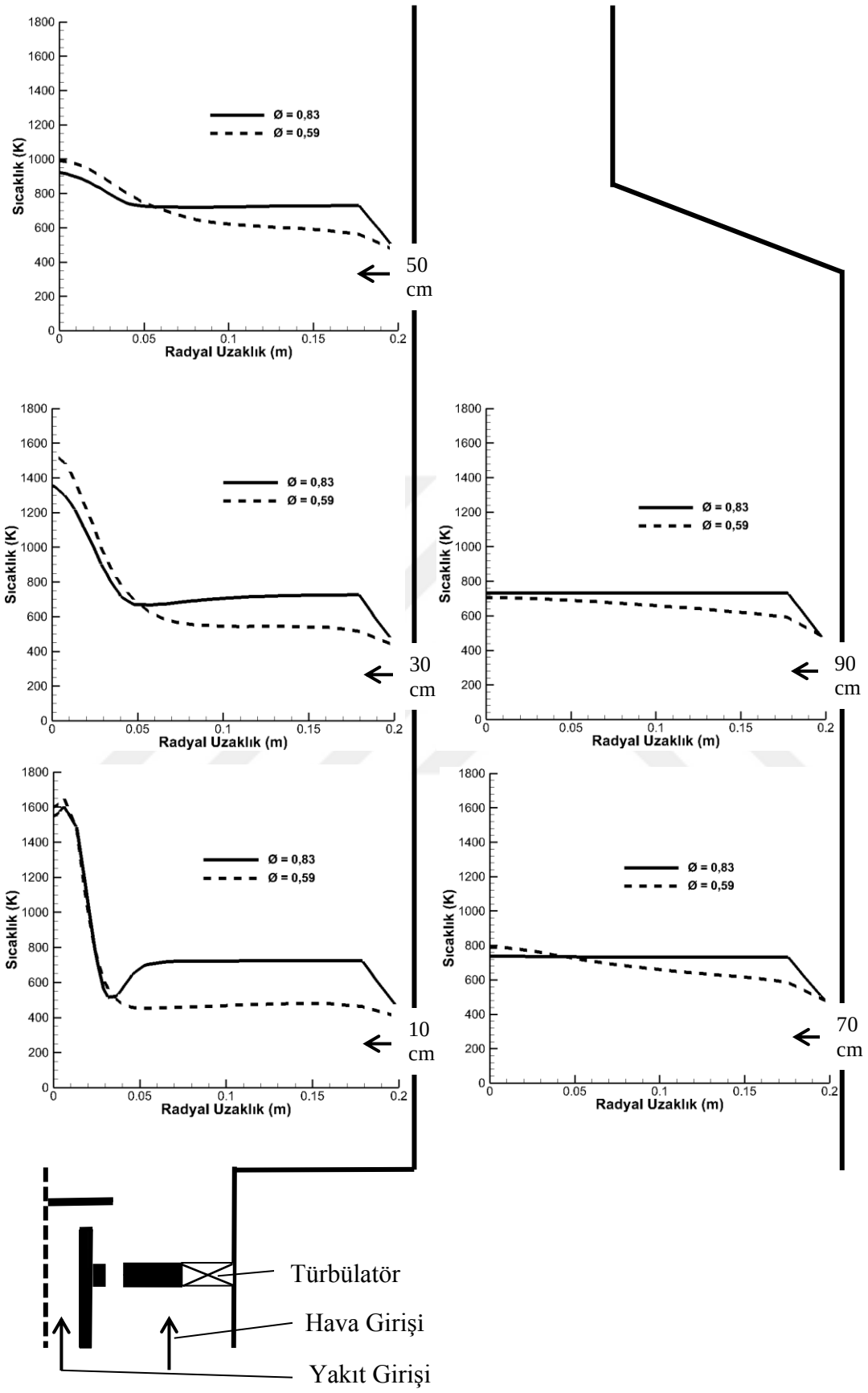
Şekil 6.4. Metan yanması için hücre sayısından bağımsızlaştırma

Metanın sayısal modellemelerine geçilmeden önce yapılan diğer bir işlem de metan yanması için uygun türbülans modelinin belirlenmesidir. Bu işlem için, üç farklı türbülans modeli ile sayısal modelleme yapılmış ve çalışmanın deneysel kısmında metan yanması için elde edilen eksenel sıcaklık ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma Şekil 6.5'te verilmiştir. Farklı türbülans modelleri için yapılan sayısal modellemeler neticesinde eksenel sıcaklık dağılımları incelendiğinde, yanma odası boyunca önemli derecede farklılık olmamakla beraber genel olarak standard k-Ɛ türbülans modeli ile yapılan sayısal modelleme sonuçlarının deneysel ölçümlerle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 6.5'ten çıkarılabilir. Bu nedenle, metan yanması için türbülans modeli olarak standard k- Ɛ türbülans modeli seçilmiştir.



Şekil 6.5. Metan yanması için uygun türbülans modelinin belirlenmesi

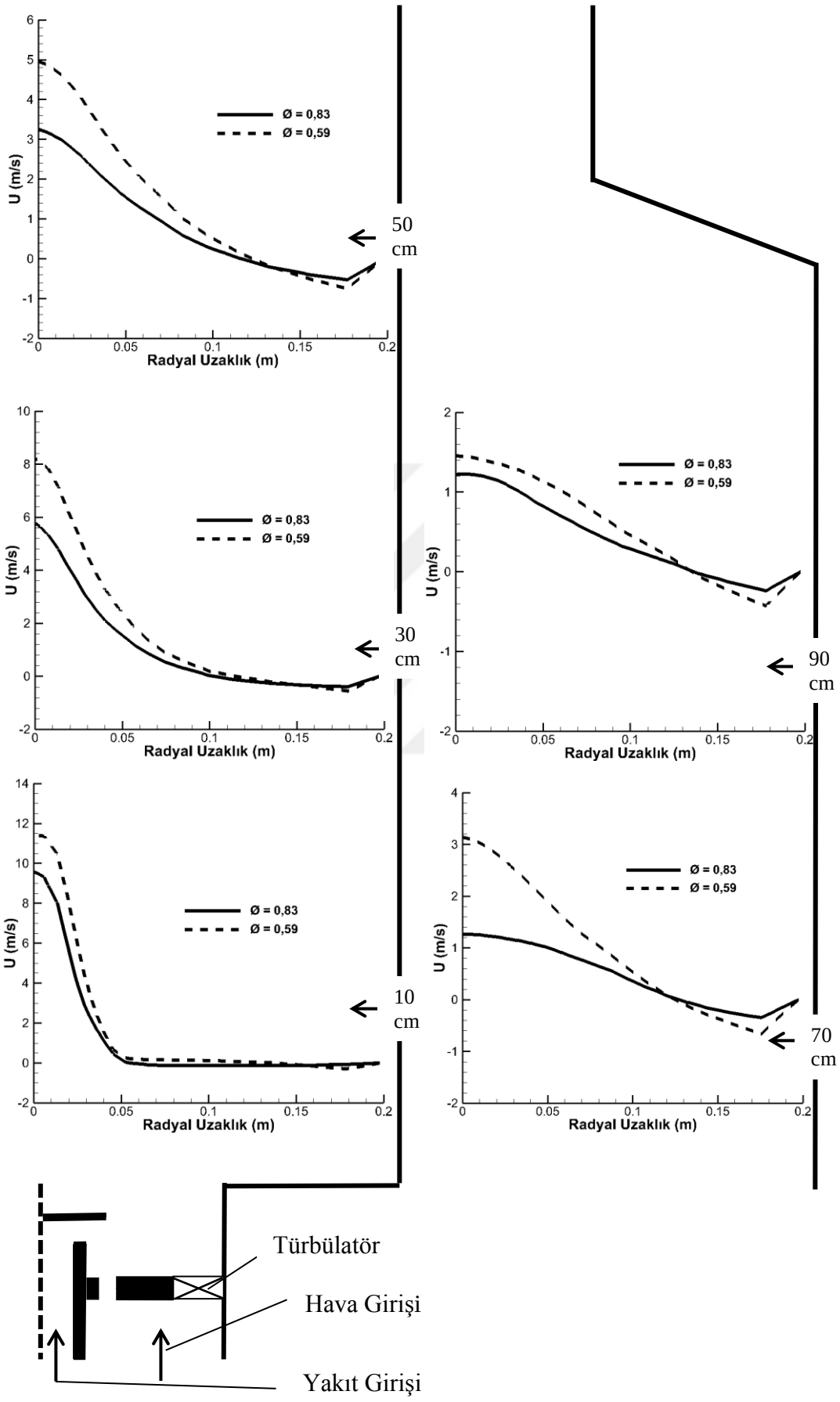
Şekil 6.6'da metan yanması için eşdeğerlilik oranının radyal sıcaklık dağılımına olan etkisi gösterilmiştir. Yanma odası boyunca, yanma odasının merkez bölgeleri haricinde eşdeğerlilik oranı azaltıldıkça sıcaklık seviyelerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir. Eşdeğerlilik oranının azaltılmasıyla artan hava debisi ile, özellikle radyal bölgelerde bir miktar soğuma belirlenmiştir. Buna karşın, yanma odası ekseni boyunca sıcaklık seviyelerinde çok bir artış da gözlemlenmiştir. Ancak gözlenen bu artış, yanma odası çıkışına doğru gidildikçe giderek kaybolmuştur.



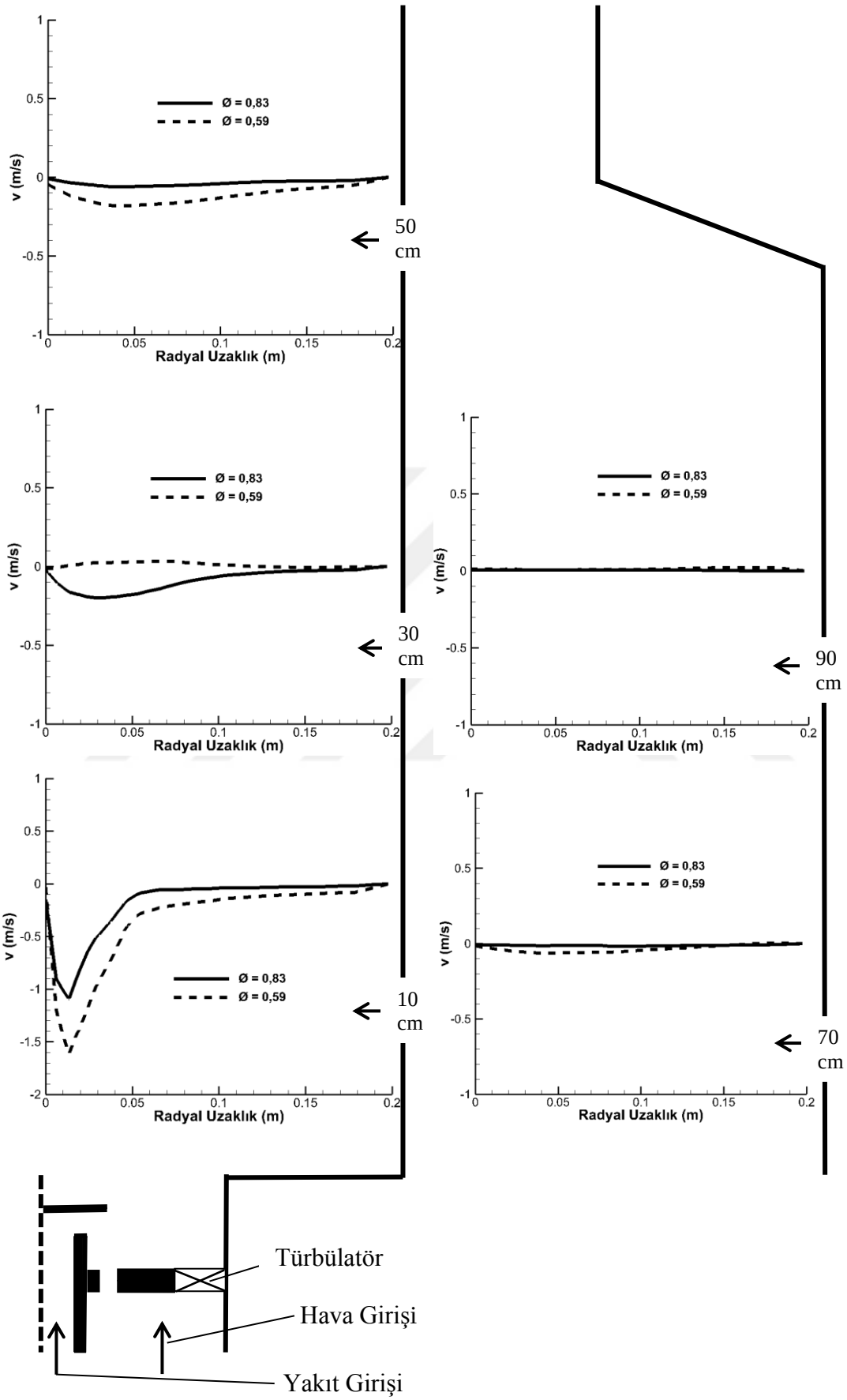
Şekil 6.6. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının radyal sıcaklık dağılımına etkisi

Şekil 6.7'de ise farklı eşdeğerlilik oranları için metan yanmasına ait eksenel hız dağılımları radyal olarak gösterilmiştir. Yanma odasının giriş ve merkez bölgesindeki hız değerleri en yüksek değerler olup, yanma odası çıkışına doğru gidildikçe hız değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Yanma odası çıkışına doğru merkezdeki hız büyüklükleri 2 m/s'nin altına kadar gerilemiştir. Eşdeğerlilik oranı azaldıkça, hava debisinin artmasından dolayı eksenel hızlarda bir miktar artış belirlenmiştir. Her iki yanma şartı için de merkezden yanma odası duvarlarına doğru gidildikçe eksenel hız büyüklüklerinde azalmalar tespit edilmiştir. Yanma odası duvarlarına yakın bölgelerde ise, eksenel hız büyüklükleri negatif değerlere düşmüştür. Bu durum, bu bölgelerin resirkülasyon bölgeleri olduğu anlamına taşımaktadır.

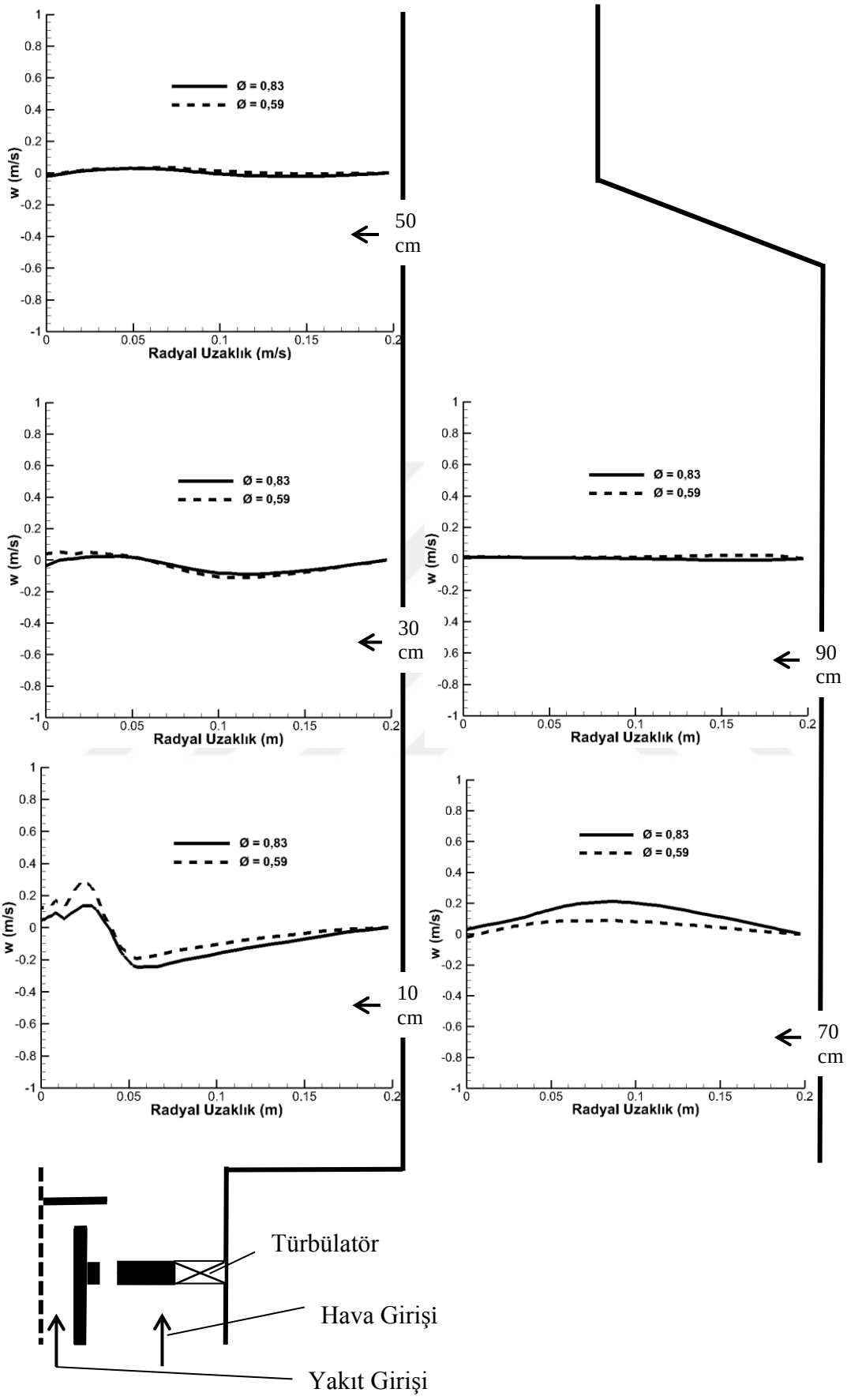
Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da ise metan yanması için yanma odası boyunca radyal ve teğetsel hız dağılımları sunulmuştur. Şekil 6.8'de 10 cm eksenel uzaklıktaki radyal hız dağılımları incelendiğinde yanma odası merkezinden duvarına doğru giderken radyal hızlarda ani bir düşüş gözlemlenmiş, ardından değerler tekrar eski haline geri dönmüştür. Bunun nedeni, bu bölgede de bir resirkülasyon olduğudur. Şekil 6.9'da gösterilen teğetsel hızlar incelenecek olursa, eşdeğerlilik oranının azaltılması ile artan hava debisi ve dolayısıyla artan hava hızı nedeniyle, yanma odası girişindeki teğetsel hızlar, eşdeğerlilik oranı 0,83 olan yanma şartları için elde edilen teğetsel hızlardan bir miktar yüksek olmuştur. Radyal hızlarda ortaya çıkan resirkülasyon bölgesi, teğetsel hız dağılımından da anlaşılmaktadır. Yanma odası çıkışına doğru gidildikçe her iki durum için de radyal ve teğetsel hızlar azalmıştır.



Şekil 6.7. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının eksenel hız dağılımına etkisi

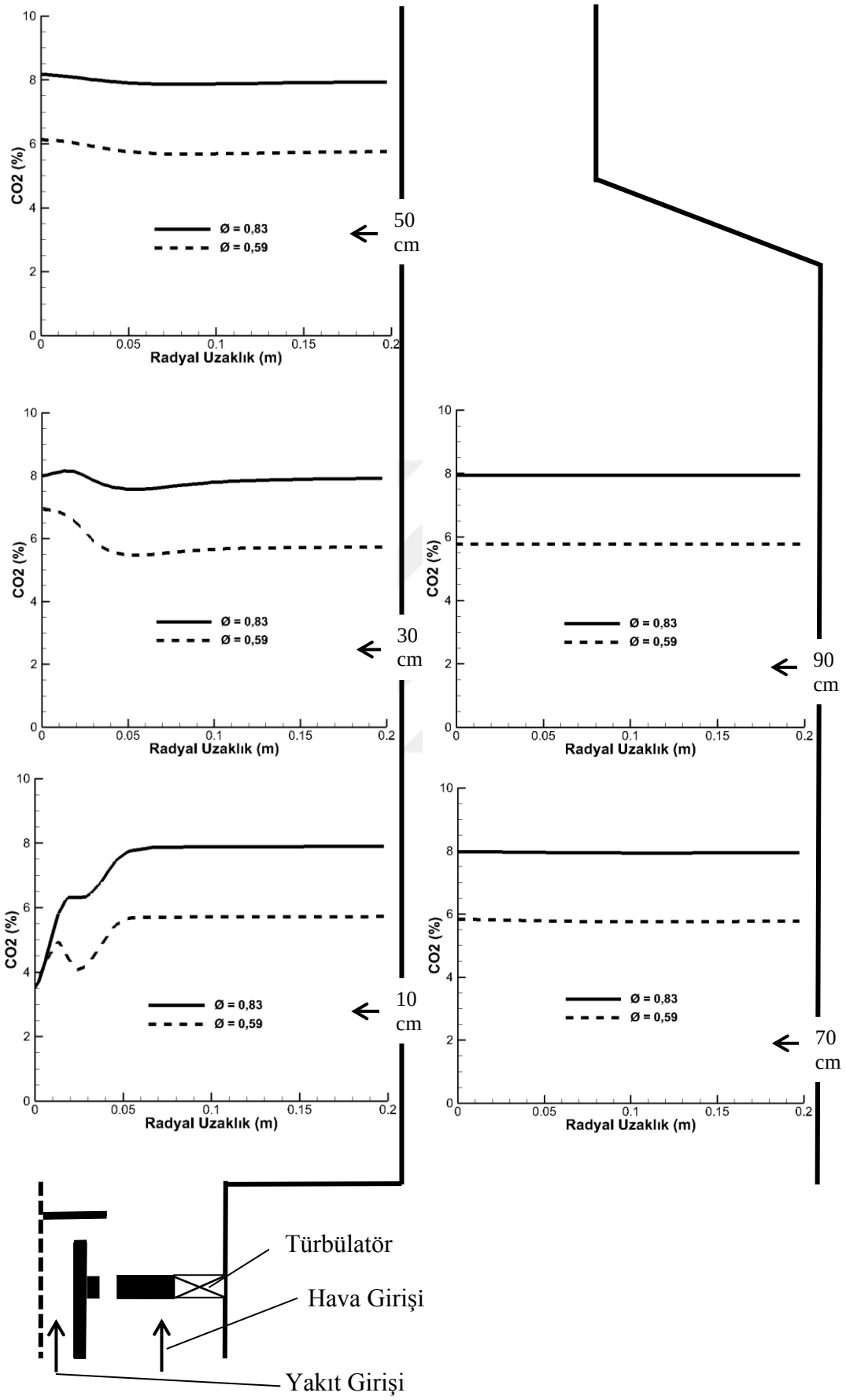


Şekil 6.8. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının radyal hız dağılımına etkisi



Şekil 6.9. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının teğetsel hız dağılımına etkisi

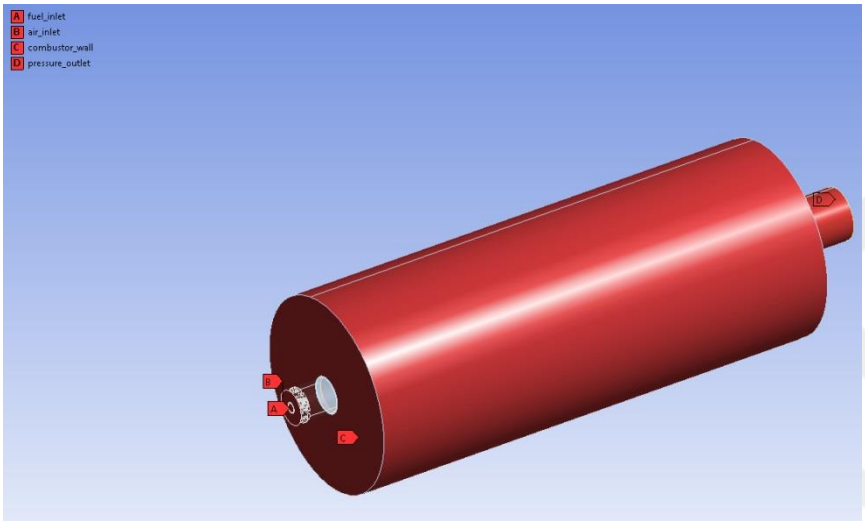
Şekil 6.10'da metan yanması sonucu ortaya çıkan CO_2 emisyonlarının yanma odası boyunca dağılımı gösterilmiştir. Yanma odası boyunca belirli bir artış gösteren CO_2 emisyonları, özellikle 50 cm'lik eksenel uzaklıktan sonra, merkezden yanma odası duvarlarına doğru ciddi bir değişim göstermemiştir. Bu durum, sıcaklık ve hız dağılımları ile de uyumlu olmaktadır. Şekil 6.10 ayrıca, eşdeğerlilik oranının CO_2 emisyonlarına olan etkilerini de sunmaktadır. Eşdeğerlilik oranının azalması ile yanma odası boyunca CO_2 seviyelerinde azalmalar olduğu tahmin edilmiştir. Bu durum, artan hava miktarı ile artan azot seviyelerinin % olarak diğer emisyonları azaltması ile açıklanabilir.



Şekil 6.10. Metan yanması için eşdeğerlilik oranının CO_2 dağılım tahminine etkisi

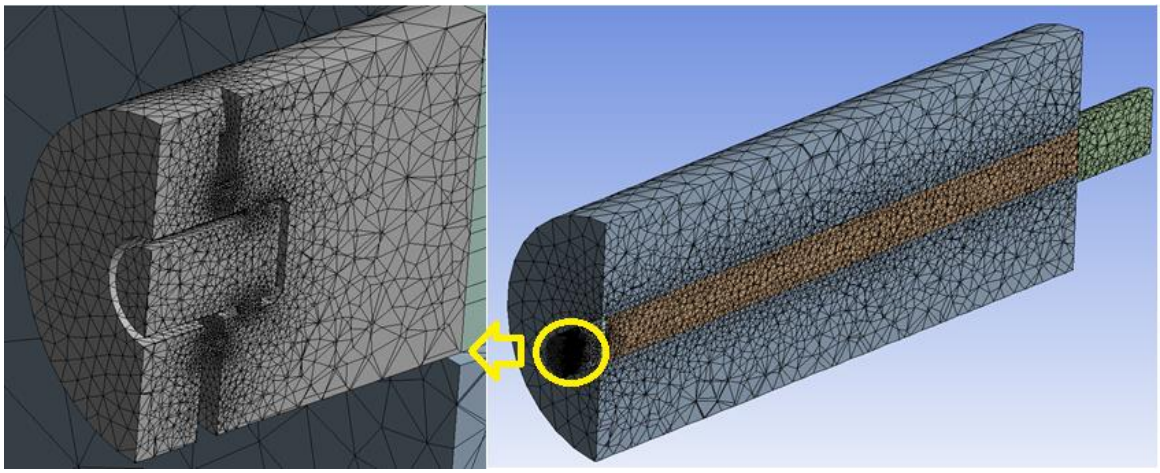
6.1.2. Hidrojence zengin kömür gazlarının sayısal modelleme sonuçları

Bu bölümde, hidrojence zengin olan kömür gazlarının (kok fırını gazı, şehir gazı I, şehir gazı II ve su gazı) yanma parametreleri araştırılmıştır. Şekil 6.11'de hidrojence zengin kömür gazı yakıcısının yanma odasına entegre edilmesi neticesinde oluşturulan akış hacmi gösterilmiştir. Şekil 6.11'de, akış hacmi üzerindeki yakıt ve hava girişleri, yanma odasının duvarları ve yanma odası çıkışı da belirtilmiştir.

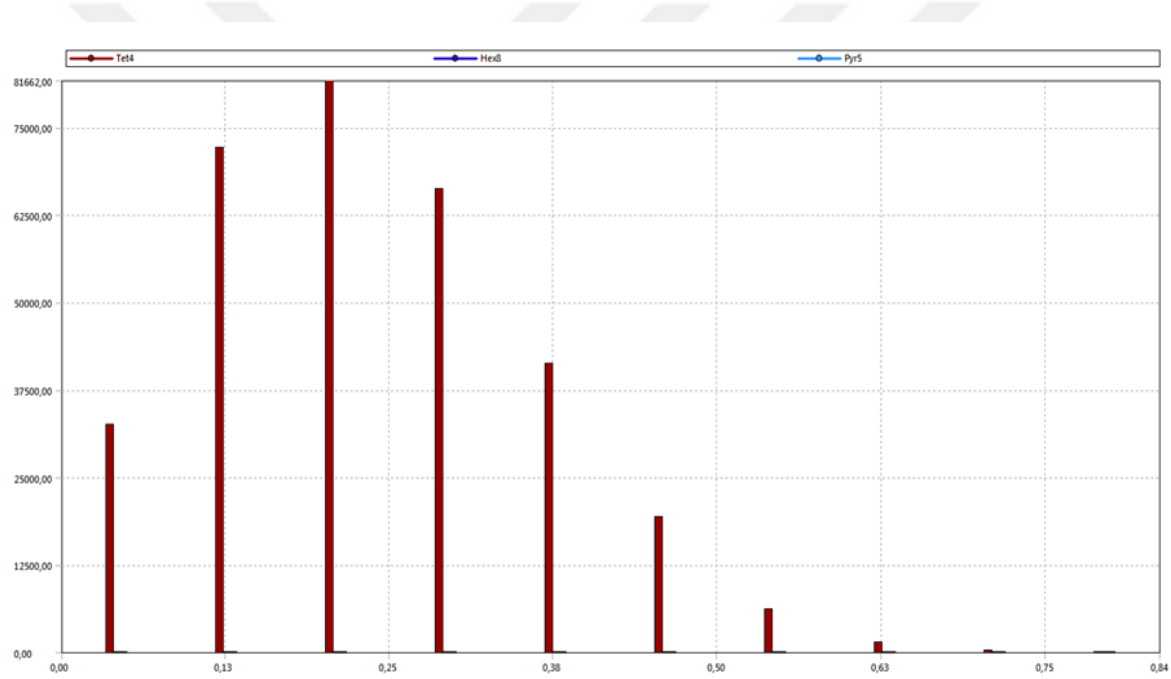


Şekil 6.11. Hidrojence zengin kömür gazlarının akış hacmi

Şekil 6.12'de ise hidrojence zengin kömür gazları için oluşturulan akış hacminin ağ yapısı sunulmuştur. Burada, özellikle hidrojence zengin kömür gazı yakıcısının ve türbülatörünün bulunduğu bölgede ağ yapısı oldukça sıklaştırılmıştır. Yanma reaksiyonlarının bu bölgede başlaması nedeniyle bu sıklaştırma oldukça önemlidir. Bu ağ yapısında 320894 adet tetrahedron şeklinde hücre ve 59860 adet de düğüm noktası bulunmaktadır. Bu ağ yapısı için en yüksek "Skewness" değeri 0,84, ortalama "Skewness" değeri 0,23 ve en düşük "Orthogonal Quality" değeri de 0,25 şeklindedir. Bunun yanı sıra, akış hacminde kullanılan tüm ağlar için "Skewness" değerlerini gösteren grafik de Şekil 6.13'te gösterilmiştir.



