T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KARE GAZ BRÜLÖR-KAZAN SİSTEMLERİNDE YANMA İLE EMİSYON ANALİZLERİ VE OPTİMİZASYON

MUSTAFA KEMALETTİN BÜYÜKAKIN

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: PROF. DR. SEMİHA ÖZTUNA

EDİRNE-2019

MUSTAFA KEMALETTİN BÜYÜKAKIN'ın hazırladığı "**KARE GAZ BRÜLÖR-KAZAN SİSTEMLERİNDE YANMA İLE EMİSYON ANALİZLERİ VE OPTİMİZASYON**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri (Ünvan, Ad, Soyad): İmza

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA (Danışman)

Prof. Dr. Kamil KAHVECİ

Prof. Dr. Fikret İŞIK

Prof. Dr. Haydar ARAS

Prof. Dr. Özden AĞRA

Tez Savunma Tarihi: 11/12/2019

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Murat YURTCAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI / DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

11/12/2019

Mustafa Kemalettin BÜYÜKAKIN

Kare Gaz Brülör-Kazan Sistemlerinde Yanma ile Emisyon Analizleri ve Optimizasyon
T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada ön karışımsız bir doğal gaz brülörü ve bu brülörün kullanıldığı karşı basınçlı test kazanı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. İlk olarak deneysel çalışmalar sabit yakıt tüketiminde farklı hava fazlalık katsayılarının kullanılmasıyla ve sabit hava fazlalık katsayısı değerinde farklı yakıt tüketim değerlerinin sağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sabit rejim koşulları altında yapılmıştır. Baca gazı emisyon değerleri ve baca gazı sıcaklık değerleri ölçülmüştür ve kayıt altına alınmıştır. Deneysel çalışmaların ardından nümerik çalışmalara geçilmiştir. Nümerik çalışmalar için Fluent yazılımı kullanılmıştır. Nümerik çalışmalarda farklı yanma modelleri kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile baca gazı emisyon ve sıcaklık değerleri bakımından kıyaslanmıştır. Deneysel verilerle tutarlı sonuçların elde edilmesinin ardından, yine Fluent yazılımı kullanılarak brülör başlık yapısındaki değişimlerin yanma odasındaki alev yapısı ve baca gazı emisyon değerleri üzerindeki etkileri çıkarılmıştır. Yapılan farklı tasarımlara göre en uygun brülör başlık yapısı NO_X emisyonlarının indirgenmesi yönünde belirlenmiştir. Ayrıca orijinal brülör başlık yapısının kullanılması ile metan yakıtına hidrojenin farklı oranlarda eklenmesi doğrultusunda, yanma parametrelerinde meydana gelen değişimler çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, literatürde var olan birçok çalışmanın aksine, metana belirli bir orana kadar olan hidrojen ilavesi karşı basınçlı bir kazan kullanımı durumunda NO_X emisyonlarını düşürebilmektedir. Çalışmada en uygun hidrojen katkı oranı NO_X emisyonlarının minimize edilmesi yönünden belirlenmiştir.

Yıl : 2019

Sayfa Sayısı : 155

Anahtar Kelimeler : Ön karışımsız yanma, metan yanması, NO_X emisyonları, hava türbülatörü, difüzyon alev yapısı, hidrojen katkısı

Combustion and Emission Analysis of Square Body Burner – Boiler Systems and System Optimisation

Trakya University Institute of Natural Sciences

Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

In this study, a non-premixed natural gas burner and its back-pressure boiler were investigated experimentally and numerically. The experimental studies were performed under the constant fuel consumption rate condition while changing the air excess ratio coefficient, and under the constant air excess ratio coefficient condition while changing the fuel consumption rate. The steady state conditions were maintained for the experimental studies. The flue gas emissions and the flue gas temperature values were the parameters to be measured. After the experimental studies, the numerical studies were conducted. The Fluent code was used as the simulation tool. The different combustion models were utilised for the numerical studies. The obtained numerical results were confronted with the experimental results as the flue gas emission and temperature values. After the validation of the numerical results, the effect of the burner head structure on the diffusion flame structure and the flue gas emissions were investigated numerically. The most proper burner head structure was determined in terms of obtaining the lowest NO_X emission level in the flue gas. In addition, the effect of the hydrogen-enrichment of pure methane on the diffusion flame structure and the emissions was studied numerically while using the original burner head structure. Unlike the most of the results from the research studies in the literature, the obtained results show that the hydrogen-enrichment of pure methane has the potential of reducing the NO_X emissions in a back-pressure combustion chamber, up to a certain ratio of hydrogen-enrichment.

Year : 2019

Number of Pages : 155

Keywords : Non-premixed combustion, methane combustion, NO_X emisssions, air turbulator, diffusion flame structure, hydrogen-enrichment

TEŞEKKÜR

Bu çalışmasının ortaya çıkmasında benden yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Semiha Öztuna'ya, çalışma için gerekli olan teçhizatların temin edilmesinde Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (TÜBAP) birimine ve deneysel çalışma imkanlarının sağlanması hususunda Ecostar firmasına şükranlarımı sunarım.

Tüm eğitim hayatım boyunca bana verdikleri maddi ve manevi desteklerinden dolayı babam Semih Büyükakın'a, annem Nesrin Büyükakın'a ve kardeşim Erkan Büyükakın'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv
ABSTRACT v
TEŞEKKÜR vi
İÇİNDEKİLER vii
ÇİZELGELER VE ŞEKİLLER DİZİNİ xi
SİMGELER VE KISALTMALAR xv
BÖLÜM 1. GİRİŞ 1
1.1 Literatür Araştırması ve Tez İçeriği 2
BÖLÜM 2. YANMA VE KİMYASAL KİNETİK 11
2.1 Yanma İle İlgili Bazı Kavramlar 13
2.2 Kimyasal Kinetik 15
2.2.1 Arrhenius Denklemi 16
2.2.2 Aktivasyon Enerjisi 16
BÖLÜM 3. YAKITLAR VE DOĞAL GAZIN YANMA MEKANİZMALARI 18
3.1 Yakıt Türleri 18
3.1.1 Hidrokarbonlar 18
3.1.1.1 Alkanlar 19
3.1.1.2 Alkenler 19
3.1.1.3 Alkinler 19
3.1.1.4 Alkoller 20
3.2 Doğal Gazın Yanma Mekanizmaları 20
3.2.1 Global ve Yarı Global Mekanizmalar 20
3.2.2 Detaylı Mekanizmalar 21
BÖLÜM 4. BRÜLÖRLER VE KAZANLAR 24
4.1 Brülörler 24
4.1.1 Gaz ve Sıvı Yakıt Brülörleri 25
4.1.2 Yanma Havasının Sağlanmasına Göre Brülörler 25
4.1.2.1 Atmosferik Brülörler 25
4.1.2.2 Fanlı Brülörler 25

4.1.3 Kontrol Sistemlerine Göre Brülörler 25
4.1.3.1 Tek Kademeli Brülörler 25
4.1.3.2 Çift Kademeli Brülörler 26
4.1.3.3 Oransal Brülörler 26
4.1.4 Konstrüksiyonuna Göre Brülörler 26
4.1.5 Yakıcı Düzenine Göre Brülörler 27
4.2 Kazanlar 27
BÖLÜM 5. YANMA EMİSYONLARI 30
5.1 CO_2 Emisyonları 30
5.2 CO Emisyonları 31
5.3 NO_X Emisyonları 31
5.3.1 Termal NO_X Oluşum Mekanizması 32
5.3.2 Ani NO_X Oluşum Mekanizması 33
5.3.3 N_2O Mekanizması 33
5.4 SO_2 Emisyonları 33
5.5 Emisyonların Kısıtlanmasıyla İlgili Yönetmelikler 34
5.6 NO_X Emisyonlarını İndirgeme Yöntemleri 35
BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 38
6.1 Deney Metodu 38
6.2 Deney Düzeneği 39
6.3 Deneylerde Kullanılan Elemanlar 40
6.3.1 Brülör 41
6.3.2 Ölçüm Cihazları 42
6.3.3 Ölçüm Cihazlarının Belirsizlikleri 45
6.4 Deney Sonuçları 46
BÖLÜM 7. MATEMATİKSEL MODELLEME VE DENEYSEL SONUÇLARLA KIYASLAMAYA YÖNELİK YAPILAN HAD ANALİZLERİ 54
7.1 Yönetici Denklemler 54
7.2 Yanma Modelleri 56
7.2.1 Eddy Yayılım Modeli 57
7.2.2 Laminer Sonlu Hız Modeli 58
7.2.3 Eddy Yayılım Konsepti (EDC) 58
7.2.4 Ön Karışımsız Yanma Modeli 58

7.2.5 Kısmi Ön Karışımlı Yanma Modeli 61
7.3 NO_X Hesabı 62
7.4 Türbülans Modellemesi 63
7.5 Deneysel Brülör-Kazan Sistemine Ait Katı Modellemeler 64
7.6 Ağ Elemanı Çalışmaları 66
7.7 Yanma Analizlerinde Kullanılan Çözüm Metotları, Sınır Şartları ve Parametreler 69
7.8 Yanma Analizleri 70
7.8.1 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Birinci Çalışma 70
7.8.1.1 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Birinci Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Deneysel Verilerle Kıyaslanması 81
7.8.2 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen İkinci Çalışma 84
7.8.2.1 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen İkinci Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Deneysel Verilerle Kıyaslanması 86
7.8.3 Eddy Yayılım Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Çalışma..87
7.8.3.1 Eddy Yayılım Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Deneysel Verilerle Kıyaslanması 93
BÖLÜM 8. BRÜLÖR BAŞLIK YAPISININ ALEV YAPISI VE EMİSYONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ 96
8.1 Brülör Başlık Yapısında Gerçekleştirilen Modifikasyonlar ve Elde Edilen Sonuçlar 96
BÖLÜM 9. EDDY YAYILIM YANMA MODELİ İLE METANA HİDROJEN EKLENTİSİNİN YANMA PARAMETRELERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ 106
BÖLÜM 10. ÖN KARIŞIMSIZ YANMA MODELİ İLE METANA HİDROJEN EKLENTİSİNİN YANMA PARAMETRELERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ 115
10.1 Hidrojen Eklentisinin Yanma Odasındaki Sıcaklık Değerleri Üzerine Etkileri 119
10.2 Hidrojen Eklentisinin Yanma Odasındaki Termal NO Emisyonlarının Oluşum Hızına Etkisi 122
BÖLÜM 11. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN BRÜLÖRÜN FARKLI BİR BRÜLÖR İLE EMİSYONLAR AÇISINDAN KIYASLANMASI.127
BÖLÜM 12. SONUÇLAR 129
KAYNAKLAR 132
EK 136

ÖZ GEÇMİŞ..... 138
TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER 139

ÇİZELGELER VE ŞEKİLLER DİZİNİ

Çizelge 5.1 "Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği" Tarafından Belirlenen Emisyon Kısıtlamaları (Gaz Yakıt Kullanılması Durumunda)….35

Çizelge 6.1 ECO30.0 G C 2c Kapasite Bilgileri……...41

Çizelge 6.2 Ölçüm Cihazlarının Belirsizlik Değerleri……..46

Çizelge 6.3 Sabit Hava Fazlalık Katsayısında Yapılan Deneyler…….47

Çizelge 6.4 Sabit Yakıt Tüketiminde Yapılan Deneyler……..47

Çizelge 6.5 Deneylerin Yapıldığı Güne Ait Doğal Gaz Bileşenleri (Çorlu Doğalgaz Dağıtım A.Ş., 2018)…….53

Çizelge 7.1 Farklı Ağ Elemanı Sayısına Göre Kazan Merkez Eksenindeki Ortalama Gaz Akışı Hız Değerleri …….68

Çizelge 7.2 Analizlerde Kullanılan Ağ Elemanına Ait Bazı Kalite Parametreleri……..69

Çizelge 9.1 HAD Analizlerinde Kullanılan Metan-Hidrojen Karışım Oranları ile Debi Değerleri……106

Çizelge 10.1 Nümerik Analizlerde Kullanılan Yakıt Karışımlarına Ait H_2 İçerikleri ve Debi Değerleri……..….116

Çizelge 11.1 ECO45 Brülörü ve Test Kazanına Ait Emisyon Değerleri……127

Şekil 2.1 Sabit Basınç ve Sıcaklıkta Gibbs Fonksiyonunun Değişimi ve Kimyasal Denge Kriteri…….....13

Şekil 2.2 Ön Karışımsız Yanma Tipi……14

Şekil 2.3 Ön Karışımlı Yanma Tipi……..15

Şekil 2.4 Aktivasyon Enerjisi Kavramı……16

Şekil 3.1 CH_4 Molekülü Yapısı……19

Şekil 3.2 C_2H_4 Molekülü Yapısı……...19

Şekil 3.3 C_2H_2 Molekülü Yapısı……...20

Şekil 3.4 H_2 ve CO Yakıtlarının Oksitlenme Mekanizmaları……...22

Şekil 3.5 CH_4 Yakıtının Detaylı Yanma Mekanizması……23

Şekil 4.1 Monoblok Brülör……..24

Şekil 4.2 Dualblok Brülör……26

Şekil 4.3 Silindirik ve Yanma Odası Geri Dönüşlü Kazan……...28

Şekil 4.4 Katı Yakıtlı ve Hava Üflemeli Kazan……28

Şekil 4.5 Yatay Duman Borulu Sıcak Su Kazanı Örneği……..29

Şekil 5.1 Fotokimyasal Duman Oluşum Mekanizması……32

Şekil 5.2 Yanma Gazlarının Sirkülasyonu……...37

Şekil 6.1 ECO30.0 Test Kazanı Teknik Resim Görüntüsü ……..39

Şekil 6.2 Deney Düzeneği Şematik Gösterimi ……40

Şekil 6.3 ECO30.0 Brülör ve Test Kazanı……40

Şekil 6.4 Deneylerde Kullanılan Brülör ……..41

Şekil 6.5 Brülörün Montajlanmış Görüntüsü (A) ……42

Şekil 6.6 Brülörün Montajlanmış Görüntüsü (B)……42

Şekil 6.7 Soğutma Suyu Debisi Ölçüm Cihazı (Solda) ve Gaz Debisi Ölçüm Cihazı…...43

Şekil 6.8 Nova Plus Marka Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Ölçüm Cihazı …….43

Şekil 6.9 Baca Gazı Sensörleri ……44

Şekil 6.10 Deneylerde Elde Edilen Detaylı Baca Gazı Raporları ……44

Şekil 6.11 Ecostar Deney Laboratuvarı Gaz Regülatör Sistemi……...45

Şekil 6.12 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki CO_2 Emisyonları…..48

Şekil 6.13 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki O_2 Emisyonları……48

Şekil 6.14 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki CO Emisyonları……..49

Şekil 6.15 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki NO_X Emisyonları……49

Şekil 6.16 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazı Sıcaklıkları……..50

Şekil 6.17 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki CO_2 Emisyonları……..50

Şekil 6.18 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki O_2 Emisyonları……..51

Şekil 6.19 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki CO Emisyonları……..51

Şekil 6.20 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki NO_X Emisyonları……..52

Şekil 6.21 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazı Sıcaklıkları……...52

Şekil 7.1 Termodinamik Çözümleme Açısından Brülör – Kazan Sistemin Şematik Görüntüsü…….....55

Şekil 7.2 Karışım Kesri Yaklaşımının Yanma Sistemine Uygulanması……...59

Şekil 7.3 ECO 30.0 G c 2c Brülörü ve Test Kazanına Ait Katı Modelleme……..64

Şekil 7.4 ECO 30.0 G c 2c Brülörü……...65

Şekil 7.5 ECO 30.0 G c 2c Brülör Başlığı ve Yakıt Borusu……..65

Şekil 7.6 ECO 30.0 G c 2c Brülör ve Test Kazanına Ait Akış Hacmi……...66

Şekil 7.7 Brülör ve Test Kazanına Ait Ağ Elemanı Yapısı……...67

Şekil 7.8 Brülör ve Test Kazanına Ait Ağ Elemanı Kesit Görünüşü…….67

Şekil 7.9 Brülör Ağ Yapısı……...68

Şekil 7.10 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)…….71

Şekil 7.11 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen CO_2 Dağılımları (yz Düzlemi)……72

Şekil 7.12 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen O_2 Dağılımları (yz Düzlemi)……..73

Şekil 7.13 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen CO Dağılımları (yz Düzlemi)……..74

Şekil 7.14 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen NO_X Dağılımları (yz Düzlemi)……75

Şekil 7.15 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)……..76

Şekil 7.16 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen CO_2 Dağılımları (yz Düzlemi)……..77

Şekil 7.17 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen O_2 Dağılımları (yz Düzlemi)……..78

Şekil 7.18 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen CO Dağılımları (yz Düzlemi)……..79

Şekil 7.19 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen NO_X Dağılımları (yz Düzlemi)……..80

Şekil 7.20 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değeri (1.2) İçin Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması……..82

Şekil 7.21 Sabit Yakıt Tüketimi İçin (45 Nm^3/h) Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması……..83

Şekil 7.22 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen Sıcaklık ve NO_X Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)……85

Şekil 7.23 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değeri (1.2) İçin Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması……..86

Şekil 7.24 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm3/h) Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)……..88

Şekil 7.25 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm3/h) Elde Edilen CO_2 Dağılımları (yz Düzlemi)……..89

Şekil 7.26 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm3/h) Elde Edilen O_2 Dağılımları (yz Düzlemi)……..90

Şekil 7.27 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm3/h) Elde Edilen CO Dağılımları (yz Düzlemi)……..91

Şekil 7.28 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm3/h) Elde Edilen NO_X Dağılımları (yz Düzlemi)……..92

Şekil 7.29 Sabit Yakıt Tüketimi İçin (45 Nm3/h) Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması……..94

Şekil 8.1 Orijinal Brülör Başlığı (Solda) ve Modifiye Edilmiş Brülör Başlığı (Sağda)…97

Şekil 8.2 17 Adet Hava Türbülatör Kanadına Sahip Modifiye Brülör Başlığının Farklı Kanat Açılarına Göre Görselleri……...97

Şekil 8.3 Farklı Modifiye Brülör Başlıklarının Kullanımı ile Elde Edilen Kazan İçi Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)……...98

Şekil 8.4 Farklı Modifiye Brülör Başlıklarının Kullanımı ile Elde Edilen Kazan İçi NO_X Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)……98

Şekil 8.5 Yanma Odası İçerisinde Eksenel Mesafeye Göre Sıcaklık Değişimleri……....99

Şekil 8.6 Yanma Odası İçerisinde Radyal Konuma Göre Sıcaklık Değişimleri…….100

Şekil 8.7 Yanma Odası İçerisinde Eksenel Mesafeye Göre Emisyonlardaki Değişim...102

Şekil 8.8 Yanma Odası İçerisinde Eksenel Mesafeye Göre Gösterge Statik Basınç Değişimi…….103

Şekil 8.9 Farklı Modifiye Başlıklı Brülörler ile Elde Edilen Baca Gazı NO_X Emisyonu Değerleri.....104

Şekil 8.10 Yanma Ortamında Hava Fazlalık Katsayısının Dağılımı (yz plane)……105

Şekil 9.1 Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)……...108

Şekil 9.2 Elde Edilen NO_X Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)……...109

Şekil 9.3 Elde Edilen CO_2 Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)……110

Şekil 9.4 Elde Edilen O_2 Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)……...111

Şekil 9.5 Elde Edilen CO Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)……112

Şekil 9.6 HAD Analizlerinden Elde Edilen Baca Gazı Sıcaklık ve Emisyon Değerleri..114

Şekil 10.1 Hidrojen-Metan Karışımlarından Elde Edilen Sonuçlar (yz Düzlemi)……..117

Şekil 10.2 Yanma Ortamındaki Hava Fazlalık Katsayısı Değerleri (yz Düzlemi)……..118

Şekil 10.3 Baca Gazı Emisyonları ve Maksimum Alev Sıcaklık Değerleri……119

Şekil 10.4 Yanma Odası İçerisindeki Sıcaklık Değişimleri (yz Düzlemi)……..121

Şekil 10.5 Yanma Odası İçerisinde Serbest O Radikalinin Yoğunluk Değişimi……124

Şekil 10.6 Yanma Odası İçerisinde Termal NO Oluşum Hızları……126

Şekil 11. 1 ECO30.0 ve ECO45 Brülörlerinden Elde Edilen Deneysel Baca Gazı NO_X Emisyonları……128

SİMGELER VE KISALTMALAR

$\mathbf{c_p}$	Özgül ısı (kJ/kg K)
$\mathbf{c_{p_i}}$	i kimyasal türüne ait özgül ısı (kJ/kg K)
D	Difüzyon katsayısı (m^2/s)
$\mathbf{E_{sistem}}$	Açık sistem iç enerjisi (kJ)
f	Karışım kesri
$\bar{\mathbf{f}}$	Ortalama karışım kesri
$\overline{\mathbf{f'^2}}$	Ortalama karışım kesri varyansı
$\mathbf{f_i}$	i kimyasal türü üzerine uygulanan kuvvet (N/kg)
$\bar{\mathbf{H}}$	Ortalama entalpi (kJ/kg)
h	Entalpi (kJ/kg)
k	Türbülans kinetik enerjisi (J/kg)
$\mathbf{k_t}$	Isıl iletkenlik (kW/mK)
Le	Lewis sayısı
$\dot{\mathbf{m}}$	Kütle debisi (kg/**s)**
$\mathbf{M_{sistem}}$	Açık sistemin kütlesi (kg)
P	Basınç (kPa)
$\dot{\mathbf{Q}}$	Birim zamandaki ısı transferi (kW)
$\mathbf{S_h}$	Radyasyon ile ısı transferi için kaynak terimi (kJ/m^3s)
$\mathbf{S_i}$	i kimyasal türü için reaksiyon hızı (kg/m^3s)
$\mathbf{S_{i,j}}$	Ortalama gerilme tensörü hızı (s^{-1})
T	Sıcaklık (K)

$\mathbf{t}$	Zaman (s)
$\mathbf{u_j}$	Hız (m/s)
$\mathbf{v}$	Hız vektörü (m/s)
$\dot{\mathbf{W}}$	İş (kW)
$\mathbf{Y_i}$	i kimyasal türüne ait kütle kesri
$\mathbf{Z_i}$	i elementine ait kütle kesri
$\boldsymbol{\epsilon}$	Türbülans yayılım hızı (J/kg s)
$\boldsymbol{\nu}$	Kinematik viskozite (m^2/s)
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk (kg/m^3)
$\boldsymbol{\chi}$	Skaler yayınım hızı (s^{-1})
$\dot{\boldsymbol{\omega}}$	Reaksiyon hızı (kg/m^3s)
$\boldsymbol{\mu}$	Dinamik viskozite (kg/ms)
$\boldsymbol{\mu_t}$	Türbülans viskozitesi (kg/ms)
$\boldsymbol{\sigma_{ij}}$	Gerilme tensörü (N/m^2)

Kısaltmalar

HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
IG	Isıl Güç
PDF	Probability density function
PPM	Parts per million
SFM	Steady flamelet model

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünya nüfusu her geçen gün artmaktadır. 2050 yılına kadar dünya nüfus değerinin şu ana göre yaklaşık olarak %50 artış göstermesi beklenmektedir. Bu şartlar doğrultusunda gelecek yıllarda dünyada enerji ve temiz yaşam alanı sıkıntısı çekileceği açıktır. Dünyanın nüfusuna paralel olarak ülkemizin nüfusu da yıllar içinde artış göstermektedir. Bu da aynı zamanda ülkemizin enerji ihtiyacını ciddi oranda arttırırken, özellikle büyük şehirlerde yoğun hava kirliliği oluşmaktadır. Bu hava kirliliği şahsi araç kullanımından, konutlarda ciddi oranda doğal gaz, elektrik ve fuel oil tüketiminden ve sanayi tarafından tüketilen elektrik ve çeşitli fosil yakıt türlerinden kaynaklanmaktadır. Fosil yakıtların hızlı bir şekilde tüketilmesi hem geleceğimizde enerji sıkıntısına düşmemize sebep olacakken, günümüzde de yüksek CO_2, CO ve NO_x salınımlarıyla çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Ancak bu tür emisyonların artması sadece artan enerji ihtiyacına bağlı değildir. Enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan verimsiz ve uygun şekilde tasarlanmamış sistemler de fazla yakıt tüketimleriyle enerji israfına ve çevre kirliliğine sebep olmaktadır.

Endüstride yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulan bir çok proses bulunmaktadır. Bunlar kızgın buhar üretimi, kurutma, metal döküm işlemleri ve cam eritme şeklinde örneklendirilebilir. Günümüzde bu prosesler için gerekli enerji ihtiyacı büyük oranda doğal gaz ya da fuel oil gibi fosil yakıtların kullanılmasıyla karşılanmaktadır. Tüm alanlarda fosil yakıtlar günümüzdeki enerji ihtiyacının %85'i kadarını karşılamaktadır (Mayr, Prieler, Demuth, Potesser ve Hochenauer, 2015). Dünya nüfusu ile birlikte yaşamımız için gerekli olan enerji ihtiyacı azalan fosil yakıt kaynaklarına paralel olarak oldukça arttığı için, günümüzde yapılan çalışmalar alternatif enerji kaynaklarının ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, verimli enerji sistemlerinin tasarımı ve eski

sistemlerin revize edilmesi üzerine yoğunlaşmaktadır. Hidrojen gazı günümüzde üzerinde sıkla çalışılan alternatif enerji kaynaklarından biridir. Karbon salınımı yapmaması, ısıl değerinin yüksek olması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı ile üretilebilmesi bu yakıtı bir çalışma alanı olarak çekici hale getirmektedir. Bununla birlikte hidrojen gazının depolanma problemi vardır. Güneş enerjisinin domestik ve endüstriyel alanlarda kullanılması da fosil yakıtların tüketimini ve çevre kirliliğini azaltırken, güneş enerjisi bu sayede üzerinde çalışılabilecek oldukça önemli konulardan biri olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle yüksek enerji harcayan endüstriyel kurutma sistemlerine güneş enerjisi sistemlerinin eklenmesi büyük miktarlarda enerji tasarrufu sağlayabilmektedir. Güneş enerjisinin kullanımı ile brülör-kazan sistemlerinde ön ısıtma yapma işlemi de yanma veriminin ve enerji tasarrufunun arttırılması bakımından uygun çalışma alanı oluşturmaktadır. Ancak günümüzde güneş enerjisi sistemlerinin maliyetleri yüksektir ve güneş enerjisinin kesintili bir kaynak olmasından dolayı depolanma problemi vardır.

Brülör-kazan sistemlerinde enerji verimliliği direkt olarak yanma verimliliğine ve kazanda oluşan ısı enerjisinin aracı akışkana aktarılmasına bağlıdır. Yanma verimliliği de yakıtın mümkün olduğunca tamamen tüketilerek maksimum miktarda ısıl enerjinin ortaya çıkarılması ile alakalıdır. İyi bir yanmanın oluşması için gerekli şartlar ise yakıt ve oksitleyicinin uygun oranlarda aynı noktada bulunmaları, türbülanslı karışmaları ve yeterli etkileşime girme sürelerine sahip olmalarıdır. Yanma verimin arttırılmasıyla sistemin yakıt tüketimi azaltılır ve yanma ürünlerinin sıcaklığı arttırılabilir. Bu durum termodinamik bakış açısıyla oldukça uygundur. Ancak sıcaklık değerlerinin artmasıyla birlikte ortaya çıkan istenmeyen NO_x emisyonları oldukça yüksek değerlere çıkabilmektedir. NOx emisyonları doğa ve insanlar için son dereceli zararlıdır ve asit yağmurlarına sebep olabilmektedir. Dolayısıyla yanma sistemlerinde NOx emisyonlarının da mutlaka göz önüne alınması gerekmektedir ve bu emisyonların alev sıcaklığı ve yanma verimliliğiyle birlikte çok iyi optimize edilmesi gerekmektedir. Yanma sistemlerinde yanma veriminin iyileştirilmesi ve NO_x emisyonlarının azaltılması yakıt türüne, brülörün yapısına ve kazan geometrisine direkt olarak bağlıdır.

1.1. Literatür Araştırması ve Tez İçeriği

Bu çalışmada literatür araştırması yanma sistemleri ile yanma emisyonları üzerine yapılmıştır. Literatürde yanma sistemleri ve emisyonları ile ilgili olarak reaksiyonlu akış

modellemesi, yanma veriminin arttırılması, zararlı emisyonların düşürülmesi ve HAD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) analizlerinden elde edilen sonuçların deneysel verilerle doğrulanması ile yapılan iyileştirme ve geliştirme çalışmaları yer almaktadır.

Mayr, Prieler, Demuth, Potesser ve Hochenauer (2015) çalışmalarında 28 kW – 115 kW arası kapasiteye sahip bir doğal gaz fırınını HAD analizleri ile farklı O_2/N_2 oranlarında incelemişlerdir. Çalışmalarında kimyasal modellemeyi SFM (Steady Flamelet Model) yaklaşımı ile yapmışlardır ve bu modelin EDC (Eddy Dissipation Concept) modeline göre zaman tasarrufu sağlarken, deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçlar verdiğini belirlemişlerdir. Çalışmalarında analiz süresi SFM modeli ile 4 haftadan 4 güne indirilmiştir. Hem deney hem de HAD sonuçları fırının ısıl veriminin havadaki artan O_2 miktarıyla yükseldiğini göstermiştir.

Sungur (2013) yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında literatürde bulunan ve deneysel analizi yapılmış $CH_4/H_2/N_2$ kompozit yakıtının yanma prosesini iki boyutlu olarak Ansys Fluent programı ile incelemiştir ve analiz sonuçlarını deney sonuçları ile kıyaslamıştır. Bu çalışmada ayrıca yakıt oranları değiştirilerek ve N_2 yerine CO_2 hesaba alınarak alev yapısı incelenmiştir. Nümerik analizlerde yanma modeli olarak ön karışımsız kimyasal dengeli PDF modeli kullanılmıştır ve CO ile NO türleri hariç diğer kimyasal türlerin yoğunlukları deneylerle kıyaslanabilecek seviyede hesaplanmıştır.

Kashir ve Tabejamaat (2013) k-ϵ türbülans modelini ve SFM yaklaşımını kullanarak, geliştirilen bir kod ile deneysel olarak daha önceden incelenmiş bir alev jetini nümerik olarak analiz etmişlerdir. Bu çalışmada yakıt kompozisyonu %33.2 H_2, % 22.1 CH_4 ve % 44.7 N_2 olmuştur. Nümerik analiz sonuçları, deneyler ile sıcaklık ve kimyasal tür dağılımı bakımından iyi uyum göstermiştir. Daha sonraki çalışmalarda CH_4 yakıtı C_3H_8 yakıtı ile değiştirilmiştir. C_3H_8 yakıtının mol kesri sabit tutulurken H_2 hacim konsantrasyonu %33.2'den %73.2'ye kadar yükseltilerek analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre H_2 konsantrasyonu arttıkça alev uzunluğu artarken sıcaklık değerleri de yükselmiştir. Radyasyonla olan ısı kaybı kesri de H_2 yakıtının artışı ile yükselmiştir. Bununla birlikte CO emisyon seviyesi de yükselmiştir.

Peters (1984) ön karışımsız türbülanslı reaksiyonlu akışlarda laminer alev konseptinin formüle edilişini göstermiştir. Kimyasal türlerin eşit difüzyon katsayısına sahip olduğu bir kabul durumunda ($D_{i,\,j}$ =D), karışım kesrinin koordinat olduğu tek

boyutlu laminer alev yapısı, sıcaklık ve karışım kesrinin fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Laminer alev yapılarında kimyasal modellemenin ve moleküler geçişlerin çalışılabileceği en uygun temsili akış konfigürasyonunun karşıt akışlı bir geometri olduğu belirtilmiştir.

