
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SENTEZ GAZLARININ OKSİ-YAKIT YANMASI: DENEYSEL KARAKTERİZASYON VE SAYISAL MODELLEME

Abdulkadir BEKTAŞ

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAYIS 2018

Abdulkadir BEKTAŞ tarafından hazırlanan "SENTEZ GAZLARININ OKSİ-YAKIT YANMASI: DENEYSEL KARAKTERİZASYON VE SAYISAL MODELLEME" 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 Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Başkan: Prof. Dr. Yüksel KAPLAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Adnan SÖZEN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Prof. Dr. Kurtuluş BORAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

Üye: Doç. Dr. Bora TİMURKUTLUK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

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

Tez Savunma Tarihi: 09/05/2018

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

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.

Abdulkadir BEKTAŞ

09/05/2018

SENTEZ GAZLARININ OKSİ-YAKIT YANMASI: DENEYSEL KARAKTERİZASYON VE SAYISAL MODELLEME

(Doktora Tezi)

Abdulkadir BEKTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

ÖZET

Enerji açısından dışa bağımlı olan ülkemiz için daha ucuz enerji kaynağı durumunda bulunan ve yaklaşık 200 yıllık rezervi olduğu varsayılan kömür, en önemli enerji kaynağıdır. Ancak, kömürün doğrudan kullanımı, içerdiği bağıl-azot, kükürt ve kül gibi kirleticilerden dolayı, hava kirliliği ve sağlık üzerinde etkili olan sera gazı emisyonları gibi bazı olumsuzlukları da beraberinde getirebilmektedir. Bu nedenle, kömür gazlaştırılarak, daha temiz ve kalorisi yüksek sentez yakıtlar elde edilmektedir. Bu tez kapsamında kömürlerin gazlaştırılması ya da koklaştırma yan ürünü olarak elde edilen, yanabilir ve yanamayan farklı bileşenlerden oluşan düşük kalorili sentez gazları (Yüksek fırın gazı ve Jeneratör gazı) saf oksijenle yakılarak, yanma ve emisyon karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca, yerli kaynak olan kömürün gaz yakıt olarak kullanımının farklı endüstriler için yaygınlaştırılması ve böylelikle yanmanın saf oksijen kullanılarak gerçekleştirildiği metal ve cam endüstrisi, kesme, kaynak vb. işlemlerde de bu gazların entegrasyonunun sağlanması amaçlanmıştır. Bu amaçla, çalışmanın ilk kısmında düşük kalorili kömür gazlar (sentez gazlar), düşük kalorili kömür gazı yakıcısında saf oksijenle yakılmış, yanma performansları ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar, oksi-yanmada yüksek sıcaklıktaki (2000 K civarı) alevin yanma odası girişinde mevcut yakıcı içine doğru toplandığını ve yakıcı duvarının aşırı ısındığını göstermiştir. İstenilmeyen bu durum mevcut yakıcının oksitleyici kesitinin, saf oksijen geçişine daha uygun olmasını sağlamaya dönük iyileştirme yapılmasını gerektirmiştir. Bunun için hava/oksijen debileri arasındaki 4/1'lik oran göz önünde bulundurularak mevcut yakıcının oksitleyici kesiti yaklaşık dört kat azaltılmış ve oksi-yakıcı elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında bu iyileştirmenin düşük kalorili sentez gazlarının yanma özellikleri üzerine etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile sayısal olarak araştırılmıştır. Hesaplanan sıcaklık verileri ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılmış ve sayısal tahmin ile deneysel ölçüm sonuçları arasında yeterli düzeyde tutarlılık olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarla ülkemizde düşük kalorili kömürlerin etken bir şekilde kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Bilim Kodu	:	91440
Anahtar Kelimeler	:	Yakıcı, Oksi-yanma, emisyon, kömür gazı, sentez gazı, modifikasyon
Sayfa Adedi	:	151
Danışman	:	Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

OXY-FUEL COMBUSTION OF SYNGASES: EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION AND NUMERICAL MODELLING

(Ph. D. Thesis)

Abdulkadir BEKTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2018

ABSTRACT

Coal is the most important energy source for our country, which is dependent on foreign energy sources. Moreover, it has reserve of about 200 years. Nevertheless, direct utilization of coals brings about some challenges such as air pollution and higher emissions of greenhouse gas which impact upon on health. For this reason, coal is gasified, and cleaner, higher calorific synthetic fuels are obtained. In this thesis, coal gases (blast furnace gas and generator gas) which are obtained by gasification or by product of coking of coal have burned with pure oxygen, combustion and emission characteristics were investigated experimentally and numerically. Furthermore, it is also aimed to ensure dissemination of usage of local coal, as gaseous fuel, for different industries and the integration of these gases with metal and glass industry, cutting, welding and so on processes. For this purpose, low calorific coal gases have been properly oxy-combusted experimentally by burner and combustion performances and emission values have been measured in the first part of the work. The experimental results for existing burner have shown that the burner wall was overheated due to the very high flame temperature (about 2000 K) in the flame holder zone. This undesirable situation has required the improvement of the oxidizer inlet section of the existing burner for pure oxygen flow. Hence, the oxidizer inlet section of the burner has been reduced approximately four times as volumetric flow rate of oxygen is lower about 4 times than the air. The oxy-combustion burner has been obtained by this modification. In the second part of study, the effect of this improvement on the combustion characteristics of coal gases was investigated numerically by a computational fluid dynamics software. The predicted temperature profiles have been compared with the experimental data and it has been demonstrated that there is consistency between the predicted and the measured results adequately. Studies have shown that low calorific coal can be used effectively in our country.

Science Code : 91440
Key Words : Burner, oxy-fuel combustion, emission, syngas, coal gases, modification
Page Number : 151
Supervisor : Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ

TEŞEKKÜR

Bu alanda doktora yapmam hususunda beni yüreklendiren, tez hocalığı döneminde değerli katkılarını ve tecrübesini esirgemeyen, hemen her noktada bir abi, bir baba şefkati ve titizliği ile yol gösteren tez danışmanım ve çok değerli hocam Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez izleme komitesi üyeleri hocalarım Prof. Dr. Yüksel KAPLAN ve Prof. Dr. Adnan SÖZEN Hocalarıma da en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Bu tez çalışmamın her noktasında akademik bilgi, becerisini hiç bir zaman esirgemeyen; en değerli vaktini tereddütsüz ayıran ve hiçbir zaman emeklerinin hakkını ödeyemeyeceğim değerli Hocam Dr. Serhat KARYEYEN'e 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 ve "07/2018-01" kodlu proje desteği için Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Hayatım her aşamasında anlayış ve desteği ile her zaman yanımda olan eşime ve hayatı daha da yaşanılır ve anlamlı kılan kıymetlim ve biricik kızım Gökçen'ime en içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xiv

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 1

1.1. Giriş 1

1.2. Tezin Amacı 3

1.3. Literatür Araştırması 4

1.3.1. Ulusal çalışmalar 4

1.3.2. Uluslararası çalışmalar 6

2. YANMA, OKSİ-YANMA VE HAVA KİRLİLİĞİ 13

2.1. Giriş 13

2.2. Yanmanın Termodinamiği ve Reaksiyon Kinetiği 13

2.3. Hava Kirliliği ve Kirletici Gazlar 17

2.3.1. Karbon monoksit (CO) oluşumu 22

2.3.2. Karbon dioksit (CO_2) oluşumu 23

2.3.3. NO_X (azot oksit) oluşum mekanizması 24

2.4. Oksi-Yanma 39

2.4.1. Oksi-yanmada CO_2 tutulması 39

2.4.2. Oksi-yakmanın yanma özellikleri 40

2.4.3. Oksi-yanma hava-yanma özelliklerinin karşılaştırılması 41

3. YAKITLAR VE KÖMÜR GAZLARI 45

3.1. Yakıtlar 45

Sayfa

3.1.1. Katı yakıtlar 45
3.1.2. Sıvı yakıtlar 47
3.1.3. Gaz yakıtlar 49
3.2. Gazlaştırma ile Kömür Gazı Elde Edilmesi 50
3.2.1. Gazlaştırmanın tarihsel gelişimi 50
3.2.2. Kömürlerin gazlaştırılması 52
3.2.3. Gazlaştırma termodinamiği 53
3.2.4. Gazlaştırma teknolojileri 58
3.2.5. Kömür gazlaştırma ürünleri 67
3.3. Düşük Kalorili Kömür Gazları 67
3.3.1. Jeneratör gazı 68
3.3.2. Yüksek fırın gazı 69
4. DENEY DÜZENEĞİ 73
4.1. Deneysel Yöntem 73
4.2. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar 73
4.2.1. Sıcaklık ölçümlerinin düzeltilmesi 78
4.2.2. Jeneratör ve yüksek fırın gazlarının debimetre kalibrasyonu 80
5. YANMANIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELLEMESİ 83
5.1. Giriş 83
5.2. Temel Denklemler 84
5.3. Kimyasal Türlerin Korunumu 86
5.4. Yakıcılarda Türbülanslı Akışın Modellenmesi 86
5.4.1. Standard k-Ɛ türbülans modeli 87
5.4.2. Yakıcılar yanmanın modellenmesi 89
5.5. Hesaplamalı Akışkan Modelinin Oluşturulması 93

Sayfa

5.5.1. Sınır şartları 96
5.5.2. Fiziksel özellikler 96
5.6. Sayısal Çözüm Metodu 97
5.6.1. Çözüm algoritması 98
5.6.2. Artıkların hesaplanması 100
5.6.3. Rahatlatma faktörleri 102
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 103
6.1. Deneysel Ölçüm Sonuçları 103
6.1.1. Sıcaklık ölçümleri 105
6.1.2. Oksi-yanma ve hava-yanma sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması 110
6.1.3. Emisyon ölçümleri 113
6.1.4. Oksi-yanma ve hava-yanma emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması 119
6.4. Sayısal Model Sonuçları 124
6.4.1. Model geçerliliği ve türbülans modellerinin etkisi 124
6.4.2. Sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması 127
6.4.3. Hız dağılımlarının karşılaştırılması 132
6.4.5. Emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması 134
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 139
7.1. Sonuçlar 139
7.2. Öneriler 143
KAYNAKLAR 145
ÖZGEÇMİŞ 151

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Birincil endüstriyel hava kirleticileri 18

Çizelge 2.2. Bitümlü kömürün hava-yanma ve oksi-yanma gaz bileşimi 41

Çizelge 3.1. Katı yakıtlarda ortalama oksijen, nem ve kül yüzdeleri 46

Çizelge 3.2. Gazlaştırma reaktörlerinin işletme karakterlerinin karşılaştırılması 66

Çizelge 3.3. Yüksek fırına şarj edilen malzemeler ve ürünler 70

Çizelge 3.4. Ortalama yüksek fırın gazı içeriği 70

Çizelge 4.1. Kömür gazlarının özellikleri 75

Çizelge 4.2. Deneysel ölçüm ekipmanlarının doğruluk dereceleri 78

Çizelge 5.1. Standart k-ε modelde kullanılan sabitler 89

Çizelge 5.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler 90

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Türkiye Birincil Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı, 2016 2

Şekil 2.1. Hava kirleticilerinin kirletici türüne göre sınıflandırılması 19

Şekil 2.2. Hava kirleticilerinin tehlike derecelerine göre sınıflandırılması 20

Şekil 2.3. Hava kirleticilerinin insan ve çevre üzerine etkileri 21

Şekil 2.4. NO oluşum mekanizmaları 26

Şekil 2.5. Azot ara ürünlerinden Yakıt NO_X oluşumu 32

Şekil 2.6. HCN ara ürününden Yakıt NO_X oluşumu 32

Şekil 2.7. Kömürden yakıt NO_X oluşumu A şeması 34

Şekil 2.8. Kömürden yakıt NO_X oluşumu B şeması 35

Şekil 2.9. Kömürden yakıt NO_X oluşumu C şeması 35

Şekil 2.10. Kömürden yakıt NO_X oluşumu D şeması 36

Şekil 2.11. Hava yanma (a) ve oksi-yanma (b) sistemleri 40

Şekil 2.12. Sentetik yakıtların (a) CO_2 ile seyreltilmiş ve (b) H_2O ile seyreltilmiş oksi-yanma güç çevrimleri 42

Şekil 3.1. Bir petrol sisteminin profili; kaynak ve rezervuar kayaçlar, kapanlar ve göç yolları 48

Şekil 3.2. Gazlaştırma prosesine dayalı enerji dönüşüm yöntemleri 53

Şekil 3.3. Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı 59

Şekil 3.4. Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı 60

Şekil 3.5. Karşıt akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı 61

Şekil 3.6. Akışkan yatak biçimleri 62

Şekil 3.7. Lurgi dolaşımlı akışkan yataklı gazlaştırma sistemi 63

Şekil 3.8. Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırma sistemi 64

Şekil 3.9. Noell tipi sürüklemeli akışlı gazlaştırma sistemi 65

Şekil 3.10. Kömür gazlaştırma ürünleri 67

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.1. Mevcut yakıcı ve hareketli türbülatör 74

Şekil 4.2. Yanma sisteminin yerleşimi 75

Şekil 5.1. Mevcut yakıcı 94

Şekil 5.2. Mevcut ve modifiye edilmiş yakıcıların hava (a) ve oksijen (b) kesitleri.... 95

Şekil 5.3. Mevcut ve modifiye edilmiş yakıcıların hava (a) ve oksijen (b) kesitleri.... 95

Şekil 5.4. Kademesiz kontrol hacmi depolama şemasının gösterimi 98

Şekil 5.5. P düğümünü çevreleyen tipik hesaplama hücresinin gösterimi 98

Şekil 5.6. Ansys Fluent programı için çözüm yöntemi akış şeması 100

Şekil 6.1. Eksenel sıcaklık dağılımları 105

Şekil 6.2. Yanma odası boyunca radyal sıcaklık dağılımları 109

Şekil 6.3. Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli durumları için elde edilen eksenel sıcaklık dağılımı..... 110

Şekil 6.4. Düşük kalorili kömür gazlarının hava-yanma ve oksi-yanma koşullarında elde edilen eksenel sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması..... 111

Şekil 6.5. Oksi-yanma ve hava-yanma radyal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması 112

Şekil 6.6. Yanma odası boyunca ölçülen radyal NO_X dağılımları 114

Şekil 6.7. Yanma odası boyunca ölçülen radyal CO_2 dağılımları 116

Şekil 6.8. Yanma odası boyunca ölçülen radyal CO dağılımları 118

Şekil 6.9. Oksi-yanma ve hava-yanma NOx emisyonlarının karşılaştırılması..... 120

Şekil 6.10. Oksi-yanma ve hava-yanma CO_2 emisyonlarının karşılaştırılması..... 122

Şekil 6.11. Oksi-yanma ve hava-yanma CO emisyonlarının karşılaştırılması 123

Şekil 6.12. Jeneratör gazı için Türbülans modellerinin etkisi..... 125

Şekil 6.13. Oksi-yanma koşullarında mevcut yakıcı için tahmin edilen ve ölçülen radyal sıcaklık dağılımları..... 126

Şekil 6.14. Mevcut yakıcıda, yüksek fırın ve jeneratör gazlarının oksi-yanma ve hava- yanma eksenel sıcaklık dağılımları 128

Şekil 6.15. Düşük kalorili sentez gazların eksenel sıcaklık dağılımları..... 129

Şekil **Sayfa**

Şekil 6.16a. Mevcut ve oksi yakıcıda, yüksek fırın gazının oksi-yanma ve hava-yanma eksenel sıcaklık dağılımları 129

Şekil 6.16b. Mevcut ve oksi yakıcıda, jeneratör gazının oksi-yanma ve hava-yanma eksenel sıcaklık dağılımları 129

Şekil 6.17. Oksi-yanma koşulları altında jeneratör ve yüksek fırın gazlarının mevcut ve oksi yakıcı için kontur sıcaklık dağılımları 130

Şekil 6.18. Düşük kalorili sentez gazlarının tüm yanma koşulları için radyal sıcaklık dağılımları 131

Şekil 6.19. Düşük kalorili sentez gazlarının tüm yanma koşulları için eksenel hız dağılımları 133

Şekil 6.20. Düşük kalorili sentez gazlarının tüm yanma koşulları için radyal NOx dağılımları 135

Şekil 6.21. Mevcut (a ve c) ve oksi-yanma (b ve d) yakıcılar için konturlar (ppm cinsinden birim) için GG (a ve b) ve BFG (c ve d) NOX dağılımları..... 136

Şekil 6.22. Düşük kalorili kömür gazlarının tüm yanma koşulları için radyal CO_2 dağılımları 137

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 4.1. Deney düzeneğinin genel görünümü 73

Resim 4.2. Mevcut yanma odasının genel görünüşü 76

Resim 4.3. Taşınabilir baca gazı analizörü 77

Resim 4.4. Seramik uçlu gaz probu 77

Resim 4.5. Seramik uçlu sıcaklık ölçer 78

Resim 6.1. Jeneratör gazı oksi-yanma deneyinde yakıcının ısınma fotoğrafı 104

Resim 6.2a. Türbülatör mesafesi 7 cm deki jeneratör gaz alevi fotoğrafı 106

Resim 6.2b. Türbülatör mesafesi 2 cm deki jeneratör gaz alevi fotoğrafı 106

Resim 6.3a. Türbülatör mesafesi 7 cm deki yüksek fırın gaz alevi fotoğrafı 107

Resim 6.3b. Türbülatör mesafesi 2 cm deki yüksek fırın gaz alevi fotoğrafı 107

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklamalar**
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

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

Simgeler	Açıklamalar
ppm	Parts per million
°C	Celcius
ρ	Yoğunluk
τ	Vizkoz gerilme tensörü
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	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
DNS	Doğrudan sayısal simülasyon
DRM	Difüzyon reaksiyon modeli
EDC	Girdap kaybolma konsepti
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
IGCC	Entegre gazlaştırma birleşik santral
JG	Jeneratör gazı
JGH1	7.5 kW Jeneratör gazı + 2.5 kW Hidrojen
JGH2	5 kW Jeneratör gazı + 5 kW Hidrojen
MILD	Orta veya yoğun düşük oksijen seyreltme
LES	Geniş girdap simülasyonu
LHV	Alt ısıl değer
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
Mteo	Milyon ton eşdeğer petrol

Kısaltmalar	Açıklamalar
RNG	Renormalizasyon grup
RSM	Reynolds gerilme modeli
TEP	Ton eşdeğer petrol
YFG	Yüksek fırın gazı
YFGH1	7.5 kW Yüksek fırın gazı + 2.5 kW Hidrojen
YFGH2	5 kW Yüksek fırın gazı + 5 kW Hidrojen
ß-PDF	ß-Olasılıklı yoğunluk fonksiyonu
CAS	Kimyasal kısaltmalar servisi
EC	Avrupa komitesi

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

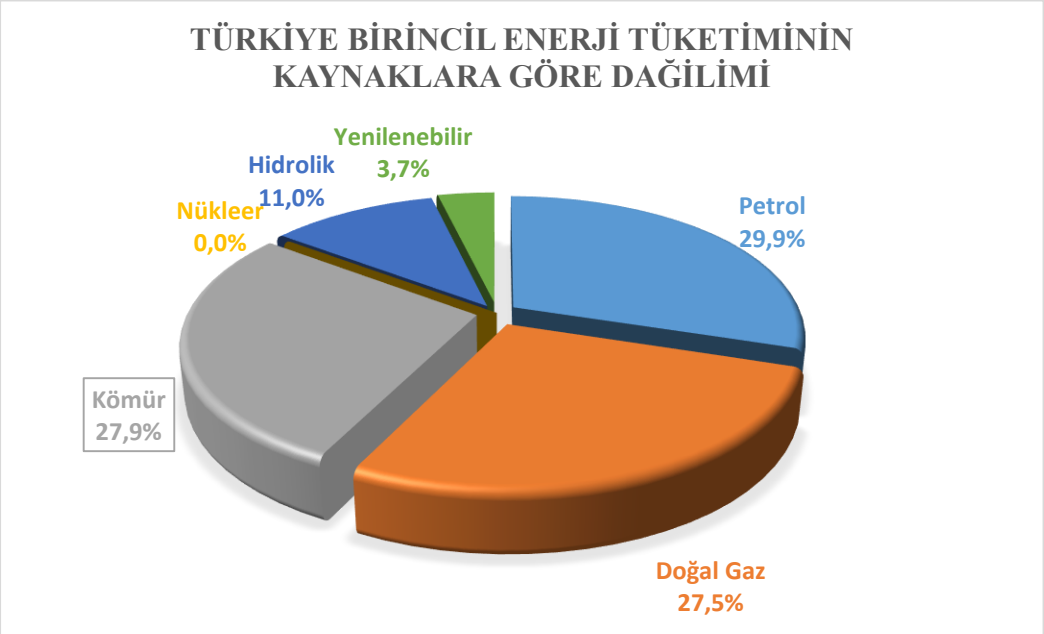
1.1. Giriş

Ekonomik ve sosyal gelişimin itici gücü olan ve hayat kalitesini artıran önemli faktörler arasında yer alan enerjiye olan talep, nüfus artışı, sanayileşme, kentleşme ve teknolojik gelişmelere paralel olarak sürekli artış göstermektedir. Özellikle Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelerde görülen görece yüksek ekonomik büyüme oranları yaşam standartlarının artmasına dolayısıyla enerjiye olan talebi ciddi artırmaktadır.

Uzun dönemde (2013-2040 arası) ortalama %3,5 büyümesi beklenen dünya ekonomisi ile birlikte dünyadaki nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşme, doğal kaynaklara ve enerjiye olan talebi önemli ölçüde arttırmaktadır. Yapılan projeksiyon çalışmaları, mevcut enerji politikalarının devamı halinde, 2040 yılında dünya enerji talebinin, ortalama yıllık %1,38'lik artışlarla, 2013 yılına göre % 44,9 (13.559 milyon ton eşdeğeri petrolden (Mtoe) 19.643 (Mtoe'ye) daha fazla olacağına işaret etmektedir. Dünya enerji talebindeki artışın sürdürülebilir koşullarda karşılanabilmesi için ise, 2015-2040 döneminde, enerji sektöründe yaklaşık 68 trilyon ABD Doları (2014 rakamlarıyla) değerinde yatırım yapılmasına ihtiyaç duyulduğu hesaplanmaktadır [1].

Ülkemiz açısından değerlendirme yapıldığında, OECD ülkeleri içerisinde geçtiğimiz 10 yıllık dönemde enerji talep artışının en hızlı gerçekleştiği ülke durumuna gelmiştir. Aynı şekilde ülkemiz, dünyada 2002 yılından bu yana elektrik ve doğal gazda Çin'den sonra en fazla talep artış hızına sahip ikinci büyük ekonomi olmuştur. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından yapılan projeksiyonlar bu eğilimin orta ve uzun vadede de devam edeceğini göstermektedir. [2]. Bütün bunların yanı sıra enerji ve doğal kaynaklar alanındaki ithalat bağımlılığımız dikkate alındığında, küresel ve bölgesel eğilimlerin etkisinde değişen piyasaların getirmiş olduğu riskler ülkemiz için büyük önem arz etmektedir. Bundan dolayı, hem doğal kaynaklarımızın ekonominin büyümesine ve ülke refahına katkıda bulunacak şekilde yönetilmesinde hem de enerji arz güvenliği açısından, daha ucuz enerji kaynağı durumundaki kömür ve biyokütle gibi yerli fosil yakıtların verimli kullanılması ve yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik verilerek kaynak çeşitlendirmesinin sağlanması çok önem arz etmektedir.

Dünyada en fazla rezerve sahip olan ve hemen her yerde bulunup çıkarılabilme imkânı sağlayan kömür, en çok kullanılan enerji kaynağı olması nedeniyle günümüzde olduğu gibi önümüzdeki yıllarda da stratejik önemini korumaya devam edecektir. 2016 yılı itibarı ile Dünya üzerinde kömür (153 yıl), petrol (50,6 yıl) ve doğalgaza (52,5 yıl) göre daha uzun yıllar yetecek rezerve sahiptir. Giderek artan dünya nüfusu ve enerji ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda kömürün daha fazla önem kazanacağı öngörülmektedir. Kömür, dünya birincil enerji tüketiminin % 28,9'unu karşılamaktadır. Rezervlerinin dünya üzerinde geniş bir alana yayılması nedeniyle de kömür cazip bir yakıt türü olmaya devam etmektedir. Ülkemiz açısından 2016 yılı üretimi baz alındığında yaklaşık 163 yıllık kömür rezervimizin bulunması, kömürün stratejik bir enerji kaynağı olması gerçeğini ortaya koymaktadır. [3].



Şekil 1.1. Türkiye Birincil Enerji Tüketiminin Kaynaklara Göre Dağılımı, 2016 (137,9 Milyon TEP)

Şekil 1.1'de görüleceği üzere Türkiye'nin 2016 yılında 137,9 Milyon TEP'lik toplam birincil enerji tüketimi içinde fosil yakıtlar, % 85,2 paya sahiptir. Türkiye'de en çok kullanılan enerji kaynağı petroldür (% 29,9), ikinci sırada az bir farkla kömür (% 27,9) ve üçündü sırada doğalgaz (% 27,5) gelmektedir. Türkiye'de fosil yakıt tüketiminin yaklaşık % 80'i ithalat yoluyla karşılanmakta ve dış ticaret açığındaki enerji ithalatı payı yaklaşık %50-60 bandında seyretmektedir. 2016 yılında 27,1 Milyar $ enerji ithalatıyla bu oran % 48,4 gerçekleşmiştir. Enerji açısından bilhassa petrol ve doğal gazda dışa bağımlılığın açık

bir göstergesi olan bu oranın aşağı seviyelere çekilebilmesi, yerli ve Türkiye'nin ispatlanmış toplam 163 yıllık kömür rezervi ile 2016 yılı dünya kömür rezervinin % 1'ine sahip olması gerçeği, kömürün stratejik bir enerji kaynağı olduğunu ortaya koyan diğer önemli bir unsurdur. Bu çerçevede, kömür potansiyelinin değerlendirilmesi için uygun teknolojilerin geliştirilmesi, ülkenin öncelikli enerji stratejileri arasında yer alması gerektiği öngörülmektedir. Bu nedenle kömür teknolojilerine yapılacak her türlü yatırım, milli ekonominin gelişimine ciddi katkı sağlayacağı aşikârdır. [3].

Bununla birlikte, direkt olarak kömür kullanımı, kömürün içerdiği bağıl-azot, kükürt ve kül gibi kirleticilerden dolayı, hava kirliliği ve sağlık üzerinde etkili olan sera gazı emisyonları ve özellikle Türk linyiti için yanma sonunda oluşan ergimiş kül nedeniyle kömürün doğrudan kullanımı ciddi zorluklar doğurabilmektedir. Bu nedenle, kömürler gazlaştırılmakta, daha temiz ve kalorisi yüksek sentetik yakıtlar elde edilmektedir. Bunun yanında, kömürü, daha kaliteli bir yakıt haline (kok) getirmek için yapılan koklaştırma işlemi esnasında açığa çıkan yan ürünler de benzer şekilde kullanılabilmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tez kapsamında, yerli ve önemli bir enerji kaynağı olan kömürlerin gazlaştırılması ya da koklaştırılması neticesinde elde edilen, yanabilir ve yanamayan farklı bileşenlerden oluşan kömür gazlarının (yüksek fırın gazı ve Jeneratör gazı) saf oksijenle yakılarak yanma ve emisyon karakteristikleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı ısıl değerlere sahip bu sentetik yakıtlar (kömür gazları) öncelikle Tübitak-1005 projesi kapsamında imal edilen yakıcı ve yanma odası kullanılarak ön karışımsız (difüzyon) kararlı alev şartlarında, saf oksijenle yakılmaları sağlanmış ve yanma odası boyunca farklı eksenel ve radyal uzaklıklarda sıcaklık ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar ışığında oksi-yanma koşullarında kömür gazlarının yanma performanslarını arttırmak, daha kararlı alev elde etmek ve kömür gazlarını saf oksijenle yakabilecek şekilde bir yakıcı elde etmek amacıyla, mevcut yakıcının oksitleyici kesiti yaklaşık dört kat azaltılarak modifiye edilmiş ve oksi-yanma yakıcısı elde edilmiştir. Literatürde bu alanda önerilen ve üzerinde çalışılan oksi-yakıcı tasarımı ile ilgili çalışmaların az olduğu, bu durumun oksi-yanma sistemlerinin kuruluşunda en önde gelen zorluklardan biri olması ve bu alandaki temel verilerin eksikliği düşünüldüğünde gerçekleştirilen çalışmanın önemi ortaya çıkmaktadır. Elde edilen yeni yakıcı ile düşük

kalorili kömür gazlarının yanma özellikleri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kodu kullanarak sayısal olarak ayrıca araştırılmıştır. Böylece, yerli enerji kaynağı olan kömürün gaz yakıt olarak kullanımının farklı endüstriler için yaygınlaştırılması ve böylelikle yanmanın saf oksijen kullanılarak gerçekleştirildiği metal ve cam endüstrisi, kesme, kaynak vb. işlemlere de bu gazların entegrasyonunu sağlanması amaçlanmıştır. Bunun için çalışmamızda bu gazların hem saf oksijenle yanma performansları hem de emisyon değerleri (NO_X, CO_2, CO) detaylı bir biçimde araştırılmıştır. Ayrıca, bütün bu hedefler doğrultusunda, bu gazların, neredeyse tamamen dışa bağımlı olduğumuz doğalgaza da, alternatif bir yakma yöntemi ile (oksi-yanma), hangi seviyelerde alternatif olabilecekleri ve ne kadar yakıt tasarrufu sağlayabilecekleri ciddi bir biçimde incelenmiştir.

1.3. Literatür Araştırması

Tez çalışması için gerekli deneysel ve sayısal çalışmalara başlamadan önce oksi yanma, kömür gazlarının yanması, kömür gazlarının elde edilmesi ve yanması ile ilgili olarak yerli ve yabancı kaynaklar ciddi bir biçimde taranmıştır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, farklı içeriklerdeki sentetik yakıtların saf oksijenle yakılarak yanma ve emisyon davranışlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar oldukça kısıtlı olduğu ve genellikle farklı oranlarda hava ile sentez yakıt yanması üzerine çalışmalar bulunduğu görülmüştür. Ancak, bu çalışmalarda, yüksek fırını gazı ve düşük kalorili olan jeneratör gazı üzerine ciddi araştırmalar yapılmamıştır. Tez çalışması boyunca konu ile ilgili ciddi bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu araştırma, literatürde oksi-yanma, kömür gazları, sentetik yakıt ve düşük kalorili yakıtlar şeklindeki yapılmıştır. Gerçekleştirilen literatür araştırma sonuçları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1.3.1. Ulusal çalışmalar

Bu alanda yapılan çalışmalar genelde kömür, linyit ve biyokütle gibi katı yakıtlar üzerinde durulmuş ve yanma özellikleri belirlenmiştir. Kömür gazları ile ilgili çalışmaların az olduğu görülmüştür. Bunlar;

Karyeyen (2016) yaptığı çalışmada farklı ısıl değerlere sahip 6 çeşit kömür gazını, geliştirip imal etmiş olduğu 3 yeni tipte yakıcıda yakmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde hidrojence zengin kömür gazlarının alev sıcaklıklarının metana

oldukça yakın olduğu ve diğer düşük kalorili kömür gazlarının yanma performanslarının düşük olmasından dolayı yanma performanslarını arttırmak için alev bölgesine hidrojen beslenmesi yapılması gerekmiştir. Ayrıca hidrojence zengin kömür gazlarının NOx emisyonları özellikle alev bölgesinde daha yüksek ölçülürken; düşük kalorili kömür gazları, oldukça yüksek miktarda azot içermelerine rağmen, alev sıcaklıklarının düşük olmasından kaynaklı oldukça düşük NOx oluştuğu belirtilmiştir [4].

Çekiç (2015) yaptığı çalışmada yeni bulunan yüksek rezervli düşük kaliteli Tekirdağ Malkara linyit kömürü, oksi-yakma koşullarında yakılarak, bu yakıtın yanma özellikleri incelenmiş ve tam yanmanın gerçekleştiği oksi-yakma koşullarını belirlenmiştir. Bu çalışmanın ilk aşamasında kuru hava kullanılarak 400, 500, 600, 700 ºC sıcaklıklarda bir fırında Tekirdağ –Malkara kömürünün yakma deneyleri yapılmıştır. Daha sonra da tam yanmanın gerçekleşip gerçekleşmediğini anlamak için ısıl değer analizi ve termal analiz cihazında ise kısa analizler yapılmıştır [5].

Turan (2009), yaptığı çalışmada düşük kaliteli Soma Deniş linyit kömürüne dört farklı biyokütle türü (fındıkkabuğu, ay çekirdeği kabuğu, zeytin küspesi (pirina), pirinç kabuğu) katarak; kömür ve biyokütle numunelerinin kuru hava ve oksijen ortamlarındaki ayrı ayrı ve birlikte yakılması ile termal analizi ve yanma özellikleri incelemiştir [6].

Toru (2015), yaptığı çalışmada Afşin Elbistan linyit kömürü ile zeytinyağı üretiminden geriye kalan pirina, farklı sıcaklık ve farklı oksi-yakma koşullarında yakılmış ve optimum koşullar belirlenmiştir. Birlikte yakabilmek amacıyla %5, 10, 25, 50 oranlarında Afşin Elbistan kömürüne Pirina ilave edilerek, hazırlanan karışımların karbon içeriğinin tamamı ile yandığı oksi-yakma koşulları belirlenmiştir. Ana numunelere ve yakma sonrası geriye kalan numunelere ısıl değer, kısa analiz, termal analiz ve elementel analiz uygulanmıştır [7].

Selçuk ve Yüzbaşı Nur (2011) yaptıkları çalışmada yerli linyit, zeytin tortusu ve ağırlıkça %50-50 karışımının hava ile oksi-yakıtlı ortamlarda pirolizi ve yanma davranışları Fourier Transform infrared (FTIR) spektrometresi ile kombine edilmiş termogravimetrik analiz cihazı (TGA) kullanılarak araştırılmıştır. Piroliz testleri hava ve oksi-yakıt ortamının ana seyrelme gazları olan azot ve karbon dioksit ortamlarında sırasıyla gerçekleştirilmiştir [8].

Gül (2008), yaptığı çalışmada akışkan yataklı yakma sisteminde, biokütle ve kömürün oksijenle zenginleştirilmiş havayla yanması incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, CO emisyon değeri, oksijen konsantrasyonu artışı ile hızla düşmektedir. Oksijen konsantrasyonunun % 21'den, %40, %60, %80 değerlerine yükselmesiyle, sırasıyla, %75, %10, %2 oranında azalma görülmüştür. Bu değerler biokütle ve kömür için yaklaşık aynıdır. NOx emisyon değeri, oksijen konsantrasyonunun artışı ile artmaktadır Oksijen/hava oranının sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Ürün gazı analiz edilmiştir [9].

1.3.2. Uluslararası çalışmalar

Genelde sera gazı emisyonlarını ve hava kirleticilerini azaltmak için alternatif bir yöntem geliştirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu amaca dönük olarak çalışmaların çoğunluğu katı yakıtlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Özellikle, oksi-yanma şartlarında yakılan kömür gazlarına yönelik çok kısıtlı sayıda deneysel çalışma bulunmaktadır. Azda olsa hava ve oksijenle yakma karşılaştırılmıştır.

Wall ve diğerleri (2009) yaptıkları çalışmada, laboratuvar ölçekli ve pilot ölçekli fırınlarda üç tür Avusturya kömürünü hava ve oksijenle yakmışlardır. Deneyler neticesinde yanma esnasındaki alev kararlılığı, yanma özellikleri, gaz emisyonları ve uçucu kül özellikleri ile ilgi veriler elde edilmiştir. Bu veriler ışığında ısı transferi, Kömür reaktivitesi ve emisyonlar her iki durum için karşılaştırılmıştır. Hava ile yakmaya göre oksi yanmada baca gazındaki NOX seviyesinin %45 arttığı, SO_X seviyesinin ise üç kat fazla olduğu tespit edilmiştir. Hava ile yakmaya göre oksi yanmada baca gazının azaldığı, oksijen seviyesinin arttığı gözlemlenmiştir [10].

Park ve diğerleri (2015) 100 MW bir kazanda, hava-kömür ve oksi-kömür yakmanın yanma ve ışınım özellikleri sayısal olarak araştırmışlardır. Önemli bulgulara ulaşılmıştır. Şöyle ki, oksijenle yanmada, alev sıcaklığının arttığı ama gaz hızının ve alevlerin etrafındaki girdabın azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca hava ile yanmaya göre oksijenle yanma da kömürün CO_2 ve H_2O ya dönüşümünün önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Sayısal bulguların henüz deneylerle desteklenmediği ayrıca vurgulanmıştır [11].

Kuo-Kuang ve diğerleri (2010) Oksijen açısından zenginleştirilmiş hava ile doğalgaz yakma işlemi gerçekleştirmiş ve oksijen zenginleştirme işleminin ısıtma hızı, emisyon miktarları, sıcaklık dağılımları ve yakıt (doğalgaz) tüketimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırma neticesinde oksijen konsantrasyonundaki artışın (21%-30%), ısıtma oranını artırdığı (53,6%) ve daha az yakıt tüketimine (23,6%) neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca alev sıcaklığının, NOx emisyonlarının oksijen konsantrasyonlarındaki artışı ile birlikte artarken; baca gazı içindeki CO_2 konsantrasyonun ise oksijen konsantrasyonu ile doğrusal olarak arttığını tespit etmişlerdir [12].

Jeongseog ve Dongsoon (2015) yaptıkları bir çalışmada farklı oranlarda CH_4 (70~100%,), H_2 (0~15%,), CO (0~10%) ve CO_2 (0~30%) gaz karışımlarından oluşan 20 farklı yakıtı; oksijen (70~100 %) ve CO_2 karışımı ile yakmış ve yakıt ile oksitleyici bileşiminin, alev stabilizasyonu, alev spektrumu ve fırın sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yürütülen çalışmaya göre yakıt karışımında H_2 ve CO miktarı arttığında alev stabilizasyon alanı artarken CO_2 miktarı arttığında ise azalmaktadır. Ayrıca alev eğimi, eşdeğerlik oranından ve yakıt ve oksitleyici arasındaki kütle debisinden de etkilenmiştir [13].

Habib ve diğerleri (2015), model bir gaz türbini yanma odasında oksijen-metan difüzyon alev kararlılığını, çeşitli koşulları altında deneysel olarak araştırmıştır. Bunun için, farklı eşdeğerlilik oranlarında (0,5 -1,0) metan gazı, farklı bileşimdeki O2/CO2 ortamında (100/0, 80/20, 60/40, 50/50, 40/60, 30/70 ve 25/75) yakılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, alev sönmesinin O_2/CO_2 bileşimindeki oksijen yüzdesinin azaltıldığı durumlarda gözlemlenmiştir. Ayrıca alevin, 0.65 eşdeğerlik oranında çok dengeli olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, yakıtın hacimsel debisindeki değişimin alev kararlılığında belirgin değişikliğe neden olmadığı da gözlemlenmiştir. Eşdeğerlilik oranının artmasıyla alev ve baca gazı sıcaklıklarının azaldığı da tespit edilmiştir [14].

Huynh ve Kong (2012) yaptıkları çalışmada üç biyokütle hammaddesinin (çam, akçaağaç-meşe karışımı ve tohum mısır) gazlaştırılmasından elde edilen sentez gazlarını, oksijenle zenginleştirilmiş üç farklı hava ve buhar koşullarında yakmışlar ve bu yanma neticesinde oluşan NOx emisyonlarını araştırmışlardır. Her bir sentetik yakıt, %21, % 30 ve % 40 O_2/hava karışımı ile yakılmış olup, yanma odası içerisinden ve alev bölgesinden herhangi bir sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmemiştir. Bu çalışmada, yanma odası boyunca yalnızca

NOx ölçümleri gerçekleştirilmiş olup, bunun dışında herhangi bir emisyon değeri de alınmamıştır [15].

Hasegawa vd. (2000) yaptıkları bir çalışmada gazlaştırma sonucu elde edilen kömür gazlarını hava ile küçük bir difüzyon yakıcısında yakmış ve farklı yanma şartlarının NOx ve CO emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada eşdeğerlilik oranının, CO/H_2 molar oranının, yakıt içindeki NH_3 konsantrasyonun ve yakıt kalorifik değerinin tek ve iki kademeli yanma şartları için NOx emisyon karakteristikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır [16].

Bongartz ve Ghoniem (2015), CH_4, CO_2 ve H_2S'ten oluşan bir gaz karışımının detaylı kimyasal kinetiğini oksi-yanma şartları için araştırmışlardır. Yapılan detaylı mikyasal kinetik ile bu gaz karışımı için laminer yanma hızını, ateşleme gecikme süresini, gaz karışımında bulunan H_2S'in pirolizini ve oksidasyonunu belirlemişlerdir [17].

Mantzaras (2008) sentez gazlarının hava ile katalitik olarak yakmasına ilişkin sayısal bir çalışma yürütmüştür. Yapılan çalışmada farklı bileşimde CO, H_2 içeren sentez gazları farklı basınçlarda (1-15 bar) havayla katalitik olarak yakılmıştır. H_2 / hava ve CO / hava yakıtlarının katalitik ateşleme sıcaklıklarının sırasıyla, 360-380 K ve 650-700 K olduğunu tespit etmiştir. Gaz reaktivitesinin basınç artışıyla ciddi biçimde arttığı da gözlemlenmiştir [18].

Krieger vd. (2015) yaptıkları çalışmada, "Can" tipi model bir gaz türbini yanma odasında oksi-yakıt yanmasının CFD simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. Kimyasal reaksiyonları modellemek için ön karışımsız denge yanma modeli kullanılmış ve türbülans modeli olarak da Reynolds Stres Modeli (RSM) seçilmiştir. Çalışmada propan/hava, propan/oksi yakıt-1, propan/oksi yakıt-2, sentetik yakıt / oksi yakıt-1 ve sentetik yakıt / oksi yakıt-2 yanma simülasyonları gerçekleştirilmiş ve alev bölgesinin çeşitli mesafelerdeki sıcakları ile yanma odası giriş, çıkış ve maksimum sıcaklıkları belirlenerek karşılaştırmalar yapılmıştır [19].

Gallucci vd. (2015) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, farklı içeriklere sahip sentez gazları, oksijen taşıyıcı olarak ilmenit ile dolgulu tip bir yatakta deneysel olarak yakılmış ve bu oksijen taşıyıcının yanma sonu CO_2 yakalama üzerine etkileri araştırılmıştır [20].

de la Torre vd. (2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmada metan ve sentez gazları oksi-yanma şartlarında deneysel olarak yakılmışlar ve bu yanma neticesinde ışınımla açığa çıkan ısı seviyelerini karşılaştırmışlardır. Sentez gazlarındaki H_2 seviyelerinin, seyreltici olarak CO_2 kullanmanın ve eşdeğerlilik oranlarının ışınımla açığa çıkan ısı miktarlarına olan etkileri ve CO_2'nin spektral radyasyonunu belirlemişlerdir. de la Torre vd. (2016) tarafından yapılan bu çalışma değerlendirildiğinde, çalışmada bir radyometre kullanılmış ve tamamıyla alevin ışınım özellikleri tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışmada kullanılan oksijen de saf olmamış, belirli gaz karışımları ile birlikte yanma odasına gönderilmiştir [21].

Habib vd (2016) metanın güneş termal reformasyonundan elde edilen sentez gazının (H_2 ve CO bileşimi) bir oksijen nakil reaktöründe oksi-yakıt yanma özellikleri ile LSCF-6428 membranın geçirgenlik potansiyeline ilişkin sayısal bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma da giriş sıcaklığı, CO_2 sirkülasyonu, yakıt bileşimi ve havalandırma gazı akışının oksijen nüfuzu ve yanma sıcaklığı üzerindeki etkileri HAD 14. versiyonu kullanılarak incelenmiştir. Yürütülen çalışmaya göre; giriş sıcaklığındaki artış ile H2 oranındaki artış oksijen geçişini artırırken; CO_2 sirkülasyonu ve havalandırma gazı akışındaki artış ise oksijen geçişini yavaşlatmaktadır [22].

Ranga Dinesh vd. (2014) tarafından yapılan bir çalışma ile farklı içeriklere sahip olan sentez gazları hem oksi-yanma şartlarında hem de hava ile yakılmışlardır. Yapılan çalışma, sayısal bir çalışma olup "Doğrudan Sayısal Simülasyon" modeli ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma ile sentez gazlarının oksijenle daha iyi yandıkları tespit edilmiştir [23].

Habib, Mokheimer, Sanusi ve Nemitallah, 200 MW gücünde ve 2 yakıcısı bulunan paket tipi bir kazanda metan yerine sentetik yakıt yanmasının yanma ve emisyon karakteristiklerini sayısal olarak araştırmışlardır. Yapılan detaylı kinetik mekanizma 21 aşamadan ve 11 türden oluşmakta ve farklı bileşimlerdeki (67% CO:33% H_2, 50% CO:50% H2 ve 33% CO:67% H2) sentez gazının hava ile yakılması incelenmiştir. Sonuçlar, sentez gazı yanmasına göre saf metan yanması durumunda yanmanın geciktiği, diğer sentez gazı bileşimlerine göre % 33 CO: % 67 H_2 içeren sentez yakıt alevinin daha kısa olduğu ve en yüksek yanma odası çıkış sıcaklığının ise % 67 CO: % 33 H2 bileşimindeki sentez yakıt yanmasında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, fazla hava miktarı % 5'ten % 25'e çıkarıldığında NOx emisyonunun % 30 oranında azaldığı ve en düşük

emisyonların ise % 50 CO, % 50 H_2 bileşimindeki sentez gazı yanmasında ortaya çıktığı tespit edilen diğer önemli sonuçlardır [24].

Williams vd. (2008), ön-karışımlı, girdap kararlı bir yakıcıda saf metan ile hidrojence zengin ve fakir sentetik yakıt karışımlarını hava ve CO_2 ile seyreltilmiş oksijen ortamında yakmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada, alevin kopma sınırından kısmi zengin koşullar altındaki CO ve NO_X emisyonları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar göre, sentetik gaz karışımlarında hidrojenin varlığı, daha kompakt, daha yüksek alev sıcaklığına, artan alev kararlılığı ve daha yüksek NOx emisyonlarının oluşumuna neden olduğu belirlenmiştir. Önceki deneyimlerle tutarlı olarak, sentez gazında artan H_2 içeriği ile alev kopma limitinin stokiyometrisi azalmaktadır. Benzer şekilde, CO emisyonlarında belirleyici olan fakir karışım stokiyometrisinin, sentez gazı içeriğinde hidrojen miktarının artmasıyla azaldığı; $\mu > 0.95$ stokiyometrik limit için CO emisyonları havayla yanmaya göre CO_2 - oksijen ortamındaki yanmada çok hızlı arttığı bu çalışmada tespit edilmiştir [25].

Kutne vd (2011), kısmen ön-karışımlı, girdap kararlı bir gaz türbini tipi yakıcıda, metan ile 20-40% oranlarında oksijen yakıt karışımının oksi-yakıt yanma koşullarında alev yapısını deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada, eşdeğerlik oranı 0,5-1 arasında iken, ısıl güç ise 10 - 30 kW arası alınmıştır. Yürütülen çalışmaya göre, O_2 fraksiyonunun alev şekli üzerinde güçlü bir etkiye sahipken; eşdeğerlik oranındaki değişikliklerin ise sadece marjinal etkileye sahiptir. Ayrıca daha önce aynı yakıcıyla araştırılan CH_4 / hava karışım alevi ile burada incelenen CH_4 /oksijen alevlerinin farklı bir yanma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Buna göre, bu alevlerin dengelenmesi için CO_2'deki O_2 fraksiyonun havadaki % 21'den daha büyük olması gerekliliğidir. Çünkü CO_2 ısı kapasitesi N_2 den daha büyüktür ve bundan dolayı da aynı eşdeğerlik oranında düşük yanma sıcaklığına ve düşük laminar alev hızına sebep olmaktadır. Termal radyasyon ve yakıcı duvarlarından olan ısı kaybı CH_4 / hava göre daha fazla olduğu bu çalışma kapsamında tespit edilmiştir [26].

Ranga Dinesh vd. (2015), detaylı kimyasal kinetiği temel alan, 3-boyutlu DNS (direct numerical simulation) modelleme yöntemi kullanarak sentez yakıtının ön-karışımsız türbülanslı jet alevlerinin skalar yapısı üzerinde çalışmışlardır. Amaç, Reynolds sayısının oksi-yakıt alev yapısı üzerindeki etkisini belirlemek ve benzer Reynolds sayısındaki sentez gazlarının oksijenli ve hava ortamındaki alevlerinin skalar yapılarındaki farklılıkları tespit

etmektir. Bu amaçla Reynolds sayısı 3000 ve 6000 olan iki oksi-yakıt sentez gazı ile Reynolds sayısı 6000 olan hava-sentez gazı simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, Oksidant içerisindeki CO_2 varlığı, hava-sentez gazı alevine göre oksi-yakıt sentetik alevinin skalar yapısında büyük bir etkiye sahiptir [27].

Mardani ve Ghomshi (2016) metana karıştırılan hidrojenin, oksi-yakıt ve MILD (moderate or intense low oxygen dilution) yanma kombinasyonunu sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada, HAD (Hesaplamalı akışkanlar dinamiği) analizi, sıfır boyutlu iyi karıştırılmış reaktör analizi ve reaktör ağ analizi kullanılmıştır. Sonuçlar, Oksi-MILD koşullarında sıcaklık eğimi, reaksiyon hızı ve Damköhler sayısının MILD ile karşılaştırıldığında düştüğünü göstermiştir. Oksi-MILD koşullarında, girişteki oksijen seviyesindeki artışın, CO, NO, CH_20 ve HCO konsantrasyonlarını düşürdüğünü ve reaksiyon bölgesindeki sıcaklığı artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, yakıt içeriğindeki hidrojen azalmasının ise, sıcaklık alanı tekdüzeliğinde ve reaksiyon bölgesi alanında artışa ve Oxy-MILD yanması için NO ve CO oluşumlarında azalma sebep olduğu tespit edilmiştir [28].

Nemitallah ve Habib (2013) yaptıkları bir çalışmada, bir gaz türbini yanma odasında metanı, farklı O_2/CO_2 karışımlı yakıcılarla yakmışlar ve bu yanma şartlarının yanma ve emisyon karakteristiklerini sayısal ve deneysel olarak detaylı bir şekilde analiz etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, en yüksek sıcaklık seviyelerine oksijence en zengin yanma şartlarında ulaşmışlardır [29].

2. YANMA, OKSİ-YANMA VE HAVA KİRLİLİĞİ

2.1. Giriş

Bu bölümde, yanma işlemi ve ilgili kimyasal tepkimeler genel olarak anlatıldıktan sonra hava kirliliği hakkında temel bilgiler verilerek, yanma kaynaklı kirletici sera gazı emisyonları çerçevesinde CO_2, CO oluşum mekanizmaları anlatılmıştır. Daha sonra NOx oluşum mekanizmaları ve NOx oluşumunu etkileyen faktörler detaylı bir biçimde anlatılmıştır**.**

2.2. Yanmanın Termodinamiği ve Reaksiyon Kinetiği

Bir yakıtın büyük miktarda enerji vererek oksitlenme tepkimesi yanma olarak tanımlanmaktadır. Yanma işlemlerinde serbest ve kolay elde edilme gibi nedenlerle sıklıkla oksitleyici olarak hava kullanılmaktadır. Bu yüzden, havanın bileşimi yanma reaksiyonlarında çok önemlidir. Yanma işlemlerinde hava, mol veya hacimce % 20,9 oksijen, % 78.1 azot ve % 0,9 argon ve az miktarda karbon dioksit, helyum, neon ve hidrojenden oluşur. Yanma işleminde yanma odasına giren her bir oksijene 0,79 / 0,21= 3,76 mol azot eşlik eder.

$$1\ \text{kmol}\ O_2 + 3.76\ \text{kmol}\ N_2 = 4.76\ \text{kmol hava} \qquad (2.1)$$

Hava ile yanma koşullarında azot inert gaz olarak davranır ve yanma odasına düşük sıcaklıklarda girer ve yanma sırasında ortaya çıkan kimyasal enerjinin büyük bir kısmını alarak çok daha yüksek bir sıcaklıkta yanma odasından çıkar. Oksi-yanma koşullarında ise inert gaz olan azot tepkimeye girmemekte ve yanma sonucunda çok daha yüksek enerji elde dilebilmektedir. Bundan dolayı saf oksijen, metal ve cam endüstrisinde, kesme, kaynak gibi bazı özel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [30].