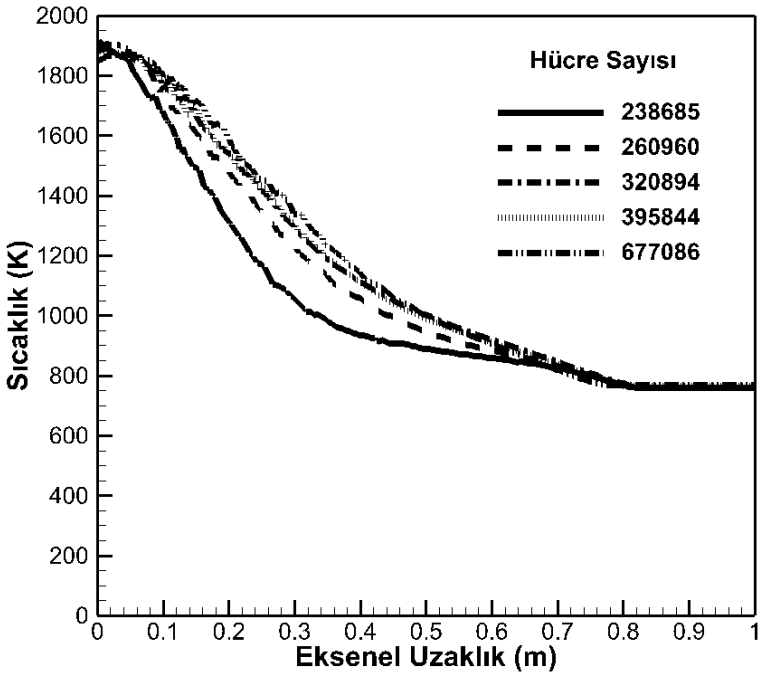
Şekil 6.12. Hidrojence zengin kömür gazları için oluşturulan akış hacminin ağ yapısı



Şekil 6.13. Hidrojence zengin kömür gazları için oluşturulan akış hacmindeki hücrelerin Skewness değerleri

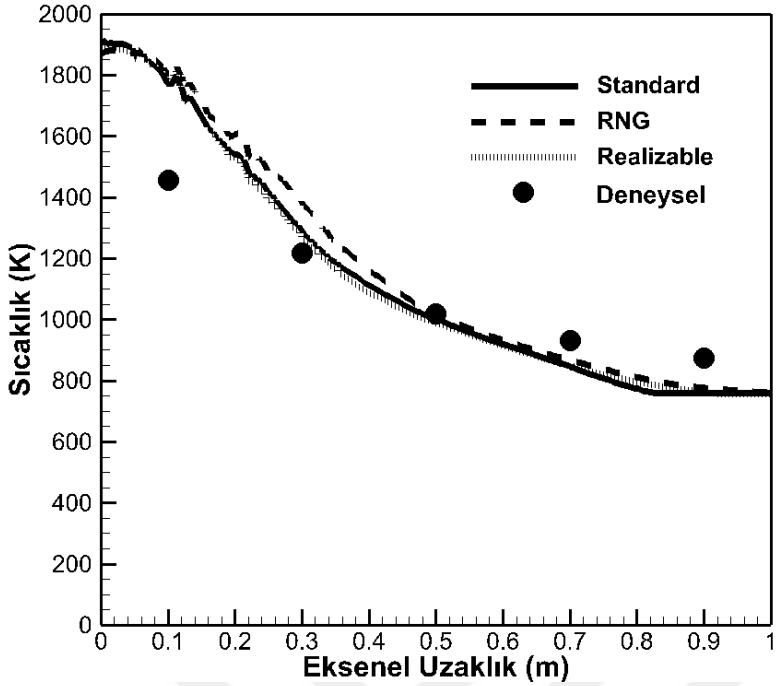
320894 hücre sayılı ağ yapısının belirlenmesinden önce, farklı sayılarda hücre sayısına sahip farklı ağ yapıları ile kok fırını gazı için sayısal modellemeler gerçekleştirilmiş ve bu sayede hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı hücre sayıları için kok fırını gazı için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları Şekil 6.14'te gösterilmiştir. Farklı hücre sayıları için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları değerlendirildiğinde, özellikle 320894 adet hücre içeren ağ yapısından sonraki ağ yapıları için sıcaklık dağılımlarında önemli derecede değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu nedenle, 320894 adet hücre içeren ağ yapısından daha fazla sayıda hücre içeren ağ yapıları ile sayısal

modellemelere devam etmek zaman açısından kayba neden olacaktır. Sonuç olarak, kok fırını gazı için yapılan hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi neticesinde hidrojence zengin kömür gazları için 320894 adet hücre bulunduran ağ yapısı en uygun ağ yapısı olarak seçilmiş ve bundan sonraki modellemelere bu ağ yapısı ile devam edilmiştir.



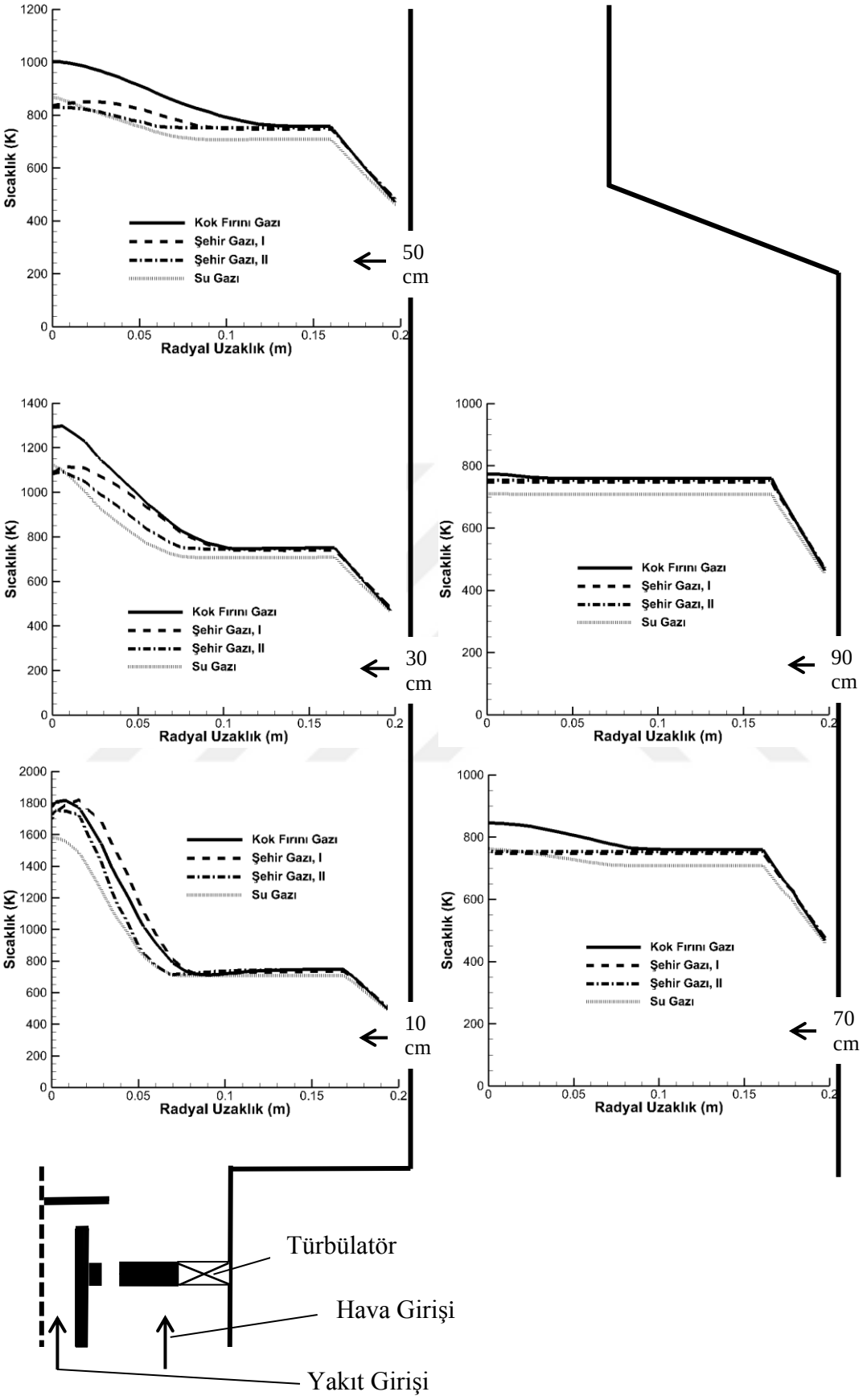
Şekil 6.14. Hidrojence zengin kömür gazları için hücre sayısından bağımsızlaştırma

Hidrojence zengin kömür gazlarının sayısal modellemelerine geçilmeden önce yapılan diğer bir işlem de hidrojence zengin kömür gazlarının yanması için uygun olan türbülans modelinin belirlenmesidir. Bu işlem için, üç farklı türbülans modeli ile kok fırını gazı için sayısal modelleme gerçekleştirilmiş ve çalışmanın deneysel kısmında kok fırını gazı yanması için elde edilen eksenel sıcaklık ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Farklı türbülans modelleri için yapılan sayısal modellemeler neticesinde eksenel sıcaklık dağılımları incelendiğinde, yanma odası boyunca sıcaklık dağılımlarında önemli derecede farklılık olmamakla beraber genel olarak standard k-Ɛ türbülans modeli ile yapılan sayısal modelleme sonuçlarının tıpkı metan yanmasında olduğu gibi deneysel ölçümlerle daha iyi bir uyum içerisinde olduğu Şekil 6.15'ten çıkarılabilir. Bu nedenle, hidrojence zengin kömür gazlarının yanması için türbülans modeli olarak standard k- Ɛ türbülans modeli seçilmiştir.



Şekil 6.15. Hidrojence zengin kömür gazları için uygun türbülans modelinin belirlenmesi

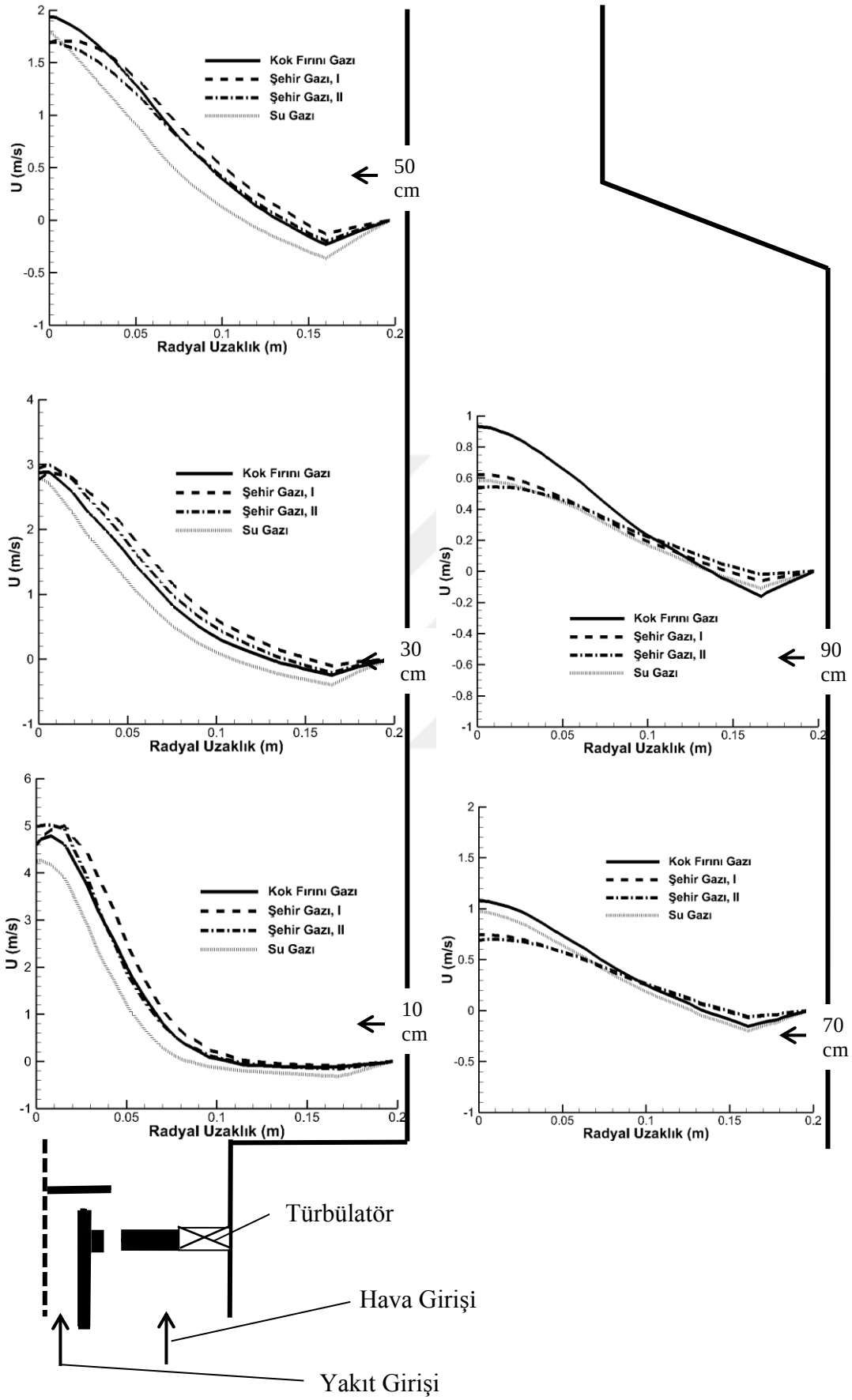
Hidrojence zengin kömür gazlarının radyal sıcaklık dağılımları Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Şekil 6.16'dan da anlaşılacağı üzere, yanma odası boyunca genellikle en iyi yanma performansı kok fırını gazı yanması sırasında gözlemlenmiştir. Sıcaklık seviyelerinin diğer hidrojence zengin kömür gazlarına nazaran biraz daha yüksek olmasının temel nedeni, bünyesinde bulunan hidrojen ve metan miktarlarının bir miktar daha fazla olmasıdır. Hidrojence zengin diğer kömür gazlarının sıcaklık seviyelerine bakılacak olursa, genellikle ısıl değere göre bir sıralanma dikkati çekmektedir. Yanma odasının merkezinden yanma odası duvarına doğru olan sıcaklık seviyeleri, yanma odasının giriş bölgelerinde daha farklı olurken yanma odası çıkışına doğru ilerledikçe bu değerler birbirine daha da yaklaşmaktadır. Bu durum, yanma sonu ürünlerinin yanma odasına homojen bir şekilde yayılması ile açıklanabilir.



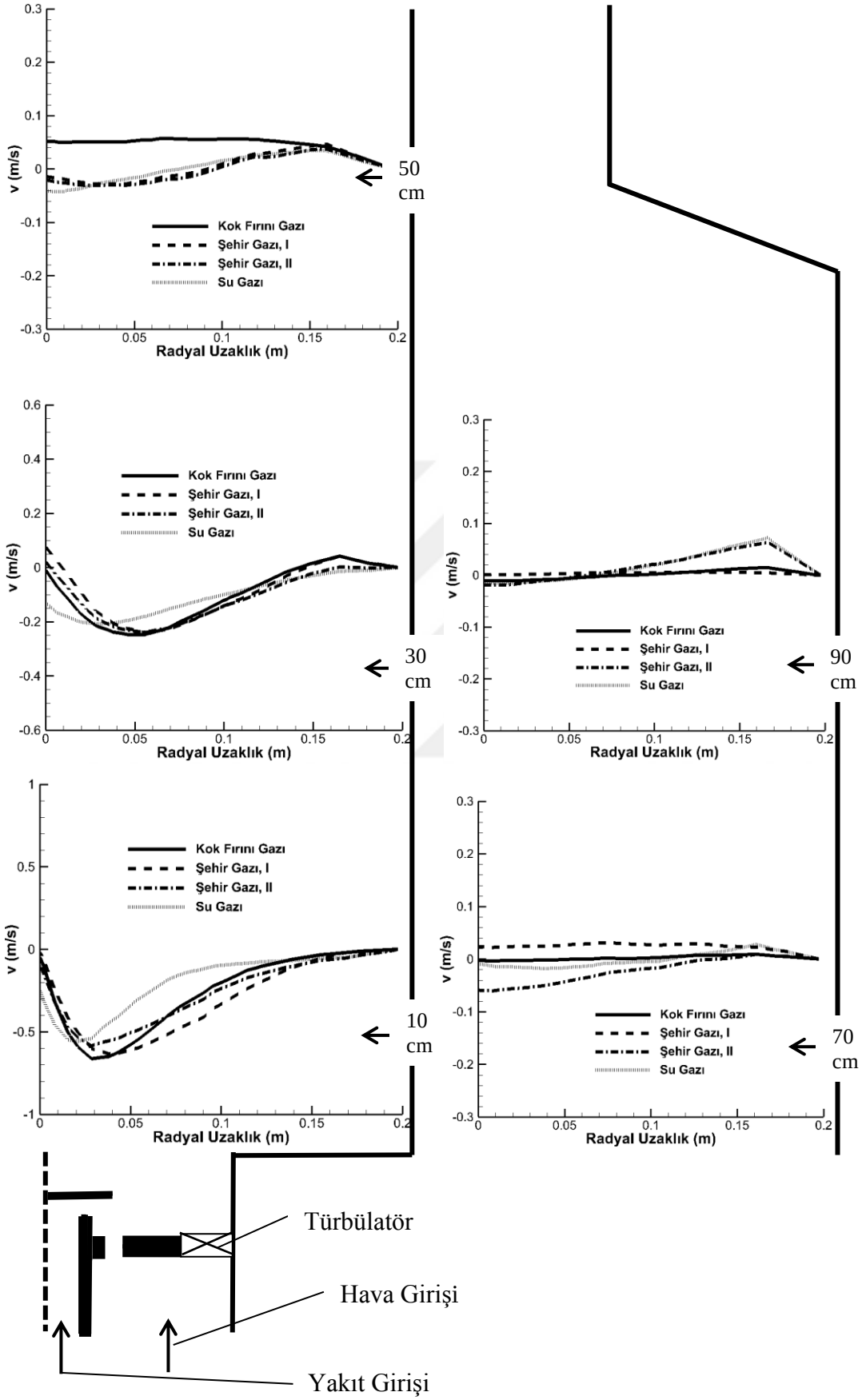
Şekil 6.16. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen radyal sıcaklık dağılımları

Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da, hidrojence zengin kömür gazlarının eksenel, radyal ve teğetsel hız dağılımları sunulmuştur. İlk olarak, Şekil 6.17 değerlendirilecek olursa, tüm hidrojence zengin kömür gazları için yanma odası boyunca farklı eksenel uzaklıklardaki radyal bölgelerde farklı eksenel hızlar tespit edilmiştir. Ancak, buna rağmen, yanma odası boyunca tüm hidrojence zengin kömür gazlarının eksenel hız seviyelerinde ciddi azalmalar belirlenmiştir. Yanma odası girişinde, şehir gazlarının yanması sonucu ortaya çıkan eksenel hız seviyeleri daha yüksek olurken, yanma odası ortalarından itibaren kok fırını gazı yanması ile tahmin edilen eksenel hız seviyeleri daha yüksek olarak belirlenmiştir. Farklı ısıl değere sahip bu yakıtların yakılmasında, 10 kW ısıl güç ve 0.83 eşdeğerlilik oranının sağlanması için farklı miktarlarda yakıt ve hava debileri gerekmektedir. Ayrıca, geliştirilen yakıcıların yakıt girişleri de radyaldir. Bu nedenle, ortaya çıkan farklı eksenel hız dağılımları normaldir.

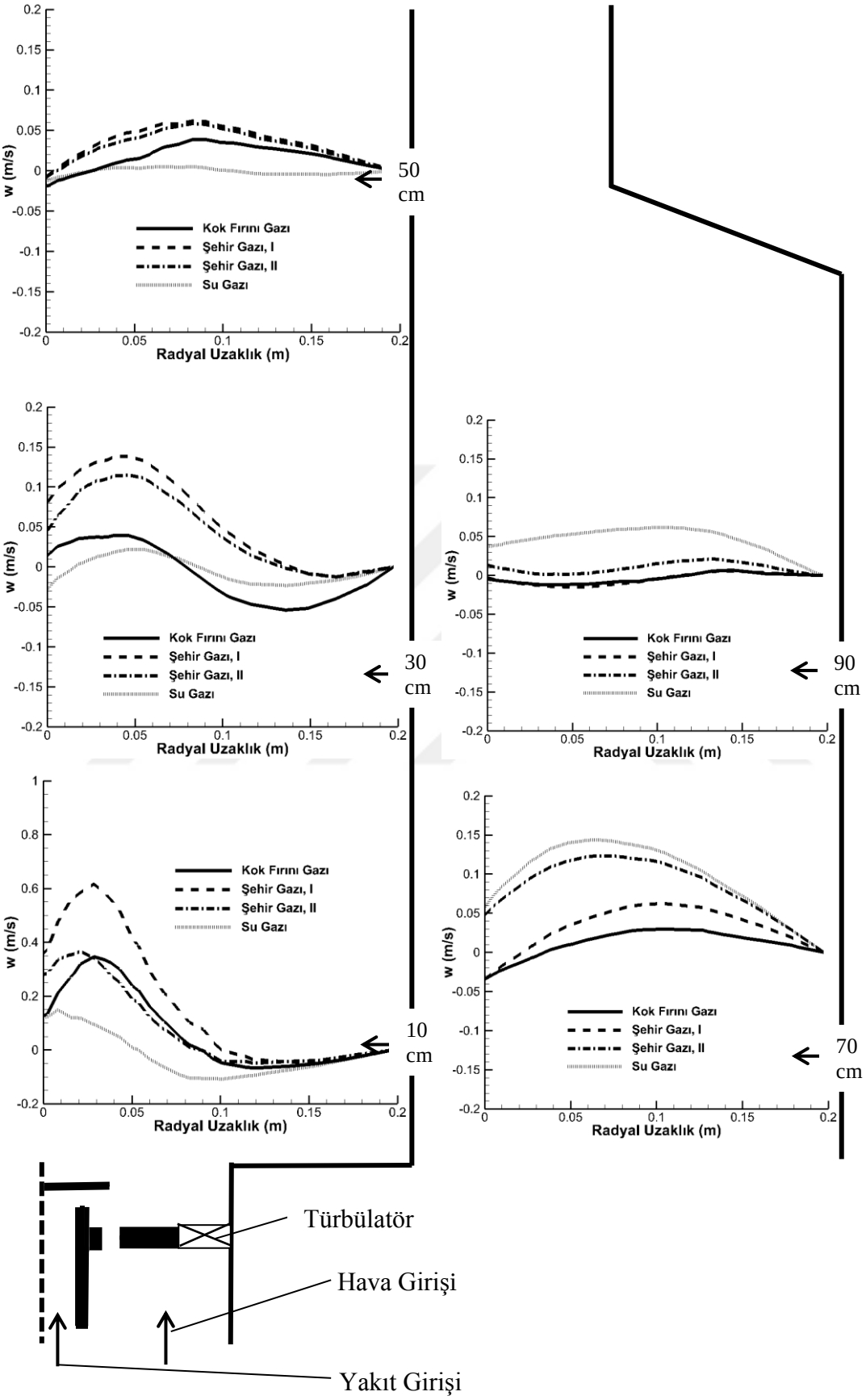
Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da ise radyal ve teğetsel hız dağılımları verilmiştir. Şekil 6.18'de gösterilen radyal hız dağılımları incelendiğinde, hidrojence zengin kömür gazlarının radyal hız seviyelerinde çok ciddi farklılıklar olmadığı söylenebilir. Şekil 6.19'da ile de teğetsel hızlar değerlendirildiğinde, yanma odası çıkışına doğru su gazı için elde edilen değerlerin nispeten daha yüksek olduğu gözükmektedir. Bunun nedeninin radyal olarak giren ve daha yüksek miktarda beslenen su gazının, yanma odası sonuna doğru teğetsel hıza katkı sağlaması olarak düşünülmektedir.



Şekil 6.17. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen eksenel hız dağılımları

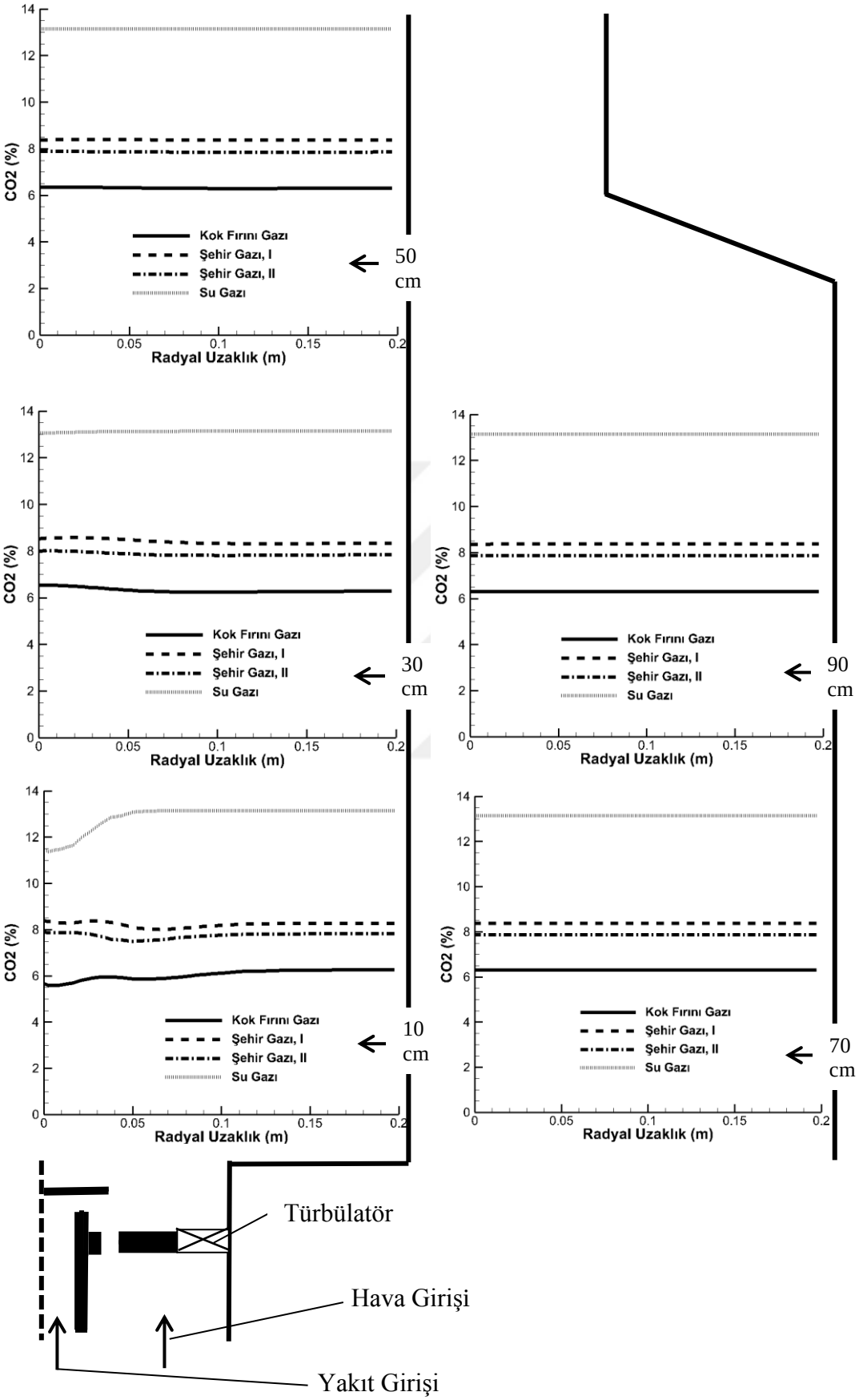


Şekil 6.18. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen radyal hız dağılımları

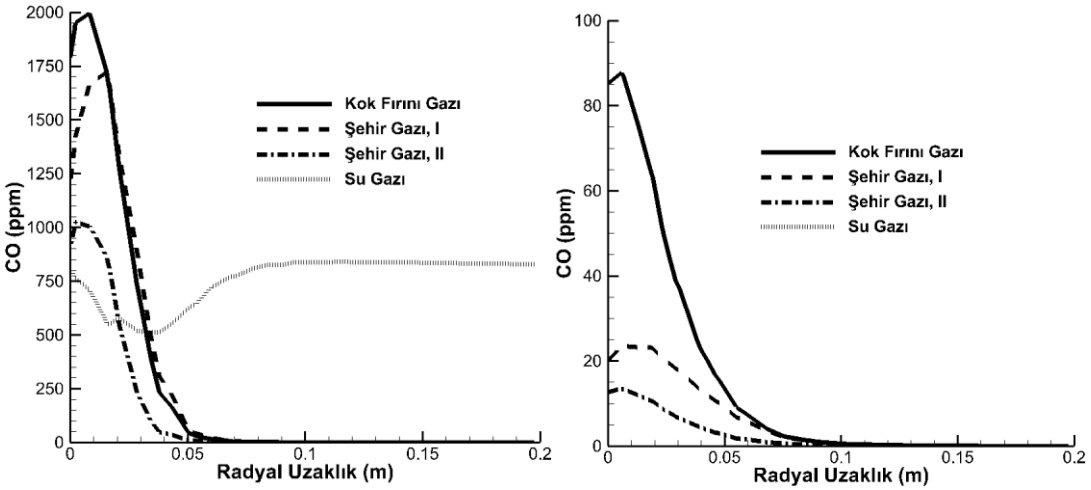


Şekil 6.19. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen teğetsel hız dağılımları

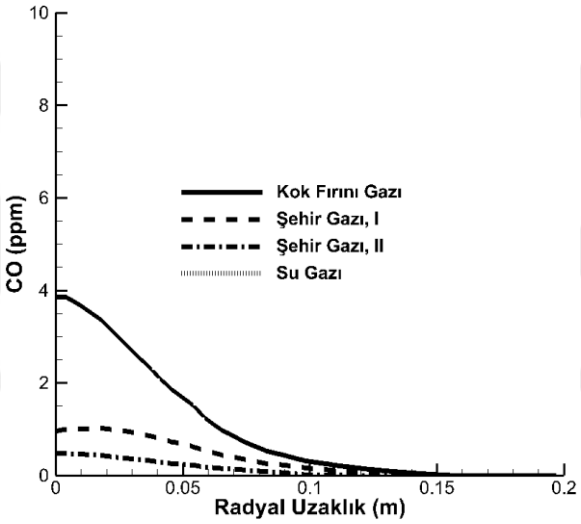
Şekil 6.20'de hidrojence zengin kömür gazlarının yanma odası boyunca elde edilen CO_2 emisyon tahminleri sunulmuştur. Elde edilen tahmin sonuçlarına göre, yanma odası boyunca CO_2 seviyelerinde önemli derecede değişimler gözlemlenmemektedir. Ayrıca, hidrojence zengin kömür gazları, farklı hacimsel oranlarda da olsa bünyelerinde bir miktar CO_2 bulundurmaktadır ve elde edilen CO_2 emisyon tahminlerine, bunların da katkı yaptığı düşünülmektedir. Hidrojence zengin kömür gazlarının CO_2 emisyon tahminleri birbiri ile karşılaştırıldığında, en yüksek emisyon tahmini su gazı yanması esnasında tahmin edilmiştir. Bunun temel nedeninin sayısal modellemeler sırasında su gazı değişim reaksiyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, sonraki bölümlerde sunulan deneysel sonuçlarda su gazı yanması için elde edilen CO_2 değerleri, diğer kömür gazları için elde edilen değerlerden daha düşük olmuştur.