Bilger (1975) değişken yoğunluklu türbülanslı akışkanlarda hareket denklemlerinin ve korunumlu skaler denklemlerinin Reynolds ortalamalı formüle edilmesi yerine, Favre ortalamalı olarak formüle edilmesini göstermiştir ve değişken yoğunluklu akışkanlarda yoğunluk terimine bağlı türbülans dalgalanmalarının ihmal edilmesiyle oluşacak hatalardan bahsetmiştir. Favre ortalamalı formülasyon ile yoğunluk terimine ait türbülans dalgalanmasının hesaba alınış yöntemi bu çalışmada gösterilmiştir.

Spangelo (2004) düşük NO_x değerli ve girdap etkili brülörler üzerine deneysel, teorik ve nümerik olarak çalışmıştır. 200 kW kapasiteli brülör, 370 kW ve 20 kW olmak üzere ölçeklendirilmiştir. Artan kazan/brülör çap oranıyla ve soğutma hızıyla NO_x emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Ancak bu parametrelerin alev rejiminde kararsızlığa sebep olabileceği sonucuna varılmıştır. 20 kW kapasiteli brülör ile yapılan iki boyutlu nümerik analizlerde ise farklı türbülans ve yanma modelleri kullanılmıştır. En uygun türbülans – yanma model kombinasyonu Reynolds Stress – Flamelet PDF olarak belirlenmiştir.

El-Ghafour, El-Dein ve Aref (2010) doğal gaz ve hidrojen gazının karışımından oluşan hibrit bir yakıtın yanma performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Gaz karışım oranları %100 doğal gazdan, %50 doğal gaz – %50 hidrojen gazı oranlarına uzanacak şekilde çeşitli oranlarda ayarlanmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, doğal gaza hidrojen eklentisi alev stabilizesini arttırmıştır ve alev uzunluğunu da kısaltmıştır. Doğal gaza hidrojen eklentisi alev sıcaklığını yükseltirken, NO ve CO emisyonlarını azaltıcı etki yapmamıştır. Ancak CO_2 emisyonları molar konsantrasyon olarak %30 mertebesinde düşmüştür.

Khanafer ve Aithal (2011) bir yakıcının sağladığı girdap hızının ve yanma hacmi duvar sıcaklıklarının NOx emisyonları üzerine olan etkilerini FIDAP programı ile nümerik olarak incelemişlerdir. Analizlerde kimyasal denge yaklaşımı uygulanmıştır. Sonuçlara göre artan girdap hızı CO emisyonlarını ve yanmamış hidrokarbon bileşenlerinin miktarını azaltmıştır. Ancak NOx emisyonları girdap hızıyla orantılı olarak değişmemiştir.

Feyz, Esfahani, Pishbin ve Razavi (2015) 55kW gücünde ön karışımlı doğal gaz yakıcısının yanma performansı üzerine deneysel olarak çalışma yapmışlardır. Yakıcı uzunluğunun çapına olan oranına bağlı olarak yanma performansları incelenmiştir. Deneylerde yakıcı ucuna bağlı olan ve yakıcı ucundan ayrık şekilde olan alev tipleri gözlemlenmiştir. Çalışmada yakıcı ucundan ayrık şekilde yer alan alev ile daha iyi ısı transferi sağlandığı belirtilmiştir.

Zadghaffari, Moghaddas ve Rahimiahar (2012) yakıcı uç açısının değerlerini değiştirmek suretiyle ön karışımsız bir yanma sisteminin sıcaklık ve emisyon değerlerini incelemişlerdir. Optimum yakıcı uç açıları kazan içerisinde düşük NO_x değerleri ile üniform akışın sağlanması doğrultusunda belirlenmiştir.

Hossain ve Malalasekera (2001) nümerik olarak sentez gazının yanmasını farklı yanma modelleri kullanarak incelemişlerdir ve elde edilen sonuçları deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Kullanılan yanma modelleri eddy – break up, reaksiyon levhası ve laminar flamelet model olmuştur. Bu üç yanma modeli benzer H_2, CO ve H_2O emisyon değerleri verse de, sıcaklık bakımından en uygun sonuç laminar flamelet modelinden alınmıştır.

Ge, Tian ve Zang (2016) sentez gazının yanmasını deneysel olarak farklı CO/H_2 oran durumları ve yanma havasındaki farklı nem yoğunluğu durumları için incelemişlerdir. CO/H_2 oranının artmasıyla alev bölgesinde oluşan OH radikallerinin yakıcıdan uzaklaştığı gözlemlenmiştir. $CO/H_2 > 2$ olduğu durumlarda yakıcı uçtan ayrık alev oluşmuştur. Hava içerisinde artan H_2O oranıyla, alevin yakıcı uçtan ayrılma özelliği azalmıştır, reaksiyon alanı daralmıştır, emisyon gazlarının sıcaklıkları ve NO_x emisyon değerleri azalmıştır.

Ballester, Dopazo, Fueyo, Hernandez ve Vidal (1997) doğal gaz yakılan brülör – kazan sistemlerinde iki farklı NO_x salınımını azaltan yöntem üzerine deneysel olarak çalışmışlardır. Bu yöntemler yakıt ve yanma havasının kademelendirilmesi üzerine olmuştur. Yakıtın kademelendirildiği durumda toplam yakıtın çoğunun ikincil alevde tükendiği belirlenmiştir. Oluşan brülör ağzı girdabıyla, düşük oksijen yoğunluğu ve sıcaklık dereceleri oluşturulmuştur. Bu sayede NO_x salınımları standart bir brülöre göre azaltılmıştır. Laboratuvar koşullarında düşük NO_x salınımı veren brülör, boyut analizi ile yüksek kapasitelere çıkarılarak endüstriyel bir kazanda denenmek üzere üretilmiştir ve bu

brülörün standart bir brülöre göre %70 civarında daha az NO_x salınımı yaptığı ölçülmüştür.

Noor, Wandel ve Yusaf (2014) biyogazın yanma simülasyonunu Ansys Fluent programı ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında ağırlıklı olarak çözüm yöntemleri ve çözümün stabil davranış göstermesi bakımından kullanılması gereken uygun nümerik parametrelerin belirlenebilmesi hakkında bilgiler sunulmuştur.

Zohra, Mounir ve Salah (2017) Ansys CFX programı ile hidrojen gazı ile zenginleştirilmiş metan gazının yanma simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada farklı oranlarda olan hidrojen katkısının yanma hacmi içerisindeki sıcaklık dağılımları üzerine olan etkileri çıkarılmıştır.

Ilbas (2005) Fluent programını kullanarak radyasyonun yanma sıcaklığı ve emisyonlar üzerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışmada farklı radyasyon modelleri (P1 ve DTRM) kullanılmıştır. Yakıt olarak da %100 CH_4, %70 H_2 - %30 CH_4 ve %100 H_2 kullanılmıştır. Kullanılan her iki radyasyon modeli ile sıcaklık ve emisyon değerleri bakımından benzer sonuçlar elde edilirken, deney sonuçlarıyla uyumlu değerler elde edilmiştir. Radyasyonsuz analizlerde ise sıcaklık ve NO_x değerlerinde oldukça yüksek sonuçlar elde edilmiştir ve deneylerle uyumsuz sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Keramida, Liakos, Founti, Boudouvis ve Markatos (2000) yaptıkları çalışmada nümerik olarak iki farklı radyasyon modelinin doğal gazın yanma prosesi üzerine olan etkilerini incelemişlerdir ve elde edilen sonuçları deneysel verilerle kıyaslamışlardır. İncelenecek akış sistemi olarak türbülanslı ve ön karışımsız doğal gaz alevi seçilmiştir. Yapılan analizlerde radyasyonun dahil edilmesiyle elde edilen sonuçların, radyasyonsuz sonuçlara göre deneysel verilerle daha uyumlu olduğu görülmüştür. Çözümlere radyasyonun dahil edilmesi alev boyutunu küçültmüştür ve kazan duvarlarından atılan ısıyı radyasyonsuz duruma göre dört kat arttırmıştır.

Ilbas ve Karyeyen (2017) Ansys Fluent programı ile düşük kalorili sentez gazının yanma karakteristiklerini incelemişlerdir. İlk olarak deneysel verilerle uyumlu sonuçlar veren analizler elde edilmiştir. Daha sonra türbülatör kanat açısı 15^o ile 45^o arasında 15^o'lik aralıklarla değiştirilerek, yanma odasındaki sıcaklık ve emisyon dağılımında olan değişimler çıkarılmıştır. Yanma modeli olarak ön karışımsız model ve türbülans modeli olarak da standart k-ϵ modeli kullanılmıştır.

Cellek ve Pınarbaşı (2018) Ansys Fluent programı ile CH_4, doğal gaz, doğal gaz – H_2 ve H_2 yakıtlarının aynı ısıl kapasiteyi sağlayacak şekilde brülör-kazan sistemlerinde yakılması sonucu oluşan sıcaklık ve emisyon farklılıklarını incelemişlerdir. CH_4 ve doğal gazın yakıt olarak kullanıldığı analizlerde çok benzer sonuçlar alınmıştır. Doğal gaza H_2 gazının eklenmesiyle ise CO_2 ve CO emisyonları azalırken, NO_x emisyonları ciddi oranda artmıştır.

Shakeel, Sanusi ve Mokheimer (2017) CH_4 gazının saf O_2 ve $O_2 – CO_2$ karışımı ile yakılması sonucu oluşan kazan çıkışı radyal sıcaklık dağılımlarını ölçmüşlerdir ve Ansys Fluent programı ile farklı reaksiyon mekanizmaları ve radyasyon mekanizmaları kombinasyonlarını kullanarak deneylerle tutarlı sonuçlar elde etmeye çalışmışlardır. Deneyler ile en tutarlı reaksiyon mekanizması ve radyasyon modeli kombinasyonu sırasıyla Jones-Lindstedt (5 denklem) (Andersen, Rasmussen, Giselsson ve Glarborg, 2009) ve WSGGM (Bordbal, Węcel ve Hyppänen, 2014) olmuştur.

Saini, Prakash, De ve Yadav (2018) iki farklı yanma modelini kullanarak (Unsteady Diffusion Flamelet Model / UDFM ve Eddy Dissipation Concept / EDC) üç farklı metan alevini (Sandia D, E ve F) Ansys Fluent 16 ve OpenFOAM 2.1 ile nümerik olarak analiz etmişlerdir. Reaksiyon mekanizması olarak Gri 3.0 mekanizması kullanılmıştır. Çalışmanın amacı farklı yanma modellerinin NO emisyonlarını uygun olarak belirleyebilmesi üzerine olmuştur. UDFM modeli NO emisyonlarının tahmin edilmesinde daha iyi sonuç vermiştir.

Shinomori, Katou, Shimokuri ve Ishizuka (2011) deneysel olarak düşük NO_X oluşturan bir prototip sıvı yakıcılı brülör üzerine çalışmışlardır. Prototip yakıcının ana gövdesi ile uç borusu arasında, kazan içi yanmış gazların sirkülasyonunun sağlanacağı şekilde bir sirkülasyon boşluğu oluşturulmuştur. Ölçümler sonucu kazan içi yanmış gazların brülör borusu içine girmesi sonucu, taze hava ile oluşturulan karışımın hacim olarak %50'e kadar yanmış gazlar tarafından oluşturulabildiği belirlenmiştir. Bu sayede NOx emisyonlarının orijinal değeri olan 108 PPM'den 22 PPM'e düştüğü deneysel olarak ölçülmüştür. Hava fazlalık katsayısı 1.6 değerine çıkarılınca ise mavi alev oluşumu gözlemlenmiştir ve NOx emisyon değerleri 18 PPM'e düşmüştür

Ilbas ve Şahin (2017) farklı türbülatör açılarında ve H_2 eklenmesiyle biyogazın yanma karakteristiği üzerine nümerik bir çalışma yapmışlardır. Nümerik çalışmalarda

PDF/ karışım fraksiyonu yanma modeli kullanılmıştır. İlk olarak 15°'lik türbülatör açısı altında biyogaz ile yapılan HAD analizleri deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ardından 30° ve 45° türbülatör açısı ile yanma sıcaklığı ve emisyonlarında oluşan değişimler çıkarılmıştır. Türbülatör açısı arttıkça yanma odası içerisinde alev sıcaklığı yükselmiştir. Bu durum yakıt ile havanın daha iyi karışmasına bağlanmıştır. Ek olarak, biyogaza H_2 gazının eklenmesiyle yanma odası içerisinde merkez eksendeki sıcaklık değerleri yükselmiştir.

Ilbas, Bektas ve Karyeyen (2018) düşük kalorili kömür gazının oksijenle yakılmasının alev karakteristikleri üzerine olan etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler 10 kW ısıl kapasite ve 1.2 oksijen fazlalık katsayısı şartlarında yapılmıştır. Sonuçlar aynı brülör ve yanma ortamında yapılan ve oksitleyici gaz olarak havanın kullanıldığı deney sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Sonuçlara göre oksitleyici gazın saf oksijen olması durumunda elde edilen yanma performansının, oksitleyici gazın hava olması durumuna göre iyileştiğini ve alev sıcaklığının yaklaşık olarak %22 arttığını göstermiştir. Diğer yandan artan alev sıcaklığı ile birlikte NO_X emisyonlarında artış meydana gelmiştir.

Karyeyen (2018) metan gazının yanmasıyla ilgili olarak deneysel ve nümerik çalışma yapmıştır. Nümerik çalışma için Ansys Fluent programından yararlanılmıştır ve ön karışımsız yanma modeli kullanılmıştır. Farklı O_2 konstrasyonlarında ve oksitleyici gaz karışımı sıcaklıklarında yanma odası içerisindeki sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Sonuçlara göre oksitleyici gazdaki O_2 konsantrasyonunun yanma gazı ürünlerinin dahil edilmesi suretiyle seyreltilmesi, yanma odasındaki sıcaklık dağılımını orijinal duruma göre daha üniform hale getirmiştir. Bu da NO_X emisyonlarında düşüş sağlamıştır.

Ti vd. (2016) pulverize kömürün yanma karakteristiği ve yanma sırasında oluşan NO_X emisyonları üzerine nümerik olarak çalışma gerçekleştirmişlerdir. Nümerik analizler ilk olarak var olan bir test düzeneğinden elde edilen sonuçlarla doğrulanmıştır. Ardından, yakıcı ana hava borusu ve ikincil hava borularının farklı uzunluklarda tasarlanması sonucunda alev sıcaklıkları ve NO_X emisyonlarında olan değişimler incelenmiştir.

Hu ve Zhang (2019) biyogaz ve hidrojen karışımlarının yanması üzerine sabit hacimli bir yanma odasında deneysel çalışma yapmışlardır ve çeşitli parametrelerin alev stabilitesi ve şekli üzerine olan etkilerini çıkarmışlardır. Bu parametreler yakıt

içerisindeki CO_2 ve H_2 oranları, basınç değerleri ve hava fazlalık katsayısı değerleri olmuştur.

Rajpara, Shah ve Banerjee (2018) hidrojen gazının metan gazına eklenmesi sonucu yanma parametrelerinde olan değişimleri nümerik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Nümerik çalışmalarda türbülans modeli olarak LES kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda yakıcı çıkışındaki emisyonlar ölçülmüştür ve alev görüntülemesi yapılmıştır. Aynı ısıl yükte metan gazına hidrojen gazının ilave edilmesiyle yanma alevinde kısalma ve genişleme gözlemlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre hidrojen ilavesi alev sıcaklığını arttırırken alev boyutlarını azaltmıştır. Ayrıca CO emisyonlarında azalma oluşurken, NO_X emisyonlarında hafif artış meydana gelmiştir.

Abubakar, Shakeel ve Mokheimer (2018) propan ve hidrojen gazı karışımlarının alev kararlılığı üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Oksitleyici gaz olarak saf O_2 ve farklı oranlarda CO_2 ile seyreltilmiş O_2 karışımları kullanılmıştır. Sonuçlara göre oksitleyici gaz belirli bir seyreltici CO_2 seviyesine sahipken, yakıt içeriğindeki hidrojen içeriğinin arttırılması alev kararlılığını arttırmıştır. Ayrıca yakıcı sistem sabit bir güç ile çalıştırıldığında, yakıttaki hidrojen gazının arttırılması ile de alev kararlılığı arttırılmıştır. Bu çalışmada oksitleyicinin sabit O_2 ve CO_2 karışımlarından oluşması durumu için nümerik analizler de gerçekleştirilmiştir. Çalışmada hidrojen gazı eklentisinin yanma parametreleri üzerine olan etkileri çıkarılmıştır. Yanma modeli olarak kimyasal denge-ön karışımsız model kullanılmıştır. Nümerik sonuçlara göre, yakıta hidrojen eklentisi aksiyel sıcaklık değerlerini arttırmıştır. Ayrıca hidrojen eklentisi ile birlikte CO_2 emisyonları azalırken, CO emisyonlarında artış elde edilmiştir.

Bouras, Attia, Khaldi ve Si-Ameur (2017) metan yakıtına hidrojen eklenmesiyle yanma parametreleri üzerinde olan değişimleri nümerik olarak incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre hidrojen eklentisi ile yanma gazlarının hızında ve sıcaklığında artış meydana gelmiştir. Yakıttaki hidrojen gazı katkısı %0'dan %100'e kadar değiştirilmiştir. Sonuçlara göre CO emisyonları hidrojen eklentisi ile azalmıştır.

Hashemi, Hajialigol, Mazaheri ve Fattahi (2014) bir yakıcıda hava ve yakıt girişlerini içinde barındıran alev tutucu ucun çap ve uzunluğunun alev yapısına olan etkisini nümerik olarak incelemişlerdir. Türbülans modeli olarak k-$\in$ modeli ve kimya – türbülans etkileşimi olarak da β – PDF modeli kullanılmıştır. Yakıt olarak ise saf metan

gazı, saf hidrojen gazı ve bu iki gazın %50 oranlarında karışımı kullanılmıştır. Alev tutucu ucun geometrisinden bağımsız olarak, metan gazına hidrojen gazının eklenmesiyle alev sıcaklık ve NO_X emisyon değerlerinde artış elde edilmiştir. Sabit alev tutucu uzunluğunda çap değerinin artmasıyla alev sıcaklıklarında önce artış meydana gelirken, en yüksek alev tutucu çap değerlerinde ise alev sıcaklığında bir miktar düşüş meydana gelmiştir. Sabit alev tutucu çapında ise, alev tutucu parçanın boyunun artmasıyla alev boyunda azalma meydana gelirken, sıcaklık değerlerinde artış meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar yanma ortamında meydana getirilen sirkülasyon bölgelerinin büyüklük değerlerindeki değişimler ile yorumlanmıştır.

Bu tez çalışmasında ise ön karışımsız bir doğal gaz brülörü ve bu brülörün kullanıldığı karşı basınçlı test kazanı üzerinde deneysel ve nümerik olarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak deneysel çalışmalar sabit yakıt tüketiminde farklı hava fazlalık kat sayılarının kullanılmasıyla ve sabit hava fazlalık katsayısında farklı yakıt tüketim değerlerinin sağlanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sabit rejim koşulları altında yapılmıştır. Baca gazı emisyon değerleri ve baca gazı sıcaklık değerleri kayıt altına alınmıştır. Ardından HAD çalışmalarına geçilmiştir. HAD çalışmalarında farklı yanma modelleri kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile baca gazı emisyon ve sıcaklık değerleri bakımından kıyaslanmıştır. Deneysel verilerle tutarlı sonuçların elde edilmesinin ardından, brülör başlık yapısının yanma odasındaki alev yapısı ve baca gazı emisyon değerleri üzerindeki etkileri nümerik çalışmalar ile ortaya çıkarılmıştır. Yapılan farklı tasarımlara göre en uygun brülör başlık yapısı NO_X emisyonlarının indirgenmesi yönünde belirlenmiştir. Ayrıca orijinal brülör başlık yapısının kullanılması ile metan yakıtına hidrojenin farklı oranlarda eklenmesi durumunda yanma parametrelerinde meydana gelen değişimler yine nümerik çalışmalar aracılığıyla çıkarılmıştır. Yine NO_X emisyonlarının indirgenmesi bakımından hidrojenin en uygun katkı oranı belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

YANMA VE KİMYASAL KİNETİK

Yanma, genel anlamda bir yakıtın oksitleyici bir gaz ile tepkimeye girip ortaya ısı enerjisinin çıkarılması olayıdır. Uygulamada yakıt olarak çoğunlukla doğal gaz, benzin, motorin ve fuel oil kullanılır. Oksitleyici gaz ise hava, saf oksijen veya havanın başka gazlarla olan karışımları şeklinde olmaktadır. Yanma enerjisi ısı ve güç üretiminde kullanılmaktadır. Örnek olarak evsel ısınma ihtiyacının karşılanması, arabalardan hareket enerjisi üretilmesi, endüstriyel kazanlardan ısı enerjisi elde edilmesi ve dolayısıyla türbinlerden yararlı enerji üretilmesi verilebilir.

Yanma olayının altında yatan temel neden, sistemlerin maksimum düzensizlik durumuna geçme eğilimidir. Bu da entropinin artışıyla ilişkilendirilir. Uygun şartların sağlanması durumunda yakıt ile oksitleyici tepkimeye girerek, yakıt içerisindeki kimyasal enerji ürünlere ısı enerjisi şeklinde transfer edilir ve sonuç olarak var olan yakıt – oksitleyici sistemi daha düzensiz bir duruma geçer. Burada önemli olan, bu süreç sırasında sistemden maksimum yararlı enerjiyi çekebilmektir.

Yanma olayı termodinamik açıdan entropinin artış ilkesine dayanarak açıklanabilir. Kapalı bir sistemde enerjinin korunumu Eş.(2.1) ile gösterilir.

$$dE = \delta Q - \delta W \tag{2.1}$$

Bir sistem içerisinde var olan kaçınılmaz entropi artışından ötürü Eş.(2.2) yazılabilir.

$$TdS \geq \delta Q \tag{2.2}$$

Sistem üzerindeki işin sadece hacim değişimiyle yapıldığı varsayılırsa Eş.(2.3) yazılabilir.

$$dE \leq TdS - PdV \tag{2.3}$$

Eş.(2.3)'de ki iç enerji fonksiyonu birden çok kimyasal tür içeren bir karışım için tanımlanırsa Eş.(2.4) yazılır (Law, 2006).

$$E = f(S, V, N_i) \tag{2.4}$$

Eş.(2.4)' de N_i terimi i türünün molar değeri olabilir. Eş.(2.4)'de ki fonksiyonun her bir parametreye bağlı olarak kısmi türevinin yazılmasıyla Eş.(2.5) elde edilebilir.

$$dE = \left(\frac{\partial E}{\partial S}\right)_{V, N_i} dS + \left(\frac{\partial E}{\partial V}\right)_{S, N_i} dV + \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial E}{\partial N_i}\right)_{S, V, N_{j \neq i}} dN_i \tag{2.5}$$

Eş.(2.5) denklemi Eş.(2.6) şeklinde yazılabilir.

$$dE = TdS - PdV + \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial E}{\partial N_i}\right)_{S, V, N_{j \neq i}} dN_i \tag{2.6}$$

Eş.(2.6)'da ki son terim kimyasal potansiyel olarak tanımlanabilir (Law, 2006).

$$\bar{\mu}_i = \left(\frac{\partial E}{\partial N_i}\right)_{S, V, N_{j \neq i}} \tag{2.7}$$

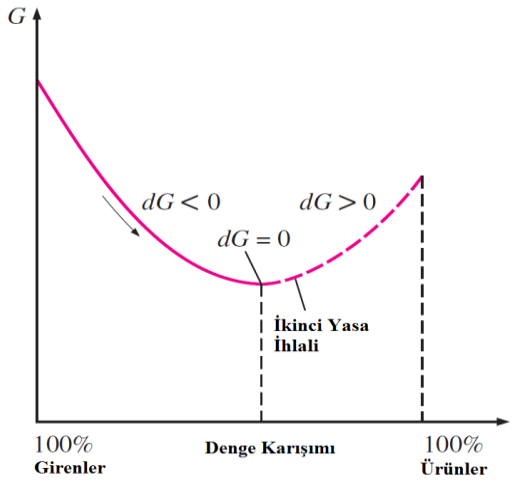
Eş.(2.3) ve Eş.(2.6) kıyaslandığı zaman Eş.(2.8) yazılır.

$$\sum_{i=1}^{N} \bar{\mu}_i \, dN_i \leq 0 \tag{2.8}$$

Gibbs fonksiyonunu kullanarak (G = H – TS) Eş.(2.9) türetilirse;

$$dG = -SdT + VdP + \sum_{i=1}^{N} \bar{\mu}_i \, dN_i \tag{2.9}$$

Dolayısıyla sabit basınç ve sıcaklık şartlarında gerçekleşen herhangi bir kimyasal proses Gibbs fonksiyonunu daima azaltacak yönde gerçekleşir. Aynı şekilde yanma olayında da reaksiyonlar Gibbs fonksiyonunu minimize edecek şekilde gerçekleşir ve kimyasal türler oluşturulur. Gibbs fonksiyonu minimize edildiği zaman kimyasal reaksiyonlar denge durumuna ulaşır. Bu duruma ilişkin şematik gösterim Şekil 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Sabit Basınç ve Sıcaklıkta Gibbs Fonksiyonunun Değişimi ve Kimyasal Denge Kriteri (Çengel, 2011)

2.1 Yanma İle İlgili Bazı Kavramlar

Metan gazının (CH_4) hava ile yanma denklemi Eş.(2.10)'da verilmiştir.

$$CH_4 + \mathbf{2}(O_2 + \mathbf{3.76}\ N_2) \longrightarrow CO_2 + \mathbf{2}\ H_2O + \mathbf{7.52}\ N_2 \qquad (2.10)$$

Eş.(2.10)'da verilen yanma denkleminde CH_4 gazı tam olarak tükenmiştir ve ürünler arasında da tepkimeye girmemiş fazladan O_2 bulunmamaktadır. Bu tür bir yanma işlemine stokiometrik yanma denmektedir. Ancak gerçek uygulamada yakıtın tam olarak yakılmasının garantiye alınması ve yanma sıcaklığının kontrol altında tutulması için belirli oranda fazla hava kullanılır. Aynı şekilde bazı durumlarda emisyonların kontrol altına alınması adına fazladan yakıt kullanımı da yapılabilir.

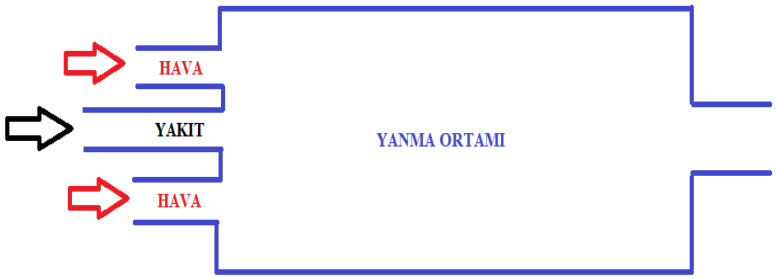
Hava Fazlalık Katsayısı: Literatürde genellikle λ sembolü ile gösterilir. Uygulamada kullanılan hava/yakıt değerinin, stokiometrik hava/yakıt değerine olan oranını belirtmektedir. Uygulamada doğal gaz yakıtı için kazanlarda genellikle 1.2 – 1.25 mertebelerinde hava fazlalık katsayısı kullanılmaktadır.

$$\lambda = \frac{\left(\text{Hava}/\text{Yakıt}\right)_{\text{uygulama}}}{\left(\text{Hava}/\text{Yakıt}\right)_{\text{stokiometrik}}} \qquad (2.11)$$

Yakıt Fazlalık Katsayısı: Bu parametre uygulamada kullanılan yakıt/hava değerinin stokiometrik yakıt/hava değerine olan oranını belirtmektedir.

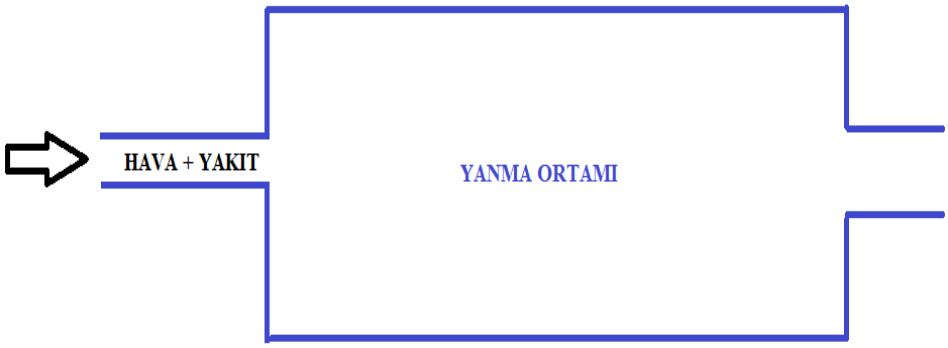
$$\varphi = \frac{\left(\text{Yakıt}/\text{Hava}\right)_{\text{uygulama}}}{\left(\text{Yakıt}/\text{Hava}\right)_{\text{stokiometrik}}} \quad (2.12)$$

Ön Karışımsız Yanma (Difüzyon Alevi): Bir yanma sisteminde yakıt ile oksitleyici gaz ayrı girişlerden yanma ortamına veriliyorsa bu yanma tipine ön karışımsız yanma ve oluşan aleve de difüzyon alevi denmektedir. Bu yanma işleminde reaksiyona giren gazlar alev cephesine difüzyon ile girerken, ürünler de difüzyonla alev cephesinden uzaklaşır. Bu tür yanmada, yanma odası içerisinde giriş şartlarına göre hesaplanan değerlerden daha yüksek ve daha düşük sıcaklık bölgeleri meydana gelebilmektedir. Yanmanın tam gerçekleşmesi için yakıt ile oksitleyici gazın yanma ortamında çok iyi karışması gerekmektedir. Ön karışımsız yanma tipine brülör – kazan sistemlerinde sıklıkla rastlanabilir. Ayrıca dizel motorlar ve enjeksiyonlu benzinli motorlarda da gerçekleşen yanma olayı ön karışımsız yanma tipi olarak örneklendirilebilir. Şekil 2.2'de ön karışımsız yanma tipi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Ön Karışımsız Yanma Tipi

Ön Karışımlı Yanma: Bu yanma tipinde gaz yakıt ile oksitleyici gaz yanma ortamına girmeden önce tamamen karıştırılır. Oluşan alev ön karışımsız yanma durumuna göre daha homojen ve yoğun olabilmektedir. Bu yanma sistemlerinde alevin geri tepme olasılığından kaynaklı uygulama güçlükleri bulunmaktadır. Şekil 2.3'de ön karışımlı yanma tipi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.3 Ön Karışımlı Yanma Tipi

Kısmi Ön Karışımlı Yanma: Bu yanma tipi ön karışımlı yanma ile ön karışımsız yanma tipi arasındadır. Yakıtın bir kısmı oksitleyici gaz ile karıştırtılırken bir kısmı ayrı girişten yanma ortamına girer.