Yanma odasına giren hava normal olarak dikkate değer bir miktarda su buharı (veya nem) içerir. Yanma işlemlerinin çoğunda, havada bulunan nem ve yanma sırasında oluşan H_2O ‘da, azot gibi inert gaz olarak değerlendirilebilir. Bunun yanı sıra, yüksek sıcaklıklarda, su buharının bir kısmı H_2 ve O_2 ile birlikte H, O ve OH’e ayrışmaktadır. Yanma gazları su

buharının çiylenme noktasının altına soğuduğunda, bir miktar nem yoğunlaşır. Su damlaları yanma gazları içinde bulunan kükürt dioksit ile birleşerek korozyona neden olan sülfürik asit oluşturduğu için, çiylenme noktasının yanma öncesinde bilinmesi çok önemlidir [30].

Yakıtlar ise esas olarak karbon, hidrojen ve oksijenden oluşur. Bunun yanı sıra sentetik yakıtların bünyesinde yüksek oranda azot ve karbon monoksit bulunmaktadır. Yanma işlemi sırasında, tepkimeden önce bulunan bileşenlere girdiler ve tepkimeden sonra bulunan bileşenlere ürünler denir. Örneğin, 1 kmol metanın, 2 kmol saf oksijen ile oksi-yanma koşullarında, C ve O_2 yanmadan önce var olduğu için girdiler, CO_2 ve H_2O yanmadan sonra ortamda olduğu için üründür.

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O \quad (2.2)$$

Aynı yakıtın hava ile yanmasında ise;

$$CH_4 + 2(O_2 + 3{,}76\ N_2) = CO_2 + 2H_2O + 7{,}52\ N_2 \quad (2.3)$$

Yanma eşitliğinin her iki tarafında da azot olmaktadır. Yani, azot hava ile yanmada hem girdi hem de ürün olarak görünmektedir.

Yanma olayında yanmanın gerçekleşebilmesi için üç şartın sağlanması gerekir. Bunlar; yakıt ile yakıcının karışması (türbülans, karışım oluşturma süreci), tutuşma sıcaklığına ulaşılması (tutuşma süreci) ve yanmanın tamamlanması süreci (zaman) sağlanmasıdır. Literatürde bu yanma koşulları yanmanın 3T (Türbülans, Temperature, Time) kuralı olarak bilinmektedir. İşte yanma olayı; yakıt ve havanın olabildiğince iç içe karıştırılarak yanıcı karışımın oluşturulması, yanıcı karışım sıcaklığının tutuşturma sıcaklığı üzerine çıkartılarak, yanma tepkimesinin başlatılması, yanma tamamlanıncaya kadar yanıcı karışımın, sıcaklığı tutuşma sıcaklığı üzerinde olan yanma odasında kalmasını sağlayarak yanmanın tamamlanmasıdır [31].

Yakıt ve yakıcının olabildiğince karıştırılarak yanıcı karışımı oluşturulduktan sonra yanmanın başlaması için yakıtın sıcaklığı, tutuşma sıcaklığının üzerine getirilmesi gerekmektedir. Gaz yakıtların tutuşma sıcaklığı sıvılara göre daha düşükken, sıvı yakıtların ise katı yakıtlara göre daha düşük tutuşma sıcaklıkları vardır. Kısacası en kolay yanma gaz yakıtlarda, en zor yanmada katı yakıtlarda gerçekleşir. Bazı yakıtların hava ile yanma

minimum tutuşma sıcaklıkları yaklaşık olarak benzin 260 ^{0}C, karbon 400 ^{0}C, hidrojen 580 ^{0}C, karbon monoksit 610 ^{0}C ve metanın 630 ^{0}C şeklindedir. Yakıtın oksijen ile temas etmesi ve tutuşma sıcaklığının üzerinde olması dışında, yanmanın başlaması için yakıt ve hava oranları yanma için uygun aralıkta olması gerekir. Yanma işlemlerinin analizinde, yakıt ve havanın sayısal olarak ifadesi için kullanılan büyüklük hava-yakıt oranı (HY)"dır. Genellikle kütleye göre ifade edilir ve yanma işlemlerinde havanın kütlesinin yakıtın kütlesine oranı olarak tanımlanır.

$$HY = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \tag{2.4}$$

Maddenin kütlesi m, m=NM, bağıntısı ile N mol sayısına bağlıdır. Burada, M, mol kütlesidir. Hava-yakıt oranı havanın mol sayısının yakıtın mol sayısına oranı şeklinde, mol sayısına göre de ifade edilebilir. Hava-yakıt oranının tersi yakıt-hava oranıdır [30].

Bir yakıtın tam yanması için gereken minimum hava miktarına stokiyometrik veya kuramsal hava denir. Kuramsal hava ile bir yakıtın tamamen yanmasına ise stokiyometrik veya kuramsal yanma denir. Buna göre, bir yakıt kuramsal hava ile tamamen yandığı zaman, ürün gazlarının içinde hiç elementel oksijen bulunmayacaktır. Kuramsal havadan daha az hava ile meydana gelen ideal yanma işleminin tamamlanması mümkün değildir. Bundan dolayı tam yanma olayını gerçekleştirmek ve yanma odası sıcaklığını kontrol etmek için stokiyometrik miktardan daha fazla hava kullanılır ve kullanılan hava miktarına fazla hava denir. Fazla verilen bu hava miktarı, hava fazlalık katsayısı (λ) ile belirlenmektedir. Stokiyometrik miktardan daha az havaya eksik hava denir ve sık sık yüzde eksik hava olarak ifade edilir. Fakir karışım şartlarında reaksiyon denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [32].

$$C_\alpha H_\beta O_\gamma + x(O_2 + 3{,}76\ N_2) = \alpha\ CO_2 + \frac{\beta}{2}(H_2O) + (x + \frac{\gamma}{2} - \alpha - \frac{\beta}{2})O_2 + 3{,}76\ N_2 \tag{2.5}$$

Yakıt-hava karışımının zengin, fakir ya da stokiyometrik şartlarda olup olmadığını gösteren ve yaygın olarak kullanılan ifade, yakıt fazlalık katsayısıdır. Yakıt fazlalık katsayısı (∅), gerçek şartlardaki yakıt/hava oranının, stokiyometrik şartlardaki değerine oranıdır.

$$\varnothing = \frac{(H/Y)_{sto}}{(H/Y)} = \frac{(Y/H)_{sto}}{(Y/H)} \quad (2.6)$$

Yakıt bakımından fakir şartlar için, $0 < \varnothing < 1$,

Stokiyometrik şartlar için, $\varnothing > 1$ ve

Yakıt bakımından zengin şartlar için, $1 < \varnothing < \infty$

Yanma, reaksiyona giren ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin enerjilerinden elde edilen ve kimyasal reaksiyonların oluşmasını sağlayan serbest enerjilerden oluşmaktadır. Yanma işlemi ile açığa çıkan enerjiyi hesaplamak için reaksiyona giren ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünlerin iç enerjisi veya entalpisi aşağıdaki gibi tanımlanabilir [33].

$$H = U + PV \quad (2.7)$$

Burada H entalpiyi, U iç enerjiyi ve PV ise sistem üzerinde yapılan mekanik işi göstermektedir. Mutlak anlamda ne iç enerjinin ne de entalpinin ölçülmesi mümkün olmadığından dolayı diğer bütün enerjiler ile ilgili olarak referans bir durumun seçilmesi gereklidir. Seçilen bu standart durum, atmosferik basınçta ve 298 K sıcaklıkta saf maddeler için kararlı bir durumu göstermektedir.

Bir reaksiyon aşağıdaki gibi tanımlandığında;

$$s_A A + s_B B + \ldots = s_P P + s_q Q + \ldots \quad (2.8)$$

Burada s_A ve s_B, A ve B girdileri için stokiyometrik katsayıları, s_P ve s_q, ise P ve Q ürünleri için stokiyometrik katsayılarını göstermektedir.

Genel kimyasal reaksiyon için entalpi değişiminin değeri, reaksiyona girenler ile reaksiyondan çıkan ürünlerin standart oluşum entalpilerinin farkı olarak eşitlik 2.9 verildiği gibi tanımlanabilir:

$$\Delta H^{\phi}_{298} = \Sigma s_x \Delta H^{\phi}_{f298}(X) \quad (2.9)$$

Burada ΔH^{ϕ}_{298}, standart şartlarda gerçekleşen reaksiyonun entalpi değişimidir. s_x, reaksiyona girenler için negatif, reaksiyondan çıkan ürünler için pozitif değer alan stokiyometrik faktördür. ΔH^{ϕ}_{f298} ise, reaksiyona girenler ile reaksiyondan çıkan ürünlerin kJ/kmol biriminde standart oluşum entalpisidir.

Kimyasal reaksiyonun davranışını niceliksel olarak tanımlamak için kullanılan oran kanunu; kimyasal türlerin konsantrasyonlarındaki değişim oranını, ürünlerin konsantrasyon değişimi ve oran sabitleri biçiminde aşağıdaki gibi tanımlamaktadır.

$$s_A A + s_B B + \cdots = s_P P + s_Q Q + \cdots$$

$$-\frac{1}{s_A}\frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{s_B}\frac{d[B]}{dt} = -\frac{1}{s_P}\frac{d[P]}{dt} = -\frac{1}{s_q}\frac{d[Q]}{dt} = k[A]^a[B]^b \quad (2.10)$$

Bu eşitlikte k, oran sabitini, a ve b, A ve B girdilerinin reaksiyonun derecesini göstermektedir. Oran sabiti k, konsantrasyondan bağımsız fakat genellikle sıcaklıktan bağımsız değildir.

Reaksiyonun sıcaklığa bağımlılığı bu sabit orana dâhil edildiğinde, genellikle Arrhenius formunda aşağıdaki gibi gösterilir.

$$k = A\, exp^{(-\frac{E}{RT})} \quad (2.11)$$

Burada A, Arrhenius faktörünü (k'nın birimi ile aynı birimde), E, reaksiyonun aktivasyon enerjisini (kJ mol^{-1}), R üniversal gaz sabitini ve T sıcaklığı (K) temsil etmektedir [33].

2.3. Hava Kirliliği ve Kirletici Gazlar

Atmosferde toz, duman, gaz, koku ve saf olmayan su buharı şeklinde bulunabilecek kirleticilerin, insanlar ve canlıların sağlığını olumsuz yönde etkileyecek ve/veya maddi zararlar meydana getirecek miktarlara yükselmesi, "Hava Kirliliği" olarak tanımlanmaktadır [34].

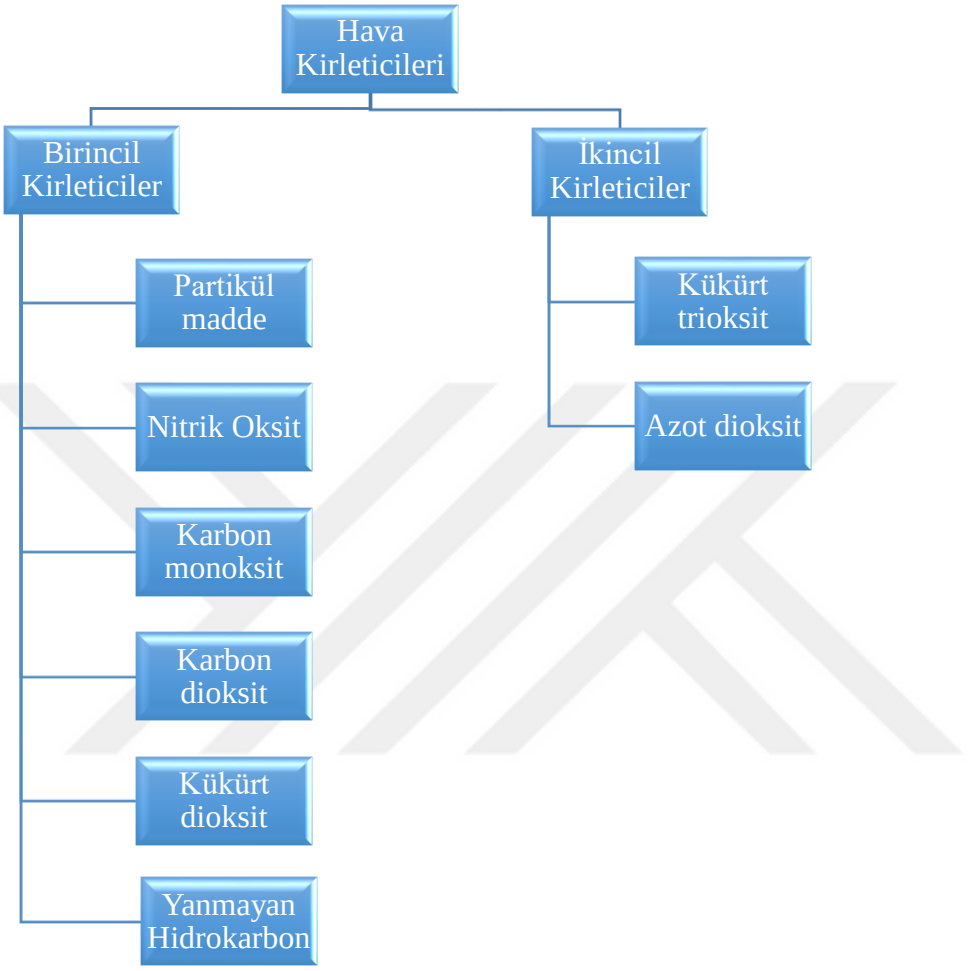
Hava kirleticileri genel olarak gaz veya parçacık şeklinde bulunurlar. Gaz kirleticiler genel olarak; karbon monoksit, sülfür dioksit, azot oksitler ve ozondur. Partikül maddeler ise, mineral, metalik ve organik bileşikler de dâhil olmak üzere birçok farklı bileşiklerden ve

farklı boyutlarda (parçacıklar, aerosoller ve ince parçacıklar) oluşurlar [35]. Aşağıdaki Çizelge 2.1'de başlıca endüstriyel hava kirleticileri ve kaynakları verilmiştir.

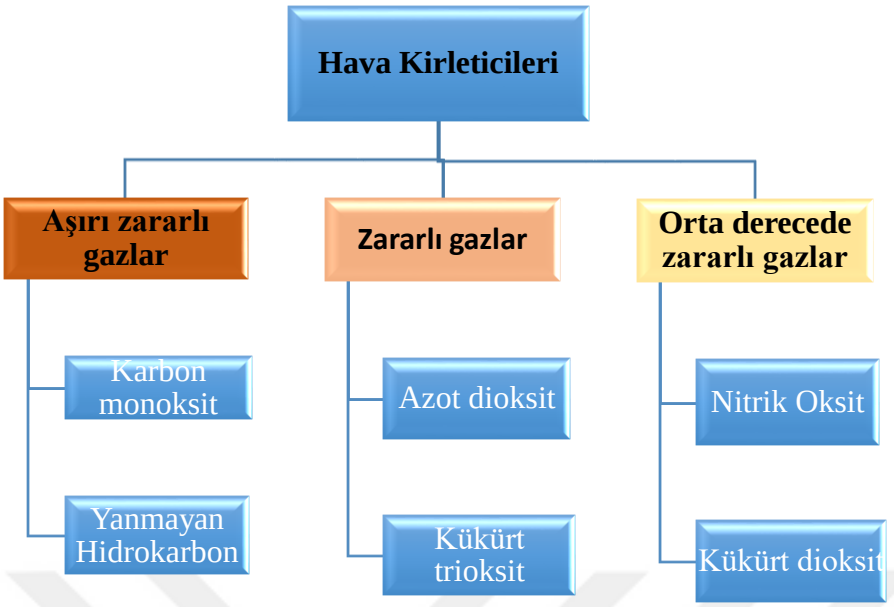
Çizelge 2.1. Birincil endüstriyel hava kirleticileri

Hava Kirleticisi	Temel Özelliği	Temel Kaynakları	Sağlık üzerine olası etkileri
Karbon Monoksit (CO)	Kandaki hemoglobin ile kuvvetli birleşme eğilimi olan renksiz ve kokusuz gaz	Yakıtların ve diğer karbonlu bileşiklerin eksik yanması	Akciğerlerden emilir; Fiziksel ve zihinsel etkisinin yanı sıra fetüs gelişimini olumsuz etkiler.
Hidrokarbonlar (HC)	Fotokimyasal duman oluşumunda yer alan, gaz veya parçacık formunda bulunan organik bileşikler (metan, etilen, asetilen gibi);	Yakıtların ve diğer karbonlu bileşiklerin eksik yanması	Uzun süreli maruz kalma durumunda göz, burun ve boğaz tahrişine neden olur; kansere neden olma şüphesi bulunmaktadır.
Kurşun (Pb)	Ağır, yumuşak, kolay işlenebilen, gri metalik kimyasal element; genellikle kurşun oksit aerosol veya toz formunda görülür.	Demir dışı metal eritme, metal üretimi, pil üretimi yapılan işyerleri	Esas olarak solunum yolları ve sindirim sistemi yoluyla vücuda girer; vücut organlarında birikir; ciddi fiziksel ve zihinsel bozulmaya neden olabilir.
Azot oksitler (NOx)	Renksiz ile kırmızımsı kahverengiye kadar değişen gaz karışımları	Sabit yakıt yanması (santraller), mobil kaynaklar ve atmosferik reaksiyonlar	Fotokimyasal duman oluşumunda en önemli bileşen konumundadır. Solunum yolu ve kardiyovasküler hastalıklara neden olma
Hava Kirleticisi	Temel Özelliği	Temel Kaynakları	Sağlık üzerine olası etkileri
Partikül madde	Atmosfere dağılmış katı veya sıvı parçacıklar (toz, kül, kurum, metaller ve çeşitli kimyasal maddeler). Sıklıkla çap boyutuna göre (micron) sınıflandırılırlar; parçacıklar (> 50 µm), aerosol (<50 µm), parçacık (<3 µm)	Katı yakıtların sabit yanması; çimento ve çelik imalatı gibi endüstriyel prosesler	Gazlı kirleticilerin toksik etkilerini artırma ve ayrıca solunum ya da kardiyorespiratuvar semptomların şiddetlenmesi neden olma
Kükürt dioksit (SO_2)	Keskin kokulu renksiz gaz	Kükürt içeren fosil yakıtların yanması, Kükürtlü metal cevherlerinin eritilmesi ve belli endüstriyel işlemler	Hafif solunum yolu rahatsızlıklarının yanı sıra asit yağmurlarının ana nedeni olma

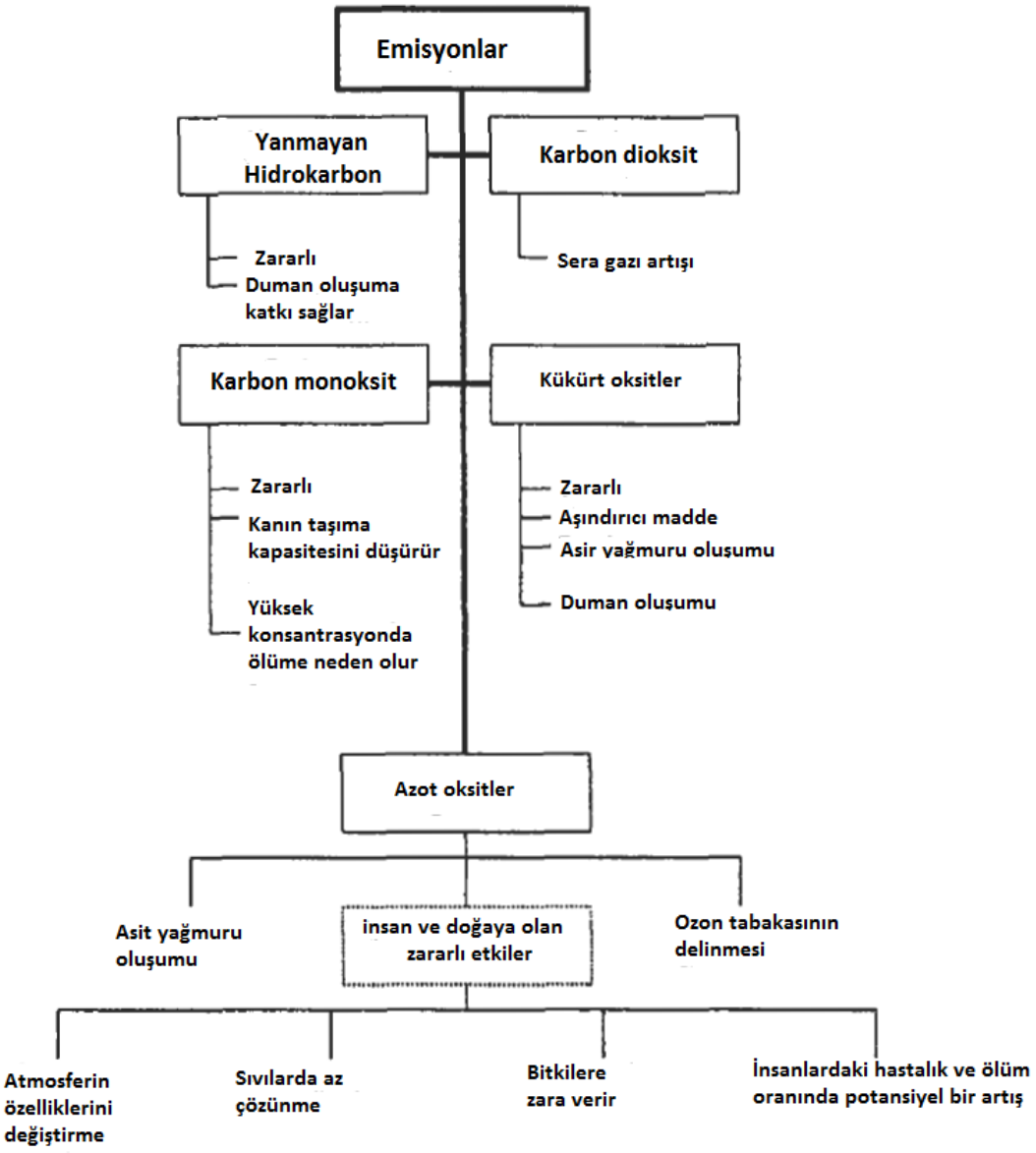
Aşağıdaki Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'te hava kirleticilerinin türlerine ve tehlike derecelerine göre sınıflandırılması; Şekil 2.3'te ise hava kirleticilerinin insan ve çevre üzerindeki etkileri gösterilmektedir [35].



Şekil 2.1 Hava kirleticilerinin kirletici türüne göre sınıflandırılması



Şekil 2.2 Hava kirleticilerinin tehlike derecelerine göre sınıflandırılması



Şekil 2.3 Hava kirleticilerinin insan ve çevre üzerine etkileri

İnsanların çeşitli faaliyetleri sonucu meydana gelen üretim ve tüketim faaliyetleri esnasında ortaya çıkan atıklarla hava tabakası kirlenmekte ve yeryüzündeki canlı hayatını olumsuz yönde etkilemektedir. Kirletici maddelerin türü ve niteliğine göre, canlılara vereceği zararın tipi ve ölçüsü de değişkenlik göstermektedir. Atmosferi meydana getiren gazların karışımlarından oluşan hava, canlı organizmanın yaşam sürecindeki en önemli öğelerden biridir. Bir insanın günde yaklaşık olarak 10 - 20 m^3 hava gereksinimi olduğu ve açlık ve susuzluğa birkaç gün dayanabilirken havasızlığa ancak 6 dakika dayanabildiği göz önüne alındığında havanın insan yaşamı açısından vazgeçilmezliği belirginleşmektedir [34].

Atmosferde bulunan gazları üç gurupta incelenebilir;

1. Havada devamlı bulunan ve miktarları değişmeyen gazlar (Azot, Oksijen, Asal gazlar)
2. Havada devamlı bulunan ve miktarları azalıp çoğalan gazlar (Karbondioksit, Su buharı, Ozon)
3. Havada her zaman bulunmayan gazlar (Kirleticiler)

Hava kirliliğinin doğal ve insan faaliyetleri sonucunda meydana gelen (antropojenik) kaynaklar olmak üzere iki temel kaynağı vardır. Doğal kaynaklar arasında; yanardağ volkan patlamaları, orman yangınları, toz fırtınaları ile bitki örtüsü ve doğanın tahrip edilmesi örnek olarak verilebilir. İnsanların faaliyetleri sonucunda meydana gelen kaynaklar arasında ise; ulaştırma (uçaklar, motorlu taşıtlar, demiryolları ve gemiler), enerji ve sanayi sektörü (termik santraller, endüstriyel prosesler ve katı atık yakma tesisleri) ve ısınma (katı, sıvı, gaz yakıt sobaları ve kalorifer kazanları) olarak sıralanabilir [36].

Hava kirletici gazların etkileri genel olarak; küresel, bölgesel ve yerel ölçekte olmak üzere üç kategoride incelenmektedir. Yeryüzünün tümünü etkileyen sera etkisi ve ozon tabakasının incelmesi gibi olaylar küresel boyuttaki etkiler iken belirli bölgelere tesir eden örneğin asit yağmurları ise hava kirliliğinin bölgesel ölçekteki etkileri olarak değerlendirilmektedir. Hava kirliliğinin yerel ölçekteki etkileri ise yerleşim ve sanayi bölgelerinde görülen hava kirliliği şeklinde olmaktadır [36].

Çalışmamızda kömür gazının yanması sonucunda da azot oksit (NO_X), kükürt dioksit (SO_2), karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2) ne olduğu açıklanmaktadır. Ayrıca, diğer bölümlerde, çalışmamızda yakılan jeneratör ve yüksek fırın gazlarının oluşturduğu yanma sonu ürünleri hakkında daha detaylı bilgiler verilmiştir

2.3.1. Karbon monoksit (CO) oluşumu

Kömür gazlarının yanmasında yanma sonu ürünü olarak ortaya çıkan karbon monoksitin oluşumunda iki ana kaynak bulunmaktadır. Birincisi, ateşleme aralığı dışındaki eşdeğerlilik oranında oluşturulan kötü karışımdan dolayı eksik miktarda yakıcının olması ya da yakıcı 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. Bunun yanı sıra kömür gazlarının yapısında değişen oranlarda karbon monoksit olması ve bunun ortaya çıkan CO eklenmesi de diğer bir CO oluşum kaynağı olarak gözükmektedir [37]. Ayrıca pistonlu motorlarda kömür gazları yanarken motor yağının ayrışması sonucunda da CO oluşmaktadır [38].

Ham sentez gazı içindeki inorganik parçacıkların konsantrasyonu, besleme stokuna, gazlaştırıcı konfigürasyonuna ve gazlaştırma koşullarına bağlıdır. Malzemenin büyük kısmı, yüksek sıcaklıkta gazlaştırıcılarda cüruf olarak veya akışkan yataklı gazlaştırıcılarda yatak malzemesi olarak gazlaştırma işleminden çıkarıldığı için kömür yakıtlarda yer alan inorganik içerik genellikle kömür gazı parçacık seviyelerinin iyi bir göstergesi değildir. IGCC sistemlerinde, sentez gazı temizleme sistemindeki partikül filtreleri veya ayırıcılar, ham sentezde bulunan partikül madde yığınını ortadan kaldırır [39].

Kömürle çalışan elektrik santrallerinden elde edilen tecrübeler, gaz türbini tabanlı IGCC sistemlerinden elde edilen nihai CO emisyonlarının, geleneksel yanma esaslı sistemlere göre daha düşük olduğunu ortaya koymaktadır .Ayrıca, pistonlu motorlarda yanan hidrojen-karbon monoksit karışımı sonucunda oluşan karbon monoksit miktarları, aynı koşullarda yakılan benzinden veya doğalgazdan daha az olmaktadır [40].

Özetle, iyi tasarlanmış ve iyi çalışan bir yanma cihazında gerçekleşen kömür gazı veya hidrokarbon eksik yanmasından daha az CO emisyonlarının açığa çıkar. Sentetik gaz yakıtlarındaki hidrojen içeriği, operasyonel sınırı genişletir ve yüksek yanma sıcaklıkları sağlayarak diğer organik yakıtların oksidasyonunu kolaylaştırır. Türbin ve kazan uygulamalarında için, kömür gazı yanma kaynaklı CO emisyonları Tablo 6.1 ve 6.2'deki verilerle kanıtlandığı gibi düşüktür. Bununla birlikte, dizel veya SI motorlarında, yağlama yağlarının ayrışması önemli ölçüde CO emisyonlarına katkı sağlayabilir [37].

2.3.2. Karbon dioksit (CO_2) oluşumu

Aslında, yeterli seviyede hava ve hava-yakıt karışımı bulunduğunda kömür gazlarının içinde bulunan tüm karbon yanarak CO_2 dönüşür. CO_2 emisyonuna katkıda bulunan kömür gazı bileşenleri arasında karbon monoksit, hidrokarbonlar ve doğal olarak bünyesinde bulunan karbon dioksittir. Doğal gaz yerine tamamen veya kısmen kömür gazı kullanıldığında, muhtemelen CO_2 emisyonu artacaktır. Çünkü kömür gazı genel olarak

daha düşük bir ısıtma değerine ve doğal gaza kıyasla daha yüksek bir karbon-ısıtma oranı oranına sahiptir [37].

2.3.3. NO_X (azot oksit) oluşum mekanizması

Yanma sistemlerinde NOx, azot oksitleri tanımlamak için kullanılan ortak bir terimdir. Bu ortak terim başlığı altında, 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 gaz bulunmaktadır. Bu gazlar içinde sadece NO, NO_2, N_2O gazlarının hava kirliliği açısından önemli bir etkiye sahiptirler. Nitrik oksit (NO) genellikle en çok salınan NO_X türüdür. Renksiz ve insan sağlığı üzerinde zehirli etkiye sahip Azot monoksit (NO) gazının ortam konsantrasyonu 0,5 ppm civarındadır. Buna karşın fotokimyasal duman oluşumunda aktif bir rol oynamakta, sinir sistemine doğrudan etki etmektedir. Atmosferde kolay ve hızlı bir biçimde azot dioksite (NO_2) dönüşmektedir. Ortam havasında 15 ppm üzerinde olduğunda göz ve burunu tahriş etmekte ve akciğer rahatsızlığına sebep olabilmektedir. Yanma işlemlerinin çoğunda toplam NO_X oluşumunun en az % 95'inin NO olduğu kabul edilmektedir [33]. Bununla birlikte, NO çevreye salındığında, öncelikle VOC'leri (Uçucu organik bileşenler) de içeren fotokimyasal reaksiyonlar yoluyla oksitlenerek azot dioksit (NO_2) dönüşür [37].

Yanma cihazlarından azot dioksit (NO_2) genellikle küçük miktarlarda açığa çıkmasına karşın, NO'dan çok daha ciddi bir sağlık ve çevresel risk kaynağıdır. Diğer önemli bir risk ise NO_2'nin VOC'lerle reaksiyona girerek ozonu oluşturmasıdır [37].

Nitro oksit (N_2O), genellikle NOx'un miktar açısında az bir bileşeni olmasına karşın akışkan yataklı yakıcılar gibi daha düşük sıcaklıklarda çalışan bazı yanma cihazlarında çok daha fazla ortaya çıkmaktadır. Buna karşın N_2O emisyonlarıyla ilgili en büyük sıkıntılardan biri, önemli bir sera gazı olması ve küresel ısınma potansiyelinin karbondioksitten 298 kat daha fazla olmasıdır [37].

Yakıt-hava yanma reaksiyonlarında (NO_X) oluşumuna katkı yapan başlıca iki kaynak bulunmaktadır. Birinci ve en çok bilinen kaynak, hacimsel oran olarak % 79 azot molekülü ve % 21 oksijen molekülü içeren havadır. İkinci kaynak ise, akaryakıt ve kömür gibi yapısında azot bulunduran yakıtlardır [33].

Sentetik gazların yakılması esnasında ortaya çıkan NOx emisyon seviyesi, kullanılan yanma cihazına, çalışma koşullarına ve sentetik yakıtta bulunan sabit azot miktarına bağlı olarak oldukça değişkenlik göstermektedir [37].

Genel olarak laminar ve türbülanslı alevlerde, NO_X emisyonlarının dört çeşit mekanizma sonucunda oluştuğu kabul edilmektedir. Bu mekanizmalar; termal NO_X oluşumu, ani (prompt) NO_X oluşumu, yakıt (fuel) NO_X oluşumu ve ara N_2O oluşumu mekanizmasıdır [33].

Termal NOx oluşum mekanizması

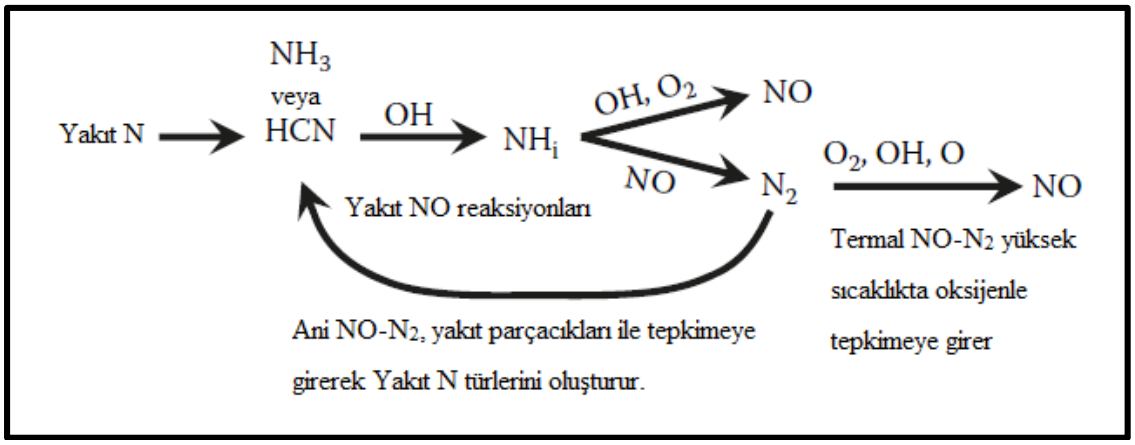
Termal NOx oluşumu, yanma havasındaki moleküler azotun (N_2) oksidasyonundan kaynaklanır. Bu oksidasyon sürecindeki temel adımlar genişletilmiş Zeldovich mekanizması olarak bilinen yüksek sıcaklığa bağlı kimyasal reaksiyonlar seti ile belirlenir. Moleküler azottun oksitlenerek termal NOx oluşumunu belirleyen başlıca üç reaksiyon şunlardır [37].

$$O + N_2 \rightleftharpoons^{1} NO + N \quad (2.12)$$

$$N + O_2 \rightleftharpoons^{2} NO + O \quad (2.13)$$

$$N + OH \rightleftharpoons^{3} NO + H \quad (2.14)$$

N_2 bağlarının parçalanması Zeldovich mekanizmasında en zor adım olduğundan dolayı ilk reaksiyon (2.12) genellikle oran kontrollüdür. Reaksiyon (2.12) ve (2.13)'un her ikisi de hem fakir hem de kısmen zengin yanma şartlarında ($\varphi > 0{,}85$) NO oluşumu bakımından çok önemlidir. Reaksiyon (2.12) ve (2.13) hem fakir hem de orta derece zengin alev şartlarında NO oluşumu bakımından çok önemlidir. Ayrıca, Lavoie ve ark. tarafından önerilen üçüncü reaksiyonun (2.14) termal NOx oluşumuna, özellikle stokiyometrik koşullarda ve yakıt bakımından zengin alevlerde (($\varphi < 0.85$)) ve bilhassa yüksek sıcaklıklarda ($T > 1800$ K) her 90 K sıcaklık artışında NO seviyesi yaklaşık olarak iki kat artış gösterdiğinden dolayı önemlidir [33].



Şekil 2.4. NO oluşum mekanizmaları

N_2 molekülünün doğal kararlılığı nedeniyle, yani bağlarının parçalanması zor olduğundan dolayı N_2'yi oksitlemek için önemli bir miktarda enerji gereklidir. Bu nedenle termal NO, ancak yüksek yanma sıcaklıklarında (>1370 °C, 2500 °F) belirgin miktarlarda oluşabilmektedir. Prensip olarak oksi-yanma koşullarında termal NO'nun oluşumu azaltılabilir. Çünkü N_2 yakıcının üst kısmında bulunan hava ayırma cihazı ile sistemden çıkarılmaktadır. Bununla birlikte pratik uygulamalarda ekonomik sebeplerden dolayı nadiren %100 oksijen kullanıldığından dolayı sistemde bir miktar (yaklaşık %2 - %5) N_2 kalmaktadır [37].

Termal NOx modelinde kullanılan yukarıdaki üç reaksiyon denklemi için oran katsayılarına ilişkin ifadeler aşağıda verilmiştir. Bunlar Hanson ve Salimian'ın çalışmasına dayanılarak seçilmiştir [42].

$$k_{f,1} = 1{,}8x10^{8}e^{-38370/T} \quad (2.15)$$

$$k_{f,2} = 1{,}8x10^{4}Te^{-4680/T} \quad (2.16)$$

$$k_{f,3} = 7{,}1x10^{7}e^{-450/T} \quad (2.17)$$

$$k_{r,1} = 3{,}8x10^{7}e^{-425/T} \quad (2.18)$$

$$k_{r,2} = 3{,}81x10^{3}Te^{-20820/T} \quad (2.19)$$

$$k_{r,3} = 1{,}7x10^{8}Te^{-24560/T} \quad (2.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde $k_{f,1}$, $k_{f,2}$ ve $k_{f,3}$, reaksiyon (2.12), (2.13) ve (2.14) için ileri oran sabitlerini, $k_{r,1}$, $k_{r,2}$ ve $k_{r,3}$ ise ters oran sabitlerini göstermektedir. Bu oran sabitlerinin

tümü m^3/ gmol-s birimine sahiptir. Reaksiyonlar ile NO oluşumu net oranı 2.12 – 2.14 ile verilir.

NO ve N oluşum hızlarını hesaplamak için O, H ve OH konsantrasyonlarının hesaplanması gerekmektedir.

[N] için Yarı-kararlı durum varsayımı

NOx oluşum hızı ancak yüksek sıcaklıklarda (1800 K'den büyük) ciddi artış göstermektedir. Çünkü azot fiksasyonu için güçlü üçlü N_2 bağlarının kırılması gerekir (ayrışma enerjisi 941 kJ / gmol). Bununla birlikte, N atomlarının oksidasyonu için aktivasyon enerjisi düşüktür. Yeterli oksijen olduğunda, serbest azot atomlarının tüketim oranı, oluşum oranına eşit olmaya ve böylelikle yarı kararlı bir durum oluşmaya başlar. Bu varsayım, yakıt bakımından aşırı derecede zengin yanma koşulları dışında, çoğu yanma şartlarında geçerlidir. Dolayısıyla NO oluşum oranı,

$$\frac{d[NO]}{dt} = 2k_{f,1}[O][N_2]\frac{(1-\frac{k_{r,1}\,k_{r,2}\,[NO]^2}{k_{f,1}[N_2]k_{f,2}\,[O_2]})}{(1+\frac{k_{r,1}\,[NO]}{k_{f,2}[O_2]+k_{f,3}\,[OH\ \ ]})} \quad (\text{gmol/m}^3\text{-s}) \qquad (2.21)$$

Yukarıdaki denklemde oksijen konsantrasyonunun artmasıyla birlikte NO oluşum hızının artacağı açıktır. Ayrıca, termal NO oluşumunun sıcaklığa oldukça bağımlı olduğu fakat yakıt türünden bağımsız olduğu görülmektedir. Nitekim $k_{f,1}$ tarafından tanımlanan sınırlama oranına dayalı olarak, 2200 K üstündeki sıcaklıklarda her 90 K sıcaklık artışında termal NOx üretim hızı iki katına çıkmaktadır [41].

Denklem 2.21'i çözmek için, istikrarlı türlerin konsantrasyonuna (yani O_2, N_2) ek olarak, [O] atom konsantrasyonu ile OH serbest radikali konsantrasyonu hesaplamak gerekmektedir. [O] atom konsantrasyonu belirlemek için devam eden çalışmalara dayanarak ANSYS Fluent üç yaklaşım kullanmaktadır; denge yaklaşımı, kısmi denge yaklaşımı ve tahmini konsantrasyon yaklaşımıdır [41].

Yöntem 1: Denge Yaklaşımı

Termal NOx oluşum hızı, ana hidrokarbonun oksidasyon hızından çok daha yavaştır ve bu nedenle termal NOx'un çoğu yanma tamamlandıktan sonra oluşur. Bu nedenle, termal NOx oluşum işlemi çoğunlukla ana yanma reaksiyon mekanizmasından ayrılabilir ve NOx oluşum hızı yanma reaksiyonlarının denge yaklaşımı ile hesaplanabilir. Westenberg'e göre [43] denge [O] atom konsantrasyonu aşağıdaki ifadeden elde edilebilir:

$$[O] = k_p[O_2]^{1/2} \tag{2.22}$$

k_p değeri dahil edildiğinde, bu ifade;

$$[O] = 3{,}97x10^5 T^{-1/2}[O_2]^{1/2} e^{-31090/T} \quad \text{(gmol/m}^3\text{-s)} \tag{2.23}$$

Yöntem 2: Kısmi Denge Yaklaşımı

Aşağıda gösterilen O_2 ayrışma-birleşme işlemleri hesaba katılmasıyla Yöntem-1 geliştirilmiştir.

$$O_2 + M \rightleftharpoons O + O + M \tag{2.24}$$

Denklem 2.23 yerine daha sonra aşağıdaki [44] ifade kullanılır.

$$[O] = 36{,}64T^{1/2}[O_2]^{1/2} e^{-27123/T} \quad \text{(gmol/m}^3\text{-s)} \tag{2.25}$$

genellikle daha yüksek kısmi bir [O] atom konsantrasyonuna yol açar.

[O] atom konsantrasyonu bulunduktan sonra OH radikal konsantrasyonunu belirlemek gerekir. Bunun içinde üç yaklaşımdan biri kullanılır: termal NOx hesaplama yaklaşımından OH'nin hariç tutulması, kısmi denge yaklaşımı ve tahmin edilen OH konsantrasyon yaklaşımının kullanılmasıdır [41].

Yöntem 1: Termal NOx hesaplama yaklaşımından OH'ın hariç tutulması

Bu yaklaşımda, genişletişmiş Zeldovich mekanizmasındaki üçüncü reaksiyon (2.14)'un aşağıdaki durum için ihmal edilebileceği kabul edilirse;

$$k_2[O_2]_{eq} \gg k_3[OH]_{eq} \quad (2.26)$$

Bu varsayım, zayıf yakıt koşulları için doğrulanmış ve çoğu durumda makul bir varsayımdır.

Yöntem 2: Kısmi Denge Yaklaşımı

Bu yaklaşımda, genişletişmiş Zeldovich mekanizmasındaki üçüncü reaksiyon (2.14)'daki OH konsantrasyonu tarafından verilir [45, 46]

$$[OH] = 2.129\ x\ 10^2 T^{-0.57} e^{-4595/T} [O_2]^{1/2} [H_2O]^{1/2} \quad (\text{gmol/m}^3\text{-s}) \quad (2.27)$$

Ani NOx oluşum mekanizması

Ani NOx'un, alevin çok erken safhasında N_2 ile yakıt parçacıkları reaksiyonu sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Alevin başlangıcındaki bu hızlı NOx oluşumundan dolayı buna ani NOx tanımlaması yapılmıştır [47].

NOx oluşumuna yol açan ikinci bir mekanizmanın varlığı, ilk olarak Fenimore [48] tarafından yapılmıştır. Ani NOx oluşumu düşük sıcaklık ve yakıt bakımından zengin koşullarda önemli miktarda oluşabileceğine dair kanıtlar vardır [33]. Alev bölgesinde ani NO reaksiyonları çok hızlı gerçekleşmesine karşın ani NOx oluşumu oldukça düşük oluşmaktadır (10-20 ppm seviyesinde). Alevlerde oluşan ani NO_X miktarının toplam NOx içindeki payının diğer iki mekanizma ile karşılaştırıldığında çok düşük olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte yeni stratejiler kullanarak (yakıcı tasarımı veya yanma odası geometrisi modifikasyonu) NOx emisyonları çok düşük seviyelere indirildiğinde, ani NOx'un nispi öneminin artması beklenmektedir [37].

Ani NOx mekanizması

Ani NO_X oluşumu zengin alevlerde yaygın olarak bulunur. Gerçek ani NOx oluşumu, karmaşık bir dizi reaksiyon ve birçok olası ara tür içerir. Şu anda kabul edilen ani NO_X oluşum yolu aşağıdaki gibidir [41]:

$$CH + N_2 \rightleftharpoons HCN + N \quad (2.28)$$
$$N + O_2 \rightleftharpoons NO + O \quad (2.29)$$
$$HCN + OH \rightleftharpoons CN + H_2O \quad (2.30)$$
$$CN + O_2 \rightleftharpoons NO + CO \quad (2.31)$$

Yakıt parçalanması ile oluşan çok sayıda kimyasal tür (CH, CH_2, C, C_2H) hidrokarbon alevlerindeki ani NOx oluşumunun ana kaynağı olduğu iddia edilmektedir. Ancak en büyük katkı CH (denklem 2.28) ve CH_2 'den (denklem 2.32) gelmektedir.

$$CH_2 + N_2 \rightleftharpoons HCN + NH \quad (2.32)$$

Yakıt azotunun oksidasyonunda meydana gelen reaksiyona benzer bir biçimde bu reaksiyonların ürünleri, daha sonra ani NO oluşumunda reaksiyona giren âminler ve siyano bileşiklerinin oluşumuna neden olabilmektedir. Örneğin;

$$HCN + N \rightleftharpoons N_2 + \ldots\ldots. \quad (2.33)$$

Ani NOx oluşum faktörleri

Ani NOx oluşumu birim hacim başına düşen karbon atomlarının sayısıyla doğru orantılı olup, ana hidrokarbon bağımsızdır. Oluşan HCN miktarı, eşdeğerlik oranı ile artan hidrokarbon radikallerinin konsantrasyonu ile birlikte artar. Eşdeğerlik oranı arttıkça, ilk önce NOx oluşumu hızla artar, daha sonra bu artış en yüksek noktaya ulaşır ve en sonunda ise oksijen yetersizliğinden dolayı azalmaya başlar.

Birincil Reaksiyon

Denklem 2.28'de verilen tepkime birinci derecede önemlidir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda [49], alev bölgesinde oluşan NOx'un büyük bir kısmının CH reaksiyonu ile oluşan ani NOx olduğu sonucuna varılmıştır. Denklem 2.28'deki reaksiyonunu, NOx oluşum hızını kontrol ettiğini varsayarsak;

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_0[CH][N_2] \tag{2.34}$$

Bununla birlikte, yukarıdaki reaksiyon için oran verileri ile ilgili belirsizlikler vardır. Denklem 2.28-2.31 göz önüne alındığında alev bölgesindeki NOx oluşumunun tahmin edilebilmesi için NOx kinetiğinin gerçek bir hidrokarbon yanma mekanizmasına bağlanmasını gerektiği ortaya çıkmaktadır. Hidrokarbon yanma mekanizmaları birçok adım içermekte ve bunları hesaplamak son derece karmaşık ve maliyetlidir. Bu nedenle birçok araştırmacı, ani NOx oluşumunu hesaplamak için tahmin edici genel modeller önermişlerdir. Aşağıdaki denklemde mevcut NOx modelinde De Soete [50] tarafından türetilen genel bir kinetik parametre kullanılmaktadır. De Soete, toplam deneysel NOx oluşum değerlerini, NOx ve N_2'nin ampirik toplam reaksiyon hızlarının sayısal integrasyonu ile hesaplanan oluşum değerleri ile karşılaştırmıştır. Genel ani NOx oluşumunu aşağıdaki ifadeden tahmin edilebileceğini göstermiştir.

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{pr}[O_2]^a[N_2][FUEL]e^{-E_a/RT} \tag{2.35}$$

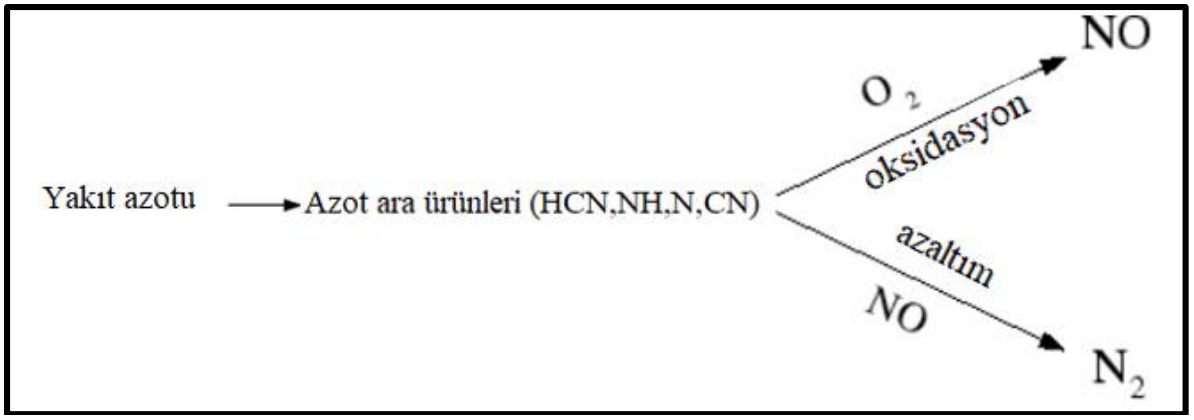
C_2H_4 (etilen) alevleri için;

$$k_{pr} = 1.2\ x\ 10^7(RT/p)^{a+1} \tag{2.36}$$

Bu eşitlikte E_a, 251151 J/gmol, a, oksijen reaksiyonun derecesini, R, evrensel gaz sabitini, P ise basıncı göstermektedir. Ani NOx oluşumunun, azot ve yakıt konsantrasyonuna birinci derecede bağımlı ve orantılı olduğu görülmektedir. Fakat a, oksijen reaksiyonun derecesi deneysel koşulları bağlıdır.

Yakıt NOx oluşum mekanizması

Yakıt NO_X mekanizması, yakıt moleküllerindeki azot bağlarının oksidasyonunu olarak tanımlanmaktadır. Yakıt azotunun NOx'a dönüşme derecesi, yanma özelliklerine ve azot içeren bileşiklerin başlangıç konsantrasyonuna bağlıdır. Yakıtta bulunan azotlu bileşikler buharlaştırma aşamasına kadar ısıtıldığında yakıt damlaları veya parçacıkları şeklinde gaz fazında serbest kalırlar. Bu bileşiklerin termal bozunumundan (anilin, piridin, piroller, vb.) reaksiyon bölgesinde HCN, NH_3, N, CN ve NH gibi azot ara ürünleri oluşturulabilir ve bunlar NOx'e dönüşebilirler. Genellikle kabul edilen yakıt NO_X mekanizması aşağıdaki şekilde gösterildiği gibidir [33].

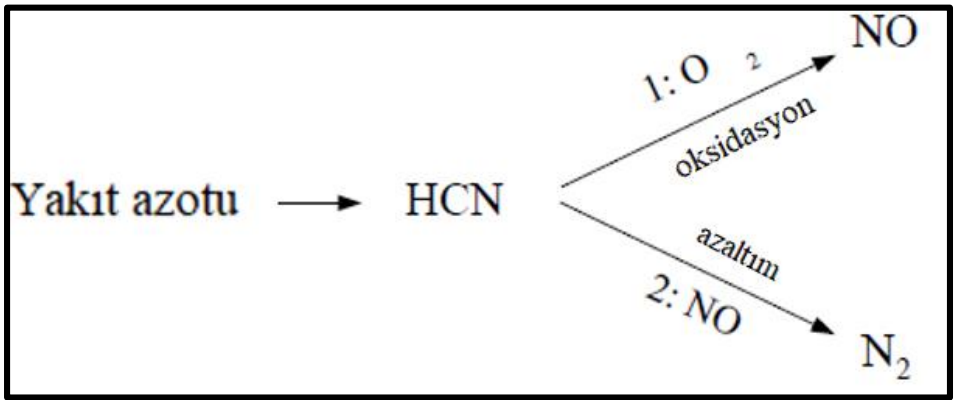


Şekil 2.5. Azot ara ürünlerinden Yakıt NO_X oluşumu

Gazlı ve Sıvı Yakıtlardan Yakıt NOx

Gazlı ve sıvı yakıtlar için yakıt mekanizmaları farklı fizik kurallarına tabi olsa da aynı kimyasal reaksiyon yollarını izleyerek gerçekleşirler [33].