Şekil 6.20. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen CO_2 emisyonları



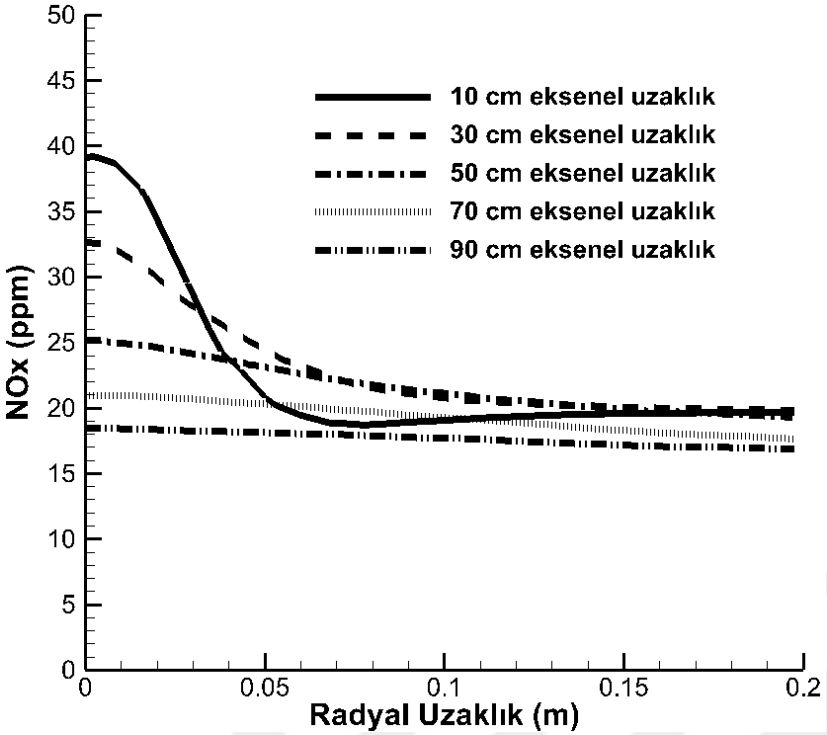
(a) 10 cm eksenel uzaklık (b) 30 cm eksenel uzaklık



(c) 50 cm eksenel uzaklık

Şekil 6.21. Hidrojence zengin kömür gazlarının tahmin edilen CO emisyonları

Şekil 6.21'de ise hidrojence zengin kömür gazları için yanma odasının bazı bölgelerinden elde edilen CO tahmin sonuçları sunulmuştur. Yanma odası çıkışına doğru yanmanın neredeyse tamamlanması nedeni ile tahmin sonuçları oldukça az olduğundan sunulmamıştır. Elde edilen tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, özellikle alev bölgesinde yanmanın henüz tamamlanmadığı, ancak yanma odası ortalarına doğru gidildikçe yanma sonu CO emisyonlarında ciddi azalmalar olduğu belirlenmiştir.

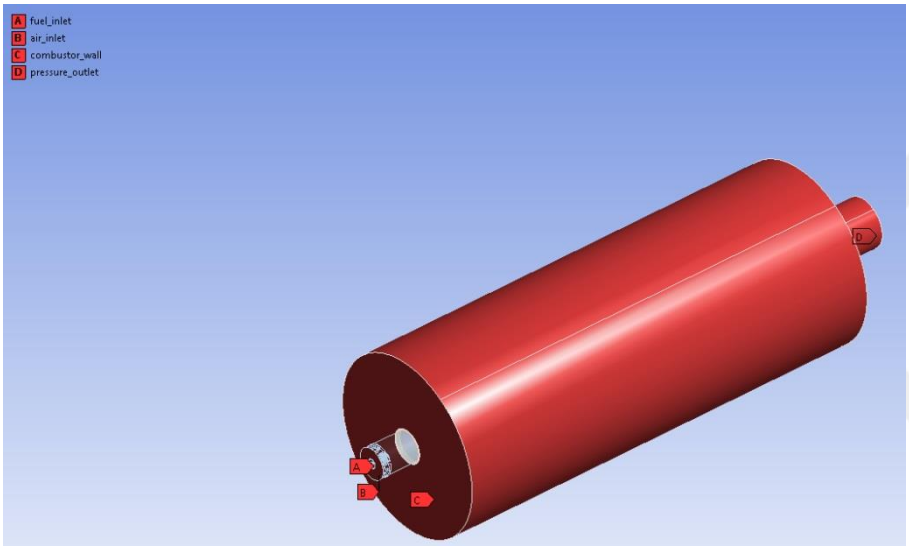


Şekil 6.22. Kok fırını gazının tahmin edilen NO_X emisyonları

Şekil 6.22'de ise hidrojence zengin kömür gazlarından kok fırını gazı için elde edilen NO_X tahminleri sunulmuştur. Fluent son işlemcisi ile gerçekleştirilen NO_X tahminlerine göre alev bölgesinde yüksek olan NO_X seviyeleri, yanma odası sonuna doğru gidildikçe bir miktar azalmış ve yanma odası çıkışında da 20 ppm dolaylarında tahmin edilmiştir. Kok fırını gazı için elde edilen sıcaklık dağılımları düşünüldüğünde, ısıl NO_X mekanizması etkisi ile NO_X tahminlerinin bu dağılımla uygun olduğu rahatlıkla söylenebilir.

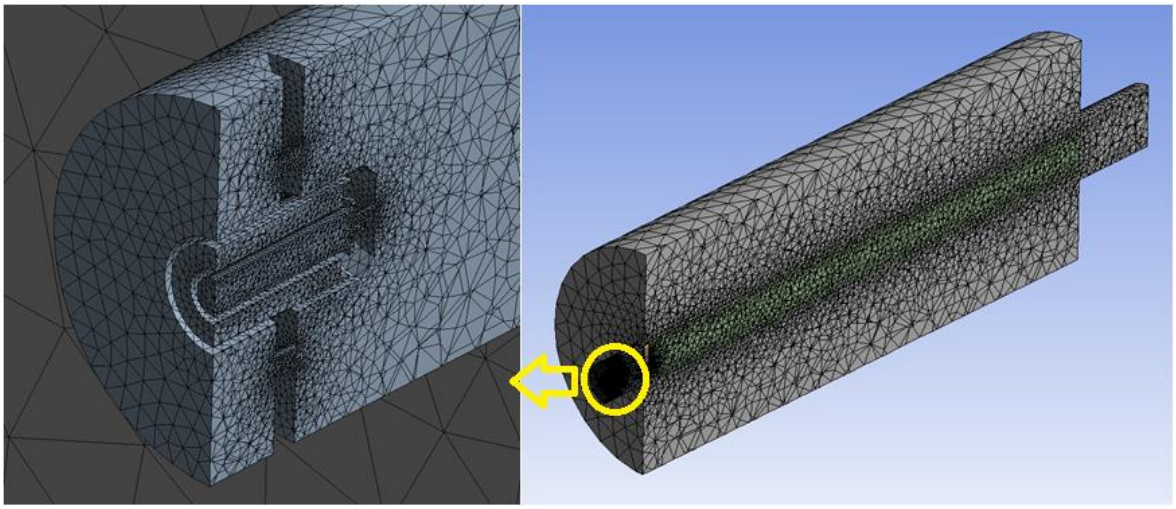
6.1.3. Düşük kalorili kömür gazlarının sayısal modelleme sonuçları

Bu bölümde, düşük kalorili kömür gazlarının (jeneratör gazı ve yüksek fırın gazı) yanma parametreleri araştırılmıştır. Şekil 6.23'te düşük kalorili kömür gazı yakıcısının yanma odasına entegre edilmesi neticesinde oluşturulan akış hacmi gösterilmiştir. Şekil 6.23'te, akış hacmi üzerindeki yakıt ve hava girişleri, yanma odasının duvarları ve yanma odası çıkışı da belirtilmiştir.

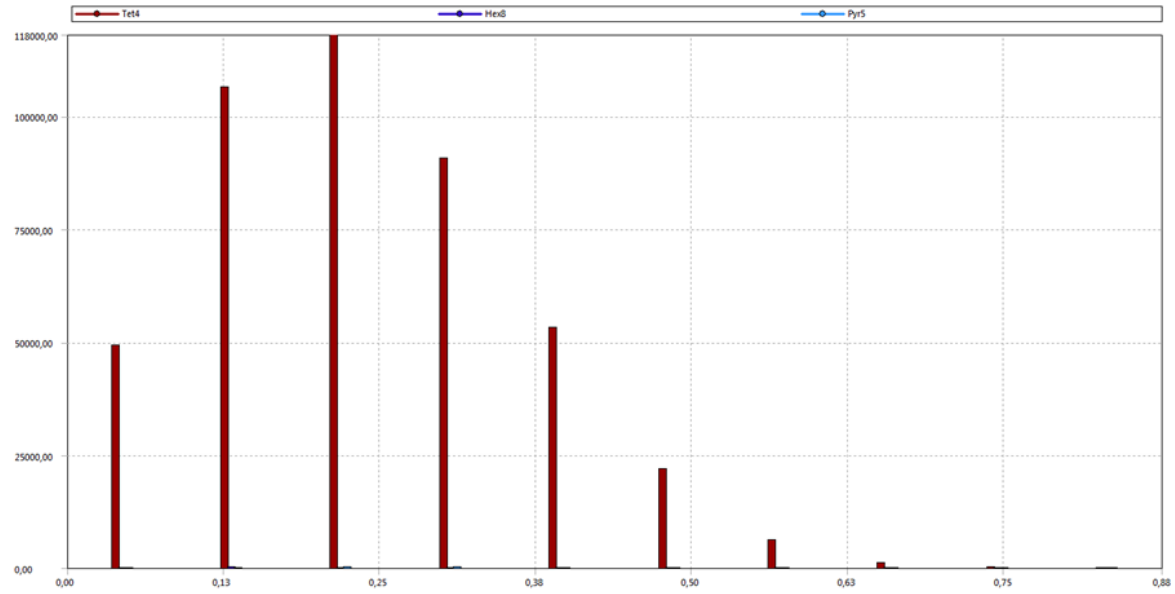


Şekil 6.23. Düşük kalorili kömür gazlarının akış hacmi

Şekil 6.24'te ise düşük kalorili kömür gazları için oluşturulan akış hacminin ağ yapısı sunulmuştur. Metan ve hidrojence zengin kömür gazı yakıcılarının bulunduğu bölgelerde olduğu gibi düşük kalorili kömür gazı yakıcısının ve türbülatörünün bulunduğu bölgede de ağ yapısı oldukça sıklaştırılmıştır. Bu ağ yapısında 447350 adet tetrahedron şeklinde hücre ve 83134 adet de düğüm noktası bulunmaktadır. Bu ağ yapısı için en yüksek "Skewness" değeri 0,87, ortalama "Skewness" değeri 0,23 ve en düşük "Orthogonal Quality" değeri de 0,23 şeklindedir. Ayrıca, Şekil 6.25'te düşük kalorili bu kömür gazları için oluşturulan akış hacmindeki hücrelerin Skewness değerlerinin dağılımı gösterilmiştir.



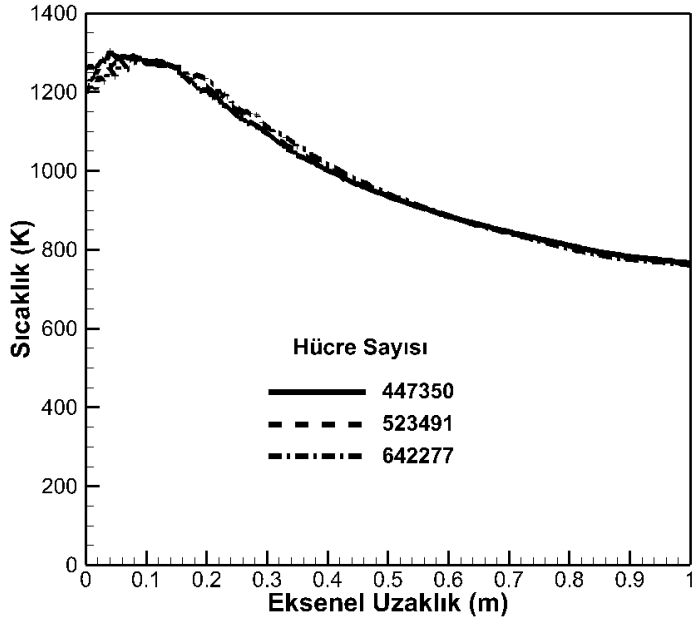
Şekil 6.24. Düşük kalorili kömür gazları için oluşturulan akış hacminin ağ yapısı



Şekil 6.25. Düşük kalorili kömür gazları için oluşturulan akış hacmindeki hücrelerin Skewness değerleri

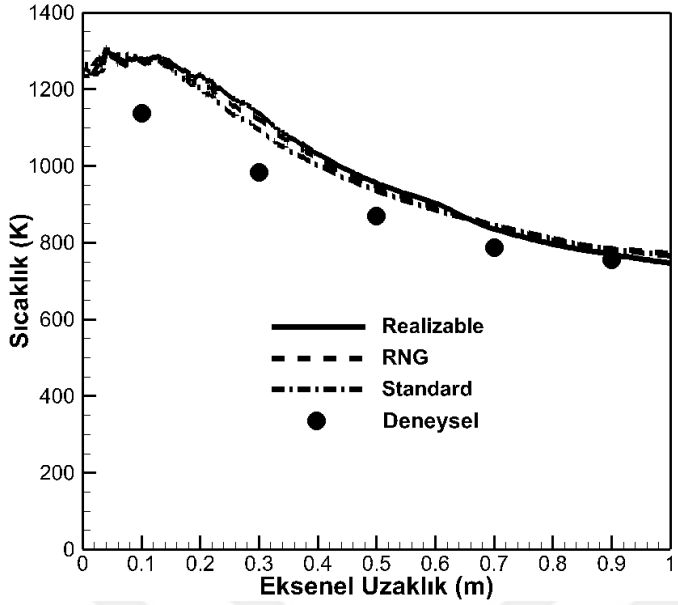
447350 hücre sayılı ağ yapısının belirlenmesinden önce, farklı sayılarda hücre sayısına sahip farklı ağ yapıları ile jeneratör gazı için sayısal modellemeler gerçekleştirilmiş ve bu sayede hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Farklı hücre sayıları için jeneratör gazı için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları Şekil 6.26'da sunulmuştur. Farklı hücre sayıları için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları değerlendirildiğinde, özellikle 447350 adet hücre içeren ağ yapısından sonraki ağ yapıları için sıcaklık dağılımlarında önemli derecede değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu sayıdan daha az sayıda hücre içeren ağ yapıları ile yapılması denenen sayısal modellemeler de yakınsamamıştır.

Bu nedenle, jeneratör gazı için yapılan hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi neticesinde düşük kalorili kömür gazları için 447350 adet hücre bulunduran ağ yapısı en uygun ağ yapısı olarak seçilmiş ve bundan sonraki modellemelere bu ağ yapısı ile devam edilmiştir.



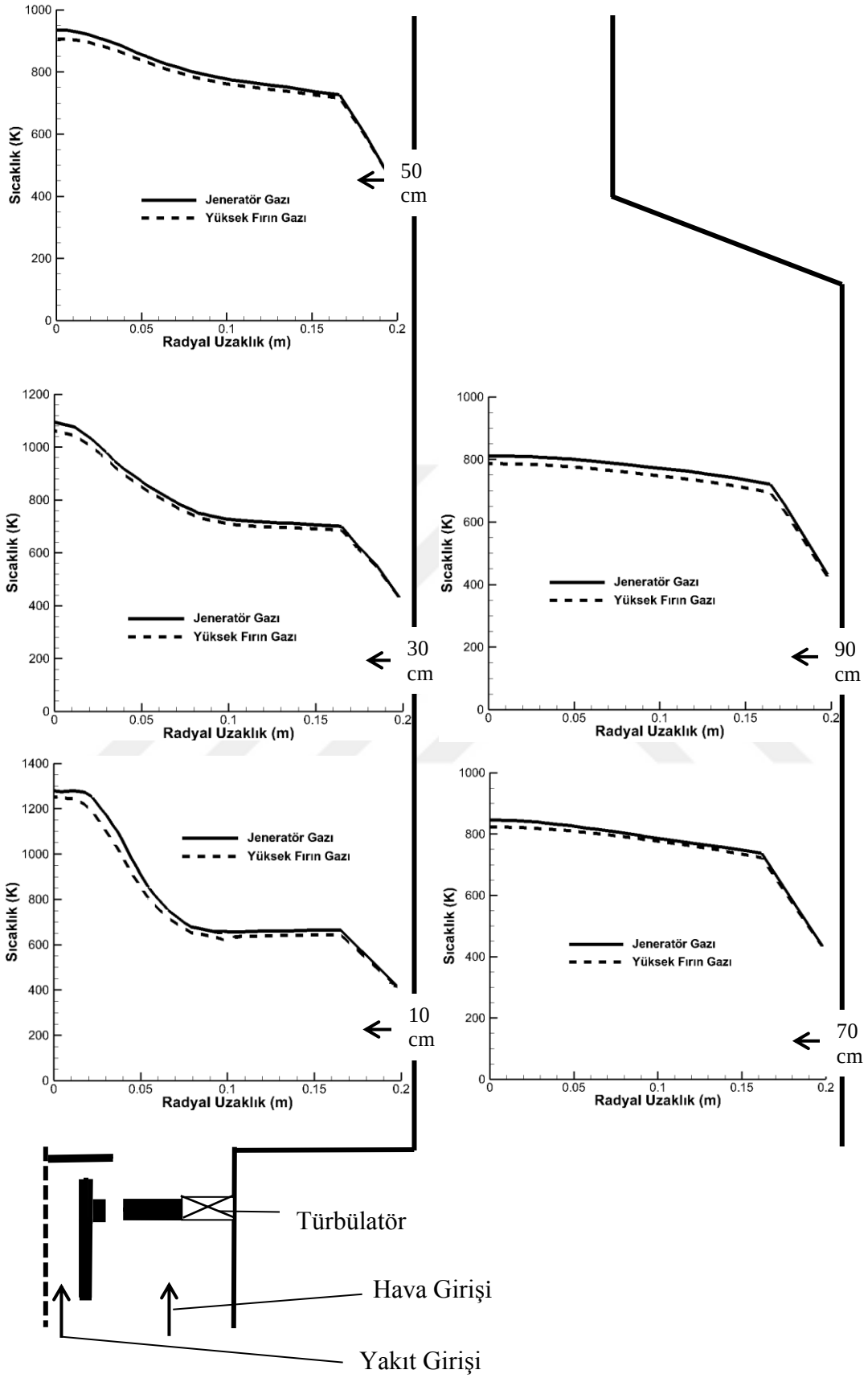
Şekil 6.26. Düşük kalorili kömür gazları için hücre sayısından bağımsızlaştırma

Düşük kalorili kömür gazlarının sayısal modellemelerine geçilmeden önce yapılan diğer bir işlem de, tıpkı metan ve hidrojence zengin kömür gazlarının yanma parametrelerinin tahminlerinde olduğu gibi düşük kalorili kömür gazları için uygun olan türbülans modelinin belirlenmesidir. Bu işlem için, üç farklı türbülans modeli ile jeneratör gazı için sayısal modelleme gerçekleştirilmiş ve çalışmanın deneysel kısmında jeneratör gazı yanması için elde edilen eksenel sıcaklık ölçümleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma Şekil 6.27'de gösterilmiştir. Farklı türbülans modelleri için yapılan sayısal modellemeler neticesinde elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları incelendiğinde, yanma odası boyunca sıcaklık dağılımlarında önemli derecede farklılık olmamakla beraber genel olarak standard k-Ɛ türbülans modeli ile yapılan sayısal modelleme sonuçlarının tıpkı metan ve hidrojence zengin kömür gazı yanma tahminlerinde olduğu gibi deneysel ölçümlere daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, düşük kalorili kömür gazlarının yanması için uygun türbülans modeli olarak standard k- Ɛ türbülans modeli seçilmiştir.



Şekil 6.27. Düşük kalorili kömür gazları için uygun türbülans modelinin belirlenmesi

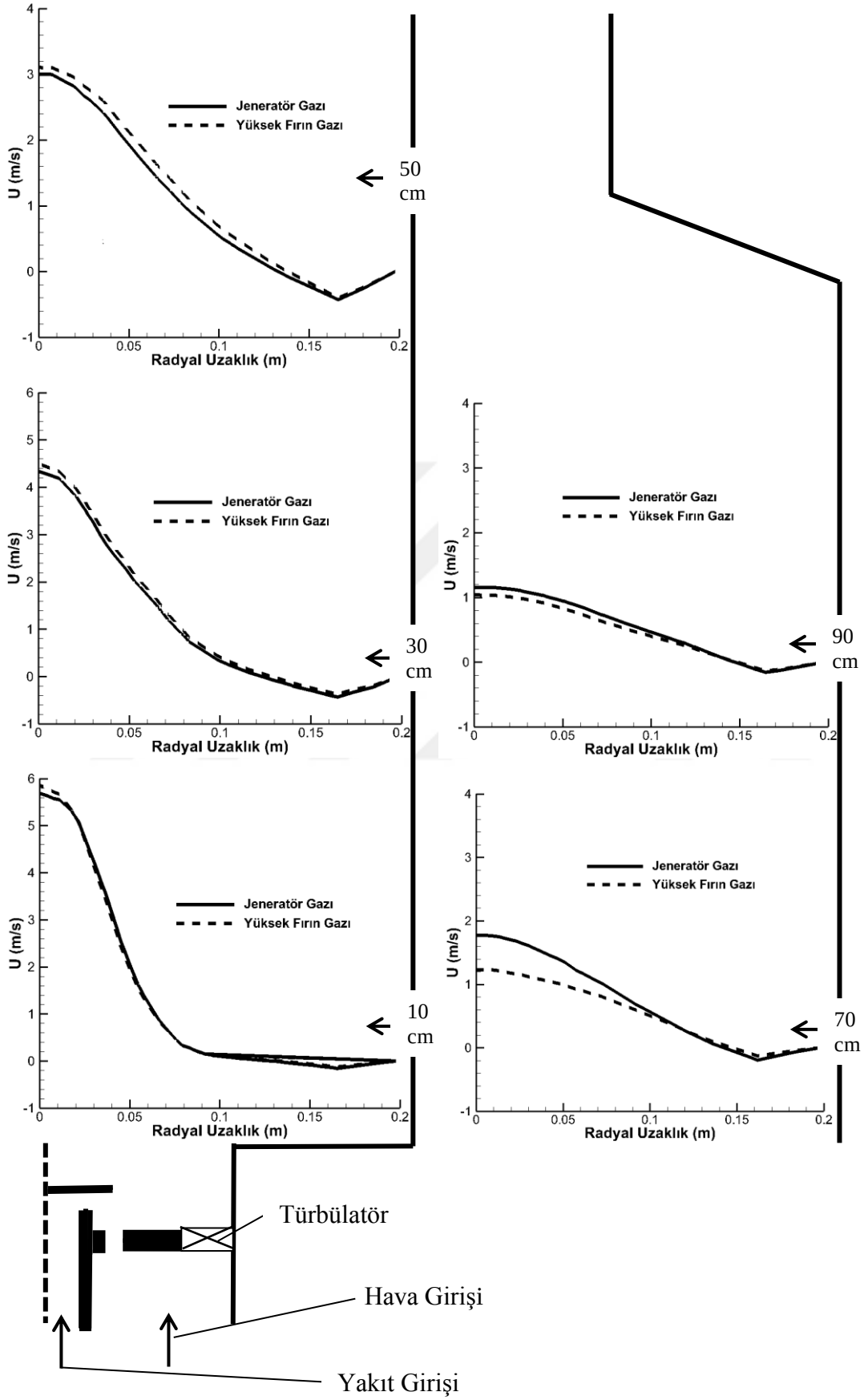
Düşük kalorili kömür gazları için yanma odası boyunca elde edilen sıcaklık tahminleri Şekil 6.28'de gösterilmiştir. Elde edilen tahmin sonuçları değerlendirildiğinde, metan ve hidrojence zengin kömür gazlarına göre oldukça düşük yanma performansına sahip oldukları rahatlıkla söylenebilir. Bu durumun en önemli nedeni, düşük kalorili kömür gazlarında yanabilir bileşenlerin oldukça az olmasıdır. Jeneratör gazı ile yüksek fırın gazının yanma performansları karşılaştırılacak olursa, jeneratör gazı için elde edilen sıcaklık tahmin sonuçlarının yüksek fırın gazına göre bir miktar daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Çünkü, jeneratör gazında % 12 dolaylarında hidrojen bulunurken, yüksek fırın gazında bulunan hidrojen miktarı yok denecek kadar azdır.



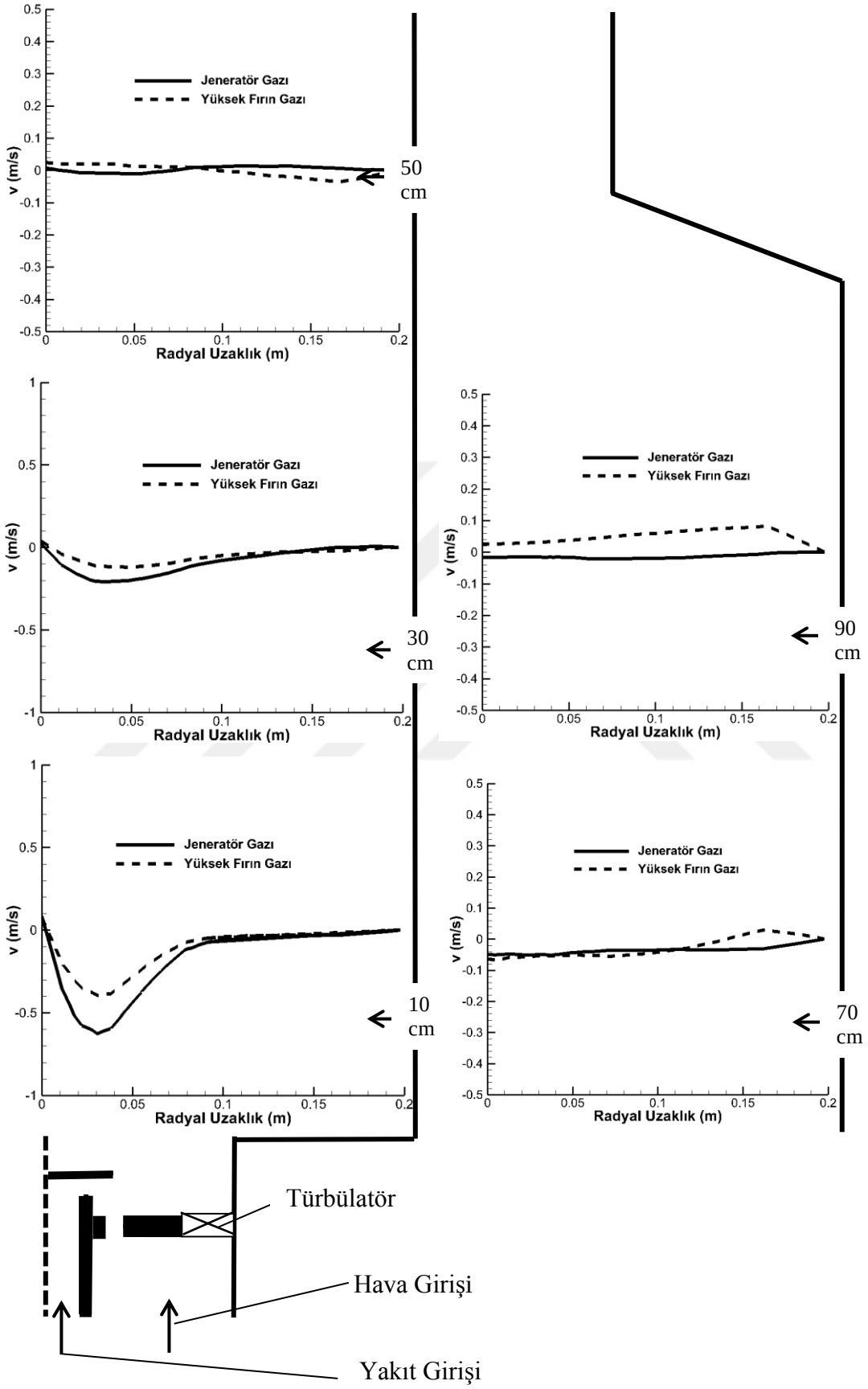
Şekil 6.28. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen radyal sıcaklık dağılımları

Şekil 6.29'da düşük kalorili kömür gazlarının eksenel hız dağılımları sunulmuştur. Şekil 6.29'a bakıldığında, her iki düşük kalorili kömür gazı için de en yüksek eksenel hız seviyelerine alev bölgesinde ulaşılmıştır. Bu durum, yakıcı çıkışındaki yakıt ve havanın belirli bir hızla yanma odasına girmelerinden ve reaksiyonun bu bölgede gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. 10 cm eksenel uzaklıktaki radyal dağılım incelenecek olursa, yanma odası duvarlarına gidildikçe eksenel hız seviyelerinde azalma olduğu ve yanma odası duvarına yakın bölgelerde de neredeyse sıfır olduğu anlaşılmaktadır. Yanma odası çıkışına doğru gidildikçe her iki yakıt için de eksenel hız seviyelerinde azalmalar tespit edilmiştir. Yanma odası boyunca, yanma odası duvarlarına yakın bölgelerde, eksenel hızlar bazen negatif değerlere düşmüştür. Bu durum, bu bölgelerin resirkülasyon bölgeleri olduğu anlamını taşımaktadır. Jeneratör ve yüksek fırın gazının eksenel hız dağılımları karşılaştırılacak olursa, yanma odasının ortalarına kadar yüksek fırın gazının eksenel hızının jeneratör gazının eksenel hızından biraz daha fazla olduğu rahatlıkla söylenebilir. 10 kW ısıl güçte yakılan bu yakıtlardan ısıl değeri daha düşük olan yüksek fırın gazından daha fazla beslenmesinden dolayı bu durum doğal karşılanabilir.