2.2 Kimyasal Kinetik

Kimyasal kinetik, reaksiyon hızlarını reaksiyona giren ve çıkan türlerin yoğunluğu ve ortam sıcaklığı ile ilişkilendirmektedir. Tek ve ileri yönlü bir reaksiyon için Eş (2.13) yazılabilir (Law, 2006).

$$\sum_{i=1}^{N} v_i' \, M_i \xrightarrow{k_f} \sum_{i=1}^{N} v_i'' \, M_i \tag{2.13}$$

Reaksiyondaki herhangi bir i türünün değişim hızı ve türden bağımsız olan reaksiyon hızı sırasıyla Eş.(2.14) ve Eş.(2.15) ile yazılabilmektedir (Law, 2006).

$$\omega_i = \frac{dci}{dt} \tag{2.14}$$

$$\omega = \frac{\omega_i}{v_i'' - v_i'} = \frac{\omega_j}{v_j'' - v_j'} \tag{2.15}$$

Burada c_i kimyasal tür yoğunluğu olmaktadır. Reaksiyon hızı ω olgusal kütle tesir kanunu ile şu şekilde yazılabilmektedir (Law, 2006);

$$\omega = k_f \prod_{i=1}^{N} c_i' \tag{2.16}$$

Eş. (2.16)'da k_f ileri reaksiyon hız sabitidir. Denge haline gelmiş bir reaksiyon için net reaksiyon hızı sıfırdır. Dolayısıyla Eş.(2.17) yazılabilir.

$$k_f \prod_{i=1}^{N} c_i' = k_b \prod_{i=1}^{N} c_i'' \tag{2.17}$$

Denge halindeki bir reaksiyon için denge sabiti, ileri (k_f) ve geri yönlü (k_b) reaksiyon hız sabitlerinin oranı olmaktadır (Law, 2006).

$$K_c = \frac{k_f}{k_b} \tag{2.18}$$

2.2.1 Arrhenius Denklemi

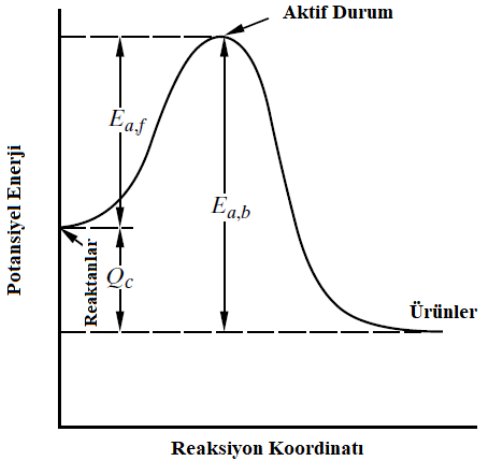
Elementer bir reaksiyon için reaksiyon hız sabiti k(T) şu şekilde yazılabilir (Raghavan, 2016);

$$k(T) = A\,T^m \exp\left[\frac{-E_a}{R_u T}\right] \tag{2.19}$$

Eş (2.19)'da A bir sabit, m sıcaklık üssü, E_a aktivasyon enerjisi (cal/mol), T (K) sıcaklık ve R_u (cal/mol.K) üniversal gaz sabitidir. Bahsedilen parametreler deneysel sonuçların nümerik yöntemlerle ilgili formüllere uygulanması ile belirlenebilmektedir (Law, 2006).

2.2.2 Aktivasyon Enerjisi

Aktivasyon enerjisi kimyasal reaksiyonların sıcaklıkla olan ilişkisinde önemli bir rol üstlenmektedir. Aktivasyon enerjisi bir kimyasal reaksiyonun gerçekleşmesi için çarpışan moleküllerin sahip olması gereken minimum enerji değerini temsil eder. Eş.(2.19)'da ki $\exp\left[\frac{-E_a}{R_u T}\right]$ terimi, fiziksel olarak aktivasyon enerjisinden daha fazla enerjiye sahip moleküler çarpışmaların oranını gösterir. Şekil 2.4'de ekzotermik bir reaksiyon için aktivasyon enerjisi kavramı şematik olarak gösterilmiştir (Law, 2006).



Şekil 2.4 Aktivasyon Enerjisi Kavramı

Bir kimyasal reaksiyonun aktivasyon enerjisindeki yükselme o reaksiyonun belirli sıcaklıktaki hızını lineer olmayan bir biçimde şiddetli şekilde düşürür. Yanma reaksiyonlarında ise aktivasyon enerjisinin artışı yanmanın başlayabileceği sıcaklığı yükseltir. Aktivasyon enerjisi yükseldikçe yanma sıcaklığı dar bir aralığa sıkışır ve bu aralıkta da reaksiyon hızı çok yüksek olacağından, reaksiyon patlama şeklinde gerçekleşebilir.

BÖLÜM 3

YAKITLAR VE DOĞAL GAZIN YANMA MEKANİZMALARI

Çalışmanın bu bölümünde yakıt türleri ve doğal gazın yanma mekanizmaları incelenmiştir ve literatür araştırması sonucu bulunan detaylı kimyasal mekanizmalara yer verilmiştir. Doğal gaz hacim olarak %96 mertebelerinde CH_4 gazından oluştuğu için (Çordaş Çorlu Doğalgaz Dağıtım A.Ş., 2018) CH_4 gazının yanma mekanizmaları incelemenin ana odağı olmuştur. CO ve H_2 gazları doğal gazın yakılması sırasında yüksek oranda meydana gelen ara ürünler olduklarından, bu gazların yanma mekanizmalarına da bu bölümde yer verilmiştir.

3.1 Yakıt Türleri

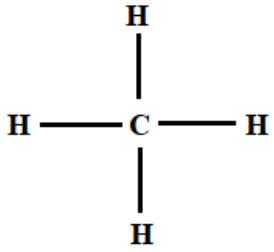
Yakıtlar fiziksel hal durumlarına göre gaz, sıvı ve katı yakıtlar olarak sınıflandırılabilirler. Gaz yakıtlar hafif hidrokarbonlar, H_2 ve CO olarak örneklendirilebilir. Sıvı yakıtlar ise alkoller ve daha ağır olan benzin ve motorin gibi hidrokarbonlar olmaktadır. Katı yakıtlara ise kömür, tahta ve karbon olarak örnek vermek mümkündür.

3.1.1 Hidrokarbonlar

Hidrokarbonlar en sık kullanılan yakıt türlerindendir. Hidrokarbonlar bünyelerinde sadece C ve H atomlarını ihtiva ederler ve moleküldeki iki karbon atomunun arasındaki bağ sayısına göre gruplandırılmaktadırlar. En küçük ve basit hidrokarbon molekülü CH_4 (metan) molekülüdür.

3.1.1.1 Alkanlar

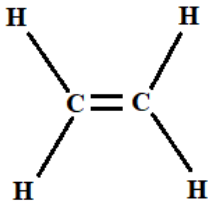
Karbon atomlarının birbirlerine tek bağ ile bağlı olduğu doymuş hidrokarbonlara alkanlar denmektedir. Genel formülleri C_nH_{2n+2} olmaktadır. En küçük alkan molekülü CH_4 molekülüdür. Şekil 3.1'de CH_4 molekülünün yapısı verilmiştir.



Şekil 3.1 CH_4 Molekülü Yapısı

3.1.1.2 Alkenler

Bünyesinde en az bir tane çift bağlı C=C yapısı bulunduran hidrokarbonlara alkenler denir. Genel formülleri C_nH_{2n} olmaktadır. Şekil 3.2'de C_2H_4 (etilen) molekülüne ait molekül yapısı gösterilmiştir (Law, 2006).



Şekil 3.2 C_2H_4 Molekülü Yapısı

3.1.1.3 Alkinler

Yapısında en az bir tane üçlü bağlı C≡C yapısı bulunduran hidrokarbonlara alkinler denmektedir. Moleküler formülleri C_nH_{2n-2} olmaktadır. Şekil 3.3'de en basit alkin molekülü olan C_2H_2'nin (asetilenin) moleküler yapısı gösterilmiştir (Law, 2006).



Şekil 3.3 C_2H_2 Molekülü Yapısı

3.1.1.4 Alkoller

Alkoller hidrokarbonların türevi olup, hidrokarbonların bünyesindeki bir veya daha fazla H radikalinin hidroksil grup (OH) ile yer değiştirmiş halidir. En basit alkoller metil alkol (CH_3OH) ve etil alkoldür (C_2H_5OH). Alkollerin birim kütle başına yanma ısısı değerleri hidrokarbonlardan daha düşüktür. Bunun sebebi bünyelerinde fazladan oksijen atomu ihtiva etmeleridir.

3.2 Doğal Gazın Yanma Mekanizmaları

3.2.1 Global ve Yarı Global Mekanizmalar

Detaylı kompleks kimyasal mekanizmaların tek bir mekanizma altında toplanması ile ortaya çıkan mekanizmaya global mekanizma denir. Bu mekanizmada reaksiyona girenler ve nihai ürünler bulunmaktadır. Çözümlerde uygulanabilirliği araştırma konusuna bağlı olmaktadır. Zira bu mekanizmaların kullanılması ile yapılan analizlerde gerçek verilerden farklı sonuçlar elde etmek mümkündür. Doğal gazın temel bileşeni olan CH_4 molekülü ve bu molekülün ara ürünleri olan CO ve H_2 moleküllerine ait global mekanizmalar sırasıyla Eş.(3.1), Eş.(3.2) ve Eş.(3.3)'de verilmiştir.

$$CH_4 + \mathbf{2}O_2 \longrightarrow CO_2 + \mathbf{2}H_2O \qquad (3.1)$$

$$CO + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad (3.2)$$

$$H_2 + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}O_2 \longrightarrow H_2O \qquad (3.3)$$

Global mekanizmalara temel ara ürünlerin yer aldığı reaksiyonların eklenmesiyle yarı global mekanizmalar oluşturulur. CH_4 molekülünün oksitlenmesine ilişkin yarı global mekanizma Eş.(3.4) ile yazılabilir.

$$CH_4 + \frac{\mathbf{3}}{\mathbf{2}}O_2 \longrightarrow CO + \mathbf{2}H_2O$$

$$CO + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}O_2 \longrightarrow CO_2 \qquad (3.4)$$

3.2.2 Detaylı Mekanizmalar

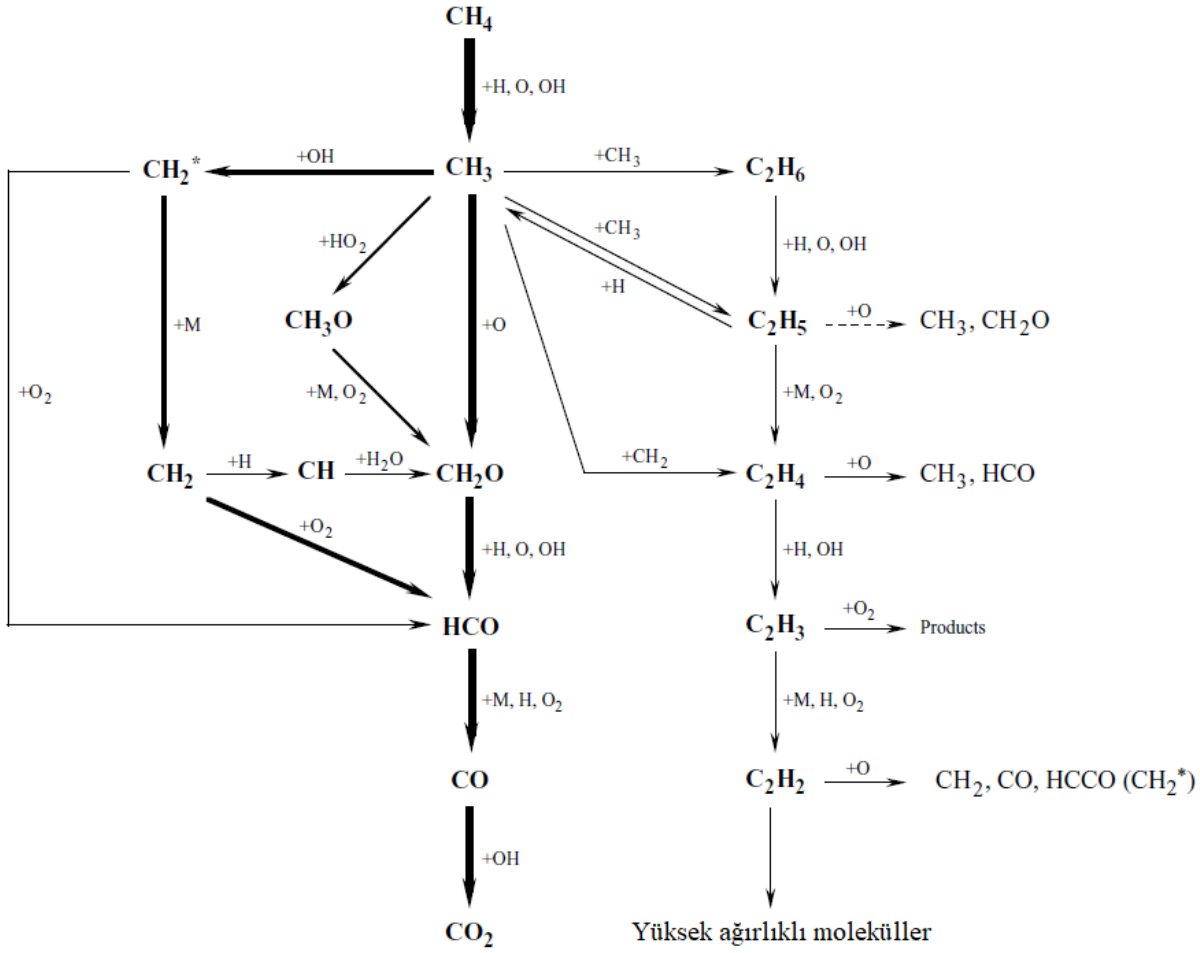
Gerçekte bir yanma mekanizması yüzlerce reaksiyon ve yüzlerce ara ürün içerebilir. Doğal gazın temel bileşeni CH_4 molekülünün ve bu molekülün parçalanmasıyla oluşan H_2 ve CO moleküllerinin nihai ürünlere dönüştürülmesi de birçok ara reaksiyonun gerçekleşmesi ve birçok ara ürünün oluşturulup tekrar yok olması ile gerçekleşir. Dolayısıyla gerçek bir yanma prosesini çözümlemek ve birçok reaksiyonun ve türün hesabını ayrı ayrı denklemlerle hesaplamak oldukça zordur. Şekil 3.4'de ilk olarak doğal gazın temel ara ürünleri olan CO ve H_2 moleküllerinin oksitlenmesine dair detaylı mekanizmalar verilmiştir. Verilen reaksiyonların her birinin etkili olduğu farklı fiziksel koşullar vardır. Dolayısıyla belirli bir koşulda bazı reaksiyonlar hızlı gerçekleşip etkili rol oynarken bazıları da ihmal edilecek kadar etkisiz kalabilir. Örnek olarak yanma ortamındaki sıcaklık yükseldikçe aktivasyon enerjisi yüksek olan reaksiyonlar etkili olur. Basınç artışı ile de aktif radikallerin birleşmesiyle nispeten kararlı ara ürünler oluşturulabilir. Bu da esasen yanma reaksiyonunu genel anlamda yavaşlatan durumlardandır. Şekil 3.4'de verilen B, α ve E_a parametreleri sırasıyla Arrhenius denkleminde kullanılan sabit sayı, sıcaklık üssü ve eşik enerjisi parametreleridir.

Reaksiyon	B[cm, mol, s]	α	E_a(kcal/mol)
H_2 - O_2 Zincir reaksiyonları			
$H + O_2 \rightleftharpoons O + OH$	1.9×10^{14}	0	16.44
$O + H_2 \rightleftharpoons H + OH$	5.1×10^{04}	2.67	6.29
$OH + H_2 \rightleftharpoons H + H_2O$	2.1×10^{08}	1.51	3.43
$O + H_2O \rightleftharpoons OH + OH$	3.0×10^{06}	2.02	13.40
H_2 - O_2 Ayrışma / Birleşme			
$H_2 + M \rightleftharpoons H + H + M$	4.6×10^{19}	−1.40	104.38
$O + O + M \rightleftharpoons O_2 + M$	6.2×10^{15}	−0.50	0
$O + H + M \rightleftharpoons OH + M$	4.7×10^{18}	−1.0	0
$H + OH + M \rightleftharpoons H_2O + M$	2.2×10^{22}	−2.0	0
HO_2'nin oluşumu ve yok olması			
$H + O_2 + M \rightleftharpoons HO_2 + M$	6.2×10^{19}	−1.42	0
$HO_2 + H \rightleftharpoons H_2 + O_2$	6.6×10^{13}	0	2.13
$HO_2 + H \rightleftharpoons OH + OH$	1.7×10^{14}	0	0.87
$HO_2 + O \rightleftharpoons OH + O_2$	1.7×10^{13}	0	−0.40
$HO_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + O_2$	1.9×10^{16}	−1.00	0
H_2O_2'nin oluşumu ve yok olması			
$HO_2 + HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2 + O_2$	4.2×10^{14}	0	11.98
	1.3×10^{11}	0	−1.629
$H_2O_2 + M \rightleftharpoons OH + OH + M$	1.2×10^{17}	0	45.50
$H_2O_2 + H \rightleftharpoons H_2O + OH$	1.0×10^{13}	0	3.59
$H_2O_2 + H \rightleftharpoons H_2 + HO_2$	4.8×10^{13}	0	7.95
$H_2O_2 + O \rightleftharpoons OH + HO_2$	9.5×10^{06}	2.0	3.97
$H_2O_2 + OH \rightleftharpoons H_2O + HO_2$	1.0×10^{12}	0	0
	5.8×10^{14}	0	9.56
CO Oksidasyonu			
$CO + O + M \rightleftharpoons CO_2 + M$	2.5×10^{13}	0	−4.54
$CO + O_2 \rightleftharpoons CO_2 + O$	2.5×10^{12}	0	47.69
$CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$	1.5×10^{07}	1.3	−0.765
$CO + HO_2 \rightleftharpoons CO_2 + OH$	6.0×10^{13}	0	22.95

Şekil 3.4 H_2 ve CO Yakıtlarının Oksitlenme Mekanizmaları (Law, 2006).

Doğal gazın ana bileşeni olan CH_4 molekülünün yanma mekanizması da birçok reaksiyonun gerçekleşmesi ve birçok ara ürünün üretilip tekrar yok olması ile gerçekleşir. Bu reaksiyonlarda özellikle H, O ve OH gibi radikallerin büyük önemi vardır. Bu aktif radikaller sayesinde CH_4 molekülü kendisinden H atomu alınmak suretiyle sürekli olarak alt ara ürünlere indirgenir ve sonuç olarak ortaya CO ve H_2 gibi ara ürünler çıkar. Bu ara ürünlerin yakılması da Şekil 3.4'de verilen mekanizmalar ile gerçekleşmektedir. Dolayısıyla H_2 ve CO moleküllerinin yanma mekanizmaları, CH_4 molekülünün yanma

mekanizmasının alt gruplarındandır. Şekil 3.5'de CH_4 molekülünün kademeli olarak indirgenmesine dair detaylı yanma mekanizması verilmiştir.



Şekil 3.5 CH_4 Yakıtının Detaylı Yanma Mekanizması (Law, 2006).

BÖLÜM 4

BRÜLÖRLER VE KAZANLAR

Çalışmanın bu bölümünde brülörler ve kazanlar hakkında bilgilere yer verilmiştir. Bölüm brülörler ve kazanlar başlıkları altında iki kısma ayrılmıştır.

4.1. Brülörler

Brülörler yakıt ve havanın uygun şekilde karıştırılarak yakıtın yakılmasını sağlayan cihazlardır. Brülörler ile yakıt ve havanın istenilen oranlarda istenilen şiddette karıştırılması sağlanarak kazan içerisinde istenilen yanma elde edilebilir. Yanma verimi ve emisyonları üzerinde brülör tasarımı ve tipinin büyük etkisi bulunmaktadır. Brülörlerin sınıflandırılması yakıt türüne, konstrüksiyonuna, kontrol sistemine, yakıcı düzenine ve fanlı olup olmamasına göre yapılabilir. Şekil 4.1'de endüstriyel ve domestik alanlarda kullanılan bir brülör örneğine yer verilmiştir.



Şekil 4.1 Monoblok Brülör (Ecostar, 2016)

4.1.1 Gaz ve Sıvı Yakıt Brülörleri

Uygulamada gaz brülör yakıtı genellikle doğal gaz olurken, sıvı brülör yakıtları ise motorin ve fuel oil olmaktadır. Gaz yakıt brülörlerinin emisyonları sıvı yakıt brülörlerine göre daha düşüktür. Endüstriyel uygulamalarda hem gaz hem de sıvı yakıt kullanan kombine brülörlerde yer almaktadır.

4.1.2 Yanma Havasının Sağlanmasına Göre Brülörler

4.1.2.1 Atmosferik Brülörler

Bu brülörlerde yanma havası fan aracılığıyla yanma ortamına iletilmez. Şebekeden düşük basınçtaki doğal gazın momentumu yakma için gerekli havayı emer. İkincil hava ise alev içerisine çevreden girer (Genceli ve Parmaksızoğlu, 2008). Atmosferik brülörlerin ısıl yük ihtiyacının çok değişken olmadığı kazanlarda kullanılması uygundur ve bu brülörlerde çoğunlukla gaz yakıt kullanır.

4.1.2.2 Fanlı Brülörler

Fanlı brülörlerde yanma havası brülöre entegre olan veya brülörden ayrı olan bir fan aracılığıyla brülör başlığı ve yanma ortamına gönderilir. İstenilen hava fazlalık katsayıları ve değişken ısıl yük ihtiyaçları bu brülörler ile sağlanır. Yüksek ısıl kapasite için endüstriyel uygulamalarda fanlı brülörlere ihtiyaç duyulur. Fanlı brülörlerin kapasiteleri 35 – 40 MW'a kadar çıkabilmektedir.

4.1.3 Kontrol Sistemlerine Göre Brülörler

Brülörler kontrol sistemlerine göre tek kademeli, çift kademeli ve oransal olmak üzere üç kısma ayrılır.

4.1.3.1 Tek Kademeli Brülörler

Tek kademeli brülörler sabit yakıt ve hava miktarıyla çalışırlar. Bu brülörler ısıl yük ihtiyacına göre sadece dur-kalk şeklinde çalışır.

4.1.3.2 Çift Kademeli Brülörler

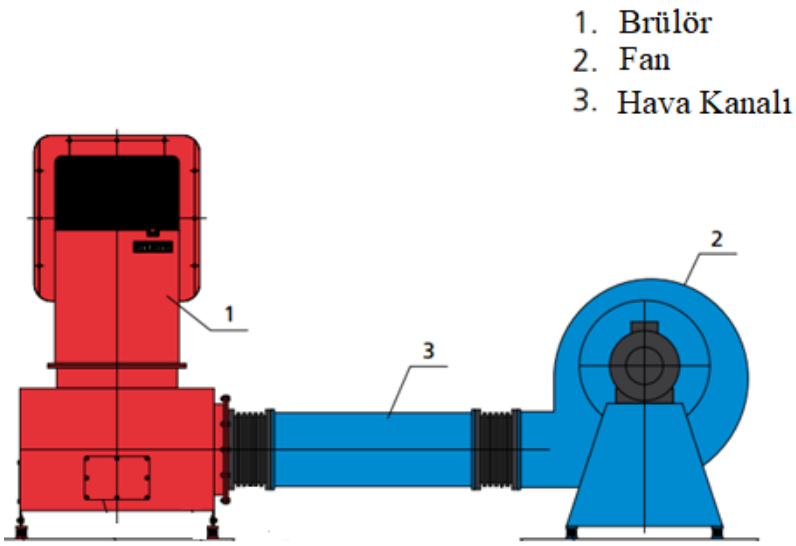
Çift kademeli brülörler minimum ve maksimum olmak üzere iki farklı yakıt tüketim seviyesinde çalışabilir. Brülör kademesi ısıl yüke göre ayarlanır.

4.1.3.3 Oransal Brülörler

Oransal brülörler minimum ve maksimum kapasite aralığında kalmak şartıyla istenilen bütün yakıt tüketim seviyelerinde çalışabilir. Ayrıca her noktada istenilen hava fazlalık katsayıları servo motorlar ile ayarlanabilir. Oransal brülörler tek ve çift kademeli brülörlerden daha verimlidirler. Enerji talebine göre düşük kapasitede ve yüksek kapasitede durdurulmadan sürekli çalışabilirler. Kademeli brülörlerde olan dur-kalk çalışma düzeni ve buna bağlı olan enerji kayıpları bu tür brülörlerde yaşanmamaktadır.

4.1.4 Konstrüksiyona Göre Brülörler

Yanma havasını tedarik eden fanın brülör gövdesine entegre olup olmamasına göre brülörler monoblok ve dualblok olmak üzere iki farklı gruba ayrılır. Dualblok brülörler yanma havasının başka bir ortamdan alınmasının gerektiği durumlarda kullanılabilmektedir. Şekil 4.2'de dualblok brülörler için şematik gösterim verilmiştir.



Şekil 4.2 Dualblok Brülör (Oilon, 2019)

4.1.5 Yakıcı Düzenine Göre Brülörler

Bu brülörler hava ile yakıtın yanma gerçekleşmeden önce tam olarak karışıp karışmamasına göre ön karışımlı ve ön karışımsız brülörler olarak iki kısma ayrılır. Ön karışımlı brülörler ön karışımsız brülörlere göre daha yoğun ve homojen alev sağlar. Ancak ön karışımlı brülörlerin alev geri tepmesi veya sıçraması gibi güvenlik sıkıntıları olabilmektedir.

4.2 Kazanlar

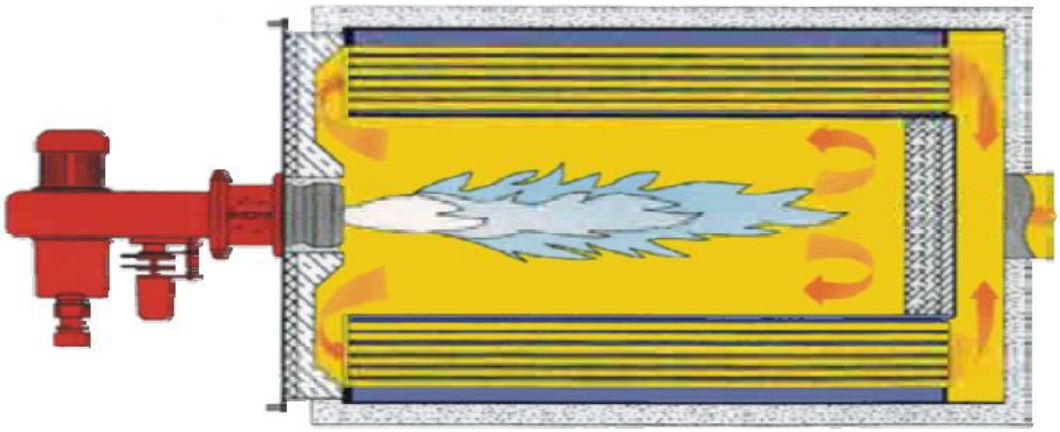
Kazanlar katı yakıtların veya brülörler aracılığıyla verilen sıvı ve gaz yakıtların yanması sonucu oluşan ısı enerjisini aracı bir akışkana aktaran sistemlerdir. Kazanlarda birçok fosil ve fosil olmayan yakıt türleri kullanılabilir. Ancak en yaygın olarak kullanılan yakıtlar doğal gaz, kömür ve çeşitli yağlar olmaktadır. Kazan içerisinde yakıt moleküllerinden gelen karbon ve hidrojen atomları oksitlenerek ve büyük miktarlarda kimyasal enerji ısı enerjisine dönüştürülerek alev ve duman gazları oluşturulur. Bu duman gazları kazan içerisinde çeşitli yapılardan geçerek ısısını aracı akışkanlara verir ve ısı enerjisi veya güç elde edilir. Bir brülör – kazan sisteminin genel verimi brülöre bağlı olduğu kadar kazan tasarımına ve uygunluğuna da bağlıdır. Kazanların sınıflandırılması aşağıdaki kıstaslar ile yapılabilmektedir;

- Yapıldığı malzemeye göre
  - Çelik
  - Döküm
  - Paslanmaz çelik
- Yakıt türüne göre
  - Katı yakıtlı (kömür)
  - Gaz ve sıvı yakıtlı
- Isı transfer aracı akışkan türüne göre
  - Sıcak su
  - Buhar
  - Yağ
- Geçiş şekline göre
  - İki geçişli

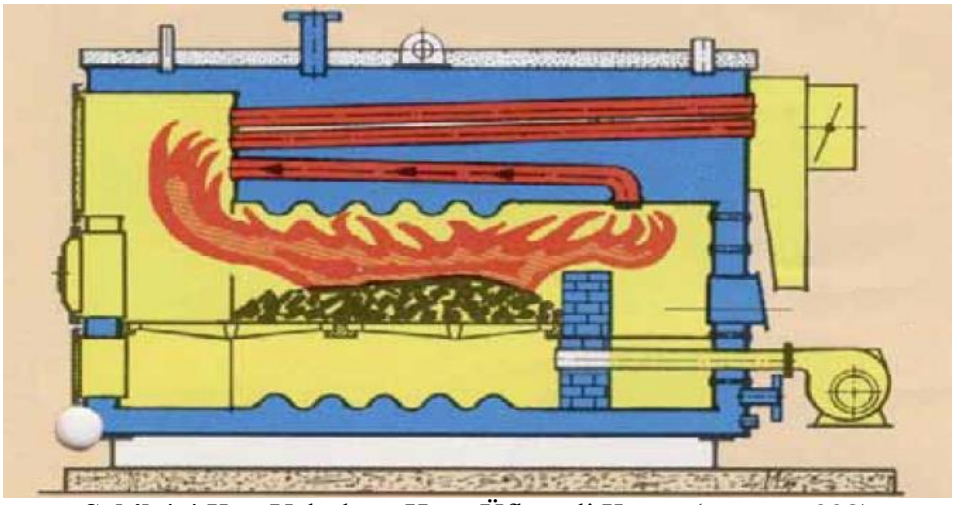
- Üç geçişli
- İki geçişli yanma odası geri dönüşlü

- Yakıcı türüne göre
  - Atmosferik yakıcılı
  - Fanlı yakıcılı
- Kazan yapısına göre
  - Yarı silindirik
  - Silindirik
  - Karşı basınçlı

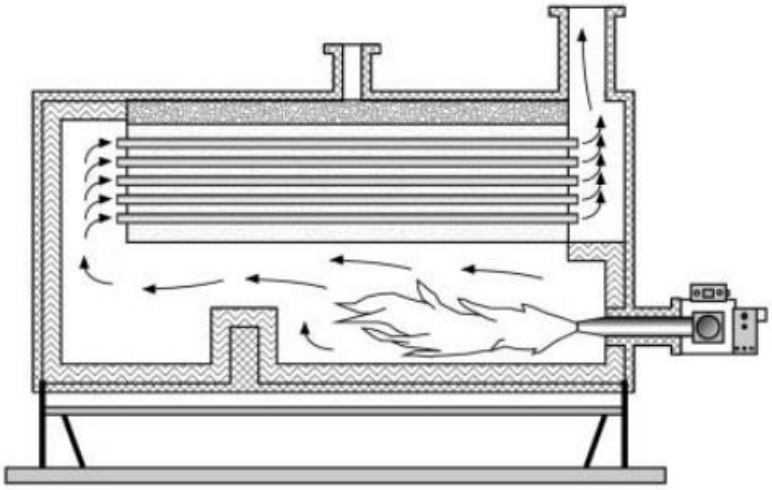
Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de bazı kazan tiplerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3 Silindirik ve Yanma Odası Geri Dönüşlü Kazan (Yegm, 2008)



Şekil 4.4 Katı Yakıtlı ve Hava Üflemeli Kazan (Yegm, 2008)



Şekil 4.5 Yatay Duman Borulu Sıcak Su Kazanı Örneği (Cedengineering, 2019)

Brülör kazan sistemlerinde yanma verimiyle ilgili parametreler baca gazı emisyonları değerleri olmaktadır. Örnek olarak bir doğal gaz kazanının baca gazında reaksiyona girmemiş yakıt kalıntısı ve CO emisyonu bulunmuyorsa bu durum yanmanın kazan içerisinde tam olarak gerçekleştiğinin göstergesidir. Ancak sistemin genel verimi bakımından bu parametrelerin uygunluğu tek başına yeterli değildir. Önemli olan yanma gazlarından kazan gövdesi vasıtasıyla mümkün olduğunca fazla miktarda ısı transfer akışkanına ısı aktarmaktır. Bu yüzden baca gazı sıcaklığının mümkün olduğunca düşük değerlerde çıkması sağlanmalıdır. Baca gazı sıcaklığının değeri, yanma ürünü gazlarından aracı akışkana (su, yağ, buhar) aktarılan ısı enerjisi miktarıyla alakalı bir göstergedir. Örnek olarak bir sıcak su kazanı için genel verim ifadesi Eş.(4.1) ile yazılabilir. Uygulamada kazan verimi değerleri en az %85-90 mertebelerinde olmalıdır.

$$\eta = \frac{\dot{m}_{su}\, c_{su}\, (T_{çıkan} - T_{giren})}{\dot{m}_{yakıt}\, Q_{Alt\ ısıl\ değer}} \qquad (4.1)$$

BÖLÜM 5

YANMA EMİSYONLARI

Çalışmanın bu bölümünde yakıtların yakılması sonucunda ortaya çıkan ürünler hava kirletici emisyonlar olmaları yönünden incelenmiştir. Katı, sıvı ve gaz yakıtların yakılması sonucunda ortaya çıkan emisyonlar CO_2, CO, NO_X, SO_2 ve yanmamış karbon (is) olmaktadır. Bu emisyonların her biri sistemin yanma verimi ve sıcaklığına dair ipuçları verir. Diğer yandan bu emisyonların çevre havası üzerinde şiddetli şekilde kirletici özellikleri bulunmaktadır. Dolayısıyla günümüzde gelişmiş ülkelerde emisyonların kontrolüne yönelik standartlar ve sınırlamalar getirilmiş durumdadır. Gaz yakıtların kolay yanabilmesi ve temiz içerikleri sayesinde kirletme özellikleri sıvı ve katı yakıtlardan daha azdır. Özellikle hidrokarbonların en küçük bileşeni olan CH_4'ün ana bileşen olarak yer aldığı doğal gaz, SO_2 ve yakıt kaynaklı NO_X emisyonlarına sebep olmamaktadır. Doğal gaz yakıtı kullanıldığında tam bir yanma verimiyle yakıtın tamamı CO_2 ve H_2O ürünlerine dönüştürülebilirken, baca gazı CO emisyonları 0-10 PPM değerleri arasında tutulabilmektedir. Yine doğal gaz yakıtı kullanıldığında, kullanılan hava ve yakıt oranlarına göre değişen miktarlarda NO_X emisyonları oluşmaktadır ve bu emisyonların çeşitli yöntemlerle indirgenmesi güncel çalışma konularından olmaktadır.