HCN (Hidrojen siyanür), ara tür olarak kullanıldığında;



Şekil 2.6. HCN ara ürününden Yakıt NO_X oluşumu

Taşıma denkleminde kaynak terimler aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$S_{HCN} = S_{p1,HCN} + S_{HCN-1} + S_{HCN-2} \quad (2.37)$$

$$S_{NO} = S_{NO-1} + S_{NO-2} \quad (2.38)$$

Gazlı bir yakıtta HCN üretim oranı yakıttaki yanma oranına eşdeğer iken, sıvı bir yakıtta ise damlacık buharlaştırma yoluyla gaz fazına salımı yapılan yakıt oranına eşdeğerdir. HCN tükenme oranları hem gaz hem de sıvı yakıtlar için aynıdır. Her iki fazda da HCN ya oksijenle oksitlenerek tükenmekte ya da oksijeni redükleyerek N_2 oluşturmaktadır. Bu mekanizma DeSoete [50] tarafından önerilmiştir.

$$R_1 = A_1 X_{HCN} X^a{}_{O_2} e^{-E_1/RT} \quad (2.39)$$

$$R_2 = A_2 X_{HCN} X_{NO} e^{-E_2/RT} \quad (2.40)$$

Eş. (2.36) ve Eş. (2.37)'da R_1 ve R_2, HCN'nin dönüşüm oranlarını (s^{-1}), T anlık sıcaklığı (K), X mol kesrini, a oksijenin reaksiyon katsayısı göstermektedir ve $A_1 = 1.0\ s\ x10^{10}$ s^{-1}, $A_2 = 3.0\ x10^{12}$ s^{-1} , $E_1 = 280451.95$ J/gmol, $E_2 = 251151\ J/gmol$'dür.

Oksijenin reaksiyon katsayısı a, alev koşullarına bağlıdır. De Soete'ye göre oksijen reaksiyon katsayısı alevdeki oksijen mol oranına doğrudan bağlıdır ve Denklem (2.41) ile bulunmaktadır.

$$a = \begin{cases} 1.0, & X_{O_2} \le 4.1 \times 10^{-3} \\ -3.95 - 0.9 \ln X_{O_2}, & 4.1 \times 10^{-3} \le X_{O_2} \le 1.11 \times 10^{-2} \\ -0.35 - 0.1 \ln X_{O_2}, & 1.11 \times 10^{-2} < X_{O_2} < 0.03 \\ 0, & X_{O_2} \ge 0.03 \end{cases} \quad 2.41$$

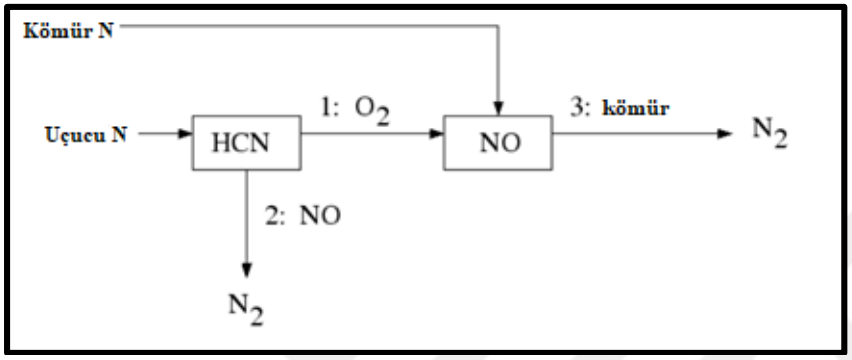
Kömürden Yakıt NOx

Kömür için, yakıt azotunun uçucu maddeler ile kömür artığı arasında dağıldığı varsayılmaktadır. Azotun uçucu maddeler ile kömür artığı arasında eşit olarak dağıldığını varsaymamız için hiçbir sebep olmadığından dolayı uçucu maddelerin içindeki azot ve kömür artığı içindeki azot ayrı ayrı belirtilmelidir. HCN ara ürün olarak kullanıldığında, kömür için iki farklı yakıt NOx mekanizması bulunmaktadır. Benzer biçimde NH_3 ara ürün olarak kullanıldığında da kömür için iki farklı yakıt NOx mekanizması bulunmaktadır.

Sonuç olarak yakıt azotunun uçucu maddeler ile kömür artığı arasında dağıldığı varsayılır [41].

Kömürden Yakıt NOx oluşumu Şema-A

Birinci HCN mekanizması, kömür artığındaki tüm azotun HCN'ye dönüştüğünü ve daha sonra HCN'nin ise kısmen NO'ya dönüştüğünü varsaymaktadır [51]. Reaksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [41]:



Şekil 2.7. Kömürden yakıt NO_X oluşumu A şeması

Şekilden de görüleceği üzere tüm kömür artığına bağlı nitrojen HCN'ye dönüşmektedir. Böylece;

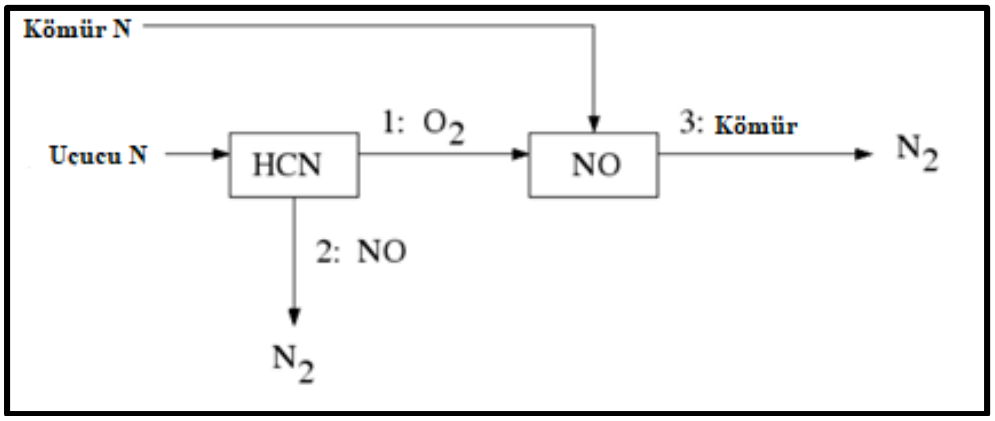
$$S_{kömür,HCN} = \frac{S_c Y_{N,kömür} M_{w,HCN}}{M_{w,N} V} \quad (2.42)$$

$$S_{kömür,NO} = 0 \quad (2.43)$$

Eş. (2.42) ve Eş. (2.43)'da S_c kömür artığı tükenme oranını (kg/s), $Y_{N,kömür}$ kömür artığındaki azot kütle oranını ve V hücre hacmini (m^3) göstermektedir.

Kömürden Yakıt NOx oluşumu Şema-B

İkinci HCN mekanizması, kömür artığındaki tüm azotun doğrudan NO'ya dönüştüğünü varsaymaktadır [52]. Reaksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:



Şekil 2.8. Kömürden yakıt NO_X oluşumu B şeması

Lockwood'a göre, kömür artığındaki azot, gaz fazında direkt NO olarak salınır. Bu yaklaşıma göre;

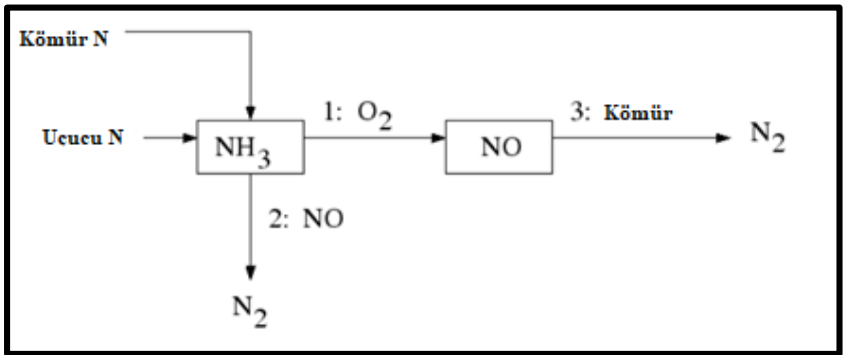
$$S_{kömür,HCN} = 0 \quad (2.44)$$

$$S_{kömür,NO} = \frac{S_c Y_{N,kömür} M_{w,HCN}}{M_{w,N} V} \quad (2.45)$$

İkinci HCN mekanizması, birinciden daha fazla NOx emisyonu üretme eğilimindedir. Bununla birlikte, genel olarak, hangisinin diğerinden daha iyi performans gösterdiğini söylemek zordur.

Kömürden Yakıt NOx oluşumu Şema-C

Birinci NH_3 mekanizması, kömür artığındaki tüm azotun NH_3'e dönüştüğünü ve daha sonra NH_3'ün ise kısmen NO'ya dönüştüğünü varsaymaktadır [51]. Reaksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:



Şekil 2.9. Kömürden yakıt NO_X oluşumu C şeması

Yukarıdaki şekilde kömür artığındaki azotun tamamı NH_3'e dönüşmektedir. Böylece;

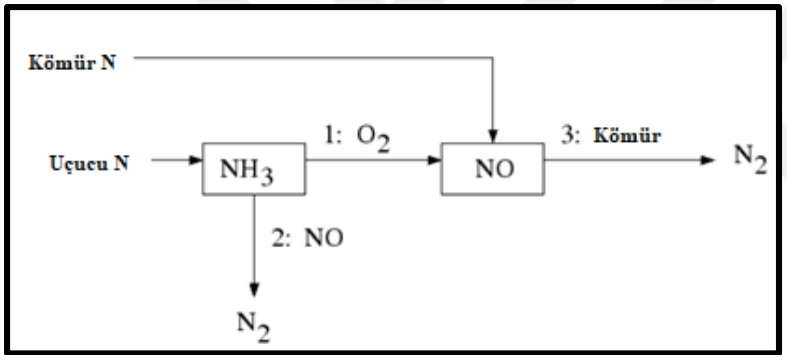
$$S_{kömür,NH_3} = \frac{S_c Y_{N,kömür} M_{w,NH_3}}{M_{w,N} V} \quad (2.46)$$

$$S_{kömür,NH_3} = 0 \quad (2.47)$$

Eş. (2.46) ve Eş. (2.47)'da S_c kömür artığı tükenme oranını (kg/s), $Y_{N,kömür}$ kömür artığındaki azot kütle oranını ve V hücre hacmini (m^3) göstermektedir.

Kömürden Yakıt NOx oluşumu Şema-D

İkinci NH_3 mekanizması, kömür artığındaki tüm azotun doğrudan NO'ya dönüştüğünü varsaymaktadır [52]. Reaksiyon aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır:



Şekil 2.10. Kömürden yakıt NO_X oluşumu D şeması

Lockwood'a göre, kömür artığındaki azot, gaz fazında direkt NO olarak salınır. Bu yaklaşıma göre;

$$S_{kömür,NH_3} = 0 \quad (2.48)$$

$$S_{kömür,NH_3} = \frac{S_c Y_{N,kömür} M_{w,NO}}{M_{w,N} V} \quad (2.49)$$

İkinci NH_3 mekanizması, birinciden daha fazla NOx emisyonu üretme eğilimindedir. Bununla birlikte, genel olarak, hangisinin diğerinden daha iyi performans gösterdiğini söylemek zordur.

Kömürden Yakıt -Uçucu Maddeden NH_3 oluşumu

Uçucu maddelerden çıkan NH_3 kaynağı, uçucu maddenin salım hızına bağlıdır [41]:

$$S_{vol,NH_3} = \frac{S_{vol} Y_{N,vol} M_{w,NH_3}}{M_{w,N} V} \quad (2.50)$$

Eş. (2.50)'de S_{vol} kömür parçacıklarından gaz fazına geçen uçucu maddelerin tükenme oranını (kg/s), $Y_{N,vol}$ uçucu maddelerdeki azotun kütle oranını ve V hücre hacmini (m^3) göstermektedir.

Sonuç olarak, kömür artığından kaynaklı yakıt azotun hesaplanması seçilen şema türüne göre değişiklik göstermektedir.

NO_2 reaksiyon mekanizması

Yanma esnasında oluşan NO'un azot içeren ara ürünlerle reaksiyona girerek N_2 oluşturduğu bilinmektedir. Bu reaksiyonlara ek olarak, NO oksijen içeren çeşitli türlerle reaksiyona girerek NO_2'yi oluşturur. Temel NO_2 oluşum reaksiyonu [33]:

$$NO + HO_2 \longrightarrow NO_2 + OH \quad (2.51)$$

Daha sonra hidrojen radikalleri ile reaksiyona girerek bünyesindeki [O] bırakır. Reaksiyon;

$$NO_2 + H \longrightarrow NO + OH \quad (2.52)$$

Alev sıcaklığının düşük olduğu bölgelerde HO_2 görece kararlıdır ve yüksek alev sıcaklık bölgesinde oluşan NO ile reaksiyona girerek, düşük sıcaklık bölgesine difüzyon ile taşınır. Yüksek radikal konsantrasyonundan dolayı NO_2 sistemde çok fazla duramamakta ve hızlı bir biçimde NO'ya geri dönüşmektedir. Sistemin yapısına bağlı olarak NO_2'nin miktarı değişebilmekte fakat genellikle toplam NO_X'un yaklaşık % 5'i civarındadır [33].

Kimyasal denge dikkate alındığında 1500 K'den yüksek alev sıcaklıkları için NO_2/NO oranı ihmal edilebilir derecede azdır. Bu dönüşümde NO_2 ömrü, karakteristik olarak 10 ms'den daha düşüktür. Yanmada, azotoksit oluşumu ile ilgili bir çok kinetik model, NO_2

emisyonunun sadece düşük sıcaklıkta çalıştırılan cihazlarda ya da soğuk ısı transfer yüzeyleri ile NO_2'yu sistemden uzaklaştıran cihazlar için önemli olduğunu belirtmektedirler [33].

N_2O reaksiyon mekanizması

Nitro oksit (N_2O), genellikle NOx'un miktar açısında az bir bileşeni olmasına karşın akışkan yataklı yakıcılar gibi daha düşük sıcaklıklarda çalışan bazı yanma cihazlarında çok daha fazla ortaya çıkmaktadır. Buna karşın N_2O emisyonlarıyla ilgili en büyük sıkıntılardan biri, önemli bir sera gazı olması ve küresel ısınma potansiyelinin karbondioksitten 298 kat daha fazla olmasıdır [37]. Bunun yanı sıra ozon tabakasının incelmesine neden olduğu da bilinmektedir.

N_2O (diazot oksit), gaz fazında gerçekleşen yanma esnasında NO'nun, NCO ve NH ile reaksiyonu sonucunda oluşmaktadır. Yakıt yanmasında gaz fazında N_2O oluşturan reaksiyonlar [33]:

$$NCO + NO \longrightarrow N_2O + CO \quad (2.53)$$

$$NH + NO \longrightarrow N_2O + H \quad (2.54)$$

NO yakıt azotundan oluştuğunda, NCO ve NH radikal türleri, alevin oksidasyon bölgesinde en yüksek konsantrasyon değerlerine ulaşırlar. Bundan dolayı, N_2O ya alev bölgesinde ya da önündeki bir konumdadır [50]. Birincil N_2O temel reaksiyonu, N_2O'nun hidrojen radikalleri ile reaksiyona girerek sistemden uzaklaştığı reaksiyondur. Bu reaksiyon;

$$H + N_2O \longrightarrow N_2 + OH \quad (2.55)$$

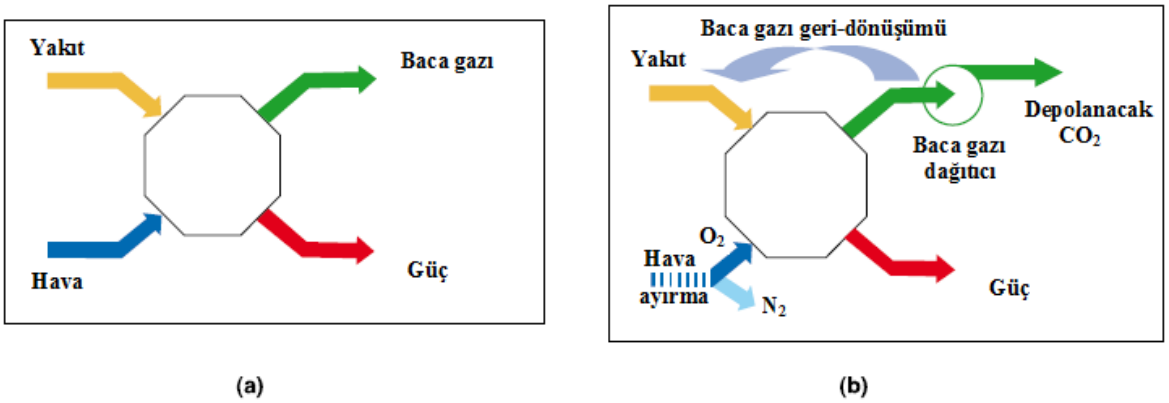
1500 K'den yüksek sıcaklıklarda N_2O'nun ömrü 10 ms'den daha azdır ve bu sıcaklıklarda N_2O emisyonu pek de önemli değildir. Fakat akışkan yataklı yakıcılarda düşük sıcaklıklarda gerçekleşen yanma olayındaki N_2O emisyon değerinin dikkate alınması gerekir [33].

2.4. Oksi-Yanma

Oksi-yakıtla yanma, yanma sürecinde birincil oksidant olarak hava yerine saf oksijeni kullanan sistemlerdir. Yakıt saf oksijenle yakıldığında, yakıtın alev sıcaklığı klasik yakma işleminden daha yüksek olmaktadır. Oksi-yanma sürecinde havadaki azot bileşenleri ısınmadığından dolayı, yakıt tüketimi düşmekte ve yüksek alev sıcaklıkları mümkün hale gelmektedir. Bununla birlikte, bu durum yakıcının ve yakıcı duvarların aşırı ısınmasına neden olabilmekte ve malzemenin sıcaklığa dayanıklılığı açısından sorun teşkil edebilmektedir. Bu nedenle yakıcı üzerinde bir modifikasyon yapılması ve bunların yapıldığı malzemenin daha dayanıklı maddelerden yapılması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır [53]. Bazı sistemlerde ise yanma odasında ortaya çıkan yüksek sıcaklığı düşürmek amacı ile baca gazının bir miktarı yanma ortamına geri yollanarak saf oksijenli ortam seyreltilmektedir. Geri dönüşüm miktarının ne kadar olması gerektiği konusunda çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Oksi-yanma prosesinde CO_2 ayırma tekniği uygulanan sistemlerde bu miktarın baca gazı debisinin 2/3'ü kadarının devri daim yapılması gerektiği belirtilmiştir [54].

2.4.1. Oksi-yanmada CO_2 tutulması

Oksi-yanma teknolojisi CO_2 yakalama teknolojileri arasında en önemli teknolojilerden birisi olarak değerlendirilmektedir. Sera gazlarını azaltmaya dönük bir teknoloji olan oksi-yanma sistemlerinde kömür, oksijen ve geri dönüştürülen baca gazı karışımı kullanılarak yakılır. Bu teknolojide temel amaç çoğunlukla CO_2 ve H_2O içeren baca gazının elde edilmesidir. NOx dâhil olmak üzere baca gazlarının devridaimi ve azotun olmaması NOx emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Birçok araştırmacı bu sorunu araştırmış ve konvansiyonel hava-yanmaya göre NOx emisyonlarında ciddi düşüşlerin (%70'e kadar) sağlanabileceği sonucuna varmışlardır [55]. Yapılan çalışmalarda, oksi-yanma prosesindeki CO_2 ayırma maliyetlerinin, konvansiyonel hava-yakmaya göre %30'dan fazla düşüş olduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı oksi-yanma teknolojisi, yüksek "karbon vergisi" uygulaması bulunan ülkelerde cazip hale gelmektedir. Hava-yanma ve oksi-yanma sistemlerinin şematiği Şekil 2.11'de verilmiştir [5].



Şekil 2.11. Hava yanma (a) ve oksi-yanma (b) sistemleri

2.4.2. Oksi-yakmanın yanma özellikleri

Tarihsel olarak, kömür artığı parçacıklarını yanmasına ait kinetik veriler, n. sıra Arrhenius yanma modeli kullanılarak ifade edilmiştir. Bu gösterimde, küresel reaksiyon oranı aşağıdaki gösterilir.

$$\mathrm{q} = k_{\mathrm{s}}\,(T_{\mathrm{p}})p^{n}{}_{o_{2},s,} \tag{2.56}$$

Yukarıdaki denklemde q partikülün birim dış yüzey alanı başına toplam yanma oranı, n reaksiyon derecesini, Tp tanecik sıcaklığını ve k_{s} ise sıcaklığa bağımlı katsayıyı ve $p^{n}{}_{o_{2},s,}$ ise çar yüzeyindeki oksijen konsantrasyonunu göstermektedir. Bu durumda Arrhenius yanma modeli aşağıdaki gibi olur [56].

$$k_{\mathrm{s}}\left(T_{\mathrm{p}}\right) = Ae^{\left(\frac{-E}{RT_{\mathrm{p}}}\right)} \tag{2.57}$$

Yukarıdaki denklemde A, y ekseni kesişimi, E aktivasyon enerjisini, R ideal gaz sabitini göstermektedir.

Oksijence zenginleştirilmiş bir ortamda pülverize kömür artığı parçacıklarını yanması üzerine yapılan deneysel bir çalışmada, %100 hava, %50-%50 hava-oksijen ve %100 oksijen ortamlarında elde edilen ortalama yüzey sıcaklıkları, sırasıyla, 1600-1800 K, 2100-2300 K ve 2300-2400 K olarak bulunmuştur. Benzer bir biçimde yanma süreleri hava için 25-45 ms düşüş gösterirken diğer koşullarda ise bu süreler sırasıyla 8-17 ms ve 6-13 ms

gerçekleşmiştir. Böylece, ortamdaki oksijen oranı havadan %100 doğru artırılırken ortalama parçacık sıcaklıkları % 45'e kadar yükselirken, yanma süreleri % 87'ye kadar (%100 oksijen ortamında) düşüş göstermiştir. Bunun yanı sıra 1500 K gaz sıcaklığında oksijen oranının %21 den %100 gibi 5 kat arttığı durumda kömür artığı parçacıklarının görünür ve içsel reaktivitesinin 5 kattan 35 kata kadar çıktığı tespit edilmiştir [57].

2.4.3. Oksi-yanma hava-yanma özelliklerinin karşılaştırılması

Oksi-yakıt yanma teknolojisini kullanan endüstrilerin geleneksel hava ile çalışan tesislere kıyasla önemli avantajlara sahiptirler. Bunlar: artan oksijen içeriği daha kararlı yanmaya izin verir ve yüksek yanma sıcaklıkları daha iyi bir ısı transferine de öncülük eder, baca gazı kütlesi ve hacmi yaklaşık % 75 daha az olur, atık gazlarda ki ısı kaybı azalarak verim artar. Ayrıca içeriğinde yüksek miktarda CO_2 bulunduran baca gazındaki kirletici konsantrasyonu daha yüksektir. Bundan dolayı kirletici gazların ayrımı daha kolay hale getirir, Yoğuşma ısısının baca gazı ile kaybolması önlenerek, uygun tekniklerle yakalanabilir ve tekrar kullanılabilir. Bütün bu avantajlarının yanı sıra yakıcı üzerinde bir modifikasyon yapılmasını gerektirmesi ve yüksek maliyetli olması gibi dezavantajları da mevcuttur [53]. Çizelge 2.2 de Bitümlü kömürün hava-yanma ve oksi-yanma gaz bileşimi verilmiştir [58].

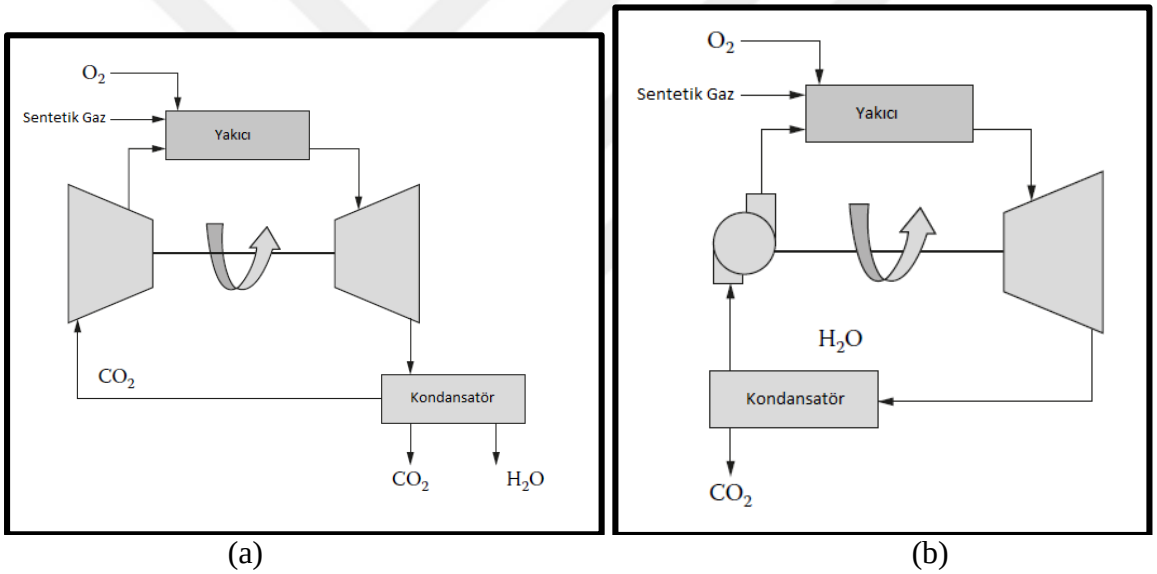
Çizelge 2.2. Bitümlü kömürün hava-yanma ve oksi-yanma gaz bileşimi

Gaz	*Hava-yanma (%)*	*Oksi-yanma (%)*
CO_2	17	64
H_2O	8,9	34
NO_x	2 770 f ppm	10 700 f ppm
SO_x	2 470 f ppm	9 400 f ppm
Mol	1	0,26
f: kömür azotunun NO_x'a dönüşüm kesri		

Oksi yakıt yanma, metal üretim ve cam endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca oksijen ile kesim en yaygın kullanılan endüstriyel termal kesim işlemidir. Yaygın olarak bu sektörlerde asetilen, propan, hidrojen ve doğal gaz yanıcı gaz olarak kullanılmakta ve bu gazların oksi-yanma özellikleri bilinmektedir.

Karbon yakalama ve depolama teknolojisindeki gelişim oksi-yanmaya olan ilgiyi gittikçe artırmaya başlamıştır. Bilhassa sentetik yakıtların yanmasında bu ilgi ciddi artış göstermektedir. Bir hidrokarbon yakıtını yanma sonu ürünleri genel olarak su ve karbondioksittir. Yanma sonu ürününden suyun ayrıştırılması neticesinde yüksek derecede karbondioksit oluşmasına neden olur. Bu yoğun CO_2 gazı sistemden ayrıştırılarak petrol çıkarma ve/veya pek çok kimyasal proseste kullanılmaktadır.

Bu teknoloji, doğal gaz güç çevrimi uygulamalarında [59] ve pülverize kömür yakan enerji üretim sistemlerinde kullanılmıştır [60]. Bununla birlikte oksi-yanma teknolojisi sentetik yakıtların yanmasında da kullanılabilir. Şekil 2.12'de sentetik yakıtların güç çevriminde kullanılabileceği iki uygulama örneği gösterilmektedir [37].



Şekil 2.12. Sentetik yakıtların (a) CO_2 ile seyreltilmiş ve (b) H_2O ile seyreltilmiş oksi-yanma güç çevrimleri

Şekil-2.12 a ve b'de sırasıyla gösterilen CO_2 ve buharla seyreltilmiş oksi-yakıt yanma sistemlerinde türbinlerinde kullanılan çalışma akışkanın yapısı konvansiyonel uygulamalarda kullanılanlarından oldukça farklıdır. Yüksek CO_2 ve buhar içeriği çalışma sıvısının öz ısı, radyasyonla ve taşınımla ısı transfer özelliklerinde önemli değişikliklere sebep olmaktadır. Daha öncede bahsedildiği üzere, oksi-yanma koşullarında hava-yanmaya göre en önemli değişiklik temel oksidant olarak hava yerine oksijen kullanılmasıdır. Bu durum bir yanda içeriğinde çok düşük miktarda CO_2 ve H_2O olan egzoz gazı üretirken diğer yanda da yanma prosesinde yüksek oranda zenginleştirilmiş O_2 olması anlamına

gelmektedir. Bu durum, işletme açısından hem yüksek bir sermaye yatırımı hem de işletme giderleri anlamına gelebilmektedir. Bu teknolojinin başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için, yakıt ve oksijen karışımının hem en iyi stokiyometrik oranda yapılması hem de bu karışımın verimliliğini maksimize etmek için yakıcı ve yanma odasının tasarımının yapılması gerekmektedir. Egzoz gazındaki fazla oksijenin asgariye indirilmiş olması bu teknolojinin diğer önemli bir avantajını oluşturmaktadır. Çünkü karbondioksiti boru hattı vasıtasıyla nakletmekte olan ayrıştırma uygulamalarında aşırı oksijen varlığı potansiyel bir korozyon tehdidi anlamına gelmektedir. Önerilen oksijen aralığı ise 2-100 ppm aralığında değişkenlik göstermektedir. Sonuçta, yanma odasındaki fazla oksijenin asgariye indirilmesi hedeflenen bir durumdur [37].

İstenilen stokiyometrik oranda yakıt ve oksijen karışımını sağlayacak yakıcıyı tasarlama zorunluluğu, oksi-yanma sistemlerinin kuruluşunda en önde gelen zorluklardan biridir. Buna ek olarak, seyreltilmiş oksi-yakıt sistemleri için literatürdeki temel verilerin eksikliği, tasarımcıların bu sistemlerde aşırı oksijeni asgariye indirme görevini daha da zorlaştırmaktadır. İlgili verilerin eksikliği, kısmen, bu alanda, uygulanabilir bilgi üretilmesini sağlayacak teknolojik gelişmelerdeki eksiklikten kaynaklanmaktadır. Ayrıca, reaktanların çoğunlukla buhar olduğu ve uygun ön ısıtma olmadan oksijen veya yakıtın eklendiği koşullarda su kolayca yoğunlaştığından dolayı yanma alevini incelemek zordur. Bu nedenlerden dolayı, buhar ile seyreltilmiş oksi-yakıt alevleri için alev hızı gibi basit özellikler bile literatürde pek çalışılamamıştır. Buna karşın, CO_2 ile seyreltilmiş sistemler için en azında laminar alevler için çalışmalar mevcuttur [61]

Oksi-yakıt yanma yaklaşımı, yanma sistemlerinin çoğuna özgün önemli bir sorun olan emisyonların kontrol edilmesi problemini çözdüğüne dikkat edilmelidir. Sentetik yakıtların hava-yanmaya göre oksi-yanma koşullarındaki azot konsantrasyonu daha düşük olmasına bağlı olarak çok daha düşük NOx emisyonu üretilmesi beklenilmektedir. Durum böyle olmasa bile, yanma sonu ürünlerinden karbondioksitin ayrıştırılabilmesi bile geleneksel emisyon kontrolleri bakış açısından oksi-yakıt yanmasını cazip hale getirmektedir [37].

3. YAKITLAR VE KÖMÜR GAZLARI

3.1. Yakıtlar

Isı enerjisi verebilecek şekilde yana bilen herhangi bir maddeye yakıt denir. En iyi bilinen yakıtlar genelde hidrojen ve karbon bileşiminden meydana gelir. Bundan dolayı hidrokarbon yakıtlar olarak tanımlanırlar. İçeriğindeki hidrojen ve karbondan dolayı C_nH_m genel formülü ile gösterilirler. Katı, sıvı ve gaz fazda hidrokarbonlar bulunabilir. Katı faz için kömür, sıvı için gazyağı ve gaz fazı için ise doğalgaz örnek olarak verilebilir.

Yakıtlar çok farklı biçimlerde sınıflandırılabilirler. Yanma cihazı açısından değerlendirildiğinde önemli olan; yakıtın yanma cihazına nasıl geldiği ve nasıl yandığıdır. Buna bağlı olarak yanma mühendisliği yakıtları başlıca; gaz, sıvı ve katı olarak sınıflandırmaktadır [62].

Günlük yaşamda yanma mühendisliğinin aksine yakıtlar toplumda, kaynağına ve çevreye olan etkisine göre sınıflandırılmaktadır. Bundan dolayı toplumda yakıtlar, fosil yakıtlar ve biyo yakıtlar, yenilenebilir yakıtlar ve yenilenmeyen yakıtlar veya karbon nötr ve karbon nötr olmayan yakıtlar diye sınıflandırılmaktadır. Fosil yakıtlar yenilemeyen yakıtlar iken biyokütle genellikle yenilenebilir diye kabul edilmektedir. Bu noktada önemli bir noktada yenilenebilir kabul edilen herhangi bir yakıtın ne kadar kullanıldığı ve üretildiğidir. Örneğin; dünyanın bir çok yerinde odun yerine tekrar ikame edilemeyecek bir oranda hasat ediliyor. Ağaçlar, yenilenebilir bir yakıt olmasına karşın hasat edilme oranı ekilme oranından fazla olduğu takdirde yenilenebilir olma özelliğini kaybeder. Fosil yakıtlar başlıca, doğal gaz, ham petrol-petrol ürünleri ve kömürden oluşmaktadır. Biyokütle ise esas olarak bünyesinde odun ve odun artıkları, tarımsal mahsuller ve mahsul kalıntıları, doğal otlar, belediye ve sanayi atıklarının organik parçasını ve biyo türevli yakıtları (alkol ve biyo-dizel gibi) barındırır [62].

3.1.1. Katı yakıtlar

Katı yakıtlar türleri içinde odun ve çeşitli biyokütle türleri, turba, linyit kömürü, bitümlü kömür, antrasit ve atıktan türetilmiş yakıtlardır. Gaz ve sıvı yakıtlara göre katı yakıtların taşınması, işlenmesi ve yanması daha zordur. Katı yakıtlar bir çok ebatta ve şekillerde

bulunurlar ve kullanılabilmeleri için genellikle ebatları küçültülmeye ve içlerindeki su buharı düşürülmeye çalışılır. Bünyelerinde karbon ve hidrojenin yanı sıra önemli miktarlarda oksijen, su, mineral maddeler, azot ve sülfür bulunur. Katı yakıt türüne bağlı olarak oksijen oranı değişiklik gösterebilmektedir (odun % 45, antrasit % 2). Çizelge 3.1 de katı yakıtlardaki oksijen, nem ve kül yüzdeleri verilmiştir [53].

Çizelge 3.1. Katı yakıtlarda ortalama oksijen, nem ve kül yüzdeleri

Katı yakıtlar	*O2 (%)* (kuru, külsüz)	*Nem (%)* (külsüz)	*Kül (%)* (kuru)
Odun	*45*	*15-50*	*0,1-1,0*
Turba	*35*	*90*	*1-10*
Linyit kömürü	*25*	*30*	*>5*
Bitümlü kömür	*5*	*5*	*>5*
Antrasit kömürü	*2*	*4*	*>5*
Atıktan türetilmiş yakıtlar	*40*	*24*	*10-15*

Yukarıdaki çizelgeden görülebileceği üzere biyo-yakıt ve düşük kaliteli kömürlerin bünyelerinde farklı oranlarda bulunan nem, belirleyici özelliklerinden biridir. Nem, katı yakıtlarda serbest (yüzey) nem ve bağıl nem olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Yüzey nem kömüre dışarıdan geçici olarak karışan, ortalama yüzde 2-3 oranında bulunan ve normal koşullarda buharlaşan nemdir. Bazı işlemler için yüzey nemin varlığı gereklidir. Örneğin, koklaşma işleminde yüzde 3-5 yüzey nemi ile çok daha iyi sonuç elde edilebilir. Bağıl nem, kömürün kılcallığına bağlı olarak değişmekte ve fiziksel adsorbsiyonla tutulmakta ve ısı emilimini düşürmektedir. Çizelge 3.1' de görüldüğü üzere yeşil odunun % 50'si, linyit kömürlerin % 20-40'ı serbest nemden oluşmaktadır. Bitümlü kömür ise yaklaşık % 5 nem içermektedir [62].

Bir katı yakıtın tam yakılması sonucu arta kalan organik olmayan mineral maddeler kül olarak nitelendirilmektedir. Katı yakıtların kullanımına ve taşınmasına bağlı olarak odunda %1'den daha az ve kömür de ise yaklaşık % 3-10 veya daha fazla kül bulunur. Genellikle, katı yakıtlarda bulunan kül, 1200°C'de yumuşama ve yakıt türüne göre değişiklik

göstermesine karşın 1300 °C civarında sıvılaşmaya başlar. Cüruf, erozyon ve korozyonu en aza indirgemek için sistem tasarımında kül özellikleri önemli bir rol oynamaktadır [62].

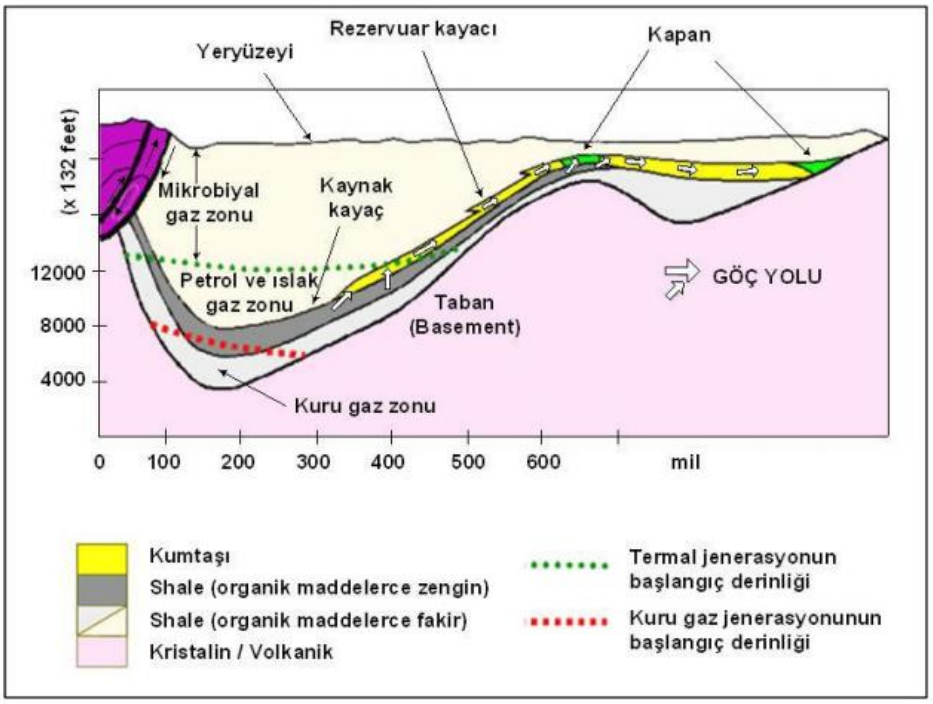
3.1.2. Sıvı yakıtlar

Sıvı yakıtlar yanma cihazı içinde sıvı biçiminde taşınan yakıtlardır. Sıvı yakıtlar doğrudan kullanılamadıkları için genellikle buhar haline getirilerek kullanılırlar. Dizel motorlarda olduğu gibi sıvı yakıtı buharlaştırma işlemi yanmanın bir parçası olarak gerçekleşmektedir. Bundan dolayı gazlara göre sıvı yakıtların yanması daha karmaşık ve zor bir işlemdir.

Sıvı yakıtlar halen başlıca petrolden elde edilmektedir. Bunun yanı sıra gittikçe artan bir oranda ise biyo-kütleden, bitümlü şisten, katran kumundan ve kömürden de petrol üretimi söz konusudur. Ham petrol, bünyesinde az miktarda kükürt, azot, oksijen, eser metalleri ve mineralleri bulunduran ve sıvı hidrokarbonların bir karışımından doğal olarak oluşan bir karışımıdır. Kimyevi bileşimi bulunduğu ortama göre değişmesinden dolayı sabit bir bileşimi yoktur. Bundan dolayı her petrol çeşidinin kendine has ağrılığı, alevlenme sıcaklığı ile ortalama ısıtma kuvvetleri vardır. Ortalama elementel bileşiminde ise karbon (%84), kükürt (%3), azot (%0,5), oksijen (%0,5) ve az miktarda da hidrojen bulunmaktadır [62].

İngilizce`de petrol yerine kullanılan petroleum terimi köken olarak Grekçe'den (Yunancadan) türemiş olup, taş anlamına gelen "petra" kelimesi ile yağ anlamına gelen "oleum" kelimelerinin birleşimidir ve taşyağı (petroleum) anlamına gelir. Eski Grekler'den daha önce, Mezopotamya dillerinde naptu kelimesi taşyağı anlamında kullanılmıştır. Daha sonra bu kelime nafta olarak evrimleşmiş ve bugün pek çok dilin kelime haznesine ham petrol veya petrolden elde edilen gazyağı ve benzin türü hidrokarbon sıvılarını belirtmek üzere girmiştir [63].

Bir petrol sisteminin profili gösteren kaynak ve rezervuar kayaçlar, kapanlar ve göç yolları detaylı bir biçimde Şekil 3.1'de gösterilmektedir [63].



Şekil 3.1. Bir petrol sisteminin profili; kaynak ve rezervuar kayaçlar, kapanlar ve göç yolları

Petrol, genellikle okyanusun dibinde bulunan bazı kaya katmanlarından çıkarılmaktadır. Petrol, büyük kaya katmanları arasında kalan bitki ve hayvanların milyon yıllar boyunca yüksek basınç ve sıcaklığın etkisiyle çürüdükten sonra geriye kalan yağlı maddelerin petrol ve gaza dönüşmesinden oluşmaktadır. Ham petrol nadiren doğrudan yakılmasına karşın, yoğunluğu, viskozitesi ve kirliliğinden dolayı çıkarıldığı gibi kullanmaktan ziyade tesislerde rafine edilir Bu işlem esnasında sırasıyla, damıtma, kraking, reforming ve safsızlığın giderilmesi işlemleri gerçekleştirilir [62].

Ham petrolün rafinerilerde arıtılması ve işlenmesi sonucunda ortalama olarak %43 benzin, %18 fuel oil ve motorin, %11 LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı, propan veya propan-bütan karışımı), %9 jet yakıtı, %5 asfalt ve %14 oranında diğer ürünler elde edilmektedir. Ham petrol, su gibi tek bir bileşik yapısında değildir. Farklı tip hidrokarbon moleküllerinin karışımından oluşmuştur. Ham petrol kaynama ve donma noktaları çok farklı bileşiklerin karışımı olduğundan, tek bir kaynama veya donma noktasından söz edilemez. Saf su bir beherde ısıtıldığında 100 °C (212 °F)'ye ulaştığında kaynamaya başlar, çünkü her tarafında tek tip H2O molekülleri vardır. Ham petrol 21 °C (70 °F)'de kaynamaya başlamaktadır ve sıcaklık arttıkça kaynama yüksek sıcaklıklara kadar devam etmektedir. Hidrokarbon

molekülleri farklı sıcaklıklarda kaynar. Propan için -44 °F (-41 °C)'den, 1500 °F (816 °C)'de asfalta kadar geniş kaynama sıcaklığı göstermektedir.

Petrol fraksiyonları; karbon aralıklarına göre gaz (C_1-C_4), nafta (C_5-C_{10}), kerosin (C_{10}-C_{14}), dizel (C_{14}-C_{18}), yağlama yağı (C_{18}-C_{50}) ve vaks (C_{16}-C_{70}) olarak gruplanacağı gibi, kaynama noktası aralıklarına göre de hafif (0- 150 °C), orta (150-370 °C) ve ağır (≥370 °C) olarak da sınıflandırılabilir [63].

3.1.3. Gaz yakıtlar

Gaz yakıtlar yanma cihazı içinde taşınan ve gaz biçiminde kullanılan yakıtlardır. En önde gelen ve bilinen gaz yakıtlar doğalgaz ve sıvılaştırılmış petrol gazıdır (LPG). Bunun yanı sıra kömür ve biyo-kütlenin ısıl gazlaştırılmasından elde edilen gaz yakıtlarda (kömür, sentetik yakıtlar diye nitelendirilmektedir) kullanılmaktadır. Bilhassa yandığında sera gazı etkisi göstermeyen hidrojen gittikçe artan bir oranda gaz yakıt olarak kullanılmaktadır.

Doğal gaz yer altındaki kaya ve şeyl katmanlarında bulunan fosil kaynaklı bir çeşit yanıcı gaz karışımıdır. Genellikle petrol rezervlerinin yanında veya üstünde yer alır. Yakıt olarak önem sıralamasında ham petrolden sonra ikinci sırayı alır. Doğal gazın büyük bölümü (%70-90'ı), Metan gazı (CH_4) adı verilen hidrokarbon bileşiğinden oluşur. Diğer bileşenleri; etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}) ve pentan (C_5H_{12}) gazlarıdır. İçeriğinde eser miktarda yanmayan gaz bileşenler olarak; karbondioksit (CO_2) , azot (N_2), helyum (He) ve hidrojen sülfür (H_2S) bulunabilmektedir. Doğal gaz kullanılmadan önce yanmayan bileşenlerinden ve yüksek molekül ağırlıklı hidrokarbonlardan temizlenir. En verimli ve ucuz taşıma yöntemi boru hatlarında basınçlı bir biçimde aktarmaktır. Bunun yanı sıra doğal gaz yüksek basınç altında ve düşük sıcaklıklarda basınçlı tanklarda sıvılaştırılmış (LNG) olarak da taşınmaktadır. Bu taşıma yöntemini boru hattı yöntemine göre daha verimsiz ve pahalı bir yöntemdir [62].

Metan, metanojenik bakteriler tarafından atık depolama sahalarında oksijensiz ortamda oluşturulur. Belediye katı atık ve tarımsal atıklar önemli miktarda metan üretilmesine neden olan organik madde ihtiva ederler. Metanojenik bakteriler, organik malzemeleri parçalayarak öncelikle karbondioksit ve metan üretirler. Karbondioksitin aksine metan, suda az çözünür, havadan hafifi olması sebebiyle ancak gömülü tüplerle

toplanabilmektedir. Metan, küresel ısınmaya neden olan sera gazlarından biri olmasından dolayı havaya salımı kontrol altında tutulması gereken bir gaz türüdür. Bundan dolayı mümkün olan her koşulda havaya salımından ziyade toplanıp, yakıt olarak kullanılması gerekir.

LPG, yani sıvılaştırılmış petrol gazı, içeriğinde etan (C_2H_6), propan (C_3H_8), bütan (C_4H_{10}) karışımı bulunan ve ham petrolün rafinerilerde damıtılması esnasında veya petrol yataklarının üzerinde bulunan doğal gazın ayrıştırılması ile elde edilen bir gaz türüdür. LPG, yüksek basınç altında sıvı halde depolanan ve atmosfer basıcında ise gaz halinde bulunan renksiz, kokusuz, havadan ağır ve yanıcı bir gazdır. Ticari LPG, 38 ^{0}C sıcaklıkta ve maksimum 208 kPa basınçta bulunur [62].

Diğer bir gaz tipi olan sentez gazları (sentetik gaz, eskiden jeneratör gazı veya havagazı denirdi), kömür veya biyokütle partiküllerinin stoikometrik miktardan daha az hava veya oksijeninle gazlaştırılmasından elde edilir. Bu işleme gazlaştırma denir ve gazlaştırıcılar yardımıyla gerçekleştirilir. Kömürlerin gazlaştırılması ya da koklaştırma yan ürünü olarak elde edilen bu gazların yanabilir ana bileşenleri, metan (CH_4) , hidrojen (H_2) ve karbon monoksit (CO) iken, yanamayan bileşenleri ise karbondioksit (CO_2) ve bazısında yüksek oranda bulunan azot (N_2) gazıdır [62].

3.2. Gazlaştırma ile Kömür Gazı Elde Edilmesi

3.2.1. Gazlaştırmanın tarihsel gelişimi

Gazlaştırma prosesi uzun zamandan beri bilinen ve uygulanmakta olan bir işlemdir. İlk sentez gaz üretimi İskoç mühendis Murdoch'un demir retordlaması sırasında kömürün pirolizi işlemiyle üretilmiştir. İlk büyük ölçekte kömürden şehir gazı 1792'de üretilmiştir, 19. Yüzyılda şehir gazı üretmek amacıyla yaygın olarak kullanılmıştır. Daha sonra 1812 yılında ilk gaz şirketi Londra'da kurulmuş, kömürden gaz üretimi gerçekleştirilerek Westminster Köprüsü'nün aydınlatılması sağlanmıştır. 1816 yılında kömürden gaz üretimi yapan ilk gaz üretim tesisi Amerika Birleşik Devletleri'nde kurulmuş ve üretilen kömür gazı ile Baltimore şehrinin sokakları aydınlatılmıştır. 1826 yılına gelindiğinde New York, Boston gibi büyük şehirlerde gaz üretimi gerçekleştirilerek sokak aydınlatılması sağlanmış; proses tüm dünyadaki büyük şehirlerde uygulanmaya başlanmıştır [64].

19. yüzyılda havagazı önce aydınlatma ve daha sonra ısınma amaçlı olarak kullanılmaya başlanmış ve özellikle sokaklarla evlerin aydınlatılmasının yolunu açmıştı. İstanbul yanında İzmir, Şam, Selanik, Beyrut, Edirne şehirleri de havagazı ile aydınlatılmaktaydı. [65].

Bilindiği üzere havagazı taş kömüründen elde edilmekte olup yaklaşık %50'si hidrojenden oluşmaktadır. "İngilizcede "coal gas" anlamında olan havagazı başlangıçta ısınmadan çok aydınlanma amacıyla kullanılmıştır. Bundan dolayı çeşitli Avrupa dillerinde "aydınlanma gazı" anlamına gelen kelimeler kullanılmıştır. Örneğin; İngilizce'de "şehir gazı" manasında "town gas"; Fransızca'da yine aynı anlamda "gaz de ville"; Almanca'da da "leuchtgas" kelimeleri kullanılmaktadır [65].

Ülkemizde ise gazlaştırma prosesinin ilk uygulaması Dolmabahçe Sarayı eklentilerinden olan Dolmabahçe Gazhanesi'nde gerçekleştirilmiştir. Yaz kış oturulması planlanan büyük boyutlardaki sarayın aydınlatma ve ısıtma problemini çözmek için bir havagazı fabrikası devlet eliyle Hazîne-i Hâssa-i Hümâyun tarafından inşa ettirilmiştir. Dolmabahçe Gazhanesi'nin inşası sarayla birlikte 1853 yılında tamamlanmış; saray ve eklentileri 7 Haziran 1856 tarihinde resmi bir törenle kullanıma açılmış ve sarayın aydınlatılması için gerekli havagazı Osmanlı Devleti sınırları içinde ilk defa burada üretilmiştir. Ayrıca Dolmabahçe Gazhanesinin üretim fazlası havagazı ile 1856 yılında Beyoğlu bölgesine havagazı verilmeye başlanmış; havagazı ile İstanbul'da ilk defa cadde-sokak aydınlatması İstiklal Caddesi (Cadde-i Kebir) aydınlatılarak gerçekleştirilmiştir. Cumhuriyet döneminde işlevini sürdüren gazhanenin, 1960'lı yılların başında İnönü Stadyumu'nun genişletilmesi sırasında bir bölümü yıkılmıştır. Geri kalan kısmı İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne bağlı İ.E.T.T mülkiyetindir [64].

II. Dünya Savaşı'nı takip eden yıllarda büyük rezervlerde doğalgazın keşfi ve doğalgazın yüksek ısıl enerjiye sahip olması nedeniyle gazlaştırma işlemine olan ilginin azalmasına neden olmuştur. 1970'li yıllarda doğalgaz rezervlerinin azalması ve talebin rezerv miktarının üzerine çıkmasıyla gazlaştırma teknolojisine olan ilgi tekrar artmış, bilhassa 1973 petrol krizi yıllarında alternatif yakıt üretim teknolojilerine olan ilgi yeniden ciddi manada artmış ve ülkeleri tekrar farklı enerji kaynak arayışına itmiştir. 1980'li yılların başında bu alanda çalışan araştırmacılar sayesinde gazlaştırma işlemi sonucunda elde

edilen ürünlerin çevresel avantajlarının farkına varılmıştır. Son yıllarda bilhassa kıta Avrupa'sında daha sert ve kısıtlayıcı çevre standartları özellikle elektrik santralleri ve endüstriyel kuruluşlarda emisyonların ve sera gazlarının azaltılmasını zorunlu hale getirmeye başlamış ve hükümetler ve sanayi paydaşlarının teşviki ile de gazlaştırma proseslerinin ticarileşmesi ivme kazanmıştır [64].