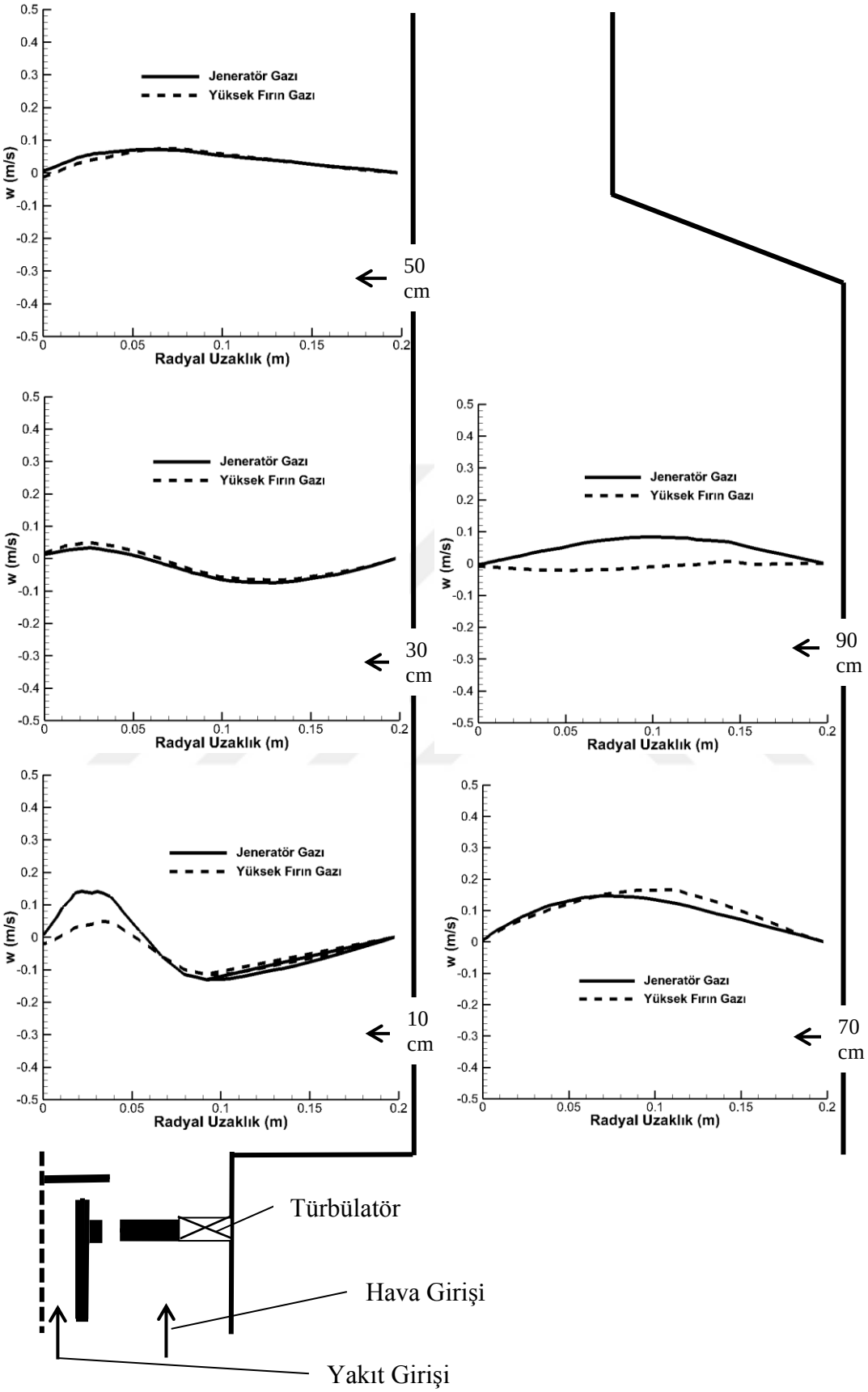
Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'de ise radyal ve teğetsel hız dağılımları verilmiştir. Şekil 6.30'da gösterilen radyal hız dağılımları incelendiğinde, düşük kalorili kömür gazlarının radyal hız seviyelerinde yanma odası boyunca çok ciddi farklılıklar olmadığı söylenebilir. Alev bölgesindeki veriler değerlendirilecek olursa, buradaki dalgalanmanın nedenine de kullanılan yakıcılarda 15º açılı türbülatör bulunması ve yakıtların yanma bölgesine radyal olarak girmesi gösterilebilir. Şekil 6.31'deki teğetsel hızlar değerlendirilecek olursa, özellikle alev bölgesinde, tıpkı radyal hızlarda olduğu gibi bir miktar dalgalanma meydana gelmektedir. Bu durum da radyal hızlarda meydana gelen durum ile rahatlıkla açıklanabilir.



Şekil 6.29. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen eksenel hız dağılımları



Şekil 6.30. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen radyal hız dağılımları



Şekil 6.31. Düşük kalorili kömür gazlarının tahmin edilen teğetsel hız dağılımları

6.2. Deneysel Ölçüm Sonuçları

Çalışmanın bu bölümünde, metan ve kömür gazlarının yanma ve emisyon davranışlarının belirlenmesi için Tübitak-1005 "114M668" kodlu proje kapsamında gerçekleştirilen ve detayları "Deney Sistemi ve Ekipmanları" bölümünde sunulan deneysel çalışma sonuçları sunulmuştur. Bu kapsamda, metan, hidrojence zengin kömür gazları ve düşük kalorili kömür gazları için yanma odasının eksenel ve radyal bölgelerinden sıcaklık, CO, CO_2, NO_X ve O_2 emisyonları ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri gerçekleştirildikten sonra, daha önceki bölümlerde detayı sunulan sıcaklık ölçümlerine ilişkin düzeltmeler, ölçümün yapıldığı eksenel uzaklıktan elde edilen duvar sıcaklıkları kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, çalışmanın bu bölümünde sunulan tüm sıcaklık ölçüm sonuçları düzeltilmiş sonuçlardır. Sayısal modellemelerde olduğu gibi yakıtlar, kendisi için tasarlanan ve imal edilen yakıcılar kullanılarak yakılmıştır. Bu ölçümlere ek olarak, düşük kalorili kömür gazlarını yakabilmek için tasarlanan yakıcının merkezinden alev bölgesine hidrojen beslemesi gerçekleştirilmiş ve bu hidrojen beslemesi ile hidrojenin düşük kalorili kömür gazlarının yanma ve emisyon parametrelerine olan etkileri de araştırılmıştır.

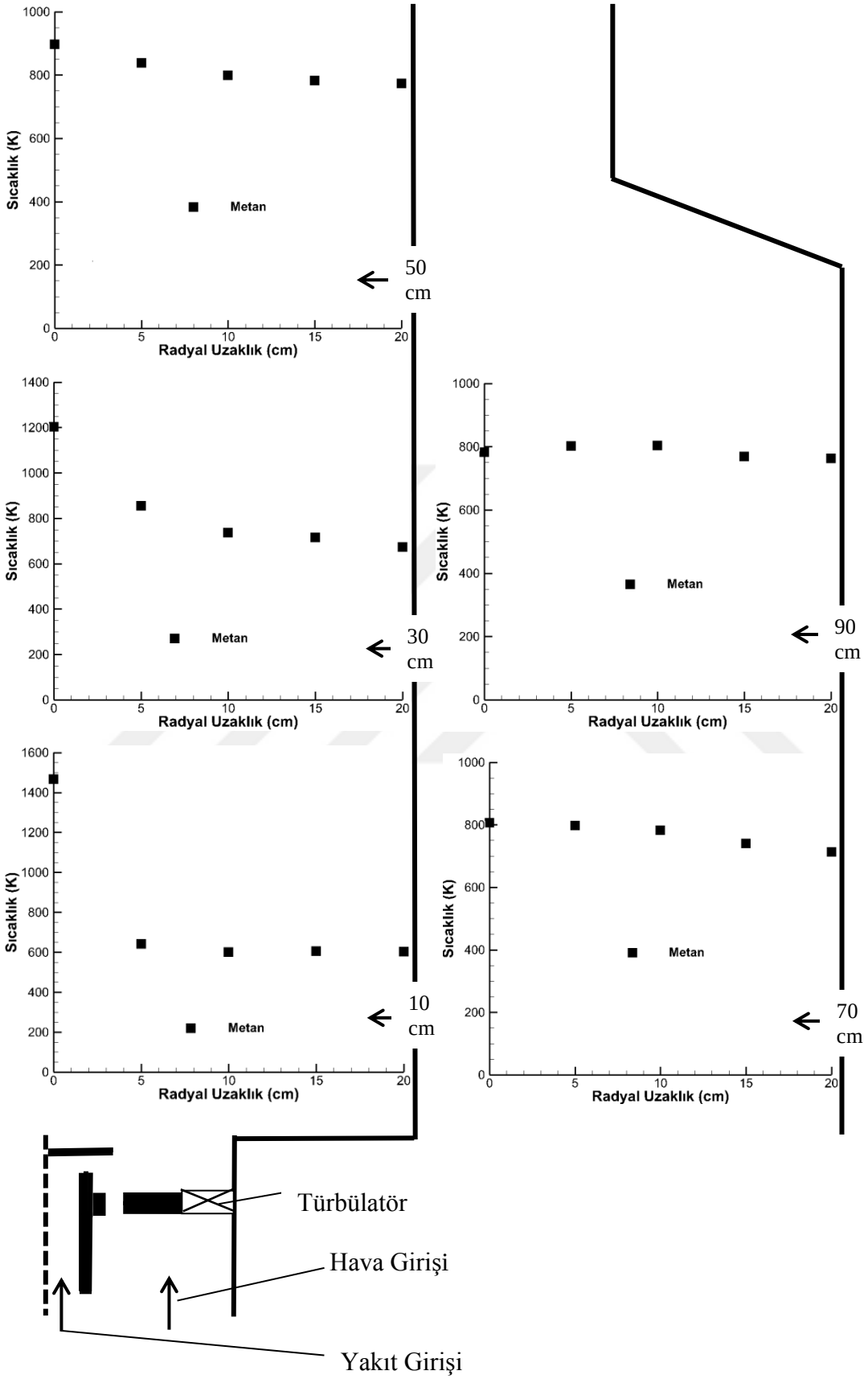
6.2.1. Metanın deneysel ölçüm sonuçları

Metan yakıtı için yanma odasının farklı noktalarından ölçülen sıcaklık değerlerine ilişkin detaylar Şekil 6.32'de sunulmuştur. Yanma odası boyunca elde edilen en yüksek sıcaklık değerine alev bölgesinden elde edilen 1466 K'lik sıcaklık değeri ile ulaşılmıştır. Alev bölgesinden yanma odası duvarına doğru gidildikçe, elde edilen sıcaklık değerlerinde hızlı bir düşme meydana gelmiştir. Bu durum, kullanılan yanma odasının ani genişlemeli bir yanma odası olması sebebiyle gerçekleşmektedir. Ayrıca, bir önceki bölümde sunulan metan için eksenel hız tahminlerine dikkat edilecek olursa, yanma odasının bu bölgesindeki hız seviyelerinin neredeyse sıfır olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisindeki hareketleri bu bölgeye doğru gerçekleşmemektedir. Ancak, yanma odası çıkışına doğru gidildikçe, eksenel yöndeki (radyal olarak 0) sıcaklık değerlerinde azalmalar tespit edilirken radyal yönde, yani yanma odası merkezinden yanma odası duvarına doğru, belirlenen sıcaklık değerlerinde, 10 cm eksenel uzaklıktan alınan değerlere kıyasla bir atış olduğu da rahatlıkla söylenebilir. Benzer şekilde, bir önceki bölümde sunulan eksenel hız dağılım tahminleri incelendiğinde, bu durumun şaşırtıcı bir sonuç olmayacağı görülmektedir. Yanma odası çıkışına doğru

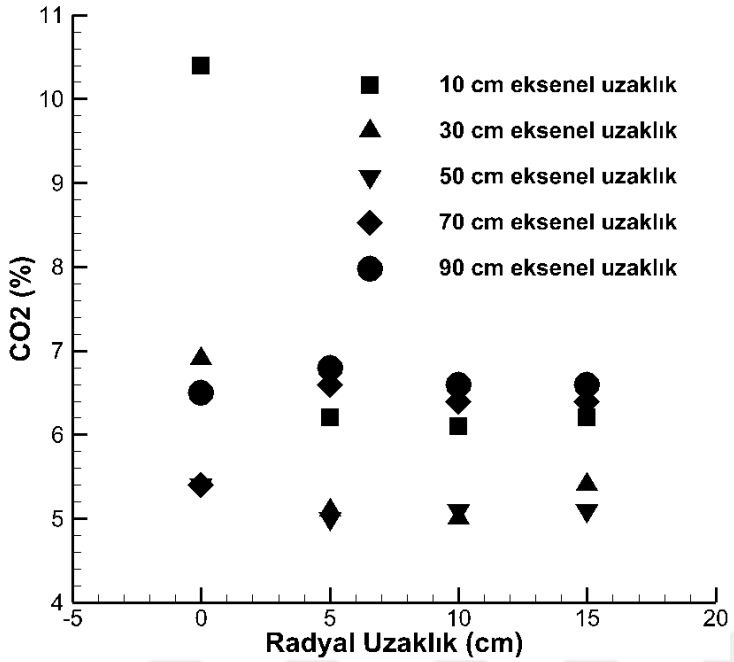
gidildikçe, yanma odası merkezi ile yanma odası duvarından metan için alınan sıcaklık değerleri birbirine oldukça yakın olmaktadır. Bu durum da, yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisine homojen olarak dağıldığını, başka bir deyişle, metan alevinin yanma odasını istenilen derecede doldurabildiğini açıklamaktadır.

30 cm eksenel uzaklığın merkezinden elde edilen sıcaklık değeri yaklaşık 1203 K olurken, bu değer 50 cm, 70 cm ve 90 cm'den sırasıyla, 897 K, 806 K ve 782 K olarak belirlenmiştir. Yanma odasının çıkışına doğru yanma odasının merkezinden elde edilen sıcaklık değeri düşmeye devam etmekte olup yanma odası çıkışından, yani sistemin bacasından, elde edilen sıcaklık değeri de yaklaşık 790 K civarında olmuştur. Ayrıca, Şekil 6.32'de, yanma odası boyunca farklı eksenel uzaklıklar için 20 cm radyal uzaklıklardan elde edilmiş sıcaklık değerleri, bu eksenel uzaklıklardaki duvar sıcaklıklarını göstermekte olup, sıcaklık düzeltmeleri de bu değerlere göre gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.33'de ise metan yanması neticesinde oluşan CO_2 emisyonlarının yanma odası boyunca alınan ölçümleri sunulmuştur. Özellikle, alevin içerisinden alınan ölçüm sonucu irdelendiğinde, CO_2 emisyonunun oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum, alev bölgesinde reaksiyonun tamamlandığı anlamına gelmektedir. Yanma odası boyunca eksenden alınan CO_2 değerleri değerlendirilecek olursa, yanma odası çıkışına doğru bir azalma olduğu düşünülebilir. Ancak, radyal bölgeden alınan ölçüm sonuçlarına bakılacak olursa, yanma odası çıkışına doğru CO_2 emisyonlarındaki artış görülebilir. Bu durumun nedeninin, kullanılan yakıcı tipinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü, benzer sonuçlara hidrojence zengin kömür gazlarında ve düşük kalorili kömür gazlarında ulaşılmıştır. Kullanılan yakıcıların yakıt girişleri radyal olduğundan, bu yakıcılar, yanma sonu emisyonlarının bir kısmını yanma odasının ekseninden duvarlarına doğru yönlendirmiştir.

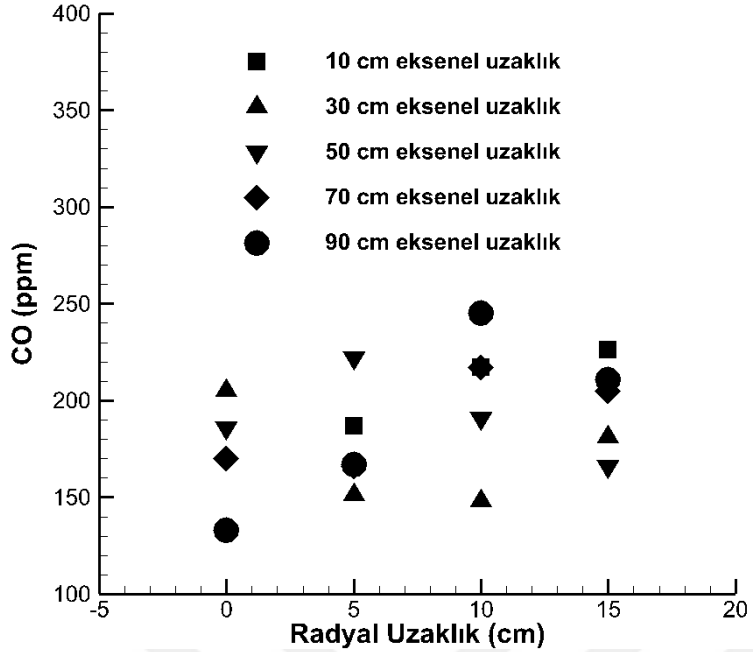


Şekil 6.32. Metan için ölçülen radyal sıcaklık dağılımı



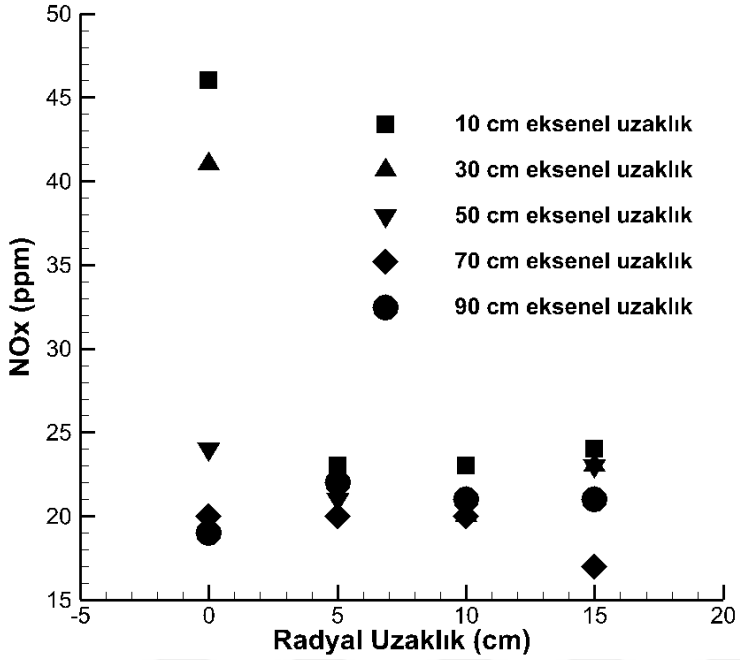
Şekil 6.33. Metan için ölçülen CO_2 emisyonları

Şekil 6.34, metan yanması neticesinde ortaya çıkan ve nedeni büyük ölçüde eksik yanmadan kaynaklanan CO emisyonlarının yanma odası boyunca alınan ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Öncelikle, kare imgesi ile gösterilen ve 10 cm eksenel uzaklıktan alınan radyal ölçüm sonuçlarında, alevin içerisinden alınan ölçüm sonucu sunulmamıştır. Bunun nedeni, alevin içerisinden alınan CO emisyon değerinin 4800 ppm dolaylarında olmasıdır. Bu değere göre de alev bölgesinde reaksiyonun henüz tamamlanmadığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak Şekil 6.33'e göre özellikle alev bölgesinde CO_2 emisyonlarının yüksek olmasının nedeninin, bu bölgede neredeyse hiç O_2 olmamasından kaynaklanması olduğu söylenebilir. Şekil 6.34'teki CO emisyon ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, yanma odası boyunca CO emisyonlarının azaldığı ve böylece yanmanın neredeyse tamamlandığı sonucu da çıkarılacaktır. Yanma odasının çıkışından alınan CO emisyon seviyeleri 150 ppm'den daha az olacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 6.34. Metan için ölçülen CO emisyonları

Şekil 6.35'te de metan yanması neticesinde oluşan NO_X emisyonlarının toplamı gösterilmiştir. En yüksek NO_X seviyelerine 46 ppm ile alev bölgesinde ulaşıldığı Şekil 6.35'e bakıldığında hemen anlaşılmaktadır. Metan yanması neticesinde oluşacak olan NO_X'ların ısıl ve ani NO_X mekanizmaları ile oluşması beklenmektedir. Bu bölge, alev bölgesi olduğundan ısıl NO_X mekanizması oldukça baskın bir rol oynamakta ve yanma odası boyunca en yüksek NO_X seviyelerine bu bölgede ulaşılmaktadır. Yanma odası çıkışına doğru ilerledikçe sıcaklığın azalması ile ilişkili olarak NO_X seviyelerinde de azalmalar tespit edilmiş olup yanma odası çıkışına doğru bu değer 20 ppm'nin altında kalmaktadır. Yanma odası boyunca radyal yöndeki NO_X ölçümleri için Şekil 6.32 incelenecek olursa, tıpkı sıcaklık dağılımlarında olduğu gibi, NO_X seviyeleri de sıcaklık seviyelerine göre oldukça uyumlu sonuçlar vermiştir. Özellikle yanma odasının ortalarından itibaren, yanma odasının merkezinden yanma odasının duvarlarına doğru olan ölçüm sonuçları birbirine oldukça yakın olmuştur.



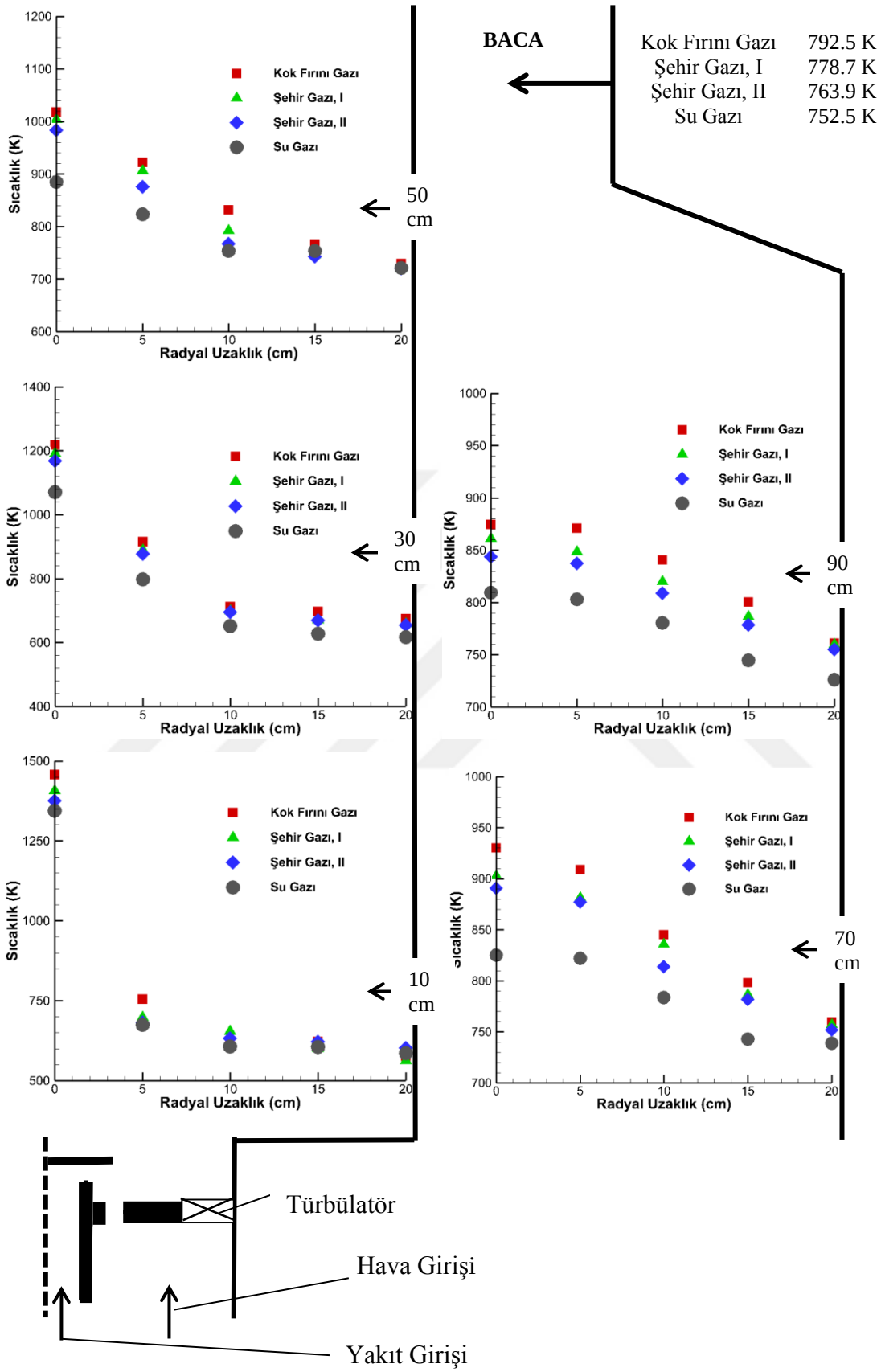
Şekil 6.35. Metan için ölçülen NO_X emisyonları

6.2.2. Hidrojence zengin kömür gazlarının deneysel ölçüm sonuçları

Hidrojence zengin kömür gazlarını yakabilmek için tasarlanan ve çalışmanın "Deney Sistemi ve Ekipmanları" bölümünde detayları sunulan hidrojence zengin kömür gazı yakıcısı kullanılarak hidrojence zengin kömür gazları yakılmış ve yanma sonucu ölçülen ve düzeltilen sıcaklık ve emisyon değerleri çalışmanın bu bölümünde sunulmuştur. İlk olarak, hidrojence zengin kömür gazlarının yanma odası boyunca elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 6.36'da gösterilmiştir. Şekil 6.36'dan yapılabilecek ilk çıkarım, tüm hidrojence zengin kömür gazları için elde edilen en yüksek sıcaklık değerlerine alevin içerisinden alınan ölçümler neticesinde ulaşıldığıdır. Bu değerler, kok fırını gazı için 1457 K, şehir gazı I için 1406 K, şehir gazı II için 1376 K ve su gazı için de 1345 K dolaylarında olmuştur. Hidrojence zengin kömür gazlarının alev sıcaklıkları birbirleri ile karşılaştırılacak olursa, yanabilir bileşen bakımından hidrojen ve metan miktarlarının diğer hidrojence zengin kömür gazlarına göre bir miktar daha fazla olmasından dolayı en yüksek alev sıcaklığına ve yanma odası boyunca daha yüksek sıcaklık seviyelerine kok fırını gazının yakılması ile ulaşılmıştır. Yanma odası boyunca, özellikle şehir gazı I ve şehir gazı II'nin yanma performansları birbirine oldukça yakın olmasına rağmen, şehir gazı I'in ısıl değerinin az da olsa şehir gazı II'den yüksek olmasından dolayı, yapılan sıcaklık ölçümlerine göre, yanma odası boyunca şehir gazı I için elde edilen sıcaklık değerlerinin

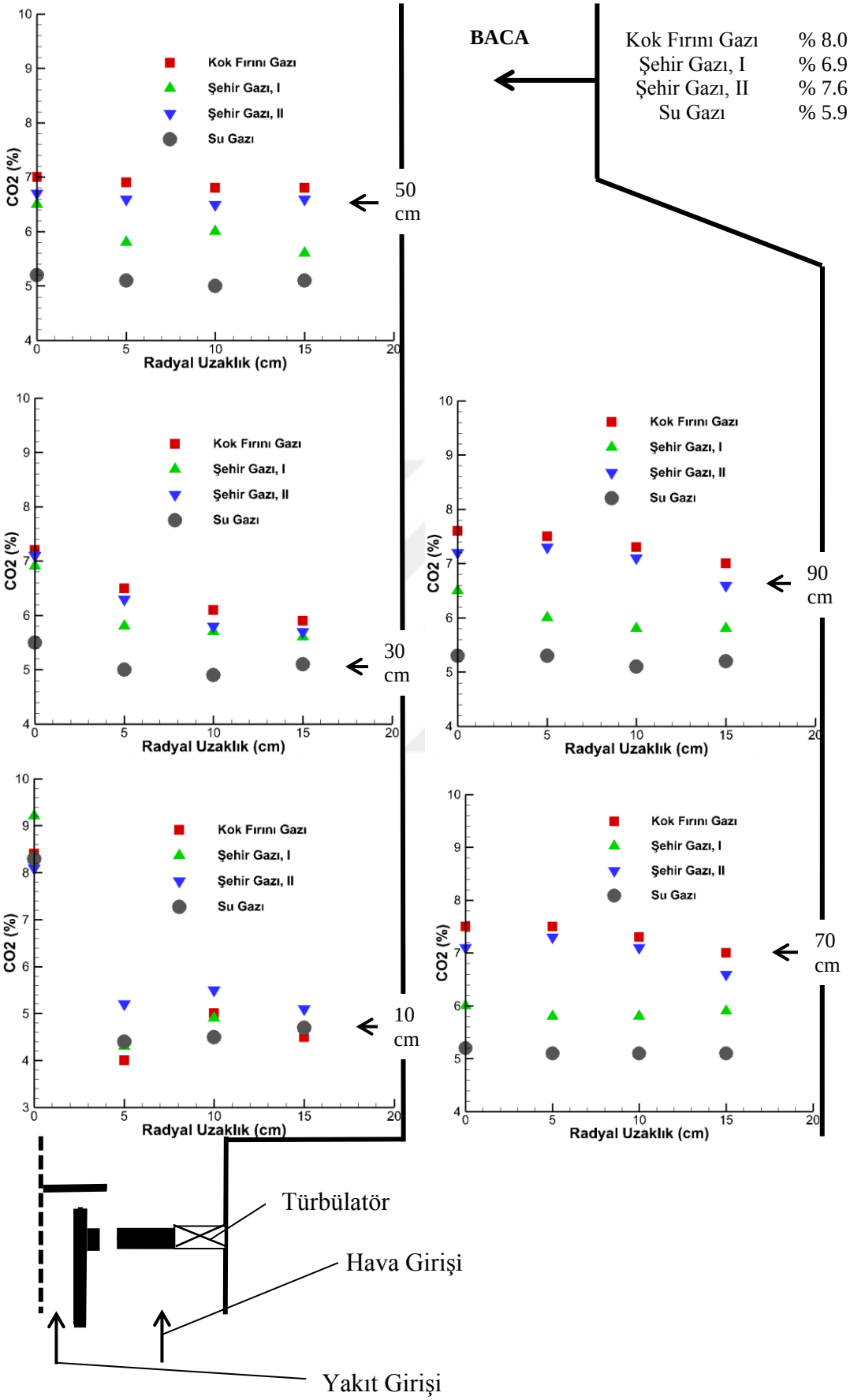
şehir gazı II için ortaya çıkan değerlerden biraz daha yüksek olduğu Şekil 6.36'dan anlaşılmaktadır. Hidrojence zengin tüm kömür gazlarının sıcaklık seviyeleri değerlendirildiğinde, yanma odasının ekseni boyunca yanma odası çıkışına doğru sıcaklık seviyelerinde, ışınım ve taşınımla ısı kaybından dolayı azalmalar olduğu rahatlıkla söylenebilir.

Radyal sıcaklık dağılımları değerlendirilecek olursa, 10 cm eksenel uzaklıktaki radyal sıcaklık dağılımı hemen dikkati çekmektedir. 10 cm eksenel uzaklığın merkezinden (yani alevden) alınan değerin ardından 5 cm, 10 cm, 15 cm ve yanma odası duvarından alınan değerler, hidrojence zengin tüm kömür gazları için oldukça hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu durumun nedeni, tıpkı metan yanmasında olduğu gibi, kullanılan yanma odasının ani genişlemeli bir yanma odası olmasıdır. Ancak, 30 cm eksenel uzaklıktan sonraki eksenel uzaklıklardan alınan radyal sıcaklık ölçümlerine bakılacak olursa, bu durumun değiştiği, yani, hidrojence zengin kömür gazlarının yanma sonu ürünlerinin yanma odası duvarlarına doğru yayılmaya başladığı anlaşılmaktadır. Bu durum, bir önceki bölümde sunulan, hidrojence zengin kömür gazlarının eksenel hız tahminlerinden de anlaşılmaktadır. Yanma odası çıkışına yaklaşıldıkça, yanma odası merkezindeki sıcaklık seviyeleri ile yanma odası duvarındaki sıcaklık seviyeleri arasındaki fark giderek azalmıştır. Yanma odası çıkışından elde edilen sıcaklık değerleri ise, sırasıyla, kok fırını gazı için 792.5 K, şehir gazı I için 778.7 K, şehir gazı II için 763.9 K ve su gazı için 752.5 K şeklinde olmuştur.