5.1 CO_2 Emisyonları

CO_2 emisyonu her ne kadar çevre için zararlı olsa da, hidrokarbon yakıtların yakılmasında ortaya çıkması istenen tek emisyondur. Bir hidrokarbon yakıtının kullanıldığı yanma sisteminde CO olmaksızın sadece CO_2'nin atık gazlarda bulunması yanmanın tam olarak gerçekleştiğine işarettir. CO_2 emisyonlarını minimize etmenin yolu yakıtı az kullanmak veya H_2 gibi alternatif yakıtları kullanmaktır. Bu da sistemin genel ısıl veya mekanik veriminin iyileştirilmesi ile alakalı olmaktadır. CO_2 emisyonlarının

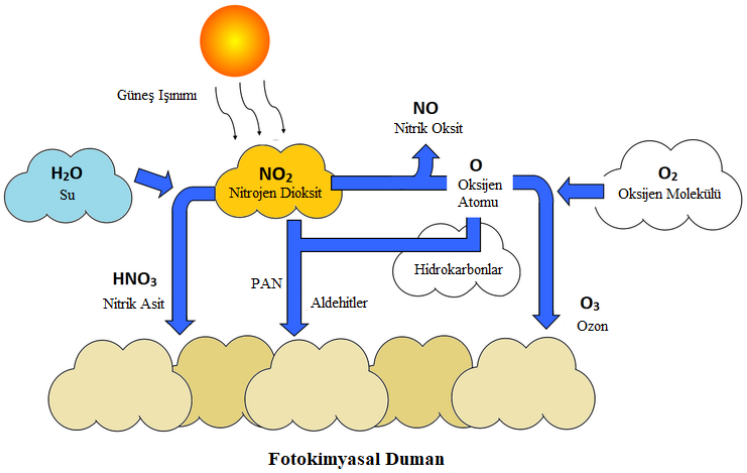
iklim değişiklikleri üzerinde etkisi bulunmaktadır. Örnek olarak ABD'de sera gazı etkisi yapan gazların %80'den fazlası CO_2 olmaktadır (Epa, 2019). Bu emisyonlar güneş ışınlarının atmosferde tutulmasına ve küresel sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. Böylelikle su kaynakları etkilenmekte, deniz seviyeleri ve yiyecek ürün yetiştirme mevsimleri değişmektedir.

5.2 CO Emisyonları

CO emisyonlarının varlığı bir yanma ortamında yakıtın tam olarak oksitlenmediğinin kanıtıdır. Bu durum genellikle brülör başlığından kaynaklı uygun olmayan hava – yakıt karışımlarından ve yetersiz hava sebebiyle olmaktadır. Ek olarak var olan yanma ortamının yapısı da CO emisyonlarının oluşumuna veya tüketilmesine etkendir.

5.3 NO_X Emisyonları

Bu emisyonlar azot atomunun oksijen atomu ile çeşitli mekanizmalar ile oksitlenmesi ile oluşmaktadır. Azotun oksitlenmesiyle NO_X olarak gösterilen NO (nitrik oksit) ile NO_2 (nitrojen dioksit) emisyonları ve de N_2O (nitröz oksit) emisyonları oluşmaktadır. Bu emisyonların oluşumu için gerekli olan N atomu oksitleyici gaz olan havanın içerisindeki N_2 moleküllerinden ya da kullanılan yakıtın bünyesinden gelebilmektedir. Pratikte işlenmiş gaz ve sıvı yakıtlarda çok az miktarda N atomu bulunduğundan, bu yakıtların yakılmasıyla oluşan NOx emisyonlarının kaynağı havadaki N_2 molekülleri olmaktadır. Ancak kömür gibi katı yakıtların bünyesinde fazla miktarda N atomu bulunabileceğinden bu gibi yakıtların kullanılmasıyla önemli miktarlarda yakıt kaynaklı NO_X emisyonları oluşabilmektedir (Law, 2006). Günümüzde konut - sanayi kaynaklı yoğun enerji tüketimi ve çok miktarda motorlu taşıtın kullanılması sonucu büyük miktarlarda NO_X emisyonları atmosfere salınmaktadır. Bu da özellikle büyük şehirlerde insan ve çevre sağlığı için son derece zararlı olan fotokimyasal dumanının oluşmasına sebep olmaktadır. Şekil 5.1'de fotokimyasal duman oluşum mekanizmaları gösterilmiştir. Fotokimyasal duman özellikle büyük ve sıcak iklim koşullarında bulunan şehirlerde yoğun olarak görülmektedir.



Şekil 5.1 Fotokimyasal Duman Oluşum Mekanizması (Energyeducation, 2018)

NO_X emisyonlarının atmosferik N_2 molekülü aracılığıyla bilinen 3 oluşum mekanizması vardır. Bunlar yüksek sıcaklık kaynaklı termal NO_X oluşum mekanizması, zengin yakıt karışımından kaynaklı ani NO_X oluşum mekanizması ve N_2O mekanizmasıdır (Law, 2006).

5.3.1 Termal NO_X Oluşum Mekanizması

Termal NO_X oluşum mekanizması esasen yüksek sıcaklık sebebiyle N_2 molekülünün oksitlenerek NO molekülünün oluştuğu mekanizmadır. Eş.(5.1)'de Zeldovich mekanizması olarak bilinen termal NO oluşum mekanizması verilmiştir (Law, 2006).

$$N_2 + O \longrightarrow NO + N$$

$$O_2 + N \longrightarrow NO + O$$

$$N + OH \longrightarrow NO + H \qquad (5.1)$$

Eş.(5.1)'de verilen mekanizmanın genel hızını belirleyen reaksiyonun, yüksek bağ enerjisine sahip N_2 molekülünün parçalanmasını içeren birinci reaksiyon olduğu bilinmektedir. Termal NO_X oluşum mekanizması 1800 K sıcaklığın altında önemli rol oynamamaktadır (Law, 2006).

5.3.2 Ani NO_X Oluşum Mekanizması

Ani NO_X mekanizması yabancı literatürde "Prompt NO_X Mechanism" olarak geçmektedir. Bu mekanizmanın varlığı, hidrokarbon alevlerinin soğuk ve O radikallerinin az olduğu bölgelerde (termal NO mekanizmasının gerçekleşmediği alev bölgeleri) NO oluşumu gözlemlendiği zaman önerilmiştir. Bu mekanizmanın sebebi, N_2 molekülünün tam olarak yanmamış hidrokarbon radikalleri ile etkileşime girmesi olarak görülmüştür. Ani NO_X oluşum mekanizması Eş.(5.2)'de verilmiştir (Law, 2006). Bu mekanizmada açığa çıkan N radikalleri nihayetinde NO oluşumuna sebep olmaktadır.

$$N_2 + CH \longrightarrow NCN + H$$

$$N_2 + CH_2 \longrightarrow HCN + NH$$

$$HCN + O \longrightarrow NCO + H$$

$$HCN + (H, OH) \longrightarrow CN + (H_2, H_2O)$$

$$NCO + H \longrightarrow NH + CO$$

$$NH + (H, OH) \longrightarrow N + (H_2, H_2O)$$

$$CN + O \longrightarrow N + CO \qquad (5.2)$$

5.3.3 N_2O Mekanizması

N_2O mekanizması Eş.(5.3)'de verilmiştir (Law, 2006). Bu mekanizmanın üçlü moleküler çarpışma ile gerçekleşen birleşme reaksiyonlarını içermesinden dolayı, yüksek basınç ve hava yoğunluğunun olduğu ortamlarda gerçekleşmesi beklenebilmektedir.

$$N_2 + O + M \longrightarrow N_2O + M$$

$$N_2O + O \longrightarrow NO + NO \qquad (5.3)$$

5.4 SO_2 Emisyonları

SO_2 (sülfür dioksit) keskin kokulu renksiz bir gazdır. Hem insan etkenli hem de doğal sebepler ile salınımı olmaktadır ve endüstriyel alanlarda kullanımı mevcuttur. Kömür ve sıvı yakıtların yakılması SO_2 gazının oluşmasının ana etmenlerindendir. Özellikle termik santrallerde kömür yakılması sonucu ciddi oranlarda SO_2 salınımı olmaktadır. SO_2 gazının insanlar ve diğer canlılar üzerinde oldukça ciddi zararları

bulunmaktadır. En yaygın bilinen zararı asit yağmurlarına sebep olmasıdır. SO_2 havadaki su buharı ile tepkimeye girerek H_2SO_4 (sülfürik asit) oluşumuna sebep olmaktadır. Bu da göller ve nehirler gibi doğal kaynakların zarar görmesine sebep olmaktadır.

5.5 Emisyonların Kısıtlanmasıyla İlgili Yönetmelikler

Ülkemizde sanayi, konut, toplu konut, hastane gibi yapılarda ısıtma amaçlı kullanılan sistemlerden kaynaklanan emisyonlar "Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği" ile denetlenmektedir. Yönetmeliğin amacı ısınma amaçlı olarak kullanılan yakıcı sistemlerden kaynaklanan ve atmosfere bırakılan gazların hava kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak ve kontrol altına almaktır. Bu yönetmelik ile katı, sıvı ve gaz yakıt yakan sistemler için ayrı ayrı emisyon standartları oluşturulmuştur. Gaz yakıt yakan sistemler ile ilgili kısıtlamalar Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1 "Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği" Tarafından Belirlenen Emisyon Kısıtlamaları (Gaz Yakıt Kullanılması Durumunda) (Mevzuat, 2005)

İlgili Standart	**Isıl Güç (kW)**		**Azot oksit (NO_X) (NO_2 olarak) (mg/kWh)**	**Karbon monoksit (CO) (mg/kWh)**	**Hidrokarbon (CxHy) (ppm) (CH4- olarak)**	**İslilik Derecesi**	**Atık Gaz İle Isı Kaybı (%)**
TS * veya EN*	70<IG≤1000		260	1070	20	2	9
	30<IG≤70	Sınıf 1**	260	-	20	2	9
		Sınıf 2**	200	-	20	2	9
		Sınıf 3**	150	-	20	2	9
		Sınıf 4**	100	-	20	2	9
(TS)* Türk Standartları Enstitüsü ve (EN)* Avrupa Birliğinin İlgili Standartları (Sınıf)** TS ve EN 'de Belirtilen Sınıflar							

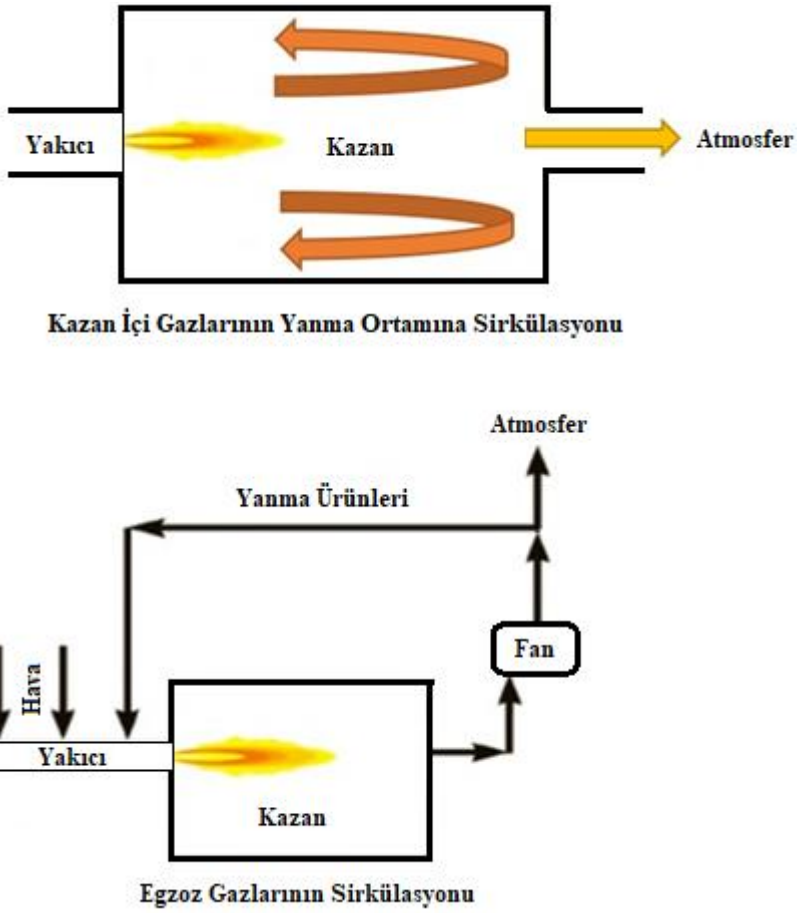
5.6 NO_X Emisyonlarını İndirgeme Yöntemleri

Gaz ve sıvı yakıt kullanan bir yanma sisteminde NO_X emisyonları büyük oranda termal mekanizmalar ile oluşmaktadır. Genel olarak 1800 K üzerindeki alev sıcaklıklarında termal NO_X oluşumunun oldukça etkili şekilde gerçekleştiği kabul edilmektedir (Law, 2006). Dolayısıyla NO_X emisyonlarının oluşumu yakıt çeşidi ne olursa olsun yanma prosesinin doğasında bulunmaktadır. Ancak var olan yanma sistemi üzerinde bazı modifikasyonlar ile NO_X emisyonlarında önemli derecede düşüşler elde edilebilir. Bu modifikasyonlar ya da geliştirme çalışmaları ile sistemde yanmanın hem tam olarak gerçekleşmesi sağlanırken, aynı anda alev sıcaklığı bir miktar düşürülebilir. NO_X emisyonlarının alev sıcaklıklarına duyarlılığı fazla olduğundan alev sıcaklığındaki

ufak değişimler ile NO_X emisyonlarında ciddi derecede düşüş sağlamak mümkün olabilmektedir. NO_X emisyonlarını azaltmaya yönelik bilinen bazı yöntemler şu şekilde sıralanabilir;

- Kademeli yanma oluşturulması (Hava veya yakıt kademelendirilmesi)
- Yakıt veya yanma havasına su buharı enjeksiyonu
- Oksitleyici hava içerisine egzoz gazlarından belirli miktarda ilave edilmesi
- Kazan içerisinde yanma gazlarının sirkülasyonu oluşturularak bu gazların taze hava ve yakıtla yanma ortamında karıştırılması
- Brülör kafasında yapılabilecek modifikasyonlar ile hava ve yakıtın brülör ağız kısmında daha uygun şekilde karıştırılarak kazana verilmesi veya alev formunun değiştirilmesi

Su buharı enjeksiyonu, egzoz gazlarının hava veya yakıta karıştırılması ve de kazan içi yanma gazlarının sirkülasyonu ile reaksiyon ortamındaki ısı daha fazla kimyasal tür üzerinde dağıtılarak yüksek sıcaklık oluşumunun önüne geçilebilir. Bu yöntemlerle ayrıca NO_X oluşumuna sebep olan O ve OH radikallerinin yoğunlukları da seyreltilebilir. Böylelikle termal NO_X oluşum mekanizmaları kısmen engellenebilmektedir. Kademeli yanma ile de yakıt ilk önce eksik hava ile karıştırılarak kısmi olarak yakılabilir. Ortamda ki fazla yakıttan dolayı alev sıcaklığı çok yüksek olmaz. Ardından yanmamış yakıtın tam olarak yakılması için reaksiyon ortamına fazla hava verilir ve yanma işlemi tamamlanır. Bu sayede yine NO_X emisyonlarının oluşumu kısmi olarak engellenebilir. Kademelendirme işlemini yakıt için de yapmak mümkün olabilir. Şekil 5.2'de yanma gazlarının iç ve dış sirkülasyonunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.2 Yanma Gazlarının Sirkülasyonu

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

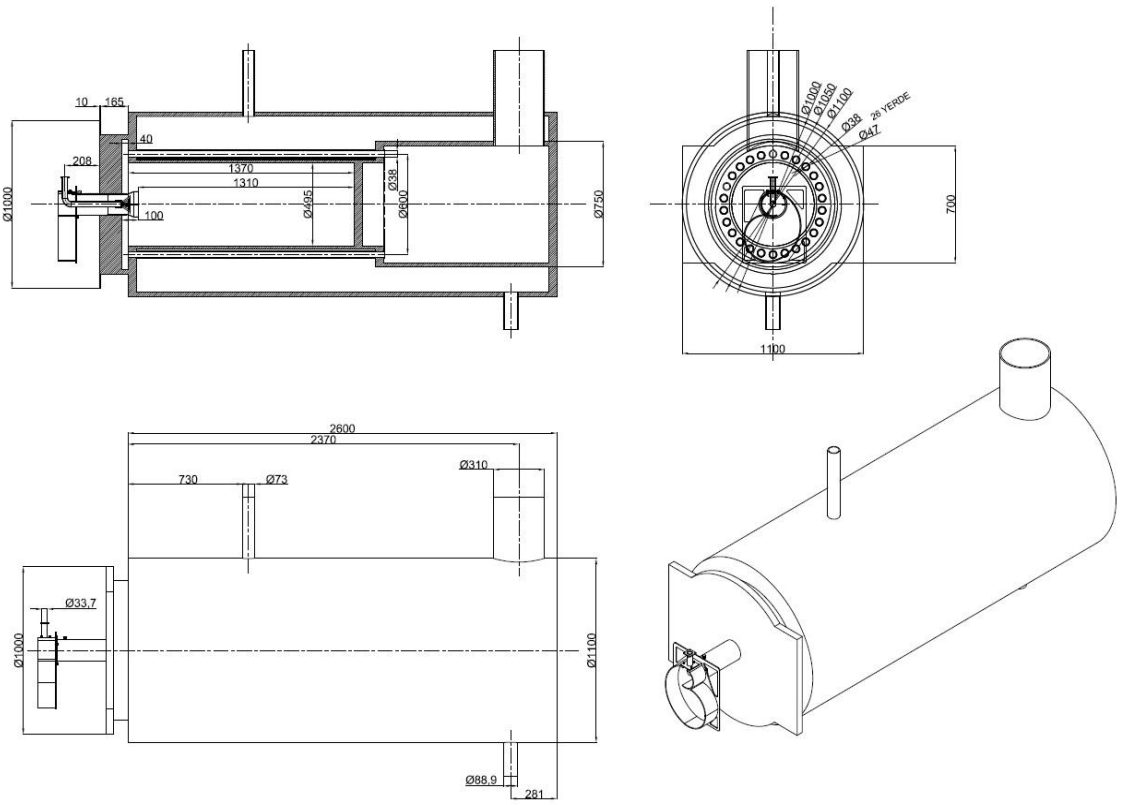
Deneysel çalışmalar Tekirdağ'ın Çorlu İlçesi'nde bulunan Ecostar firmasının test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışılacak brülör-kazan sistemi olarak ECO30.0 G C 2c kare gövdeli gaz brülörü ve bu brülöre ait test kazanı seçilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıt doğal gaz olmuştur. Deney düzeneğinde ölçüm cihazları olarak baca gazı emisyon ve sıcaklık ölçüm cihazı, soğutma suyu debisi ve sıcaklık ölçüm cihazı, doğal gaz debisi ve sıcaklık ölçüm cihazı ve laboratuvarda bulunan gaz regülatör düzeneği kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar 26.01.2018 tarihinde gerçekleştirilmiştir. Ecostar firmasına doğal gaz tedariki sağlayan Çorlu Doğal Gaz Dağıtım A.Ş.'den deneylerin yapıldığı güne ait doğal gaz bileşen değerleri elde edilmiştir.

6.1 Deney Metodu

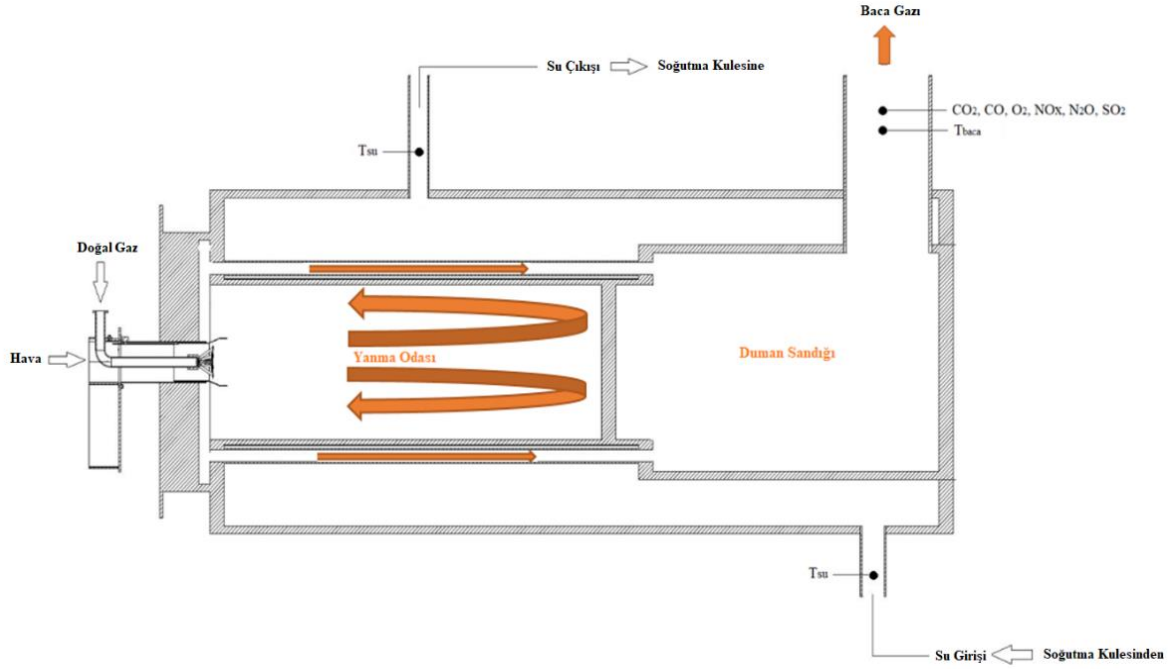
Deneyler Ecostar firmasının sağladığı test laboratuvarında deney düzeneklerinin verdiği imkanlar dahilinde gerçekleştirilmiştir. Toplamda 8 farklı deney gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bir kısmı sabit yakıt tüketiminde hava fazlalık katsayısını değiştirerek, bir kısmı da sabit hava fazlalık katsayısında yakıt tüketimini değiştirerek gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için en az 10 dakika bekleme süresi oluşturulup sistemin sürekli rejime girmesi sağlanmıştır. Deneyler sırasında baca gazı emisyon ve sıcaklık değerleri ile kazan soğutma suyu debisi ve giriş-çıkış sıcaklıkları takip edilmiştir. Baca gazı emisyon değerleri olarak CO_2, CO, O_2, NO_X, SO_2 ve yanmamış yakıt kalıntıları ölçülmüştür. Sürekli rejim şartları için istenen kıstas baca gazı sıcaklık ve emisyon değerlerinin sabit değerlerde kalması olmuştur. Sürekli rejim sağlandıktan sonra baca gazı emisyon ve sıcaklık değerleri ile ilgili emisyon analiz cihazından ayrıntılı rapor elde edilmiştir.

6.2 Deney Düzeneği

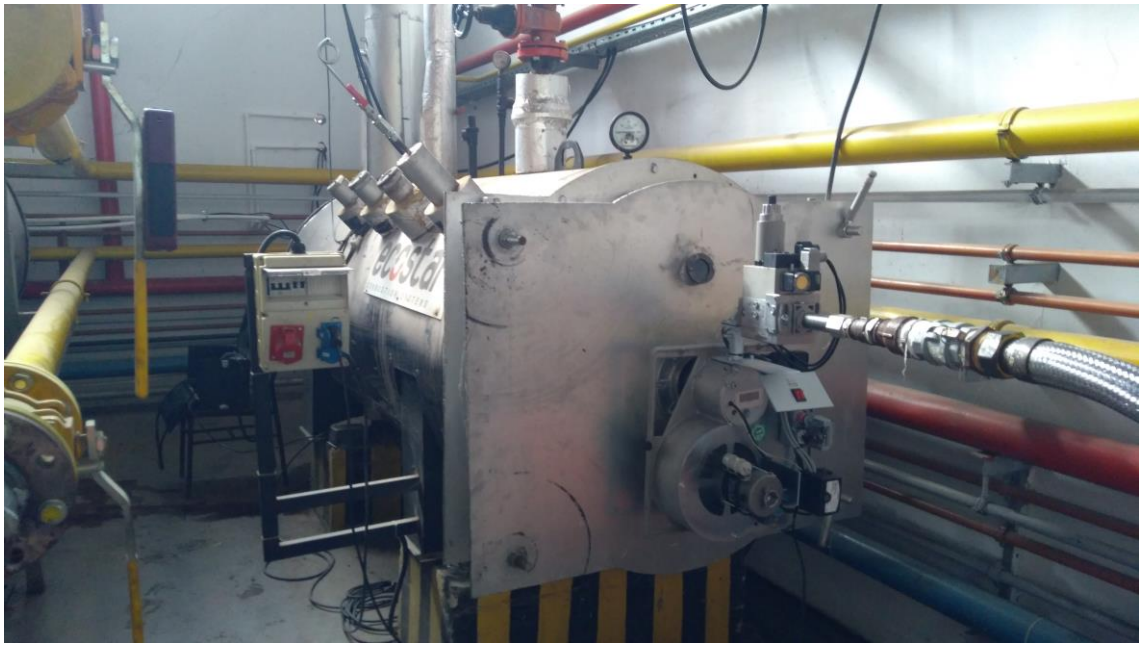
Deneysel çalışmalarda kullanılan kazan yanma odası geri dönüşlü, 26 adet duman borusuna sahip karşı basınçlı bir test kazanıdır. Duman borularının çapı 38 mm'dir. Yanma odası çapı 495 mm ve uzunluğu ise brülör ucundan itibaren 1310 mm'dir. Brülör uzunluğu 373 mm olup, bu brülörde 27.2 mm çaplı yakıt giriş borusu ve 128 mm çaplı hava giriş borusu bulunmaktadır. Brülör uç kısmına yakın bir bölgede disk şekilli brülör başlığı bulunmaktadır. Brülör başlığının üzerinde hava türbülatörü ve 8 adet yakıt püskürtme uçları yer almaktadır. Deney düzeneğinde brülör-kazan sistemine ek olarak kazana soğutma suyunu sağlayan soğutma kulesi bulunmaktadır. Kullanılan deneysel düzeneğin teknik resim görüntüsü Şekil 6.1'de verilmiştir. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü ise Şekil 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.3'de ise test kazanı ve brülörün fotoğraflanmış görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 6.1 ECO30.0 Test Kazanı Teknik Resim Görüntüsü



Şekil 6.2 Deney Düzeneği Şematik Gösterimi



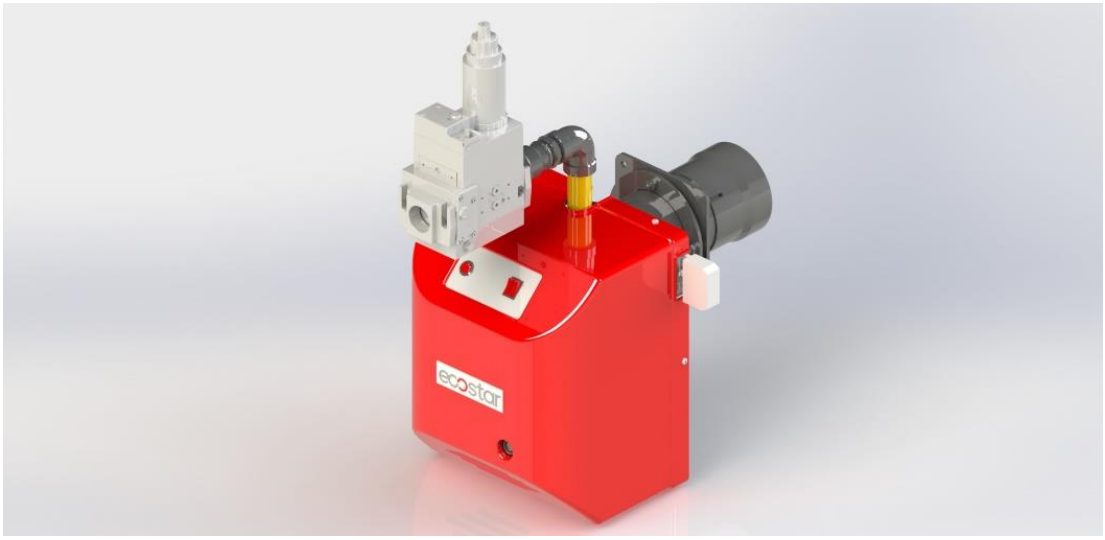
Şekil 6.3 ECO30.0 Brülör ve Test Kazanı

6.3 Deneylerde Kullanılan Elemanlar

Kazan haricinde deneylerde kullanılan diğer cihazlar bu bölümde tanıtılmıştır.

6.3.1 Brülör

Deneylerde kullanılan brülör ön karışımsız tipinde, kare gövdeli ve iki kademeli ECO30.0 G C 2c gaz brülörüdür. Bu brülör kendi serisi içerisindeki en yüksek kapasiteli brülördür. İlgili brülörün görüntüsü Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4 Deneylerde Kullanılan Brülör (Ecostar, 2016)

Çizelge 6.1'de ilgili brülörün kapasite bilgilerine yer verilmiştir.