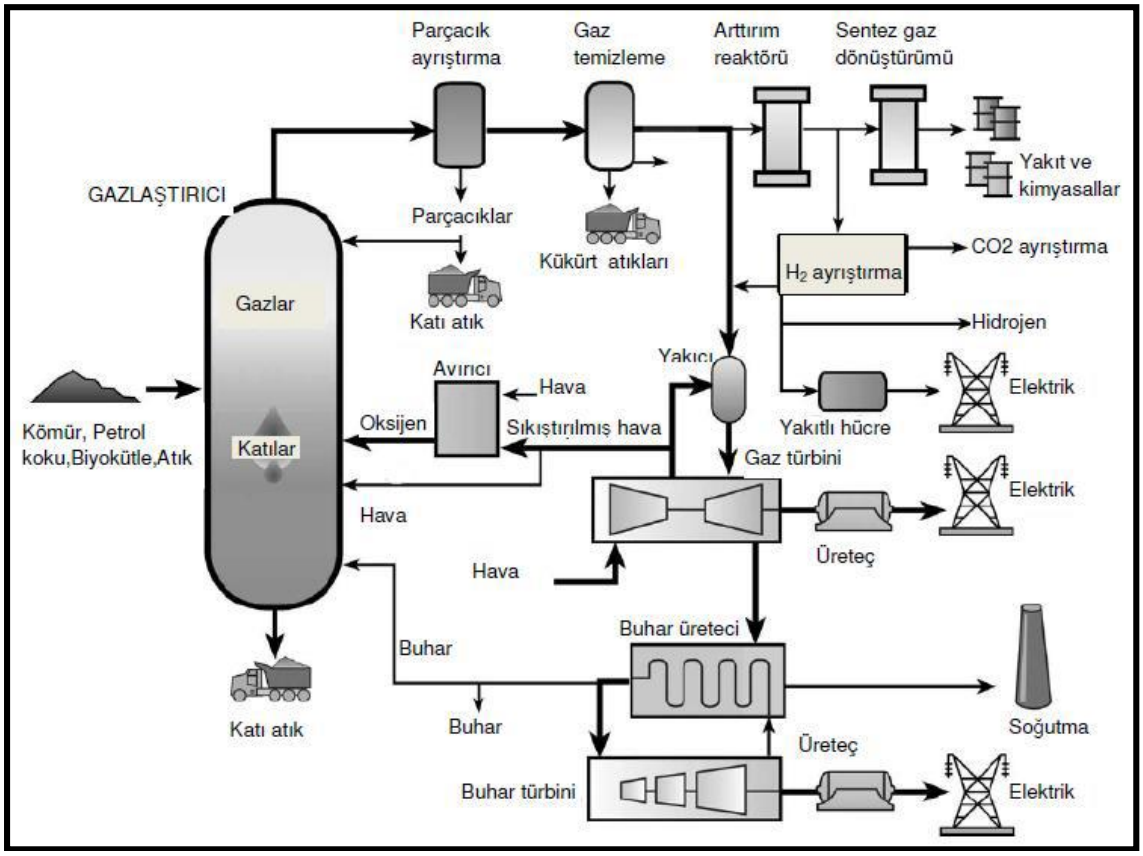
3.2.2. Kömürlerin gazlaştırılması

Gazlaştırma, organik ya da fosil esaslı karbonlu katı ve sıvı yakıtların karbonmonoksit, karbondioksit, hidrojen, metan gibi gazları bünyesinde taşıyan bir gaza dönüştürüldüğü ısıl bir işlemdir. Bir dizi kimyasal tepkimeler sonucunda elde edilen gaza sentez gazı denilmektedir [56]. Üretilen sentez gazı bileşimi, kullanılan hammaddenin fiziksel ve kimyasal özelliklerine, gazlaştırma ortamı sağlayan oksitleyiciye (oksijen, hava, karbondioksit, su buharı…) ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir [66].

İnsanlık tarihinde çok uzun yıllar boyunca ısı, buhar ve elektrik üretiminde önemli bir paya sahip olan kömürün yakın gelecekte de önemli bir yere sahip olacağı öngörülmektedir. Benzer bir biçimde, kömürlerin gazlaştırılması ile elde edilen kömür gazlarının bileşimi de, kullanılan kömürün tepkime yeteneğine, kullanılan gazların cinsine ve uygulanan gazlaştırma işlemine (basınç, sıcaklık, kömür ve gazın akış yönleri v.b.) bağlı olarak değişiklikler gösterir. Bu işlem sonucunda elde edilen ham gaz, çeşitli oranda CO, CO_2, N_2, CH_4, H_2 ve su buharı içerir. Kullanılan kömür bünyesindeki kükürdün önemli bir bölümü H_2S ve COS halinde elde edilen ham gaz içinde bulunur. Daha sonra ham gaz suyla yıkanarak CO_2'nin uzaklaştırılması, CO gazının CO_2'ye dönüştürülmesi, ham gazın kükürtlü bileşiklerden arındırılması ve hidrokarbonların parçalanması gibi işlemlerle istenen özellikteki kömür gazı elde edilebilmektedir [67].

Gazlaştırma tepkimelerinin tümü kömürün ısıl bozulması (piroliz) ile başlar. Isıl bozulma sonucunda CO_2, CH_4, doymuş ve doymamış hidrokarbonlar meydana gelir. Gazlaştırma esnasında bu ürünler birbiriyle tekrar etkileşirler. Çeşitli tepkimeler yoluyla ısıl parçalanırlar. Uygulamada hidrojenle gazlaştırma dışındaki katı/gaz tepkimeleri 800°C'ın üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştirilirler. Artık olarak geriye katı ya da erimiş haldeki kül ya da gazlaşmamış kok kalır [67].

Kullanılan yakıta ve gazlaştırma ortamına bağlı olarak gazlaştırıcılardan elde edilen sentez gazı doğrudan içten yanmalı motorlarda kullanılabileceği gibi yakıt hücrelerinde ya da methanol, Fischer Tropsch prosesinde kullanılarak sentetik yakıt üretimi de gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3.2'de gazlaştırma prosesi ve bu prosese bağlı enerji dönüşüm yöntemleri görülmektedir [64].



Şekil 3.2. Gazlaştırma prosesine dayalı enerji dönüşüm yöntemleri

3.2.3. Gazlaştırma termodinamiği

Gazlaştırma işlemi 800 °C ile 1800 °C arasındaki sıcaklıklarda gerçekleşir. Tam sıcaklık, gazlaştırmaya tabi tutulacak maddenin özelliklerine bağlıdır. Katı karbonun gazlaştırılması işleminde karbon kömür veya kok formunda olabilir. Temel kimyasal reaksiyonlar karbon, karbon monoksit, karbon dioksit, hidrojen, su (ya da su buharı) ve metan içerir. Bu tepkimeler [68]:

Yanma tepkimeleri,

$C + ½ O_2 = CO \quad -111$ MJ/kmol (3.1)

$CO + ½ O2 = CO_2 - 283$ MJ/kmol (3.2)

$H_2 + ½ O2 = H_2O \quad -242$ MJ/kmol (3.3)

Boudouard tepkimesi, reaktör içindeki karbondioksitin çarla reaksiyona girerek karbonmonoksit oluşturduğu endotermik bir reaksiyondur.

$C + CO_2 \rightleftharpoons CO \quad +172$ MJ/kmol (3.4)

Su gazı tepkimesi, heterojen fazda gerçekleşen bir reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda aynı molar oranında karbonmonoksit ve hidrojen oluşumu gerçekleşir.

$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H2 \quad +131$ MJ/kmol (3.5)

Metanasyon tepkimesi, heterojen fazda gerçekleşen bir reaksiyondur.

$C + 2\,H_2 \rightleftharpoons CH_4 \quad -75$ MJ/kmol (3.6)

Serbest oksijenle gerçekleşen (2.54), (2.55) ve (2.56) tepkimelerin hepsi temelde gazlaştırma koşulları altında tam olarak tamamlanması gerekmektedir. Bundan dolayı bu tepkimelerin sentez gazı bileşiminin tahmin edilmesinde dikkate alınmasına gerek yoktur. Bunun için gerçekleşen üç heterojen (katı ve gaz faz) tepkime (2.57), (2,58) ve (2,59) yeterlidir.

Genellikle karbon dönüşümünün tamamlanmış olduğu durumları da dikkate almak gerekir. Bu durumda; (2.57), (2,58) ve (2,59) denklemleri aşağıdaki gibi homojen gaz tepkimelerine indirgenebilir:

CO değişim tepkimesi, reaktör içerisindeki karbonmonoksitin su buharı ile reaksiyona girerek hidrojen ve karbondioksit oluşturduğu ekzotermik bir reaksiyondur.

$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ - 41 MJ/kmol (3.7)

Buhar metan düzeltim tepkimesi, reaktör içerisindeki metanın su buharı ile reaksiyona girerek karbondioksit ve hidrojen oluşturduğu endotermik bir reaksiyondur

$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 3H2$ + 206 MJ/kmol (3.8)

(2.57) tepkimesi mol ve ısı etkisi ile (2.58) çıkarılarak (2.60) reaksiyonu elde edilir ve benzer biçimde (2.59) tepkimesinden (2.58) çıkarılarak (2.61) tepkimesi elde edilir. Böylece (2.60) ve (2.61) tepkimeleri (2.57), (2.58) ve (2.59) tepkimelernden elde edilmiş olur ancak bunun başka bir yolu da bulunmamaktadır. Üç bağımsız denklem her zaman iki denklemden daha fazla bilgi içerir.

(2.54), (2.57), (2.58) ve (2.59) tepkimeleri karbonlu veya hidrokarbon yakıtların gazlaştırılması işlemini dört yoldan açıklar. Tepkime (2.57), saf karbonun oksijen/CO_2 karışımı ile gazlaştırılmasından saf CO üretimini açıklamaktadır. Tepkime (2.58) su gazı prosesinde önemli bir rol oynar. Tepkime (2.59) tüm hidrojenle gazlaştırma işlemlerinin temelini oluşturur. Ancak çoğu gazlaştırma işlemi (2.54) (kısmi oksidasyon) ve (2.58) (su gazı) tepkimelerinin dengesine dayanır [68].

Gerçek yakıtlar için (hidrojen içeren kömür dâhil olmak üzere), genel tepkime formülü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$C_nH_m + \frac{n}{2} O_2 = nCO + \frac{m}{2} H_2$ + 206 MJ/kmol (3.9)

Yukarıdaki denklemlerde, saf metan gibi gazlar için; m=4 ve n=1, $\frac{m}{n}$=4, Petrol için; $\frac{m}{n} \approx 2$, m=2 ve n=1 ve kömür için, $\frac{m}{n} \approx 1$, m=1 ve n=1

Gazlaştırma sıcaklıkları tüm koşullarda çok yüksek olduğundan dolayı hem termodinamik hem de pratik açıdan metan dışındaki hiçbir hidrokarbon kayda değer miktarlarda bulunamaz.

Termodinamik denge

Çift yönlü oklardan anlaşılacağı üzere (2.57)'den (2.61)'e kadar olan tüm denklemler geri dönüşümlü çift yönlü tepkimelerdir. Genelde ileri ve geri yönlü reaksiyonlar farklı hızlarda ve aynı anda gerçekleşirler. Herhangi bir sıcaklık derecesi için bu reaksiyon hızları, reaksiyonun gerçekleşmesini sağlayan reaktiflerin miktarıyla orantılıdır [68].

CO değişim tepkimesini örnek olarak aldığımızda (2.60); ileri yönlü reaksiyon hızı olan r_f, CO ve H_2O birim hacimdeki molar konsantrasyonlarıyla doğru orantılıdır.

$$r_f = k_f . [CO].[H_2O] \quad (3.10)$$

Burada, oran sabiti kf, sıcaklığa bağlıdır. Benzer bir biçimde, ters yönlü tepkime için,

$$r_r = k_r . [CO].[H_2O] \quad (3.11)$$

Yukarıdaki iki tepkimenin hızı belirli bir süre içinde ortak bir değere ulaşma eğilimi göstermekte ve böylelikle gaz bileşimi denge durumuna ulaşmaktadır. Bu koşullar altında,

$$K_p = \frac{k_r}{k_f} \frac{[CO_2].[H_2]}{[CO].[H_2O]} \quad (3.12)$$

Yukarıda Kp, CO değişim tepkimesinin sıcaklığa bağlı denge sabitidir. İdeal gaz şartlarında yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$K_p = \frac{P_{CO_2} . P_{H_2}}{P_{CO} . P_{H_2O}} = \frac{v_{CO_2} . v_{H_2}}{v_{CO} . v_{H_2O}} \quad (3.13)$$

Yukarıdaki denklemde P_{CO} kısmi basınç ve v_{CO} gaz içerisindeki CO'nun $\frac{P_{CO}}{P}$ mol kesridir.

Benzer şekilde, diğer reaksiyonlar için denge sabiti aşağıdaki gibi yazılabilir:

Boudouard tepkimesi (2.57) için

$$K_p = \frac{P^2\text{CO}}{P_{\text{CO}_2}} = \frac{(v_{\text{CO}})^2}{v_{\text{CO}_2}}.\text{P} \quad (3.14)$$

Su gazı tepkimesi(2-58) için

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}}.P_{H_2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{v_{\text{CO}}.v_{H_2}}{v_{\text{H}_2\text{O}}} . P \quad (3.15)$$

Buhar metan düzeltim tepkimesi (2-61)

$$K_p = \frac{P_{\text{CO}}\, P^3{}_{H_2}}{P_{CH_4}\, P_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{v_{\text{CO}}\, v^3{}_{H_2}}{v_{CH_4}\, v_{\text{H}_2\text{O}}} . P^2 \quad (3.16)$$

Metan- buhar düzeltim tepkimesi (2.61) için P toplam mutlak gaz basıncını göstermektedir.

Yukarıdaki denklemlerdeki denge sabitlerinin sıcaklık bağımlılığı temel verilerden türetilmekte ancak genellikle aşağıdaki gibi bir korelasyon ifadesi ile gösterilmektedir:

$$\ln (K_{p,T}) = \ln (K_{p,T0}) + f (T) \quad (3.17)$$

Yukarıdaki denklemde, T, Kelvin türünden mutlak sıcaklığı göstermektedir. Ayrıca, (2.63) ten (2.66) ya kadar olan eşitliklere ait tepkimeler, tepkimelerin dengeye ulaştığı varsayımı altında, bize sentez gazının, gaz bileşenlerinin bağıl konsantrasyonlarının belirlenmesinde katkı sağlamaktadır.

Yukarıdaki tartışmaların tamamında gazların ideal olduğu varsayılmıştır ve fugasite hesaba dâhil edilmemiştir. Birçok işlem 30-70 bar basıncında çalışmasına rağmen bu varsayım her bir bileşiğin kritik sıcaklığından çok uzak olan yüksek sıcaklıklarda gerçeklemesi nedeniyle doğrulanmaktadır [68].

3.2.4. Gazlaştırma teknolojileri

Gazlaştırma işlemi kömür ve biyokütle gibi katı yakıtların reaktörlerin içerisinde oksitleyiciler (oksijen, hava, su buharı ya da bunların çeşitli oranlarda karışımlarının) ile temas etmesi ile gerçekleşmektedir. Gazlaştırma işleminin gerçekleştiği bu reaktörlere gazlaştırıcı da denilmektedir. Kullanılan yakıt tipine, kullanım amacına, sistemin kapasitesine, işletme zorlukları gibi parametrelere reaktör tipi belirlenmektedir.

Gazlaştırma işlemi esnasında karbon dönüşümü, sıcaklık dağılımları, ürün gazı içerisindeki tanecik miktarı seçilen reaktör tipine bağlı olarak değişiklik gösterdiğinden dolayı nihai ürünlerin bileşimi ve ısıl değerleri doğrudan reaktör tipinden etkilenmektedir. Reaktör tipleri temel olarak sabit yataklı gazlaştırıcılar, akışkan yataklı gazlaştırıcılar ve sürüklemeli tip gazlaştırıcılar olmak üzere üçe ayrılır. Bu gazlaştırıcılar kendi içinde de çeşitli tipleri bulunmaktadır [64].

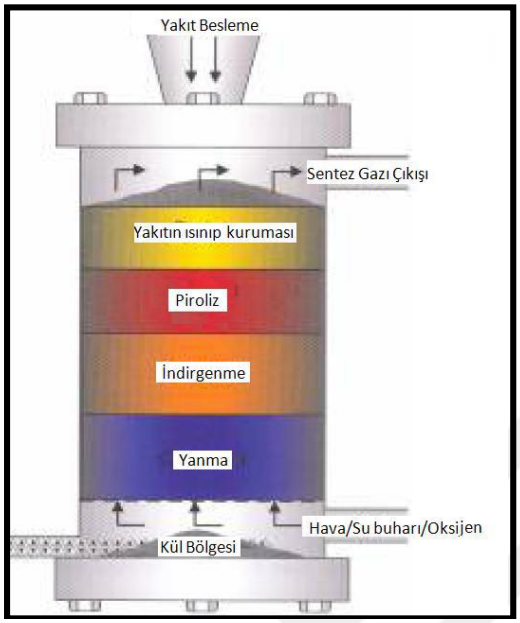
Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar

Sabit yataklı gazlaştırıcılar havanın ve gazın akış yönüne göre; yukarı akışlı gazlaştırıcılar, aşağı akışlı gazlaştırıcılar ve karşıt akışlı gazlaştırıcılar olmak üç farklı tipi bulunmaktadır.

Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılar

Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılarda karbonlu içerikli kömür ve biyokütle gibi yakıtlar reaktörün üstünden sisteme verilirken, hava veya diğer oksitleyiciler (buhar, oksijen) gazlaştırıcının alt bölgesinden reaktöre verilir. Sisteme beslenen yakıtın nemi, aşağıdan gelen sıcak gazın ısısıyla buharlaşır ve daha sonra katı yakıt piroliz bölgesinde bünyesindeki uçuculara ve çara ayrışır. Yanma ve gazlaştırma reaksiyonları ızgaranın üzerindeki ocak bölgesinde gerçekleşir ve sıcak gaz ürünleri bu bölgede oluşur. Yukarı akışlı sabit yataklı sistemlerde pirolizden çıkan ürünler tam olarak tepkimeye giremediklerinden ve sıcaklıklarının düşük olmasından dolayı meydana gelen katran tam olarak parçalanmaz ve üretilen sentez gazı içeriğindeki katran miktarı yoğun olur. Katran, borularda yoğuşup tıkanmalara neden olmasından ve enerji verimini de olumsuz yönde

etkilediğinden dolayı gazlaştırma işleminde istenmeyen bir üründür. Şekil 3.3'te yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcının şematik resmi görülmektedir [64].



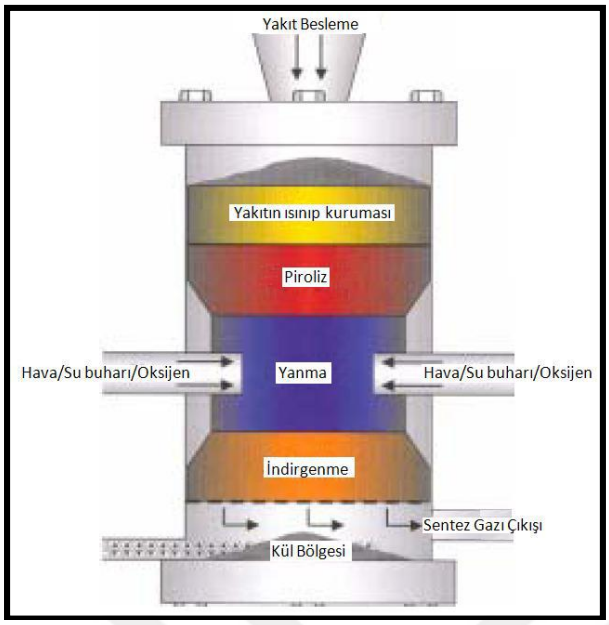
Şekil 3.3. Yukarı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı

Bu tip gazlaştırıcıların en önemli avantajları, düşük katran üretimi, düşük ısıl değerlikli ürün gazı oluşumu, tozun ayarlanabilmesidir. Genellikle küçük ve orta ölçekli tesislerde kullanılırlar.

Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılar

Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırma sisteminde yakıt ve oksitleyiciler sisteme yukarıdan verilir. Açığa çıkan gazlaştırma ürünleri ise sistemin alt bölgesinden alınır. Piroliz bölgesinde çıkan ürünler sıcak yatak bölgesinden geçtiği için oluşan katranın büyük bir kısmı bu bölgede parçalanır. Bu tip gazlaştırıcılar özellikle biyokütle gazlaştırmada çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Aşağı akışlı gazlaştırıcılarda yüksek sıcaklıklarda topaklaşan yakıt tıkanmalara sebep olabilmektedir. Bunun önüne geçmek için hareketli ızgaralar kullanılmamaktadır. Çıkan gazların sıcaklığı yüksek olduğundan bu tip sistemlerde ilave bir soğutma sistemine ihtiyaç duyulabilmektedir. Şekil 3.4'te aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcının yapısı görülmektedir [64].

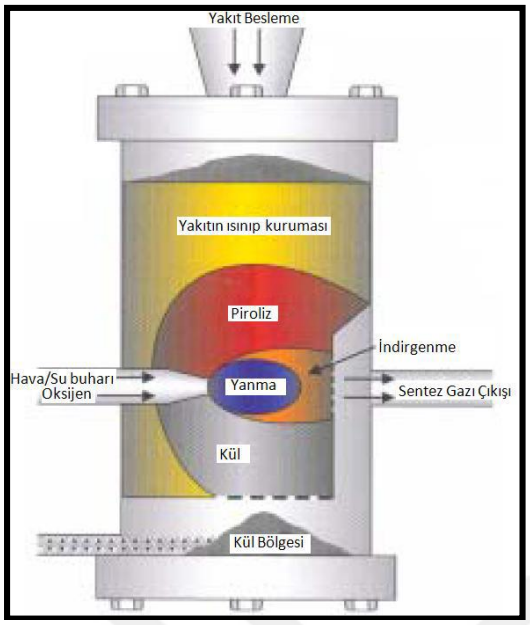


Şekil 3.4. Aşağı akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı

Bu tip gazlaştırıcıların en önemli avantajları, yüksek ısıl değerli ürün gazı oluşumu ve tozun ayarlanabilmesidir. Dezavantajı ise yüksek katran oluşuma neden olmasıdır. Genellikle küçük ve orta ölçekli tesislerde kullanılırlar.

Karşıt akışlı sabit yataklı gazlaştırıcılar

Karşıt akışlı sabit yataklı gazlaştırma sistemlerinde reaktörün üstünden beslenen yakıt aşağı doğru inerken gazlaştırıcı ortam olarak kullanılan gazlar reaktörün yanından beslenir. Elde edilen ürün gazı da yine aynı seviyeden diğer taraftan sistemden alınmaktadır. Yanma bölgesi bu iki bölgenin arasında kalan kısımda bulunur. Sistemde kül, reaktörün alt kısmından alınarak uzaklaştırılmaktadır. Nihai elde edilen ürün gazının içeriğinde istenmeyen katran ve tanecik miktarı yoğundur. Bu sebepten bu tip gazlaştırıcılar, katran ve nem miktarı düşük yakıtlar tercih edilmelidir. Şekil 3.5'de karşıt akışlı gazlaştırma sistemine ait akış şeması görülmektedir [64].



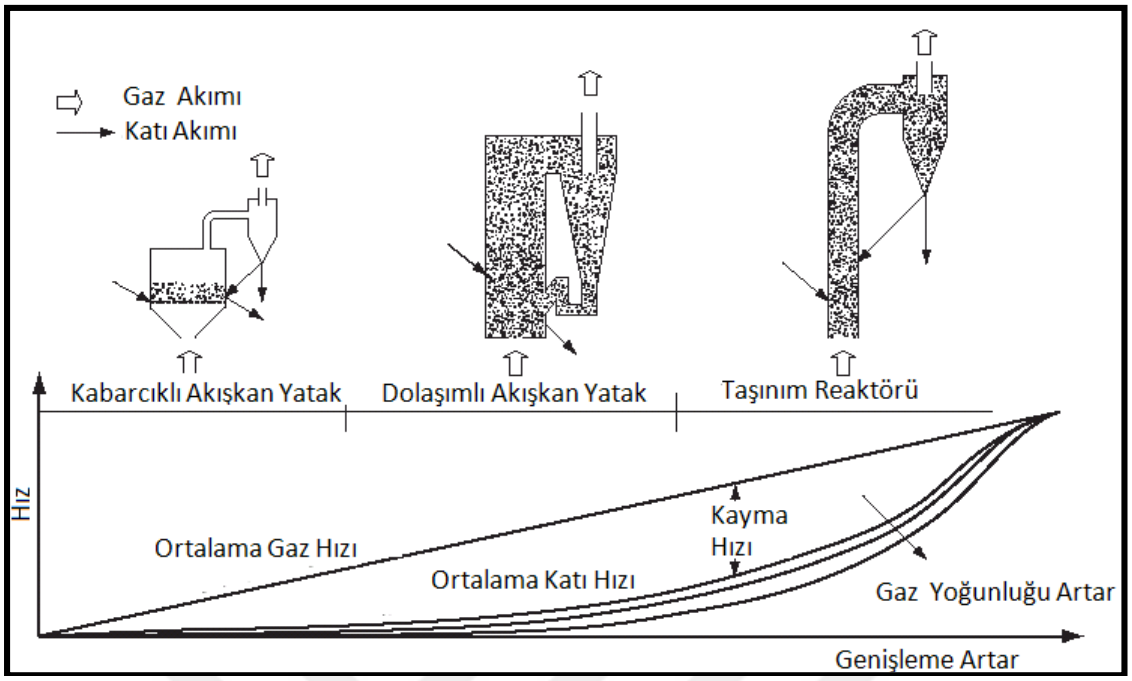
Şekil 3.5. Karşıt akışlı sabit yataklı gazlaştırıcı

Bu tip gazlaştırıcıların en önemli avantajları, tozun ayarlanabilmesidir. Dezavantajı ise düşük ısıl değerlikli ürün gazı oluşumu ve yüksek katran oluşuma neden olmasıdır. Genellikle küçük ve orta ölçekli tesislerde kullanılırlar.

Akışkan yataklı gazlaştırıcılar

Akışkan yataklı gazlaştırma sistemi Alman bilim adamı Fritz Winkler tarafından 1921 yılında bulunmuştur. Akışkan yataklı gazlaştırıcının keşfi ile hava kullanılarak yapılan gazlaştırma işlemi sonucu üretilen sentetik yakıtlar gaz motorlarında kullanılmıştır.

Akışkan yataklı gazlaştırma sistemlerinde uygun parçacık boyutuna getirilmiş yakıt, gazlaştırma ortamında akışkan hale getirilerek gazlaştırılmaktadır. Bu tip sistemler 0.5–5 mm aralığındaki kömür ve biyokütle parçacıklarının gazlaştırılması için uygundur. Yatak malzemesi olarak kum, kireç taşı ya da yakıtın kendi külü kullanılır. Kireç taşı eklenmesi durumunda sülfürün bir kısmının reaktör içerisinde tutulumu sağlanır. Biyokütlelerin gazlaştırılması sırasında silika kum, inert yatak malzemesi olarak kullanılmaktadır Akışkan yataklı reaktörler, yüksek ısı ve kütle transferi sayesinde oldukça iyi karışım olanağı sağlamakta ve reaktör boyunca homojen bir sıcaklık dağılımı elde edilmektedir. Şekil 3.6.'da çeşitli akışkan yatak biçimleri verilmiştir [64].



Şekil 3.6. Akışkan yatak biçimleri

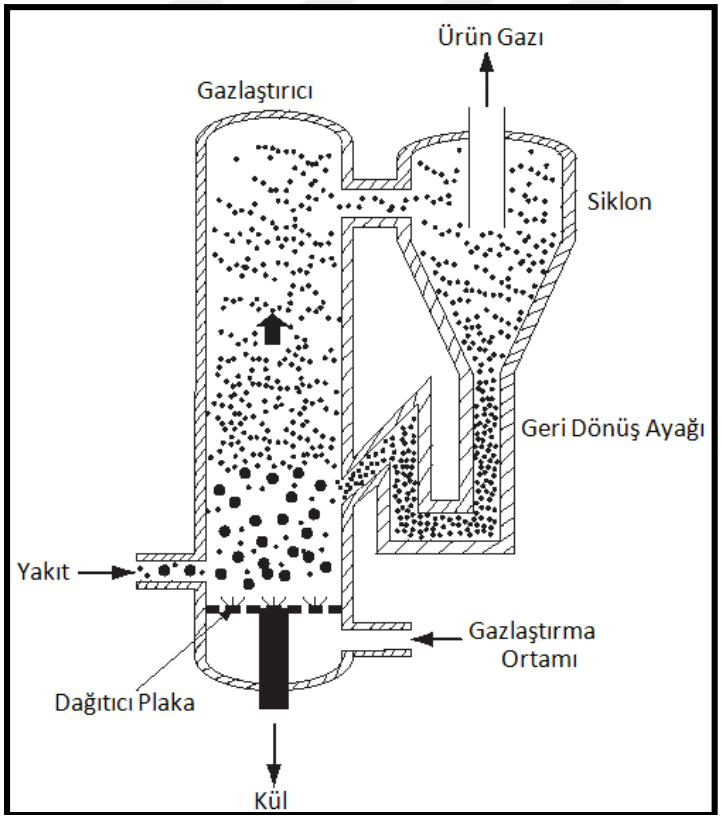
Reaktör işletilirken dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biri yatak sıcaklığının külün ergime sıcaklığının altında tutulmasıdır. Aksi takdirde kül ergiyerek cüruf oluşmasına ve buda yatağı tıkayarak akışkanlaşmayı bozabilmektedir. Buna yatak bağlaması da denilmektedir. Bundan dolayı akışkan yataklı sistemler daima kül ergime sıcaklığının altında çalıştırılmalıdır. Kömürle çalışan gazlaştırıcılarda bu değer 950 – 1100 ºC, biyokütle ile çalışan sistemlerde ise 800- 950 ºC mertebesindedir.

Akışkan yataklı sistemlerde reaktörün hidrodinamiği açısından, reaktöre verilecek gazlaştırıcının homojen olması ve reaktörde ölü bölgelerin oluşmaması son derece önemlidir. Ayrıca dağıtıcı plakalar hava, su buharı ya da oksijenin sisteme beslendiği kanala katı taneciklerin gitmesine de engel olmaktadır.

Bu sebeple gazlaştırma reaktörlerinde çeşitli tiplerde dağıtıcı plakalar kullanılmaktadır. Akışkan yataklı sistemler kendi içinde dolaşımlı akışkan yataklı sistemler ve kabarcıklı akışkan yataklı sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır

Dolaşımlı akışkan yataklı sistemler

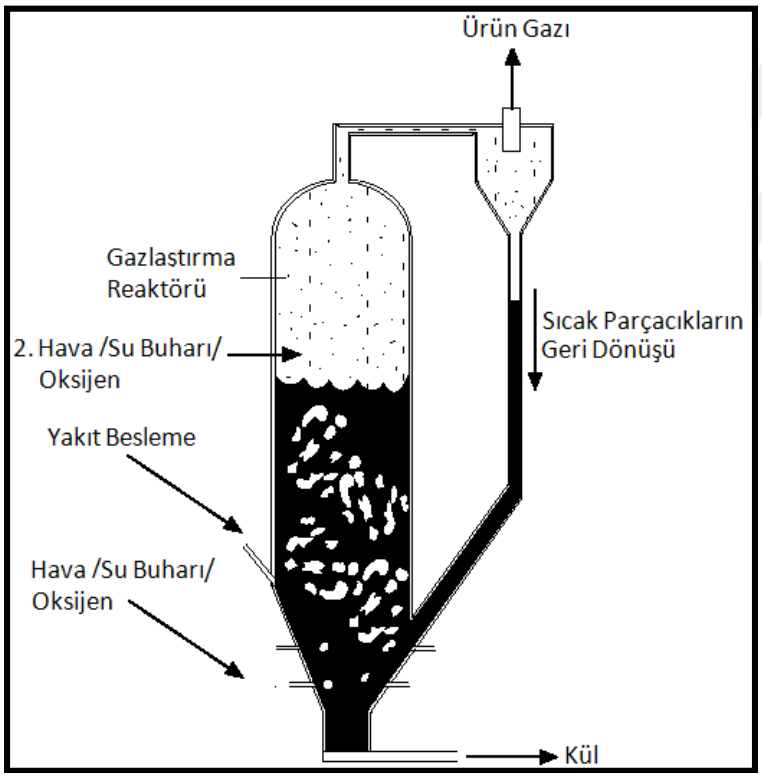
Dolaşımlı akışkan yataklı sistemlerde yakıt ve yatak malzemesi sıcak bir ortamda karışmaktadır. Bu tip sistemlerde yoğun katı - gaz karışımı oluşmasından dolayı reaktörün farklı bölgelerinde kuruma, piroliz, indirgenme ve oksidasyon reaksiyonları gerçekleşmektedir. Reaktöre verilen gazlaştırıcılar sisteme bir dağıtıcı plaka aracılığıyla verilmektedir. Böylelikle homojen bir karışım oluşması sağlanmaktadır. Dolaşımlı akışkan yataklı sistemlerde yatak malzemesi bütün reaktör boyunca yer aldığı için reaktör boyunca sıcaklık dağılımı homojen dağılım göstermektedir. Dolaşımlı akışkan yataklı sistemlerde gazlaştırıcı ortam hızı yüksek olduğu için beslenen yakıtın reaksiyona girme süresi kabarcıklı akışkan yataklı sistemlere göre daha kısadır. Bu durum reaksiyon veriminin daha düşük olmasına neden olabilmektedir. Bunu önlemek bu tip sistemlerde reaktöre daha küçük boyutta yakıt beslemesi yapılmalıdır. Sabit yataklı gazlaştırıcılara kıyasla hava/yakıt oranı rahatlıkla ayarlanabildiği için yatak sıcaklığı daha kolay bir biçimde kontrol edilebilmektedir. Şekil 3.7' de dolaşımlı akışkan yataklı gazlaştırma sistemine ait akış şeması verilmiştir [64].



Şekil 3.7. Lurgi dolaşımlı akışkan yataklı gazlaştırma sistemi

Kabarcıklı akışkan yataklı sistemler

Kabarcıklı akışkan yataklı sistemlerde, yatağa beslenen yakıtın akışkanlaşmaya başlaması için gazlaşma ortamının hızının belli bir seviyede olması gerekmektedir. Bu noktadaki hıza minimum akışkanlaşma hızı denilmektedir. Bu tip reaktörlerdeki akışkanlaşma hızı 2-3 m/s mertebesinde tutulmaktadır. Daha yüksek hızlara çıkıldığında yatak genişleyerek yatak malzemesinin reaktörden dışarı çıkıp siklonda birikmesine neden olur. Bu sebeple kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırıcılarda yüksek hızlara çıkmaktan sakınılmaktadır. Şekil 3.8'de kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırma sistemine ait akış şeması görülmektedir [65].

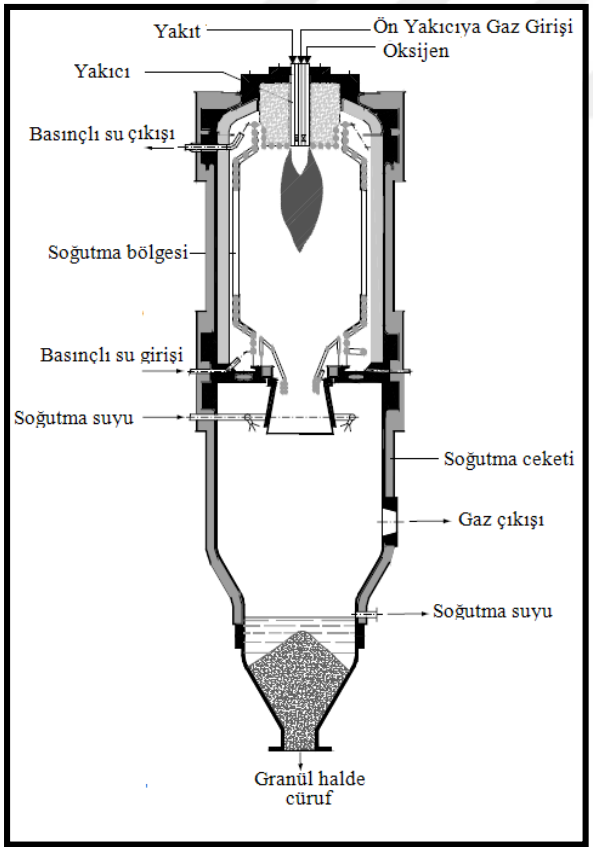


Şekil 3.8. Kabarcıklı akışkan yataklı gazlaştırma sistemi

Dolaşımlı ve kabarcıklı tipli gazlaştırıcıların en önemli avantajları, yüksek ısı ve kütle transferi olması, daha yüksek verim elde edilmesi ve yüksek ısıl değerli ürün gazı oluşumudur. Genellikle orta ölçekli tesislerde kullanılırlar.

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar

Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar genellikle kömürlerin gazlaştırılması işleminde tercih edilen gazlaştırıcılardır. Bu tip sistemlerde yatak sıcaklıkları 1000- 1600 ºC mertebesinde olduğundan yatak içerisindeki kül ergimiş halde sistemden uzaklaştırılmaktadır. Yüksek yatak sıcaklıklarından dolayı ürün gazında istenmeyen katran gibi maddelerin neredeyse tamamı parçalanmaktadır. Böylelikle katran içermeyen, temiz sentez gazı üretimi bu tip gazlaştırıcılarda gerçekleştirilebilmektedir. Karbon dönüşümü bu tip sistemlerde % 99 mertebesindedir. Başarılı şekilde işletmesi gerçekleştirilen 20 – 70 bar basınçtaki ticari boyutlardaki sürüklemeli akışlı gazlaştırıcıların çoğunluğu 1950'li yıllardan sonra kurulmuştur. Sürüklemeli akışlı gazlaştırıcılar daha çok yüksek enerjili kömürlerin gazlaştırılmasında ve entegre kombine çevrimli güç santrallerinde kullanılmaktadır. Kömür besleme sistemleri kuru kömür besleme ya da kömür su karışımı şeklinde olabilmektedir. Şekil 3.9' de Noell tipi sürüklemeli akışlı gazlaştırıcının akış şeması görülmektedir [64].



Şekil 3.9. Noell tipi sürüklemeli akışlı gazlaştırma sistemi

Bu tip gazlaştırıcıların en önemli avantajları, her tip kömürün gazlaştırılabilmesi, yüksek kapasiteli olmaları ve külün ergimesidir. Genellikle büyük ölçekli tesislerde kullanılırlar.

Bu tür gazlaştırıcıların yanı sıra plazma gazlaştırma sistemlerinden bahsetmek gerekir. Plazma gazlaştırma yöntemi daha çok evsel atıkların ve diğer katı atıkların gazlaştırılmasında kullanılan bir gazlaştırma yöntemidir. Bu tip sistemler plazma proliz adıyla da bilinmektedir. Sistemin temel elamanı plazma ateşleyicileridir. İki elektrod arasında oluşan yoğun elektrik arkı neticesinde yüksek sıcaklıklara ulaşılır. Beslenen atıklar yüksek sıcaklıklarda reaksiyona girerek gazlaştırma işlemi gerçekleşir. Reaktördeki yüksek sıcaklıklardan dolayı oluşan katranlı yapılar kırılmakta ve dioksin ve furan gibi gazlar parçalanmaktadır.

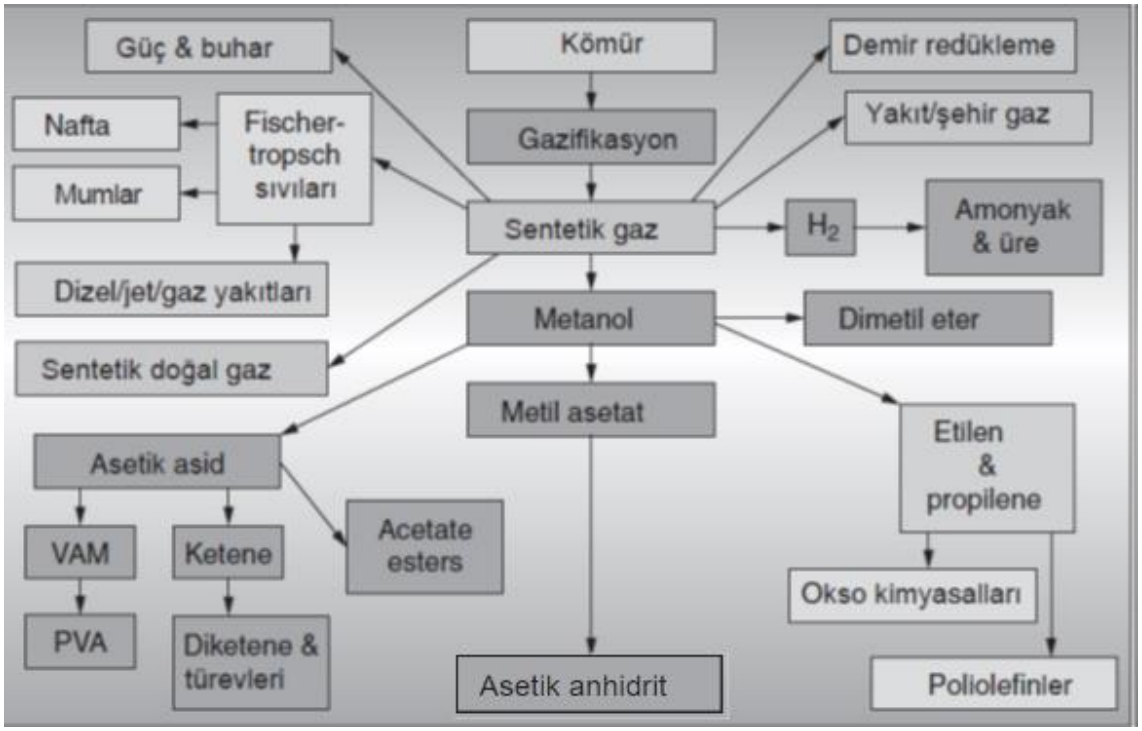
Şu ana kadar bahsi geçen gazlaştırma sistemleri için, Çizelge 3.2'de gazlaştırma reaktörlerinin işletme karakterlerinin karşılaştırılması yapılmıştır [64].

Çizelge 3.2. Gazlaştırma reaktörlerinin işletme karakterlerinin karşılaştırılması

Gazlaştırıcı Yatak Tipleri			
Parametre	Sabit Yataklı Gazlaştırıcılar	Akışkan Yataklı Gazlaştırıcılar	Sürüklemeli Akışlı Gazlaştırıcılar
Beslenen yakıtın tanecik boyutu	< 51 mm	< 6 mm	< 0.15 mm
Küçük taneciklere tolerans	Sınırlı	İyi	Çok iyi
Büyük taneciklere tolerans	Çok iyi	İyi	Zayıf
Gaz çıkış sıcaklığı	450 - 650 ºC	800 – 1000 ºC	> 1260 ºC
Yakıt tipi	Düşük değerlikli kömür	Düşük değerlikli kömür ve özellikle biyokütle	Her türlü kömür için uygundur fakat biyokütleler için uygun değildir.
Oksidant gerekliliği	Düşük	Ayarlanabilir	Yüksek
Reaksiyon bölgesi sıcaklıkları	1090 C	800 – 1000 ºC	> 1990 ºC
Buhar gereksinimi	Yüksek	Ayarlanabilir	Düşük
Üretilen kül tipi	Kuru	Kuru	Ergimiş
Soğuk gaz verimi	80 %	89.2%	80%
Kapasite	Küçük ölçekli	Orta ölçekli	Büyük ölçekli
Karşılan problemler	Katran oluşumu	Karbon dönüşümü	Sentez gazının soğutulması

3.2.5. Kömür gazlaştırma ürünleri

Kömürlerin gazlaştırılması neticesinde elde edilen gaz yakıtlar, gazlaştırılan kömürün cinsine, gazlaştırma prosesine ve gazlaştırıcı tipine ve gazlaştırma şartlarına bağlı olarak değişiklikler gösterir (Şekil 3.10). Bilhassa, elde edilen gaz ürününün bazı parçacıklar ve kükürt bileşenleri gibi kirleticilerden arındırılmış olması gerekir. Özellikle bu arındırmanın su gaz dönüşüm tepkimesi veya metanlaştırma süreçlerinden evvel yapılması gereklidir [69,70].



Şekil 3.10. Kömür gazlaştırma ürünleri

3.3. Düşük Kalorili Kömür Gazları

Kömür gazının havayla oksitlenme neticesinde üretilmesi sırasında oksijen havadan ayrılmaz ve sonuç olarak gaz ürünü her zaman düşük bir ısı içeriğine sahip olur (5,6 – 11,2 MJ/m^3). Bu tip gazlaştırma işlemi, bilhassa kömür madenciliğinin yapılamadığı ya da yapılması ekonomik açıdan uygun olmayan durumlarda kömürün bulunduğu yerde yani yer altında gazlaştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu sayede kömür madenciliği yapmaksızın kömürden enerji elde edilmektedir [71].

Düşük kalorili kömür gazlarının yüksek sıcaklıklarda, üretiminde birçok önemli kimyasal reaksiyon ve bir dizi yan reaksiyona rol almaktadır. Düşük kalorili kömür gazları, dört ana bileşenin yanı sıra düşük oranlarda diğer bazı bileşenleri de bünyelerinde barındırmaktadırlar. Beşinci ve marjinal olarak önemli bir bileşen ise metan gazıdır [71].
Düşük kalorili kömür gazlarının içeriğinde, hacimce yüzde 33'ten biraz daha az, yüzde 50'den biraz fazla miktarda azot bulunabilmekte ve öyle kolay bir biçimde gazdan ayrıştırılamamaktadır. İçerikte bulunan bu yüksek azot oranından dolayı bu tip gazlar düşük kalorili kömür gazı olarak nitelendirilmektedir. İçerikteki azot aynı zamanda düşük kalorili kömür gazlarının kimyasal sentez reaksiyonlarında kullanabilirliğini de kesinlikle sınırlar. Azot gibi yanmayan ve bünyede bulunan su buharı buharlaşma ile karbon dioksit ise bazı farklı kimyasal tepkimelerle bünyeden uzaklaştırılabilir [71].

Düşük kalorili kömür gazlarının içeriğinde yanabilen önemli bileşenler olarak hidrojen ve karbon monoksit yaklaşık olarak 2:3'ten 3:2'ye kadar değişiklik gösteren oranlarda bulunmaktadır. Düşük oranda da olsa içerikte bulunabilen metan gazının yakıt ısıl değerine katkısı söz konusudur. Besleme kömürün kükürt içeriğine bağlı olarak düşük kalorili kömür gazındaki miktarı değişen hidrojen sülfür küçük, önemli ve bir veya birden fazla işlem ile yakıttan uzaklaştırılması gereken bir bileşendir [72].

3.3.1. Jeneratör gazı

Jeneratör adı verilen büyük ocaklarda, kızgın kömür üzerine hava ve az miktarda su buharının verilmesiyle bileşimi % 12 H_2 , % 28 CO, % 0,5 CH_4 , %5 CO_2 ve % 54,5 N_2 olan jeneratör gazı (havagazı) meydana gelmektedir.

Jeneratör gazı üretimi için nadiren kok kullanılır, Daha ucuz olan taş ve linyit kömürleri tercih edilir. Jeneratör gazı üretimi dikey fırın şeklinde olan jeneratörlerde yapılmaktadır. Yakıtın cins ve şekline göre kullanılan jeneratörlerin, bilhassa ızgara kısmı farklılık göstermektedir. Jeneratörlerde kullanılan kömürün tanecik büyüklüğü çok önemlidir. Çünkü gazlaştırılacak madde ne kadar kaba ve tanelerinin birbiri ile olan mesafesi ne kadar fazla olursa, yığın yüksekliği o kadar fazla olacağından dolayı yakıt yatağının işlenmesi o derece zorlaşır. En uygun çalışma şekli elekten geçmiş, belirli tane büyüklüğünde kömürün kullanılmasıdır. Kömürdeki toz, gazlaşma yatağında tıkanıklıklar yapar ve istenmeyen

kanallar açarak cüruflaşmaya, o da yanma esnasında kömürün sık şişlenmesini sebep olur. Bu durum verimde düşme meydana getirir. Bir jeneratörde gazlaştırma verimi:

$$\gamma_G = \frac{V_G.H_{aG}}{M_y.H_{ay}} \quad (3.18)$$

Yukarıdaki denklemde, V_G elde edilen gazın Nm^3 cinsinden hacmi, M_y kullanılan yakıtın kg cinsinden miktarı, H_{aG} elde dilen gazın alt ısıl değeri ve H_{ay} ise kullanılan yakıtın alt ısıl değerini göstermektedir.

Üretilecek gazın cinsine, kullanılacağı yere, kömürün cinsine ve tane büyüklüğüne göre çeşitli tip jeneratörler imal edilmektedir [73].

3.3.2. Yüksek fırın gazı

Demir içerikli hammaddelerin kok ve kireçtaşı ile bir arada ergitilmesinde kullanılan ve kapasitelerine göre yükseklikleri 30-90 m arasında değişebilen, içerisinde gerçekleşen tepkimeler sonucunda oluşan C ve CO'in cevher redüklediği (indirgenme reaksiyonuna uğradığı), oluşan ısı ile demirin ergitildiği fırınlara "Yüksek Fırın" denir [74].

Yüksek Fırın'a üst bölümden metalürjik kok, dolomit, limonit, hematit, manyetit, kireç taşı, vüslit, siderit ilave edilir. Hava, körük vasıtasıyla 1000-1100 °C'ye ısıtılarak tüyerlerden fırın içine püskürtülür ve bu hava kok ile reaksiyona girerek koku yakar. Kok içindeki karbonların (C) yanması ile karbon monoksit gazı (CO) oluşur. Oluşan CO gazı demir cevherinin indirgenmesini sağlar. Bu indirgenme esnasında yan ürün olarak yüksek fırın gazı oluşur. Oluşan yüksek fırın gazı, boğaz bölgesinin üst kısmında toplanarak gaz temizleme tesislerine gönderilir. Temizlenen yüksek fırın gazı entegre tesiste yakıt olarak kullanılırken, ham demir, çelik üretimi için çelikhaneye gönderilir [74].

Yüksek fırın çalışırken şarj malzemeleri fırına, fırın içinde belli bir yüksekliği muhafaza edecek bir biçimde verilir. Fırın ergitme bölgesinde katı şarj malzemeleri ergiyip sıvı halde pik demir ve cüruf meydan gelirken bir yandan da şarj işlemi sürekli devam eder. Yüksek fırın tepkimeleri esas olarak yukarıdan aşağıya inen şarj malzemeleri ile aşağıdan yukarıya çıkan hava arasında olur. Çizelge 3.3'te görüleceği üzere 1 ton sıvı pik demir için yüksek

fırına yüklenen malzeme ve reaksiyonlar sonucunda ürünler detaylı bir biçimde örneklendirilmiştir.

Çizelge 3.3. Yüksek fırına şarj edilen malzemeler ve ürünler

1 ton sıvı pik demir için Yüksek fırına yüklenen malzeme

Malzeme miktarı (kg)		**Boyutu (mm)**
Kok kömürü	380	50
Sinter cevher	1160	20
Pelet cevher	190	12
Kireçtaşı	280	25

Fırın gazının kompozisyonu (hacimce)	
Toplam miktarı (m^3)	1533
CO	% 22
CO_2	% 22,8
H_2	% 4,2
Sıcaklık (°K)	430
Basınç (Mpa)	0,25

Fırından alınan	
Sıvı pik demir sıc. (°K)	1800
Curuf/pik demir oranı	0,30
Pik demirin kompozisyonu(%ag.)	
C	4,50
Si	0,39
Mn	0,27
P	0,10
S	0,03
Curufun kimyasal kom (%ag.)	
SiO_2	33,8
CaO	45
Al_2O_3	14,3
MgO	6,5
MnO	0,26
S	0,96

Yüksek fırın gazı içeriği kullanılan malzeme cinsine ve miktarına göre değişiklik gösterir. İçeriğinde yanmayan bileşenler olarak ortalama %47- 60 civarında azot ve % 17-25 oranında CO_2 bulunduğundan dolayı oldukça düşük bir kalorifik değere (3.5 MJ/m³) sahiptir. Geriye kalan ve yanan bileşenler olarak ise, düşük kalorifik değeri olan karbon monoksit (% 19-25) ve az bir oranda hidrojen (% 2 – 9,6) gazıdır [75].