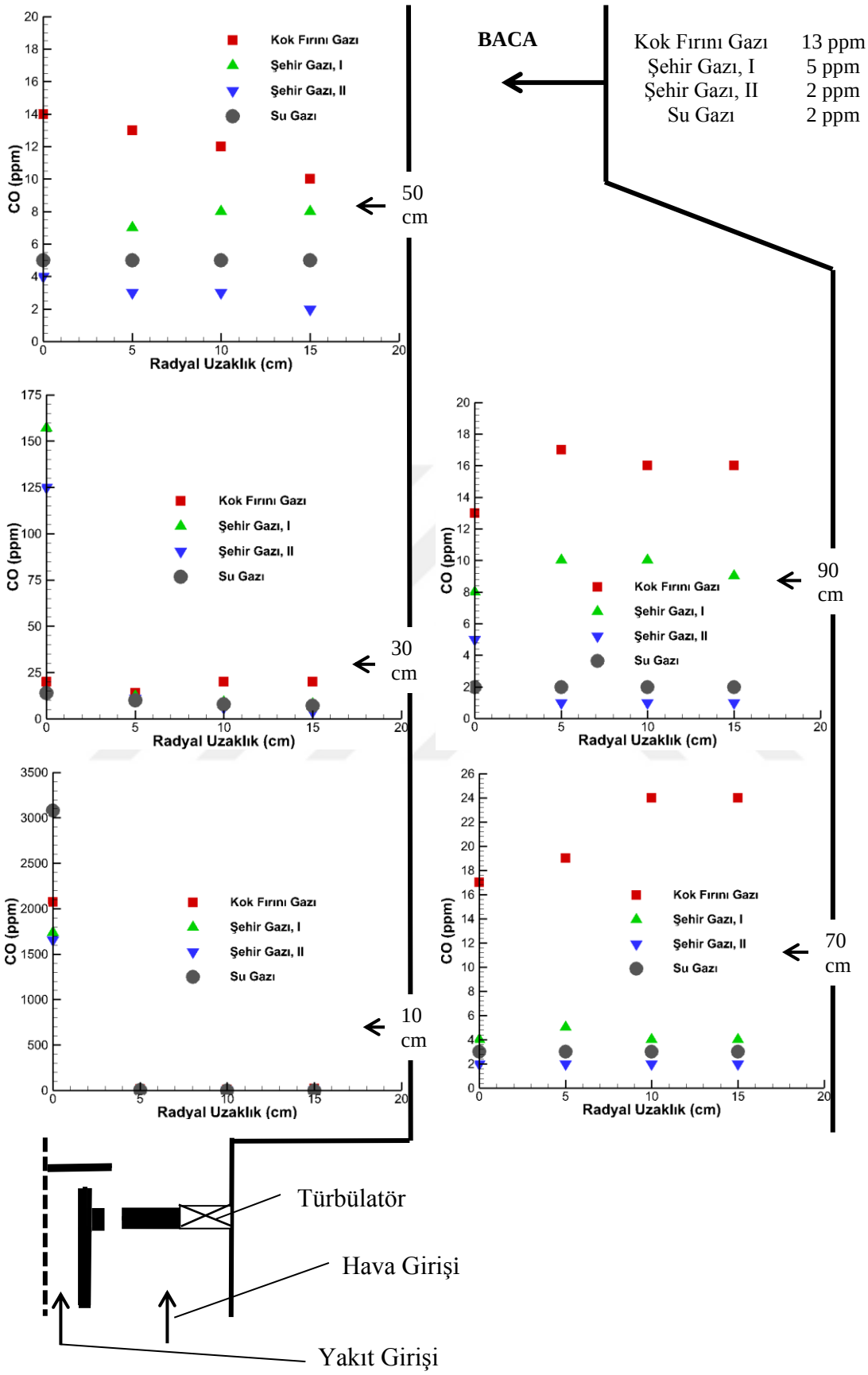
Şekil 6.36. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen sıcaklık dağılımı

Hidrojence zengin kömür gazı alevlerinin yanma odası boyunca CO_2 dağılımları Şekil 6.37'de gösterilmiştir. Şekil 6.37'den de anlaşılacağı üzere, hidrojence zengin tüm kömür gazları için alev bölgesindeki CO_2 emisyonları daha yüksektir. Ancak, radyal yönde durum daha farklıdır. Yanma odası boyunca, özellikle de 5 cm ve 10 cm'lik radyal uzaklıklardan yanma odası çıkışına doğru, hemen hemen tüm kömür gazları için CO_2 değerlerinde yükselme gözlemlenmiştir. Bu durum ise, yanma sonu ürünlerinin, nispeten yanma odasına doğru dağıldığını göstermektedir. Hidrojence zengin kömür gazlarının CO_2 emisyonları karşılaştırılacak olursa, yanma odası boyunca, kok fırını gazı yanması sonucu oluşan CO_2 emisyon seviyelerinin, diğerlerine göre bir miktar daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeninin, en yüksek metan miktarının bu kömür gazında bulunması olduğu düşünülmektedir. Diğer taraftan, en düşük CO_2 oluşumu ise su gazı yanma sonu ürünlerinden ölçülmüştür. Her ne kadar su gazı % 40 seviyelerinde karbon monoksit içerse de, karbon monoksitin oksitlenmesi, metana göre oldukça düşük seviyelerde kalmıştır. Şehir gazlarının CO_2 emisyonları karşılaştırılacak olursa, şehir gazı II'nin CO_2 yanma sonu ürün seviyelerinin de nispeten şehir gazı I'in CO_2 yanma sonu ürün seviyelerinden daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu kömür gazlarının içerikleri dikkate alındığında, bu durumun normal bir sonuç olduğu rahatlıkla söylenebilir. Her iki şehir gazı da eşit miktarda CO_2 bulunduruyor olsa bile, şehir gazı II'nin bünyesinde daha fazla miktarda metan bulunmaktadır.



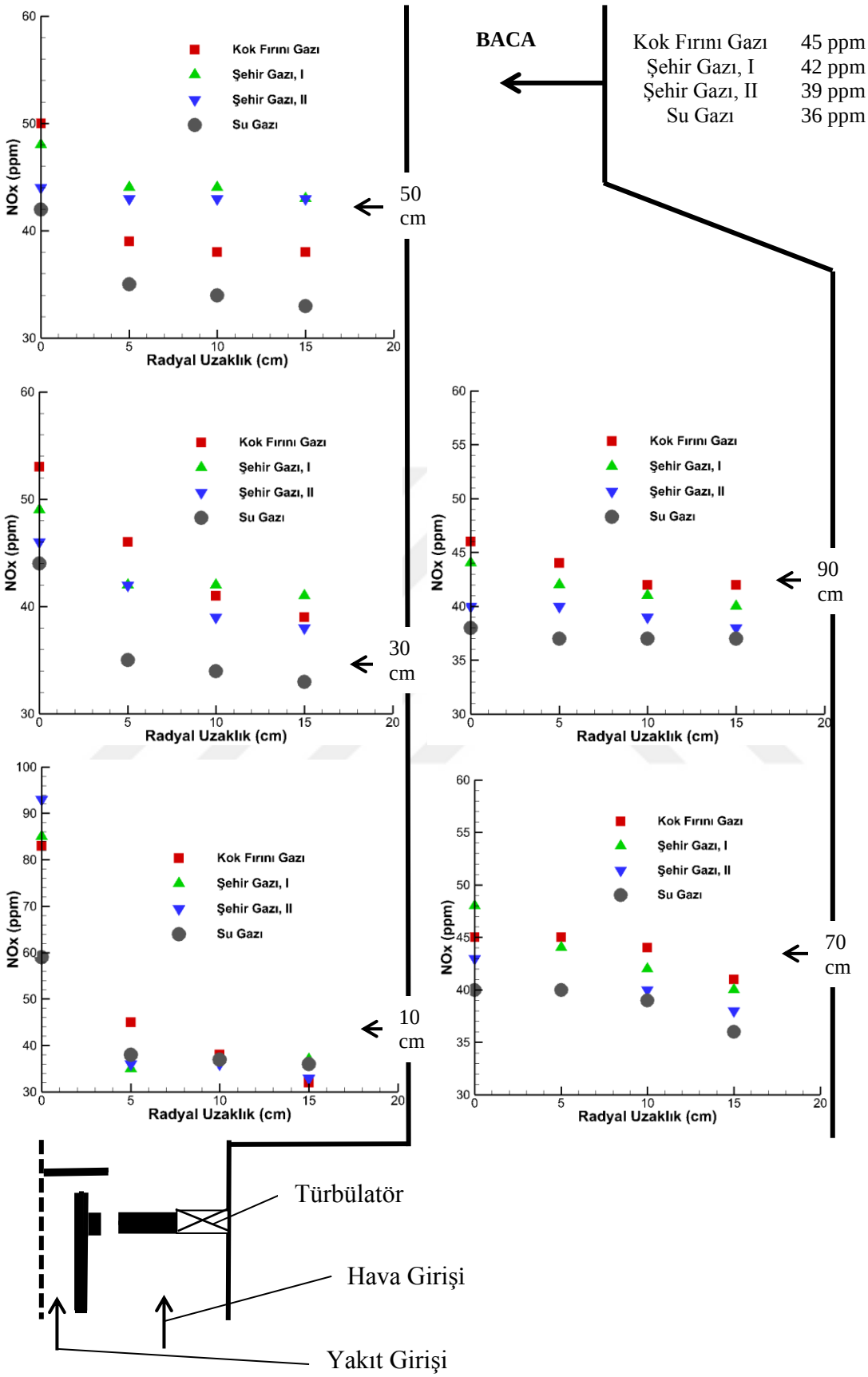
Şekil 6.37. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen CO_2 dağılımı

Hidrojence zengin kömür gazı alevlerinin yanma odası boyunca meydana gelen CO yanma sonu ürünlerinin dağılımları Şekil 6.38'de gösterilmiştir. Şekil 6.38'den de anlaşılacağı gibi, en yüksek CO seviyelerine alevin içinden yapılan ölçümlerde ulaşılmıştır. Bu durum, alev içerisinde henüz yanmanın tamamlanmadığı şeklinde rahatlıkla yorumlanabilir. Yanma odası çıkışına doğru gidildikçe, tüm kömür gazlarının CO emisyonlarında ciddi seviyelerde azalma olduğu, böylece yanma odası çıkışına doğru yanmanın tamamlandığı söylenebilir. Ayrıca, kömür gazlarının yanma sonu ürünü CO seviyeleri karşılaştırılacak olursa, özellikle alevden alınan ölçümlerde, en yüksek CO seviyesine su gazı yanması neticesinde ulaşılmıştır. Bunun temel nedeni olarak, su gazının bünyesinde yüksek oranda CO olması ve henüz CO_2'e dönüşmemiş olması gösterilebilir. Yanma odasının ortalarına ilerledikçe ise, kok fırını gazının yanma sonu ürünü CO seviyelerinin, diğer yakıtlara göre nispeten daha yüksek kaldığı anlaşılmaktadır. 10 cm ve 30 cm'lik eksenel uzaklıklar haricinde (yanma odasının merkezinden çıkışına doğru) radyal yönlerdeki CO seviyelerinde ciddi değişimler gözlemlenmemiş olup yanma odası çıkışından kok fırını gazı için 13 ppm, şehir gazı I için 5 ppm, şehir gazı II ve su gazı için de 2 ppm'lik CO emisyon ölçümleri elde edilmiştir.



Şekil 6.38. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen CO dağılımı

Hidrojence zengin kömür gazı alevlerinin yanma odası boyunca meydana gelen NO_X yanma sonu ürünlerinin dağılımları Şekil 6.39'da gösterilmiştir. Alev bölgesinden ölçülen NO_X emisyon seviyeleri oldukça yüksek olmuştur. Bunun temel nedeni, daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, havadan gelen serbest azotun ısıl NO_X mekanizması ile NO_X oluşturmasının yanı sıra, bahsi geçen kömür gazlarında bulunan serbest azotların da ısıl NO_X mekanizması ile NO_X oluşumuna katkı sağlamalarıdır. Bu nedenle, NO_X oluşumuna ısıl NO_X mekanizmasının katkısı oldukça fazla olmuştur. Şekil 6.39 incelendiğinde, 10 cm eksenel uzaklıktan alınan radyal ölçümlere göre, radyal yönde sıcaklık seviyelerinin önemli derecede düşmesinden dolayı, NO_X seviyeleri de aynı şekilde azalmıştır. Yanma odası çıkışına doğru gidildikçe de, benzer durumun ortaya çıktığı rahatlıkla söylenebilir. Hidrojence zengin kömür gazları için ortaya çıkan NO_X yanma sonu ürünleri karşılaştırılacak olursa, özellikle alev bölgesinde en yüksek NO_X seviyesi şehir gazı II yanma sonu ürünlerinden ölçülmüştür. Bilindiği gibi, şehir gazı II, yaklaşık % 16 serbest azot içermektedir. Bunun yanında, yanma odası boyunca, kok fırını gazı ve şehir gazı I için ölçülen NO_X seviyeleri de oldukça yüksek belirlenmiştir. Yanma odası çıkışında ise bu durum nispeten değişmiş olup, kok fırını gazı için NO_X değeri 45 ppm olarak ölçülürken, şehir gazı I için 42 ppm, şehir gazı II için 39 ppm ve su gazı için de 36 ppm'lik NO_X emisyon değerleri ölçülmüştür.

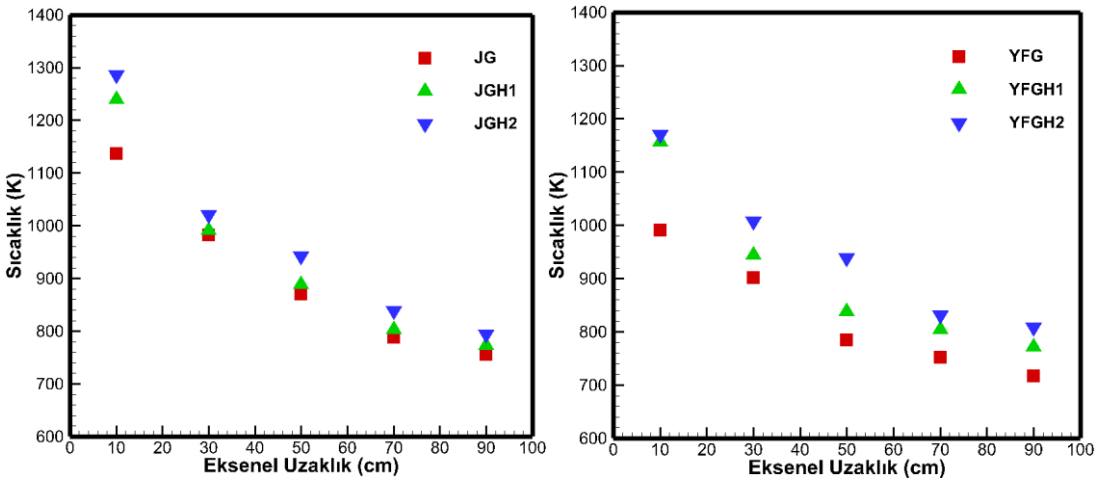


Şekil 6.39. Hidrojence zengin kömür gazları için ölçülen NO_X dağılımı

6.2.3. Düşük kalorili kömür gazlarının deneysel ölçüm sonuçları

Düşük kalorili kömür gazlarını yakabilmek için tasarlanan ve çalışmanın "Deney Sistemi ve Ekipmanları" bölümünde detayları sunulan düşük kalorili hidrojen beslemeli kömür gazı yakıcısı kullanılarak düşük kalorili kömür gazları hidrojen beslemesi yapılmadan ve hidrojen beslemesi yapılarak yakılmış ve yanma sonucu ölçülen ve düzeltilen sıcaklık ve emisyon değerleri çalışmanın bu bölümünde sunulmuştur. Şekillerde gösterilen JG, jeneratör gazını, JGH1, 10 kW'lık ısıl gücün 2,5 kW'ının hidrojence 7,5 kW'ının jeneratör gazından sağlandığı hidrojen beslemeli jeneratör gazını, JGH2, 10 kW'lık ısıl gücün 5 kW'ının hidrojence 5 kW'ının jeneratör gazından sağlandığı hidrojen beslemeli jeneratör gazını, YFG, yüksek fırın gazını, YFGH1, 10 kW'lık ısıl gücün 2,5 kW'ının hidrojence 7,5 kW'ının yüksek fırın gazından sağlandığı hidrojen beslemeli yüksek fırın gazını ve son olarak da YFGH2, 10 kW'lık ısıl gücün 5 kW'ının hidrojence 5 kW'ının yüksek fırın gazından sağlandığı hidrojen beslemeli yüksek fırın gazını temsil etmektedir.

Yanma deneyleri neticesinde, jeneratör gazının ve yüksek fırın gazının, hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli deney şartları için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları Şekil 6.40a ve Şekil 6.40b'de verilmiştir. Şekil 6.40a ve Şekil 6.40b'ye göre hidrojen beslemesiz yanma şartlarında jeneratör gazı ve yüksek fırın gazı için ölçülen alev sıcaklıkları sırasıyla 1136.9 K ve 990.3 K şeklindedir. Bu alev sıcaklıkları, bu tez kapsamında gerçekleştirilen ve daha önceki bölümlerde sunulan diğer yakıtların alev sıcaklıklarına göre oldukça düşüktür. Bunun temel nedeni ise, düşük kalorili kömür gazlarının ihtiva ettiği gaz karışımlarına bakıldığında hemen anlaşılmaktadır. Bu gazlar, yüksek oranda azot içerirken, yanabilir bileşenleri de oldukça azdır. Bu yakıtların yanma odası çıkışından ölçülen sıcaklık değerleri ise sırasıyla 755 K ve 713.1 K'dir.



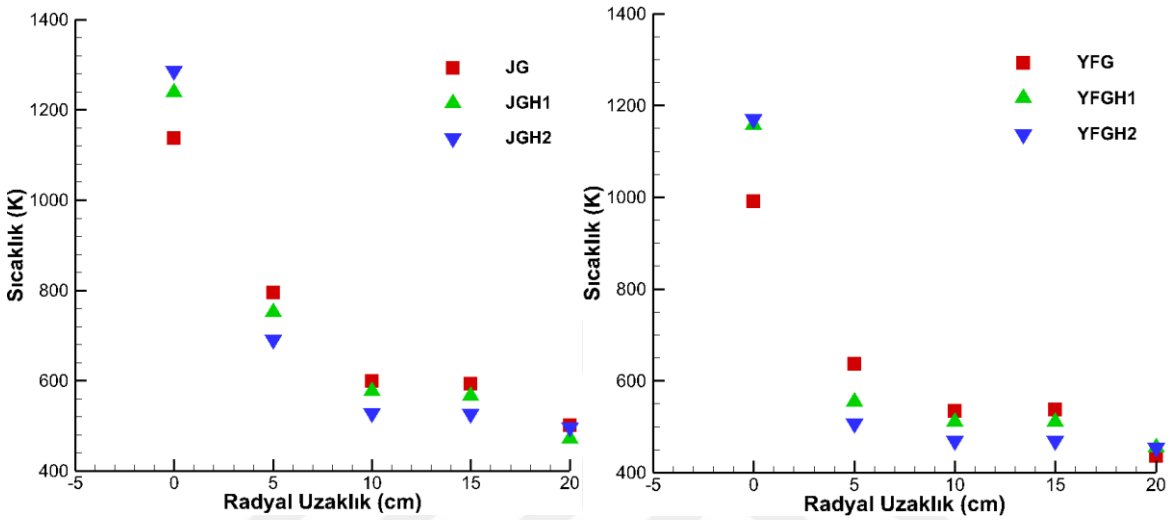
(a) (b)

Şekil 6.40. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen eksenel sıcaklık dağılımı

Çalışma kapsamında yürütülen diğer yanma deneylerinde ise, aleve hidrojen beslemesi gerçekleştirilmiş olup, bu beslemenin eksenel sıcaklık dağılımları üzerindeki etkileri de Şekil 6.40'ta sunulmuştur. Aleve hidrojen beslenmesi neticesinde her iki durum için de alev sıcaklıklarının yükseldiği Şekil 6.40a ve Şekil 6.40b'den rahatlıkla anlaşılmakta olup ölçülen alev sıcaklıkları, JGH1 için 1238.9 K, JGH2 için 1286.1 K, YFGH1 için 1156.2 K ve YFGH2 için 1171 K şeklinde olmuştur. Böylece, aleve hidrojen beslenmesi neticesinde, eksen boyunca elde edilen sıcaklık ölçümleri dikkate alınarak düşük kalorili kömür gazlarının yanma performanslarının arttırıldığı rahatlıkla söylenebilir.

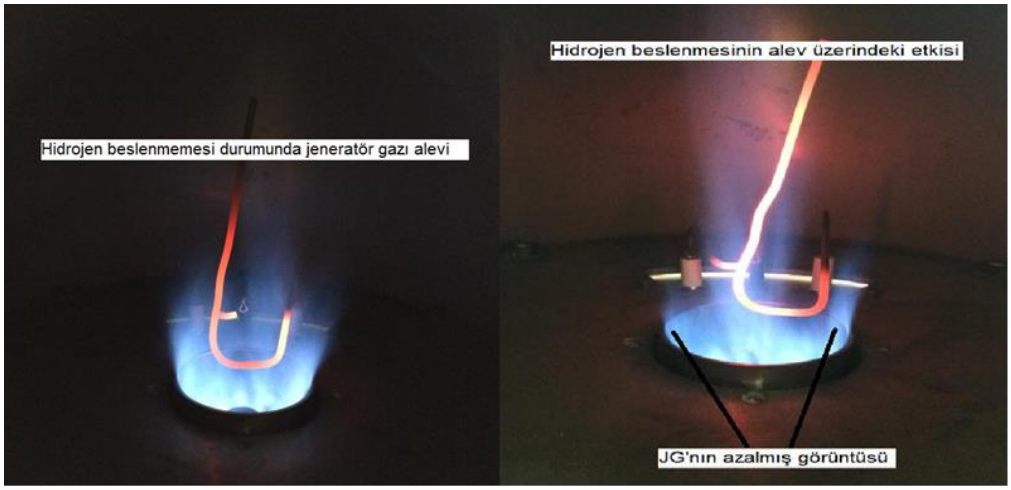
Şekil 6.41a ve Şekil 6.41b'de ise, jeneratör gazı ve yüksek fırın gazı alevlerinin hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli yanma şartları için 10 cm eksenel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık değerleri gösterilmiştir. 10 cm eksenel uzaklıktan alınan radyal ölçümler değerlendirildiğinde, yanma odası merkezinden duvarına doğru gidildikçe sıcaklık seviyeleri hızla düşmektedir. Bunun temel nedeni, daha önceki bölümlerde de açıklandığı gibi, yanma odası tipinin ani genişlemeli olmasıdır. Hidrojen beslemeli durumlarda ölçülen sıcaklık değerleri dikkate alındığında ise, JGH1, JGH2, YFGH1 ve YFGH2 yanma şartlarının sıcaklık değerleri JG ve YFG şartlarındaki sıcaklık değerlerinden daha düşük olduğu görülmektedir. İlk bakışta, beklenmeyen bir gelişme gibi görünen bu durum, Resim 6.1'de gösterilen alev fotoğrafları ile açıklanabilir. Resim 6.1'de, jeneratör gazının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli yanma şartlarında alınan alev fotoğrafları bulunmaktadır. Hidrojen beslemesi yapıldıkça, aynı ısıl gücü sağlayabilmek için, düşük

kalorili kömür gazlarının miktarlarının azaltıldığından bahsedilmişti. Bu nedenle, alev fotoğrafından da anlaşılacağı üzere, yakıcı gövdesine yakın bölgelerin daha az yoğun, buna karşın alev çekirdeğinin daha yoğun olduğu görülmektedir. Bu da, yakıcı gövdesine çok yakın bir yerden yanma odası duvarına doğru alınan sıcaklık ölçümlerini (10 cm eksenel uzaklık) önemli ölçüde etkilemiştir.

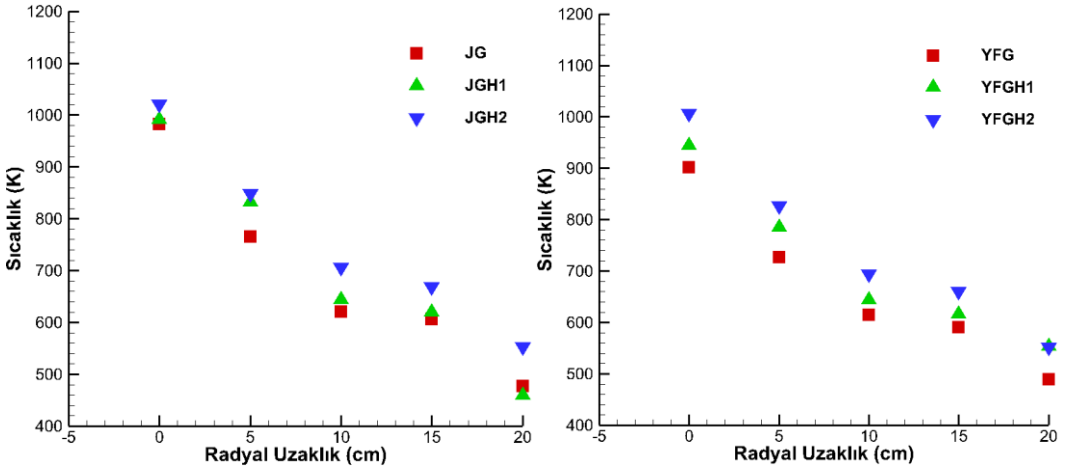


(a) (b)

Şekil 6.41. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 10 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı



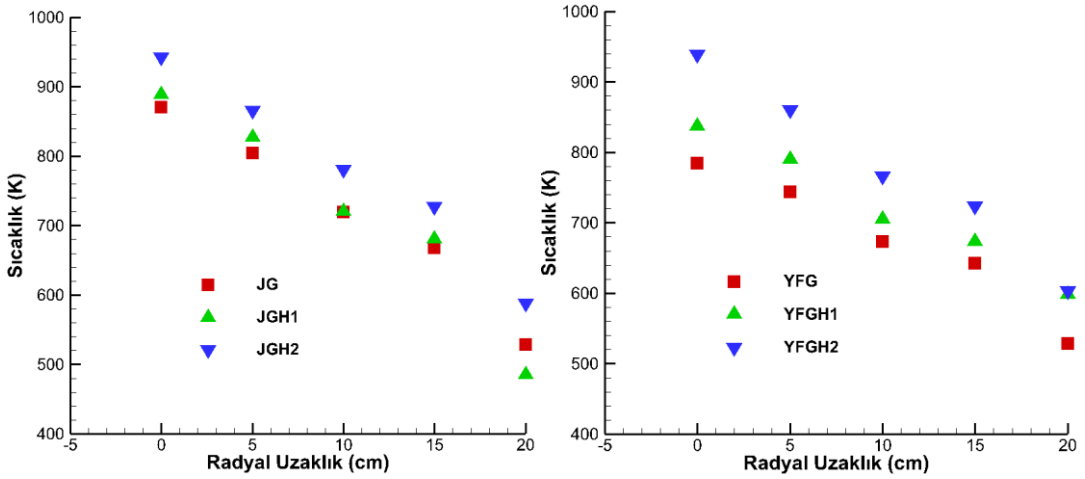
Resim 6.1. JG ve JGH1 yanma şartlarının alev fotoğrafları



(a) (b)

Şekil 6.42. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 30 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı

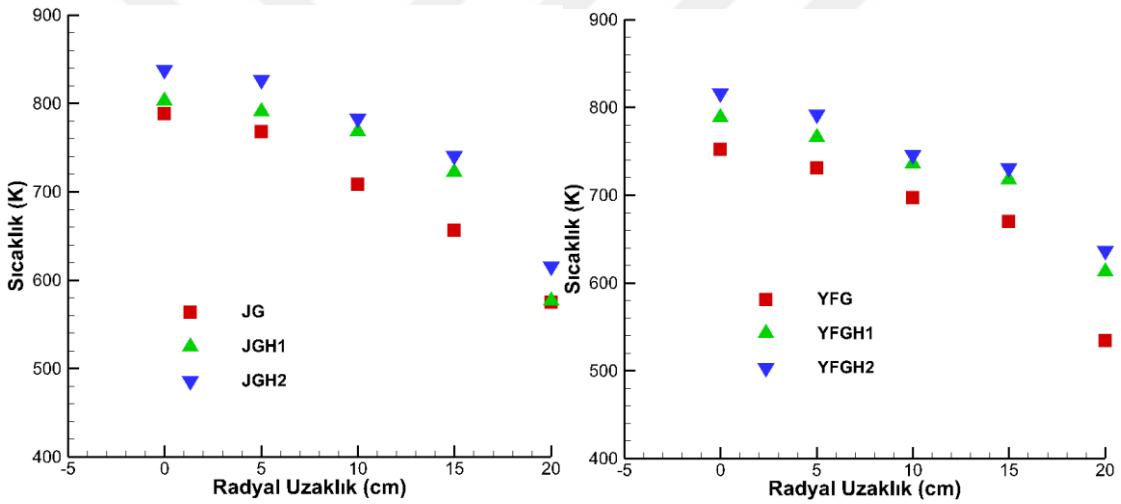
Düşük kalorili kömür gazı alevlerinden hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumlar için 30 cm eksenel uzaklıktan elde edilen radyal sıcaklık değerleri Şekil 6.42'de verilmiştir. 10 cm eksenel uzaklıktan elde edilen radyal ölçümler ile karşılaştırılacak olursa, 30 cm eksenel uzaklıktan alınan radyal ölçümlerde, yanma odası merkezinden yanma odasına doğru olan sıcaklık farkları nispeten azalmaya başlamıştır. Ayrıca, her iki kömür gazı için de gerçekleştirilen hidrojen beslenmesi durumları değerlendirildiğinde, hidrojenin artık yanma odasına içerisine yayılmaya başladığı ve böylece yanma performansına radyal yönlerde de olumlu katkı sağladığı rahatlıkla söylenebilir.



(a) (b)

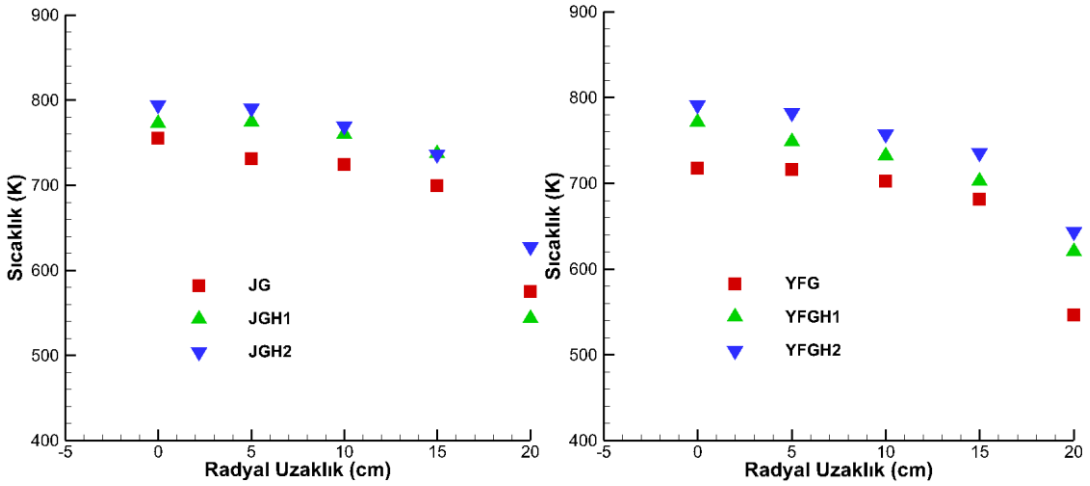
Şekil 6.43. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 50 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı

Şekil 6.43, Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'te ise 50 cm, 70 cm ve 90 cm eksenel uzaklıklardan alınan radyal sıcaklık ölçümleri sunulmuştur. Şekil 6.43, Şekil 6.44 ve Şekil 6.45'ten de anlaşılacağı gibi, özellikle yanma odası çıkışına doğru gidildikçe, yanma odası merkezinden yanma odası duvarlarına doğru alınan sıcaklık ölçümleri arasındaki farklar azalmaktadır. Bu durum, yanma sonu ürünlerinin yanma odasına iyice yayılması ile gerçekleşmekte ve böylece yanma odası içerisinde daha homojen bir sıcaklık dağılımı oluşturmaktadır. Bu şekillerden önce sunulan şekillerde olduğu gibi bu şekillerde de, yanma odası boyunca, jeneratör gazının yanma (hidrojen beslemeli yanma şartları dahil) performansının yüksek fırın gazından daha yüksek olduğu rahatlıkla söylenebilir. Bu durum ise, jeneratör gazının yüksek fırın gazına göre daha yüksek oranda hidrojen içermesi ile açıklanabilir.