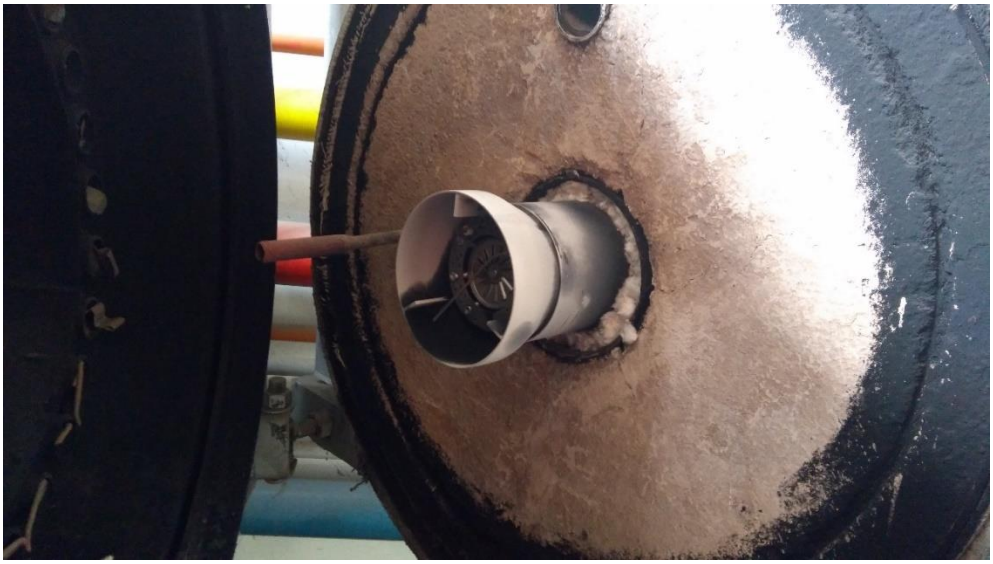
Çizelge 6.1 ECO30.0 G C 2c Kapasite Bilgileri (Ecostar, 2016)

Brülör Numarası	**Kapasite**		**Doğal Gaz Tüketimi**		**Fan Motoru Gücü** kW
	Min. kW	**Maks.** kW	**Min.** Nm^3/h	**Maks.** Nm^3/h	
ECO30.0 G C 2c	190	620	19.8	64.6	0.55

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da brülörün kazana montajlanmış fotoğraflarına yer verilmiştir.



Şekil 6.5 Brülörün Montajlanmış Görüntüsü (A)



Şekil 6.6 Brülörün Montajlanmış Görüntüsü (B)

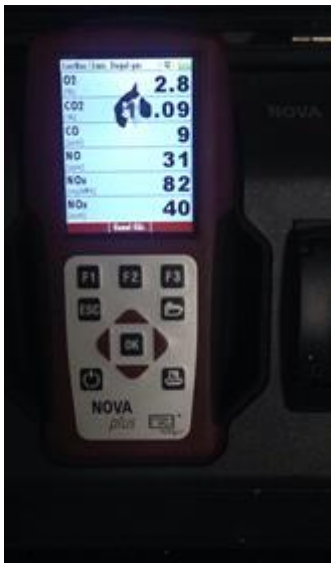
6.3.2 Ölçüm Cihazları

Deneylerde doğal gaz debisi ile sıcaklığı ve soğutma suyu debisi ile giriş – çıkış sıcaklıkları ABB marka ölçüm cihazları ile ölçülmüştür ve kayıt altına alınmıştır. Şekil 6.7'de soğutma suyu debisi ölçüm cihazı ile gaz debisi ve sıcaklık ölçüm cihazının görüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 6.7 Soğutma Suyu Debisi Ölçüm Cihazı (Solda) ve Gaz Debisi Ölçüm Cihazı

Baca gazı emisyon değerleri ve sıcaklıkları Nova Plus marka cihaz ile analiz edilmiştir. Bu cihaza ait görsel Şekil 6.8'de verilmiştir.



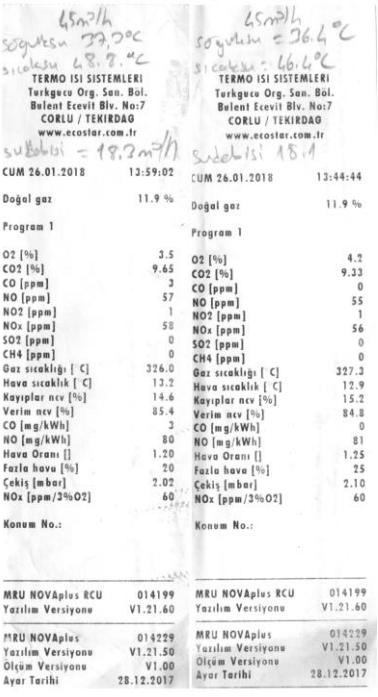
Şekil 6.8 Nova Plus Marka Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Ölçüm Cihazı

Şekil 6.9'da baca gazı emisyon ve sıcaklık değerlerini algılayan sensörlerin görsellerine yer verilmiştir. Burada k-tipi termokupl ve elektrokimyasal sensörler kullanılmıştır.



Şekil 6.9 Baca Gazı Sensörleri

Deneyler sırasında baca gazı analiz cihazından, baca gazı emisyon ve sıcaklık değerleri ile ilgili detaylı raporlar elde edilmiştir. Sürekli rejim şartlarında yapılan deneylerden elde edilen detaylı raporların bir kısmı Şekil 6.10'da verilmiştir.



45m³/h
soğuksu 37.7°C
sıcaksu 48.8.°C
TERMO ISI SISTEMLERI
Turkgucu Org. San. Bol.
Bulent Ecevit Blv. No:7
CORLU / TEKIRDAG
www.ecostar.com.tr
subebisi = 18.3m³/h
CUM 26.01.2018 13:59:02
Doğal gaz 11.9 %
Program 1

O2 [%]	3.5
CO2 [%]	9.65
CO [ppm]	3
NO [ppm]	57
NO2 [ppm]	1
NOx [ppm]	58
SO2 [ppm]	0
CH4 [ppm]	0
Gaz sıcaklığı [C]	326.0
Hava sıcaklık [C]	13.2
Kayıplar ncv [%]	14.6
Verim ncv [%]	85.4
CO [mg/kWh]	3
NO [mg/kWh]	80
Hava Oranı []	1.20
Fazla hava [%]	20
Çekiş [mbar]	2.02
NOx [ppm/3%O2]	60

Konum No.:

MRU NOVAplus RCU	014199
Yazılım Versiyonu	V1.21.60
MRU NOVAplus	014229
Yazılım Versiyonu	V1.21.50
Ölçüm Versiyonu	V1.00
Ayar Tarihi	28.12.2017

45m³/h
soğuksu = 36.4°C
sıcaksu = 46.6°C
TERMO ISI SISTEMLERI
Turkgucu Org. San. Bol.
Bulent Ecevit Blv. No:7
CORLU / TEKIRDAG
www.ecostar.com.tr
subebisi 18.1
CUM 26.01.2018 13:44:44
Doğal gaz 11.9 %
Program 1

O2 [%]	4.2
CO2 [%]	9.33
CO [ppm]	0
NO [ppm]	55
NO2 [ppm]	1
NOx [ppm]	56
SO2 [ppm]	0
CH4 [ppm]	0
Gaz sıcaklığı [C]	327.3
Hava sıcaklık [C]	12.9
Kayıplar ncv [%]	15.2
Verim ncv [%]	84.8
CO [mg/kWh]	0
NO [mg/kWh]	81
Hava Oranı []	1.25
Fazla hava [%]	25
Çekiş [mbar]	2.10
NOx [ppm/3%O2]	60

Konum No.:

MRU NOVAplus RCU	014199
Yazılım Versiyonu	V1.21.60
MRU NOVAplus	014229
Yazılım Versiyonu	V1.21.50
Ölçüm Versiyonu	V1.00
Ayar Tarihi	28.12.2017

Şekil 6.10 Deneylerde Elde Edilen Detaylı Baca Gazı Raporları

Şekil 6.11'de deneylerin yapıldığı laboratuvarda bulunan gaz regülatör sistemi gösterilmiştir. Bu sistem sayesinde doğal gaz basıncı 300 mbar'dan 21 mbar değerine düşürülmektedir.



Şekil 6.11 Ecostar Deney Laboratuvarı Gaz Regülatör Sistemi

6.3.3 Ölçüm Cihazlarının Belirsizlikleri

Baca gazı emisyonu ve sıcaklık ölçümü cihazına ait ölçüm belirsizlikleri ile soğutma suyu ve gaz debisi ölçüm cihazlarına ait ölçüm belirsizlikleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 Ölçüm Cihazlarının Belirsizlik Değerleri

Ölçüm Cihazı	**Ölçüm Parametresi**	**Ölçüm Aralığı**	**Hata Değeri**
Baca Gazı ve Sıcaklık Analiz Cihazı (MRU-NovaPlus)	O_2	0-21 (%)	±0.2 (%)
	CO	0-4,000 (PPM)	±10 (PPM)
	CO_2	0-30 (%)	±0.3 (%)
	NO	0-1,000 (PPM)	± 5 (PPM)
	NO_2	0-200 (PPM)	± 5 (PPM)
	SO_2	0-2,000 (PPM)	± 10 (PPM)
	Sıcaklık	0-650 (^oC)	± 2 (^oC)
Gaz Debisi Ölçüm Cihazı (ABB)	Gaz debisi	0-1,300 (Nm^3/h)	< 0.2 (%)
Soğutma Suyu Debisi Ölçüm Cihazı (ABB)	Su debisi	0 – 600 m^3/h	± 0.4 (%)

6.4 Deney Sonuçları

Deneysel çalışmalar Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'de verilen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Yapılan denemeler sonrasında yakıt tüketiminin 20 Nm^3/h değerinin altında veya 55 Nm^3/h değerinin üstünde olduğu zaman, brülörün çalıştırılamadığı tespit edilmiştir. Bu durum kullanılan hava fanının kapasite sınırından kaynaklanmıştır. Deneyler sırasında doğal gaz ve yanma havasının giriş sıcaklığı 11℃ olarak ölçülmüştür.

Çizelge 6.3 Sabit Hava Fazlalık Katsayısında Yapılan Deneyler

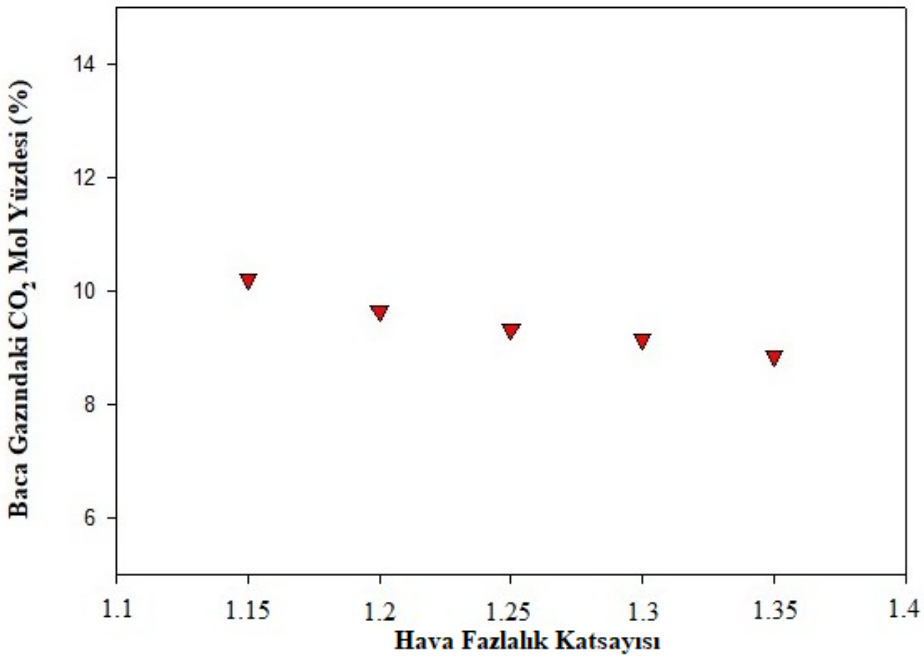
Hava Fazlalık Katsayısı	**Doğal Gaz Tüketimi (Nm^3/h)**	**Kapasite (kW)**
1.2	22	210
1.2	30	287
1.2	45	432
1.2	51	488

Çizelge 6.4 Sabit Yakıt Tüketiminde Yapılan Deneyler

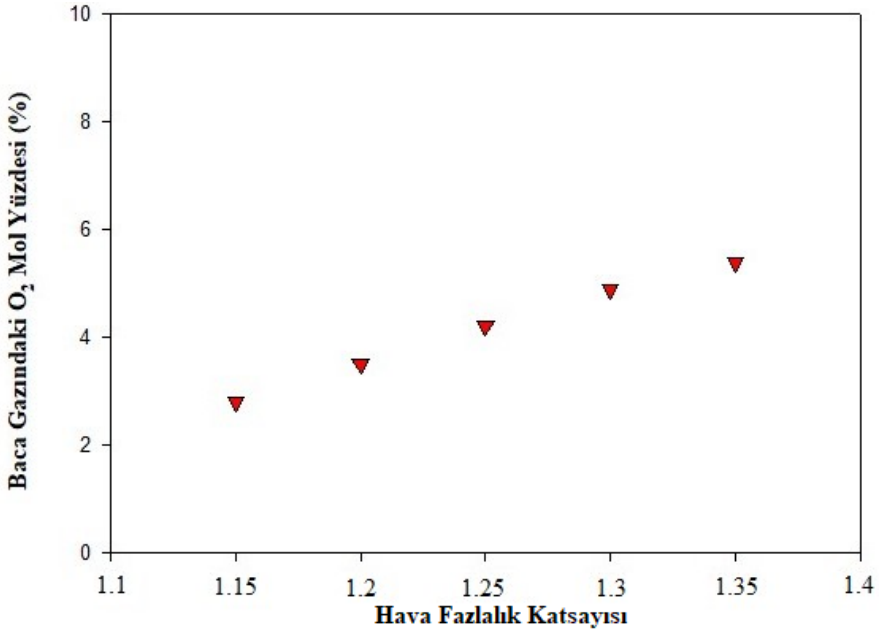
Hava Fazlalık Katsayısı	**Doğal Gaz Tüketimi (Nm^3/h)**	**Kapasite (kW)**
1.15	45	432
1.2	45	432
1.25	45	432
1.3	45	432
1.35	45	432

Elde edilen deneysel sonuçlar baca gazı emisyon ve sıcaklık değerleri olarak Şekil 6.12 ile Şekil 6.21 arasında verilmiştir. Sabit 45 Nm^3/h değerindeki doğal gaz tüketimi için elde edilen sonuçlar Şekil 6.12 ile Şekil 6.16 arasında verilirken, sabit hava fazlalık

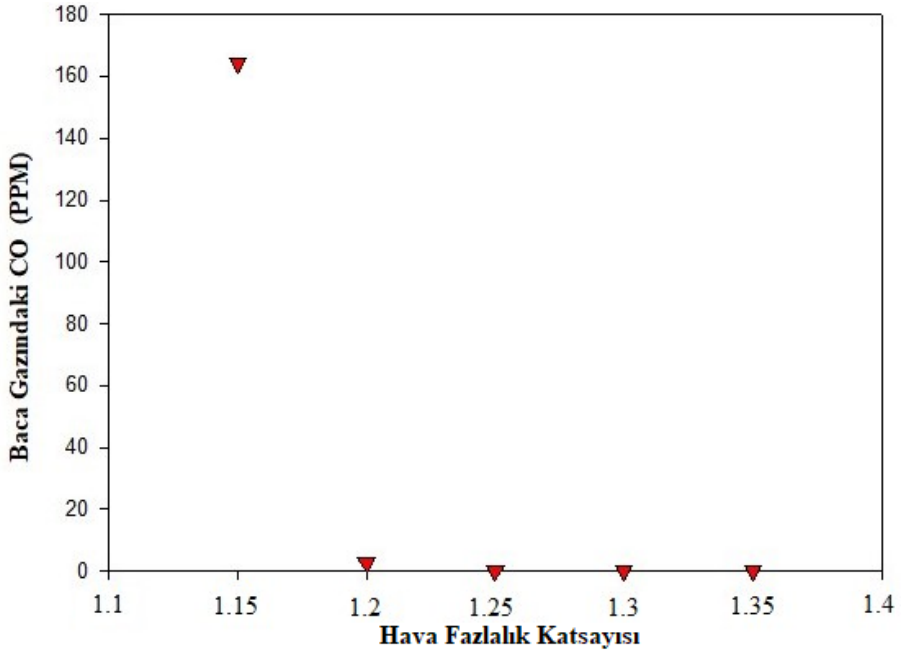
katsayısı değeri (1.2) için elde edilen sonuçlar ise Şekil 6.17 ile Şekil 6.21 arasında verilmiştir.



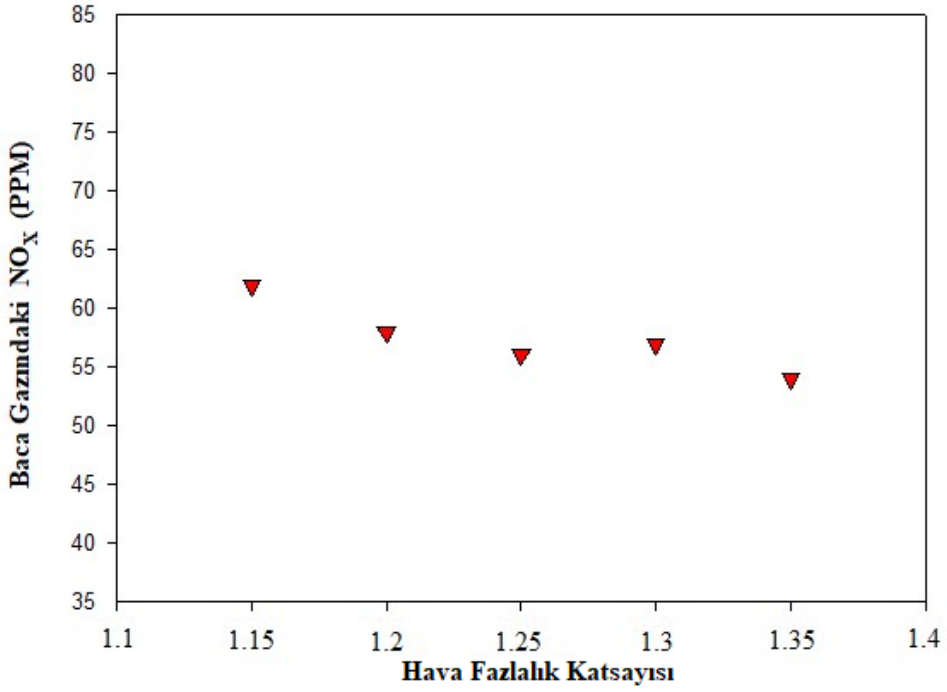
Şekil 6.12 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki CO_2 Emisyonları



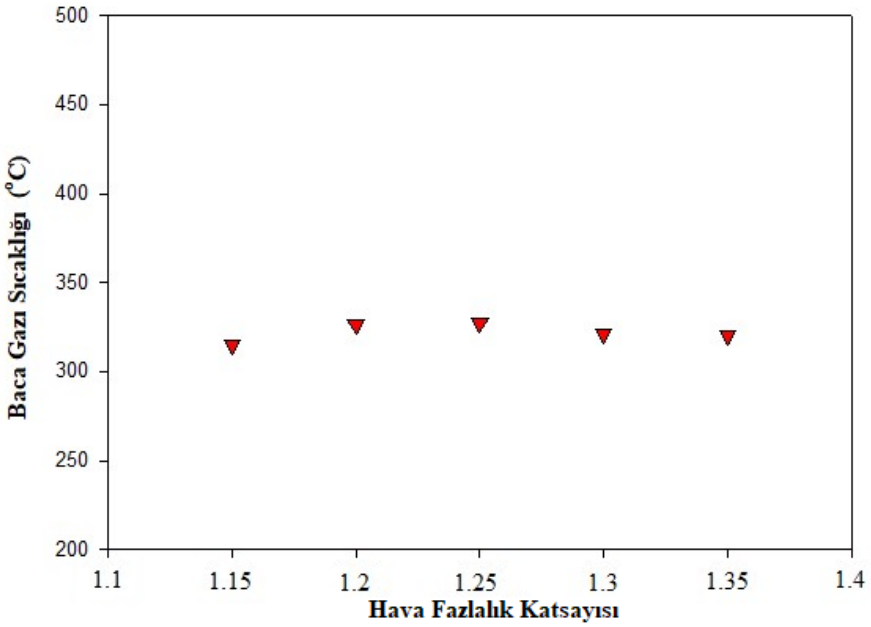
Şekil 6.13 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki O_2 Emisyonları



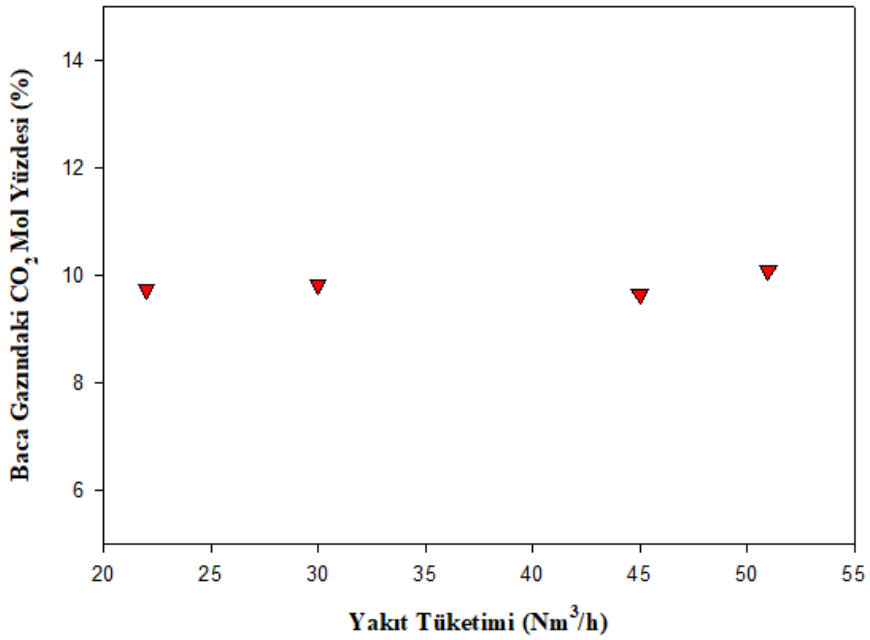
Şekil 6.14 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki CO Emisyonları



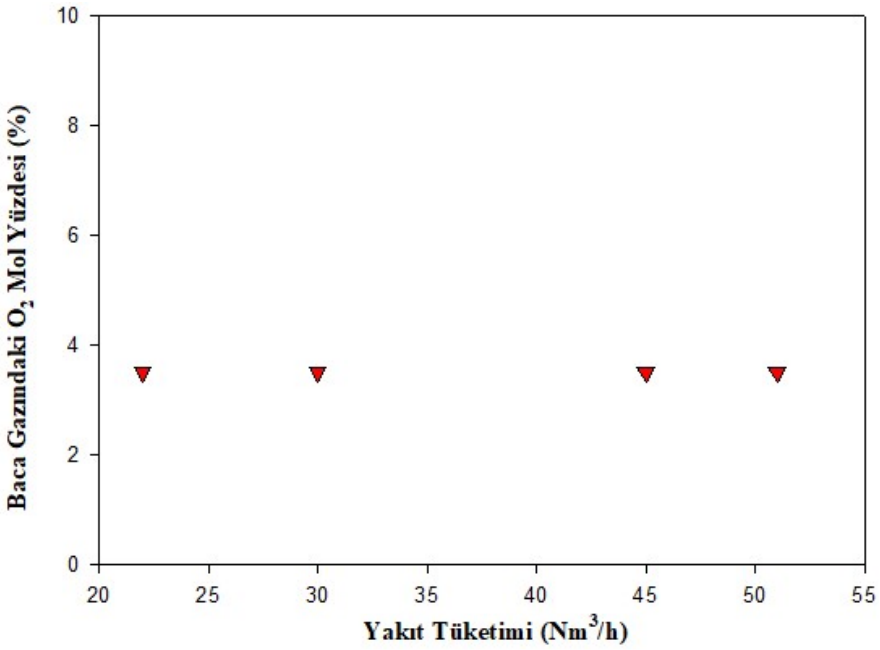
Şekil 6.15 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazındaki NO_X Emisyonları



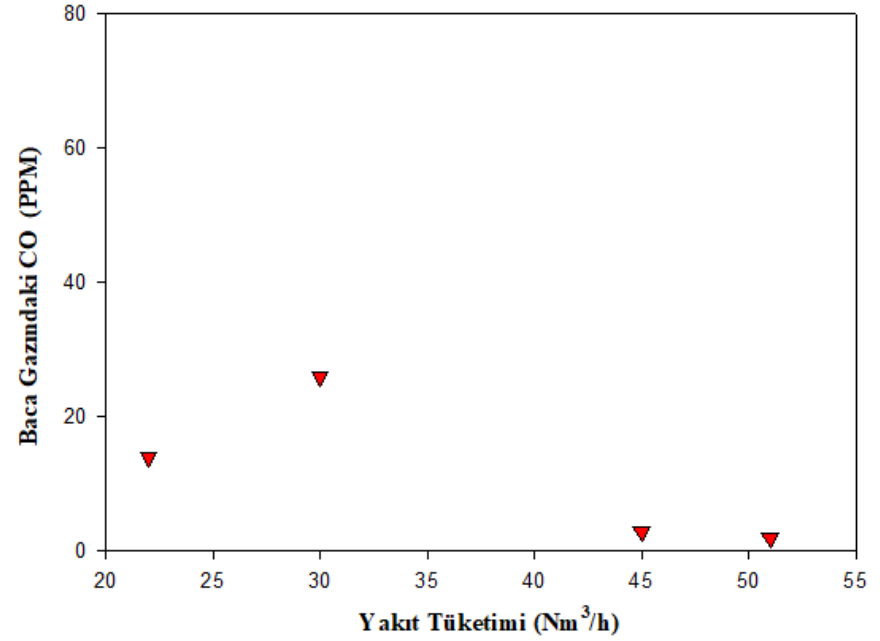
Şekil 6.16 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Baca Gazı Sıcaklıkları



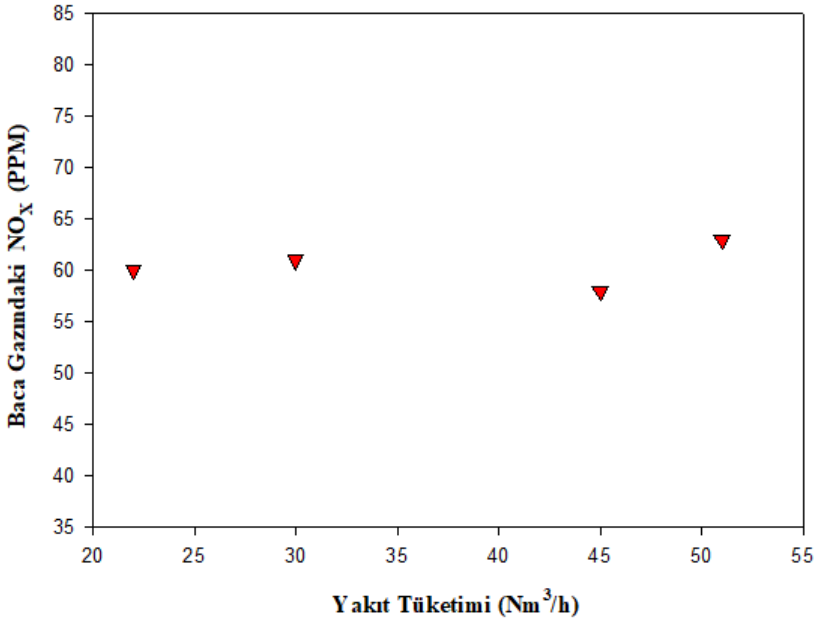
Şekil 6.17 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki CO_2 Emisyonları



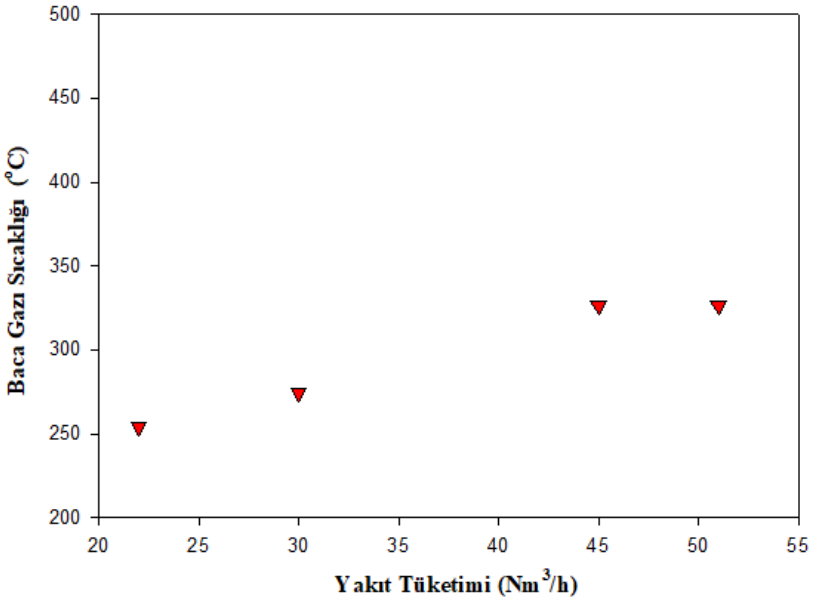
Şekil 6.18 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki O_2 Emisyonları



Şekil 6.19 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki CO Emisyonları



Şekil 6.20 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazındaki NO_X Emisyonları



Şekil 6.21 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Baca Gazı Sıcaklıkları

Sonuçları yukarıda verilen deneysel çalışmalar kış mevsiminde, doğal gaz ve hava giriş sıcaklığı 11℃ olan laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin doğal gaz ve hava giriş sıcaklığının daha yüksek olduğu bir ortamda yapılması durumunda ise baca gazı NO_X emisyonlarında bir miktar artış gözlenebilir. Bunun sebebi alev sıcaklık değerlerinde meydana gelecek küçük değişimlerdir. Ek olarak belirtilmelidir ki baca

gazındaki CO_2 mol yüzdesi %0 H_2O ve %0 O_2 bazında ölçülmüştür. Ayrıca baca gazında ki CO ve NO_X emisyonları da molar bazda PPM mertebesinde ölçülmüştür. Deneylerin yapıldığı güne ait doğal gaz bileşen yüzdeleri Çizelge 6.5'de verilmiştir.

Çizelge 6.5 Deneylerin Yapıldığı Güne Ait Doğal Gaz Bileşenleri (Çordaş Çorlu Doğalgaz Dağıtım A.Ş., 2018)

İçerik	Metan	Etan	Propan	i-Bütan	n-Bütan	i-Pentan	n-Pentan	Hekzan	Azot	Karbon Dioksit
Mol %	96.3948	1.9101	0.6189	0.0950	0.0937	0.0175	0.0131	0.0102	0.6938	0.1529

BÖLÜM 7

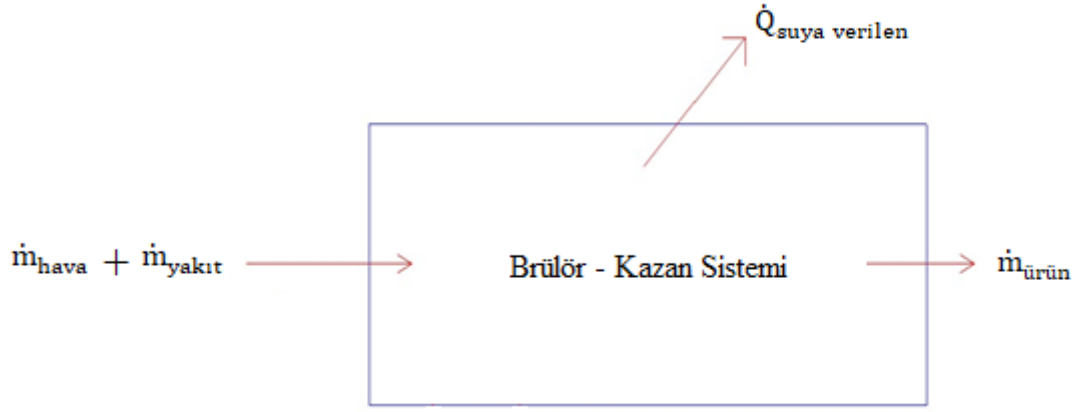
MATEMATİKSEL MODELLEME VE DENEYSEL SONUÇLARLA KIYASLAMAYA YÖNELİK YAPILAN HAD ANALİZLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde ilk olarak reaksiyonlu bir akışın çözümlenmesinde kullanılan yönetici denklemler verilmiştir. Ardından HAD analizlerinde kullanılabilecek yanma modellerine yer verilmiştir.