Çizelge 3.4. Ortalama yüksek fırın gazı içeriği

Kimyasal ad	Kimyasal formül	CAS numarası	EC numarası	Yüzde Hacim
Azot	N2	7727-37-9	231-783-9	47,0-60,0
Karbonmonoksit	CO	630-08-0	211-128-3	19,0-25,0
Karbon dioksit	CO2	124-38-9	204-696-9	17,0-25,0
Hidrojen	H2	1333-74-0	215-605-7	2,0-9,6

Yüksek fırın gazının özellikleri

Yüksek fırın gazı neredeyse renksiz bir gazdır (hafif beyazımsı) ve normalde kokusuzdur. Bununla birlikte, hafif bir kükürt kokusu duyulabilir. Kalorifik değeri, 650 ila 900 kcal/ m^3

aralığında olan düşük kalorifik değerli bir gaz yakıttır. Kalorifik değerini esas olarak yüksek fırında kullanılan kok oranı belirler.
Yüksek fırın gazı yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Standart sıcaklık ve basınçta 1250 kg / m^3 civarındadır. Bu yoğunluk, tüm gaz halindeki yakıtlar içinde en yüksek olan değerdir. Yoğunluğu, havanın yoğunluğundan daha yüksek olduğu için, bir sızıntı halinde en altta yer alır.

Yüksek fırın gazı, teorik olarak 1455 ^{0}C civarında düşük alev sıcaklığına sahiptir. Bunun yanı sıra diğer gaz yakıtlara göre en düşük alev yayılım oranına sahiptir. Yüksek fırın gazının otomatik alevlenme noktası yaklaşık 630 ^{0}C dir.

Normal sıcaklık ve basınçtaki yüksek fırın gazının alt patlama limiti, bir hava-gaz karışımına göre % 27 daha düşükken, üst patlama limiti ise % 75 üst daha yüksektir. Yüksek fırın gazı yanıcıdır ve havayla patlayıcı karışımlar oluşturabilir ve statik bir şarjla kolaylıkla tutuşabilir. Ayrıca, normal depolama ve taşıma koşullarında kararlı bir kimyasal kararlılığa sahiptir [75].

4. DENEY DÜZENEĞİ

4.1. Deneysel Yöntem

Deneysel çalışma kapsamında farklı ısıl değere sahip bu jeneratör ve yüksek fırın gazının yakılmasında, 10 kW ısıl güç ve 0.83 eşdeğerlilik oranın kullanılmıştır. Deneylerde yanma odası boyunca farklı eksenel ve radyal mesafelerde sıcaklık ve emisyon ölçümleri (NO_X, CO, CO_2) gerçekleştirilmiştir. Yanma odası üzerinde, ilki yanma odası girişinden 10 cm yükseklikte olmak üzere 20 cm aralıklar yerleştirilen 5 adet ölçüm noktası (10, 30, 50, 70 ve 90 cm) bulunmaktadır. Bu ölçüm noktaları sayesinde, yanma odası içerisindeki eksenel ve radyal yöndeki sıcaklık ve emisyon değerleri ısıl çiftler aracılığıyla alınmış ve kömür gazlarının yanma karakteristikleri belirlenmiştir. Deney sisteminin genel görünümü Resim 4.1'de görülmektedir.

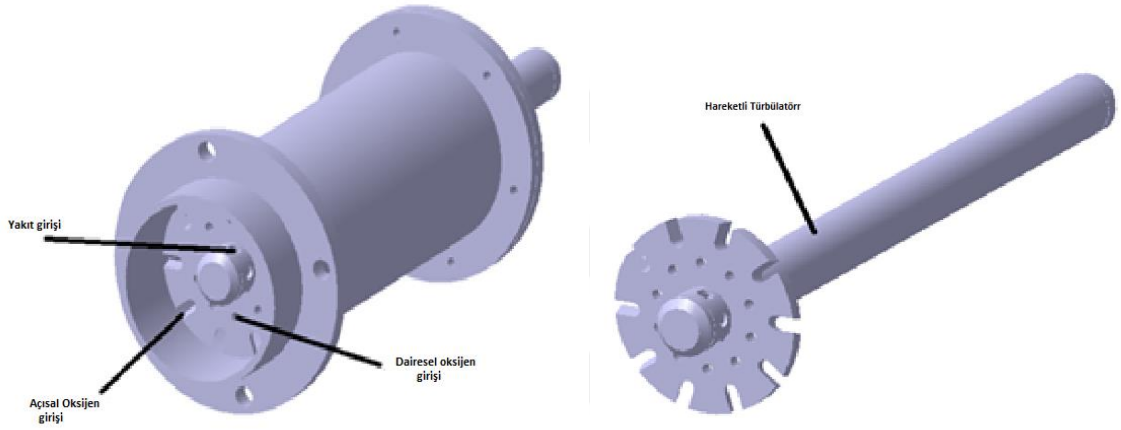


Resim 4.1. Deney düzeneğinin genel görünümü

4.2. Deney Düzeneği ve Kullanılan Ekipmanlar

Farklı ısıl değerlere sahip sentetik yakıtlar (yüksek fırın gazı ve Jeneratör gazı) Tübitak-1005 projesi [4] kapsamında imal edilen yakıcı ve yanma odası kullanılarak ön karışımsız (difüzyon) kararlı alev şartlarında, saf oksijenle yakılmaları sağlanmış ve yanma odası boyunca farklı eksenel ve radyal uzaklıklarda sıcaklık ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyde kullanılan yakıcı ve hareketli türbülatör Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Kullanılan yakıcı difüzyon alevli bir yakıcı olup, oksijen ve kömür gazları içinde koaksiyal bir biçimde akmaktadır. Yakıcıdan yanma odasına doğru iki farklı oksijen girişi mevcuttur. İlk oksijen girişi, teğetsel hız alevini dengelemek için 15 derecelik açıya sahipken; ikincisi ise dairesel girişlerden oluşmaktadır. Yakıcı üzerinde 10 açısal ve 9 dairesel oksijen girişi bulunmaktadır. Daha iyi bir yakıt / oksijen karışımı elde etmek amacıyla yanma odasına yakıt, radyal biçimde giriş yapabilecek şekilde tasarlanmıştır.



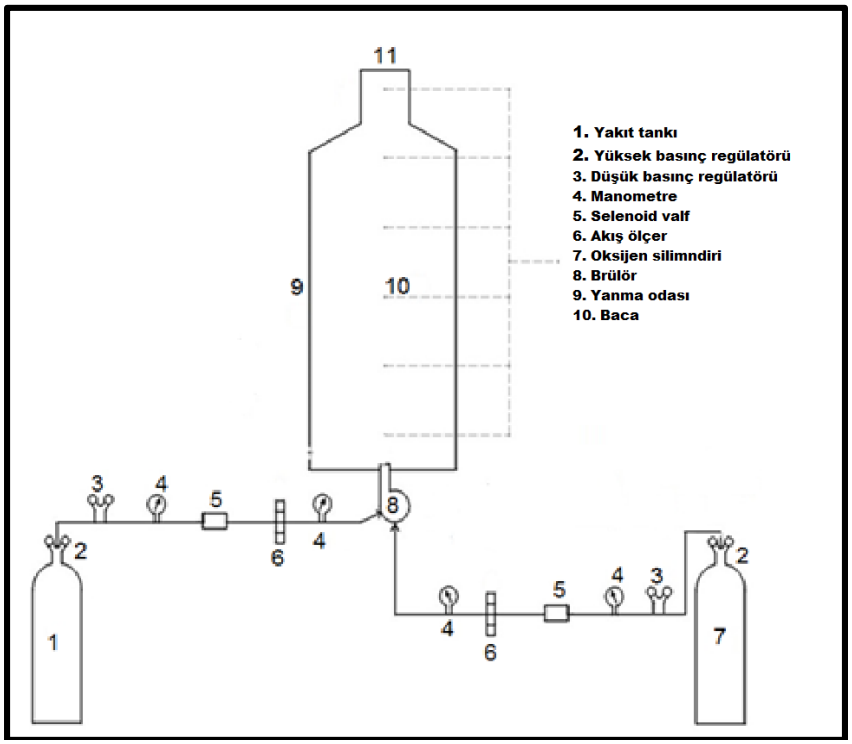
Şekil 4.1. Mevcut yakıcı ve hareketli türbülatör

Deney düzeneğinde kömür gazlarını yakmakta kullanılan yakıcılar, düşük kalorili kömür gazlarının ısıl değerleri ve yoğunlukları dikkate alınarak tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan kömür gazlarına ilişkin temel özellikler Çizelge-4.1 de gösterilmiştir. Çizelge-4.1'den görüleceği üzere düşük kalorili kömür gazları yüksek oranda yanıcı olmayan bileşen olarak Azot gazını ve düşük oranda yanıcı bileşenler olarak CO ve CO_2 gazları içermektedirler.

Çizelge 4.1. Kömür gazlarının özellikleri [76]

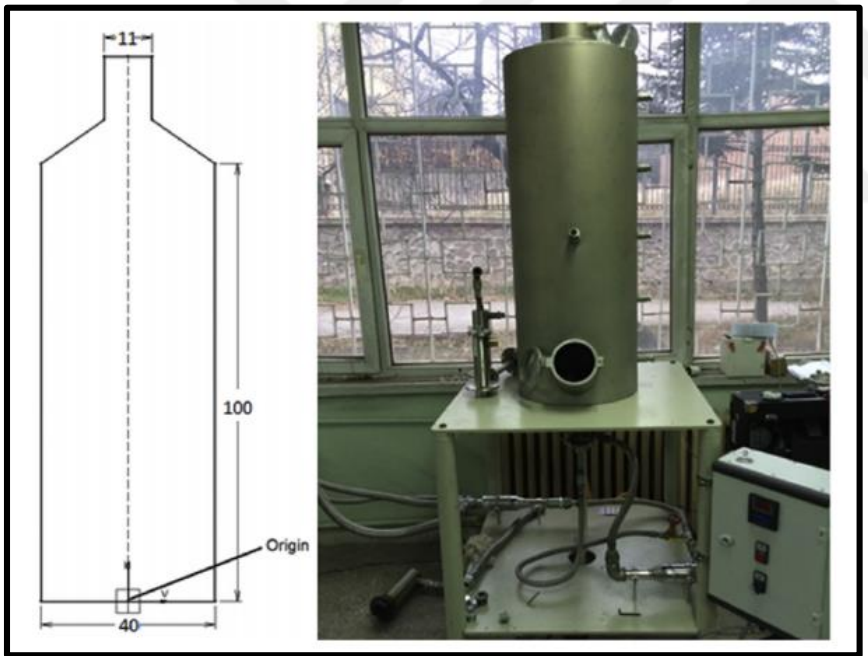
	H_2 (%)	CH_4 (%)	CO (%)	CO_2 (%)	N_2 (%)	LHV ($kcal/m^3$)	Yoğunluk (kg/m^3)
Jeneratör Gazı (kömür gazı)	*12*	*0,5*	*28*	*5*	*54,5*	*1124*	*1,070*
Yüksek Fırın Gazı (kömür	*2*	*-*	*30*	*8*	*60*	*900*	*1,200*

Çizelge 4.1'de gösterildiği gibi istenilen yüzdelerde hazırlanan sentez gazlarını ve saf oksijeni mevcut yakıcıya aktarmak için yanma sistemine yüksek basınçlı yakıt ve oksijen tankı entegre edilmiştir. Ayrıca sistem, düşük kalorili kömür gazı hattı ile oksijen gazı hattı olmak üzere iki gaz hattından oluşmaktadır. Bu hatlar üzerinde regülâtörler, manometreler, selenoid valflar ve şamandıra tipi debimetreler bulunmaktadır. Regülâtörler, gaz ve oksijen basıncını düzenlemek için sisteme yerleştirilmiştir. Deney esnasında gaz ve oksijen basıncı, düzenli olarak manometreler vasıtasıyla izlenmiş ve kontrol edilmiştir. Yakıcı önündeki alev mevcut olmadığında, gaz akışını kesmek için selenoid valfler sisteme eklenmiştir. Ayrıca, yanma sisteminde istenilen gaz ve oksijen akış hızlarını elde etmek için tüm hatlarda yüzer tip akış ölçerler sisteme dâhil edilmiştir.



Şekil 4.2. Yanma sisteminin yerleşimi

Yanma deneylerinin gerçekleştirildiği yanma odasına ait resim ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Resim 4.2'de gösterilen yanma odasının boyutları uzunluk olarak 100 cm ve çap olarak da 40 cm'dir. Yanma odası, paslanmaz çelikten imal edilmiştir Yanma odası içerisindeki alevin yanma deneyleri sırasında gözlenebilmesi için, yanma odası üzerine yüksek sıcaklıklara dayanabilen ve normal camlara göre yaklaşık 5 kat daha dayanıklı olan temperli camdan (güçlendirilmiş cam ya da güvenlik camı) yapılmış bir adet gözetleme camı yerleştirilmiştir. Ayrıca, Resim 4.2'den de görülebileceği üzere yanma odası üzerinde, ilki yanma odası girişinden 10 cm yükseklikte olmak üzere 20 cm aralıklar yerleştirilen 5 adet ölçüm noktası (10,30,50,70 ve 90 cm) bulunmaktadır. Bu ölçüm noktaları sayesinde, yanma odası içerisindeki eksenel ve radyal yöndeki sıcaklık ve emisyon değerleri ısıl çiftler aracılığıyla alınmış ve kömür gazlarının yanma karakteristikleri belirlenmiştir.



Resim 4.2. Mevcut yanma odasının genel görünüşü

Resim 4.3'te, deneysel çalışmada kullanılan düşük kalorili kömür gazlarının yanma odası boyunca eksenel ve radyal yönlerden emisyon parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan NOVA plus RCU tipi baca gazı analizör cihazı gösterilmiştir. Bu cihaz, 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.



Resim 4.3. Taşınabilir baca gazı analizörü

Resim 4.4'te gösterilen seramik uçlu gaz probu, Resim 4.4'te gösterilen taşınabilir baca gazı analizörüne entegre edilerek, alev bölgesinde emisyon ölçümleri yapabilmektedir [4].



Resim 4.4. Seramik uçlu gaz probu

Yanma odası boyunca sıcaklık değerlerini ölçmek için, Resim 4.5'te gösterilen ve 1700ºC'ye kadar yüksek sıcaklıklara dayanabilen, ± % 0,3 hassasiyetle ölçüm yapabilen ve çapı 5 mm olan seramik kaplı R tipi sıcaklık ölçer kullanılmıştır. Bu sıcaklık ölçer sayesinde düşük kalorili kömür gazlarının hem alev sıcaklıkları hem de yanma odası boyunca eksenel ve radyal yöndeki sıcaklık seviyeleri ölçülmüştür.



Resim 4.5. Seramik uçlu sıcaklık ölçer

Deneysel çalışmada kullanılan ölçüm ekipmanlarının doğruluğu Çizelge-4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneysel ölçüm ekipmanlarının doğruluk dereceleri

Akış metre	R-tipi sıcaklık ölçer	Baca gazı analizörü
1 %	± 2 ºC	O2, ± 0.2 (%) CO, ± 10 ppm NO and NO2, ± 5 ppm SO_2, ± 10 ppm CO_2, ± 0.3 (%)

4.2.1. Sıcaklık ölçümlerinin düzeltilmesi

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri, yanma odasındaki yüksek sıcaklıklar nedeniyle meydana gelen ışınımla ısı transferinden dolayı gerçek sıcaklık değerlerini göstermemektedir. Bundan dolayı ölçülen sıcaklık değerlerinin bu kayıpları da göz önüne alacak biçimde düzeltilmesi gerekmektedir. Bu düzeltmeler ve iyileştirmelerle ilgili literatürde yapılan çalışmalar mevcuttur [33, 77,78].

Isıl çiftler, çevre sıcaklığının sabit olduğu varsayımı altında, ısıl ve kimyasal dengede bulunan yüksek sıcaklıktaki gaz akımına yaklaşık olarak dikey bir biçimde yerleştirildiklerinde, gazdan tele taşınım ve ışınımla olan toplam ısı transferi, telden koruyucu tabakaya (seramik) iletimle ve duvara ışınımla olan ısı transferi toplamına eşittir [33].

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (4.1)$$

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 göstermektedir.

Gazın ışınım yayınırlık katsayısı çok küçük olduğundan gazdan tele ışınımla olan ısı transferi (Q_2) ihmal edilebilir. Ayrıca, telden koruyucu tabakaya iletimle olan ısı kaybı, telin boyutları ve ısıl iletkenliği ile koruyucu tabakanın yapısına bağlıdır. Bundan dolayı, ısıl çiftler için bu ısı kayıpları, ısıl çiftin uç kısmı ile direkt ilgili olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda, ısıl denge eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q_1 = Q_4 \quad (4.2)$$

Gazdan tele taşınımla olan ısı kayıpları (Q_1) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q_1 = hA(T_g - T) \quad (4.3)$$

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

Telden, yanma odasının duvarlarına ışınımla ısı kaybı (Q_4) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q_4 = \sigma A\left(\varepsilon T^4 - a{T_W}^4\right) \quad (4.4)$$

Burada, σ Stefan-Boltzman sabitini, ε telin yayma katsayısını, a telin yutma katsayısını, T_W, duvar sıcaklığını (K) göstermektedir. Kirchoff kanununa göre, ısıl dengedeki bir cismin yayma ve yutma katsayısı aynıdır. Bundan dolayı denklem (4.4) aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Q_4 = \sigma A\varepsilon\left(T^4 - {T_W}^4\right) \quad (4.5)$$

$Q_1 = Q_4$ eşitliğindeki ifadeler yazıldığında,

$$hA\left(T_g - T\right) = \sigma A\varepsilon\left(T^4 - {T_W}^4\right) \quad (4.6)$$

elde edilir. Yukarıdaki denklem (4.6) yeniden düzenlenecek olursa,

$$T_g = \frac{\sigma \varepsilon (T^4 - T_W{}^4)}{h} + T \tag{4.7}$$

eşitliği elde edilir. Eşitliğin sağ tarafındaki birinci terim, ısı kayıplarından dolayı azalan ısıl çift sıcaklığını telafi etmek için bir düzeltme faktörünü göstermektedir.

Bu çalışmanın deneysel kısmında yapılan sıcaklık ölçümlerin düzeltilmesi için yukarıda verilen eşitlik (4.7) kullanılmıştır. Eşitlik (4.7)'de, Stefan-Boltzman sabiti $\sigma = 5{,}67x10^{-8}$ ve ısıl çiftlerin yayma katsayısı $\varepsilon = 0{,}22$ [79] şeklindedir. T (K) deneyler esnasında ölçülen hatalı değeri, T_W (K) deneyler esnasında ölçülen duvar sıcaklığını göstermektedir. h değeri ise, bir silindir etrafındaki akış dikkate alınarak, Nu sayısına [80] bağlı olarak ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Nu = 0{,}8.(Re)^{0{,}25} \tag{4.8}$$

$$Nu = \frac{h.D}{k} \tag{4.9}$$

$$Re = \frac{U.D}{v} \tag{4.10}$$

Eşitlik (4.10)'da verilen Reynolds sayısının hesaplanmasında kullanılan hız değeri, teorik olarak hesaplanan yakıt hızlarıdır. Hidrolik çap (D) değeri de, ısıl çiftin tel çapını göstermektedir (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 (4.9)'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 [4].

4.2.2. Jeneratör ve yüksek fırın gazlarının debimetre kalibrasyonu

Oksi-yanma deneylerinde kullanılacak olan jeneratör ve yüksek fırın gazlarının gerekli olan yakıt miktarlarını debimetrelerden ayarlayabilmek için her iki yakıt için ihtiyaç duyulan yakıt miktarlarının deney gerçekleştirilmeden önce hesaplanması gerekir. (Q),

ihtiyaç duyulan yakıt miktarı, (LHV) yakıt alt ısıl değeri olmak üzere hesaplamalar aşağıdaki eşitlik kullanılarak yapılmıştır [4].

$$Q\left(\frac{Nm^3}{h}\right) = \frac{Isıl\ Güç}{LHV\left(\frac{kJ}{Nm^3}\right)x\frac{1(h)}{3600(s)}} \quad (4.11)$$

Bu denklemde, LHV yakıtların alt ısıl değerini, Q hacimsel akış miktarını göstermektedir. Deney sisteminde düşük kalorili kömür gazları için önceden tasarlanmış özel debimetreler bulunmadığından dolayı hava debimetreleri kullanılmıştır. Bundan dolayı, gaz hatlarında bulunan debimetreler, jeneratör ve yüksek fırın gazının yoğunluğuna göre kalibre edilmiş ve deneyler esnasında okunan değerlerin, aşağıdaki eşitlik sayesinde bulunan değerler olmasına dikkat edilmiştir [4]:

$$Q_{çalışma\ akışkanı} = k\ x\ Q_{kalibrasyon\ akışkanı} \quad (4.12)$$

$$k = \sqrt{\frac{Hava\ yoğunluğu}{düşük\ kalorili\ kömür\ gazı\ yoğunluğu}} \quad (4.13)$$

Eşitlik 5.13'te çalışma akışkanımız hava olmasından dolayı pay kısmına hava yoğunluğu ve debimetre kalibrasyon akışkanımız ise düşük kalorili kömür gazları olduğu için payda kısmına ise jeneratör ve yüksek fırın gazının yoğunluğu yazılmıştır. K ise dönüşüm faktörünü göstermektedir.

Düşük kalorili jeneratör gazı kullanılarak 10 kW ısıl güç elde etmek için (LHV jeneratör gazı = 1124 kcal/Nm^3) gerekli olan jeneratör gazı miktarı 7,65 m^3/h dir. Ancak, bu değerin elde edilebilmesi için yakıt debimetreden okunması gereken değer (20°C'de ρ_{hava} = 1,204 kg/m^3 ve $\rho_{generatör\ gazı}$ = 1,0728 kg/m^3) yaklaşık olarak 7,22 m^3/h'tir. Benzer bir biçimde yüksek fırın gazı kullanılarak 10 kW ısıl güç elde etmek için (LHV jeneratör gazı = 900 kcal/Nm^3) gerekli olan yüksek fırın gazı miktarı 9,55 m^3/h dir. Ancak, bu değerin elde edilebilmesi için yakıt debimetreden okunması gereken değer (20°C'de ρ_{hava} = 1,204 kg/m^3 ve $\rho_{yüksek\ fırın\ gazı}$ = 1,34 kg/m^3) yaklaşık olarak 9,54 m^3/h'tir.

Deneyler yapılırken de düşük kalorili jeneratör ve yüksek fırın gazları için bu değerler 10 kW ısıl güçte ve ∅ = 0,83 eşdeğerlilik oranında hesaplanmış ve debimetrelerden hesaplanan değerler okunmuştur.

5. YANMANIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) MODELLEMESİ

5.1. Giriş

Deneyleri yapılan jeneratör ve yüksek fırın gazları için yanma davranışları hem mevcut yakıcı ve hem de saf oksijenle yakmaya uygun olarak modifiye edilen oksi-yakıcı kullanarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Modeli ile sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, sıvı akışı, ısı transferi ve kimyasal reaksiyonlar gibi ilişkili olayları modellemek için kullanılan bilgisayar tabanlı bir simülasyon programıdır. Çok güçlü bir teknik altyapıya sahip olmasından dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Makine, inşaat, gemi inşaat, uçak-uzay, gıda, elektrik, otomotiv ve daha birçok alanda HAD programlarından faydalanılmaktadır [81].

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesi, çalışılan kontrol hacmi içerisinde temel korunum denklemlerinin çözülmesi ve çalışılan akış alanının sayısal simülasyonunun yapılması işlemlerini kapsamaktadır. Öncelikle akış alanı için gerekli tüm önemli faktörleri (geometri, sınır şartları, akışkanın fiziksel özellikleri, türbülans vb.) içeren bir HAD modeli gerekmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmalara göre daha hızlı ve ekonomik olan HAD modelleme sayısal tahminlerinin, gerçekleştirilen deneysel sonuçlarla da uyum içerisinde olması beklenmektedir [4].

Gaz yakıcıların HAD modellemesi, yanma işleminin ve akış alanının (özellikle yakıcı bölgesi) karmaşıklığından dolayı, araştırmacılar ve tasarımcılar için ciddi bir şekilde ilgi odağı olmaya devam etmektedir. Bu çalışma kapsamında jeneratör ve yüksek fırın gazlarının mevcut ve modifiye edilmiş yakıcı için (oksi-yakıcı) oksi-yanma koşullarında yanmanın sayısal modellemesi gerçekleştirilmiş, sıcaklık ve emisyon dağılım tahminleri gerçekleştirilmiştir [82].

Düşük kalorili kömür gazları için, türbülans ve yanma gibi eşitliklerin yanı sıra kütlenin, momentumun ve enerjinin korunumu eşitlikleri çözülmüştür. Çalışma kapsamında,

jeneratör ve yüksek fırın gazları için standart k-Ɛ türbülans modeli kullanıldığından dolayı türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisinin dağılım oran ($\mathcal{E}$) eşitlikleri de ayrıca çözülmüştür. Karışım yakıtların, ön-karışımsız yanma şartlarında the mixture fraction/PDF modeli daha iyi sonuçlar verdiği için yanma modeli olarak tercih edilmiştir [4].

5.2. Temel Denklemler

Bir akışkanın akışı için geliştirilen korunum denklemleri, fiziğin korunum kanunlarının matematiksel olarak ifade edilmesini temsil etmektedir. Bu denklemlerde; Akışkanın kütlesinin korunduğu, momentum değişim oranının akışkan parçacık üzerindeki kuvvetlerin toplamına eşit olduğu (Newton'un ikinci yasası) ve enerji değişim oranının da ısı ilave oranı ile akışkan parçacık üzerine yapılan işin toplamına eşit olduğu varsayılmaktadır (termodinamiğin birinci kanunu).

Üç boyutlu kütle korunumu

Yukarıdaki varsayımlar neticesinde akışkan parçacığı için üç boyutlu kütle dengesi aşağıdaki yazılabilir.

Akışkan parçacığın kütle artış oranı = akışkan parçacığa olan kütle akışının net oranı (5.1)

Akışkan parçacığındaki kütle artış oranı;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \partial x \partial y \partial x) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \partial x \partial y \partial x \qquad (5.2)$$

Eşitliğin sol tarafı $\partial x \partial y \partial x$ bölündüğünde eşistlik 4.3 elde edilir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \qquad (5.3)$$

Kütle korunumunun daha kompakt vektör gösterimi şekli şöyledir [81]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + div(\rho u) = 0 \qquad (5.4)$$

Eşitlik 5.4, kararsız, üç boyutlu kütlenin korunumu veya zamana bağlı sıkıştırılabilir bir noktadaki akışkanın süreklilik denklemini temsil eder. Bu eşitlikteki ilk ifade, yoğunluğun zamana bağlı olarak değişimini ifade eder. Konvektif terim diye nitelendirilen ikinci terim, akışkan elemanının sınırları boyunca geçen net kütle akışını tanımlar. Bu çalışmada yapılan modellemeler zamandan bağımsız olarak çözüldüğü için ilk ifade sıfır olmaktadır [81].

Üç boyutlu momentum korunumu

Newton'un ikinci yasası, bir akışkan parçacığının momentum değişim oranının, parçacık üzerindeki kuvvetlerin toplamına eşit olduğunu belirtir. Buna göre üç boyutlu bir akışkan için x, y ve z yönlerindeki momentum eşitlikleri aşağıdaki yazılabilir [81]:

Kaynaklara bağlı x momentum artış oranı

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p+\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \tag{5.5}$$

momentum denkleminin y-bileşeni

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p+\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \tag{5.6}$$

momentum denkleminin z-bileşeni

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p+\tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \tag{5.7}$$

Üç boyutlu enerji korunumu

Enerji korunum denklemi, enerji değişim oranının ısı ilave oranı ile akışkan parçacık üzerine yapılan işin toplamına eşit olduğunu söyleyen termodinamiğin birinci yasasından türetilmiştir [67]. Enerjinin korunumu eşitliği, statik entalpinin korunumu açısından çözülmüştür. Basınç ve dış kuvvetlerin neden olduğu türlerin difüzyonunun ihmal edildiği varsayıldığında, enerji denklemi de aşağıdaki gibi ifade edilebilir [33]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}\sum_{j'} h_{j'}J_{j'}+\frac{\partial p}{\partial t}+u_i\frac{\partial p}{\partial x_i}+\tau_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+S_h \quad (5.8)$$

Denklem 5.8'de T alev sıcaklığını, 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. Ayrıca statik entalpiyi gösteren h aşağıdaki gibi formüle edilmektedir [33].

$h=\sum_i\ m_i h_i$ ve

Buradaki h_i i türünün özgül entalpisini, m_i i türünün kütle kesrini göstermektedir.

5.3. 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 denklem aşağıdaki gibi tanımlanır [33]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_i m_j\right)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_{m_j}\frac{\partial m_j}{\partial x_i}\right)-\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\overline{u'_i m'_j}\right)+R_j+S_j \quad (5.9)$$

Denklem 5.9'da, R_j, kimyasal reaksiyon ile oluşan veya bozulan kimyasal tür kütle oranını (gaz fazında), S_j, kimyasal reaksiyon ile oluşma oranını (dağınık fazda) ve Γ_{m_j} laminer değiştirme katsayısını göstermektedir [33].

5.4. Yakıcılarda Türbülanslı Akışın Modellenmesi

Türbülanslı akışta birbirini izleyen birçok karmaşık olaylar serisi meydana gelmektedir ve akışın davranışı gelişigüzel ve oldukça karışıktır. Türbülanslı akışlarda hız dâhil akışın tüm özellikleri rastgele ve karmaşık özellik gösterir. Bundan dolayı, türbülanslı akışlarda bir noktadaki hız, ortalama (zaman ortalama) ve değişen bileşeninin toplamı olarak ($u_i = \bar{u}_i + u'_i$) dikkate alınmaktadır [33].

Bu çalışmanın sayısal yanma analizinde FLUENT programındaki yer alan k-ε RNG, k-ε Realizable ve k-ε Standart türbülans modelleri arasından k-ε standart modeli türbülans modeli kullanılmıştır.

Standart k-ε model, yarı deneysel bir modeldir ve jet akışları kanal akışları gibi düzlemsel kayma tabakalı türbülans akışlarını modellemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Reynolds Stress Model ise karmaşık bir modeldir. Bu model ayrıştırıcılar, swirl sayısının 1'den büyük yada eşit olduğu türbülatörlü yakıcılar gibi cihazların modellemesinde daha iyi doğru sonuçlar vermektedir [83]. k-ε standart modelinin türbülans modeli olarak seçim sebepleri bölüm 6.4.1'de detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

5.4.1. Standard k-Ɛ türbülans modeli

Standart k-ε türbülans modeli eddy-viskozite modeli olarak da bilinmektedir. Reynolds gerilmelerinin, ortalama hız gradyanları ile orantılı olduğu varsayılır. Bu Boussinesq hipotezi olarak bilinir ve gerilmeler aşağıdaki gibi gösterilir [33];

$$-\rho\overline{u_i'u_j'} = \mu_t\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right]-\rho\frac{2}{3}k\delta_{ij} \tag{5.10}$$

Denklem 5.10'da μ_t türbülans viskozitesini, δ_{ij} kroneker delta tensörünü, u_i ve u_j ortalama hızları, u_i' ve u_j' değişen hızları ve k ise türbülans kinetik enerji $\left(\frac{1}{2}\sum_i \overline{u_i'^2}\right)$' yi göstermektedir [33].

Türbülans girdap vizkozitesi laminar akışta moleküler viskoziteden farklıdır fakat laminar akışlarda moleküler viskozite ile aynı rolü oynar ve moleküler viskozite yerine efektif viskozite (μ_{eff}) geçer.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{5.11}$$

Türbülans viskozitesinin (μ_t), türbülans hız ölçeği ve uzunluk ölçeği ile orantılı olduğu varsayılır. Bu hız ve uzunluk ölçekleri, türbülans kinetik enerjisinden, k ve dağılım

oranında, ε elde edilir. Türbülans vizkozitesi aşağıdaki gibi yazılır [33].

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{5.12}$$

Denklem 5.12'de C_μ, deneysel bir oran sabitidir. k-ε model Reynolds gerilmelerinin eş yönlü olduğu bir çok basit akışta görece iyi sonuçlar veren model konseptine dayanmaktadır. Ancak, bu model yukarıda tanımlandığı üzere μ_t, eş yönlü türbülansın dayalı olarak tanımlandığından dolayı eş yönlü olmayan türbülans tahmini için uygun değildir. Bu modelde bir çok durumda yakınsama mükemmel olmasına karşın, yüksek girdaplı yakıcılar gibi sistemlerde elde edilen sonuçlar ve ölçümler arasındaki karşılaştırmalarda iyi sonuçlar vermemektedir. k-ε modelde türbülans vizkozitesinin (μt) hesaplanması için k ve ε değerlerine ihtiyaç vardır. Bunlar aşağıda verilen denklemlerden elde edilir [83]:

Türbülans kinetik enerjisi k'nın değeri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial_k}{\partial x_i}\right) + G_k - \rho\varepsilon \tag{5.13}$$

Türbülans kinetik enerjisinin dağılım oranı ε' nin değeri;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial_\varepsilon}{\partial x_i}\right) + C_{1\varepsilon} G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{1\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{5.14}$$

Denklem 5.14'te G_k ortalama akıştan üretilen türbülans kinetik enerjisini, $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ deneysel sabitleri, σ_k ve σ_ε Prandtl sayılarını göstermektedir. Türbülans kinetik enerji üretim oranı (G_k) aşağıdaki denklem elde edilmektedir [33]:

$$G_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \tag{5.15}$$

Standart k-ε modelde kullanılan sabitlerin değerleri çizelge 5.1'de verilmiştir

Çizelge 5.1. Standart k-ε modelde kullanılan sabitler [33]

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

5.4.2. Yakıcılar yanmanın modellenmesi

Türbülanslı reaksiyon akışlarının modellemesi bir çok reaksiyon ve kinetik modelin tanımlanmasının yanı sıra türbülans ve kimya arasındaki etkileşimlerin tanımlanmasını da getirmektedir. Akış denklemlerine ek olarak her bir kimyasal j türü için, m_j kütle kesrine ait taşınım denklemlerinin çözümlenmesi gerekir (denklem 5.9). Kimyasal türlerin taşınım denklemlerinde bir kimyasal türün üretimi ya da tüketiminin hacimsel oranı kaynak terimi (Sj) olarak bulunmaktadır. Yakıt, oksitleyici ve inert türlerin kütle ve hacim kesirlerinin toplamı 1'e eşittir. Yanma işleminde kimyasal enerji, ısı olarak açığa çıkmaktadır ve sonuç entalpisi, taşınım denkleminin çözümünden elde edilmektedir [33].

Yanmanın gerçekleştiği akış alanı sırasıyla sıcaklık ve yoğunluk değişimlerinden etkilenir. Bundan dolayı kimyasal tür ve entalpi denklemlerine ek olarak tüm akış denklemleri çözülmelidir. Sonuçta, oluşan denklemler çok büyüktür [33].

Bu çalışmada kullanılan jeneratör ve yüksek fırın gazı genel olarak bünyesinde beş farklı gazı bulundurduklarından ve karışım yakıtlar için daha iyi sonuçlar verdiğinden dolayı yanma modeli olarak Mixture Fraction/PDF yanma modeli seçilmiştir.

The Mixture Fraction/PDF yanma modeli

Bu çalışmada, yanma modeli olarak Mixture Fraction / PDF Modeli kullanıldı. Bu yanma modelinde, her bir tür için taşıma denklemleri çözülmez. Onun yerine ilgili her bir türün konsantrasyonu, tahmin edilen karışım oran dağılımında türetilir. Türbülans ve kimyanın etkileşimi, olasılık yoğunluk fonksiyonuyla (PDF) hesaplanır [33].

PDF modelleme yaklaşımı, bilhassa türbülanslı difüzyon alevlerinin simülasyonu için geliştirilmiştir. Yakıt/Oksitleyici sistem karışım oranı, yerel yakıt kütlesi oranı, f olarak şöyle tanımlanabilir;

$$f = \frac{m_F}{m_F + m_O} \tag{5.16}$$

Denklem 5.16'da m_F ve m_O, yakıt ve oksitleyici kütle oranlarını göstermektedir.

Karışım oranı f, akış alanın her noktasındaki değeri, türbülanslı akış alanının ortalama zaman değeri için aşağıdaki korunum denkleminin çözümü ile hesaplanan nicel bir değerdir [33].

$$\frac{\partial(\rho\bar{f})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{f})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial \bar{f}}{\partial x_i}\right) + S_m \tag{5.17}$$

Denklem 5.17'de, S_m, , sıvı yakıt damlacıklarından gaz fazına yalnızca kütle transferi ile ilgili bir kaynak terimdir.

Ortalama karışım oranı çözümüne ek olarak, karışım oranı varyansı için bir korunum denklemi çözülür. $\overline{f'}^2$ türbülans-kimya etkileşimlerini tanımlayan ve kapanma modelinde kullanılan bir değişkendir.

$$\frac{\partial(\rho\overline{f\prime}^2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \overline{f\prime}^2)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\frac{\partial \overline{f\prime}^2}{\partial x_i}\right) + C_g\mu_t\left(\frac{\partial \overline{f\prime}^2}{\partial x_i}\right)^2 - C_d\rho\frac{\varepsilon}{k}\overline{f'}^2 \tag{5.18}$$

Standart Mixture Fraction/PDF modelinde kullanılan sabitlerin değerleri çizelge 5.2'de verilmiştir [33].

Çizelge 5.2. Mixture fraction/PDF modelinde kullanılan sabitler

SABİT	σ_t	C_g	C_d
DEĞER	0,7	2,86	2,0

Sistem kimyasını tanımlamak amacıyla kullanılan modelde iki seçenekli varsayım yapılır; alev tabakası (karışım yakması)) yaklaşımı ve denge yaklaşımı. Alev tabakası ya da ‘’karışım yakması’’ yaklaşımı, kimyasal etkileşimin sonsuz hızda ve tersinmez olduğu varsayımına dayanır. Ayrıca yakıt ve oksitleyici türleri ortamda asla birlikte bulunmaz ve bir aşamada yanma sonu ürünlerine dönüşürler. Bu basit sistem, türlerin kütle ve karışım oranları arasında düz çizgi ilişkisi tanımlar. Bu yaklaşımın hesaplanması oldukça kolaydır ve reaksiyon ile reaksiyon oranına ihtiyaç duymadan hızlı gerçekleşir. Buna karşın ‘’karışım yakması’’ modeli, tek aşama reaksiyonlarının tahmininde yetersiz olmakta ve ara türlerin oluşum tahminini yapamamaktadır. Bundan dolayı, sistemdeki ara türlerin hesaplamasını denge varsayımı ile yapılmaktadır. Bu varsayım, moleküler seviyede kimyasal denge için her zaman yeterli kimyasal hızın var olduğu kabulüne dayanmaktadır. Karışım oranındaki (*f*) türlerin mol oranları, Gibbs free enerjinin minimize edilmesine dayalı bir algoritma kullanılarak hesaplanır. Bu model, detaylı bir kimyasal kinetik oran veri bilgisine ihtiyaç duymamaktadır. Kimyasal türler için özellik verisi, kodları verilmiş kimyasal bir veri tabanı kullanarak tanımlanır [33].

Türbülans-Kimya etkileşimi

Türbülans ve kimyanın etkileşimi, olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) yaklaşımının uygulanması ile modellenir. PDF, p(*f*), *f ve f* + Δ*f* aralığında değerler alan değişken *f*'nin zamana göre oranını verir.

$$p(f)\Delta f = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \qquad (5.19)$$

τ_i burada f değişkeninin Δf aralığında harcadığı zamanın kesridir [33].

Radyasyon modeli

Radyasyonla ısı transferi yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. Yanma odalarındaki, gaz alev sıcaklığı, stokiyometrik yanma koşullarına yakın şartlarda genellikle yüksektir (1000-1600 °C'). Bundan dolayı yanma odalarında meydana gelen ısı transferi önemlidir ve yanma odalarındaki sıcaklık dağılımının daha doğru ve iyi tahmin edilebilmesi için analizlerde radyasyon modelinin dâhil edilmesi gereklidir [33].

P-1 modeli, radyasyon yoğunluğunun genişlemesine dayanan genel P-N modelinin en basit örneğidir ve diğer radyasyon modellerine göre bazı avantajları vardır. Örneğin; P-1 modelinde daha düşük CPU kullanımı söz konusudur. Optik kalınlığın olduğu yanma uygulamaları için P-1 modeli oldukça iyi çalışır. P-1 modeli, eğrisel koordinatlar içeren karmaşık geometrilere de kolayca uygulanabilir [75]. Bu nedenle, bu çalışmada kömür gazlarının yanmasını daha iyi ve doğru bir tahmin etmek amacıyla P-1 radyasyon modeli kullanılmıştır.

Işınımla ısı transferi aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$Q_{rad} = \sigma\,(T_{max}^4 - T_{min}^4) \tag{5.20}$$

Işınımla olan ısı transferi, taşınım veya iletimle olan ısı transfer miktarlarına göre çok fazla olduğunda, radyasyonla ısı transfer modeli simülasyonu içinde yer alması gerekir.

Bir d_x yolu boyunca radyant yoğunluğu da aşağıdaki denklem ifade edilebilir.

$$\frac{dI}{dx} = (\alpha_a+\alpha_s)I + \frac{\alpha_a \delta\, T^4}{\pi} \tag{5.21}$$

α_a ve α_s sırasıyla emme ve saçılma katsayıları, I, toplam yarı küresel yoğunluk, T yerel sıcaklık (K) ve σ Stefan-Boltzman sabitidir (5,672x10^{-8} W/m^{2}K^4). Bu modelde, yukarıdaki denklem (5.21), yüzeydeki her bir kontrol hacminde yer alan bir noktadan yayılan ışın serileri ile entegre edilir. Bu ışınlar, bu nokta civarında yarı küresel katı açı kapsarlar [33].

Entegre ışıma yoğunluğu aşağıdaki gibi olur.

$$I(x) = \frac{\sigma T^4}{\pi}\left(\frac{\alpha_a}{\alpha_a+\alpha_s}\right)(1 - \exp[-(\alpha_a+\alpha_s)x]) + I_0 \exp[-(\alpha_a+\alpha_s)x] \tag{5.22}$$

I_0 artımlı dx yolunun başındaki ışıma yoğunluğudur. Bu yeni durumda entalpi kaynağı, akışkan kontrol hacmi boyunca takip edilen her ışıma yolu boyunca, yoğunluktaki değişimin toplamı olarak hesaplanır ve bunun içinde ‘’ışıma izleme’’ tekniği kullanılır [33].

Fluent radyasyon modelinde, modeldeki tüm yüzeyleri için radyasyonun dalga boyundan bağımsız olduğu varsayıldığından dolayı radyasyon gri radyasyon olarak kabul edilir. Böylece dolayı yukarıda verilen denklemlerden tahmin edilen radyasyon yoğunluğu, tüm dalga boylarının birleştirilmiş yoğunluğuna eşittir. Bundan dolayı, Fluent radyasyon modeli gri-yayılmalı radyasyon modeli olarak adlandırılabilir [33]

Karbondioksit ve su buharı gibi, yanma sistemlerindeki gazların pek çoğu güçlü emici ve yayıcı olmalarına karşın, belirgin bir şekilde radyasyon dağıtamazlar. Bundan dolayı, saçılma katsayısının ihmal edilebilir bir etkisi olduğu tespit edilmiştir (stokiyometrik karışım oranlarına yakın şartlarda saçılma katsayısının 10^{-8} den 10^{-3}'e artması, sıcaklık seviyesini sadece 4°C azaltmaktadır).

Radyasyon özellikleri simülasyonda kullanılan program tarafından hesaplanabilmektedir. Duvar yayılımı 0,6' ya ayarlanır (gaz yanması için tipik değer). Akış giriş ve çıkışındaki yayılım katsayıları 1.0 olarak alınmıştır (siyah cisim emmesi) [33].

5.5. Hesaplamalı Akışkan Modelinin Oluşturulması

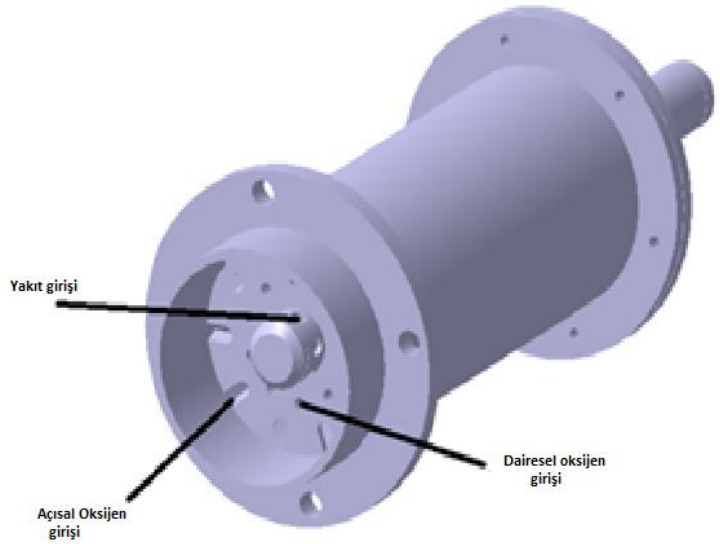
Tez kapsamında çalışmanın sayısal bölümünde mevcut ve oksi-yakıcıda ve yanma odasındaki türbülans akışın sayısal simülasyonu ANSYS Fluent kodu kullanılarak gerçekleştirildi. Model, akışkan ve türleri için temel denklemleri sonlu hacim yöntemini kullanarak çözer ve viskoz olan veya olmayan, laminer veya türbülans gibi farklı fiziksel modelleri kullanabilme yeteneği sağlar [76]. Basınç-hız bağlantısı için Basit algoritma uygulanmıştır. Tüm ulaşım denklemlerinde konveksiyon terimleri için ikinci derece upwind scheme metodu kullanılmıştır ve basınç ayrıştırması içinde ikinci dereceden yöntem kullanılmıştır. Tüm artıkların 10^{-5} in altına düştüğünde çözümün iyi yakınsadığı kabul edilmiştir.

Türbülanslı difüzyon alevlerini simüle etmek için özel olarak geliştirilen ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde (CFD) yaygın olarak kullanılan K-epsilon (k-ε) türbülans modeli olarak seçilmiştir. Model seçim sürecinde Realizable k-epsilon, RNG k-epsilon ve Standart k-epsilon modelleri incelenmiş ve Standart k-epsilon modelinin yanma odası içerisindeki sıcaklık ve emisyon değerlerini belirlemede ve deneysel sonuçları yansıtmada diğer modellere göre daha başarılı olmasından dolayı çalışmalarımızda tercih edilmiştir.

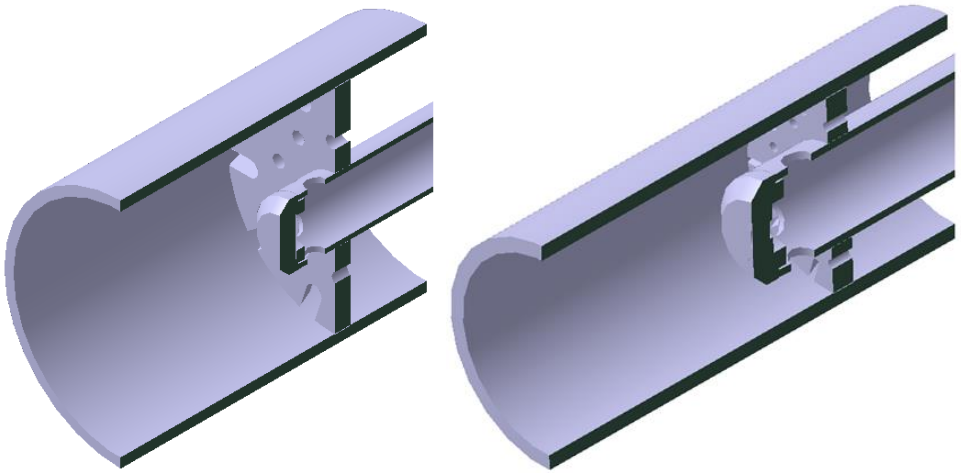
Kullanılan kömür gazları birden fazla gazın karışımdan oluşmasından dolayı yanma modellemesi için karışım yakıtlarda, ön-karışımsız yanma şartları için daha iyi sonuçlar veren the mixture fraction/PDF yanma modeli tercih edilmiştir. Ayrıca P-1 radyasyon modeli ile daha iyi sonuçlar elde edildiğinden yanma ve radyasyon model seçimlerinde tercih edilmişlerdir.

Çalışmanın ilk bölümünde deneysel verilerle karşılaştırma yapabilmek amacıyla mevcut düşük kalorili sentez gazı yakıcısı kullanılmıştır. Daha sonra ise mevcut yakıcının oksitleyici kesiti saf oksijen akışına daha uygun olması sağlamak amacı ile yaklaşık dört kat azaltılarak oksi-yanma yakıcısı elde edilmiş ve çalışmanın ikinci kısmında bu yeni yakıcı kullanılmıştır. Yapılan bu değişiklikle oksi-yanma koşullarında düşük kalorili sentez gazları için hem daha kararlı bir alev elde edilmesi sağlanmış hem de alevin düzgün dağılım göstermesinden dolayı yakıcı duvarının aşırı ısınmasını önlenmiştir.

Mevcut Yakıcı, Şekil 5.1'de [76] ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Ayrıca, hava ve oksitleyici kesitler ve mevcut (değiştirilmemiş) ve modifiye edilmiş yakıcı (oksi-yanma) bölümleri sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmektedir. Şekillerden görüleceği üzere oksi-yakıcının yakıt akış kesiti mevcut hava-yanma yakıcısında olduğu gibi bırakılmış fakat oksijen geçiş kesiti oksijen geçişi uygun olarak yaklaşık 4 kat daraltılmıştır.

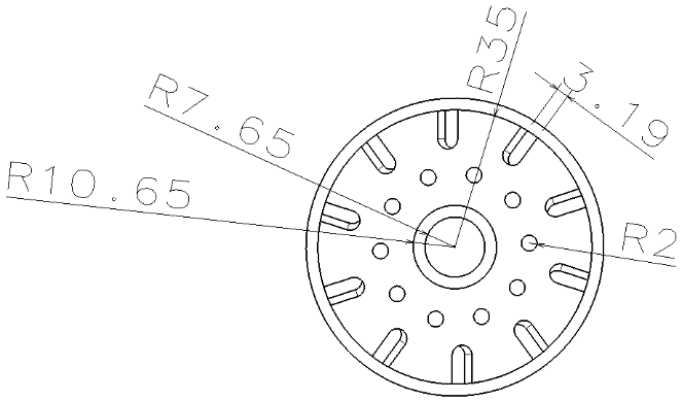


Şekil 5.1. Mevcut yakıcı

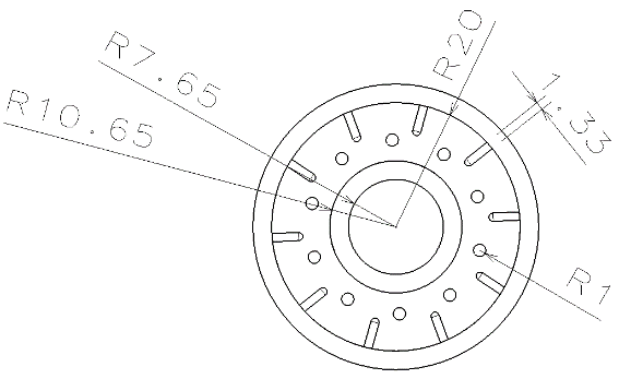


(a) (b)

Şekil 5.2. Mevcut yakıcının hava (a) ve modifiye edilmiş yakıcının oksijen (b) kesiti



(a)



(b)

Şekil 5.3. Mevcut ve modifiye edilmiş yakıcıların hava (a) ve oksijen (b) kesitleri

5.5.1. Sınır şartları

Sayısal modellemeler gerçekleştirilmeden önce, modellemenin doğru bir şekilde yapılabilmesi için bazı sınır şartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bundan dolayı deneyin yapılmış olduğu şartların sayısal modellemede belirtilmesi gerekir. Bunun için yakıt ve yakıcı hızları, ortam basınç ve sıcaklık verileri modellemede kullanılmıştır.

Sayısal modellemelerde, debimetre kalibrasyonu neticesinde elde edilen yakıt ve oksijen hacimsel debileri temel alınarak yakıt ve oksijen giriş hızları belirlenmiştir. Yakıt ve oksijen giriş sıcaklıkları, deneysel çalışmalarda kullanılan ortam sıcaklığı (20ºC), basınçları ise deneysel çalışmalarda kullanılan yanma odası giriş basınçları (21 mbar) kullanılmıştır. 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 (20ºC) seçilmiştir. Ayrıca, yanma odasının bulunduğu ortamdaki havanın ısı taşınım katsayısı da 20 W/m^2K olarak girilmiştir [4].

5.5.2. Fiziksel özellikler

Akışkanların akış problemlerini çözmek için akışkanın fiziksel özellikleri gerekmektedir. Sayısal modelleme çalışmalarımızda gerçekleştirilen sayısal simülasyonlarda kullanılan Ansys Fluent programı, akışkanın özelliklerini çeşitli şekillerde tanımlar. Örneğin; fiziksel fiziksel özelliklerini sabit kabul eder veya özelliklerini sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlar. Bunun yanı sıra Ansys Fluent programı, viskoziteyi dinamik viskozite (kg/m-s) olarak değerlendirirken akışkan viskoziteyi, termal iletkenliği (Watt/m-K) ve özgül ısı sığasını sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlar [33].