(a) (b)

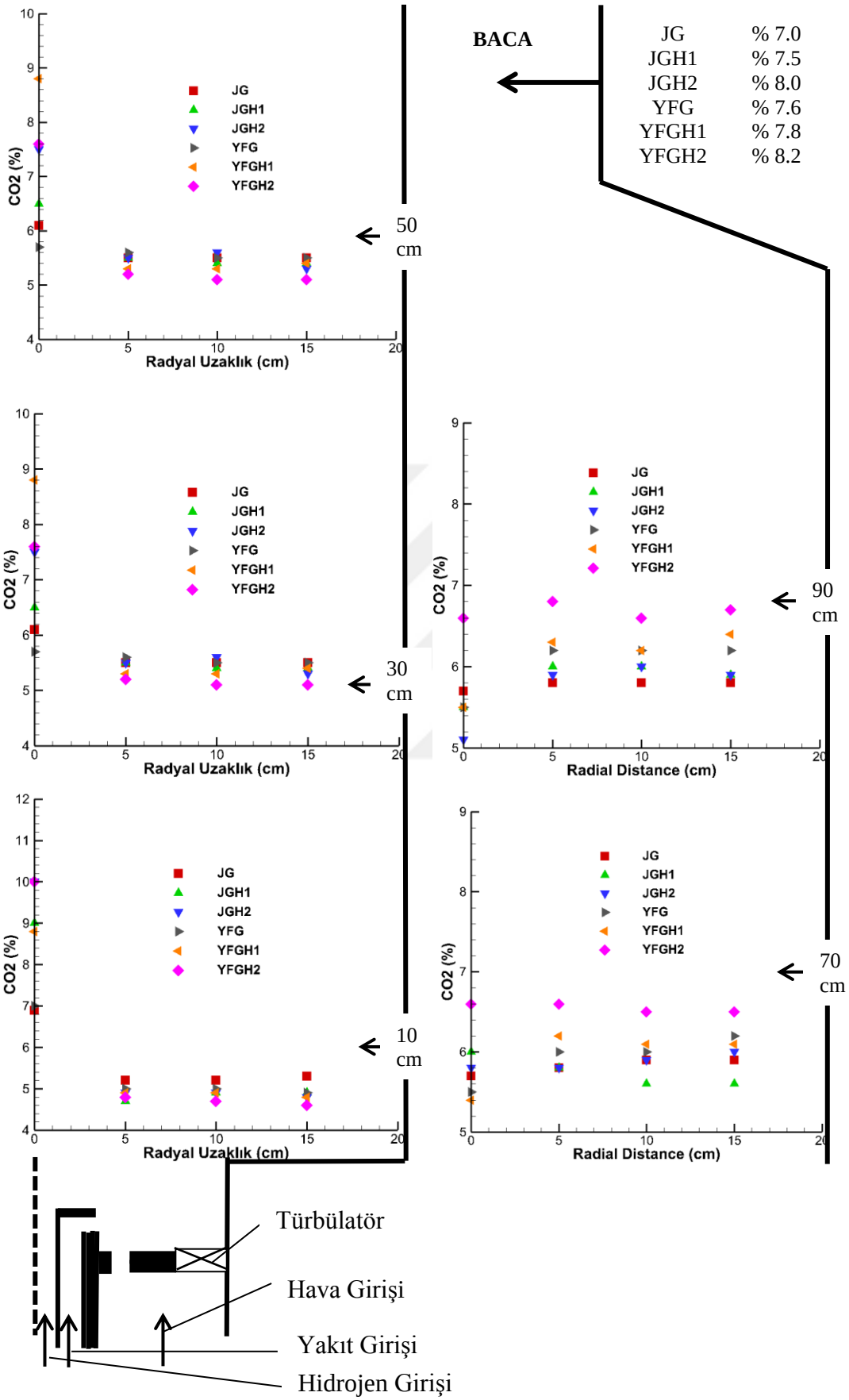
Şekil 6.44. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 70 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı



(a) (b)

Şekil 6.45. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için 90 cm eksenel uzaklıktan ölçülen radyal sıcaklık dağılımı

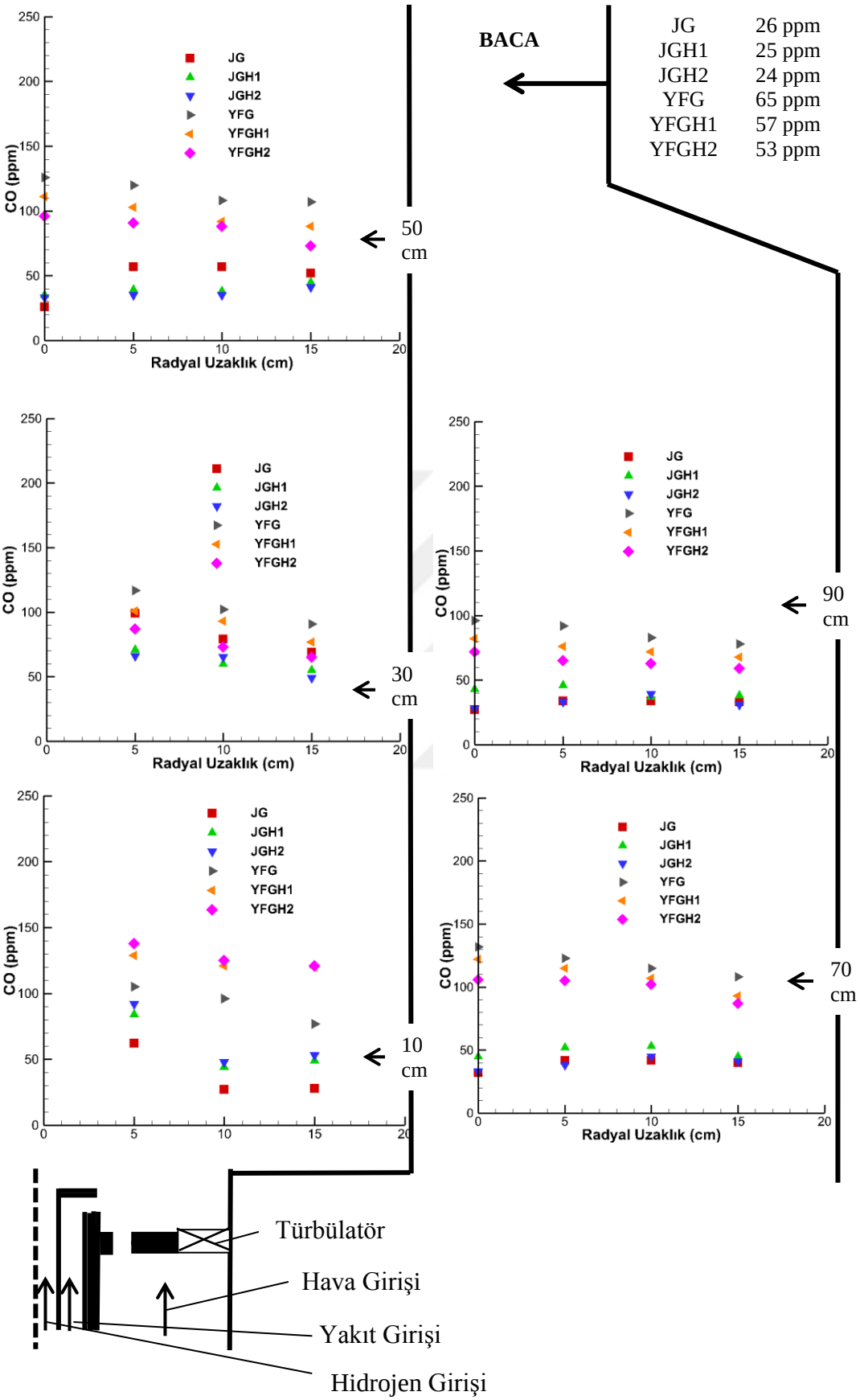
Düşük kalorili kömür gazı alevlerinin yanma odası boyunca ölçülen CO_2 değerleri Şekil 6.46'da sunulmuştur. Şekil 6.46'dan da anlaşılacağı üzere, tüm yanma şartları için en yüksek CO_2 seviyelerine 10 cm eksenel uzaklık için verilen radyal dağılımın merkezinde (yani alev bölgesinde) ulaşılmıştır. Aynı eksenel uzaklık için alınan radyal CO_2 ölçümleri ise oldukça az olup, yanma odası çıkışına doğru alınan ölçümler bu doğrultuda değerlendirilecek olursa, ölçülen CO_2 seviyelerinde bir artış olduğu söylenebilir. JG ve YFG yanma şartları için ölçülen CO_2 değerleri karşılaştırıldığında ise, yanma odası boyunca genellikle YFG yanması sonrasında ölçülen CO_2 değerlerinin JG yanması sonrasında ölçülen CO_2 değerlerinden az da olsa fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bunun temel nedeninin, içerdikleri CO_2 seviyelerindeki farklılık olduğu düşünülmektedir. Hidrojen beslemeli durumlarda ortaya çıkan CO_2 seviyeleri değerlendirilecek olursa, her iki kömür gazı için de oluşan CO_2 seviyelerini arttırdığı rahatlıkla söylenebilir. Alevin merkezine hidrojen beslemesi yapıldıkça alev sıcaklığı artmakta, bu durumun da kömür gazları bünyesinde bulunan CO'in su gazı değişim reaksiyonu ile daha hızlı oksitlenmesine neden olduğu düşünülmektedir. Bu sonuç, yanma odası genelinde en yüksek CO_2 oluşum seviyelerinin YFGH2 yanma şartları için ortaya çıkması ile de güçlenmektedir.



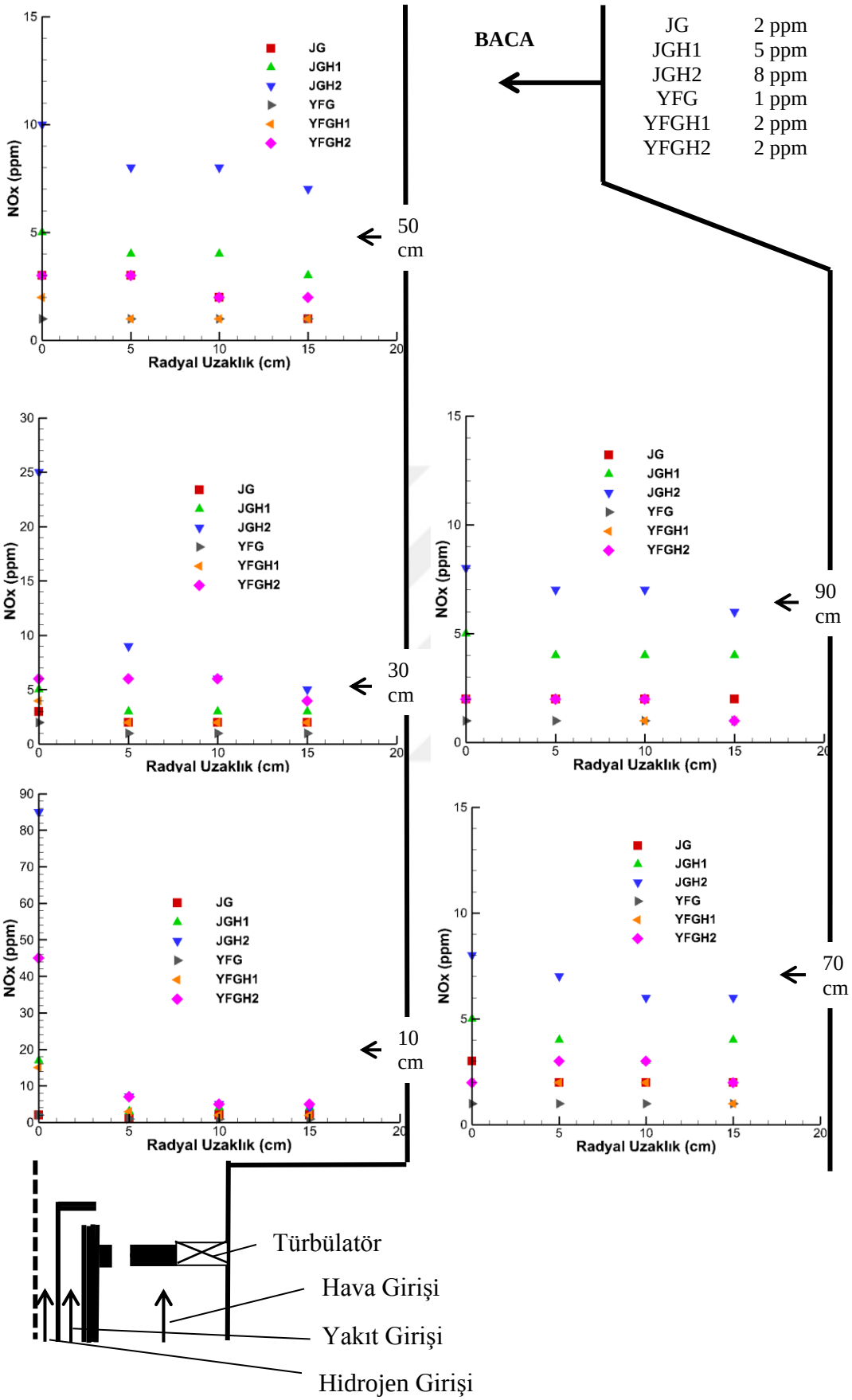
Şekil 6.46. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen CO_2 dağılımı

Düşük kalorili kömür gazları için yanma odası boyunca yapılan CO ölçümleri Şekil 6.47'de gösterilmiştir. Jeneratör gazı ve yüksek fırın gazı, yüksek oranda CO içermesinden ve bünyelerinde neredeyse tek yanabilir bileşen olarak bulundurdukları bu bileşimden dolayı, yanma odasının belirli noktalarından (özellikle alev bölgesi) alınan CO emisyon değerleri oldukça yüksek çıkmış ve kullanılan baca gazı analizörünün ölçüm aralığının dışına çıkmıştır. Bu nedenle, Şekil 6.47'de, yanma odası boyunca ölçülebilen CO ölçümleri ppm cinsinden sunulmuştur. Yanma odası çıkışına doğru gidildikçe, yanmanın tamamlanmasından dolayı CO emisyonlarında azalmalar tespit edilmiş olup, yanma odası çıkışında, bünyesinden yüksek oranda CO bulundurmasından dolayı, en yüksek CO emisyonu YFG yanması neticesinde ölçülmüştür.

Şekil 6.48'de ise düşük kalorili kömür gazı alevlerinden yanma odası boyunca ölçülen NO_X emisyonlarının dağılımı gösterilmiştir. Jeneratör gazı ve yüksek fırın gazının yanması neticesinde oluşan NO_X seviyeleri değerlendirildiğinde, yanma odası boyunca oldukça düşük seviyelerde oldukları açıkça görülmektedir. Bu durum, NO_X oluşum mekanizmaları göz önünde bulundurulduğunda beklenen bir sonuç olmuştur. Bu kömür gazlarının yanma karakteristikleri NO_X emisyonları bakımından değerlendirilecek olursa, doğalgaza göre oldukça iyi seviyelerde oldukları söylenebilir. Ancak, önceki bölümlerde sunulan sıcaklık dağılımları dikkate alındığında, yanma performanslarının çok da iyi olmadığından bahsedilmişti. Bu nedenle, yakıcı merkezinden hidrojen beslemesi gerçekleştirilmiş olup, bu işlem neticesinde, yanma odası içerisinden alınan NO_X emisyon değerleri de Şekil 6.48'de sunulmuştur. Her iki kömür gazı için de, hidrojen beslemeli şartlarda NO_X emisyon değerleri yanma odası boyunca artış göstermiştir. Alevin içerisinden alınan ölçümlere göre, JGH1, JGH2, YFGH1 ve YFGH2 yanma şartları için elde edilen sonuçlar, sırasıyla, 17 ppm, 85 ppm, 15 ppm ve 45 ppm şeklindedir. Yanma odası çıkışına doğru gidildikçe, sıcaklık seviyelerindeki azalmalar neticesinde tüm yanma şartları için NO_X seviyelerinde azalmalar görülmüş ve yanma odası çıkışında, JG, JGH1, JGH2, YFG, YFGH1 ve YFGH2 için alınan ölçümler, 2 ppm, 5 ppm, 8 ppm, 1 ppm, 2 ppm ve 2 ppm şeklinde olmuştur. Radyal yönde alınan NO_X değerleri değerlendirilecek olursa, 10 cm eksenel uzaklıktan alınan radyal ölçümlerde, yanma odası merkezinden duvarına doğru hızlı düşüşler meydana gelirken, bu durum, diğer eksenel uzaklıklardan alınan radyal ölçümler için daha benzer sonuçlara doğru evrilmiştir.



Şekil 6.47. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen CO dağılımı

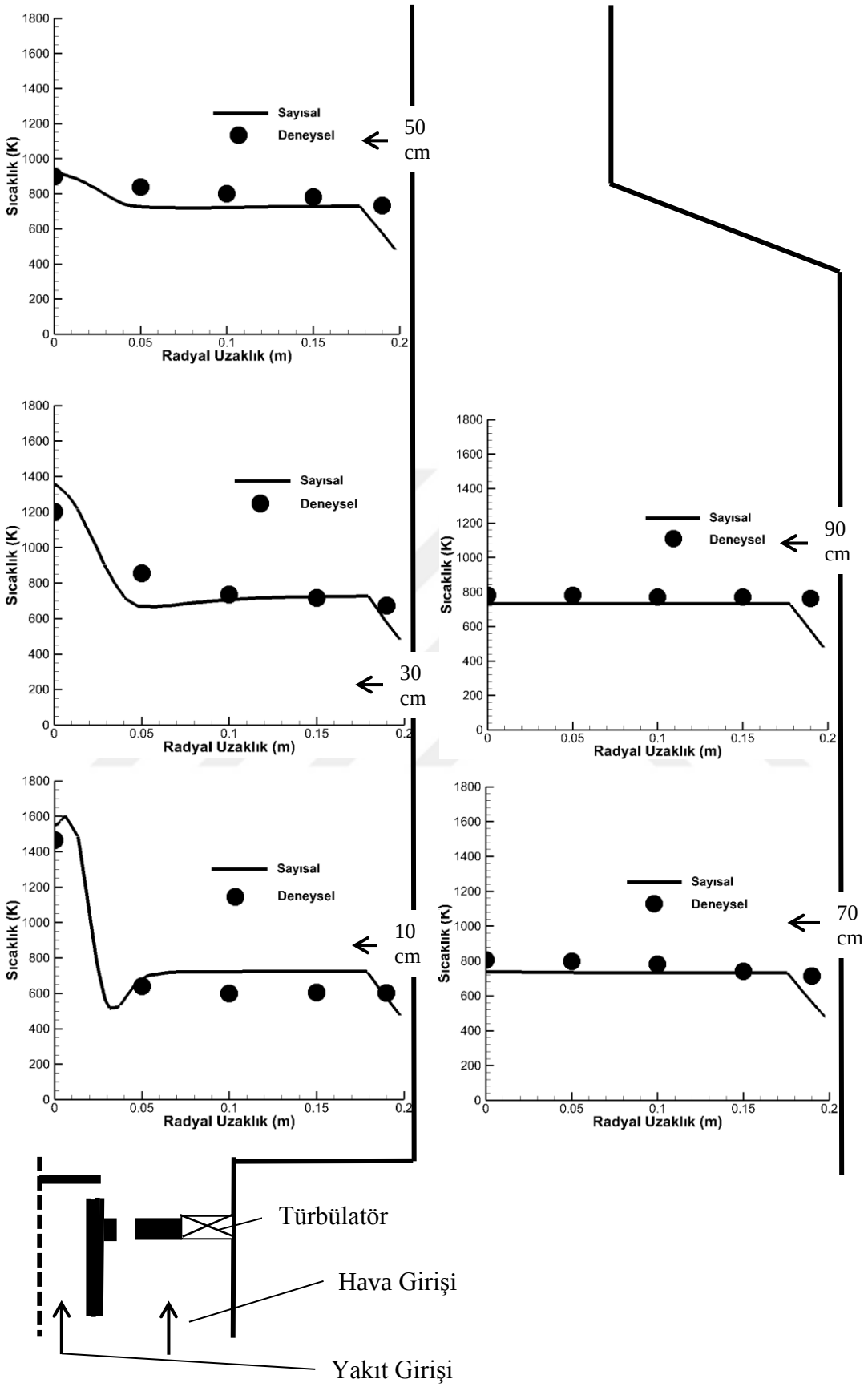


Şekil 6.48. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için ölçülen NO_X dağılımı

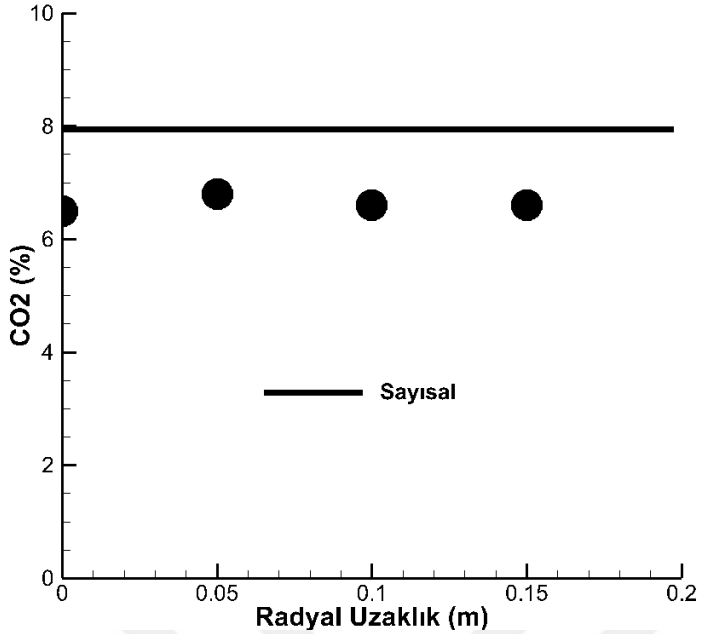
6.3. Deneysel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 6.1 ve Bölüm 6.2'de sunulan deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırılmış ve çalışmanın bu bölümünde sunulmuştur. İlk olarak, metan için elde edilen sayısal ve deneysel sıcaklık değerleri Şekil 6.49'da gösterilmiştir. Yanma odası boyunca 10 cm, 30 cm, 50 cm, 70 cm ve 90 cm eksenel uzaklıklardaki ölçüm portları ile yanma odası ekseni boyunca bu uzaklıklardan alınan radyal ölçümler ile HAD modellemesi neticesinde elde edilen sıcaklık tahmin sonuçları yanma odası boyunca oldukça iyi bir uyum içerisindedir. Yanmanın HAD modellemesi ile elde edilen tahmin sonuçlarının deneysel sonuçlar ile, grafik boyunca belirli bir trend uyumu göstermesi, yanma modellemeleri için genellikle kabul edilebilir bir model doğrulaması olduğundan yapılan tahminlerin oldukça uyumlu olduğu rahatlıkla söylenebilir. Yine de buna rağmen, bazı ölçüm noktalarında bir miktar farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bu farklılıklar, çok yüksek yüzdelerde olmazken, en kötü tahmin sonuçlarında bile % 5-10 arasında bir sapma belirlenmiştir. Bu sapmalar, daha iyi bilgisayar alt yapısı ve zamana bağlı çözüm gerektiren farklı türbülans modelleri ile (LES, RANS gibi) giderilebilir.

Şekil 6.50'de ise metan yakıtının yanması neticesinde oluşan CO_2 emisyonlarının 90 cm eksenel uzaklık için deneysel ölçüm sonuçları ile sayısal tahmin sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik sunulmuştur. Şekil 6.50 değerlendirildiğinde, yanma odası çıkışına doğru elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların birbiri ile trend olarak uyum gösterdiği anlaşılmaktadır.

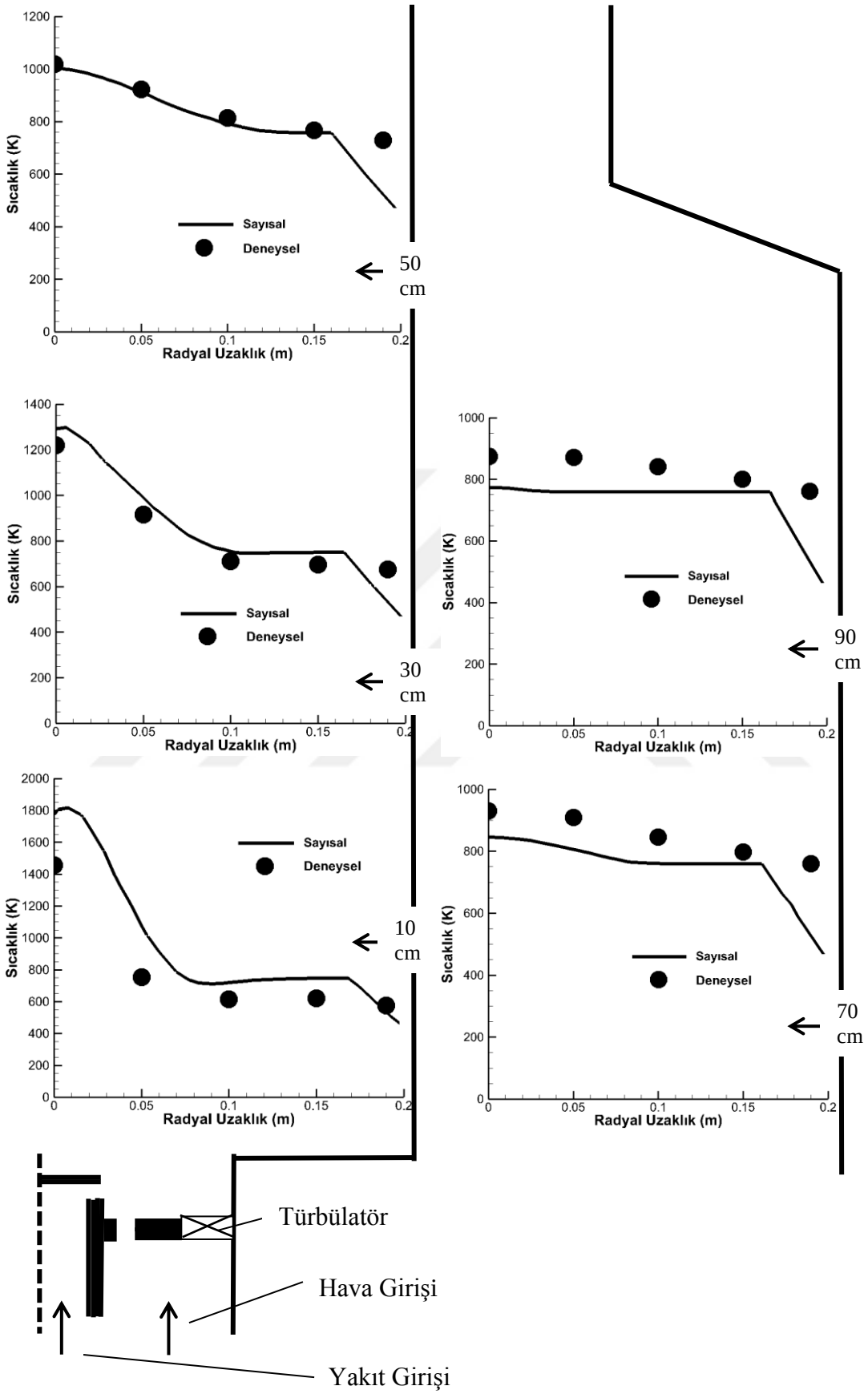


Şekil 6.49. Metan için deneysel ve sayısal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

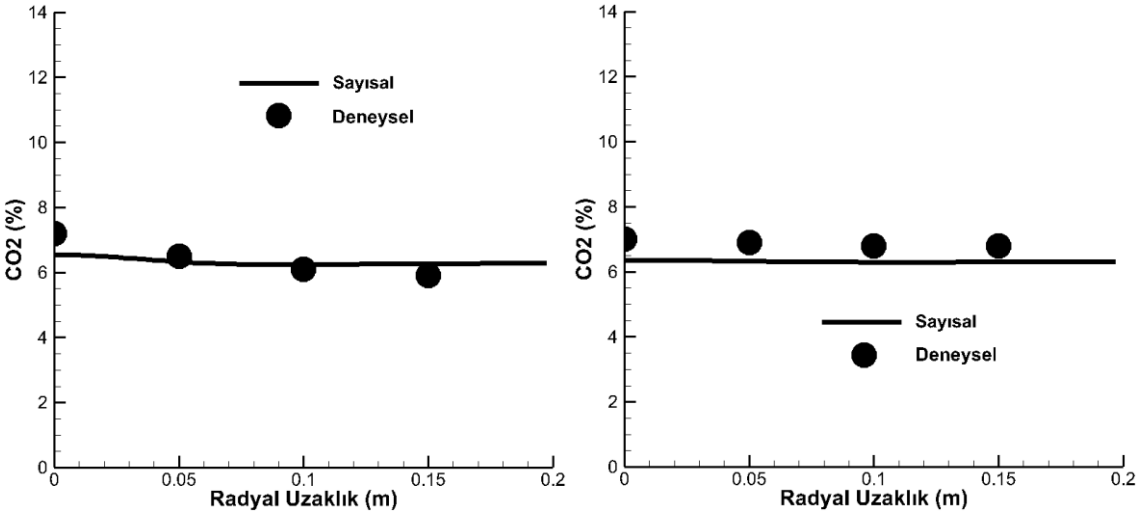


Şekil 6.50. Metan için 90 cm eksenel uzaklıktaki deneysel ve sayısal radyal CO_2 dağılımlarının karşılaştırılması

Hidrojence zengin ve düşük kalorili kömür gazları için elde edilen sayısal tahminler ile yapılan deneyler neticesinde ölçülen deneysel verilerin karşılaştırılması için tüm yakıtların kullanılması yerine, hidrojence zengin kömür gazları için kok fırını gazı ve düşük kalorili kömür gazları için de jeneratör gazı seçilmiştir. Kok fırını gazı için yapılan sayısal tahminler neticesinde elde edilen sıcaklık dağılımının deneysel çalışma sırasında ölçülen ve düzeltilen sıcaklık değerleri ile karşılaştırılması Şekil 6.51'de gösterilmiştir. Alev bölgesi için yapılan sayısal tahmin sonuçları, elde edilen deneysel sonuçlardan biraz yüksek olmasına rağmen, yanma odası boyunca HAD modellemesi ile elde edilen tahmin sonuçları deneysel verilerle oldukça iyi bir uyum içerisindedir. Ancak, özellikle alev bölgesindeki karşılaştırmada uyum daha az olmuştur. Bu bölgedeki yüksek türbülans, daha iyi bilgisayar alt yapısı ve zamana bağlı çözüm gerektiren farklı türbülans modelleri (LES, RANS gibi) kullanılarak giderilebilir. Hidrojence zengin olan yakıtlar için, hidrojenin hızlı bir şekilde reaksiyona girme isteğinden dolayı, yapılan tahminler, genellikle reaksiyonun hızlı bir şekilde tamamlandığı ve sıcaklığın bir anda yükseldiği şeklindedir.