Yönetici denklemlerin ve yanma modellerinin tanıtılmasından sonra deneysel çalışmalarda kullanılan brülör-kazan sistemine ait katı modellemelere yer verilmiştir. Daha sonra HAD analizleri yapılmıştır. HAD analizleri için Ansys Fluent yazılımı kullanılmıştır. HAD analizlerinde ilk olarak ağ elemanından bağımsızlık çalışmaları yapılmıştır. Sistem için gerekli ağ elemanı sayısının belirlenmesinden sonra yanma analizlerine geçilmiştir. Yanma analizlerinden alınan sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

7.1 Yönetici Denklemler

Sürekli veya geçici rejimde bir brülör-kazan sisteminin çözümlemesinin yapılabilmesi için temel olarak iki durumun sağlanması gerekmektedir. Bunlar kütle ve enerji denkliğidir. Şekil 7.1'de termodinamik çözümleme açısından brülör-kazan sisteminin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7.1 Termodinamik Çözümleme Açısından Brülör – Kazan Sistemin Şematik Görüntüsü

Şekil 7.1'de ki sistem termodinamik açıdan incelenirse kütle ve enerji denkliği için sırasıyla Eş.(7.1) ve Eş.(7.2) yazılabilir.

$$\Sigma\dot{m}_g - \Sigma\dot{m}_ç = \frac{dM_{sistem}}{dt} \tag{7.1}$$

$$\dot{Q} - \dot{W} + \Sigma\dot{m}_g h_g - \Sigma\dot{m}_ç h_ç = \frac{dE_{sistem}}{dt} \tag{7.2}$$

Sistem içerisindeki sıcaklık, yoğunluk ve kimyasal türlerin dağılımının elde edilebilmesi adına kütle, enerji ve momentum korunum denklemlerinin akış hacmi içerisindeki her noktada çözülmesi gerekir. Eş.(7.3) ile Eş.(7.5) arasında sırasıyla kütle, momentum ve enerji korunum denklemleri verilmiştir (Law, 2006 ve Çengel, 2008).

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla.(\rho\mathbf{v}) = 0 \tag{7.3}$$

$$\frac{\partial\rho\mathbf{v}}{\partial t} + \nabla.\rho\mathbf{v}\mathbf{v} = -\nabla.\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ij}} + \rho\sum_{i=1}^{N} Y_i\,\mathbf{f_i} \tag{7.4}$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla.[\rho\mathbf{v}h - \rho D\nabla h + k_t\left(\frac{1}{Le} - 1\right)\nabla T] = \frac{dP}{dt} \tag{7.5}$$

Eş. (7.4)'de σ_{ij} terimi gerilme tensörü olup, termodinamik basıncı ve viskoz gerilme tensörünü içermektedir. Reaksiyonlu bir akış ortamında çok sayıda farklı kimyasal türlerin oluşumu ve tükenişi söz konusu olduğu için her bir kimyasal tür için de korunum denklemi yazılmalıdır. Eş. (7.6)'da akış ortamında bulunabilecek bir "i" kimyasal türü için korunum denklemi verilmiştir (Law, 2006). Eş. (7.6)'da Y_i ifadesi bir i türü için kütle kesrini ifade etmektedir.

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla.[\rho \mathbf{v} Y_i - \rho D \nabla Y_i] = \dot{\omega}_i \quad (7.6)$$

Yanma olayının gerçekleştiği reaksiyonlu bir akışta yüksek sıcaklık bölgeleri ortaya çıkacağı için reaksiyonun olduğu ortamdan (yanma alevi) çevredeki ortamlara (yanma odası duvarları) yüksek miktarda radyasyon ile ısı transferi gerçekleşir. Yanma sistemlerinde radyasyonla ısı transferinin yanma ortamı sıcaklığı ve emisyonları üzerinde büyük etkisi vardır. İleriki HAD çalışmalarında hesaba alınmak üzere kullanılan radyasyon denklemi Eş.(7.7)'de verilmiştir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$\frac{d\, I(\vec{r},\vec{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_s)\, I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}')\, \Phi(\vec{s}.\vec{s}')\, d\Omega' \quad (7.7)$$

Eş. (7.7)'de $\vec{r}$, $\vec{s}$, $\vec{s}'$, s, α , n, σ_s, σ, I, T, Φ ve Ω'parametreleri sırasıyla konum vektörü, yön vektörü, saçılma yönü vektörü, ışınım yolu, absorpsiyon katsayısı, kırılma indisi, saçılma katsayısı, Stefan – Boltzmann sabiti (5.672×10^{-8} W/m^{2}K^4), toplam ışınım şiddeti, sıcaklık (K), faz fonksiyonu ve katı açı olmaktadır. Radyasyon ile ısı transferi için kaynak terimi olan S_h parametresinin enerjinin korunumu denklemine dahil edilmesi gereklidir. Lewis sayısının 1 olarak alınması ve basınç teriminin de zamandan bağımsız olması durumunda enerjinin korunumu denklemi Eş.(7.8)'de verildiği gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla.(\rho \mathbf{v} h) = \nabla.[\frac{k_t}{c_p} \nabla h] + S_h \quad (7.8)$$

7.2 Yanma Modelleri

Kullanılacak yanma modelinin seçiminde Damköhler (Da) sayısı en önemli parametrelerden biridir. Da sayısının tanımı Eş.(7.9)'da verilmiştir.

$$\text{Da} = \frac{\text{Karakteristik akış ya da difüzyon zamanı}}{\text{Karakteristik reaksiyon zamanı}} \quad (7.9)$$

Da sayısı özellikle ön karışımsız yanma tipleri için önem ihtiva etmektedir. Da>>1 olduğu durumlarda reaksiyon zaman değerleri akışkan karışım zaman değerlerinden daha küçüktür. Bir diğer anlamda reaksiyon hızı akışkan karışımı ya da türbülans hızından daha yüksektir. Dolayısıyla böyle durumlarda reaksiyon hızları sistemdeki akışın fonksiyonu olmaktadır. Da~1 olduğu durumlarda ise reaksiyonlar hem karışım hem de reaksiyon zamanına bağlı olmaktadır ve çözümleme yaparken hem reaksiyon hızı hem de karışım hızları birlikte hesaba alınmalıdır. Ansys Fluent yazılımında bu durumlara ilişkin yanma modelleri hızlı kimya modelleri (Da>>1) ve yavaş kimya modelleri (Da~1) olarak

bulunmaktadır. Fırınlar, kazanlar ve gaz türbinleri gibi sistemlerde hızlı kimya modelleri ile çözüm yapılarak gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek mümkün olabilmektedir. Ancak kirletici emisyonların oluşumu, yanma ortamında ani tutuşma veya sönme gibi durumların incelenmesi gerektiğinde yavaş kimya modellerinin kullanılması gerekir.

7.2.1 Eddy Yayılım Modeli

Bu modelde ürünlerin yanma hızı tamamen türbülans hızına ve dolayısıyla da kimyasal türlerin karışım hızına bağlıdır. Dolayısıyla detaylı kimyasal kinetik bilgisine gerek yoktur. Tek veya iki adımlı global reaksiyonların kullanımı üzerinden reaksiyona giren türler ürünlere dönüştürülmektedir. Herhangi bir i türünün r reaksiyonundaki net üretimi olan $R_{i,r}$ Eş.(7.10) ve Eş.(7.11) arasından elde edilen değerlerden daha küçük olana eşit olmaktadır (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r}\, M_{\omega,i}\, A\, \rho\, \frac{\epsilon}{k} \min\left(\frac{Y_R}{\nu'_{R,r}\, M_{\omega,R}}\right) \tag{7.10}$$

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r}\, M_{\omega,i}\, A\, B\, \rho\, \frac{\epsilon}{k}\, \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j^N \nu''_{j,r} M_{\omega,j}} \tag{7.11}$$

Bu eşitliklerde $\nu'_{R,r}$ ve $\nu''_{j,r}$ reaksiyona girenler ve ürünler için stokiometrik değerler, A ve B ampirik sabitler ve $M_{\omega,i}$ değeri de i türüne ait moleküler kütle değeri olmaktadır. R ve P alt indisleri sırasıyla reaksiyona girenleri ve ürünleri belirtmektedir. $\nu'_{i,r}$ ise reaktant olan i türünün r reaksiyonundaki stokiometrik katsayısı olmaktadır. Ön karışımlı bir yanma tipinde reaksiyona girecek türlerin yanma ortamına dahil edilmeden reaksiyona girmesinin hesaplamalarda önlenmesi için sonlu hızlı / eddy yayılım modeli kullanılır. Bu durumda Eş. (7.10), Eş.(7.11) ve Eş.(7.12)'den minimum değeri sağlayan eşitlik reaksiyon hız değerini belirler (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$R_{i,r} = \Gamma\, (\nu''_{i,r} - \nu'_{i,r}) \left[k_{f,r} \prod_{j=1}^{N} C_{j,r}^{n'_{j,r}} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N} C_{j,r}^{\nu''_{j,r}} \right] \tag{7.12}$$

Eş. (7.12)'de $C_{j,r}$ ifadesi j türünün r reaksiyonundaki molar yoğunluğu ve $n'_{j,r}$ j türünün r reaksiyonundaki hız üssü olmaktadır. $\nu''_{i,r}$ ise i türünün ürün olarak stokiometrik katsayısı olmaktadır. Diğer yandan Γ parametresi üçüncül moleküllerin reaksiyon hızı üzerindeki net etkisi olup, $k_{f,r}$ ile $k_{b,r}$ ileri ve geri reaksiyon hız sabitleridir.

7.2.2 Laminer Sonlu Hız Modeli

Bu yanma modelinde kimyasal türler için olan kaynak terimlerinin hesabı Arrhenius denkleminden faydalanarak yapılmaktadır. Modele göre kaynak terimlerinin hesaplanmasında türbülans etkileşimi hesaba alınmamaktadır. Tersinir bir reaksiyonda i türü için kaynak terimi Eş. (7.12)'de ki gibi hesaplanmaktadır (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

7.2.3 Eddy Yayılım Konsepti (EDC)

Eddy yayılım konsepti (EDC) eddy yayılım modelinin geliştirilmiş halidir ve türbülanslı akışlarda detaylı kimyasal kinetik bilgisini içerir. Bir i türü için yazılan korunum formülündeki kaynak terimi olan R_i şu şekilde modellenmektedir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009);

$$R_i = \frac{\rho {\xi^*}^2}{\tau^* \left[1 - \left(\xi^{*3}\right)\right]} \left(Y_i^* - Y_i\right) \tag{7.13}$$

Eş. (7.13)'de ξ^* ince türbülans ölçek uzunluk kesri, ξ^{*3} ince türbülans ölçek hacim kesri, τ^* zaman ölçeği ve Y_i^*ise τ^* zamanından sonra ince türbülans ölçeğinde i türünün kütle kesridir.

7.2.4 Ön Karışımsız Yanma Modeli

Ön karışımsız yanma modeli hızlı kimya modeli kapsamında bulunmaktadır. Bu modelin kullanımı ile yavaş kimya modellerine göre zamandan tasarruf sağlanabilirken, detaylı kimyasal kinetik bilgisi de kullanılarak ara radikallerin hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu modelde yapılan bazı kabuller ile termokimya özellikler tek bir parametre altına toplanabilmektedir. Lewis sayısının 1'e eşit alınması ve kimyasal türlerin difüzyon katsayısının aynı olması kabulü ile ($D_{i,j}$ =D) kimyasal türlerin atomlarının korunumu formülü elde edilebilmektedir. Bu da karışım kesri parametresinin tanımlanması ile mümkün olabilmektedir. Karışım kesri parametresi Eş.(7.14) ile verilmiştir.

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,\text{oksitleyici}}}{Z_{i,\text{yakıt}} - Z_{i,\text{oksitleyici}}} \tag{7.14}$$

Eş.(7.14)'de bir i atomu için türetilmiş karışım kesri formülü verilmiştir. Tüm kimyasal türlerin difüzyon katsayısı eşit alındığı için bu eşitlik reaksiyon hacmindeki tüm atomlar için aynı şekilde türetilebilir. Karışım kesri f esasen reaksiyon hacminde yakıttan gelen kütle kesrini belirtmektedir. Diğer bir ifade ile tüm kimyasal türler içerisindeki yanmış ve yanmamış yakıt kaynaklı atom ve elementlerin toplam kütle kesrini belirtmektedir. Kimyasal reaksiyonlarda atomlar korunduğu için karışım kesri de korunumlu bir skaler büyüklüktür. Dolayısıyla korunum formülünde kimyasal reaksiyon kaynaklı oluşum ve tükenme terimleri yer almaz. Karışım kesri değer olarak 0 ile 1 arasında değişmektedir. Yakıt kaynağında değeri 1 olurken, oksitleyici (hava veya saf oksijen) kaynakta değeri 0'dır. Karışım kesri korunum formülü Eş.(7.15) ile yazılabilir.

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \nabla.[\rho \mathbf{v} f - \rho D \nabla f] = 0 \qquad (7.15)$$

Ön karışımsız yanma tipine karışım kesrinin uygulanmış hali Şekil 7.2'de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 7.2 Karışım Kesri Yaklaşımının Yanma Sistemine Uygulanması

Eş.(7.16)'da yanma ortamı çıkışındaki karışım kesri formülü verilmiştir.

$$f_{çıkış} = \frac{\dot{m}_{yakıt}}{\dot{m}_{yakıt} + \dot{m}_{hava}} \qquad (7.16)$$

Fluent yazılımında Reynolds ortalamalı bir türbülanslı akışta ortalama karşım kesri denklemi Eş.(7.17)'de olduğu gibi çözülmektedir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$\frac{\partial(\rho \bar{f})}{\partial t} + \nabla.(\rho \mathbf{v} \bar{f}) = \nabla.(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}) + S_m + S_{user} \qquad (7.17)$$

Eş.(7.17)'de S_m sıvı ya da katı halden gaz hale geçiş için kaynak terimi olurken, S_{user} isteğe göre nümerik kod içerisinde tanımlanabilen kaynak terimidir. Reaksiyonlu bir akışta

yoğunluk, sıcaklık ve kimyasal türlerin hesaplanabilmesi için kimya-türbülans etkileşiminin hesaba alınması gerekir. Fluent yazılımında bu etkileşimin hesabı olasılık yoğunluk fonksiyonunun (Probability Density Function) kullanımı ile yapılmaktadır. Bu yüzden ortalama karışım kesri korunum denklemi ile beraber ortalama karışım kesri varyansı korunum denklemi de çözülmelidir. Reynolds ortalamalı Navier-Stokes türbülans modellerinin kullanılması durumunda, ortalama karışım kesri varyansı için çözülen korunum denklemi Eş.(7.18)'de verilmiştir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$\frac{\partial(\rho\overline{f'^2})}{\partial t} + \nabla.(\rho\mathbf{v}\overline{f'^2}) = \nabla.(\frac{\mu_t}{\sigma_t}\nabla\overline{f'^2}) + C_g\,\mu_t(\nabla\bar{f})^2 - C_d\,\rho\frac{\epsilon}{k}\overline{f'^2} + S_{user} \qquad (7.18)$$

Eş.(7.18)'de σ_t, C_g ve C_d denklem sabitleri olup, S_{user} isteğe bağlı tanımlanabilen kaynak terimidir.

Ön karışımsız yanma modelinde termokimya özellikler karışım kesrinin fonksiyonu olmaktadır. Reaksiyon hacmindeki yoğunluk, sıcaklık ve kimyasal türlerin belirlenebilmesi için bu skaler değerler ile karışım kesri arasında iki şekilde ilişki kurulabilmektedir. Bunlar tam kimyasal denge kabulü metodu ve laminer alev metodu olmaktadır. Tam kimyasal denge kabulü metodunda adyabatik olmayan bir reaksiyon hacmindeki ortalama yoğunluk, sıcaklık ve kimyasal (∅) türler Eş.(7.19)'da ki gibi hesaplanır (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$\overline{\emptyset} = \int \emptyset(f,\bar{H})P(f)\,df \qquad (7.19)$$

Eş.(7.19)'da P(f) fonksiyonu β tipi olasılık yoğunluk fonksiyonu olmaktadır ve f, $\bar{f}$ ve $\overline{f'^2}$ parametrelerinin fonksiyonudur.

Laminer alev metodunda fiziksel koordinatlar karışım kesri koordinatına indirgenir ve tek boyutta sonlu reaksiyon hız değerleri kullanılarak laminer difüzyon alevi çözümlemeleri yapılır. Elde edilen bu laminer difüzyon alev çözümlemeleri türbülanslı akış içerisine gömülerek, türbülanslı akışın ince, tek boyutlu ve laminer alevciklerden meydana geldiği yaklaşımı yapılır. Laminer difüzyon alev çözümlemeleri kimyasal türler ve sıcaklık için sırasıyla Eş. (7.20) ve Eş. (7.21) kullanılarak yapılmaktadır (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$\rho\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \frac{1}{2}\,\rho\chi\frac{\partial^2 Y_i}{\partial f^2} + S_i \qquad (7.20)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{2} \rho\chi \frac{\partial^2 T}{\partial f^2} - \frac{1}{c_p} \sum_i H_i S_i + \frac{1}{2c_p} \rho\chi \left[\frac{\partial c_p}{\partial f} + \sum_i c_{p_i} \frac{\partial Y_i}{\partial f} \right] \frac{\partial T}{\partial f} \quad (7.21)$$

Eş.(7.20) ve Eş.(7.21)'de χ, S_i ve H_i terimleri sırasıyla skaler yayınım hızı, i türü için reaksiyon hızı ve i türü için spesifik entalpi değeri olmaktadır. χ terimi, oluşturulan difüzyon alevinin kimyasal dengeden sapmasının bir ölçüsü olmaktadır ve bu değer aerodinamik gerilmelerle artış gösterip oluşan alevi kimyasal denge durumundan uzaklaştırmaktadır. χ terimi aynı zamanda şu şekilde hesaplanabilir; (Peters, 1984)

$$\chi (f) = 2D(\nabla f)^2 \quad (7.22)$$

Eş.(7.20) ve Eş.(7.21) denklemlerinin Fluent yazılımında çözülebilmesi için kimyasal türlere ait detaylı yanma mekanizma bilgilerini içeren mekanizma dosyaları gereklidir. Eş.(7.20) ve Eş. (7.21) denklemlerinin çözümlenmesinin ardından ortalama skaler değerler türbülans etkileşimlerinin hesaba alınması ile Eş.(7.19) ile hesaplanır. Ancak laminer alev içerisindeki kimyasal türlerin dağılımlarının entalpi değerinden bağımsız olduğu kabulü vardır (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009). Ön karışımsız yanma modelinin önemli bir avantajı ortalama kimyasal tür, yoğunluk ve sıcaklık gibi skaler büyüklüklerin hesabının akış analizine geçilmeden yapılabilmesi ve elde edilen sonuçların tablo haline getirilebilmesidir. Dolayısıyla Fluent yazılımında Eş.(7.19) ile Eş.(7.21) arasında verilen denklemler akış hesabına geçilmeden önce çözülmektedir. Ardından akış hesabında $\bar{f}$, $\overline{f'^2}$ ve $\overline{H}$ değerlerinin akış hacmi içerisinde dağılımı hesaplanarak tablolardan tür, yoğunluk ve sıcaklık değerleri çekilmektedir. Bu yaklaşım sayesinde analizlerden önemli miktarda zaman tasarrufu sağlanabilmektedir.

7.2.5 Kısmi Ön Karışımlı Yanma Modeli

Kısmi ön karışımlı yanma modeli homojen olmayan yakıt ve oksitleyici karışımlarının çözümlenmesi için uygun olmaktadır. Bu modelde hem ön karışımsız hem de ön karışımlı yanma modelindeki kabuller ve kısıtlamalar kullanılır (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009). Bu yanma modelinde hem ortalama gelişme değişkeni ($\bar{c}$) hem de ortalama karışım kesri ($\bar{f}$) ve de ortalama karışım kesri varyansı ($\overline{f'^2}$) parametrelerinin çözümü yapılmaktadır. Alev konumunun belirlenebilmesi için ortalama gelişme değişkeni parametresi şu şekilde çözümlenmektedir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009);

$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} + \nabla.(\rho\vec{v}c) = \nabla.(\frac{\mu_t}{Sc_t}\nabla c) + \rho S_c \quad (7.23)$$

Bu denklemde S_C gelişme değişkeni kaynak terimi (s^{-1}) ve Sc_t türbülans Schmidt sayısıdır. Gelişme değişken parametresi de şu şekilde ifade edilmektedir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009);

$$c = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sum_{i=1}^{n} Y_{i,eq}} \quad (7.24)$$

Eş.(7.24)'de Y_i ürün olarak i türünün kütle kesrini ve $Y_{i,eq}$ ise denge halinde ürün olarak i türünün kütle kesrini vermektedir.

Kısmi ön karışımlı yanma modelinde ortalama skaler değerler ise şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\overline{\emptyset} = \int \emptyset(f,c)P(f,c)\, df\, dc \quad (7.25)$$

7.3 NO_X Hesabı

Bu çalışmada yapılan tüm yanma analizleri ilk olarak NO_X emisyonları hesaba alınmadan gerçekleştirilmiştir. Yeterli derecede yakınsama elde edildikten sonra yanma analizine ait denklemler devre dışı bırakılmıştır ve reaksiyonlu akış dondurulmuştur. Ardından dondurulmuş reaksiyonlu akışın üzerine NO_X denklemi çözdürülmüştür. Burada yapılan kabul NO_X emisyonlarının PPM mertebesinde olmasından dolayı ana reaksiyonlu akışı etkilemediğidir. NOx emisyonlarının hesabında kullanılan denklem Eş.(7.26) ile verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho Y_{NOX})}{\partial t} + \nabla.[\rho\mathbf{v}Y_{NOX} - \rho D\nabla Y_{NOX}] = \dot{\omega}_{NO_X} \quad (7.26)$$

Bu çalışmada termal NO emisyonu için oluşum hızı (mol/m^3s) Zeldovich mekanizmasına göre şu şekilde hesaba alınmıştır (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009 ve Law, 2006);

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{f1}[O][N_2] + k_{f2}[N][O_2] + k_{f3}[N][OH] - k_{r1}[NO][N] - k_{r2}[NO][O] - k_{r3}[NO][H] \quad (7.27)$$

Eş.(7.27)'de k parametresi reaksiyon hız sabiti olup, yanma ortamının sıcaklığının fonksiyonu olmaktadır. Eş.(7.27) ana reaksiyonlu akış üzerine çözdürüldüğünden dolayı bu denkleme ilişkin sıcaklık değerleri ile radikal ve moleküler yoğunluk değerleri ana

reaksiyonlu akıştan çekilmektedir. Yanma ortamındaki ani NO_X (Prompt NO_X) oluşum hızı ise şu şekilde yazılabilir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009);

$$\frac{d[NO]}{dt} = k\,[CH]\,[N_2] \tag{7.28}$$

NO_X emisyonlarının oluşum hızı sıcaklık değerleri ile radikal ve moleküler yoğunluklara oldukça bağımlı olduğundan, doğru bir NO_X emisyon hesabı için ana reaksiyonlu akıştan elde edilen sonuçların yeterince doğru olması gerekmektedir.

7.4 Türbülans Modellemesi

HAD araçlarında reaksiyonlu akışlar için kullanılabilecek farklı türbülans modelleri mevcuttur. Ancak literatürdeki bir çok çalışma göstermiştir ki Reynolds ortalamalı Navier-Stokes modeli olan "realizable k- ϵ türbülans modeli" hem çözümleme hızı hem de alınan sonuçların doğruluğu bakımından uygun bir türbülans modeli olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada tüm analizler için "realizable k- ϵ türbülans modeli" kullanılmıştır. Bu modelde türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans kinetik enerjisi yayılım hızı (ϵ) için iki denklem çözülmektedir. Bu denklemler sırasıyla Eş.(7.29) ve Eş.(7.30)'da verilmiştir (Ansys Fluent 12.0 Theory Guide, 2009).

$$\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k})\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon \tag{7.29}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S\epsilon - \rho\, C_2 \frac{\epsilon^2}{k+\sqrt{\nu\epsilon}} + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon}\, G_b \tag{7.30}$$

Kullanılan model parametreleri ise şu şekilde yazılmaktadır;

$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right] \tag{7.31}$$

$$\eta = S\frac{k}{\epsilon}\ ,\ S = \sqrt{2\,S_{ij}\,S_{ij}} \tag{7.32}$$

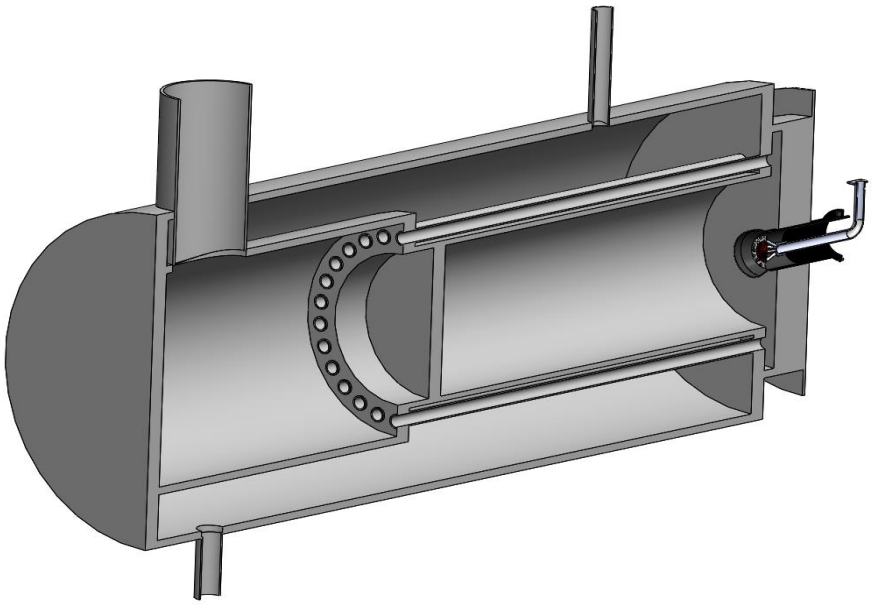
$$C_{3\epsilon} = \tanh\left|\frac{\upsilon}{u}\right| \tag{7.33}$$

Bu denklemlerde G_k ve G_b sırasıyla ortalama hız gradyanı ve kaldırma kuvveti kaynaklı olan türbülans kinetik enerjisi oluşum terimleridir. S terimi gerilme tensörünün ortalama değişim hızının modülüdür. C_2 ve $C_{1\epsilon}$ parametreleri model sabitleridir. σ_k ve σ_ϵ

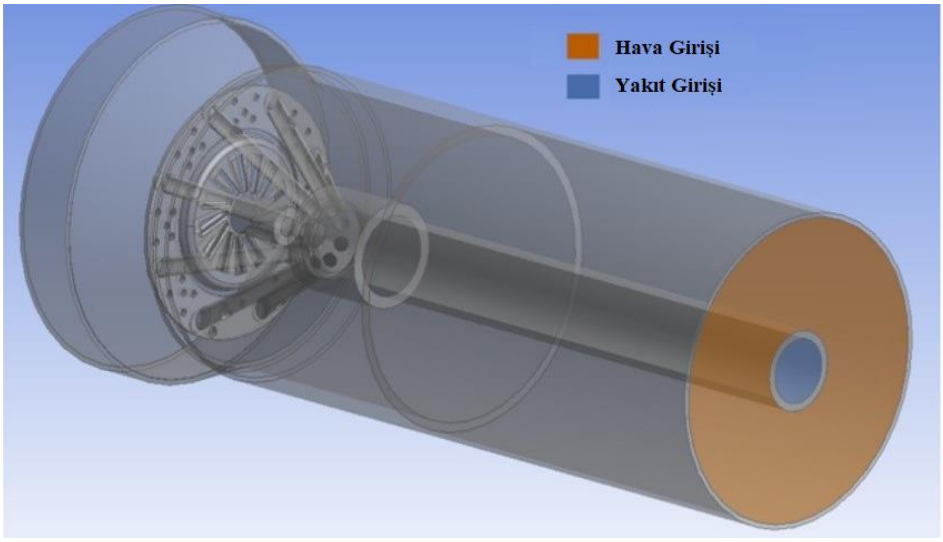
parametreleri ise k ve ∈ için Prandtl sayısı olmaktadır. Diğer yandan υ terimi yer çekimi vektörüne paralel olan akış hızı ve u terimi de yer çekimi vektörüne dik olan akış hızıdır.

7.5 Deneysel Brülör-Kazan Sistemine Ait Katı Modellemeler

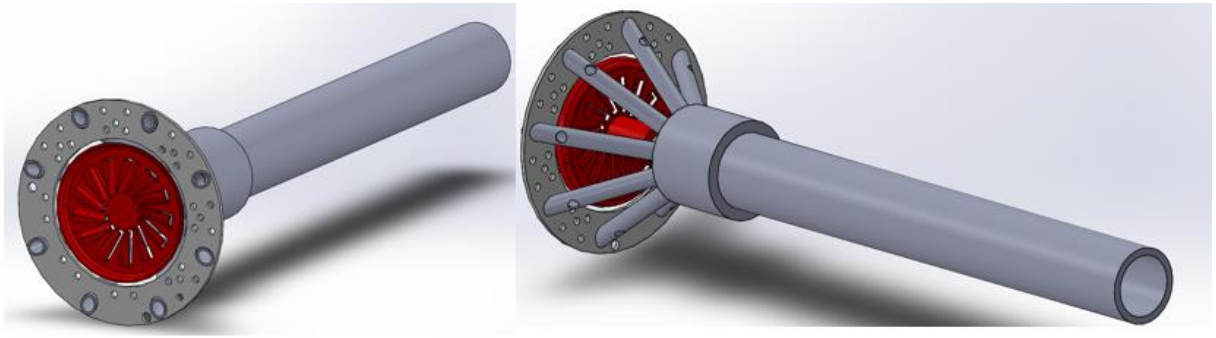
Katı modelleme çalışmasında ECO30.0 G C 2c kare gaz brülörü ve bu brülöre ait test kazanı ilk olarak üç boyutlu olacak şekilde modellenmiştir. Katı modellemenin ardından brülör ve kazanın akış hacimleri elde edilmiştir. Brülör ve kazanın simetrik olmamasından dolayı iki boyutlu modelleme veya simetri sınır şartlarının kullanılabileceği bir modelleme imkanı olmamıştır. Ayrıca brülör başlığı üzerinde bulunan ateşleyici ekipmanlar ağ elemanı kalitesini bozacağı için modellenmemiştir. Şekil 7.3 ve Şekil 7.5 arasında brülör-kazan sistemine ait katı modellere yer verilmiştir.