Çalışma kapsamında kullanılan jeneratör ve yüksek fırın gazlar, 5 farklı gaz karışımından meydana gelmekte ve bu gaz karışımlarının fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında sayısal simülasyonlarda kömür gaz karışımlarının yoğunlukları, denklem (5.23)'de verilen ideal gaz kanunu kullanılarak belirlenmiştir [33].

$$\rho = \frac{P_{op}+P}{RT\sum_{i'}\frac{m_{i'}}{M_{i'}}} \tag{5.23}$$

Kömür gazlarının diğer fiziksel özellikleri arasında yer alan özgül ısı değerleri denklem (5.24), ısıl iletkenlikleri denklem (5.25) ve viskoziteleri de denklem (5.26) ile ideal gaz karışım kanununa göre kimyasal türlerin ilgili özellikleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır [82].

$$c_P = \sum_{i'} m_{i'} c_{P,i'} \tag{5.24}$$

$$k = \sum_{i'} \frac{X_{i'} k_{i'}}{\sum_{j'i} X_{j'} \emptyset_{i',j'}} \tag{5.25}$$

$$\mu = \sum_{i'} \frac{X_{i'} \mu_{i'}}{\sum_{j'i} X_{j'} \emptyset_{i',j'}} \tag{5.26}$$

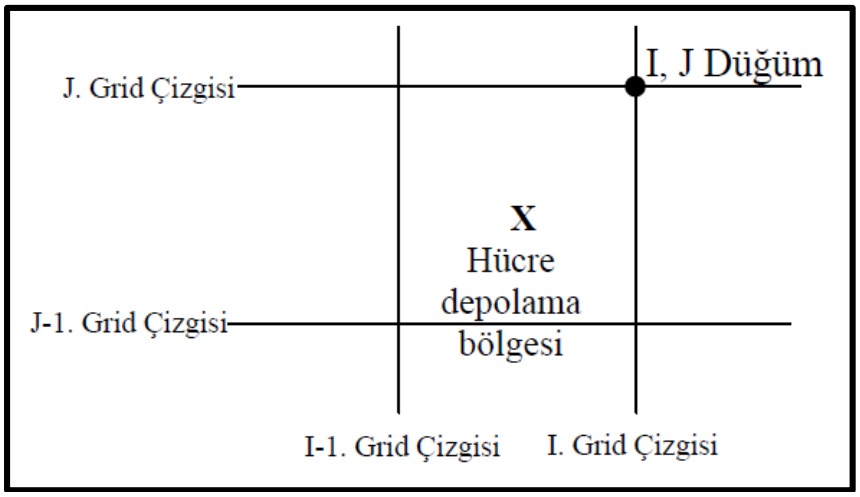
Yukarıda denklemler neticesinde elde edilen P_{op} işletme basıncını, R, üniversal gaz sabitini, $M_{i'}$, i' kimyasal türünün molekül ağırlığını, $X_{i'}$, i' kimyasal türünün mol kesrini göstermektedir. Ayrıca, $\emptyset_{i',j'}$ değeri de denklem (5.27)'de verilmiştir.

$$\emptyset_{i',j'} = \frac{\left[1+\left\{\frac{\mu_{i'}}{\mu_{j'}}\right\}\left\{\frac{M_{i'}}{M_{j'}}\right\}^{1/4}\right]^2}{\left[8\left(1+\frac{M_{i'}}{M_{j'}}\right)\right]^{1/2}} \tag{5.27}$$

5.6. Sayısal Çözüm Metodu

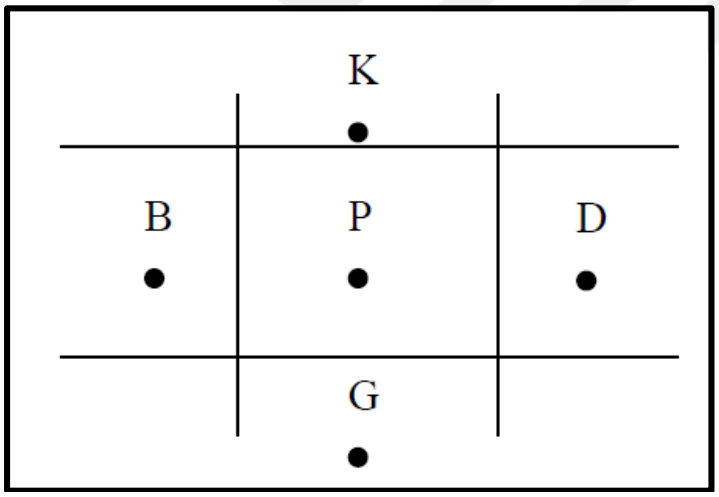
Bu çalışma kapsamında kullanılan kömür gazlarının Ansys Fluent programı ile yanma modellemesinde korunum denklemleri, kütlenin korunumu, momentum, enerji, kimyasal türler ve türbülans miktarları, kontrol hacmine dayalı teknik kullanılarak çözülmüştür. Bu teknikte, öncelikle, hesaplama alanı, genel bir hesaplama ağı kullanılarak birbirinden ayrı kontrol hacimlerine bölünmektedir. Daha sonra, hız, basınç ve diğer skaler büyüklükler gibi bilinmeyenleri hesaplamak amacı ile kullanılacak olan cebirsel denklemler oluşturmak için her bir kontrol hacminde korunum denklemleri birleştirilir [84].

Şekil 5.4'te kademesiz ağ depolama şeması kullanılarak ayrı kontrol hacimlerinin tanımlanması yapılmakta ve tüm korunum denklemlerinin birleştirilmesi sürecinde aynı kontrol hacmi kullanıldığı gösterilmektedir [33].



Şekil 5.4. Kademesiz kontrol hacmi depolama şemasının gösterimi

Şekil 5.5'te ise bir P düğümünü çevreleyen tipik hesaplama hücresi gösterilmiştir. Tüm değişkenler (basınç, hız bileşenleri, reynolds gerilim bileşeni, vb.) ve bütün skaler büyüklükler, kontrol hacminin hücre merkezinde depolanır [33].



Şekil 5.5. P düğümünü çevreleyen tipik hesaplama hücresinin gösterimi

5.6.1. Çözüm algoritması

Kütle, momentum, enerji ve kimyasal türlere ait korunum denklemlerinin genel biçimi denklem 5.29'da gösterilmiştir. Korunum denklemleri hesaplama hücrelerinde birleştirilir ve sonlu farklar analojisine indirgenirler.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \emptyset) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \emptyset) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\Gamma_\emptyset \frac{\partial \emptyset}{\partial x_i}\right] + S_\emptyset \qquad (5.29)$$

Korunum denklemleri hesaplama hücreleri üzerinde entegre edilerek sonlu farklar yaklaşımlarına indirgenir. 5.29'daki denklemlerin birleştirilmesinden sonra oluşan cebirsel denklemler, denklem 5.30 gibi gösterilebilir [33].

$$\emptyset P \sum_i (A_i - S_P) = \sum_i (A_i \emptyset_i) + S_c \tag{5.30}$$

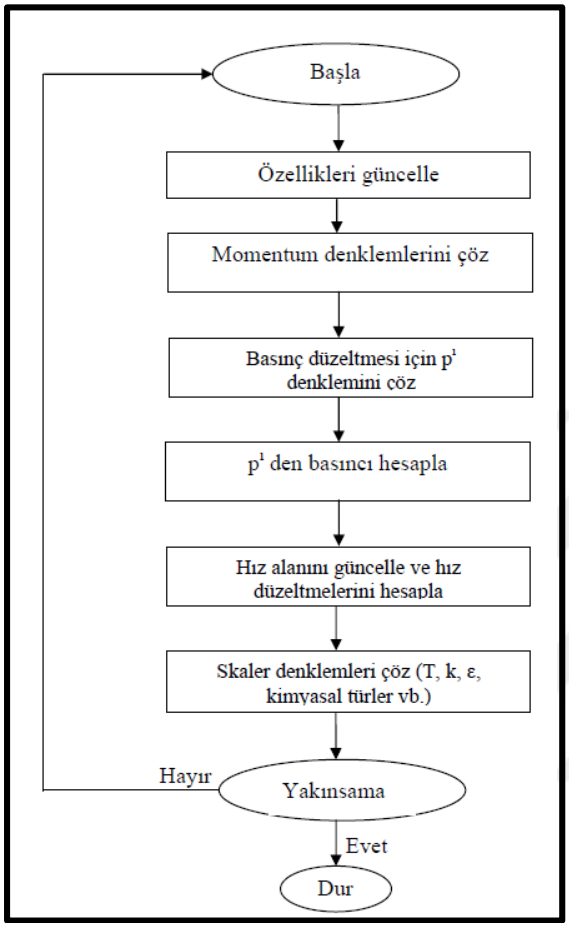
Burada toplam, sonlu komşu fark hücrelerinin üzerinde olduğu yerdir. A, taşınım ve difüzyon akılarından gelen katkıları içeren katsayıları ve S_c ve $S_\emptyset$, doğrusallaştırılmış kaynak teriminin bileşenleridir. Akış değişkenlerinin türevlerini hesaplamak ve grid noktaları arasına enterpolasyon yapmak için bir güç kanunu fark yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, aşağıda verilen adımları elde ederek doğru çözümlere ulaşmak için yarı kapalı iterasyon yöntemi (a semi implicit iterative scheme) kullanılmıştır [84].

1. Ara hız alanlarını güncellemek için u, v ve w momentum denklemleri, tahmin edilen basınçlar kullanılarak çözülmüştür.
2. Basınç düzeltmelerini elde etmek için basınç düzeltme denklemi çözüldü. Daha sonra ise basınç ve hız alanılar güncellenmiştir.
3. Hız alanını güncellemek için k ve Ɛ denklemleri çözülmüştür. Kalan denklemler (entalpi, kimyasal tür korunumu, radyasyon, ilave türbülans denklemleri vb.) diğer değişkenlerin güncellenmiş değerleri öncelikle kullanılarak çözülmüştür.
4. Hesaplamayı tamamlamak için akışkan özellikleri güncellenmiştir.
5. İyi bir yakınsayan çözüme ulaşmak için problemin yakınsaması kontrol edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen iterasyonlu çözüm adımları, problemin istenilen yakınsaması sağlanana kadar devam ettirilir. Bu işleme ait akış diyagramı da Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı, hesaplama alanında her bir hücre için artıkları hesaplamakta ve çözülen her bir denklem için artık raporlaması yapmaktadır. Akış değişkenleri için hesaplanan 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 $1x10^{-6}$'dır değeri makbuldür [33].

Bu çalışmada kullanılan modellemeler 3-D olmasına rağmen gerçekleştirilen sayısal çalışmamalarda 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 5.6. Ansys Fluent programı için çözüm yöntemi akış şeması

5.6.2. Artıkların hesaplanması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modellemesinde iyi yakınsayan çözümün elde edilmesi çok önemlidir. Çalışmanın sayısal modelleme bölümünde kullanılan Ansys Fluent programı, her bir korunum denklemi için denklemdeki dengesizlikleri toplayarak hesaplama alanındaki bütün hücrelerde artıkları hesaplamaktadır. Daha sonra program her bir iterasyondaki denklem için artıkların raporunu vermekte ve işlem adımları kullanıcı tarafından ekrandan takip edebilmektedir. Ayrıca elde edilen bu artıklar, akış alanı boyunca her bir denklemin gerçekleşme derecesini göstermektedir. Örneğin, iki boyutlu bir durum için genel değişken ($Ø_P$)'nin kurunum denklemi, ayrıştırmasından sonra, aşağıdaki gibi yazılabilir [33]:

$$A_P \emptyset_P = A_E \emptyset_E + A_W \emptyset_W + A_N \emptyset_N + A_S \emptyset_S + S_C \quad (5.31)$$

Denklem 5.31'de Ø miktarı herhangi bir bağımlı değişken (hız, türbülans, enerji, entalpi vb.) olabilir. S_C , denkleme herhangi bir terimi dâhil eden ve taşıma/difüzyon biçimde olmayan doğrusallaştırılmış kaynak teriminin bir bileşenidir. Denklem(5.31)'in sağ tarafında yer alan A terimleri, bir P noktasını çevreleyen kontrol hacmi boyunca konvektif ve difüzyonu birleştiren sonlu fark katsayısıdır. P düğümü ve komşu düğümleri çevreleyen tipik hesaplama hücresi Şekil 5.5'te gösterilmiştir. A terimleri arasındaki ilişki denklem (5.32)'de gibi yazılabilir.

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S - S_P \quad (5.32)$$

Burada, S_P, denklem (5.31)'deki S_C gibi doğrusallaştırılmış kaynak teriminin bir bileşenidir. (5.31)'deki denklem dengesizliğini gösteren R artığı, program tarafından aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$R = \sum_{d\text{üğüm}P} |[A_E \emptyset_E + A_W \emptyset_W + A_N \emptyset_N + A_S \emptyset_S + S_C - A_P \emptyset_P]| \quad (5.33)$$

Yukarıdaki denklemde R, P hesaplama noktalarının toplamını vermektedir. R, normalize edilmemiş artıkları gösterirken; normalleştirilmiş artıklar diye rapor edilen $(\bar{R})$ ise program tarafından aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{d\text{üğüm}P} |[A_E \emptyset_E + A_W \emptyset_W + A_N \emptyset_N + A_S \emptyset_S + S_C - A_P \emptyset_P]|}{\sum_{d\text{üğüm}ler} |(A_P \emptyset_P)|} \quad (5.34)$$

Denklem (5.34) ile hesaplanan normalleştirilmiş artıklar, basınç dışında bütün değişkenler için geçerlidir. Basınç artığı, denklem 5.35'te verildiği üzere süreklilik denklemindeki (basınç korelasyonu) dengesizliktir.

$$R = \sum_{d\text{üğüm}ler} |(C_W - C_E + C_S - C_N)| \quad (5.35)$$

Burada C_W, C_E, C_S ve C_N, P noktasını çevreleyen kontrol hacminin her bir yüzeyi boyunca kütle yayılımıdır. Basınç artıklarının normalizasyonu, ikinci iterasyonda artık (ya da süreklilik dengesizliği) ile bölünerek elde edilmektedir [33].

$$\bar{R} = \frac{R_{N.\ iterasyon}}{R_{2.\ iterasyon}} \tag{5.36}$$

5.6.3. Rahatlatma faktörleri

Lineer olmayan denklemlerin çözüm güçlüğünden dolayı yakınsayan çözümlere ulaşmak her zaman kolay olmamaktadır. Yetersiz rahatlatma faktörlerin varlığı, uygun olmayan sınır şartlarının seçimi gibi nedenlerden dolayı problemde ıraksama meydana gelebilmektedir. Her bir iterasyonda elde edilen değişkenlerdeki değişimin azaltılması yoluyla ıraksama problemleri aşılarak yakınsayan çözümler elde edilebilir. P düğümündeki Ø değişkeninin eski ($Ø_{P,eski}$) ve yeni ($Ø_{P,yeni}$) değerleri arasındaki ilişki, $Ø_P$'nin hesaplanan değişimi, rahatlama faktörü, α aşağıdaki gibi ifade edilebilir [84]:

$$Ø_P = Ø_{P,eski} + \alpha \Delta Ø_P \tag{5.37}$$

Rahatlatma faktörünün uygun değerinin bulunması genel olarak tecrübeye dayansa da akış konfigürasyonu, hesaplama ağ yapısı vb. çok sayıda parametreye de bağlıdır. Her bir değişkenin α değeri probleme göre değişiklik göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümünde, düşük kalorili kömür gazlarının yanma parametreleri için deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Daha sonra, yapılan sayısal modellemelerde elde edilen sıcaklık dağılımları ile deneysel çalışma esnasında elde edilip düzeltilen sıcaklık ölçümleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı yakıcı ve yanma odası kullanılarak düşük kalorili jeneratör ve yüksek fırın gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli hava ile yanma koşullarında elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları [76] ile oksi-yanma koşulları altında elde edilen sıcaklık dağılımları detaylı bir biçimde karşılaştırılmıştır. Son olarak ise hava-yanma ve oksi-yanma koşullarında gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen emisyonlar detaylı bir biçimde karşılaştırılarak oksi-yanmanın farklılıkları ortaya konmuştur.

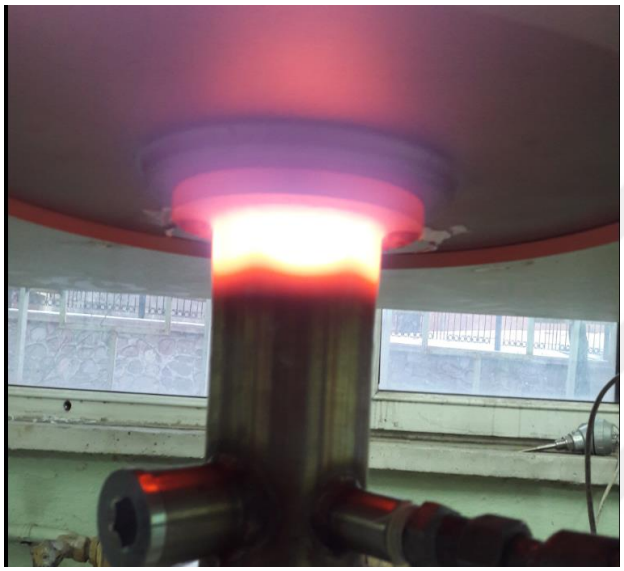
Sayısal modellemelerde, deneysel çalışmada kullanılan yanma şartları aynı şekilde değerlendirilmiştir. Düşük kalorili jeneratör ve yüksek fırın gazlarının yakılması, 10 kW ısıl güçte ve $\varnothing = 0{,}83$ eşdeğerlilik oranında, yakıt ve hava basınçları 18-21 mbar olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Sayısal modellemelerde de, ANSYS Fluent programına bu sınır şartları veya sınır şartlarından elde edilen sonuçlar (örneğin yakıt ve hava hızları gibi) girilerek sınır şartları belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda yapılan karşılaştırmalara benzer biçimde jeneratör ve yüksek fırın gazlarının mevcut ve modifiye edilmiş yakıcı için (oksi-yakıcı) oksi-yanma koşullarında jeneratör ve yüksek fırın gazlarının yanma davranışlarına ilişkin sonuçlar da detaylı bir biçimde karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

6.1. Deneysel Ölçüm Sonuçları

Tezin başlangıcında öncelikle, farklı ısıl değerlere sahip kömür gazları (yüksek fırın gazı ve Jeneratör gazı) Tübitak-1005 projesi [4] kapsamında geliştirilip, imal edilen yakıcı ve yanma odası kullanılarak ön karışımsız (difüzyon) kararlı alev şartlarında, saf oksijenle yakılmaları sağlanmış ve yanma odası boyunca farklı eksenel ve radyal uzaklıklarda sıcaklık ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Deneyde kullanılan R tipi sıcaklık ölçerler 4 mm kalınlıkta yanma duvarına dişli bağlantılar ile sabitlenmiştir. Emisyon değerleri, farklı eksenel ve radyal konumlarda aynı ölçüm noktaları üzerinden bir baca gazı analizörü aracılığıyla ölçülmüştür.

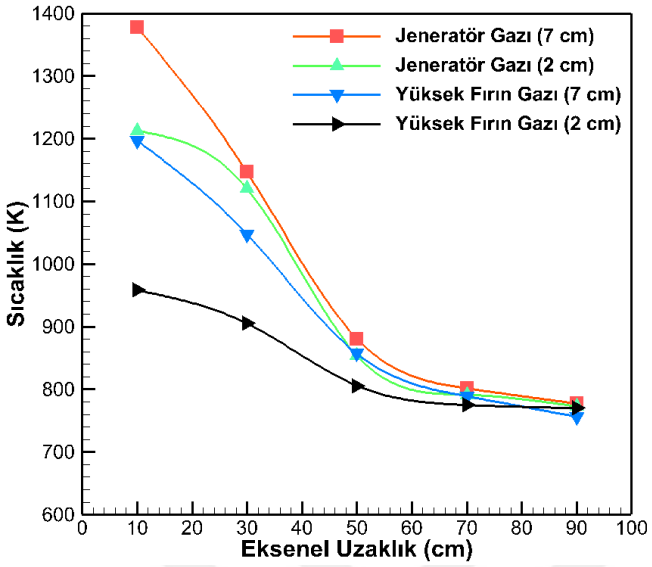
Mevcut yakıcı ile yapılan oksi-yanma deneysel çalışmalarında alevin, yanma odası girişinde yakıcı içine doğru toplandığı ve yakıcı duvarının aşırı ısındığı Resim 6.1'de rahatlıkla görülmektedir.



Resim 6.1. Jeneratör gazı oksi-yanma deneyinde yakıcının ısınma fotoğrafı

Türbülatörün yanma odası olan giriş mesafesi 7 cm de sıcaklık ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise yakıcı duvarının aşırı ısınmasını hafifletmek amacıyla küçük bir modifikasyon yapılarak türbülatör yanma odasına yaklaştırılmış ve 2 cm mesafede de hem alev yapısı gözlemlenmiş hem de sıcaklık ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçta da her iki mesafede elde edilen sıcaklık ve emisyon ölçümleri birbiriyle karşılaştırılmıştır.

6.1.1. Sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.1. Eksenel Sıcaklık Dağılımları

Şekil 6.1'de verilen sıcaklık dağılımlarından görüleceği üzere, yanma odası boyunca en yüksek sıcaklık değeri 7 cm'lik türbülatör mesafesinde ve jeneratör gazı alev bölgesinde ortaya çıktığı söylenebilir. Düzeltilmiş değeri 1377,6 K'dır. Aynı türbülatör mesafesinde yüksek fırın gazının alev sıcaklığı 1196,6 K olarak tespit edilmiştir. 10 cm deki eksenel uzaklık için (radyal olarak 0) türbülatör 7 cm den yakıcı çıkışına (2 cm) taşındığında sentetik gazların alev sıcaklıklarında önemli ölçüde düşme gözlemlenmiştir. Jeneratör gazı için bu değer 1377,6 K den 1212,5 K düşerken; yüksek fırın gazında ise sıcaklık değeri 1196,6 K den 958,2 K düşüş göstermiştir. Bu sonuçlar, türbülatörün 7 cm uzakta bulunduğu konumda, hem düşük kalorili kömür gazı alevinin daha iyi toplandığı hem de her iki yakıt türü içinde yakıt / oksijen karışımının daha iyi elde edildiği şeklinde açıklanabilir.

Ayrıca diğer eksenel mesafelerde de bu iki gaz için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şöyle ki; 30 cm eksenel mesafede jeneratör gaz alevinin sıcaklık değeri türbülatör mesafesi 7 cm iken 1146,5 K olarak ölçülmüşken, 2 cm de ise 1120,2 K olarak daha düşük ölçülmüştür. Bu değerler 50 cm, 70 cm ve 90 cm'de sırasıyla, 1092-854 K, 802-791 K ve 777-773 K olarak belirlenmiştir. Yüksek fırın gazı içinde 30 cm eksenel mesafede alevinin sıcaklık değeri türbülatör mesafesi 7 cm iken 1047,4 K olarak ölçülmüşken, 2 cm de ise 905,1 K

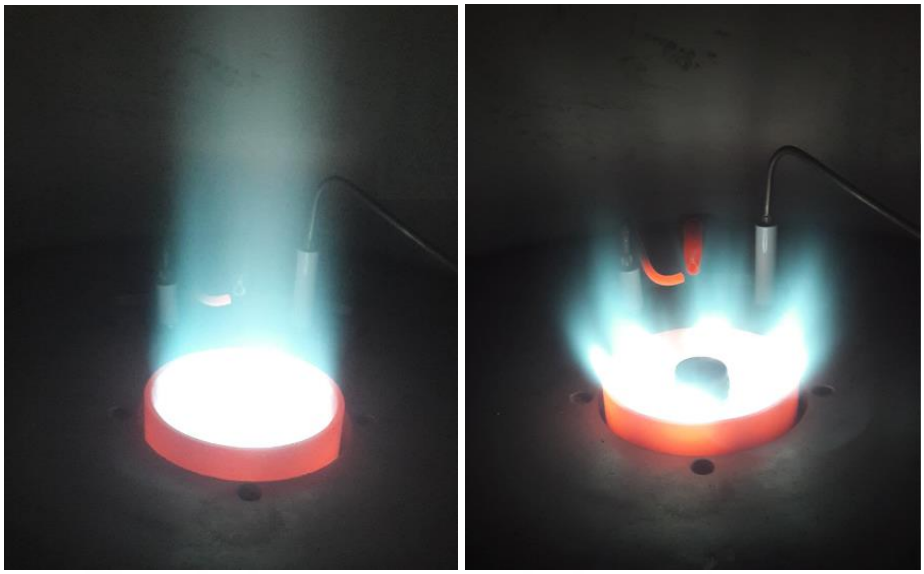
olarak daha düşük ölçülmüştür. Bu değerler 50 cm, 70 cm ve 90 cm'de sırasıyla, 857-806 K, 789-775 K ve 756-770 K olarak belirlenmiştir.

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 720 K civarında olmuştur. Tüm yanma koşullarındaki sıcaklık seviyeleri, taşınım ve özellikle radyasyonla ısı transferleri nedeniyle yanma odasının merkezinden duvarlara doğru kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir.



(a) (b)

Resim 6.2. (a) Türbülatör mesafesi 7 cm deki jeneratör gaz alevi fotoğrafı, (b) Türbülatör mesafesi 2 cm deki jeneratör gaz alevi fotoğrafı

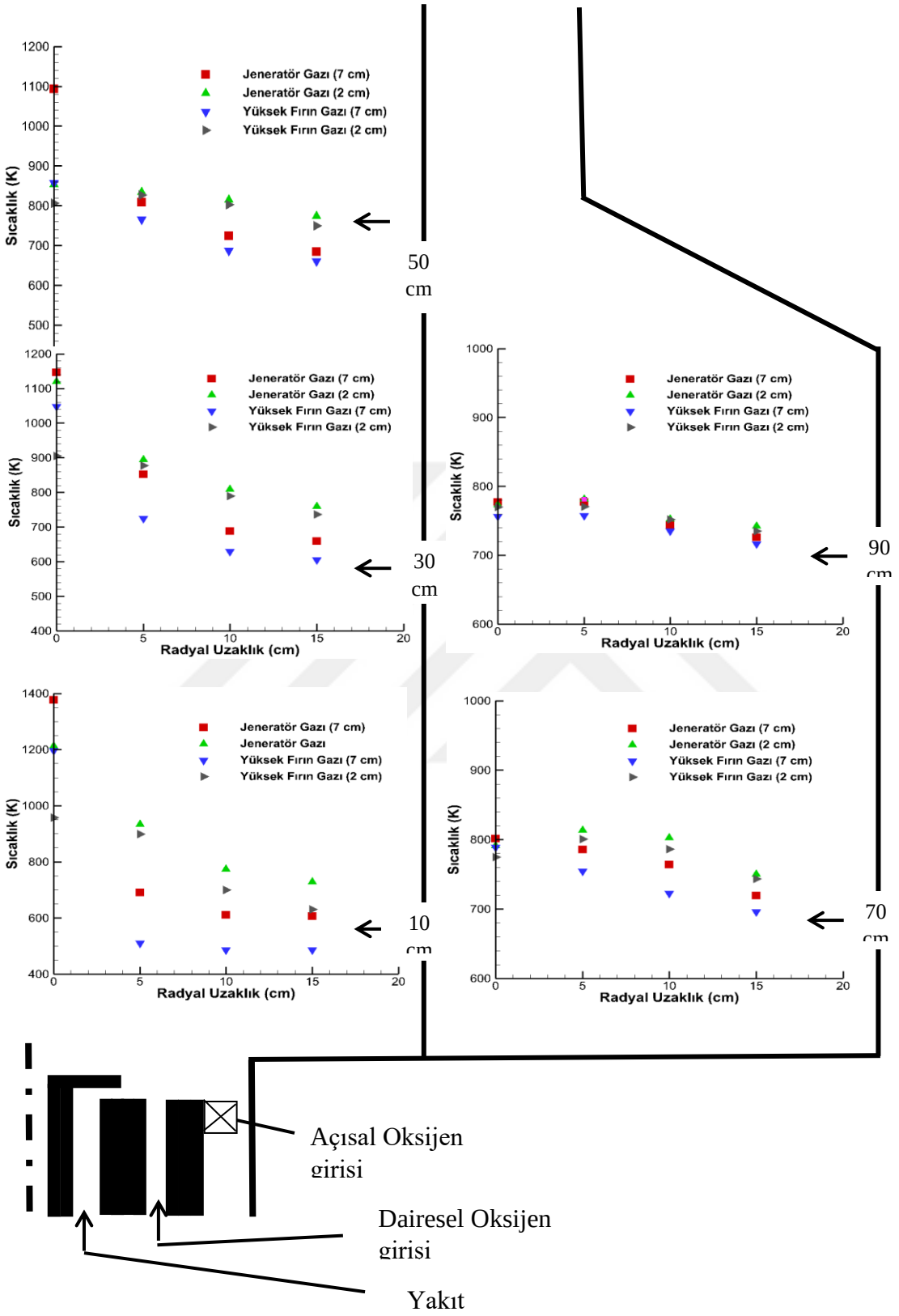


(a) (b)

Resim 6.3. (a) Türbülatör mesafesi 7 cm deki yüksek fırın gaz alevi fotoğrafı, (b) Türbülatör mesafesi 2 cm deki yüksek fırın gaz alevi fotoğrafı

Eksenel ölçümlerin aksine radyal ölçümlerde; türbülatör 7 cm den yakıcı çıkışına (2 cm) taşındığında kömür gazlarının alev sıcaklıklarının arttığı söylenebilir (Şekil 6.2). 10 cm'lik bir eksenel mesafede elde edilen 5 cm mesafedeki radyal ölçümlerde jeneratör gazının sıcaklık değeri, türbülatör mesafesi 7 cm iken 691,5 K olarak ölçülmüşken, 2 cm de ise 933,9 K'dir. Bu değerler 10 cm ve 15 cm mesafedeki radyal ölçümlerde sırasıyla; 611-774 K ve 606-728 K olarak ölçülmüştür. Ayrıca, yüksek fırın gazı içinde radyal ölçümlerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şöyle ki, yüksek fırın gazı için 10 cm'lik bir eksenel mesafede 5 cm, 10 cm ve 15 cm mesafelerdeki radyal ölçümlerde sırasıyla; 510-899 K, 485-700 K ve 486-631 K elde edilmiştir. Diğer eksenel mesafelerdeki radyal ölçümlerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, eksenel ölçümlerde olduğu gibi, Resim 6.2 ve 6.3' de gösterilen jeneratör ve yüksek fırın gazlarının alev yapılarıyla açıklanabilir. Çünkü türbülatör mesafesinin 2 cm olduğu yanma koşullarındaki alev, diğer duruma kıyasla daha geniş ve ölçüm noktalarına yani yanma odasının duvarlarına daha yakındır. Ayrıca, tüm ölçüm koşullarında alev bölgesinden yanma odası duvarına doğru gidildikçe, elde edilen sıcaklık değerlerinde hızlı bir düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, kullanılan yanma odasının ani genişlemeli bir yanma odası olmasında kaynaklandığı düşünülmektedir.

Hem eksenel hem de radyal ölçümler sonucunda yakıcı duvarlarındaki aşırı ısınmayı azaltmak için türbülatörün, 7 cm den 2 cm ye çekme modifikasyonu düşük kalorili kömür gazlarının oksijenle yanma performanslarının artmasına hizmet ettiği sonucuna varılabilir.

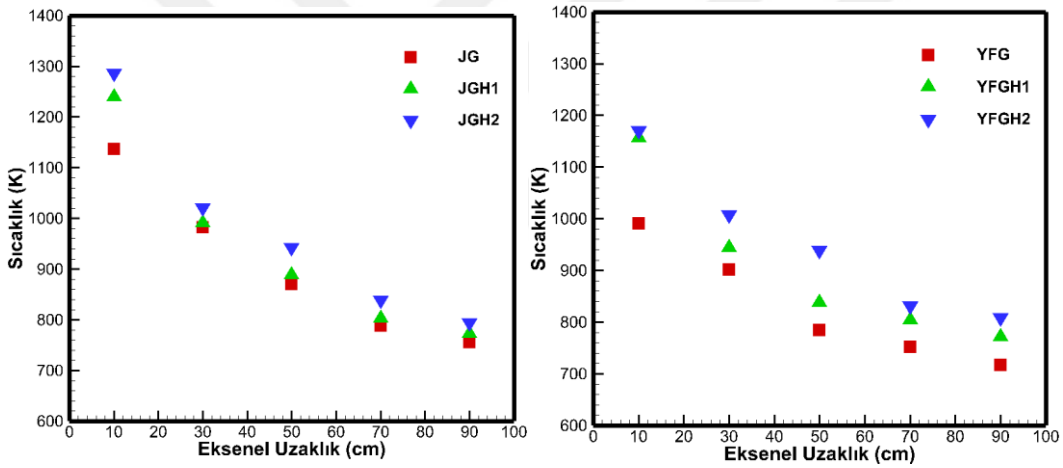


Şekil 6.2. Yanma odası boyunca ölçülen radyal sıcaklık dağılımları

6.1.2. Oksi-yanma ve hava-yanma sıcaklık ölçümlerinin karşılaştırılması

Düşük kalorili kömür gazlarının oksi-yanma koşulları altında sıcaklık değerleri bir önceki bölümde araştırılmıştı. Bu bölümde aynı yakıcı ve yanma odası düşük kalorili jeneratör ve yüksek fırın gazlarının hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli hava ile yanma koşullarında elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları [76] ile oksi-yanma koşulları altında elde edilen sıcaklık dağılımları detaylı bir biçimde karşılaştırılmıştır.

Aşağıdaki Şekil 6.3a ve Şekil 6.3b'de, jeneratör gazı ve yüksek fırın gazı alevlerinin hidrojen beslemesiz ve hidrojen beslemeli hava ile yanma ve 10 kW'lık ısıl güç koşullarında ölçülen eksenel sıcaklık değerleri gösterilmiştir.



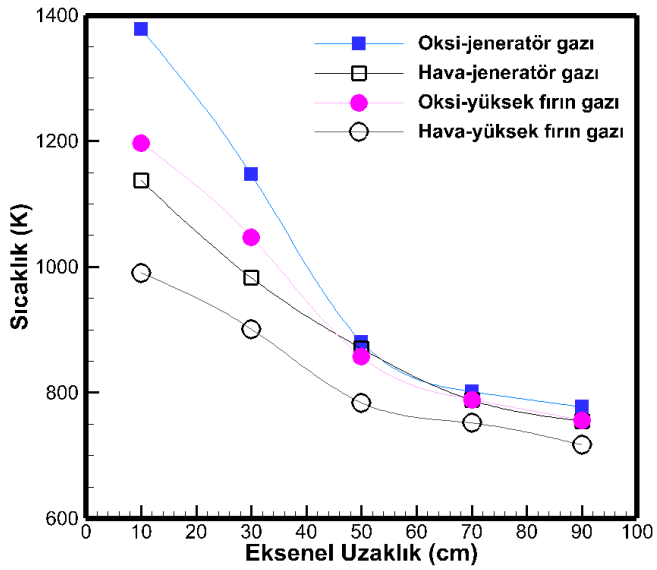
(a) (b)

Şekil 6.3. (a) Düşük kalorili kömür gazlarının hidrojen beslemesiz ve (b) hidrojen beslemeli hava ile yanma koşullarında elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları

Şekillerde gösterilen; JG, jeneratör gazını, JGH1, 10 kW'lık ısıl gücün 2,5 kW'ının hidrojence sağlandığı hidrojen beslemeli jeneratör gazını, JGH2, 10 kW'lık ısıl gücün 5 kW'ının hidrojence sağlandığı hidrojen beslemeli jeneratör gazını göstermektedir. Ayrıca, YFG, yüksek fırın gazını, YFGH1, 10 kW'lık ısıl gücün 7 2,5 kW'ının hidrojence sağlandığı hidrojen beslemeli yüksek fırın gazını, YFGH2 ise, 10 kW'lık ısıl gücün 5 kW'ının hidrojence sağlandığı hidrojen beslemeli yüksek fırın gazını göstermektedir [76].

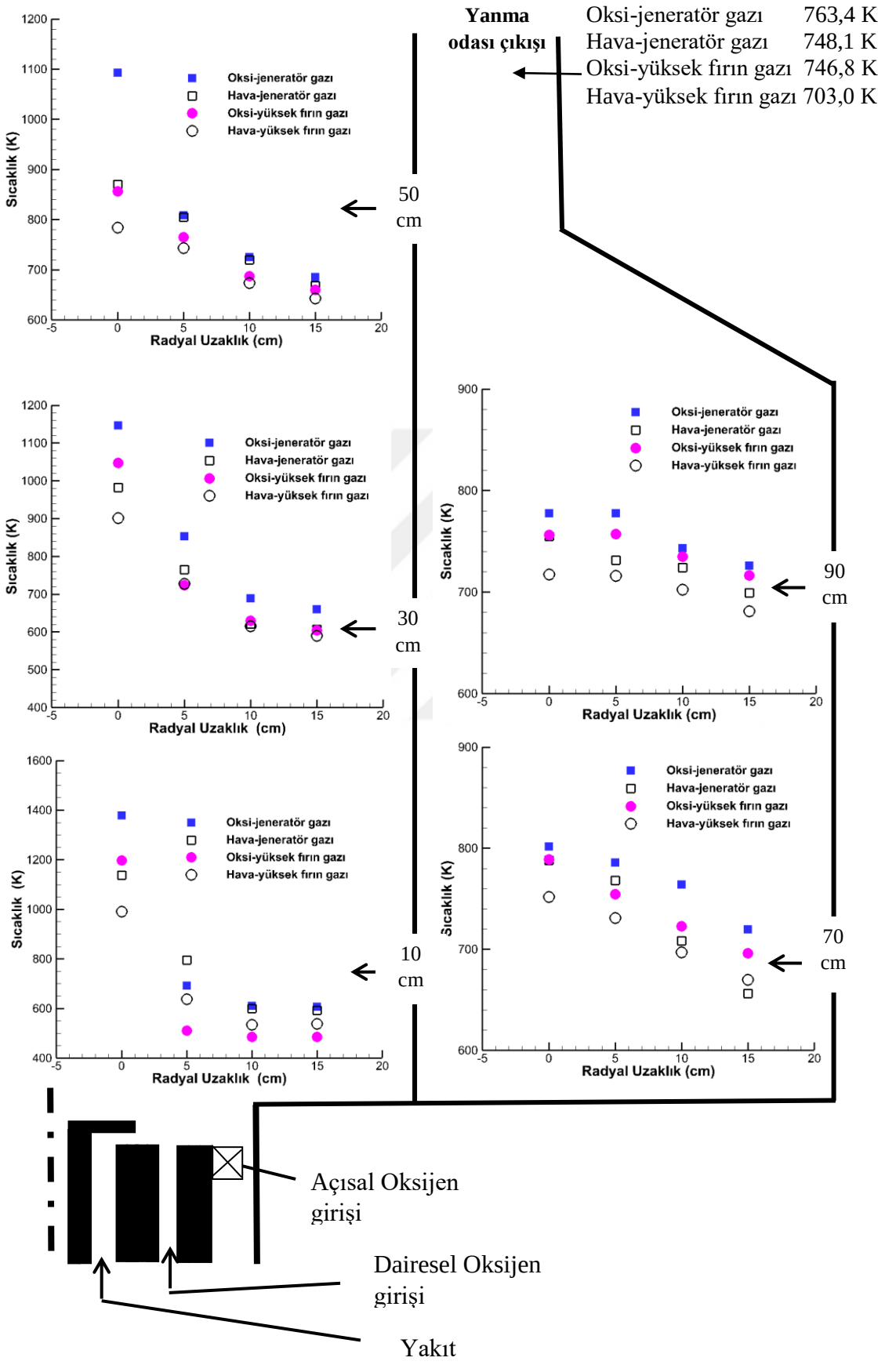
Şekil 6.3'den görüleceği üzere hidrojen beslemesiz Jeneratör gazının hava-yanma sıcaklık değeri olan 1136,9 K değeri, oksi-yanmada elde edilen jeneratör gazı alev sıcaklığı olan 1377,6 K değerine göre çok düşük çıkmaktadır. Ayrıca, oksi-yanmada elde edilen bu

jeneratör gazı alev sıcaklık değeri, JGH1 için ölçülen 1238.9 K ve JGH2 için ölçülen 1286.1 K değerlerinden yüksektir. Benzer şekilde, hidrojen beslemesiz Yüksek fırın gazının hava-yanma sıcaklık değeri olan 990.3 K değeri, oksi-yanmada elde edilen yüksek fırın gazı alev sıcaklığı olan 1196,6 K göre çok düşük çıkmaktadır. Benzer şekilde oksi-yanmada elde edilen bu yüksek fırın gazı alev sıcaklık değeri, YFGH1 için ölçülen 1156.2 K ve YFGH2 için ölçülen 1171 K değerlerinden de yüksektir. Kısacası, hem Jeneratör gazının hem de Yüksek fırın gazının oksi-yanma sıcaklık değerleri, hidrojen beslemesiz hava ile yanma ve 10 kW'lık ısıl güç koşullarında ölçülen eksenel sıcaklık değerlerine göre alev bölgesinde yaklaşık % 20 daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuç Şekil 6.4 rahatlıkla görülmektedir.



Şekil 6.4. Düşük kalorili kömür gazlarının hava-yanma ve oksi-yanma koşullarında elde edilen eksenel sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

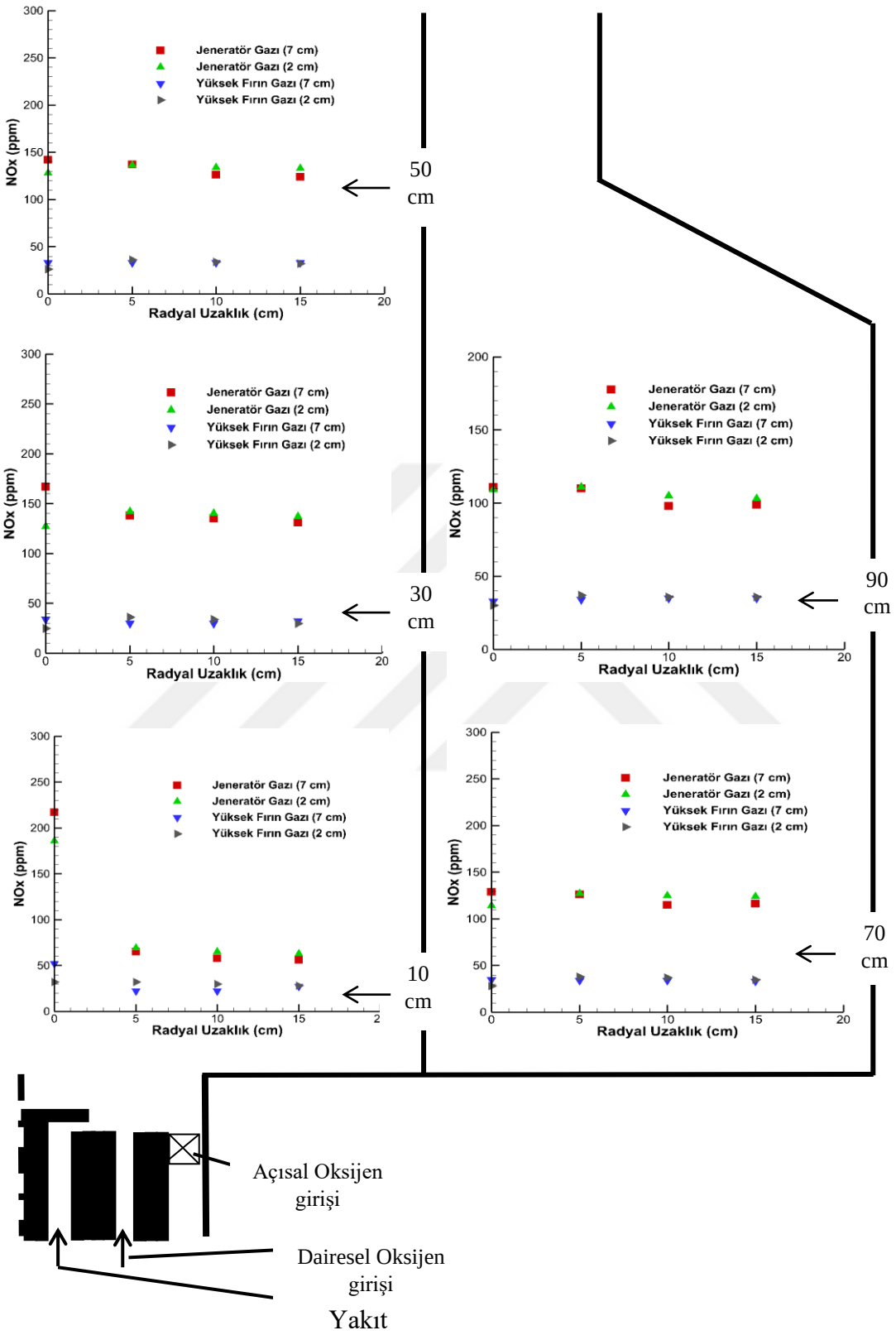
Yanma odasının çıkışına doğru oksi-yanma ve hava-yanma sıcaklık değerleri birbirlerine yaklaşmasına karşın alev bölgesindeki bu ciddi artış, oksi-yanmanın düşük kalorili kömür yakıtlarının yanma performanslarını ciddi arttırdığını göstermektir. Ayrıca, hava-yanma koşullarında yanma odası boyunca elde edilen en yüksek sıcaklık değerinin metan gazı alev bölgesinden elde edilen 1466 K [4] olduğu düşünüldüğünde, jeneratör gazı için oksi-yanma koşullarında elde edilen 1377,6 K sıcaklık değeri düşük kalorili sentez yakıtların yakma sistemlerinde kullanılabilirliği açısından çok ciddi bir sonuçtur. Şekil 6.5'te oksi-yanma ve hava- yanma sıcaklıkları arasındaki detaylı bir biçimde gösterilmiştir.



Şekil 6.5. Oksi-yanma ve hava-yanma radyal sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

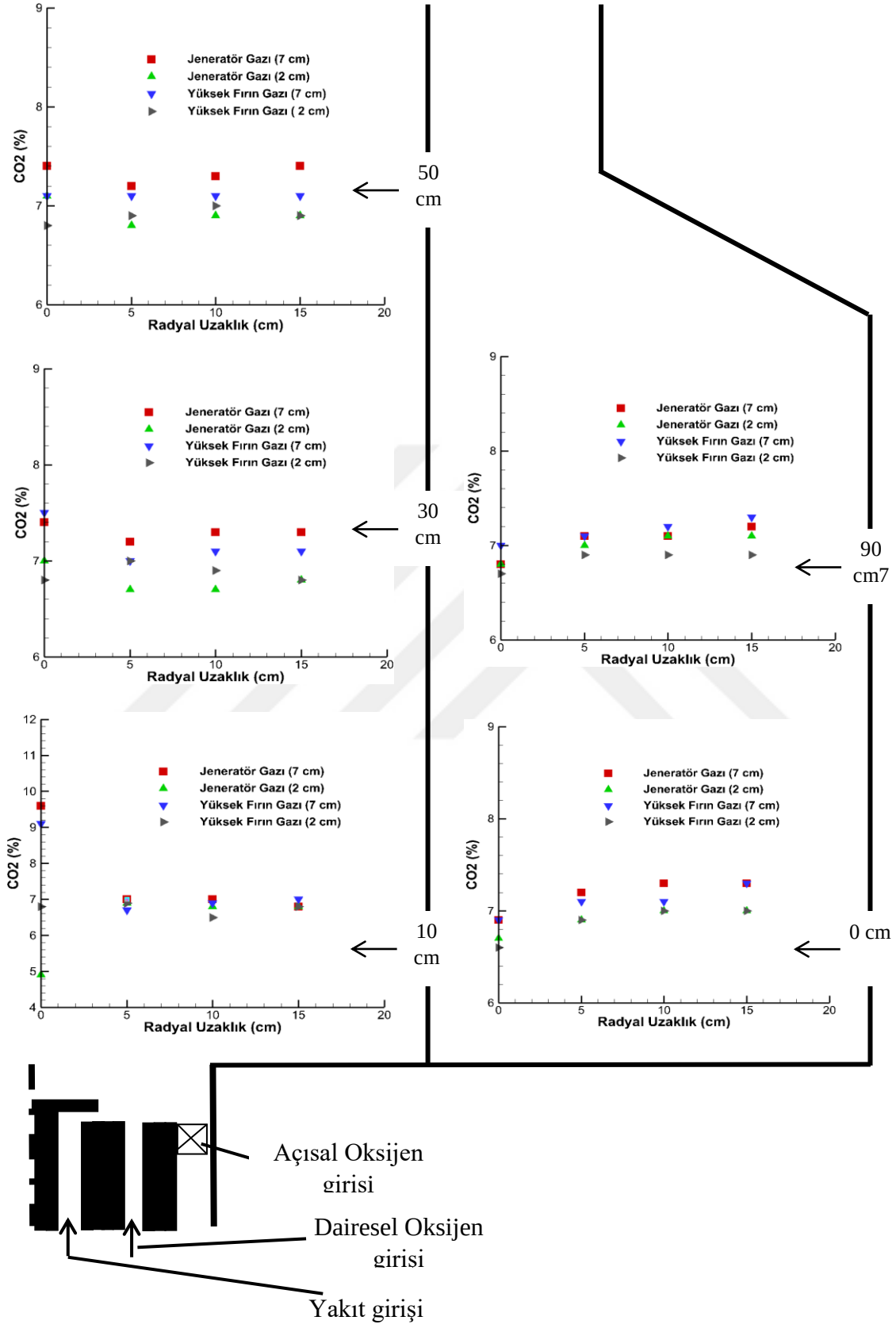
6.1.3. Emisyon ölçümleri

Mevcut deneyde, NO_X, CO_2 ve CO emisyonları bir baca gazı analiz cihazı ile eksenel ve radyal olarak ölçülmüştür. Şekil 6.6 yanma odası boyunca NO_X emisyon değerlerini göstermektedir. Şekil 6.6'da görülebileceği üzere, tüm yanma koşullarında en yüksek NO_X değeri 10 cm eksenel mesafede 7 cm türbülatör pozisyonunda jeneratör gazı alev bölgesinde ölçülmüştür (217 ppm). Bu sonuç doğrudan ölçülen sıcaklık değeri ile ilgilidir (Şekil 6.6). Aynı sonuç, yüksek fırın gazının yanmasında da görülmüştür. Her iki kömür gazı için diğer eksenel mesafelerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bunun temel nedeni, kömür gazlarında bulunan serbest azotların ısıl NO_X mekanizması ile NO_X oluşumuna katkı sağlamasıdır. Bu nedenle, alev bölgesi sıcaklığındaki ciddi artış, bu bölgede NO_X oluşumuna ısıl NO_X mekanizmasının katkısı oldukça fazla olmuştur. Yanma odası boyunca radyal yönde sıcaklık seviyelerinin önemli derecede düşmesinden dolayı, NO_X seviyelerin de paralel bir biçimde azalma görülmüştür. Yanma odası çıkışına doğru, benzer durumun devam ettiği rahatlıkla söylenebilir. Ayrıca, türbülatör pozisyonu 7 cm den 2 cm değiştirildiğinde jeneratör gazı için yüzde 1-9 arasında ve yüksek fırın gazı için alev bölgesi dışında ölçülen NO_X değerleri (Şekil 6.6) sıcaklıkla paralel bir davranış göstererek 7 cm de ölçülen değerlere göre yüzde 3-13 oranında yükselmiştir. NO_X emisyonu sıcaklık seviyesi ile ilişkili olduğu halde NO_X artışı sıcaklık artışına göre çok daha az olmuştur. Bundan dolayı düşük kalorili kömür gazlarının oksijenle yanmasında NO_X emisyonu değerinin yüksek sorun olmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 6.6. Yanma odası boyunca ölçülen radyal NO_X dağılımları

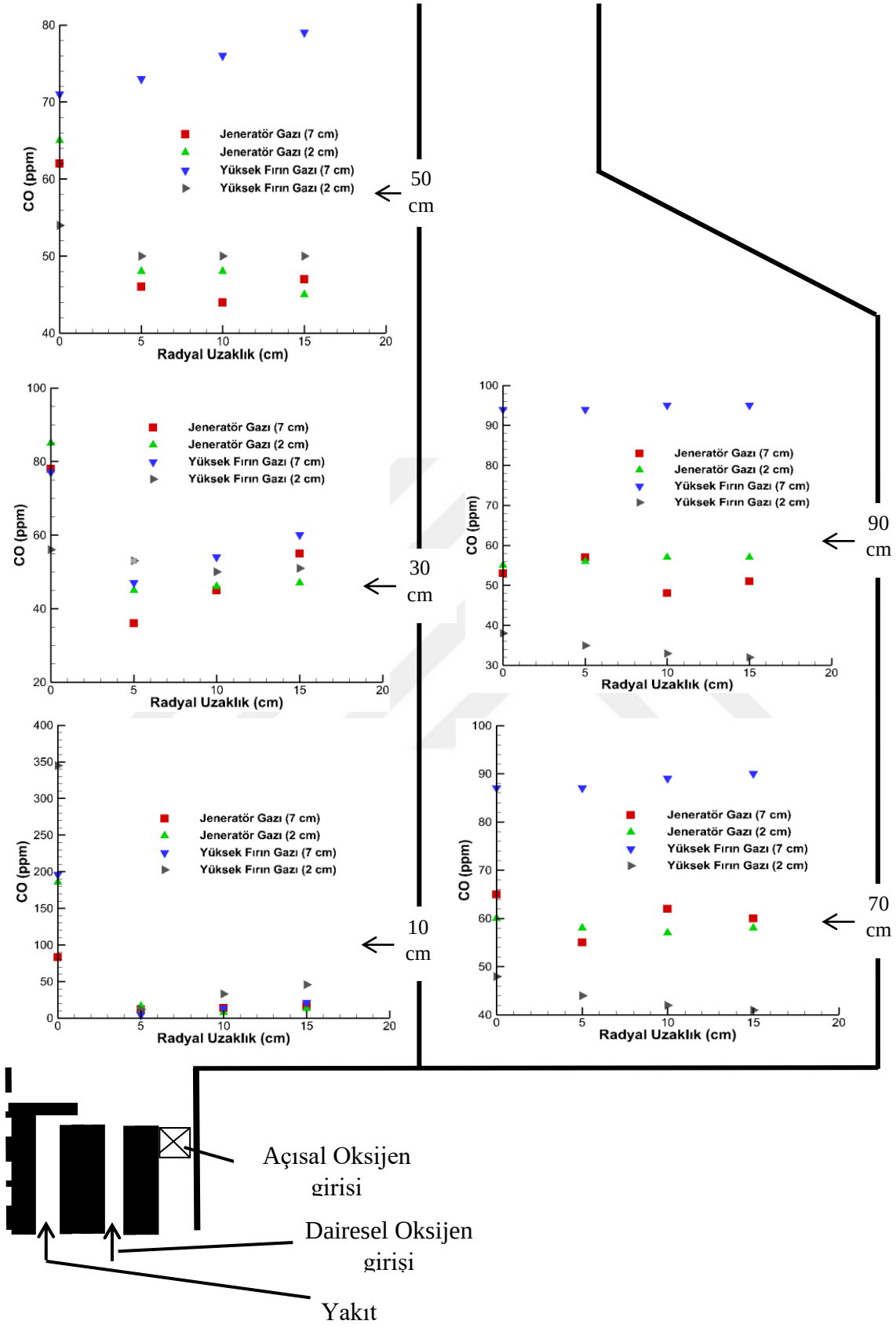
Düşük kalorili kömür gazlarının yanma odası boyunca CO_2 emisyon ölçümleri Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Şekil 6.7'den görüleceği üzere tüm yanma şartları için en yüksek CO_2 düzeyi 10 cm eksenel mesafede 7 cm türbülatör pozisyonunda oksijen-yakıt karışımının en iyi olduğu jeneratör gazı alev bölgesinde (yani radyal dağılımın merkezinde) ölçülmüştür. Diğer eksenel mesafelerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak radyal ölçümlerde, CO_2 seviyesi 10, 30 ve 50 cm lik eksenel mesafelerde alev merkezinde yanma duvarına doğru ilk 5 cmlik radyal mesafede yavaş yavaş azalırken, diğer radyal mesafelerde ise yanma odası duvarına doğru yaklaştıkça hafifçe artmaktadır. 70 ve 90 cmlik radyal mesafelerde ise alev bölgesinden yanma odası duvarına düşük eğilimli de olsa artış göstermektedir. Bu sonuç, yanma sonu CO_2 ürünlerinin, yanma odasına doğru nispeten yayıldığını göstermektedir. Ayrıca, türbülatör yakıcı çıkışına hareket ettirildiğinde CO_2 seviyesinin azaldığı görülmüştür. Bu nedenle, türbülatör mesafe değişikliğinin NO_X emisyonlarında olduğu gibi, düşük kalorili kömür gazlarının oksi-yanma koşullarında CO_2 emisyon seviyelerin de bir artışa neden olmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 6.7. Yanma odası boyunca ölçülen radyal CO_2 dağılımları

Düşük kalorili kömür gazlarının yanma odası boyunca CO emisyon ölçümleri Şekil 6.8'de gösterilmiştir. Şekil 6.8'den de görüleceği üzere maksimum CO düzeyleri alev bölgesinde gözlemlenmiştir. Bu durum, alev bölgesinde henüz yanmanın tam olarak tamamlanmadığı şeklinde yorumlanabilir. En yüksek CO düzeyi ise 2 cm türbülatör mesafesinde yüksek fırın gazı alev bölgesinde ölçülmüştür. Bu durum, 2 cm türbülatör mesafesindeki yüksek fırın gazının, jeneratör gazına göre sıcaklığının daha az olmasından ve CO içeriğinin ise biraz fazla olmasından kaynaklığı düşünülmektedir. Diğer eksenel mesafelerde ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. Şöyle ki, 50, 70 ve 90 cm eksenel mesafelerde en yüksek CO düzeyleri 7 cm türbülatör mesafesinde ve bünyesinden yüksek oranda CO bulundurmasından dolayı yüksek fırın gazında ölçülmüştür.