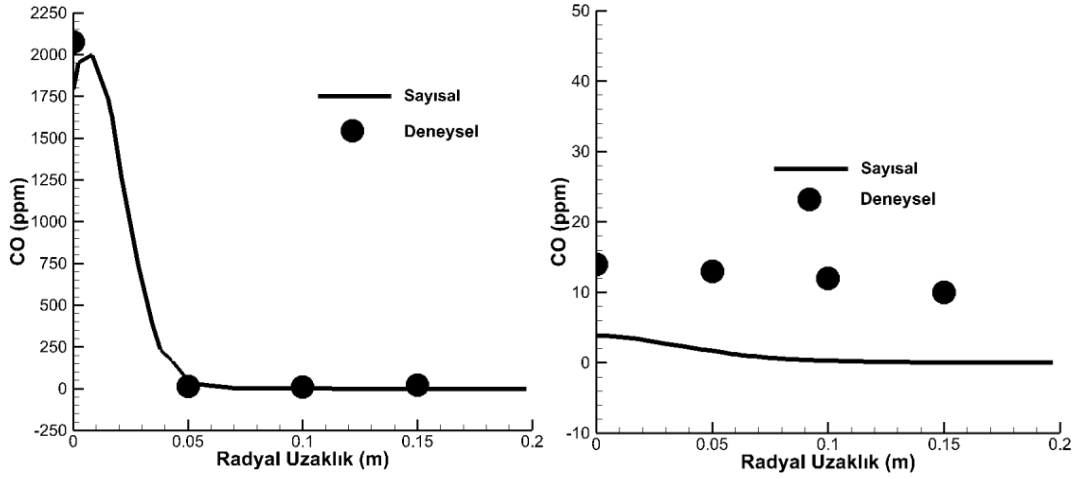


Şekil 6.51. Kok fırını gazı için deneysel ve sayısal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

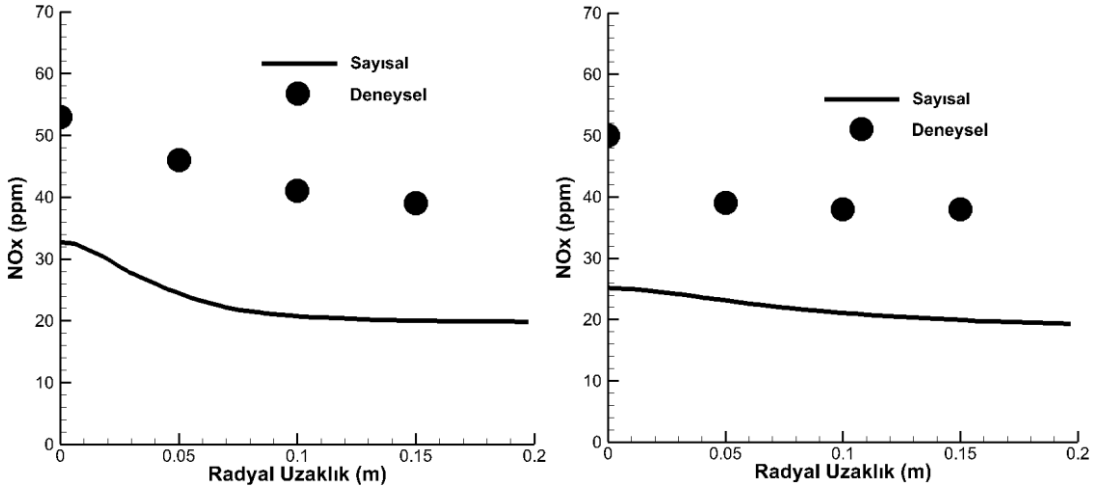


Şekil 6.52. Kok fırını gazı için 30 cm (a) ve 50 cm (b) eksenel uzaklıklardaki deneysel ve sayısal radyal CO_2 dağılımlarının karşılaştırılması

Şekil 6.52'de ise farklı eksenel uzaklıklardan elde edilen CO_2 tahminleri ile aynı mesafelerden alınan deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde, neredeyse tüm yanma odası boyunca CO_2 tahminleri deneysel verilerle uyum içerisinde sonuçlar vermiştir. Benzer şekilde, Şekil 6.53'te de CO tahminleri ile deneysel ölçümler karşılaştırılmış, 10 cm eksenel uzaklıktan alınan radyal ölçümler, sayısal tahmin sonuçları ile daha iyi bir uyum yakalamış olup 50 cm eksenel uzaklıktan elde edilen sonuçlarda da trend uyumunun olduğu Şekil 6.53'ten anlaşılmaktadır.



Şekil 6.53. Kok fırını gazı için 10 cm (a) ve 50 cm (b) eksenel uzaklıklardaki deneysel ve sayısal radyal CO dağılımlarının karşılaştırılması

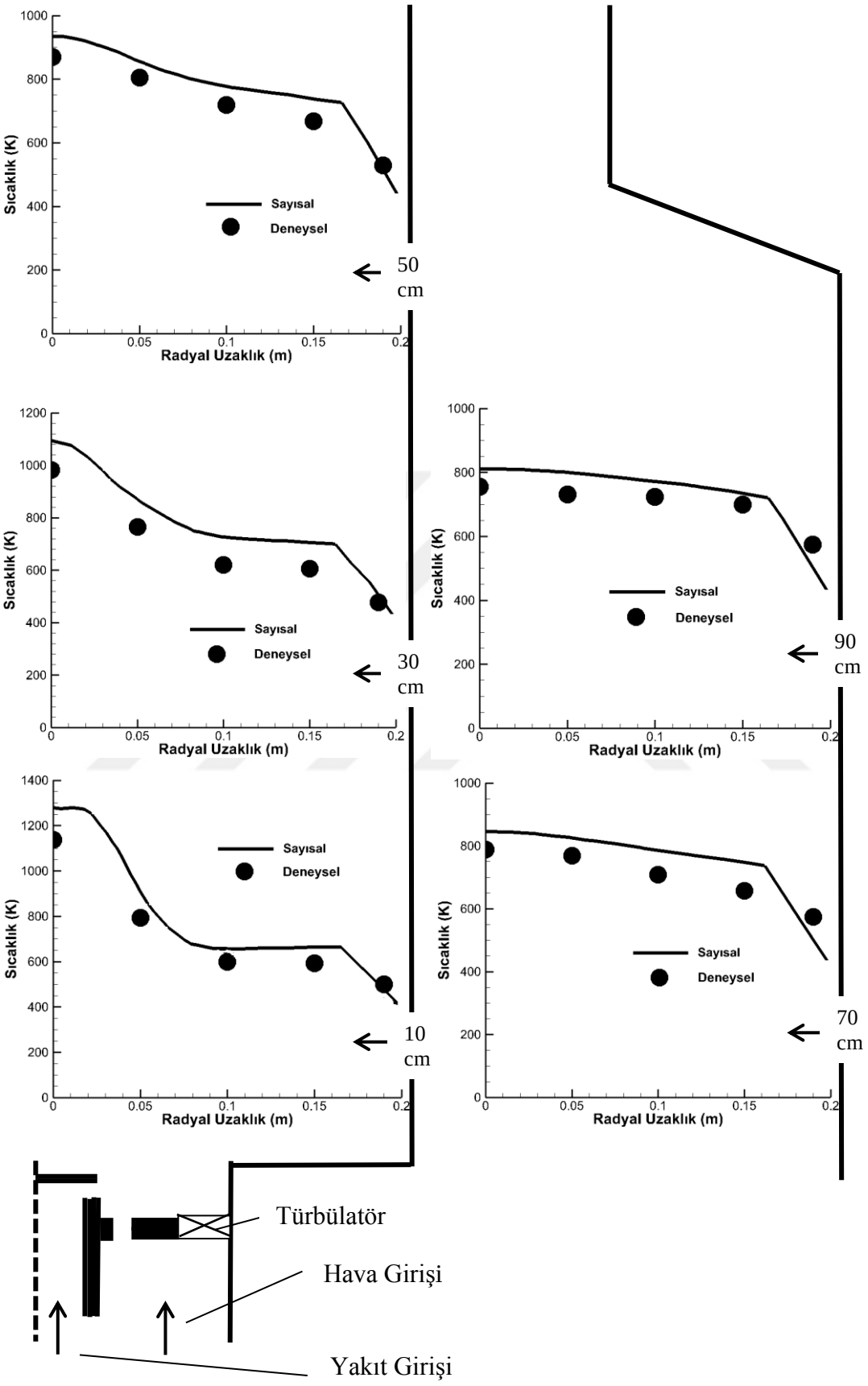


(a) (b)

Şekil 6.54. Kok fırını gazı için 30 cm (a) ve 50 cm (b) eksenel uzaklıklardaki deneysel ve sayısal radyal NO_X dağılımlarının karşılaştırılması

Fluent HAD kodu NO_X tahminini son işlemcisi ile yapabilmektedir. Ancak, bu tahminler, genellikle, deneysel NO_X ölçümleri ile daha çok bir trend uyumu yakalamaktadır. Şekil 6.54'te de hidrojence zengin kömür gazlarından kok fırını gazı için yapılan NO_X son işlemci tahminleri 30 cm ve 50 cm eksenel uzaklık için sunulmuştur. Yapılan tahminlerden elde edilen sonuçlar, deneysel NO_X ölçümlerinden bir miktar az olmakla beraber trend olarak oldukça iyi bir uyum göstermiştir.

Şekil 6.55'te ise hidrojen beslemesiz şartlar için jeneratör gazı yanması neticesinde elde edilen sıcaklık tahminleri ile deneysel sıcaklık sonuçları karşılaştırılmıştır. Metan ve kok fırını gazı yanması neticesinde ortaya çıkan sonuç ve trend uyumu, jeneratör gazı için de ortaya çıkmıştır. Şekil 6.55'ten de anlaşılacağı üzere, yanma odası boyunca elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar oldukça iyi bir uyum içerisindedir. Yine de buna rağmen, bazı ölçüm noktalarında bir miktar farklılıklar belirlenmiştir. Bu farklılıklar, çok yüksek yüzdelerde olmazken, en kötü tahmin sonuçlarında bile % 10'u aşmamaktadır. Bu sapmalar, daha iyi bilgisayar alt yapısı ve zamana bağlı çözüm gerektiren farklı türbülans modelleri (LES, RANS gibi) kullanılarak giderilebilir. Gerek eksenel gerekse radyal yönlerde elde edilen tahmin sonuçları, yapılan sayısal tahminlerin oldukça iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.55. Jeneratör gazı için deneysel ve sayısal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, farklı ısıl değerlere sahip kömür gazlarının yanma performansları ve emisyon parametreleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Çalışmanın deneysel bölümünün gerçekleştirilebilmesi için Tübitak-1005 programı kapsamında "114M668" kodlu projeden destek sağlanmıştır. Bu destek ile farklı ısıl değerlerdeki kömür gazlarını yakabilmek için yeni tip yakıcılar tasarlanmış ve imal edilmiştir. Yapılan tasarımda, kullanılacak olan kömür gazlarının ısıl değerleri, yoğunlukları ve bünyelerinde bulunan gazların yanma karakteristikleri dikkate alınmıştır. Bu nedenle üç farklı yakıt ve hava kesitlerine sahip yakıcı imal edilmiştir. Bunlardan birincisi, metanın yakılması için kullanılmıştır. İkinci yakıcı, hidrojence zengin içerikli (kok fırını gazı, şehir gazı I, şehir gazı II ve su gazı) kömür gazlarını yakmak için tasarlanmış ve imal edilmiş olup üçüncü yakıcı ise düşük kalorili (jeneratör gazı ve yüksek fırın gazı) kömür gazlarının yanma performanslarını ve emisyon parametrelerini belirlemek için tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ayrıca, düşük kalorili kömür gazlarını yakabilmek için kullanılan yakıcının merkezinden, düşük kalorili kömür gazlarına ve havaya yanma öncesinde karışmayacak şekilde hidrojen geçiş borusu ilave edilmiş ve bu sayede, düşük kalorili kömür gazlarının alevlerine hidrojen beslemesi de yapılarak bu yakıtların yanma performansları arttırılmıştır. "114M668" kodlu proje ile bu yakıtların yakılabileceği bir yanma odası, farklı ısıl değerlerdeki kömür gazlarını besleyebilecek yakıt hatları, hava ve hidrojen hattı imal edilmiştir. Yakıtların sıcaklık ve emisyon parametrelerini belirlemek için ısıl çift, baca gazı analizörü ve istenilen bileşimlerde yakıt tüpleri de bu proje ile sağlanmıştır.

Çalışmanın sayısal bölümünde ise, çalışmanın yürütüldüğü anabilim dalında bulunan ANSYS Fluent HAD kodu ile akış ve yanma modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu modellemelerde, genellikle karışım yakıtların modellenmesinde kullanılan The PDF/Mixture Fraction yanma modeli kullanmış olup, P-1 radyasyon modeli ile de daha iyi sonuçlar yakalanmış ve farklı türbülans modelleri ile de denemeler yapılarak her bir yakıt grubu için uygun türbülans modelinin seçilmesi de sağlanmıştır. Yapılan sayısal modellemeler ile deneysel ölçüm sonuçları da çalışmanın son bölümünde karşılaştırılmış ve sayısal modellemelerin bu yakıtlar için oldukça iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Konut ve sanayide yapılan ısıtma uygulamalarında, elektrik üretim santrallerinde ve

kojenerasyon uygulamalarında, demir-çelik endüstrisinde vb. uygulamalarda, farklı ısıl değerlere ve farklı gaz içeriklerine sahip kömür gazlarının doğru yakma sistemi tasarımları ile rahatlıkla kullanılabileceği bu çalışma ile gösterilmeye çalışılmıştır. Çalışma, başarılı bir şekilde sonuçlandırılmış olup, çalışma neticesinde elde edilen önemli bulgular aşağıda sunulmuştur.

7.1. Sonuçlar

- Çalışmanın deneysel bölümünde yapılan deneyler neticesinde, en yüksek alev sıcaklığına, metanın yakılması neticesinde ulaşılmıştır. Diğer taraftan, tasarımı yapılan kömür gazı yakıcıları ile yakılan kömür gazlarından özellikle hidrojence zengin kömür gazlarının alev sıcaklıkları da metana oldukça yakın olmuştur. Bu sonuç ile hidrojence zengin kömür gazları için imal edilen yakıcının kullanımı ile bu gazların kullanımının yaygınlaştırılabileceği belirlenmiştir.

- Deneysel çalışmalarda yanma odası boyunca elde edilen sıcaklık değerleri değerlendirildiğinde, yanma odasının bazı bölgelerinde kömür gazlarının sıcaklık seviyelerinin metana göre daha yüksek oldukları belirlenmiştir. Bu durumun nedeninin tasarımı yapılan yakıcıların kesitlerinin farklı olması olduğu düşünülmektedir. Metan ile elde edilen aynı ısıl kapasite, daha düşük ısıl değere sahip kömür gazları ile sağlandığı zaman, daha fazla miktarda yakıt beslenmesi gerekli olup, bu durum, kömür gazı yakıcı tasarımında özellikle yakıt kesitlerinin büyümesine ve dolayısıyla nispeten daha geniş çaplı yakıcıların imal edilmesine neden olmaktadır.

- Düşük kalorili kömür gazlarına ilişkin sıcaklık ölçümlerinde kömür gazlarının mevcut halleri ile, küçük kapasiteli uygulamalarda kullanılabilirken daha büyük kapasiteli uygulamalar için çok da uygun olmadığını göstermiştir. Düşük kalorili kömür gazlarının yanma performanslarını arttırmak için bu kömür gazlarını yakabilecek yakıcının merkezinden alev bölgesine hidrojen beslenmesi ile bu kömür gazlarının alev sıcaklıkları arttırılmıştır. Böylece, bu kömür gazlarının kullanım alanlarının genişletilmesi sağlanabilecektir.

- Deneylerde kullanılan ısıl çiftler ile ölçümü yapılan sıcaklık değerlerinin ışınımdan kaynaklı ısı kaybına karşı düzeltilmesinin gerekli olduğu belirlenmiştir. Bu düzeltme

işlemleri, elde edilen sıcaklık değerlerine göre değişmekte olup 2-80 K arasından bir düzeltme tüm yakıtlar için yapılmıştır.

- Çalışmanın sayısal bölümünde yapılan sıcaklık tahminleri değerlendirilecek olursa, metan için yapılan sayısal sıcaklık tahminlerinin deneysel ölçümlerle oldukça iyi bir uyum içerisinde olduğu rahatlıkla söylenebilir. Benzer şekilde, hidrojence zengin ve düşük kalorili kömür gazları için yapılan sıcaklık tahminleri de deneysel sonuçlarla uyumlu olmuştur. Ancak, özellikle alev bölgesine yönelik yapılan tahminlerin, ölçülen sıcaklık değerlerinden bir miktar yüksek olduğu da belirlenmiştir. Daha doğru sayısal tahminleri, kullanılan bilgisayar hafıza ve kapasitelerinin ve uygulamada daha karmaşık türbülanslı yanma reaksiyonunda oluşan ve reaksiyon esnasında başka radikal ve türlere dönüşen birçok ara radikal ve kimyasal türü içermeyen basit bir veya birkaç adımlı yanma reaksiyon mekanizmasının kullanımının sınırladığı düşünülmektedir.

- Çalışmanın sayısal bölümünde elde edilen diğer bir parametrede, deneysel bölümde ölçümü yapılamayan hız dağılımları olmuştur. Bu dağılımlar, tüm yakıtlar için yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisinde hangi bölgelere doğru hareket ettiklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, yanma odası girişinin duvara yakın bölgelerinin resirkülasyon bölgeleri olduğu tespit edilmiştir.

- Çalışmanın deneysel kısmında yapılan emisyon ölçümleri irdelenecek olursa, kömür gazlarının bünyesinde bulunan, azot, karbon monoksit ve karbon dioksitin yanma sonu ürünlerini doğrudan etkilediği sonucuna varılmıştır. Hidrojence zengin kömür gazlarının NO_X emisyonları, bünyelerinde bulunan serbest azotun da ısıl NO_X'a katkı yapmasıyla özellikle alev bölgesinde daha yüksek ölçülmüştür. Buna karşın, düşük kalorili kömür gazları, oldukça yüksek miktarda azot içermelerine rağmen, alev sıcaklıklarının düşük olması nedeni ile oldukça düşük NO_X oluşumuna katkı sağlamışlardır. Ancak, hidrojen beslenmesi ile alev sıcaklığının yükselmesi neticesinde, bünyelerinde bulunan serbest azotlar hızlı bir şekilde NO_X'a dönüşmüştür. Buna rağmen, yanma odası çıkışına çok yüksek seviyelerde NO_X'a rastlanmamıştır.

- Çalışmanın deneysel kısmında yapılan CO ölçümleri ile, düşük kalorili kömür gazlarının bünyesinde bulunan CO'lerin daha yavaş reaksiyona girdikleri belirlenmiştir. Ayrıca, aleve hidrojen beslenmesi ile su gazı değişim reaksiyonu sayesinde, düşük

kalorili kömür gazlarında yüksek oranda bulunan CO'lerin hızlı bir şekilde CO_2'ye dönüştükleri belirlenmiştir.

- Deneyler esnasında, yanma odası üzerinde bulunan gözetleme camı ile yapılan gözlemlerde, metan, hidrojence zengin ve düşük kalorili kömür gazlarının alevleri sürekli izlenmiş ve herhangi bir alev kopması vb. bir alev kararsızlığına rastlanmamıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma ile ülkemiz için yerli bir kaynak olan kömürden farklı yöntemler sonucunda elde edilen kömür gazlarının yakma sistemlerinde kullanılabilirliği belirlenmiştir. Geliştirilen yakıcılar sayesinde bu kömür gazları başarılı bir şekilde yakılmıştır.

7.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında kazanılan tecrübeler ve bilgiler dikkate alınarak aşağıda birkaç madde halinde verilen önerilerin dikkate alınmasının bundan sonra yapılacak olan çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

- Tasarımı yapılan ve imal edilen kömür gazı yakıcılarının daha büyük kapasiteler için yeniden düzenlemesi esnasında, bu kömür gazlarının fiziksel özelliklerine dikkat edilmesi, uygun tasarımın ortaya çıkarılmasına katkı sağlayacağı bilinmelidir.

- Hidrojence zengin kömür gazlarının ve hidrojen beslemeli düşük kalorili kömür gazlarının yanması neticesinde yüksek miktarda oluşan NO_X emisyonlarının azaltılmasına yönelik bir çalışma, kademeli yakma tekniği kullanılarak deneysel ve sayısal olarak gerçekleştirilebilir.

- Çalışmada kullanılan tüm kömür gazları, lpg ile de karıştırılarak deneysel ve sayısal olarak araştırılabilir.

- Çalışmada kullanılan tüm kömür gazlarının yakıldığı yanma odalarının aerodinamik yanma karakteristikleri LDA ya da PIV kullanılarak belirlenebilir. Böylece, bu yakıtları daha verimli yakabilecek yanma odaları ve yakıcılar tasarlanabilir.

- Çalışmada kullanılan tüm kömür gazları, daha yüksek basınçlarda, yani gaz türbini yanma şartlarında yakılabilir.

- Çalışmada kullanılan tüm kömür gazlarının sıcaklık ölçümlerinin düzeltilmesinde kullanılabilecek yeni Nusselt sayısı geliştirilebilir.

- Çalışmada kullanılan tüm kömür gazları, LES, RANS ve DNS modelleri ya da farklı yanma modelleri ve radyasyon modelleri kullanılarak yeniden modellenebilir. Çözümler zamana bağlı olarak yapılabilir. Yanma reaksiyonları detaylı kimyasal kinetikle analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Yaga, M., Endo, H., Yamamoto, T., Aoki, H. ve Miura, T. (2002). Modeling of eddy characteristic time in LES for calculating turbulent diffusion flame, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(11), 2343-2349.

2. Tomczak, H. J., Benelli, G., Carrai, L. ve Cecchini, D. (2002). Investigation of a gas turbine combustion system fired with mixtures of natural gas and hydrogen, *IFRF Combustion Journal*, Article Number 200207.

3. Shudo, T., Omori, K. ve Hiyama, O. (2008). NO_X reduxtion and NO_2 emission characteristics in rich-lean combustion of hydrogen, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(17), 4689-4693.

4. Yilmaz, I. ve Ilbas, M. (2008). An experimental study on hydrogen-methane mixtured fuels, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(2), 178-187.

5. Frassoldati, A., Frigerio, S., Colombo, E., Inzoli, F., Faravelli, T. (2005). Determination of NO_X emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure, *Chemical Engineering Science*, 60(11), 2851-2869.

6. Tabet, F., Sarh, B. ve Gökalp, I. (2009). Hydrogen-hydrocarbon turbulent non-premixed flame structure, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(11), 5040-5047.

7. Asai, T., Dodo, S., Koizumi, H., Takahashi, H., Yoshida, S. ve Inoue, H. (2011). *Effects of multiple-injection-burner configurations on combustion characteristics for dry low-NO_X combustion of hydrogen-rich fuels*, Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, June 6-10, Vancouver, British Columbia, Canada.

8. Gobbato, P., Masi, M., Toffolo, A. ve Lazzaretto, A. (2011). Numerical simulation of a hydrogen fuelled gas turbine combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(13), 7993-8002.

9. Hashemi, S. A., Skeikhzadeh, G. A., Hajialigol, N. ve Nikfar, M. (2012). Numerical investigation of NO_X reduction in a sudden-expansion combustor with inclined turbulent air jet, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(11), 3723-3731.

10. Ghenai, C., Zbeeb, K. ve Janajreh, I. (2013). Combustion of alternative fuels in vortex trapped combustor, *Energy Conversion and Management*, 65, 819-828.

11. Zhou, Z., Tao, Z. Q., Lin, B. Y. ve Kong, W. J. (2013). Numerical investigation on effects of high initial temperatures and pressures on flame behavior of CO/H_2/Air mixtures near the dilution limit, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), 274-281.

12. Whitty, K. J., Zhang, H. R. ve Eddings, E. G. (2008). Emissions from syngas combustion, *Combustion Science and Technology*, 180, 1117-1136.

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

14. Ranga Dinesh, K. K. J., Jiang, X. ve van Oijen, J. A. (2013). Direct numerical simulation of non-premixed syngas burning with detailed chemistry, *FUEL*, 107, 343-355.

15. Saqr, K. M., Aly, H. S., Sies, M. M. ve Wahid, M. A. (2010). Effect of free stream turbulence on NO_X and soot formation in turbulent diffusion CH_4-air flames, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(6), 611-617.

16. Feyz, M. E., Esfahani, J. A., Pishbin, I. ve 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.

17. Khanafer, K. ve Aithal, S. M. (2011). Fluid-dynamic and NO_X computation in swirl burners, *Intenational Journal of Heat and Mass Transfer*, 54(23-24), 5030-5038.

18. Khelil, A., Naji, H., Loukarfi, L. ve Mompean, G. (2009). Prediction of a high swirled natural gas diffusion flame using a PDF model, *FUEL*, 88(2), 374-381.

19. Keramida, E. P., Liakos, H. H., Founti, M. A., Boudouvis, A. G. ve Markatos, N. C. (2000). Radiative heat transfer in natural gas-fired furnaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(10), 1801-1809.

20. Lee, M. C., Yoon, J., Joo, S. ve Yoon, Y. (2015). Gas turbine combustion characteristics of H2/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle applications, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11032-11045.

21. Lee, M. C., Seo, S. B., Chung, J. H., Kim, s. M., Joo, Y. J. ve Ahn, D. H. (2010). Gas turbine combusiton performance test of hydrogen and carbon monoxide synthetic gas, *FUEL*, 89(7), 1485-1491.

22. Ilbas, M. (2005). The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen-hydrocarbon combustion modelling, *International Journal of Hydrogen Energy*, 30(10), 1113-1126.

23. Delattin, F., Lorenzo, G. D., Rizzo, S., Bram, S. ve Ruyck, J. D. (2010). Combustion of syngas in a pressurized microturbine-like combustor: Experimental results, *Applied Energy*, 87(4), 1441-1452.

24. Ranga Dinesh, K. K. J., Jiang, X., Kirkpatrick, M. P. ve Malalasekera, W. (2012). Combustion characteristics of H_2/N_2 and H_2/CO syngas nonpremixed flames, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(21), 16186-16200.

25. Ge, B., Zang, S., Guo, P. ve Tian, Y. (2012). *Experimental study of nitrogen dilution effects on a double-swirled non-premixed syngas burner*, Proceedings of ASME Turbo Expo 2012, June 11-15, Copenhagen, Denmark.

26. Huang, M., Xiao, Y., Zhang, Z., Shao, W., Xiong, Y., Liu, Y., Liu, Z. ve Lei, F. (2015). Effect of air/fuel nozzle arrangement on the MILD combustion of syngas, *Applied Thermal Engineering*, 87, 200-208.

27. Wang, H., Shao, W., Lei, F., Zhang, Z., Liu, Y. ve Xiao, Y. (2015). Experimental and numerical studies of pressure effects on syngas combustor liner temperature, *Applied Thermal Engineering*, 82, 30-38.

28. Ghenai, C. (2010). Combustion of syngas fuel in gas turbine can combustor, *Advances in Mechanical Engineering*, 10, Article ID 342357.

29. Ranga Dinesh, K. K. J., Jiang, X., Malalasekera, W. ve Odedra, A. (2013). Large Eddy Simulation of fuel variability and flame dynamics of hydrogen-enriched nonpremixed flames, *Fuel Processing Technology*, 107, 2-13.

30. Habib, M. A., Mokheimer, M. A., Sanusi, S. Y. ve Nemitallah, M. A. (2014). Numerical investigations of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200 MW package boiler, *Energy Conversion and Management*, 83, 296-305.

31. Martinez, D. M., Jiang, X., Moulinec, C. ve Emerson, D. R. (2013). Numerical investigation of the effects of fuel variability on the Dynamics of syngas impinging jet flames, *FUEL*, 103, 646-662.

32. Rohani, B. ve Saqr, K. M. (2012). Effects of hydrogen addition on the structure and pollutant emissions of a turbulent unconfined swirling flame, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 681-688.

33. Williams, T. C., Shaddix, C. R. ve Schefer, R. W. (2008). Effect of syngas composition and CO_2-diluted oxygen on performance of a premixed swirl-stabilized combustor, *Combustion Science and Technology*, 180, 64-88.

34. Ziani, L., Chaker, A., Chetehouna, K., Malek, A. ve Mahmah, B. (2013). Numerical simulations of non-premixed turbulent combustion of $CH_4 - H_2$ mixtures using the PDF approach, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(20), 8597-8603.

35. İlbaş, M. ve 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.

36. Hasegawa, T., Sato, M. ve Nakata, T. (2001). A study of combustion characteristics of gasified coal fuel, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(1), 22-32.

37. Hasegawa, T. ve Tamaru, T. (2007). Gas turbine combustion Technology reducing both fuel-NO_X and thermal-NO_X emissions for oxygen-blown IGCC with hot/dry synthetic gas cleanup, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 129(2), 358-369.

38. Liu, K. ve Sanderson, V. (2013). The influence of changes in fuel calorific value to combustion performance for Siemens SGT-300 dry low emission combustion system, *FUEL*, 103, 239-246.

39. Dattarajan, S., Kaluri, R. ve Sridhar, G. (2014). Development of a combustor to burn raw producer gas, *Fuel Processing Technology*, 126, 76-87.

40. Kutne, P., Boxx, I., Stöhr, M. ve Meier, W. (2007). *Experimental analysis of the combustion behaviour of low calorific syngas mixtures in a gas turbine model combustor*, Third European Combustion Meeting ECM 2007, Crete, Greece.

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

42. Joo, S., Yoon, J., Kim, J., Lee, M. ve Yoon, Y. (2015). NO_X emissions characteristcs of the partially premixed combustion of H_2/CO/CH_4 syngas using artificial neural networks, *Applied Thermal Engineering*, 80, 436-444.

43. Lee, M. C., Seo, S. B., Yoon, J., Kim, M. ve Yoon, Y. (2012). Experimental study on the effect of N_2, CO_2, and steam dilution on the combustion performance of H2 and CO synthetic gas in an industrial gas turbine, *FUEL*, 102, 431-438.

44. Tian, Y., Zang, S. ve Ge, B. (2016). Experimental investigation on the combustion performance of N2 dilution in syngas non-premix combustion in humid air conditions, *Applied Thermal Engineering*, 107, 560-564.

45. Borman, G. L., Ragland, K. W., (1998). *Combustion engineering*. (First Edition) Singapore: McGraw-Hill Companies, 25-48.

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

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

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

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

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

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

52. DeSoete, G. G. (1990) Fundamental Chemistry of NO_X and N_2O formation and destruction, *Lecture 6: Third Flame Research Course*, IFRF, Netherland.

53. DeSoete, G. G. (1975). *Overall reaction rates of NO and N_2 formation from fuel nitrogen*, 15th Symposium (International) on Combustion, Tokyo, Japan, 1093-1102.

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

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

56. Mustafi, N. N., Miraglia, Y. C., Raine, R. R., Bansal, P. K., ve Elder, S. T. (2006). Spark-ignition engine performance with "powergas" fuel (mixture of CO/H_2): A comparison with gasoline and natural gas, *FUEL*, 85(12-13), 1605-1612.

57. Nef, J. U. (1957). *A History of Technology*. Oxford: Clarendon Press, chap: 3.

58. Van Heek, K. H. ve Muhlen, H. J. (1991). *Fundamental Issues in Control of Carbon Gasification Reactivity*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers Inc., , 1.