Şekil 7.3 ECO 30.0 G c 2c Brülörü ve Test Kazanına Ait Katı Modelleme

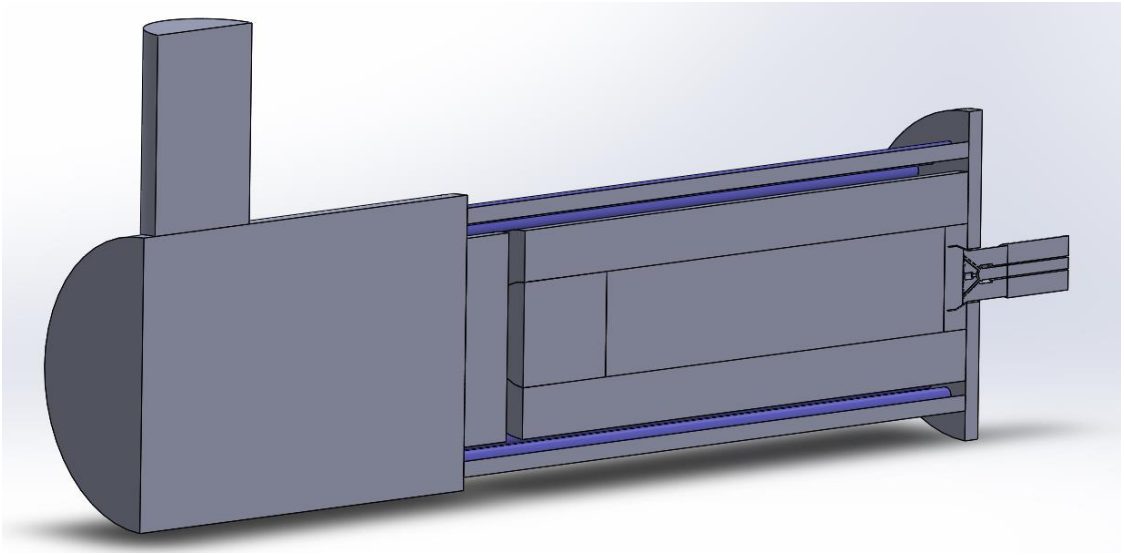


Şekil 7.4 ECO 30.0 G c 2c Brülörü



Şekil 7.5 ECO 30.0 G c 2c Brülör Başlığı ve Yakıt Borusu

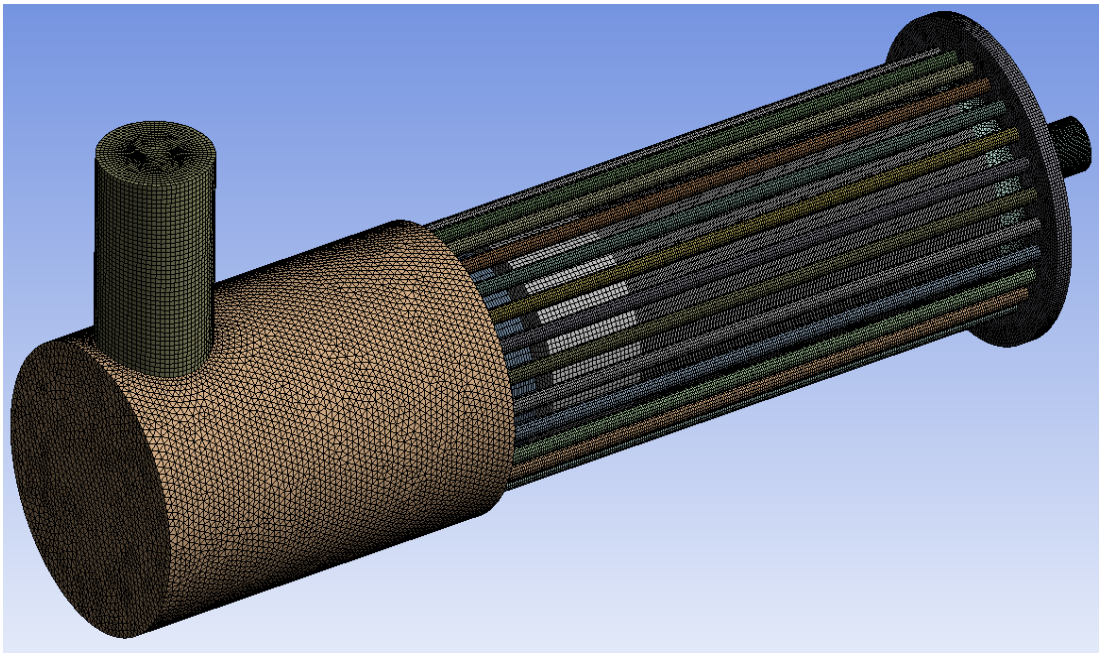
Katı modellemenin ardından brülör-kazan sistemindeki yanmış ve yanmamış gazlara ait akış hacmi çıkarılmıştır ve Şekil 7.6'da verilmiştir.



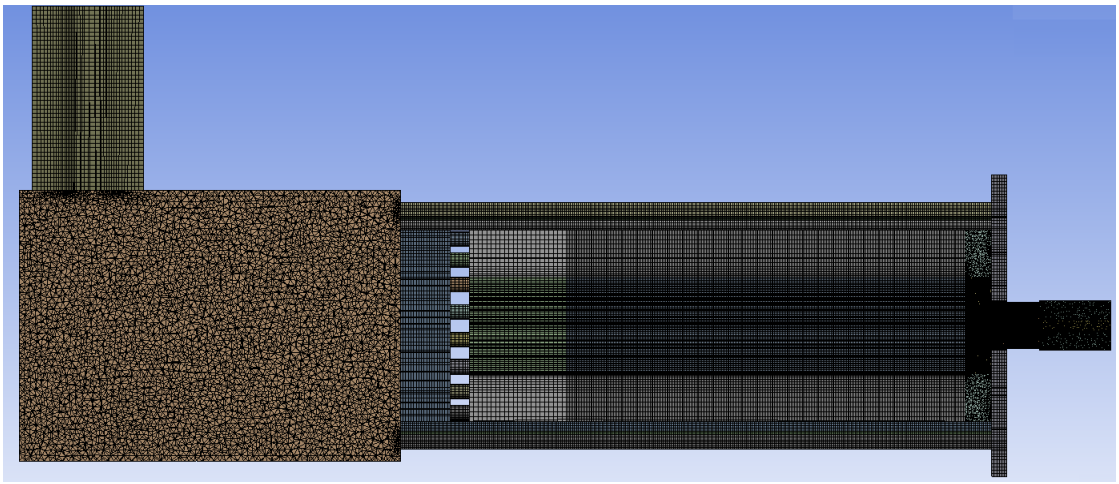
Şekil 7.6 ECO 30.0 G c 2c Brülör ve Test Kazanına Ait Akış Hacmi

7.6 Ağ Elemanı Çalışmaları

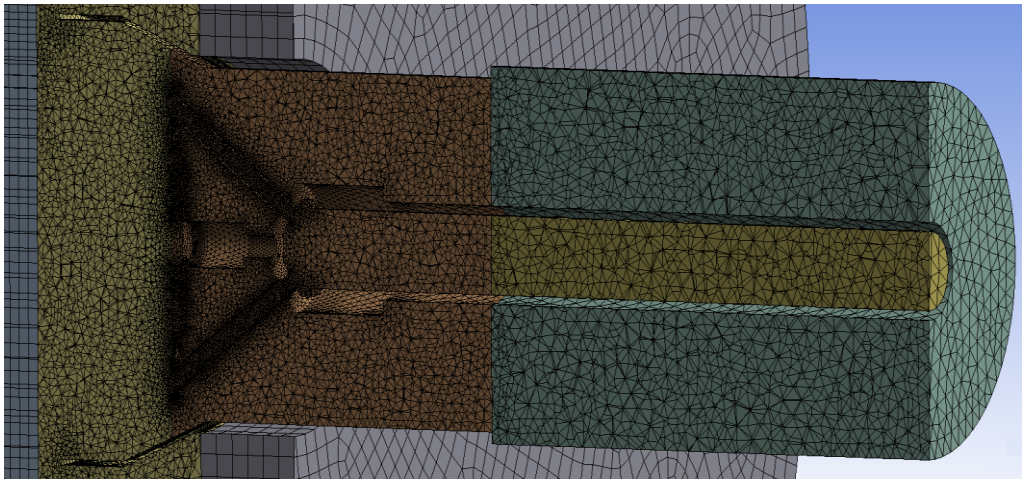
Katı modelleme çalışmalarının ardından HAD analizlerinin ilk ayağı olarak Fluent yazılımında ağ elemanı sayısından bağımsızlık çalışmalarına başlanmıştır. Yanma analizlerinin mümkün olduğunca hızlı ve deneysel verilerle tutarlı olabilmesi için ağ elemanlarının sistemdeki dağılım yoğunluğu optimum seviyede olmalıdır. Bu doğrultuda kazan içerisinde alevin oluşmasının beklendiği kazan merkezi ve brülör ağzı ile brülör türbülatörü çok yoğun olarak ağ elemanlarına ayrılırken, sistemin geri kalan kısımlarında nispeten daha az yoğunlukta ağ elemanı kullanılmıştır. Ağ elemanı sayısından bağımsızlık çalışmaları için soğuk akış analizinden yararlanılmıştır. Soğuk akış analizi kazan içerisinde hava ile yakıtın yanmadan karışmasını hesap eden bir analizdir. Ağ elemanı sayısından bağımsızlık elde edilebilmesi adına bu analizde takip edilen parametre kazan merkez ekseni üzerinde hesaplanan ortalama akış hızı olmuştur. Yanma prosesinde reaksiyona girecek gazların doğru şekilde türbülanslı olarak karışması oldukça önemli olduğu için, bu analizden elde edilen ağ elemanı sayısının yanma analizleri için de yeterli olacağı düşünülmüştür. Soğuk akış analizlerinde kullanılan yakıt %100 oranında CH_4 olarak alınmıştır. Yakıt debisi, deneysel çalışmalarda sağlanabilen maksimum debi değeri olan 51 Nm^3/h olarak alınırken, hava fazlalık katsayısı 1.2 olarak alınmıştır. Brülör-kazan sistemine ait ağ elemanı görüntüleri Şekil 7.7 ve Şekil 7.9 arasında verilmiştir.



Şekil 7.7 Brülör ve Test Kazanına Ait Ağ Elemanı Yapısı



Şekil 7.8 Brülör ve Test Kazanına Ait Ağ Elemanı Kesit Görünüşü



Şekil 7.9 Brülör Ağ Yapısı

Soğuk akış analizlerinde farklı sayıda ağ elemanları kullanılarak kazan merkez eksenindeki ortalama gaz akışı hız değerleri elde edilmiştir ve bu değerler Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1 Farklı Ağ Elemanı Sayısına Göre Kazan Merkez Eksenindeki Ortalama Gaz Akışı Hız Değerleri

Ağ elemanı sayısı	Yanma odası merkez eksenindeki ortalama gaz akışı hızı değeri (m/s)	Fark (%)
4,000,000	20.6	-
4,700,000	17.9	13.1
5,250,000	19.4	8.3
5,600,000	19	2
6,000,000	19.17	0.89
6,700,000	19.05	0.63

Çizelge 7.1'de görüleceği üzere 6 milyon ağ elemanı sayısından sonra kazan merkezindeki ortalama hız değerlerindeki değişimler %1'den az olmaktadır. Dolayısıyla

yanma analizlerinde kullanılması gereken ağ eleman sayısı 6 milyon olarak seçilmiştir. Bu ağ elemanına ait kalite parametrelerinden bazıları Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2 Analizlerde Kullanılan Ağ Elemanına Ait Bazı Kalite Parametreleri

Ağ Elemanı Kalite Parametreleri	Minimum Ortogonal Kalite	Maksimum Çarpıklık
	0.17	0.83

7.7 Yanma Analizlerinde Kullanılan Çözüm Metotları, Sınır Şartları ve Parametreler

Analizlerin tamamında kullanılan bazı önemli çözüm metotları, sınır şartları ve parametreler aşağıda verilmiştir;

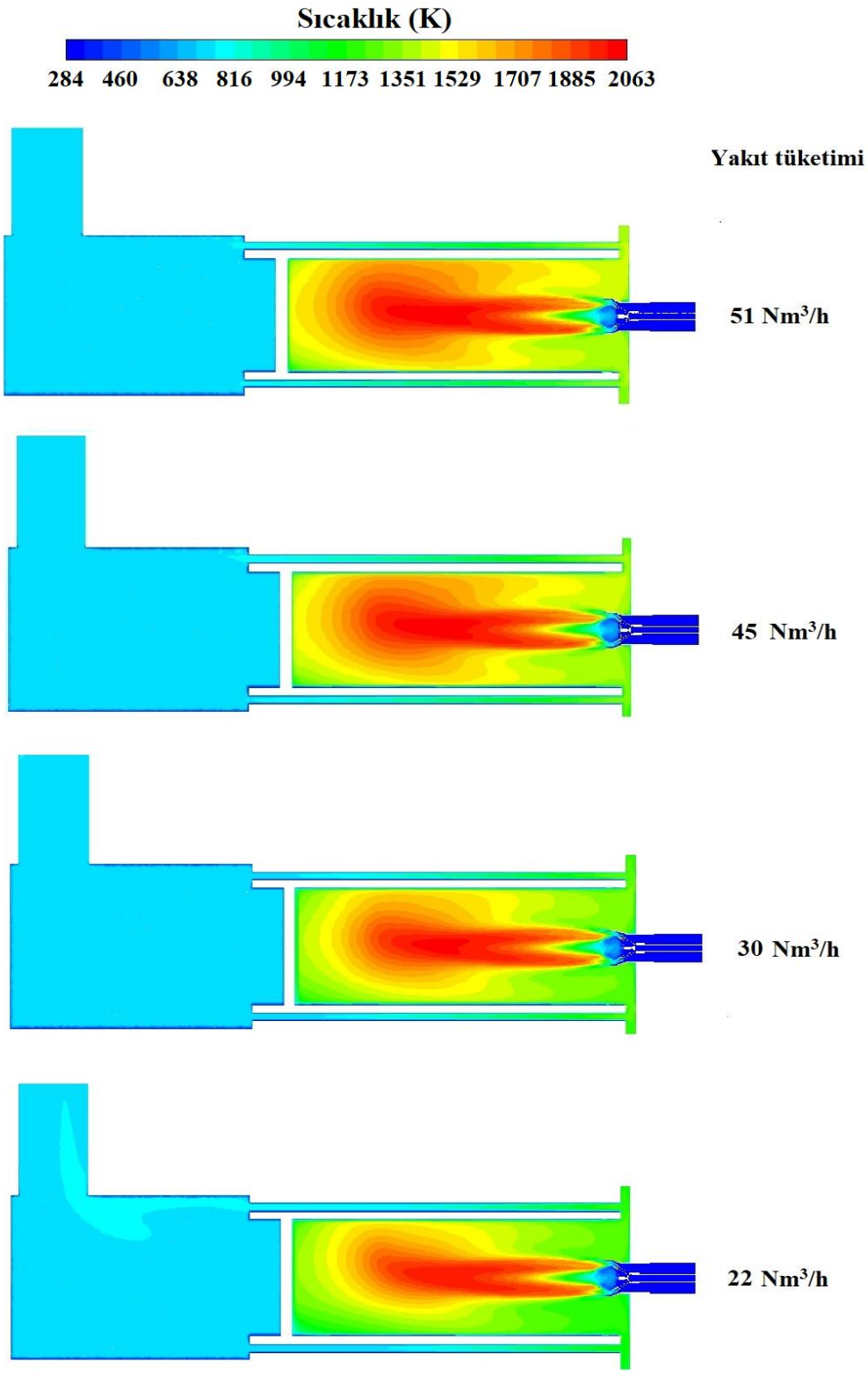
- Analizlerde brülör-kazan sisteminin yanma hacmi kısmı sabit rejim koşulları ile analiz edilmiştir. Kazanın soğutma suyuna ait kısmı analiz edilmemiştir. Ana reaksiyonlu akış çözümleri ilk olarak NOx hesabı yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Çözümlemelerde yakınsama elde edildikten sonra ana reaksiyonlu akış denklemleri kapatılmıştır ve elde edilmiş akış alanı ve sıcaklık dağılımları üzerinde sadece NOx transport denklemi aktive edilerek NOx hesabı yapılmıştır. Burada yapılan kabul ise PPM mertebesindeki NO_X emisyonlarının akışı etkilemediği yönündedir.
- Tüm analizlerde türbülans modeli olarak realizable k-∈ modeli kullanılmıştır.
- Yanma modelleri olarak ön karışımsız yanma modeli ve eddy yayılım modeli kullanılmıştır.
- Analizlerin bir kısmında doğal gaz yakıtı %100 CH_4 olarak alınırken, bir kısmında ise deneysel çalışmalardaki bileşenle aynı alınmıştır.
- Ön karışımsız yanma modelinin kullanılması durumunda laminar difüzyon alev yaklaşımı hesaba alınmıştır ve laminer difüzyon alev hesapları için 17 kimyasal tür ve 58 kimyasal reaksiyonun (NO_X mekanizmasız) bulunduğu metan-hava yanma mekanizması kullanılmıştır (Nishioka, Takeno, Nagakawa ve Ishikawa, 1993). Kullanılan bu mekanizma *Ek* 'de verilmiştir.

- Radyasyon denkleminin çözümü için tüm analizlerde Discrete Ordinates modeli kullanılmıştır. Absorpsiyon katsayısı analizlerin bir kısmında 0.275 m^{-1} olarak sabit alınırken, bir kısmında ise "wsggm-domain based" yaklaşımı kullanılmıştır.
- Analizlerde yakıt ve hava giriş şartları olarak kütle debisi kullanılmıştır. Türbülans giriş şartları olarak ise türbülans yoğunluğu ve hidrolik çap değerleri kullanılmıştır. Yakıt ve hava giriş sıcaklıkları deneysel çalışmalarda olduğu gibi 11°C alınmıştır. Tüm analizlerde yakınsama kolaylığı bakımından kazan iç duvarlarına sabit sıcaklık koşulu uygulanmıştır ve kazan iç duvar sıcaklıkları tüm analizlerde 100°C olarak alınmıştır.
- Çözüm metodu olarak "Coupled" Basınç-Hız kullanılmıştır. Basınç için çözücü olarak "PRESTO!" kullanılmıştır. Momentum, türbülans kinetik enerjisi ve yayılımı, enerji, radyasyon, karışım kesri ve varyansı ile kimyasal türler için "Second Order Upwind" kullanılmıştır. Yakınsama kriterleri kütle, momentum, türbülans (k-∈), ortalama karışım kesri, ortalama karışım kesri varyansı ve kimyasal tür denklemleri için 10^{-4}, enerji ve radyasyon denklemleri için 10^{-6} ve NO_X denklemi için 10^{-7} olmuştur. Ek olarak çözümler sırasında yanma odasındaki ortalama alev sıcaklık değeri ile baca gazı emisyonları takip edilmiştir ve bu parametrelerin sabit değerlere oturması beklenmiştir.

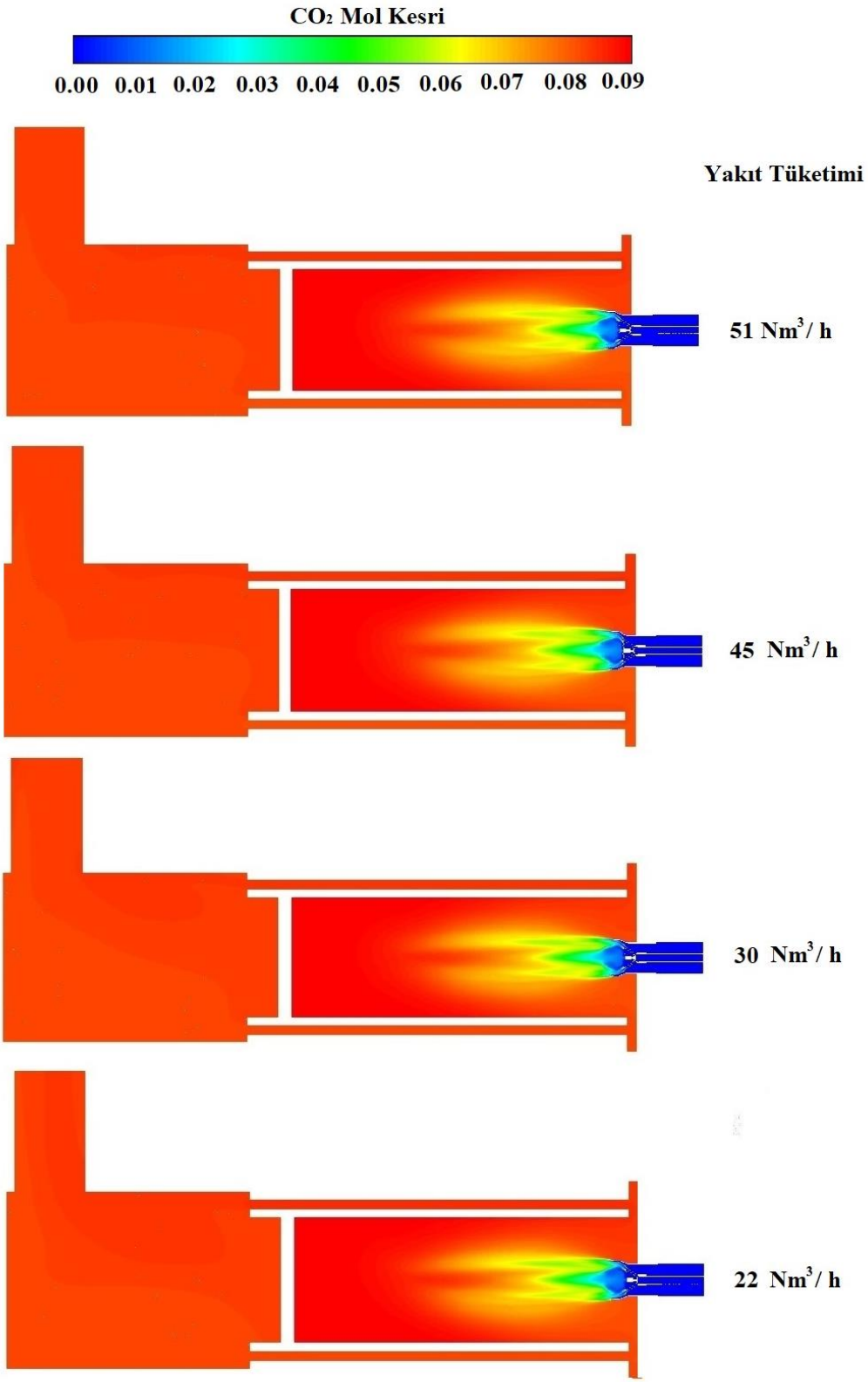
7.8 Yanma Analizleri

7.8.1 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Birinci Çalışma

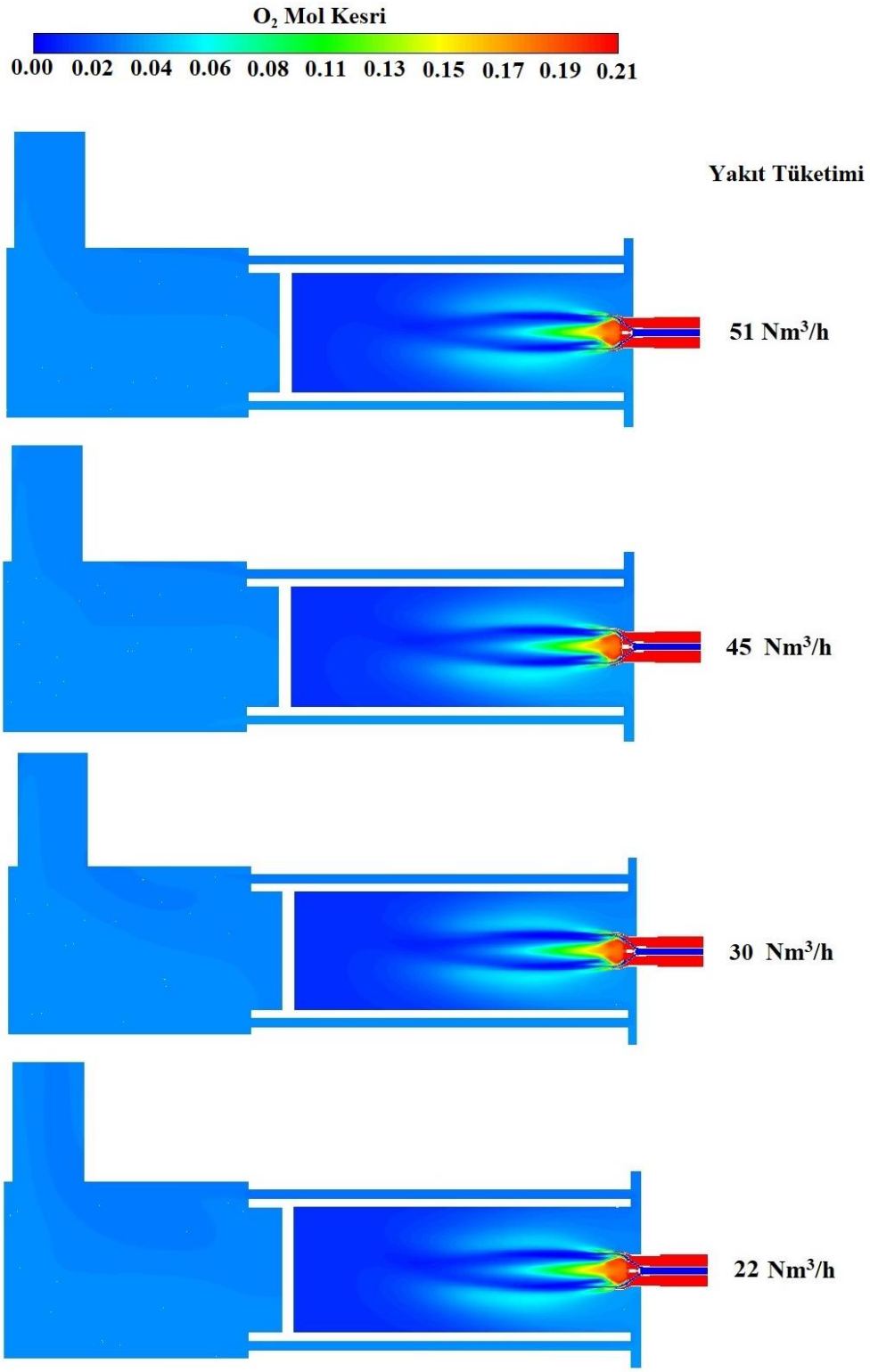
Kazan içi sıcaklık ve kimyasal türlerin dağılımları yönetici denklemlerin çözülmesi ile elde edilmiştir. Analizlerde yakıt olarak saf metan ele alınmıştır. Radyasyon denkleminin hesabında absorpsiyon katsayısı 0.275 m^{-1} olarak sabit alınmıştır. Deneysel çalışmalarda olduğu gibi hava fazlalık katsayısı değerinin 1.2 olarak alındığı durumlarda yakıt tüketim değerleri sırasıyla 22 Nm^3/h, 30 Nm^3/h, 45 Nm^3/h ve 51 Nm^3/h olmuştur. Yakıt tüketiminin 45 Nm^3/h (432 kW) alındığı durumlarda ise hava fazlalık katsayısı değerleri sırası ile 1.15, 1.2, 1.25, 1.3 ve 1.35 olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.10 ile Şekil 7.19 arasında verilmiştir.