Ancak radyal ölçümlerde, CO seviyesi yanma odası çıkışına doğru gidildikçe kısmen artış gösteriyor gibi gözükse de alev bölgesinde ölçülen değerlerin çok altında kalmaktadırlar. Ayrıca, türbülatör yakıcı çıkışına hareket ettirildiğinde CO seviyesinin azaldığı görülmüştür. Bu nedenle, türbülatör mesafe değişikliğinin tıpkı NO_X emisyonlarını olduğu gibi, düşük kalorili kömür gazlarının oksi-yanma koşullarında CO emisyon seviyelerini arttırmadığı sonucuna varılabilir.

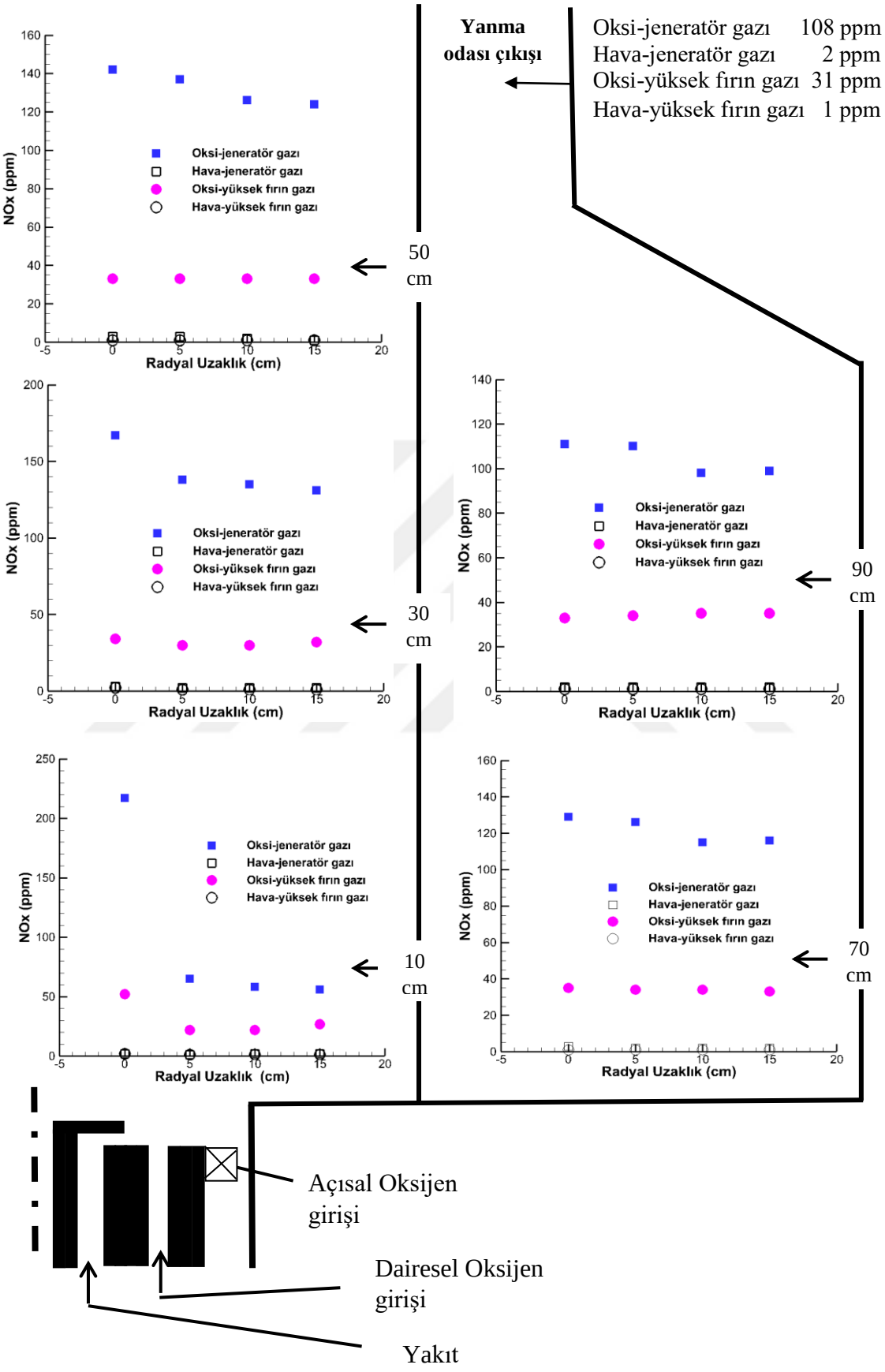


Şekil 6.8. Yanma odası boyunca ölçülen radyal CO dağılımları

6.1.4. Oksi-yanma ve hava-yanma emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması

Düşük kalorili jeneratör ve yüksek fırın gazlarının hidrojen beslemesiz-beslemeli hava ile yanma koşullarında elde edilen eksenel sıcaklık dağılımları ile oksi-yanma koşulları altında elde edilen sıcaklık dağılımları detaylı bir biçimde önceki bölümlerde karşılaştırılmıştı. Bu bölümde ise hava-yanma ve oksi-yanma koşullarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen emisyonlar detaylı bir biçimde karşılaştırılmıştır. En önemli kirletici olması dolayısıyla öncelikle NOx emisyonları karşılaştırılmıştır.

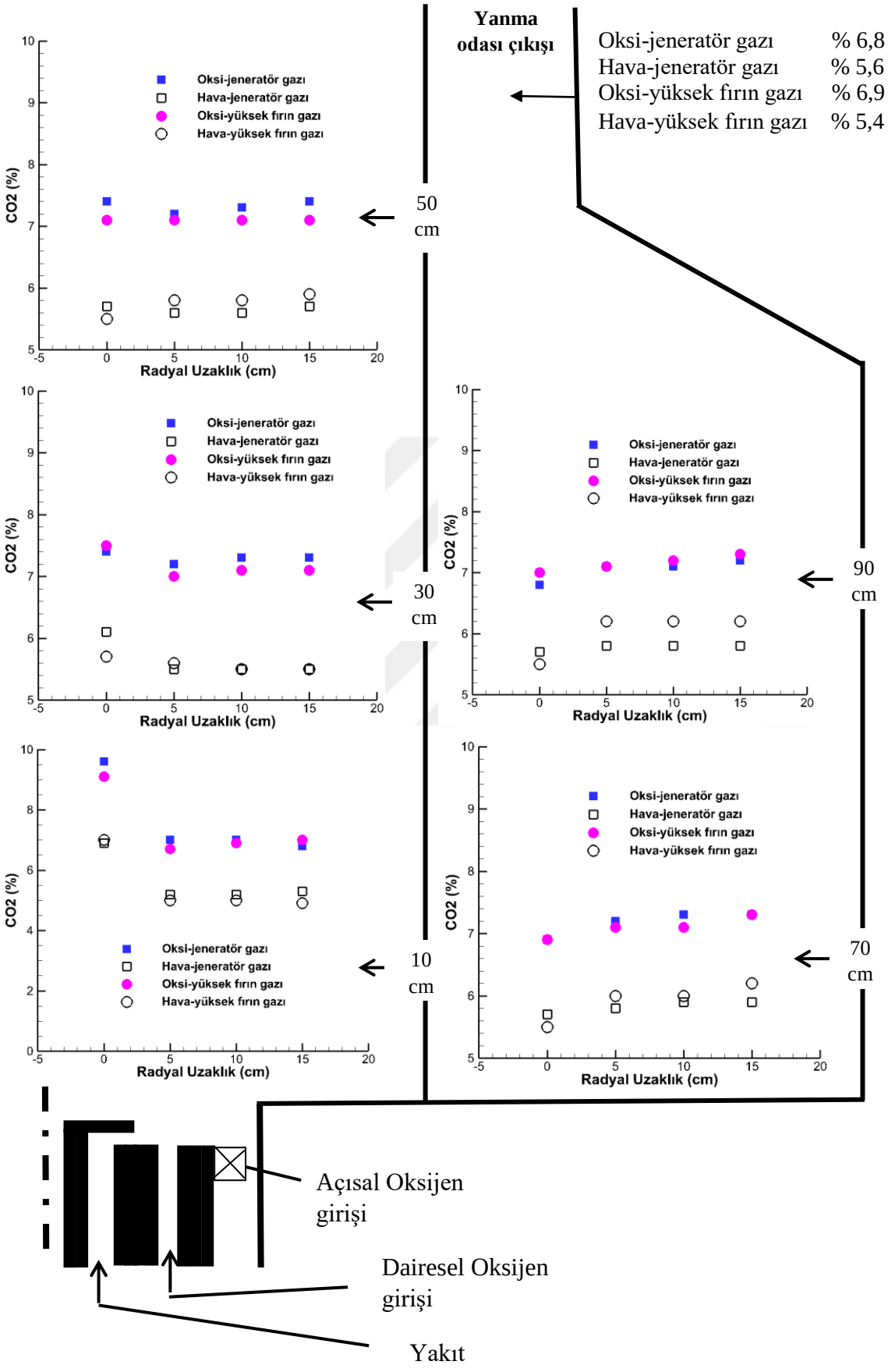
Şekil 6.9'dan görüleceği üzere ısıl NOx mekanizmasından dolayı hava-yanmaya göre oksi-yanma da NOx oluşumunda artış söz konusudur. Bilhassa alev bölgesinde bu rahatlıkla görülmektedir. Daha öncede belirtmiş olunduğu üzere hava-yanmaya göre oksi-yanma koşullarında alev bölgesi sıcaklığındaki ciddi artış, bu bölgede NO_X oluşumuna ısıl NO_X mekanizmasının katkısı oldukça fazla olmaktadır. Fakat yanma odası çıkışına doğru ölçülen NOx emisyon değerleri sıcaklık değerlerindeki azalmaya bağlı olarak yavaş yavaş azalmaktadır. Bu sonuçlar ışığında oksi-yanma koşullarında ısıl NO_X mekanizmasından kaynaklanan NO_X emisyonlarındaki artış daha sonra bilim adamları tarafından gerçekleştirilecek araştırmalar sayesinde uygun bir çözüme kavuşturulabileceği düşünülmektedir.



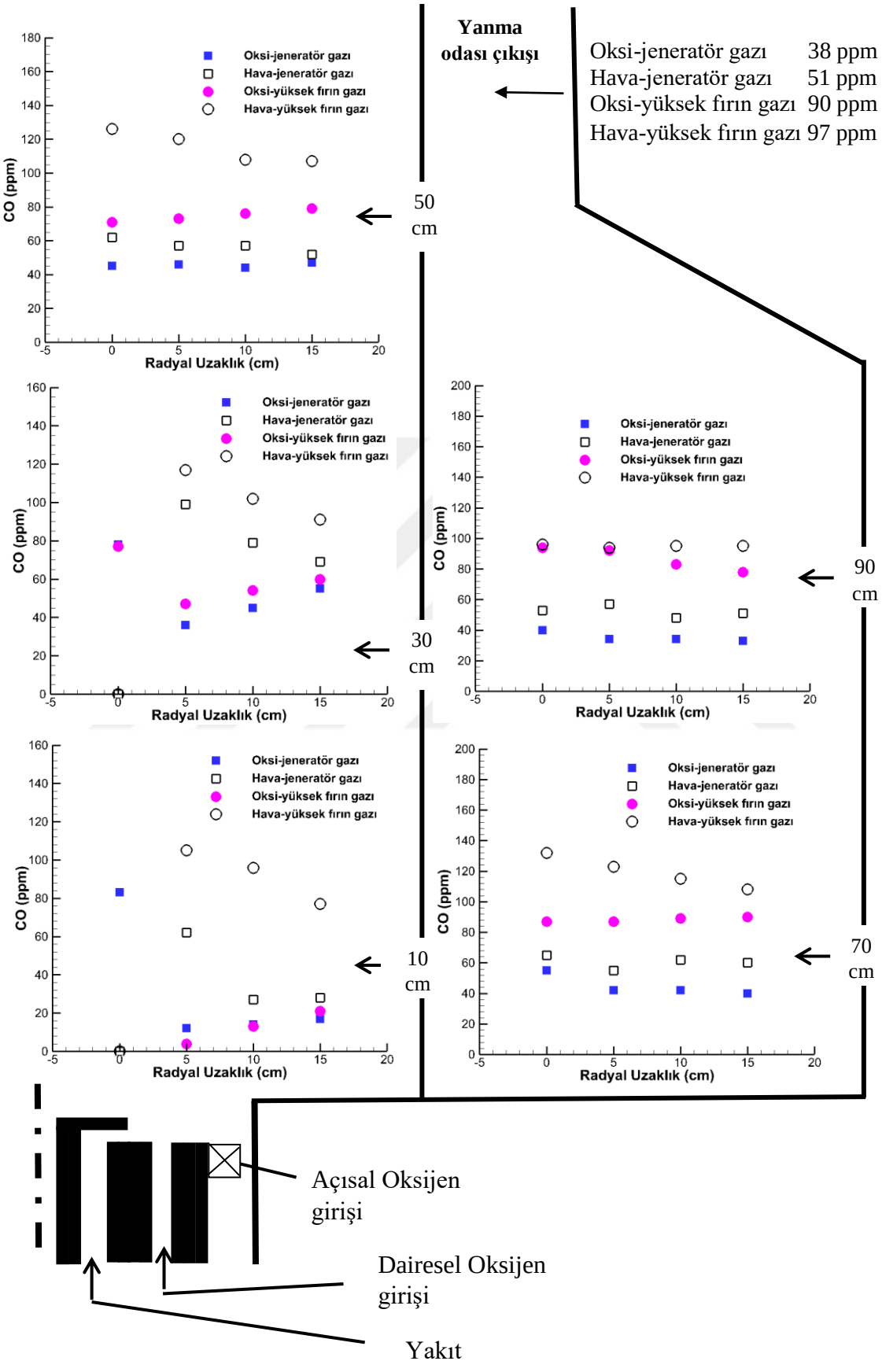
Şekil 6.9. Oksi-yanma ve hava-yanma NOx emisyonlarının karşılaştırılması

Diğer önemli bir emisyon kaynağı ise CO_2 emisyonlarıdır. Hava-yanma ve oksi-yanma koşullarının tam olarak anlaşılabilmesi için CO_2 emisyonlarının karşılaştırılması önemlidir. Karşılaştırmanın gösterildiği Şekil 6.10'da görüleceği yanma tepkimelerinde oksitleyici olarak saf oksijen kullanmak yanma verimliliğini arttırmakta ve bu da karbon atomlarının alev bölgesinde yeterince oksijen atomlarıyla reaksiyona girdiği anlamına gelmektedir. Bu sonuç yanma süreci açısından çok önemlidir, çünkü yanma sürecinde karşılaşılan en önemli sorun tam yanmanın sağlanamamasıdır. Tüm yanma şartları için eksenel ölçümlerde oksi-yanma koşullarındaki CO_2 emisyonları hava-yanmaya daha yüksektir. CO emisyonu tamamlanmamış yanma sonu ürünü olduğu için Şekil 6.11 kontrol edildiğinde oksi-yanma CO seviyelerinin hava-yanmaya göre düşük çıkıyor olması ortaya çıkan bu sonuçları ciddi biçimde desteklendiği görülmektedir. Başka bir deyişle, düşük CO emisyonu daha iyi yanma anlamına gelmektedir. Şekil 6.11 oksi-yanmanın yanma sürecini olumlu etkilediğini göstermektedir. Çünkü yanma odası boyunda oksi-yanma CO emisyonları hava-yanma CO emisyonlarına göre daha düşük gerçekleşmektedir. Bundan dolayı yanma işleminde yanma verimliliği açısından oksi-yanmanın daha iyi olduğu söylenebilir. Dahası, bu durum yüksek miktarda azot ve az miktarda yanabilir bileşen içeren kömür gazlarının yakılmasında daha bir önem kazanmaktadır.

Düşük kalorili kömür gazlarında yanabilir bileşen olarak az miktarda H_2 dışında en önemli yanabilir bileşeni olan ve ortalama % 30 oranında bulunan karbon monoksitin yüksek bir verimde yakılması yanma açısından önemlidir. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde ve Şekil 6.10 ve Şekil 6.11 görüldüğü üzere hava yerine oksitleyici olarak oksijen kullanılması karbon monoksitin daha iyi yanmasını sağlamaktadır. Bu da emisyonu azaltan bir durumdur.



Şekil 6.10. Oksi-yanma ve hava-yanma CO_2 emisyonlarının karşılaştırılması



Şekil 6.11. Oksi-yanma ve hava-yanma CO emisyonlarının karşılaştırılması

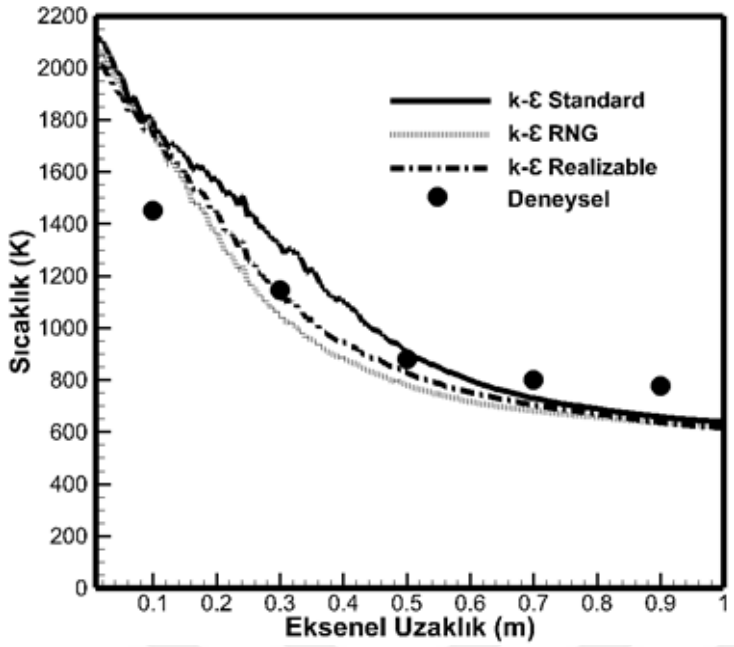
6.4. Sayısal Model Sonuçları

Sayısal modelleme sonuçlarına geçmeden önce, düşük kalorili her bir sentez gazı için farklı türbülans modelleri denenmiş, sayısal modellemelerin geçerliliği ve doğru türbülans modelinin belirlenmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki bölümlerde ise jeneratör ve yüksek fırın gazlarının mevcut ve modifiye edilmiş yakıcı için (oksi-yakıcı) oksi-yanma koşullarında sayısal modelleme sonuçları sunulmuştur. Ayrıca, jeneratör ve yüksek fırın gazlarının hava-yanma [4] ve oksi-yanma koşulları altında yanma davranışlarına ilişkin sıcaklık profilleri ve emisyon değerleri detaylı bir biçimde karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

6.4.1. Model geçerliliği ve türbülans modellerinin etkisi

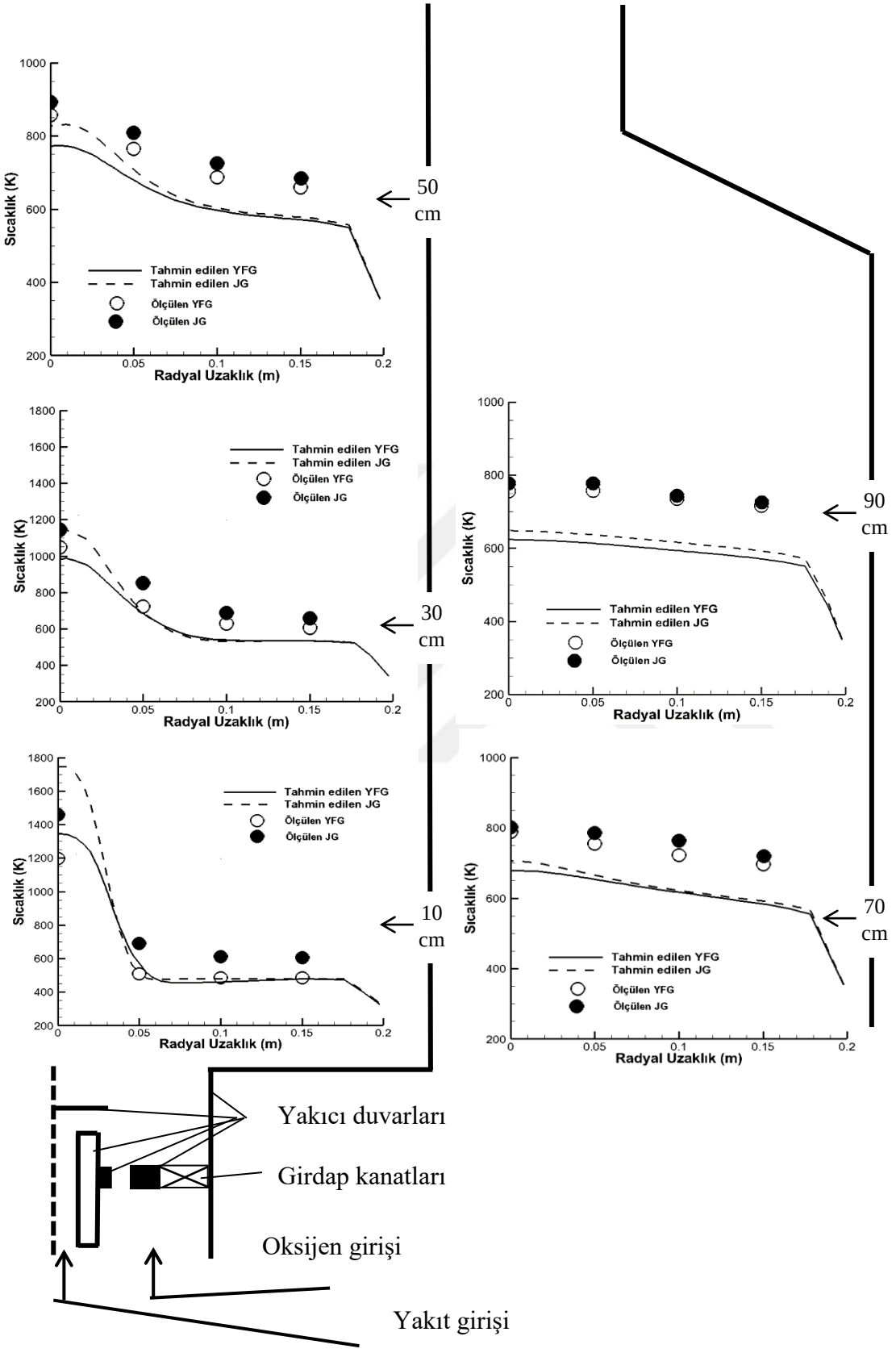
Deney sonucunda elde edilen sonuçların sayısal modellemelerle doğrulanması gerekir. Ancak bu şekilde ölçüm sonucunda elde edilen ve sıcaklık ve emisyon dağılımlarını da içeren düşük kalorili sentez gazlarına ait diğer sonuçların geçerliliği söylenebilir. Bu nedenle, düşük kalorili sentez gazı mevcut yakıcı kullanılarak sayısal modelleme sonucunda elde edilen tahmini sıcaklık sonuçları ile deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yanma odası içinden elde edilen eksenel ve radyal sıcaklık dağılımlar Şekil 6.12 ve Şekil 6.13' te verilmiştir. Şekil 6.12' de görülebileceği gibi, jeneratör gazı için elde edilen deney verileri tüm türbülans modelleri için sayısal modelleme sonucunda elde edilen tahmini eksenel sıcaklık profilleri iyi bir uyum içindedir.

Bununla birlikte, özelikle, yanma odasının ortasından sonra elde edilen sıcaklık sonuçları ile k-Ɛ standart türbülans modeli kullanılarak tahmin edilen sıcaklık profilleri arasında daha fazla bir tutarlılığın olduğu söylenebilir. Bundan dolayı k-Ɛ standart modeli, bu çalışmada türbülans modeli olarak seçilmiştir. Ayrıca benzer gazlar ve yakıcı kullanarak gerçekleştirilen hava-yanma çalışmasından da [4] standart k-Ɛ türbülans modeli kullanılmış olması hem bulmuş olduğumuz sonucu desteklemekte hem de düşük kalorili sentez gazlarının hava-yanma ile oksi-yanma performanslarının aynı türbülans modeli ile gerçekleştirilmesinden dolayı rahatlıkla karşılaştırabilme olanağı da tanımaktadır.



Şekil 6.12. Jeneratör gazı için Türbülans modellerinin etkisi

Şekil 6.13. tüm ölçüm noktaları için jeneratör ve yüksek fırın gazlarının tahmin edilen ve ölçülen radyal sıcaklık profillerini göstermektedir. Bu gazlar için sayısal modelleme sonucunda elde edilen sıcaklık profilleri gerek sıcaklık eğilimleri ve gerekse aldıkları değerler açısından deney sonucunda ölçülen değerlerle iyi bir biçimde uyumluluk göstermektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada daha ileri modellerin uygulanabilir olduğu sonucuna varılabilir.

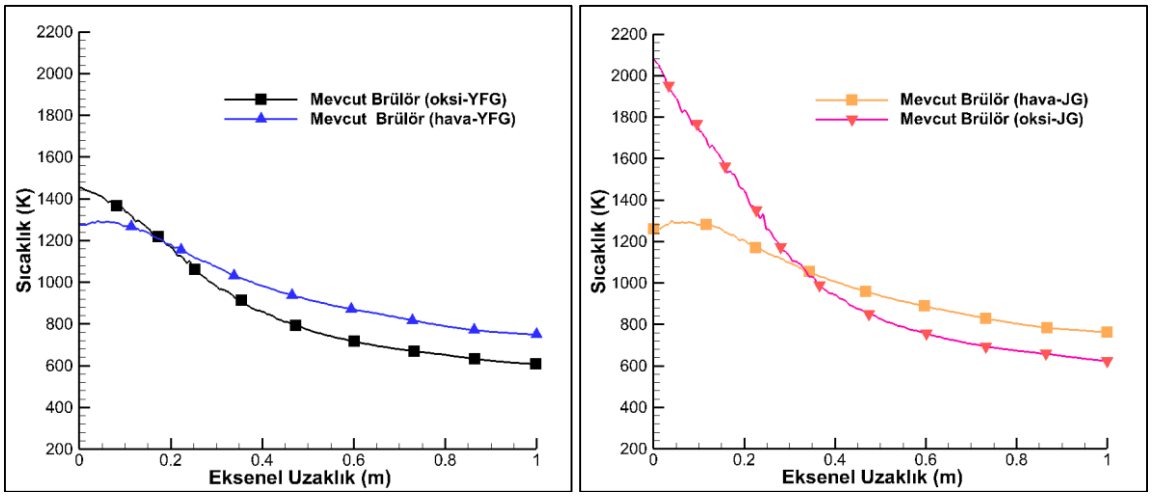


Şekil 6.13. Oksi-yanma koşullarında mevcut yakıcı için tahmin edilen ve ölçülen radyal sıcaklık dağılımları

6.4.2. Sıcaklık dağılımlarının karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde, jeneratör ve yüksek fırın gazlarının mevcut ve modifiye edilmiş yakıcı için (oksi-yakıcı) oksi-yanma koşullarında sıcaklık sayısal modelleme sonuçları sunulmuştur. Ayrıca, hava-yanma [4] ve oksi-yanma koşulları altında jeneratör ve yüksek fırın gazlarının yanma davranışlarına ilişkin sonuçlar da detaylı bir biçimde karşılaştırmalı olarak ele alınacaktır. Tüm yanma koşulları için jeneratör ve yüksek fırın gazlarının tahmin edilen eksenel sıcaklık dağılımları Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Bu gazların yanma sıcaklık performansları birbirleriyle karşılaştırıldığında, alt ısıl değerleri arasındaki fark nedeniyle jeneratör gazı yanma sıcaklık değerinin yüksek fırın gazından daha yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Çünkü jeneratör gazı yüksek miktarda yanabilir bileşen olan hidrojen içerirken, yüksek fırın gazı ise daha düşük miktarda yanabilir bileşen olan hidrojen daha yüksek miktarda yanamayan ve inert bir gaz olan azot içermektedir.

Bu gazlar, oksi-yanma koşulları altında modifiye edilmemiş yani mevcut yakıcı tarafından yakıldığında oksitleyici olarak kullanılan oksijen gazı, içeriğinde inert bir gaz olan nitrojen içermediğinden dolayı düşük kalorili sentez gazı alev sıcaklıklarının, alev bölgesinde hızla artırdığı rahatlıkla görülmektedir. Aşırı ısınmaya bağlı olarak yakıcı ve yanma odası malzemesi ile ilgili bir sorun olmadığı takdirde, bu sonuç, düşük kalorili sentez gazların yanma performansları için oldukça uygun bir sonuçtur. Bununla birlikte deneyden elde edilen düşük kalorili sentez gazlarına ait alev fotoğrafı (Resim 6.1) ve mevcut yakıcı için tahmin edilen sıcaklık dağılım sonuçları (Şekil 6.17a ve Şekil 6.17c) alevin yanma odası girişinde toplandığını göstermektedir. Daha önceki bölümde belirtildiği üzere bu durum eksenel hızların düşük olmasından kaynaklanmakta ve mevcut yakıcının aşırı ısınmasına sebep olmaktadır. Bu aşırı ısınma doğal olarak istenmeyen bir durum olduğundan dolayı oksi-yanma koşullarında sentez gazlarının yakılmasında kullanılan mevcut yakıcının modifiye edilmesini gerektirmiştir. Bundan dolayı, düşük kalorili sentez gazların oksi-yanma koşullarında daha iyi yanmasını sağlamak için mevcut yakıcının oksitleyici kesiti yaklaşık dört kat azaltılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 6.15, Şekil 6.17b ve Şekil 6.17d verilmiştir.



Şekil 6.14. Mevcut yakıcıda, yüksek fırın ve jeneratör gazlarının oksi-yanma ve hava-yanma eksenel sıcaklık dağılımları

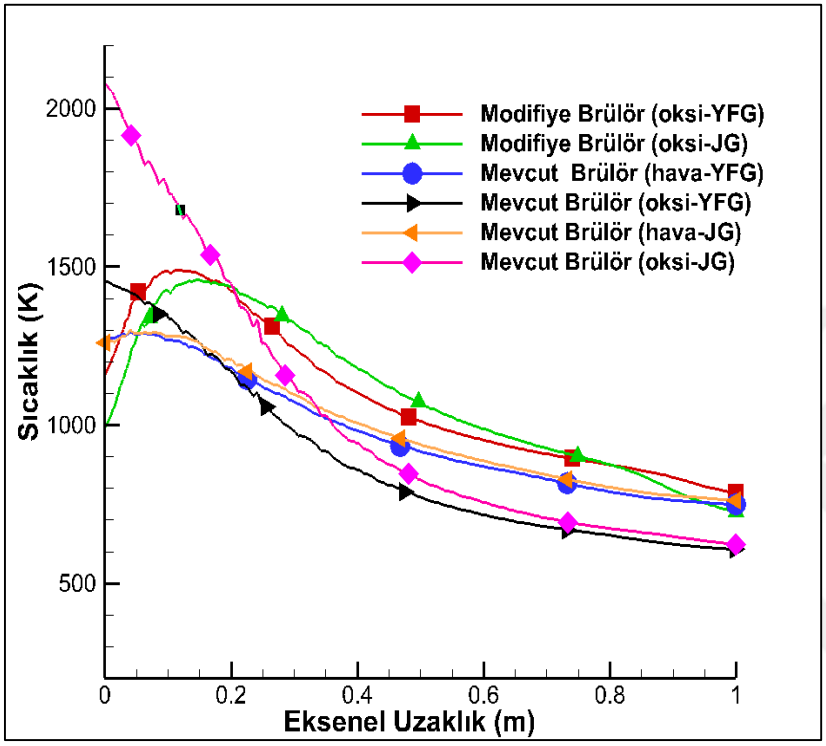
Mevcut yakıcı için, oksi-yanma ve hava-yanma sayısal modelleme sonuçları şekil 6.14'te karşılaştırılmıştır. Oksi-yanmada gaz alevleri yakıcı içine toplandığından dolayı her iki sentez gazı içinde alev bölgesine yakın mesafelerde oksi-alev sıcaklıkları hava-alev sıcaklığından daha yüksek gerçekleşirken; yanma odası çıkışına gidildikçe oksi-alev sıcaklıkları kademeli olarak azalmaktadır. Ayrıca, tüm yanma koşullarındaki sıcaklık seviyelerinin, taşınım ve özellikle radyasyonla ısı transferleri nedeniyle yanma odasının merkezinden duvarlara doğru kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir.

Modifikasyon yapıldıktan sonra sayısal modellemeler gerçekleştirilmiş ve düşük kalorili sentez gazlara ait sıcaklık dağılımları Şekil 6.15 ve 6.17 de çizilmiş ve Şekil 6.17b, Şekil 6.17d kontur grafikleri olarak sunulmuştur.

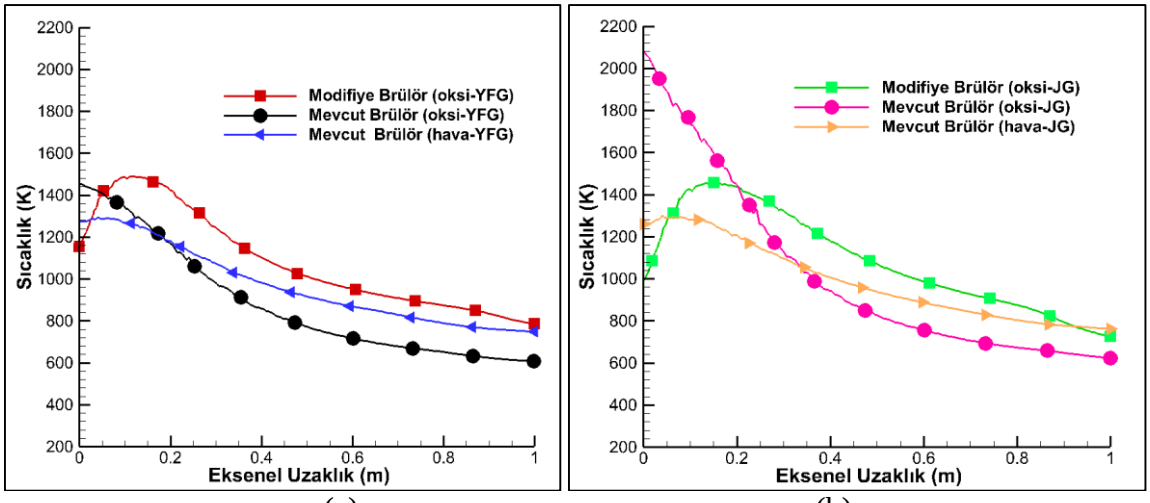
Şekillerden anlaşılacağı üzere, yapılan bu değişiklikle düşük kalorili sentez gaz alevleri yakıcının dışına yani yanma odasına doğru taşınmakta, daha kararlı bir alev elde edilmekte ve yanma odası içerisinde alev, düzgün dağılım göstermektedir.

Modifikasyonun, düşük kalorili sentez gazı yanma performanslarını oksi-yanma koşulları altında sıcaklık dağılımları bakımından geliştirilmesini mümkün kıldığı sonucuna varılabilir. Yapılan bu değişiklikle düşük kalorili sentez gazları için oksi-yanma koşulları altında hem daha kararlı bir alev elde edilmesi sağlanmış hem de yanma odası içerisinde alevin düzgün dağılım göstermesinde dolayı yakıcı duvarının aşırı ısınması önlenmiştir. Şekil 6.15, 6.16 ve 6.18'den görüleceği üzere gibi yapılan modifikasyon, sentez gazlarının

yanma odası çıkışında daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmasını sağlamıştır. Bütün bu bulgular neticesinde, düşük kalorili sentez gazlarının, oksi-yanma koşulları altında oksi yakıcıyla yakıldığı yanma odalarında, fırınlarda vb. yerlerde alternatif yakıt olarak kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

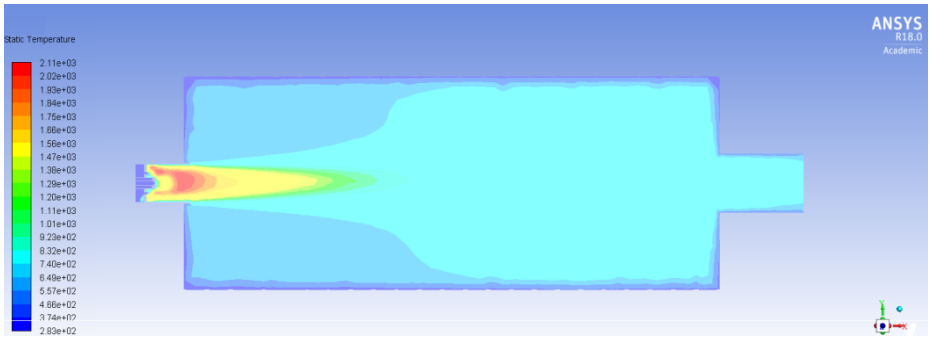


Şekil 6.15. Düşük kalorili sentez gazların eksenel sıcaklık dağılımları

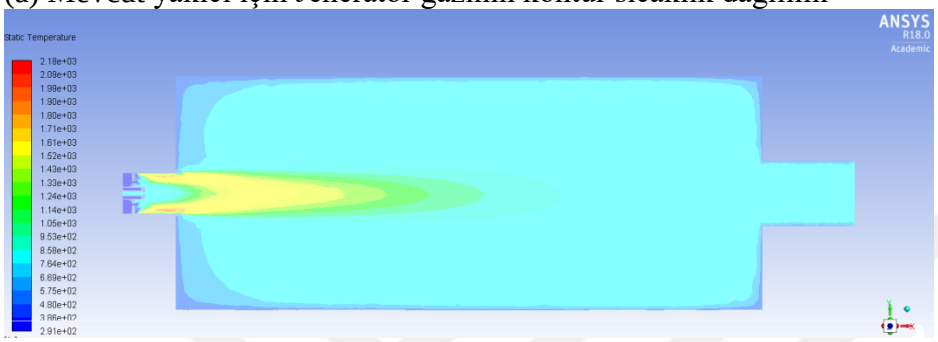


(a) (b)

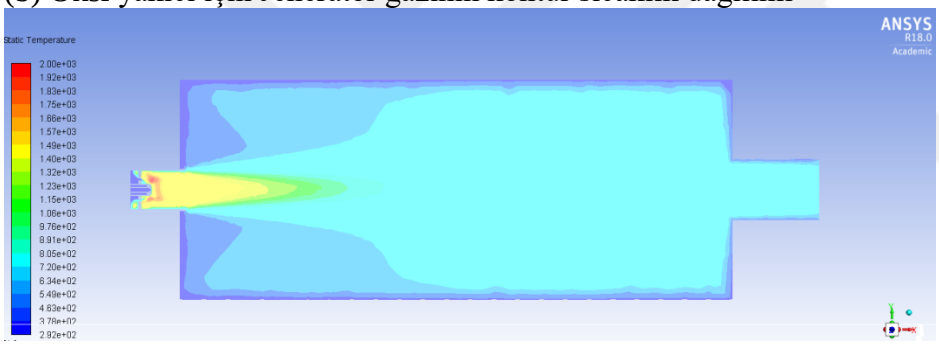
Şekil 6.16. (a) Mevcut ve oksi yakıcıda, yüksek fırın gazının oksi-yanma ve hava-yanma eksenel sıcaklık dağılımları, (b) Mevcut ve oksi yakıcıda, jeneratör gazının oksi-yanma ve hava-yanma eksenel sıcaklık dağılımları



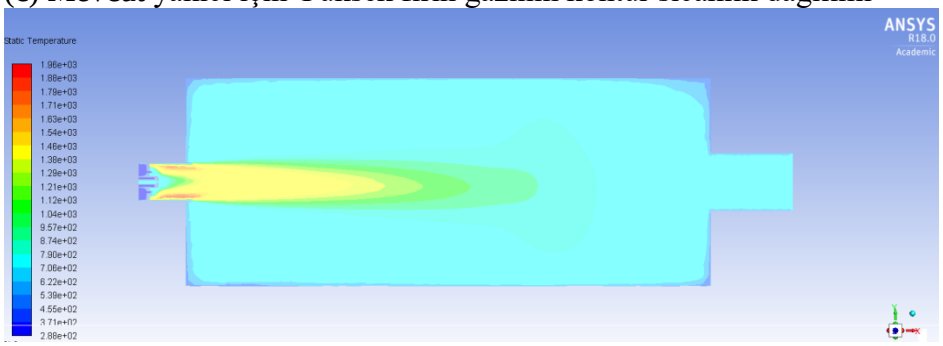
(a) Mevcut yakıcı için Jeneratör gazının kontur sıcaklık dağılımı



(b) Oksi yakıcı için Jeneratör gazının kontur sıcaklık dağılımı

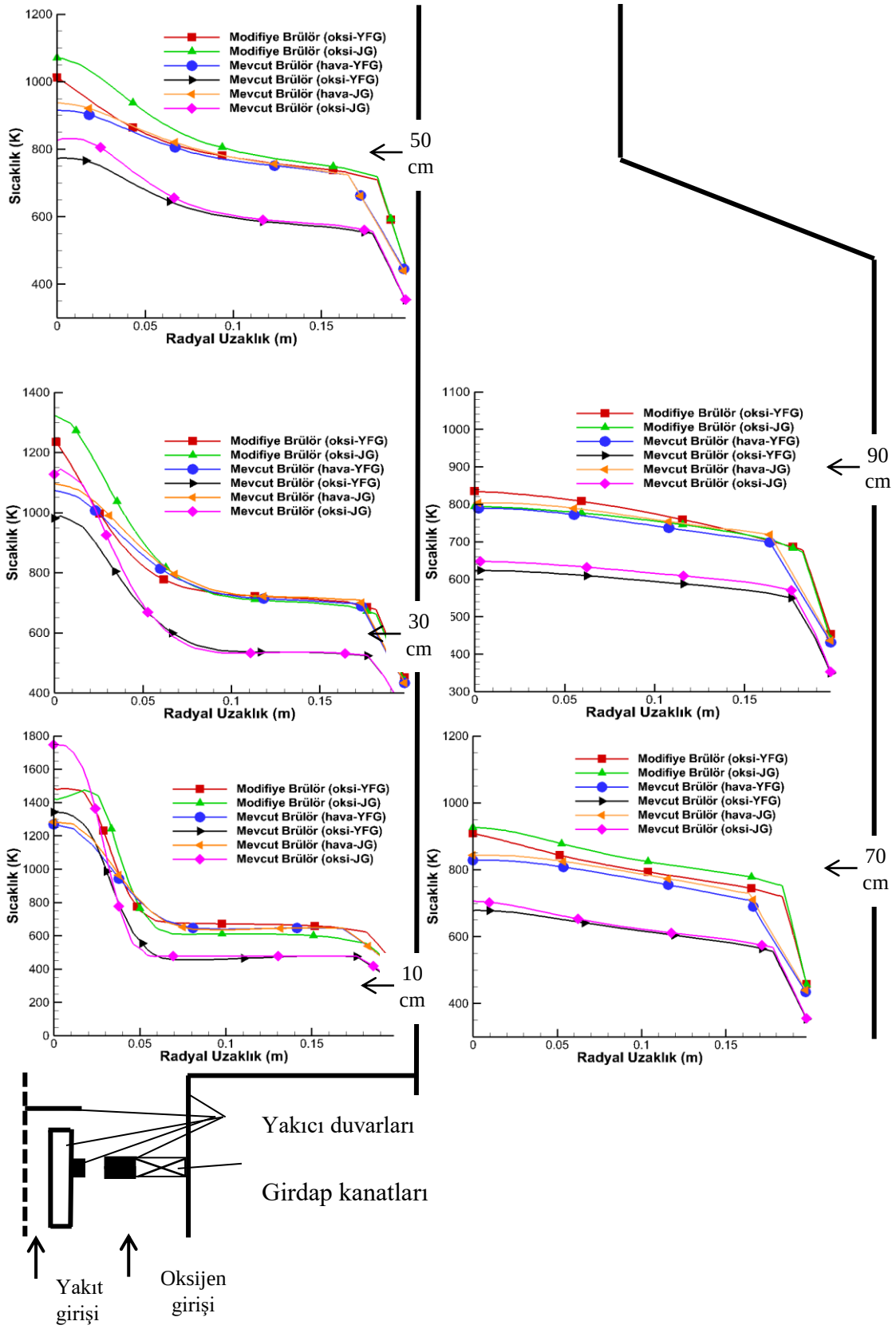


(c) Mevcut yakıcı için Yüksek fırın gazının kontur sıcaklık dağılımı



(d) Oksi yakıcı için Yüksek fırın gazının kontur sıcaklık dağılımı

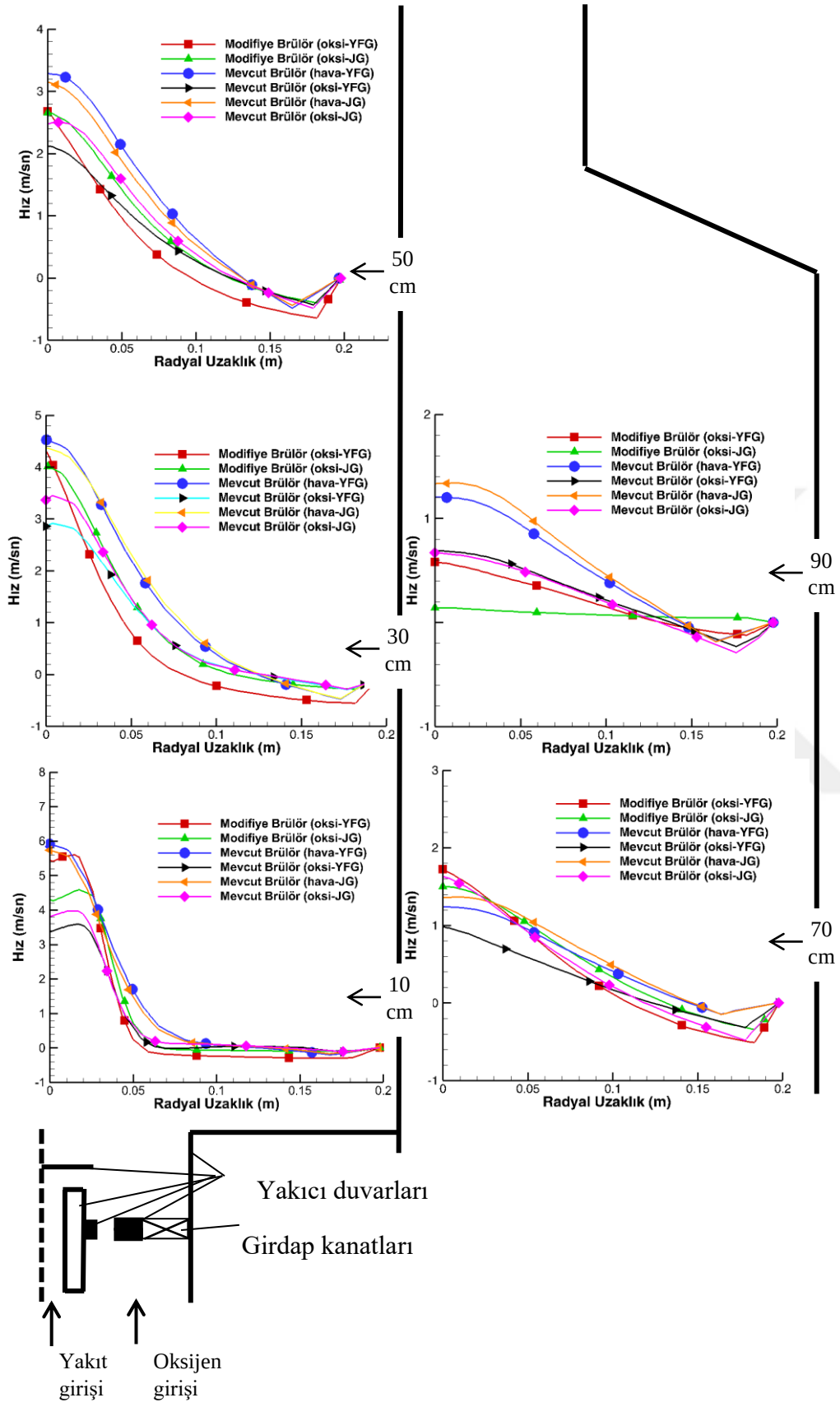
Şekil 6.17. Oksi-yanma koşulları altında jeneratör ve yüksek fırın gazlarının mevcut ve oksi yakıcı için kontur sıcaklık dağılımları



Şekil 6.18. Düşük kalorili kömür gazlarının tüm yanma koşulları için radyal sıcaklık dağılımları

6.4.3. Hız dağılımlarının karşılaştırılması

Yanma işlemlerinde yanma sonu ürünlerinin yayılım gösterdiği bölgeleri ve alev özelliklerini belirlemeye yardımcı olduğundan dolayı hız dağılımları belirlemek önemli bir konudur. Düşük kalorili sentez gazlarının tüm yanma koşulları için tahmini eksenel hız profilleri belirlenmiş ve Şekil 6.19'da gösterilmiştir. Şekil 6.19 detaylı olarak incelendiğinde, tüm yanma koşullarında maksimum eksenel hız değerlerinin alev bölgelerinde ortaya çıktığı söylenebilir. Oksi-yanma koşullarında modifiye edilmemiş yakıcı için oksitleyici kesitindeki oksijen debisinin havaya göre 4 kata yakın daha az olmasına bağlı olarak tahmini eksenel hız değerlerinin hızlı bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bu durum oksi-yanmada alevin yanma odası girişinde mevcut yakıcı içine doğru toplanmasını önlemeye dönük yapılan modifikasyonun nedenini açıklamaktadır. Bu nedenle hem bu sorunu çözmek hem de yakıcı duvarının aşırı ısınmasını önlemek adına yakıcının oksitleyici kesiti, saf oksijen geçişine uygun olması için modifiye edilmiştir. Böylece, oksi yakıcı için düşük kalorili sentez gazlarının eksenel hız değerleri, Şekil 6.19'da görülebileceği gibi artmıştır. Ayrıca tahmini eksenel hız değerlerinin yanma odası çıkışına doğru kademeli olarak azaldığı tüm yanma şartları için belirlenmiştir.