59. Speight, J. G. (2008). *Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance*, (First Edition). United States of America: The McGraw-Hill Companies, 145-150.

60. Cusumano, J. A., Dalla Betta, R. A. ve Levy, R. B. (1978). *Catalysis in Coal Conversion*, New York: Academic Press Inc.

61. Probstein, R. F. ve Hicks, R. E. (1990). *Synthetic Fuels*, Cambridge: pH Press, chap. 4.

62. Speight, J. G. (1993). *Gas processing: Environmental aspects and methods*, Oxford: Butterworth Heinemann.

63. Kasem, A. (1979). *Three clean fuels from coal: Technology and economics*, New York: Marcel Dekker Inc.

64. Razzaq, R., Li, C. ve Zhang, S. (2013). Coke Oven Gas: Availability, properties, purification, and utilization in China, *FUEL*, 113, 287-299.

65. Diez, M. A., Alvarez, R. ve Barriocanal, C. (2002). Coal for metallurgical coke production: predictions of coke quality and future requirements for coke making, *International Journal of Coal Geology*, 50(1-4), 389-412.

66. Modesto, M. ve Nebra, S. A. (2009). Exergoeconomic analysis of the power generation system using blast furnace and coke oven gas in a Brazilian steel mill, *Applied Thermal Engineering*, 29(11-12), 2127-2136.

67. Liao, H., Li, B. ve Zhang, B. (1998). Prolysis of coal with hydrogen-rich gases. 2. Desulfurization and denitrogenation in coal prolysis under coke-oven gas and synthesis gas, *FUEL*, 77(14), 1643-1646.

68. Bermúdez, J. M., Arenillas, A., Luque, R. ve Menéndez, J. A. (2013). An overview of novel technologies to valorise coke oven gas surplus, *Fuel Processing Technology*, 110, 150-159.

69. Wikipedia. Blast Furnace Gas. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FBlast_furnace_gas&date=2016-12-30, Son Erişim Tarihi: 30.12.2016

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

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

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

73. 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.

74. Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, (First Edition), London: McGraw-Hill Book Company.

75. Heitor, M. V., Moreira, A. L. N. (1993). Thermocouples and sample probes for combustion studies, *Progress in Energy and Combustion Science*, 19, 259-278.

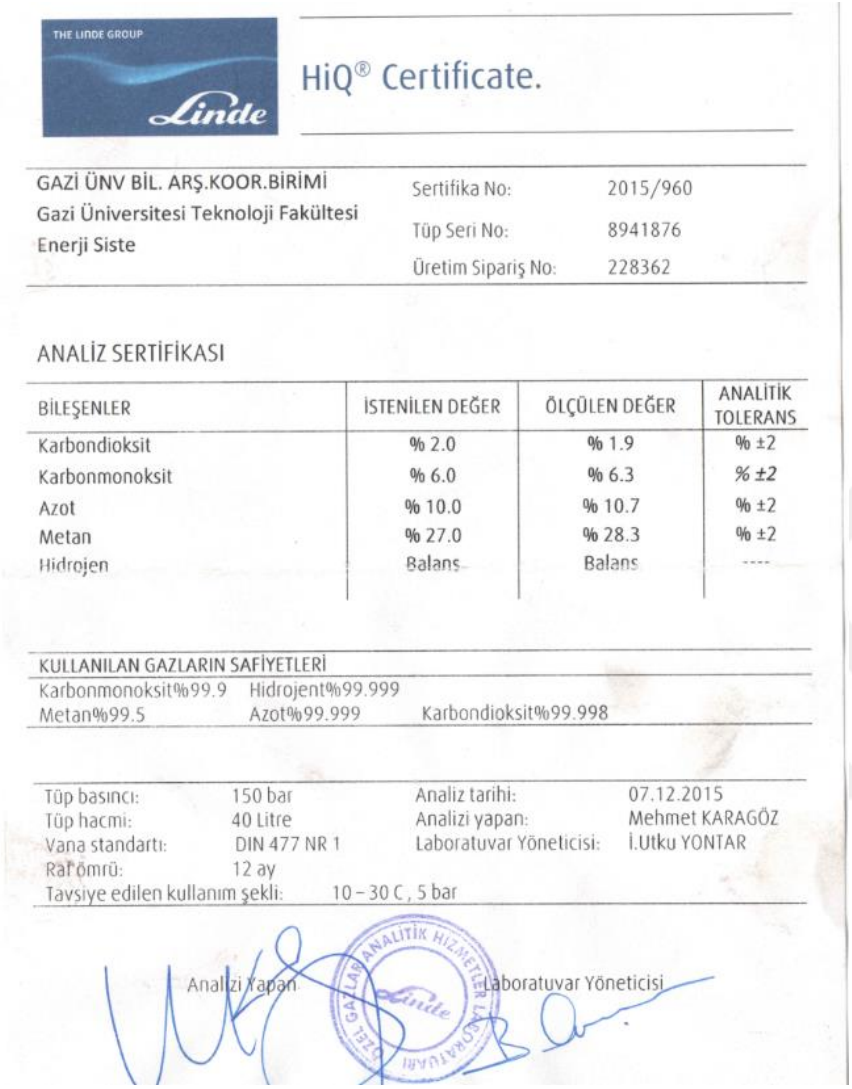
76. Al-Sharifi, F. A. (1980). The measurements and correction of mean temperature in swirling flames, *UWCC, Department Report*, No: 563.

77. Siegel, R., Howell, J. (2002). *Thermal radiation heat transfer*, (Fourth Edition), Newyork: Taylor&Francis Group.

78. Vanoverbeghe, K. (2004). *Flow, Turbulence and Combustion of Premixed Swirling Jet Flames*, Ph. D. Thesis, Katholieke Universiteit Lewen, Belgium.

EKLER

EK-1. Hazırlanan gazların sertifikaları



THE LINDE GROUP

Linde

HiQ® Certificate.

GAZİ ÜNV BİL. ARŞ.KOOR.BİRİMİ
Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Enerji Siste

Sertifika No: 2015/960
Tüp Seri No: 8941876
Üretim Sipariş No: 228362

ANALİZ SERTİFİKASI

BİLEŞENLER	İSTENİLEN DEĞER	ÖLÇÜLEN DEĞER	ANALİTİK TOLERANS
Karbondioksit	% 2.0	% 1.9	% ±2
Karbonmonoksit	% 6.0	% 6.3	% ±2
Azot	% 10.0	% 10.7	% ±2
Metan	% 27.0	% 28.3	% ±2
Hidrojen	Balans	Balans	----

KULLANILAN GAZLARIN SAFİYETLERİ
Karbonmonoksit%99.9 Hidrojent%99.999
Metan%99.5 Azot%99.999 Karbondioksit%99.998

Tüp basıncı: 150 bar
Tüp hacmi: 40 Litre
Vana standartı: DIN 477 NR 1
Raf ömrü: 12 ay
Tavsiye edilen kullanım şekli: 10 – 30 C , 5 bar

Analiz tarihi: 07.12.2015
Analizi yapan: Mehmet KARAGÖZ
Laboratuvar Yöneticisi: İ.Utku YONTAR

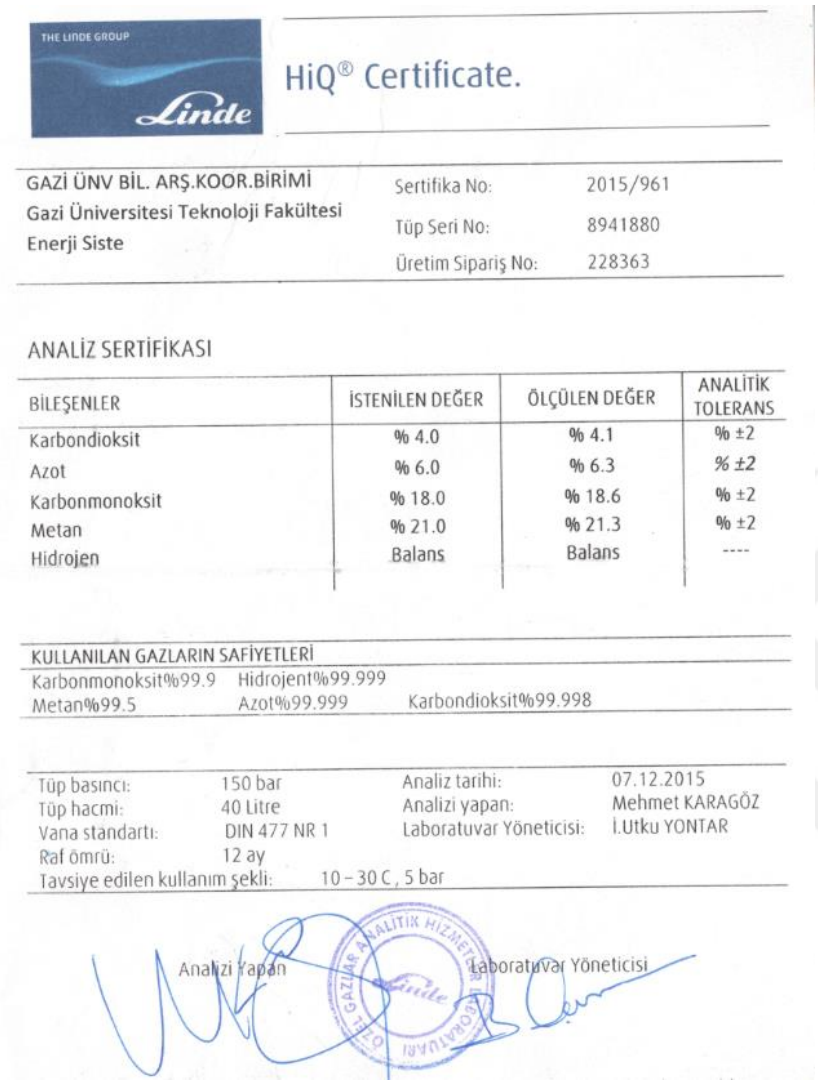
Analizi Yapan

GAZ ANALİTİK HİZMETLER LABORATUVARI Linde

Laboratuvar Yöneticisi

Şekil 1.1. Hazırlanan kok fırını gazının içeriğini gösteren sertifika

EK-1. (devam) Hazırlanan gazların sertifikaları



THE LINDE GROUP

Linde

HiQ® Certificate.

GAZİ ÜNV BİL. ARŞ.KOOR.BİRİMİ
Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Enerji Siste

Sertifika No: 2015/961
Tüp Seri No: 8941880
Üretim Sipariş No: 228363

ANALİZ SERTİFİKASI

BİLEŞENLER	İSTENİLEN DEĞER	ÖLÇÜLEN DEĞER	ANALİTİK TOLERANS
Karbondioksit	% 4.0	% 4.1	% ±2
Azot	% 6.0	% 6.3	% ±2
Karbonmonoksit	% 18.0	% 18.6	% ±2
Metan	% 21.0	% 21.3	% ±2
Hidrojen	Balans	Balans	----

KULLANILAN GAZLARIN SAFİYETLERİ

Karbonmonoksit%99.9 Hidrojent%99.999
Metan%99.5 Azot%99.999 Karbondioksit%99.998

Tüp basıncı: 150 bar
Tüp hacmi: 40 Litre
Vana standartı: DIN 477 NR 1
Raf ömrü: 12 ay
Tavsiye edilen kullanım şekli: 10 – 30 C , 5 bar

Analiz tarihi: 07.12.2015
Analizi yapan: Mehmet KARAGÖZ
Laboratuvar Yöneticisi: İ.Utku YONTAR

Analizi Yapan

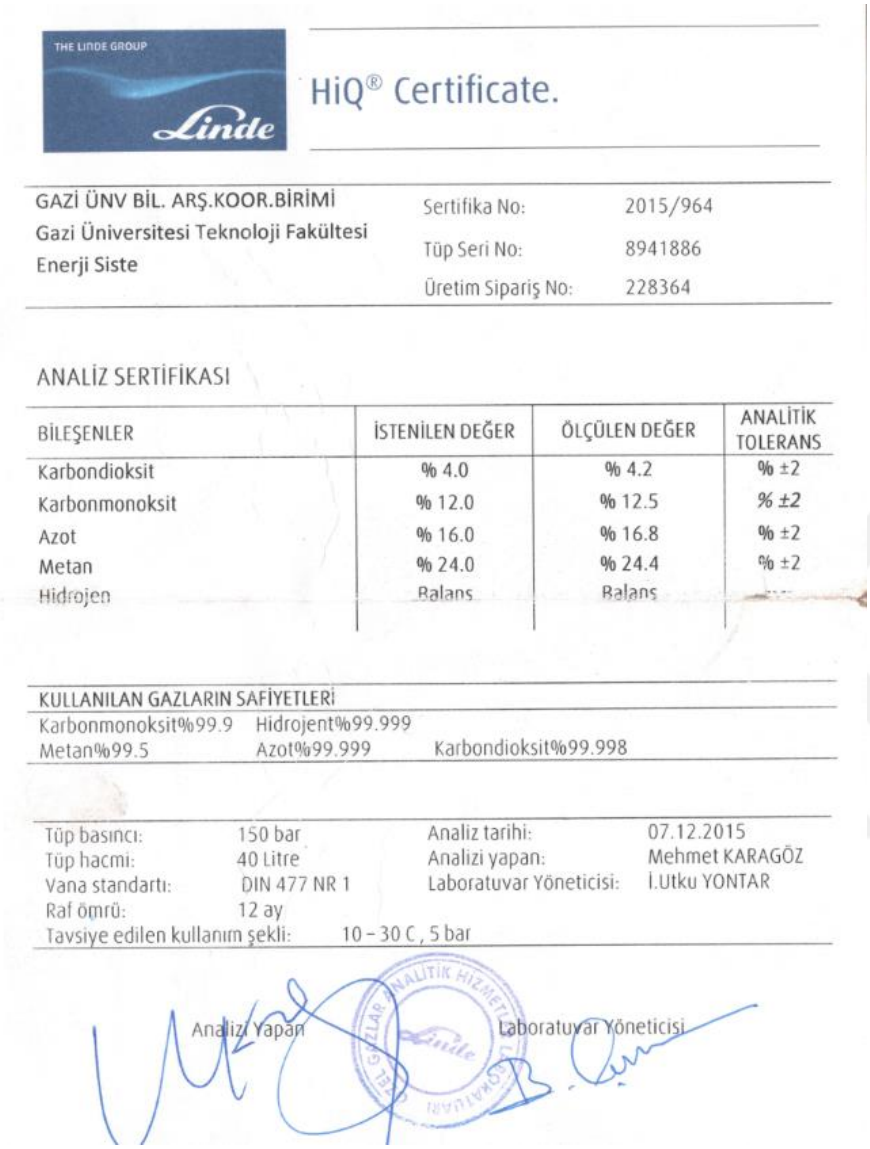
GAZLAR ANALİTİK HİZMETLERİ LABORATUARI

Linde

Laboratuvar Yöneticisi

Şekil 1.2. Hazırlanan şehir gazı I'in içeriğini gösteren sertifika

EK-1. (devam) Hazırlanan gazların sertifikaları



THE LINDE GROUP

Linde

HiQ® Certificate.

GAZİ ÜNV BİL. ARŞ.KOOR.BİRİMİ
Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Enerji Siste

Sertifika No: 2015/964
Tüp Seri No: 8941886
Üretim Sipariş No: 228364

ANALİZ SERTİFİKASI

BİLEŞENLER	İSTENİLEN DEĞER	ÖLÇÜLEN DEĞER	ANALİTİK TOLERANS
Karbondioksit	% 4.0	% 4.2	% ±2
Karbonmonoksit	% 12.0	% 12.5	% ±2
Azot	% 16.0	% 16.8	% ±2
Metan	% 24.0	% 24.4	% ±2
Hidrojen	Balans	Balans	

KULLANILAN GAZLARIN SAFİYETLERİ

Karbonmonoksit%99.9 Hidrojent%99.999
Metan%99.5 Azot%99.999 Karbondioksit%99.998

Tüp basıncı: 150 bar
Tüp hacmi: 40 Litre
Vana standartı: DIN 477 NR 1
Raf ömrü: 12 ay
Tavsiye edilen kullanım şekli: 10 – 30 C , 5 bar

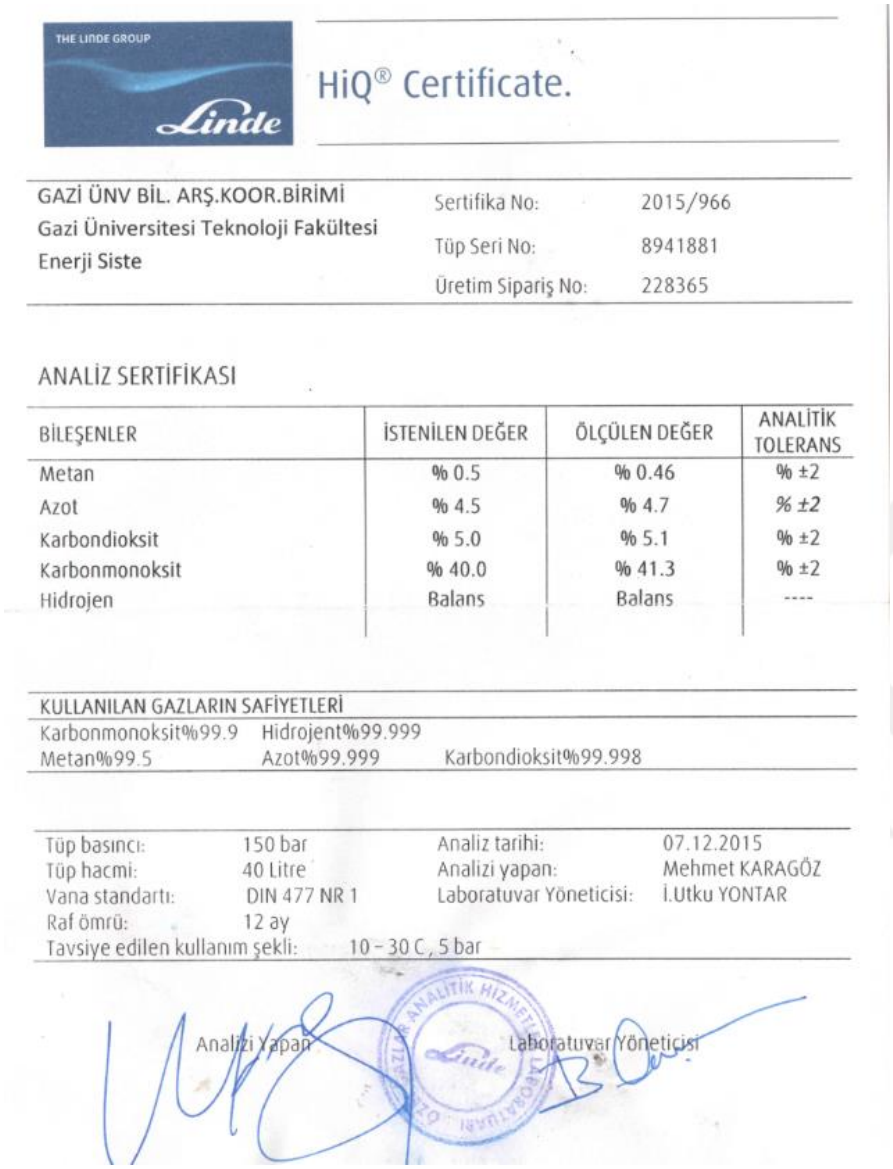
Analiz tarihi: 07.12.2015
Analizi yapan: Mehmet KARAGÖZ
Laboratuvar Yöneticisi: İ.Utku YONTAR

Analizi Yapan

Laboratuvar Yöneticisi

Şekil 1.3. Hazırlanan şehir gazı II'in içeriğini gösteren sertifika

EK-1. (devam) Hazırlanan gazların sertifikaları



THE LINDE GROUP

Linde

HiQ® Certificate.

GAZİ ÜNV BİL. ARŞ.KOOR.BİRİMİ
Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Enerji Siste

Sertifika No: 2015/966
Tüp Seri No: 8941881
Üretim Sipariş No: 228365

ANALİZ SERTİFİKASI

BİLEŞENLER	İSTENİLEN DEĞER	ÖLÇÜLEN DEĞER	ANALİTİK TOLERANS
Metan	% 0.5	% 0.46	% ±2
Azot	% 4.5	% 4.7	% ±2
Karbondioksit	% 5.0	% 5.1	% ±2
Karbonmonoksit	% 40.0	% 41.3	% ±2
Hidrojen	Balans	Balans	----

KULLANILAN GAZLARIN SAFİYETLERİ

Karbonmonoksit%99.9 Hidrojent%99.999
Metan%99.5 Azot%99.999 Karbondioksit%99.998

Tüp basıncı: 150 bar
Tüp hacmi: 40 Litre
Vana standartı: DIN 477 NR 1
Raf ömrü: 12 ay
Tavsiye edilen kullanım şekli: 10 – 30 C, 5 bar

Analiz tarihi: 07.12.2015
Analizi yapan: Mehmet KARAGÖZ
Laboratuvar Yöneticisi: İ.Utku YONTAR

Analizi Yapan

Laboratuvar Yöneticisi

Şekil 1.4. Hazırlanan su gazının içeriğini gösteren sertifika

EK-1. (devam) Hazırlanan gazların sertifikaları

THE LINDE GROUP

Linde

HiQ® Certificate.

GAZİ ÜNV BİL. ARŞ.KOOR.BİRİMİ Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Siste	Sertifika No: Tüp Seri No: Üretim Sipariş No:	2016/036 8940885 233847

ANALİZ SERTİFİKASI

BİLEŞENLER	İSTENİLEN DEĞER	ÖLÇÜLEN DEĞER	ANALİTİK TOLERANS
Metan	% 0.5	% 0.5	% ±2
Karbondioksit	% 5.0	% 5.0	% ±2
Hidrojen	% 12.0	% 12.5	% ±2
Kabonmonoksit	% 28.0	%28.8	% ±2
Azot	Balans	Balans	

KULLANILAN GAZLARIN SAFİYETLERİ

Karbonmonoksit	*% 99,9*	*Hidrojen%99.999*	
Metan % 99.995	*Azot%99.999*	*Karbondioksit*	*%99.998*

Tüp basıncı:	150 bar	Analiz tarihi:	28.01.2016
Tüp hacmi:	40 Litre	Analizi yapan:	Mehmet KARAGÖZ
Vana standartı:	DIN 477 NR 1	Laboratuvar Yöneticisi:	İ.Utku YONTAR
Raf ömrü:	12 ay		
Tavsiye edilen kullanım şekli:	10 – 30 C , 5 bar		

Analizi Yapan

Laboratuvar Yöneticisi

Şekil 1.5. Hazırlanan jeneratör gazının içeriğini gösteren sertifika

EK-1. (devam) Hazırlanan gazların sertifikaları

THE LINDE GROUP

Linde

HiQ® Certificate.

GAZİ ÜNV BİL. ARŞ.KOOR.BİRİMİ
Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Enerji Siste

Sertifika No: 2016/034
Tüp Seri No: 8941875
Üretim Sipariş No: 233848

ANALİZ SERTİFİKASI

BİLEŞENLER	İSTENİLEN DEĞER	ÖLÇÜLEN DEĞER	ANALİTİK TOLERANS
Hidrojen	%2.0	% 1.8	% ±2
Karbondioksit	% 8.0	% 7.7	% ±2
Karbonmonoksit	% 30.0	% 29.6	% ±2
Azot	Balans	Balans	

KULLANILAN GAZLARIN SAFİYETLERİ

Hidrojen%99.999 Azot%99.999
Karbondioksit%99.998 Karbonmonoksit%99.9

Tüp basıncı:	200 bar	Analiz tarihi:	27.01.2016
Tüp hacmi:	40 Litre	Analizi yapan:	Mehmet KARAGÖZ
Vana standartı:	DIN 477NR 1	Laboratuvar Yöneticisi:	İ.Utku YONTAR
Raf ömrü:	12 ay		
Tavsiye edilen kullanım şekli:	10 – 30 C , 5 bar		

Analizi Yapan Laboratuvar Yöneticisi

Şekil 1.6. Hazırlanan yüksek fırın gazının içeriğini gösteren sertifika

EK-2. Baca gazı analizörü

MRU BACA GAZI VE EMİSYON ÖLÇÜM CİHAZLARI LTD. ŞTİ.

KALİBRASYON SERTİFİKASI

FİRMA ADI : GAZİ ÜNİVERSİTESİ

CİHAZ MODELİ : NOVAplus Analizör NOVAplus RCU

CİHAZ SERİ NO : 014297 014253

Tarih : 18.09.2015

Bacagazı Analiz Cihazlarının Kalibrasyon ve ayarı sertifikalı test gazları ile yapılmaktadır.

Sertifikalı Test Gazları Listesi :

CO/O2 Silindir no : 01333	NO Silindir no : 01259
CO/H2/O2 Silindir no : 01330	SO2 Silindir no : 01256
NO2 : 01233	

Ölçüm Sonuçları :

	Silindir Değeri	İlk Okuma	Ayarlanan Değer
O2 %	0,00	N/A	0,1
O2 %	2,02	N/A	2,1
CO ppm	504	N/A	504
NO ppm	80	N/A	80
NO2 ppm	57,69	N/A	58
SO2 ppm	496	N/A	496

MRU BACA GAZI ve EMİSYON ÖLÇÜM CİHAZLARI LİMİTED ŞİRKETİ

Şekil 2.1. MRU tipi baca gazı analizörünün kalibrasyon sertifikası

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARYEYEN, Serhat
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 05.01.1988, Konya
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 202 89 60
Faks : 0 (312) 202 89 47
e-mail : serhatkaryeyen@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi/Enerji Sist. Müh.	2016
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/Makine Müh.	2013
Lisans	Gazi Üniversitesi/Makine Müh.	2011
Lise	Cemil Keleşoğlu Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2011-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN** (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).
2) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN**, İsmail ÖZDEMİR (2015). Investigation of Premixed Hydrogen Flames in Confined/Unconfined Combustors: A Numerical Study. International Journal of Hydrogen Energy, 40 (34) (11189-11194).

3) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN** (2015). A Numerical Study on Combustion Behaviours of Hydrogen-Enriched Low Calorific Value Coal Gases. International Journal of Hydrogen Energy, 40 (44) (15218-15226).

4) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN**, İlker YILMAZ (2016). Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor. International Journal of Hydrogen Energy, 41(17)(7185-7191).

5) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN** (2016). Numerical modelling of effects of hydrogen supply on combustion behaviours of low calorific value coal gases. International Journal of Global Warming, 10 (1/2/3) (16-31).

6) Mustafa İLBAŞ, Murat ŞAHİN, **Serhat KARYEYEN** (2016). Combustion behaviours of different biogases in an existing conventional natural gas burner: An experimental study, International Journal of Renewable Energy Research, 6(3) 1178-1188.

7) **Serhat KARYEYEN**, Mustafa İLBAŞ (2016). Turbulent diffusion flames of coal-derived hydrogen supplied low calorific value syngas mixtures in a new type of burner. International Journal of Hydrogen Energy, In Press.

8) Mustafa İLBAŞ, Murat ŞAHİN, **Serhat KARYEYEN** (2016). 3D Numerical Modelling of Turbulent Biogas Combustion in a Newly Generated 10 kW Burner. Journal of the Energy Institute, In Press.

9) Mustafa İLBAŞ, Zehra GÖKALP ÖZTÜRK, **Serhat KARYEYEN** (2014). Progress in Exergy, Energy, and Environment, Part 6: Fuels and Combustion. Three Dimensional Numerical Modelling of Hydrogen, Methane, Propane and Butane Combustions in a Spherical Model Combustor / SPRINGER.

10) Mustafa İLBAŞ and **Serhat KARYEYEN** (2016). Turbulent Diffusion Flames of a Low-Calorific Value Syngas Under Varying Turbulator Angles, 9th International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection Kayseri / TURKEY.

11) Mustafa İLBAŞ and **Serhat KARYEYEN** (2016). Premixed Turbulent Combustion of Hydrogen-Containing Fuels: An Experimental Study, Belgian Section of the Combustion Institute / Louvain-la-Neuve in BELGIUM.

12) Mustafa İLBAŞ and **Serhat KARYEYEN** (2016). Experimental Investigation of Temperature Measurements of Premixed and Diffusion Methane Flames, 8TH EGE ENERGY SYMPOSIUM AND EXHIBITION Afyon / TURKEY.

13) Mustafa İLBAŞ and **Serhat KARYEYEN** (2016). Determination of Emission Characteristics of Premixed and Diffusion Methane Flames: An Experimental Study, 8TH EGE ENERGY SYMPOSIUM AND EXHIBITION Afyon / TURKEY.
14) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN** and İlker YILMAZ (2015). Effect of Swirl Number on Temperature Levels of Hydrogen-Containing Fuels in a Combustor, 17th International Conference on Emerging Nuclear Energy Systems (ICENES_2015) İstanbul / TURKEY.
15) Mustafa İLBAŞ and **Serhat KARYEYEN** (2014). Numerical Investigation of Effects of Hydrogen Addition on Combustion Characteristics of Low Calorific Value-Coal Gases, 13th International Conference on Clean Energy, İSTANBUL / TURKEY.
16) Mustafa İLBAŞ and **Serhat KARYEYEN** (2014). Combustion behaviours of hydrogen-enriched low calorific value coal gases: A numerical study, 4. International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources, ANTALYA / TURKEY.
17) Mustafa AKTAŞ, Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN**, Murat ŞAHİN (2014). Energy Analysis of an Infrared Dryer for Different Drying Conditions, 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, UŞAK / TURKEY.
18) Mustafa İLBAŞ, İsmail ÖZDEMİR, **Serhat KARYEYEN** (2014). Numerical Investigation of Premixed Hydrogen Flames in Confined/Unconfined Combustors, 7th International Ege Energy Symposium & Exhibition, UŞAK / TURKEY.
19) Mustafa İLBAŞ, Zehra GÖKALP ÖZTÜRK, **Serhat KARYEYEN** (2013). Three Dimensional Numerical Modelling of Hydrogen Combustion in a Spherical Model Combustor , The Sixth International Exergy, Energy and Environment Symposium, RİZE / TURKEY.
20) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN** (2013). Energy and Exergy Analysis of an Existing Gas Turbine, II. European Workshop on Renewable Energy Systems, ANTALYA / TURKEY.
21) Mustafa İLBAŞ, Serkan ÖZEK, **Serhat KARYEYEN** (2012). Effects of the Maintenance Management System on Energy Efficiency of Thermal Power Plants, III. International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources 20-23 May, ISTANBUL / TURKEY.
22) **Serhat KARYEYEN**, Muharrem H. AKSOY, Muammer ÖZGÖREN, Saim KOÇAK (2011). Konya Sanayisinde Enerji Verimliliği, Yeşil Ekonomiler Konferansı, MEVKA, 6-7 Aralık, KONYA / TÜRKİYE.

23) Mustafa İLBAŞ ve **Serhat KARYEYEN** (2015). Model bir yanma odasında N_2 ve CO_2 seyrelticilerinin kok fırını gazı yanma performansına olan etkisinin nümerik olarak incelenmesi, 20. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, BALIKESİR / TÜRKİYE.

24) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN**, Kazım ÇİLİNGİR (2016). Ön Karışımsız ve Ön Karışımlı Metan Alevlerinin Baca Gazı Yanma Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 19 (3) (357-365).

25) Mustafa İLBAŞ, **Serhat KARYEYEN** (2012). Kok Fırını Gazının Model Bir Gaz Türbini Yanma Odasındaki Yanma Performansının Sayısal Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 15 (4) (171-176).

Hobiler

Yüzme, futbol, yürüyüş yapma



GAZİ GELECEKTİR..