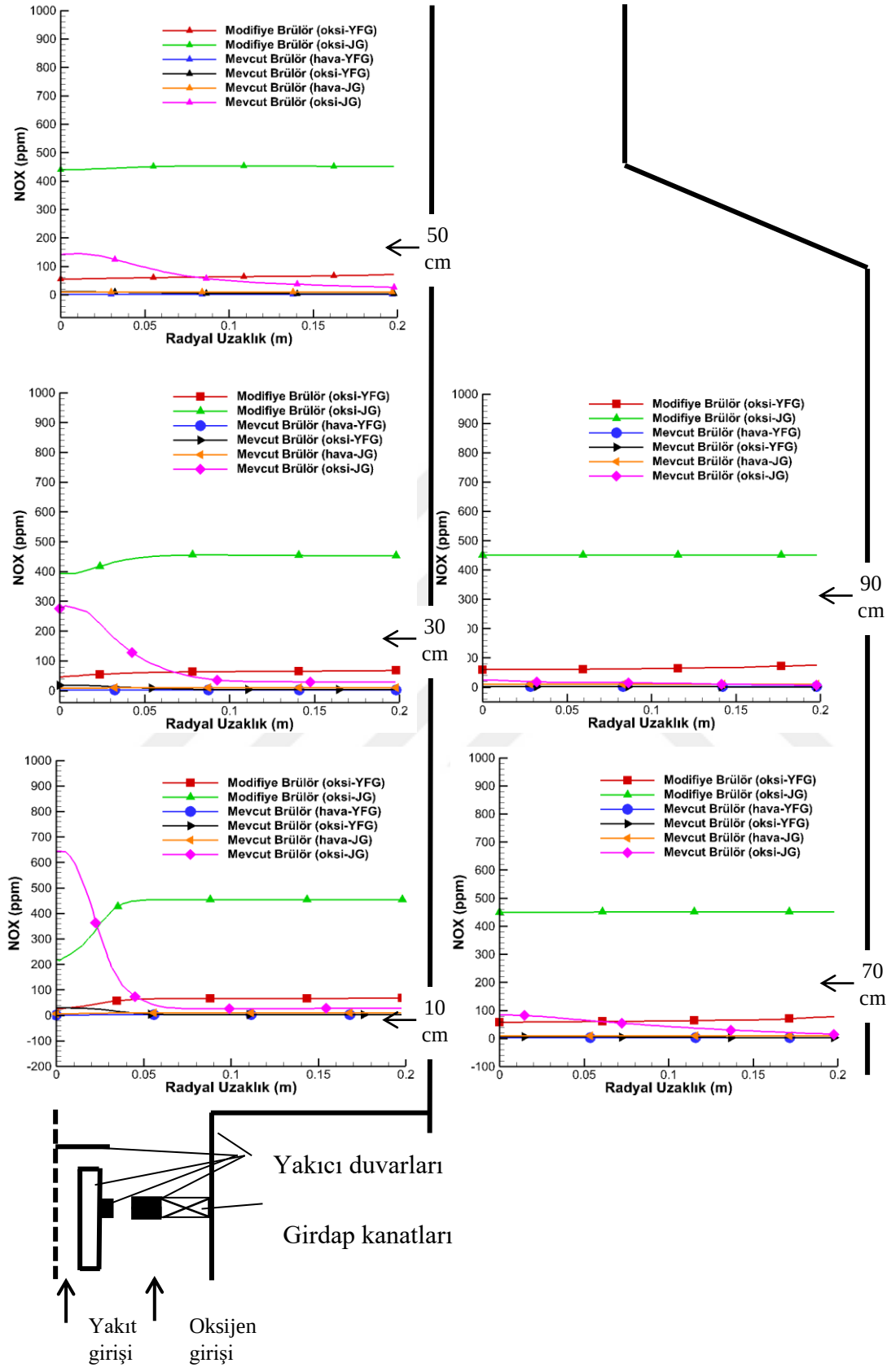
Şekil 6.19. Düşük kalorili kömür gazlarının tüm yanma koşulları için eksenel hız dağılımları

6.4.5. Emisyon ölçümlerinin karşılaştırılması

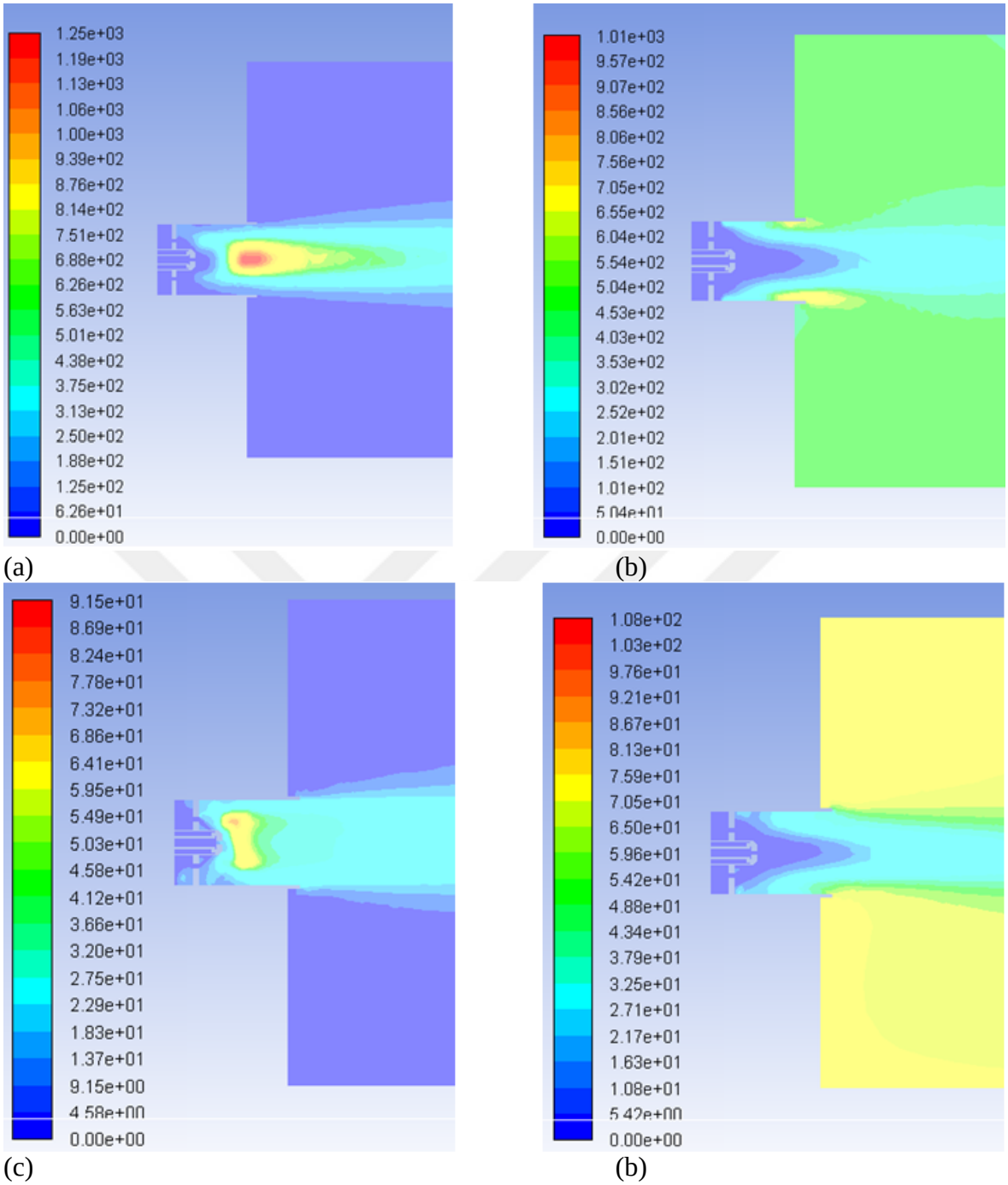
Atmosferdeki su buharı ile reaksiyona girdiğinde asit yağmurlarının oluşmasına ve ozon tabakasının delinmesine neden olan NOx (NO ve NO_2), kirletici bir emisyondur. Bundan dolayı yanma sonrası NOx emisyon seviyesinin araştırılması gerekir. Öncelikle NOx oluşum mekanizmalarının bilinmesi önem arz etmektedir. Genel olarak ısıl NO_X, hızlı (ani) NO_X ve yakıt NO_X olarak adlandırılan üç NO_X oluşum mekanizması olduğu bilinmektedir. IsıI-NO yakıcı gazdaki atmosfer azotunun, ortamda yeteri kadar oksijen bulunması halinde "ısıl" mekanizma ile oksijenle birleşmesi sonucu oluşmaktadır. Yakıt NO_X, yakıtta var olan azotun oksidasyonundan kaynaklanır. Ani NO_X'un, alev bölgesindeki yakıt parçacıkları ile N_2 reaksiyonu sonucu oluştuğu düşünülmektedir [4].

Bu çalışmada, tüm yanma koşulları için NO_X emisyon profilleri sayısal modellemelerle tahmin edilmiştir. Şekil 6.20'de düşük kalorili sentez gazlarının tahmini radyal NO_X profilleri gösterilmektedir. Hava-yanma koşulları altında düşük kalorili jeneratör ve yüksek fırın gazlarının NOx profilleri değerlendirildiğinde, düşük alev sıcaklıklarına bağlı olarak oluşan NO_X seviyelerinin ihmal edilebilir olduğu rahatlıkla söylenebilir. Oksi-yanma koşullarında ise, mevcut yakıcı için tahmin edilen NO_X seviyeleri, sıcaklık profillerinde görüldüğü üzere, termal NO_X mekanizması nedeniyle alev bölgelerinde hızla artmaktadır. Bu durum NOx dağılımlarını gösteren Şekil 6.21a ve 6.21c konturlarında rahatlıkla görülebilir. Ayrıca yanma odası boyunca sıcaklı düşmesinden dolayı mevcut yakıcıda, yanma odasında tahmin edilen NO_X değerleri, alev bölgesinde tahmin edilen NO_X değerlerinden daha düşük çıkmaktadır.

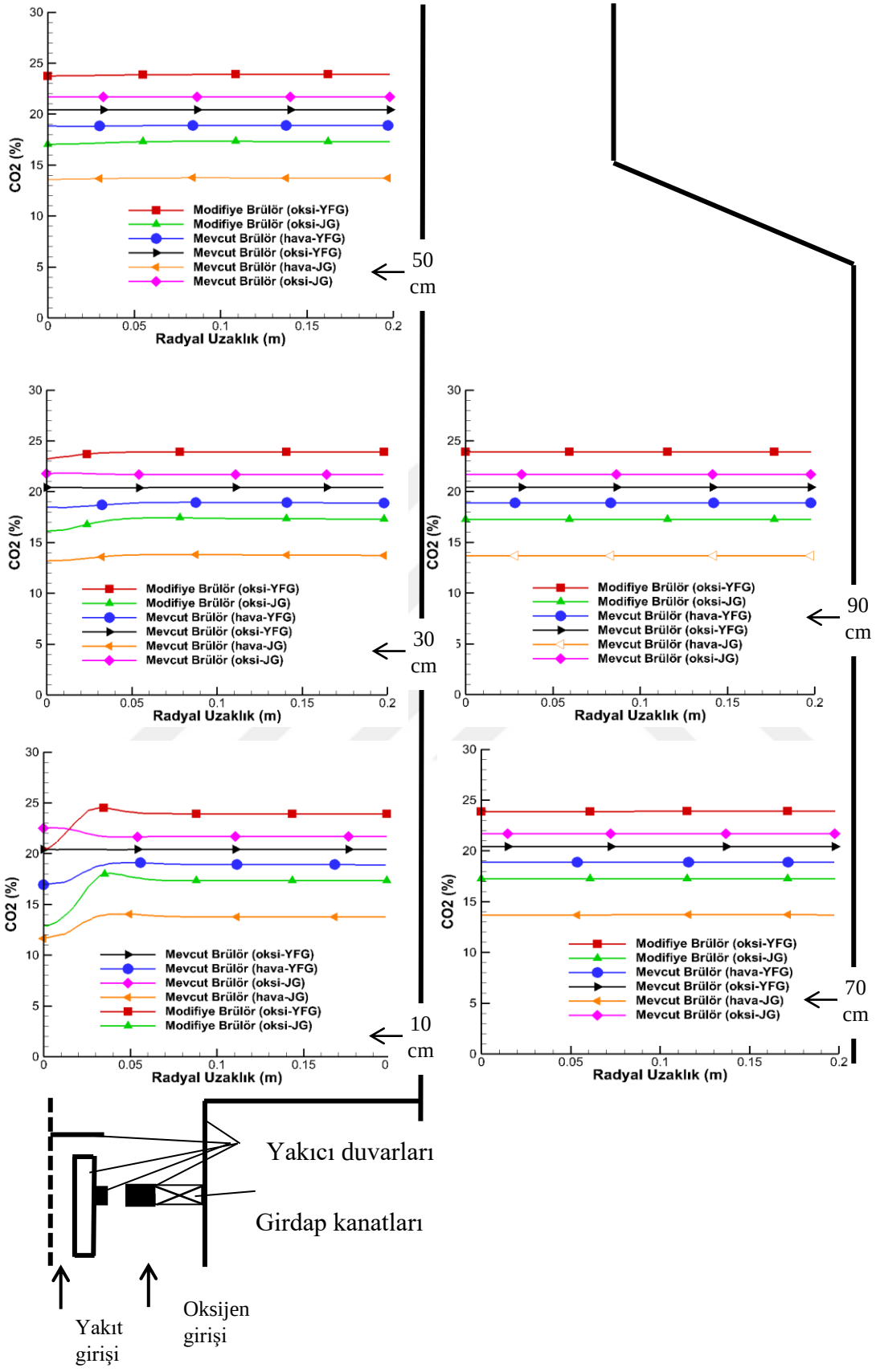
Modifiye edilmiş oksi-yanma yakıcısı için alev bölgesinde tahmin edilen NOx seviyesi, mevcut yakıcı için tahmin edilen NO_X seviyesine göre daha düşük çıktığı Şekil 6.21b ve Şekil 6.21d konturlarında görülmektedir. Ayrıca, bu gazların tahmin edilen NO_X seviyeleri, mevcut yakıcıdakinin aksine oksi yakıcıda yanma odası boyunca hızla artmakta ve alev bölgesi dışında yanma odası içerisinde homojen hale gelmektedir. Bu durumun, modifikasyonla gazların hızlarının artmasına bağlı olarak alevin yanma odasında düzgün dağılmasından kaynaklandığı ileri sürülebilir. Her iki durumda da NOx seviyeleri, yanma odası çıkışına doğru kademeli olarak azalmaktadır. Kısacası, modifikasyonun, alev bölgelerinde tahmin edilen NO_X seviyelerinin azalmasına yol açarken; yanma odasındaki tahmin edilen NO_X seviyelerinin artmasını neden olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 6.20. Düşük kalorili kömür gazlarının tüm yanma koşulları için radyal NOx dağılımları



Şekil 6.21. Mevcut (a ve c) ve oksi-yanma (b ve d) yakıcılar için konturlar (ppm cinsinden birim) için jeneratör gazı (a ve b) ve yüksek fırın gazı (c ve d) NO_X dağılımları



Şekil 6.22. Düşük kalorili kömür gazlarının tüm yanma koşulları için radyal CO_2 dağılımları

Bir diğer önemli emisyon unsuru ise CO_2'dir ve genel olarak oksi-yanma koşullarında CO_2 seviyeleri daha yüksek çıkmaktadır. Bu da doğal olarak oksi-yanma koşullarında yanmanın daha iyi gerçekleşmesinden kaynakladığı söylenebilir. Bu nedenle yanmadan sonra CO_2 seviyelerinin belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada, tahmin edilen radyal CO_2 dağılımları Şekil-21'de verilmiştir.

Şekil-21, yanma odası boyunca oksi-yanma koşullarında hem mevcut yakıcı için CO_2 seviyelerini verirken hem de yakıcının modifiye edilmesinin, CO_2 seviyelerini nasıl etkilediğini göstermektedir. İlk olarak, bu gazlar mevcut yakıcı için saf oksijenle yakıldığında jeneratör ve yüksek fırın gazlarının tahmini CO_2 seviyelerinin arttığı söylenebilir. Mevcut yakıcının oksitleyici kesiti modifiye edildiğinde, yüksek fırın gazının tahmin edilen CO_2 seviyesi artarken, jeneratör gazının tahmin edilen CO_2 seviyesi azalmaktadır. Bu sonuç, yüksek fırın gazı içerisindeki CO ve CO_2 miktarının jeneratör gazından daha yüksek olması gerçeği ile açıklanabilir. Bir başka deyişle, yüksek fırın gazında bulunan CO'nun modifikasyon yapıldığında hızla CO_2'ye dönüştüğü düşünülmektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düşük kalorili sentez gazlarının yanma özellikleri, oksi-yanma koşullarında mevcut ve modifiye edilmiş yakıcı (oksi-yakıcı) için araştırılmıştır. Çalışmanın sayısal bölümünde 3D sayısal modellemeler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) kodu ile gerçekleştirilmiştir. Bunun için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yaygın olarak kullanılan K-epsilon (k-ε) türbülans modeli, the mixture fraction/PDF yanma modeli ve P-1 radyasyon modeli kullanılmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde deneysel verilerle karşılaştırma yapabilmek amacıyla mevcut düşük kalorili sentez gazı yakıcısı ile elde edilen sayışa tahmini veriler kullanılmıştır. Öncelikle, düşük kalorili sentez gazları için mevcut düşük kalorili sentez gazı yakıcısı ile elde edilen sayısal tahmini sıcaklık dağılımları, yanma odası boyunca ölçülen deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve eksenel sıcaklık profillerinin uyumlu olduğu görülmüştür. Mevcut yakıcı için hem deneysel hem de sayısal sonuçlar oksi-yanmada alevin yanma odası girişinde yakıcı içine doğru toplandığını göstermiştir. Bu durum istenilmeyen bir biçimde mevcut yakıcı duvarının aşırı ısınmasına sebep olmuştur. Bu durum kaçınılmaz bir biçimde mevcut yakıcının oksitleyici kesiti yaklaşık 4 kat azaltılarak, saf oksijen geçişine daha uygun olmasını sağlamaya dönük modifikasyon yapılması zorunluluğunu ortaya koymuştur. Bundan dolayı, mevcut yakıcı duvarının aşırı ısınmasını önlemek ve daha kararlı alev elde etmek için yakıcının oksitleyici kesiti modifiye edilmiş ve bu modifikasyonun düşük kalorili sentez gazlarının yanma özellikleri üzerine etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Ayrıca, mevcut yakıcı içinde tahmin edilen oksi-yanma sonuçları ile Karyeyen tarafından literatüre kazandırılan hava-yanma [4] sonuçları ile detaylı bir biçimde karşılaştırılmıştır.

7.1. Sonuçlar

1. Çalışmanın deneysel bölümünde gerçekleştirilen ölçümler neticesinde, yanma odası boyunca en yüksek sıcaklık değeri 7 cm'lik türbülatör mesafesinde ve jeneratör gazı alev bölgesinde elde edilmiştir. Düzeltilmiş değeri 1377,6 K'dır. Hava-yanma koşullarında yanma odası boyunca elde edilen en yüksek sıcaklık değerinin metan gazı alev bölgesinden elde edilen 1466 K [4] olduğu düşünüldüğünde, jeneratör gazı için oksi-yanma koşullarında elde edilen 1377,6 K sıcaklık değeri düşük kalorili kömür gazlarının yakma sistemlerinde kullanılabilirliği açısından çok ciddi bir sonuçtur.

Ayrıca, hem Jeneratör gazının hem de Yüksek fırın gazının oksi-yanma sıcaklık değerleri, hidrojen beslemesiz hava ile yanma ve 10 kW'lık ısıl güç koşullarında ölçülen eksenel sıcaklık değerlerine göre alev bölgesinde yaklaşık % 20 daha yüksek çıkmaktadır. Bu sonuç, oksi-yanma koşullarında düşük kalorili kömür gazlarının kullanımının yaygınlaştırılabileceğini göstermektedir.

2. Eksenel ölçümlerin aksine radyal ölçümlerde; türbülatör 7 cm den yakıcı çıkışına (2 cm) taşındığında kömür gazlarının alev sıcaklıklarının arttığı söylenebilir. Çünkü türbülatör mesafesinin 2 cm olduğu yanma koşullarındaki alev, diğer duruma kıyasla daha geniş ve ölçüm noktalarına yani yanma odasının duvarlarına daha yakındır. Ayrıca, tüm ölçüm koşullarında alev bölgesinden yanma odası duvarına doğru gidildikçe, elde edilen sıcaklık değerlerinde hızlı bir düşme meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumun, kullanılan yanma odasının ani genişlemeli bir yanma odası olmasında kaynaklandığı düşünülmektedir. Hem eksenel hem de radyal ölçümler sonucunda yakıcı duvarlarındaki aşırı ısınmayı azaltmak için türbülatörün, 7 cm den 2 cm ye çekme modifikasyonu düşük kalorili kömür gazlarının oksijenle yanma performanslarının artmasına hizmet ettiği sonucuna varılabilir.
3. Tüm yanma koşullarındaki sıcaklık seviyelerinin, taşınım ve özellikle radyasyonla ısı transferleri nedeniyle yanma odasının merkezinden duvarlara doğru kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Bu kayıpları göz önünde bulundurmak amacı ile deneylerde kullanılan ısıl çiftler elde edilen sıcaklık değerlerinin ışınımdan kaynaklı ısı kaybına karşı kullanılan sıcaklık verilerinde düzeltmeler yapılmıştır. Bu düzeltme işlemleri, elde edilen sıcaklık verilerine göre değişkenlik göstermekte olup, jeneratör gazı için 0-56 K ve yüksek fırın gazı için ise 2-30 arasından değişiklik göstermiştir.
4. Çalışmanın deneysel bölümünde elde edilen emisyonlara bakıldığında; tüm yanma koşullarında en yüksek NO_X değeri 10 cm eksenel mesafede 7 cm türbülatör pozisyonunda jeneratör gazı alev bölgesinde ölçülmüştür (217 ppm). Bu sonuç doğrudan ölçülen sıcaklık değeri ile ilgilidir. Aynı sonuç, yüksek fırın gazının yanmasında da görülmüştür. Her iki kömür gazı için diğer eksenel mesafelerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bunun temel nedeni, kömür gazlarında bulunan serbest azotların ısıl NO_X mekanizması ile NO_X oluşumuna katkı sağlamasıdır.
5. Yanma odası boyunca radyal yönde sıcaklık seviyelerinin önemli derecede düşmesinden dolayı, NO_X seviyelerin de paralel bir biçimde azalma görülmüştür. Yanma odası çıkışına doğru, benzer durumun devam ettiği ve türbülatör pozisyonunun 7 cm den 2 cm değiştirildiğinde jeneratör ve yüksek fırın gazı için alev bölgesi dışında

ölçülen NO_X değerleri sıcaklıkla paralel bir davranış göstererek 7 cm de ölçülen değerlere göre nispeten yükselmiştir. NO_X emisyonu doğrudan sıcaklık seviyesi ile ilişkili olduğu halde NO_X artışı sıcaklık artışına göre çok daha az olmuştur. Bundan dolayı düşük kalorili kömür gazlarının oksijenle yanmasında yüksek NO_X emisyonu sorun olmadığı sonucuna varılabilir.

6. Isıl NOx mekanizmasından dolayı hava-yanmaya göre oksi-yanma da NOx oluşumunda artış söz konusudur. Bilhassa alev bölgesinde bu rahatlıkla görülmektedir. Daha öncede belirtmiş olunduğu üzere hava-yanmaya göre oksi-yanma koşullarında alev bölgesi sıcaklığındaki ciddi artış nedeniyle bu bölgede NO_X oluşumuna ısıl NO_X mekanizmasının katkısı oldukça fazla olmaktadır. Fakat yanma odası çıkışına doğru ölçülen NOx emisyon değerleri sıcaklık değerlerindeki azalmaya bağlı olarak yavaş yavaş azalmaktadır.
7. Tüm yanma şartları için en yüksek CO_2 düzeyi, 10 cm eksenel mesafede 7 cm türbülatör pozisyonunda oksijen-yakıt karışımının en iyi olduğu jeneratör gazı alev bölgesinde (yani radyal dağılımın merkezinde) ölçülmüştür. Diğer eksenel mesafelerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak radyal ölçümlerde, CO_2 seviyesi 10, 30 ve 50 cm lik eksenel mesafelerde alev merkezinde yanma duvarına doğru ilk 5 cm lik radyal mesafede yavaş yavaş azalırken, diğer radyal mesafelerde ise yanma odası duvarına doğru yaklaştıkça hafifçe artmaktadır. 70 ve 90 cm lik radyal mesafelerde ise alev bölgesinden yanma odası duvarına düşük eğilimli de olsa artış göstermektedir. Bu sonuç, yanma sonu CO_2 ürünlerinin, yanma odasına doğru nispeten yayıldığını göstermektedir. Ayrıca, türbülatör yakıcı çıkışına hareket ettirildiğinde CO_2 seviyesinin azaldığı görülmüştür. Bu nedenle, türbülatör mesafe değişikliğinin tıpkı NO_X emisyonlarında olduğu gibi, düşük kalorili kömür gazlarının oksi-yanma koşullarında CO_2 emisyon seviyelerini arttırmadığı sonucuna varılabilir.
8. Düşük kalorili kömür gazlarının yanma odası boyunca maksimum CO düzeyleri alev bölgesinde gözlemlenmiştir. Bu durum, alev bölgesinde henüz yanmanın tam olarak tamamlanmadığı şeklinde yorumlanabilir. En yüksek CO düzeyi ise 2 cm türbülatör mesafesinde yüksek fırın gazı alev bölgesinde ölçülmüştür. Bu durum, 2 cm türbülatör mesafesindeki yüksek fırın gazının, jeneratör gazına göre sıcaklığının daha az olmasından ve CO içeriğinin ise biraz fazla olmasından kaynaklığı düşünülmektedir. Diğer eksenel mesafelerde ise farklı sonuçlar elde edilmiştir.
9. Ancak radyal ölçümlerde, CO seviyesi yanma odası çıkışına doğru gidildikçe kısmen artış gösteriyor gibi gözükse de alev bölgesinde ölçülen değerlerin çok altında

kalmaktadırlar. Ayrıca, türbülatör yakıcı çıkışına hareket ettirildiğinde CO seviyesinin azaldığı görülmüştür. Bu nedenle, türbülatör mesafe değişikliğinin tıpkı NO_X emisyonlarını olduğu gibi, düşük kalorili kömür gazlarının oksi-yanma koşullarında CO emisyon seviyelerini arttırmadığı sonucuna varılabilir.

10. Hava-yanmaya göre oksi-yanma da NOx oluşumunda ısıl NOx mekanizmasından dolayı artış söz konusudur. Bilhassa alev bölgesinde bu rahatlıkla görülmektedir. Fakat yanma odası çıkışına doğru ölçülen NOx emisyon değerleri sıcaklık değerlerindeki azalmaya bağlı olarak yavaş yavaş düşmektedir.
11. Hava-yanma ve oksi-yanma koşullarının tam olarak anlaşılabilmesi için CO_2 emisyonlarının karşılaştırılması önemlidir. Tüm yanma koşullarında eksenel ölçümlerde oksi-yanma koşullarındaki CO_2 emisyonları hava-yanmaya göre daha yüksektir. Buna karşın yanma odası boyunca oksi-yanma koşullarında elde edilen CO emisyonları hava-yanma koşullarında elde edilen CO emisyonlarına göre daha düşük gerçekleşmektedir. Bundan dolayı yanma işleminde yanma verimliliği açısından oksi-yanmanın daha iyi olduğu söylenebilir. Dahası, bu durum yüksek miktarda azot ve az miktarda yanabilir bileşen içeren kömür gazlarının yakılmasında daha bir önem kazanmaktadır. Gerçekleştirilen deneyler neticesinde hava yerine oksidant olarak oksijen kullanılması karbon monoksitin daha iyi yanmasını sağlamaktadır. Bu da emisyonu azaltan bir durumdur.
12. Çalışmanın sayısal modelleme sonuçlarına göre, hava-yanma yakıcısına göre oksi-yakıcıda oksi-yanma koşullarında düşük kalorili sentez gazları için kararlı bir alev elde edilmesi sağlanmış ve yanma odası içerisinde alevin düzgün dağılım göstermesinden dolayı yakıcı duvarının aşırı ısınması sorunu çözülmüştür. Bu nedenle, gerçekleştirilen yakıcı modifikasyonunun, yanma odası içinde homojen sıcaklık dağılımını kolaylaştırdığı ve yanma performanslarının iyileştirilmesine ve kömür gazlarının yanma odası çıkışında daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmasını olanak sağladığı sonucuna varılabilir.
13. Çalışmanın sayısal bölümünde yapılan sıcaklık tahminleri değerlendirilecek olursa, yapılan modifikasyonun, kömür gazlarının yanma odası çıkışında daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmasını sağladığı ortaya konulmuştur.
14. Çalışmanın sayısal bölümünde yapılan emisyon tahminleri değerlendirilecek olursa, oksi-yanma koşullarında ise, mevcut yakıcı için tahmin edilen NO_X seviyeleri alev bölgelerinde hızla artarken, yanma odası boyunca sıcaklı düşmesinden dolayı mevcut yakıcıda, yanma odasında tahmin edilen NO_X değerleri, alev bölgesinde tahmin edilen

NO_X değerlerinden daha düşük çıkmaktadır. Ayrıca, mevcut yakıcıda yapılan modifikasyonun NO_X seviyeleri açısından etkisi yüksek fırın gazında dikkate alınmayacak kadar az iken, jeneratör gazı için alev bölgesinde NO_X seviyelerinin azalmasına fakat yanma odası içinde ise NO_X seviyelerinin artmasını neden olduğu sonucuna varılabilir.

15. Bir diğer önemli emisyon unsuru ise CO_2'dir, Genel olarak oksi-yanma koşullarında CO_2 seviyeleri daha yüksek çıkmaktadır. Ayrıca, mevcut yakıcıda düşük kalorili kömür gazları saf oksijenle yakıldığında tahmini CO_2 seviyelerinin arttığı söylenebilir. Mevcut yakıcının oksitleyici kesiti modifiye edildiğinde, yüksek fırın gazının tahmin edilen CO_2 seviyesi artarken, jeneratör gazının tahmin edilen CO_2 seviyesi azalmaktadır. Bu sonuç, yüksek fırın gazı içerisindeki CO ve CO_2 miktarının jeneratör gazından daha yüksek olması gerçeği ile açıklanabilir. Bir başka deyişle, yüksek fırın gazında bulunan CO'nun modifikasyon yapıldığında hızla CO_2'ye dönüştüğü düşünülmektedir. Hülasa, CO_2 emisyon seviyeleri değerlendirildiğinde, modifikasyonun yüksek fırın gazının CO_2 seviyesinin az miktarda artmasına neden olurken, jeneratör gazının CO_2 emisyonunda hafif bir azalmaya yol açtığı sonucuna varılabilir.
16. Çalışmanın sayısal bölümünde elde edilen diğer bir parametrede, deneysel bölümde ölçümü yapılamayan hız dağılımları olmuştur. Bu dağılımlar, tüm yanma koşullarında düşük kalorili kömür gazları için yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisinde hangi bölgelere doğru hareket ettiklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Elde edilen sonuçlara göre, tüm yanma koşullarında maksimum eksenel hız değerlerinin alev bölgelerinde ortaya çıktığı ve tahmini eksenel hız değerlerinin yanma odası çıkışına doğru kademeli olarak azaldığı tüm yanma şartları için belirlenmiştir.
17. Bütün bu bulgular neticesinde, düşük kalorili sentez gazlarının, oksi-yanma koşulları altında oksi yakıcıyla yakıldığı yanma odalarında, fırınlarda vb. yerlerde alternatif yakıt olarak kullanılabilir olduğu ortaya konmuştur. Bununla birlikte yakıcı duvarının aşırı ısınmasını önlemek ve daha kararlı alev elde etmek için yanma işleminde kullanılan yakıcının, oksitleyici kesitinin bir modifikasyon gerektirdiği dikkatten kaçmamalıdır.

7.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen tecrübeler ve bilgiler ışığında, düşük kalorili kömür gazlarının başarılı bir şekilde yakılması, yanma ve emisyon performansı ile ilgili

ileride yapılacak çalışmalarda, aşağıda maddeler halinde belirtilen durumların ve /veya önerilerin dikkate alınması yapılacak olan çalışmalar için yararlı olacağı düşünülmektedir.

1. Hız dağılımları, tüm yanma koşullarında düşük kalorili kömür gazları için yanma sonu ürünlerinin yanma odası içerisinde hangi bölgelere doğru hareket ettiklerinin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bundan dolayı deneysel bölümde ölçümü yapılamayan hız dağılımları belirlenebilir. Böylelikle sayısal modelleme ile elde dilen veriler deneysel verilerle karşılaştırma imkânı bulunmuş olacaktır.
2. Isıl NOx mekanizmasından dolayı hava-yanmaya göre oksi-yanma koşullarında alev bölgesi sıcaklığındaki ciddi artışa bağlı olarak oluşan yüksek miktarda NO_X emisyonlarının azaltılmasına yönelik deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilebilir
3. Çalışmada kullanılan düşük kalorili kömür gazları model bir yanma odasında gaz türbin işletme şartlarında yakılarak, yanma odası çıkışında (türbin girişi) yanma ve emisyon dağılımları belirlenebilir.
4. Türkiye'nin elektrik üretiminden kaynaklı CO_2 emisyonlarında elde edilen enerji değerine karşılık daha fazla emisyona sebep olan ve önemli bir yerli kaynak konumundaki linyitten elde edilecek olan kömür gazı ve bu çalışma neticesinde elde edilen oksi-yakıcı kullanarak benzer deneysel ve sayısal çalışmaların yapılması yerli sermayenin değerlendirilmesi açısında önem arz edebilir.
5. Çalışmada kullanılan düşük kalorili kömür gazları imal edilecek oksi-yakıcı ile oksi-yanma koşullarında deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirebilir. Ayrıca bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırma yapma olanağı da oluşabilir.
6. Çalışmada kullanılan düşük kalorili kömür gazları oksi-yanma koşullarında farklı yanma ve radyasyon modelleri kullanılarak yeniden modellenebilir. Yanma reaksiyonları detaylı bir biçimde kimyasal kinetikle analiz edilebilir.
7. Çalışmada kullanılmayan diğer düşük kalorili kömür (şehir gazı I, şehir gazı II ve su gazı) ve biyogazlar oksi-yanma koşullarında farklı yanma ve radyasyon modelleri kullanılarak yeniden modellenebilir.

KAYNAKLAR

1. Elektrik Üretim A.Ş. (2016). Elektrik Üretim Sektör Raporu. *Ankara*, 1-2.

2. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2015). *T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2015-2019 Stratejik Planı.* Ankara: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 9.

3. BP P.L.C. (2017). *BP Statistical Review of World Energy.* London: BP, 9, 37.

4. Karyeyen, S. (2016). *Geliştirilen bir yakıcıda kömür gazlarının yanma karakteristiklerinin deneysel ve sayısal olarak araştırılması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1, 107,121-122,140-142.

5. Çekiç, Y. (2015). *Tekirdağ malkara linyit kömürünün farklı sıcaklıklarda farklı oksi yakma koşullarında yakılmasında optimum sıcaklık ve oksijen miktarının belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

6. Turan, A.Z. (2009). *Linyit biyokütle karışımlarının oksijen ortamında yakılması*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

7. Toru, O. (2015). *Afşin Elbistan linyit kömürü ve pirinanın optimum oksi yakma koşullarının belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

8. Selcuk, N., ve Yuzbasi Nur, S. (2011). Air and Oxy-Fuel Combustion Characteristics of Biomass/Lignite Blends in TGA-FTIR. *Fuel Processing Technology*, 92(5),1101-1108.

9. Gül, S. (2008). *Oxycombustion of biomass and coal in a laboratory scale fluidized bed system.* Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

10. Wall, T., Liu, Y., Spero, C., Elliott, L., Khare, S., Rathnam, R., Zeenathal, F., Moghtaderi, B., Buhre, B., Sheng, C., Gupta, R., Yamada, T., Makino, K. and Yu, J.Y. (2009). An overview on oxyfuel coal combustion—State of the art research and technology development. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(8),1003-1016.

11. Sanghyun, P., Jungeun, A, Kim., Changkook, R., Taeyoung, C., Won, Y., Young-Ju, K., Ho-Young, P. and Hee-Chun, L. (2013). Combustion and heat transfer characteristics of oxy-coal combustion in a 100 MWe front-wall-fired furnace. *Fuel*, 106, 718-729.

12. Wu, K., Chang, Y., Chen, C. and Chen, Y. (2010). High-efficiency combustion of natural gas with 21–30 % oxygen-enriched air. *Fuel*, 89, 2455-2462.

13. Jeongseog, O. and Dongsoon, N. (2015). Flame characteristics of a non-premixed oxy-fuel jet in a lab-scale furnace, *Energy*, 81, 328-343.

14. Habib, M.A., Nemitallah, M.A., Ahmed, P., Sharqawy, M.H., Badr, H.M., Muhammad, I. and Yaqub, M. (2015). Experimental analysis of oxygen-methane

combustion inside a gas turbine reactor under various operating conditions. *Energy*, 86, 105-114.

15. Huynh, C.V. and Kong, S. (2012). Combustion and NOX emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam. *Fuel*, 107, 455-464.

16. Hasegawa, T., Sato, M. and Nakata, T. (2000). A study of combustion characteristics of gasified coal fuel, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 123(1), 22-32.

17. Bongartz, D. and Ghoniem A.F. (2015). Chemical kinetics mechanism for oxy-fuel combustion of mixtures of hydrogen sulfide and methane. *Combustion and Flame*, 162, 544-553.

18. Mantzaras, J. (2008). Catalytic Combustion of Syngas. *Combustion Science and Technology*, 180(6), 1137-1168.

19. Krieger, G.C., Campos, A.P.V., Takehara, M.D.B., Alfaia da Cunha, F. and Gurgel Veras, C. A. (2015). Numerical simulation of oxy-fuel combustion for gas turbine applications, *Applied Thermal Engineering*, 78, 471-481.

20. Gallucci, F., Hamers, H.P., van Zanten, M. and van Sint Annaland, M. (2015). Experimental demonstration of chemical-looping combustion of syngas in packed bed reactors with ilmenite, *Chemical Engineering Journal*, 274, 156-168.

21. de la Torre, M., Chowdhury, A.S.M.A., Love, N. and Choudhuri, A. (2016). Radiative heat release from premixed oxy-syngas and oxy-methane flames. *Fuel*, 166, 567-573.

22. Habib, M.A., Salaudeen, S.A., Nemitallah, M.A., Ben-Mansour, R. and Mokheimer, E.M.A. (2016). Numerical investigation of syngas oxy-combustion inside a LSCF-6428 oxygen transport membrane reactor. *Energy*, 96, 654-665.

23. Ranga Dinesh, K.K.J., van Oijen, J.A., Luo, K.H. and Jiang, X. (2014). Near-field local flame extinction of oxy-syngas non-premixed jet flames: A DNS study. *Fuel*, 130, 189-196.

24. Habib, M.A., Mokheimer, E.M.A., Sanusi, S.Y. and 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.

25. Williams, T.C., Shaddix, C.R. and 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.

26. Kutne, P,, Kapadia B.K., Meier W. and Aigner M. (2011). Experimental analysis of the combustion behaviour of oxyfuel flames in a gas turbine model combustor, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 3383-3390.

27. Ranga Dinesh, K.K.J,. Richardson, E.S,. van Oijen, J.A., Luo, K.H. and Jiang, X. (2015). The Scalar Structure of Turbulent Oxy-Fuel Non-Premixed Flames. *Energy Procedia*, 66, 305-308.

28. Mardani, A. and Ghomshi, A. F. (2016). Numerical study of oxy-fuel MILD (moderate or intense low-oxygen dilution combustion) combustion for CH_4-H_2 fuel. *Energy*, 99, 136-151.

29. Nemitallah, M.A. and Habib, M.A. (2013). Experimental and numerical investigations of an atmospheric diffusion oxy-combustion flame in a gas turbine model combustor. *Applied Energy*, 111, 401-415.

30. Çengel, Y.A. and Boles, M.A. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach.* (Yedinci Baskı). New York: McGraw-Hill, 764-769.

31. Hırkalıoğlu, F. (2005) *Gaz türbini yanma odasında hidrojen ve hidrokarbon yanmasının modellenmesi ve NOx oluşumunun incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 7.

32. Gökçek, M. (2008). *Metan ve metan-hidrojen karışımı yakıtların kullanıldığı gaz türbinlerinde yanmanın ve azot oksit oluşumunun modellenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 31, 32.

33. Ilbas, M. (1997). *Studies of ultra-Low NOX burners.* Doktora Tezi, School of Engineering University of Wales, Cardiff, 11,12, 20,21,27,28, 84-87, 109-137.

34. İnternet: *Hava kirliliği.* URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fcevreonline.com%2Fhava-kirliligi%2F&date=2018-05-15 Son Erişim Tarihi: 21.04.2018.

35. El-Mahallawy, F. and El-Din Habik, S. (2002). *Fundamentals and technology of combustion* (Birinci Baskı). United States: Elsevier Science Ltd, 55-58.

36. İnternet: *Sakarya hava kalitesi koruma ve iyileştirme (SAHAKK-İ) proje sitesi.* URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.sahakk.sakarya.edu.tr%2Fdocuments%2Fhava_kirliligi_ve_kirleticiler_rapor1.pdf+&date=2018-05-15 Son Erişim Tarihi: 21.04.2018.

37. Lieuwen, T.C., Yang, V. and Yetter, R. (2010). *Synthesis gas combustion: fundamentals and applications.* (Birinci Baskı). United States: Taylor and Francis Group, 169-188.

38. Li, H. and 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.

39. Ratafia-Brown, J.A., Manfredo, L.M., Hoffman, J.W., Ramezan, M., and Stiegel, G.J. (2002). *An environmental assessment of IGCC power systems*. Paper presented at the19th Annual Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, PA, 23–27.

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

41. ANSYS Incorporated. (2011). *Ansys Fluent 14.0: Kullanım Kılavuzu*. UK.

42. Hanson, R.K. and Salimian, S. (1984). *Survey of Rate Constants in H/N/O Systems.* (Editör W.C. Gardiner). Combustion Chemistry, 361.

43. Westenberg, A.A. (1971). Kinetics of NO and CO in Lean, Premixed Hydrocarbon – Air Flames. *Combustion Science Technology*, 4(19), 59-64.

44. Warnatz, J. (1989). *NOx Formation in High Temperature Processes.* Germany: University of Stuttgart, 57.

45. Baulch D. L. ve diğerleri. (1992). Evaluated Kinetic Data for Combustion Modelling. *J. Physical and Chemical Reference Data,* 21(3), 411-734.

46. Westbrook, C. and Dryer, F. (1984). Chemical kinetic modelling of hydrocarbon combustion. *Progress in Energy Combustion Science*, 10(1), 1-57.

47. Miller, J.A., Bowman, C.T. (1989). Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion, *Progress in Energy Combustion Science* 15(4), 287–338.

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

49. Schefer, R.W., Namazian, M. and Kelly, J. (1991). Simultaneous raman scattering and laser-induced fluorescence for multispecies imaging in turbulent flames. *In Combustion Research Facility News,* 16(11), 858-860.

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

51. Smoot, Smoot, L.D. and Smith, P.J. (1985). Coal combustion and gasification. (Birinci Baskı). United States: Bringham Yung University, 373-404.

52. Lockwood, F.C. and Romo-Millares, C.A. (1992). Mathematical Modelling of Fuel – NO Emissions From PF Burners. *Journal of the Institute of Energy,* 65, 144-152.

53. Markewitz P., Leitner W., Linssen J., Zapp, P., Müller T., Schreiber A. (2012). Worldwide innovations in the development of carbon capture technologies and the utilization of CO_2. *Energy & Environmental Science*, 5(6), 7281–7385.

54. Kakaras, E., Koumanakos, A., Doukelis, A., Giannakopoulos, D. and Vorrias, I. (2007). Oxyfuel boiler design in a lignite-fired power plant. *Fuel,* 86, 2144-2150.

55. Arias, B., Pevida, C., Rubiera, F. and Pis, J.J. (2008). Effect of biomass blending on coal ignition and burnout during oxy-fuel combustion, *Fuel,* 87, 2753-2759.

56. Murphy, J.J. and Shaddix, C.R. (2006). Combustion kinetics of coal chars in oxygen-enriched environments. *Combustion and Flame,* 144, 710-729.

57. Paula, A.B. and Yiannis, A.L. (2007). Combustion of Coal Chars in Oxygen-Enriched Atmospheres, *Combustion Science and Techonogy*, 179, 1569-1587.

58. Malti G., Sudhakar M., Shahi R.V. (2014). *Carbon Capture, Storage, and Utilization, A possible climate change solution for energy industry*. New Delhi: Energy and Resource Institute, 80-81.

59. Anderson, R. and Pronske, K. (2006). CES gas generator plant: A new kind of aeroderivative. *Modern Power Systems*, 12, 20–27.

60. Buhre, B.J.P., Elliott, L.K., Sheng, C.D., Gupta, R.P. and Wall, T.F. (2005). Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 31(4), 283-307.

61. Lewis, B. and von Elbe, G. (1987). *Combustion, flames, and explosions of gases.* (Üçüncü Baskı). Orlando, FL: Academic Press.

62. Bryden, K.M.L., Ragland, K.W. (2011). *Combustion engineering.* (İkinci Baskı) Florida: Taylor and Francis Group, 11-24.

63. İnternet: *Ham petrolün destilasyonu.* URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fmegep.meb.gov.tr%2Fmte_program_modul%2Fmoduller_pdf%2FHam%2520Petrol%25C3%25BCn%2520Destilasyonu.pdf&date=2018-05-15 Son Erişim Tarihi: 21.04.2018.

64. Nayır, T. (2012). *Kömür ve biyokütle karışımlarının gazlaştırılması ve Aspen HSYS programı ile simulasyonu,* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 9-11,13-21.

65. Tekin, H.C. (2006). *Dolmabahçe Gazhanesi'nin kuruluşu ve işletmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Türkiyat Araştırmaları Enstitüsü, İstanbul, 1.

66. Vural, E.S. (2014). *Soma-eynez linyitinin su buharı gazlaştırması.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 16-20.

67. Canel, M. (1986). Kömürlerin gazlaştırılması. *Madencilik*, 25(2), 35-41.

68. Higman, C. ve Burgt, B. (2008). Gasification. (İkinci Baskı). United States of America, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 9-12.

69. Cusumano, J.A. Dalla Betta, R.A. and Levy, R.B. (1978). *Catalysis in coal conversion.* New York: Academic Press Inc.

70. Probstein, R.F. and Hicks, R.E. (1990). *Synthetic Fuels.* Cambridge: PH Press.

71. Speight, J.G. (2008). *Synthetic fuels handbook: Properties, process, and performance* (First Edition). United States: The McGraw-Hill Companies, 145-150.

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

73. Yavuz, H. (1987). *Isparta'da jeneratör gazı üretimi ve dağılımı*. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya, 1,5, 7,

74. İnternet: *KTB Bilim sitesi*. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kuark.org%2F2014%2F02%2Fyuksek-firinlar-ile-ham-demir-uretimi%2F&date=2018-05-15 Son Erişim Tarihi: 21.04.2018.

75. İnternet: *Blast furnace gas, its characterıstıcs and safety requırements*. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fispatguru.com%2Fblast-furnace-gas-its-characteristics-and-safety-requirements%2F&date=2018-05-15 Son Erişim Tarihi: 21.04.2018.

76. Karyeyen, S., Ilbas, M. (2017). Turbulent diffusion flames of coal derived-hydrogen supplied low calorific value syngas mixtures in a new type of burner: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(4), 2411-2423.

77. Heitor, M.V., Moreira, A.L.N. (1993). Thermocouples and sample probes for combustion studies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 19(3), 259-278.

78. Al-Sharifi, F.A. (1980). The measurements and correction of mean temperature in swirling flames; UWCC. *Wales*, 563.

79. Siegel, R., Howell, J. (2002). *Thermal radiation heat transfer,* (Dördüncü Baskı), Newyork: Taylor&Francis Group.

80. Vanoverbeghe, K. (2004). *Flow, turbulence and combustion of premixed swirling jet flames*, Doktora Tezi, Katholieke Universiteit Lewen, Belgium.

81. Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics* (Second Edition). England: Pearson Education Limited, 9-20.

82. Yılmaz, İ. (2006). *Model bir yakıcıda hidrojen-metan karışımının yanmasının sayısal ve deneysel incelenmesi,* Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 24-27.

83. 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.

84. Patankar, S.V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow* (Birinci Baskı), London: McGraw-Hill Book Company.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : BEKTAŞ, Abdulkadir
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 04.02.1973, İzmir
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (312) 295 53 17
Faks : 0 (312) 295 50 05
e-mail : abdulkadir.bektas@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Enerji Sist. Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	2007
Lisans	Bilkent Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	1999
Lise	Karşıyaka Lisesi	1990

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı	Daire Başkanı
2006-2018	Türkiye İstatistik Kurumu	TÜİK Uzmanı
2004-2005	Kaya Telekom A.Ş.	Planlama Müdürü

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. İlbaş, M., Bektaş, A., Karyeyen, S. (2018). Effect of oxy-fuel combustion on flame characteristics of low calorific value coal gases in a small burner and combustor, *Fuel*, 226, 350-364.

Hobiler

Kitap okumak, Sinema, Yüzme, Futbol.



GAZİ GELECEKTİR..