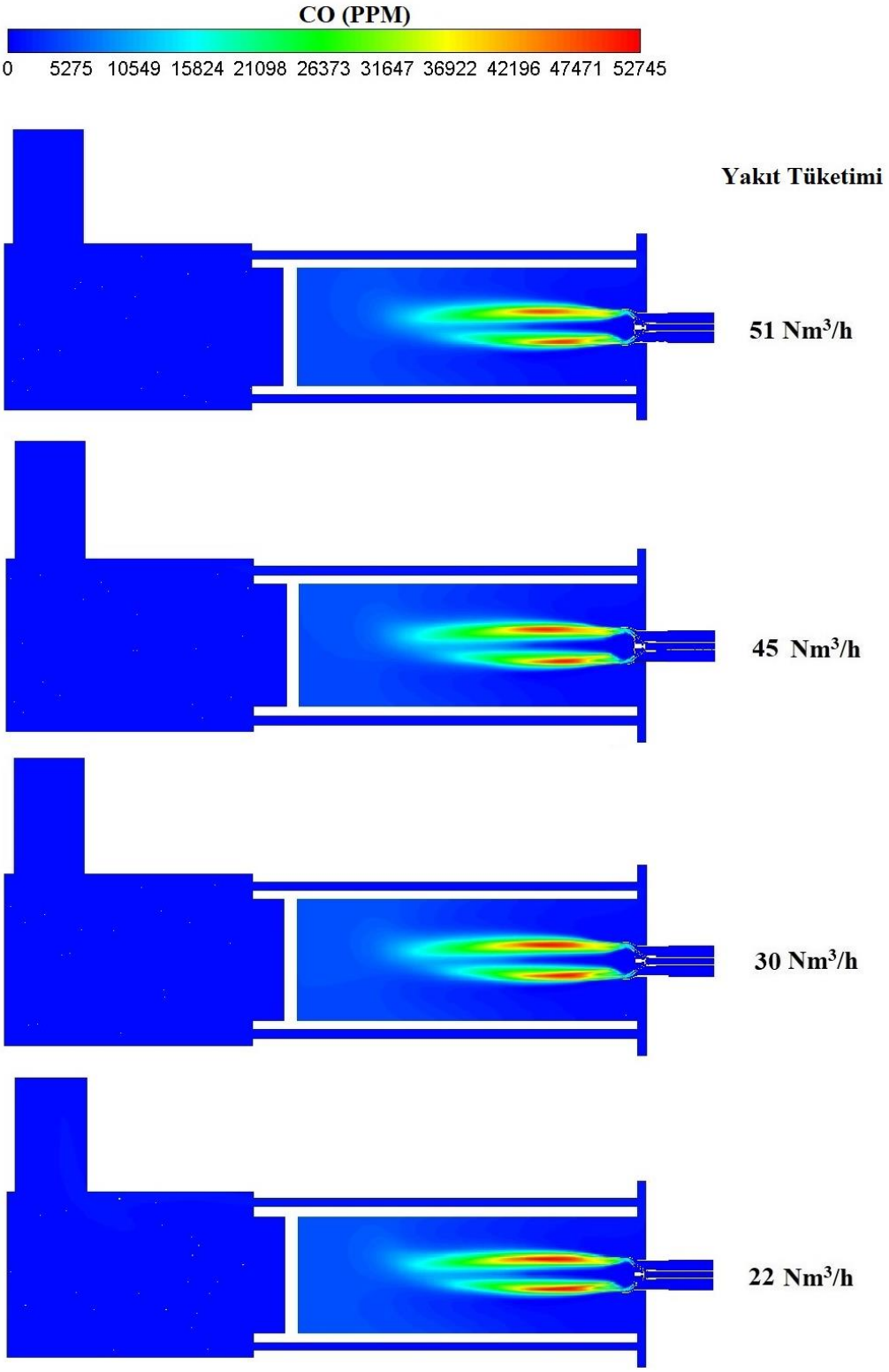
Şekil 7.10 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)



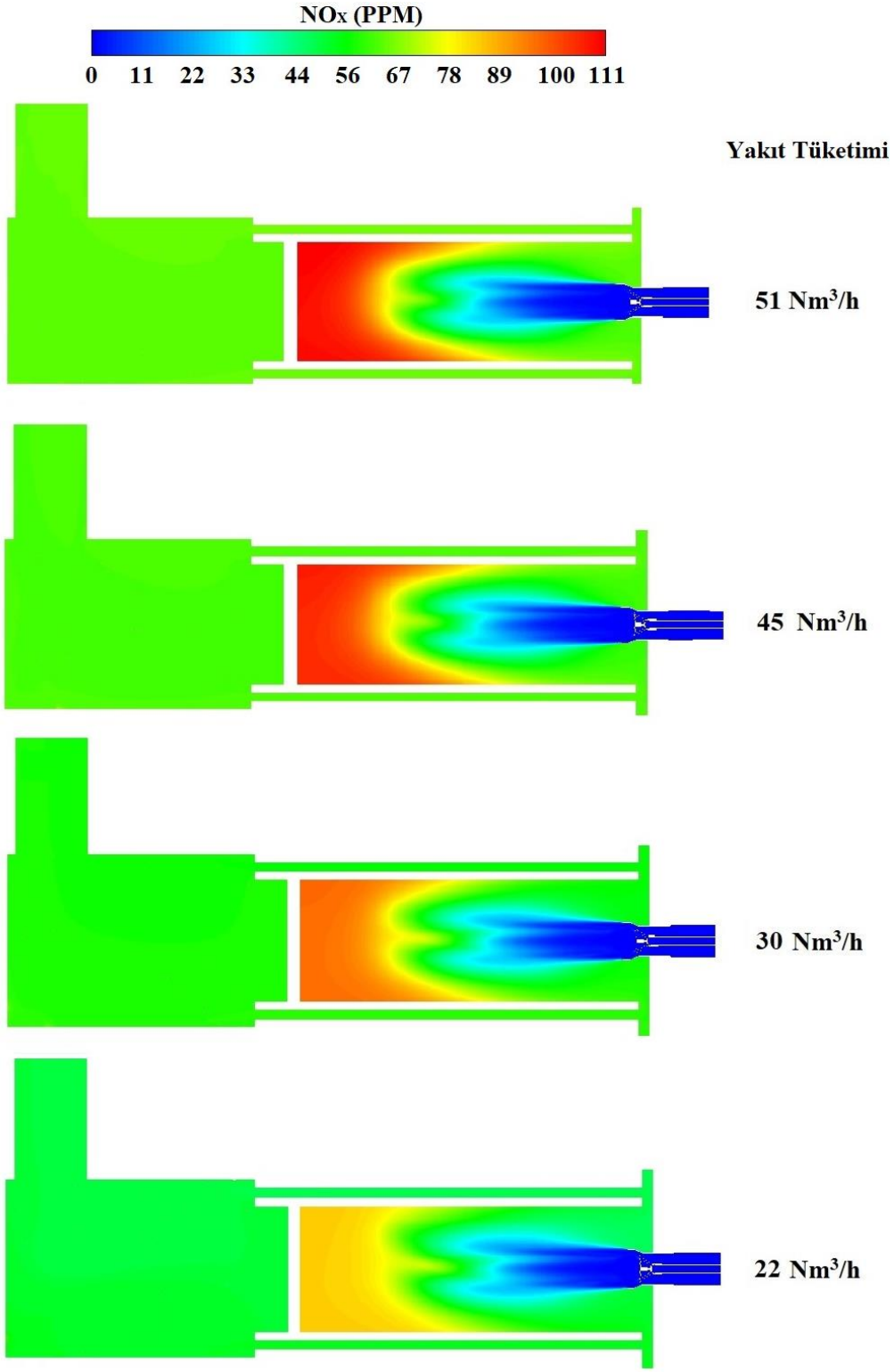
Şekil 7.11 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen CO_2 Dağılımları (yz Düzlemi)



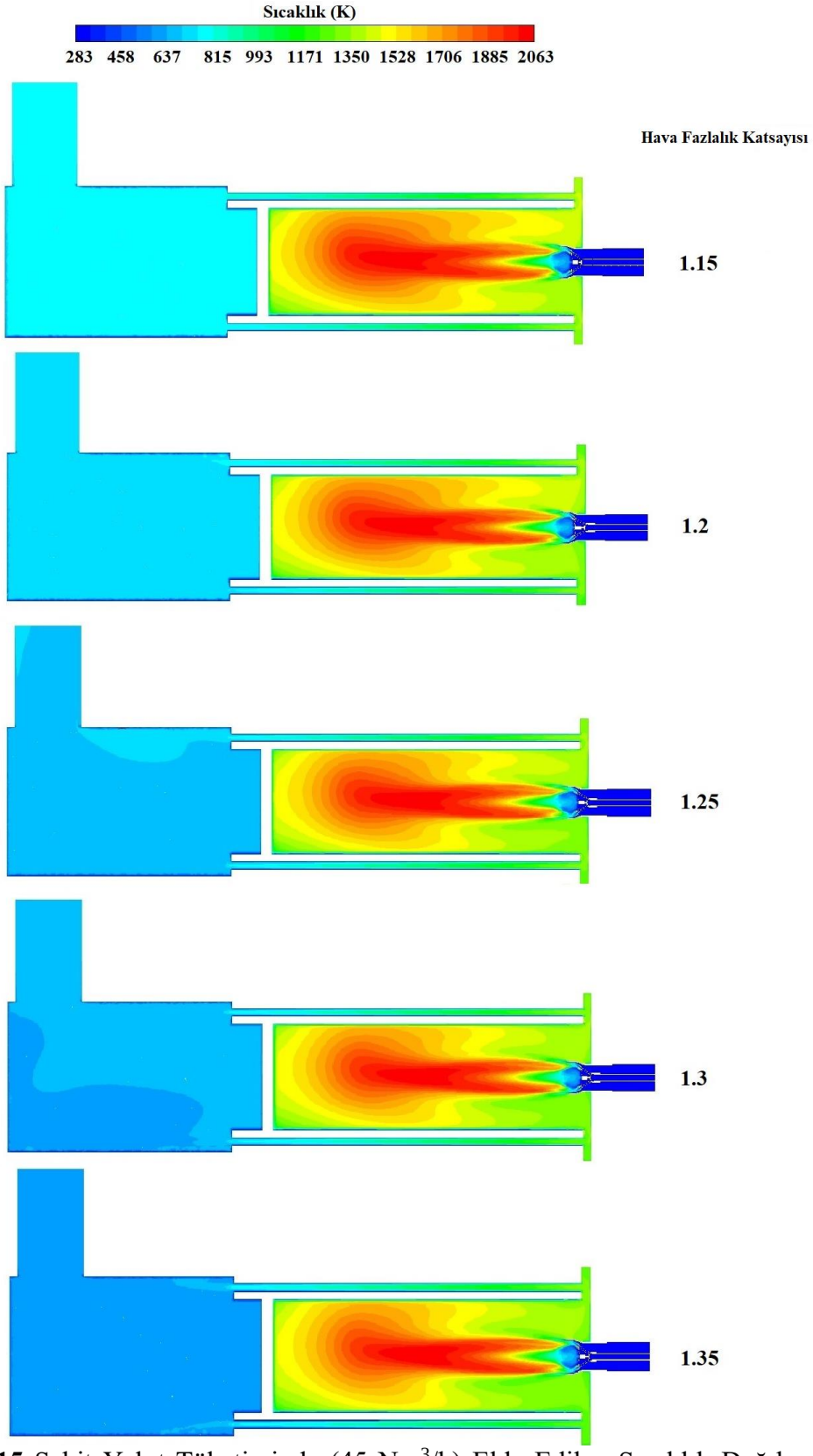
Şekil 7.12 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen O_2 Dağılımları (yz Düzlemi)



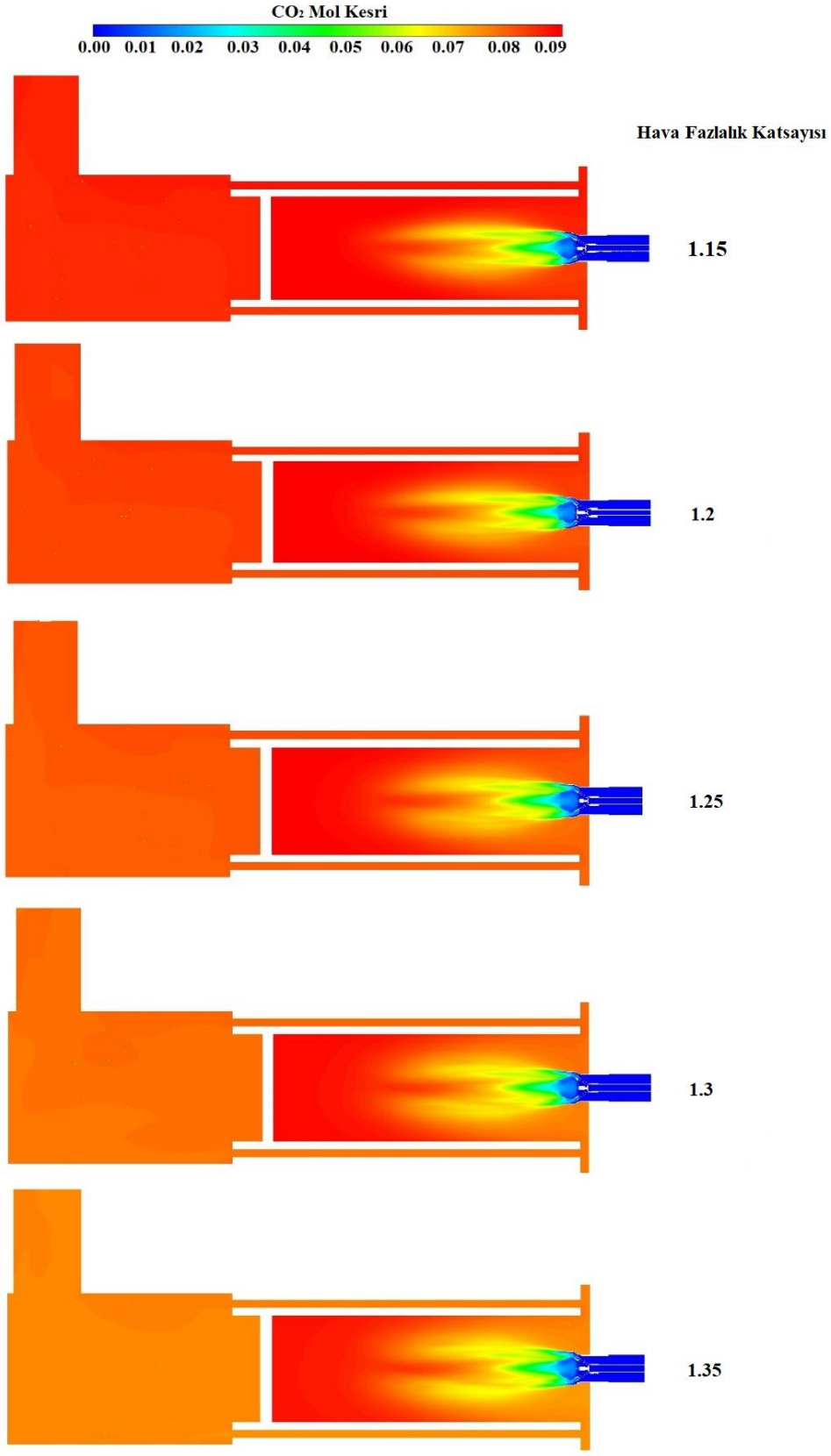
Şekil 7.13 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen CO Dağılımları (yz Düzlemi)



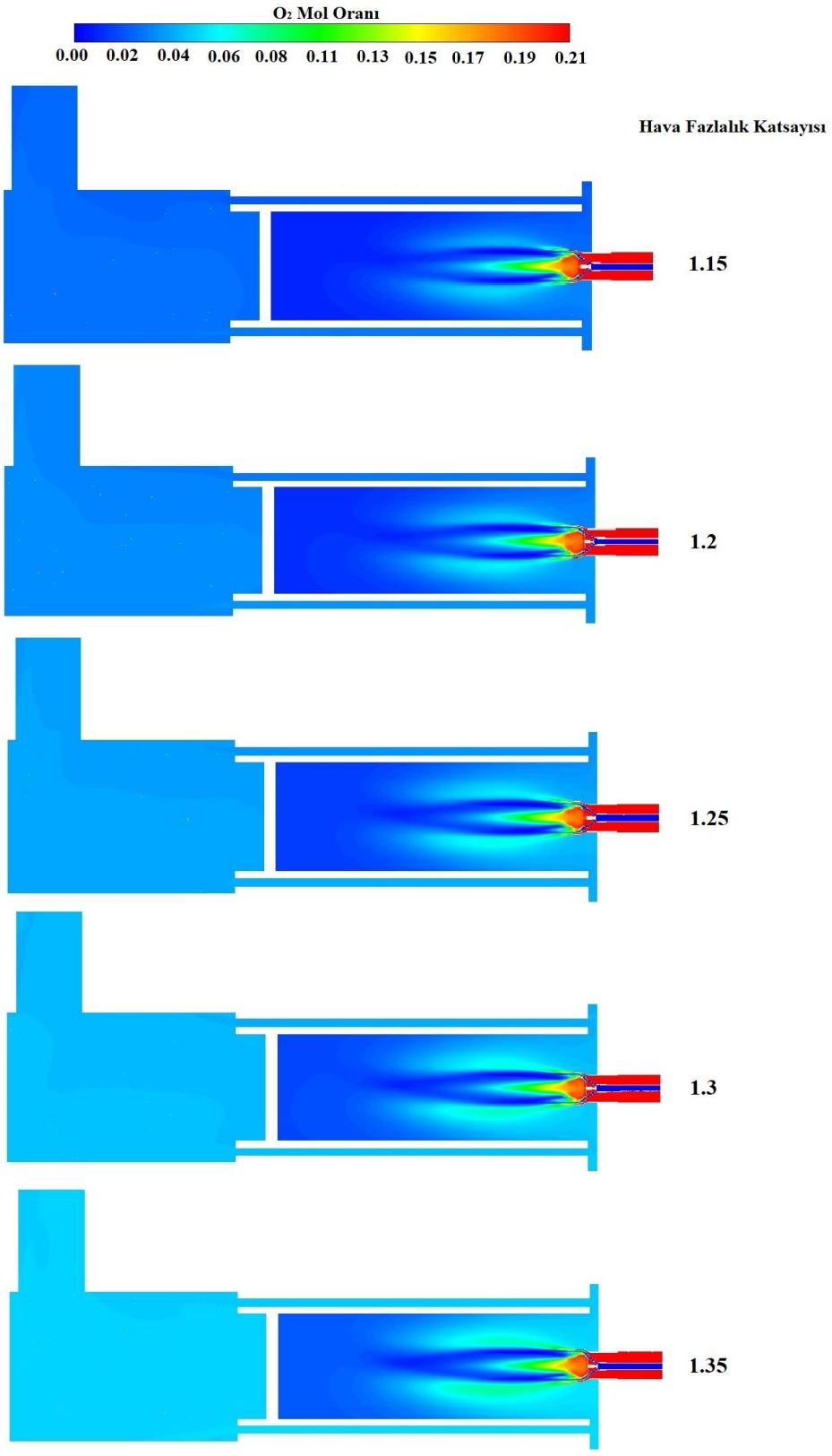
Şekil 7.14 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen NO_X Dağılımları (yz Düzlemi)



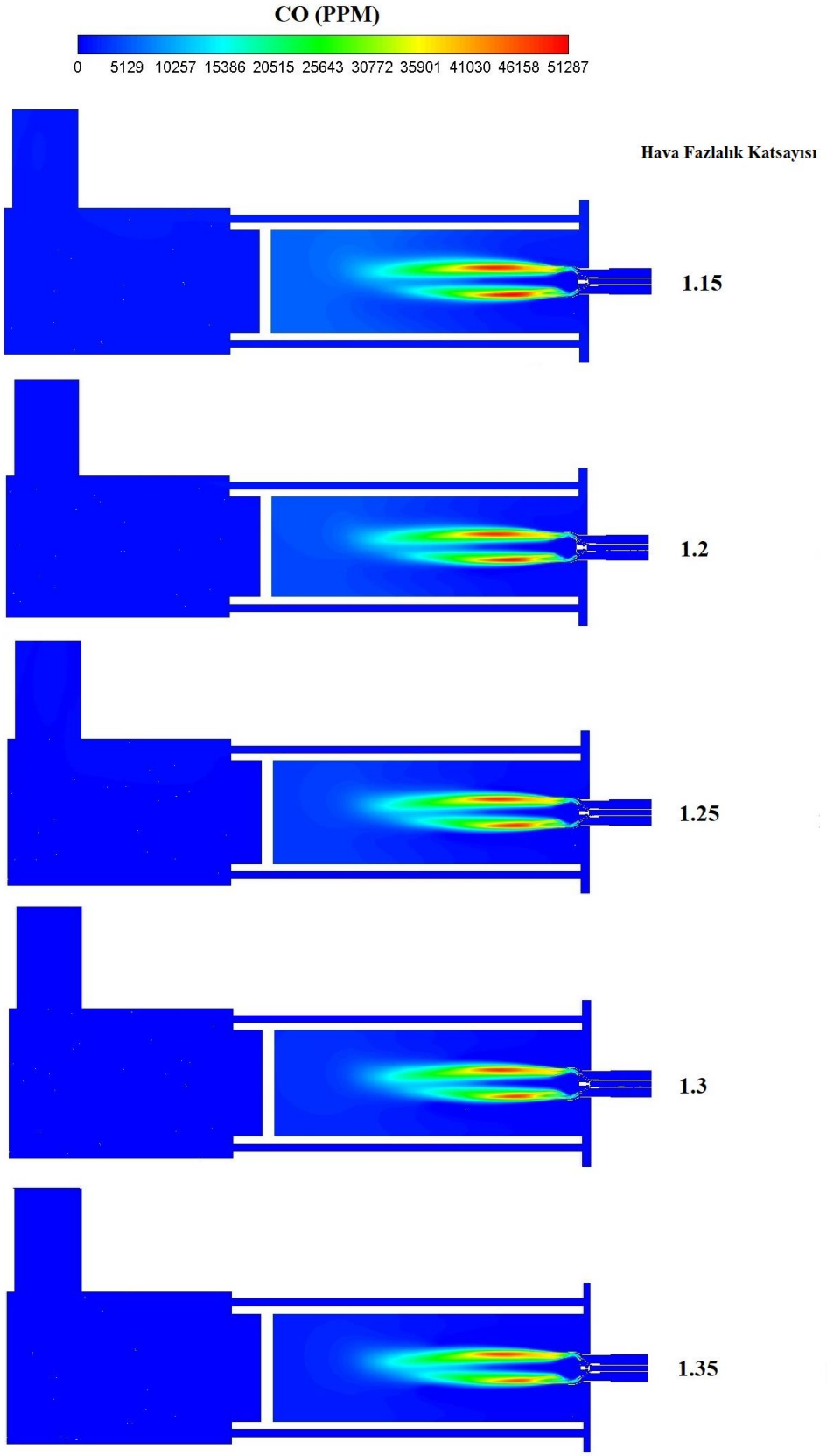
Şekil 7.15 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)



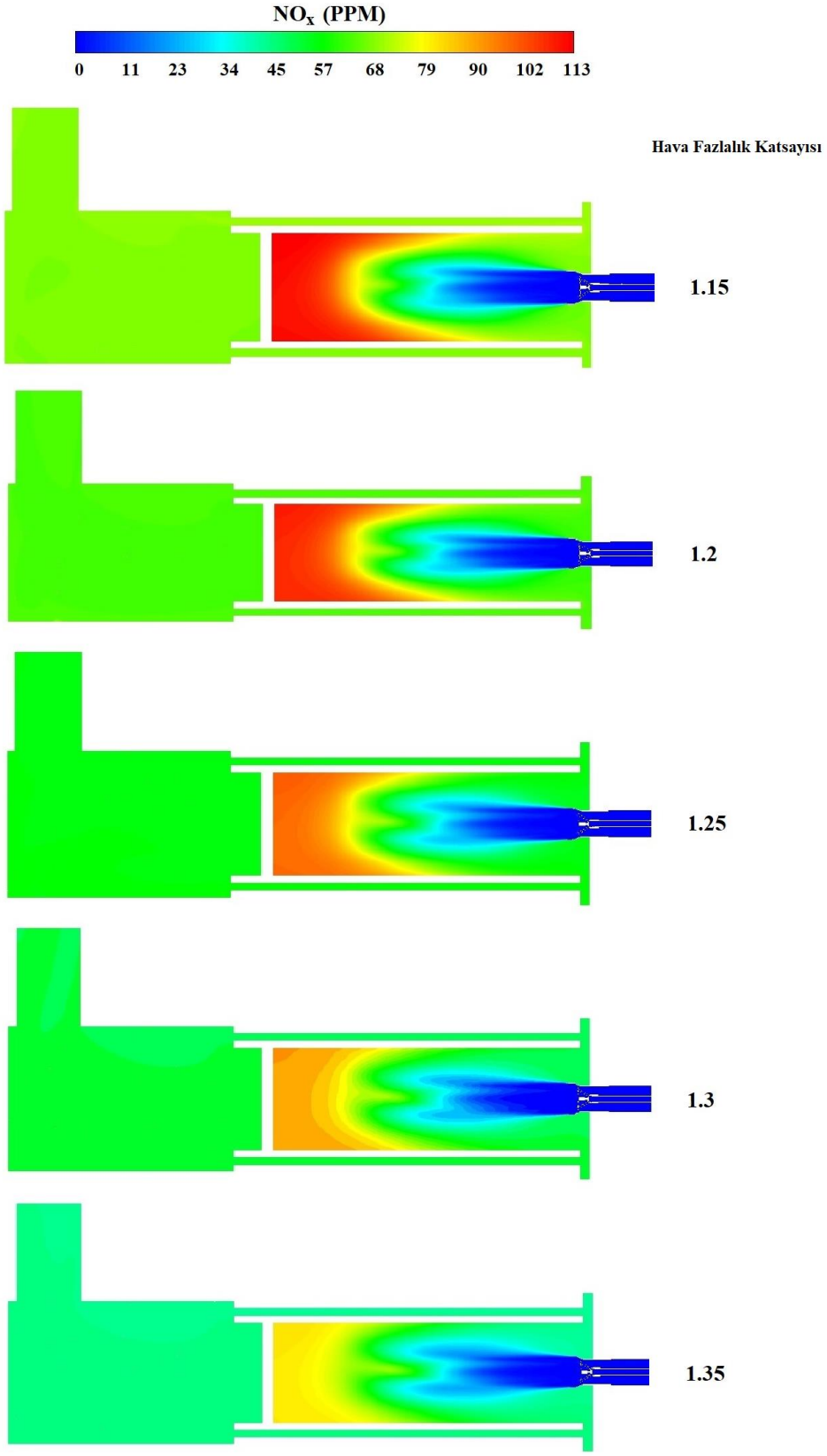
Şekil 7.16 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen CO_2 Dağılımları (yz Düzlemi)



Şekil 7.17 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen O_2 Dağılımları (yz Düzlemi)



Şekil 7.18 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen CO Dağılımları (yz Düzlemi)



Şekil 7.19 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen NO_X Dağılımları (yz Düzlemi)

Elde edilen HAD analizleri sonuçlarına göre hava fazlalık katsayısı sabit tutulduğunda (1.2) yanma odası içerisindeki alev boyu ve kalınlığı yakıt tüketimiyle birlikte azalmıştır. Bunun nedeni sisteme daha az miktarda yakıt ve yanma havası kütlesinin girmesindendir. Hava fazlalık katsayısı değerinin 1.2 olarak sabit tutulduğu durumlar için CO_2, O_2 ve CO emisyonu dağılımları çok benzer sonuçlar vermiştir. Yakıt ve hava oranının sabit tutulmasından dolayı bu beklenen bir sonuçtur. Diğer yandan yakıt tüketim miktarıyla birlikte NO_X emisyonlarında hafif bir artış meydana gelmiştir. Bu durum yakıt tüketim miktarının artmasıyla birlikte, yanma odası içerisinde hesaplanan yakıt-hava karışma derecesinin bazı alev bölgelerinde azaldığının bir göstergesi olmaktadır.

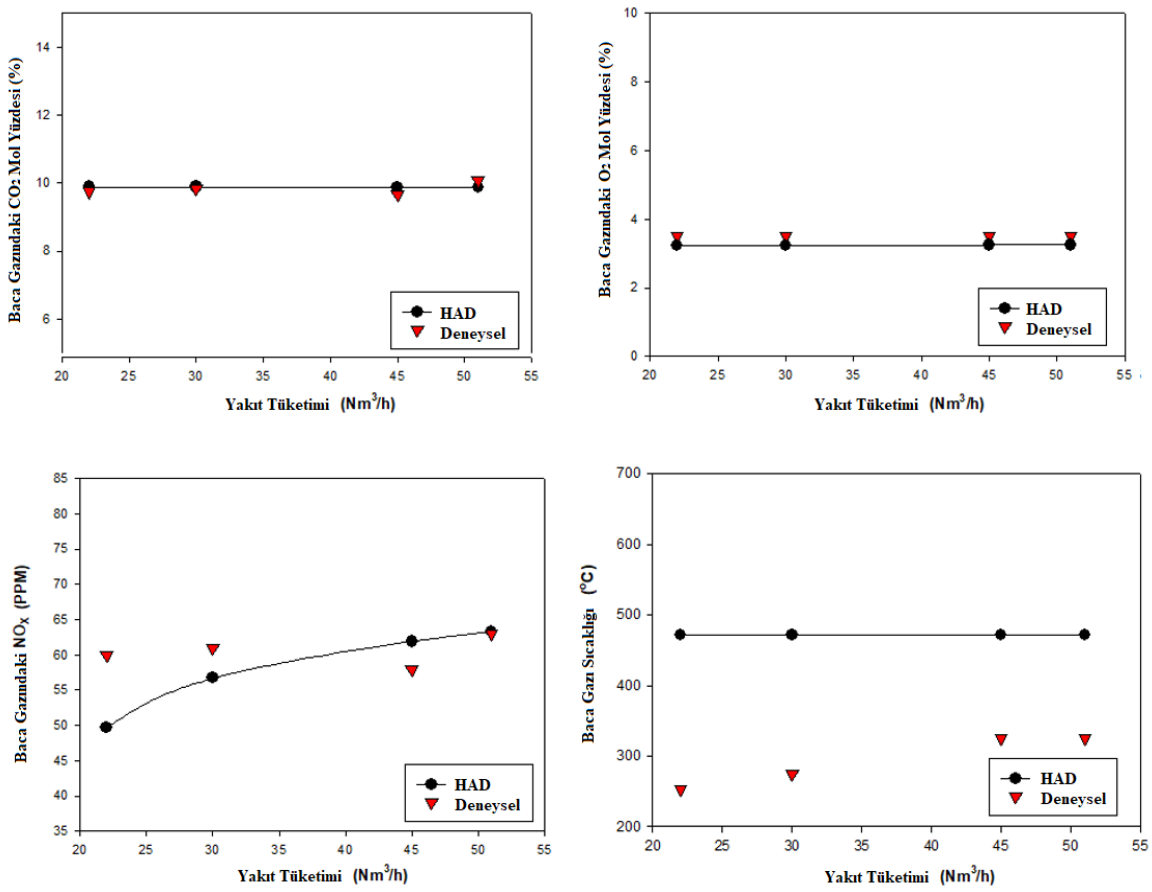
Sabit yakıt tüketimi (45 Nm^3/h) durumlarında ise hava fazlalık katsayısı değerinin artmasıyla birlikte alev boyunda bir değişme olmazken, radyal yönde alev sıcaklığı azalmıştır. Tahmin edileceği üzere hava fazlalık katsayısı değerindeki artış ile birlikte CO_2 emisyonlarının baca gazı içerisindeki hacimsel değerleri azalırken, O_2 emisyonlarında artış olmuştur. CO emisyonlarının yanma odası içerisindeki dağılımında ise artan hava fazlalık katsayısı değeriyle birlikte hafif bir azalma olduğu söylenebilir. NO_X emisyonlarının yanma odasındaki miktarı da artan hava fazlalık katsayısı ile birlikte bir miktar azalma göstermiştir.

CO emisyonlarının baca gazındaki değerleri tüm analizlerde 0 PPM olarak hesaplanmıştır. Bunun nedeni skaler yayınım parametresinin (χ) kazan çıkışında önemsenmeyecek derecede küçük olmasıdır. Diğer bir anlamda sistem baca gazı kısmında kimyasal dengeye ulaşmaktadır. Bu durum ön karışımsız yanma modelinin zayıf bir yönü olarak ortaya çıkmaktadır. Bu noktada çıkarılan sonuç, CO emisyonlarının baca gazı içerisindeki değerini hesaplayabilmek için daha detaylı bir yanma modelinin kullanılması gerektiğidir.

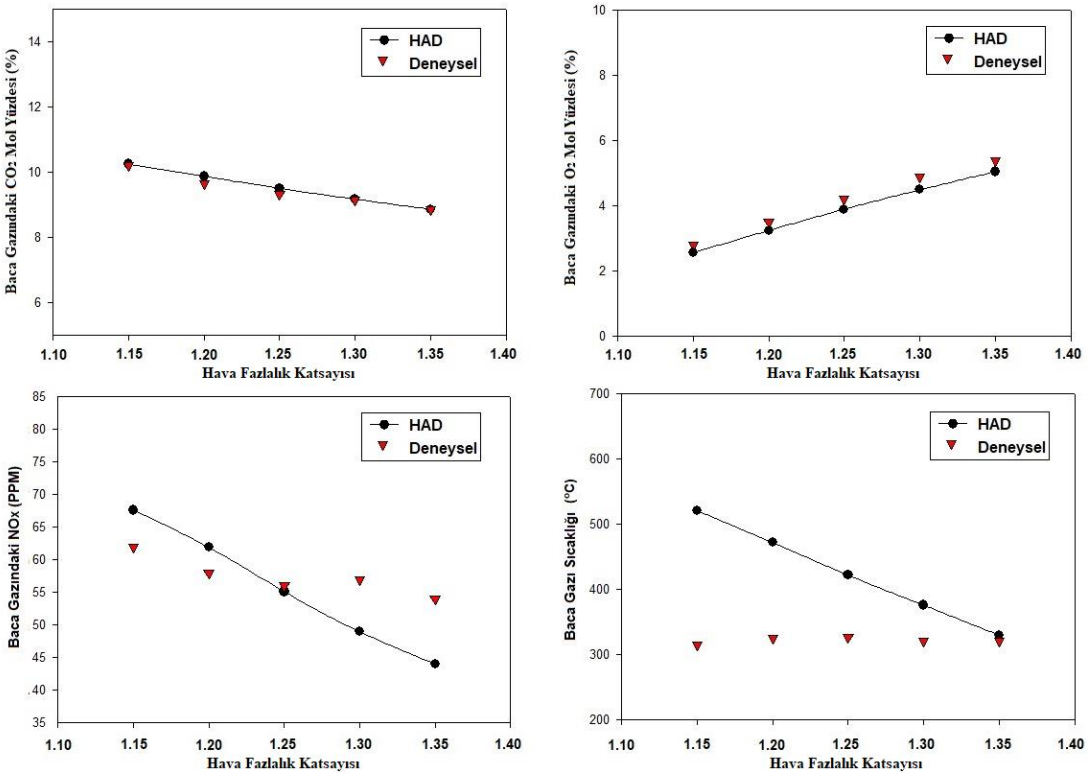
7.8.1.1 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Birinci Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Deneysel Verilerle Kıyaslanması

Ön karışımsız yanma modelinin kullanımı ile yapılan birinci çalışmadan elde edilen baca gazı emisyon değerleri ve baca gazı sıcaklık değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ölçümlerde olduğu gibi, baca gazında hesaplanan CO_2 emisyonlarının molar yüzdesi %0 H_2O ve %0 O_2 bazına çevrilmiştir. Diğer yandan CO

emisyonları ile ilgili bir karşılaştırmaya gerek duyulmamıştır. HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırılması Şekil 7.20 ve Şekil 7.21'de verilmiştir.



Şekil 7.20 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değeri (1.2) İçin Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması



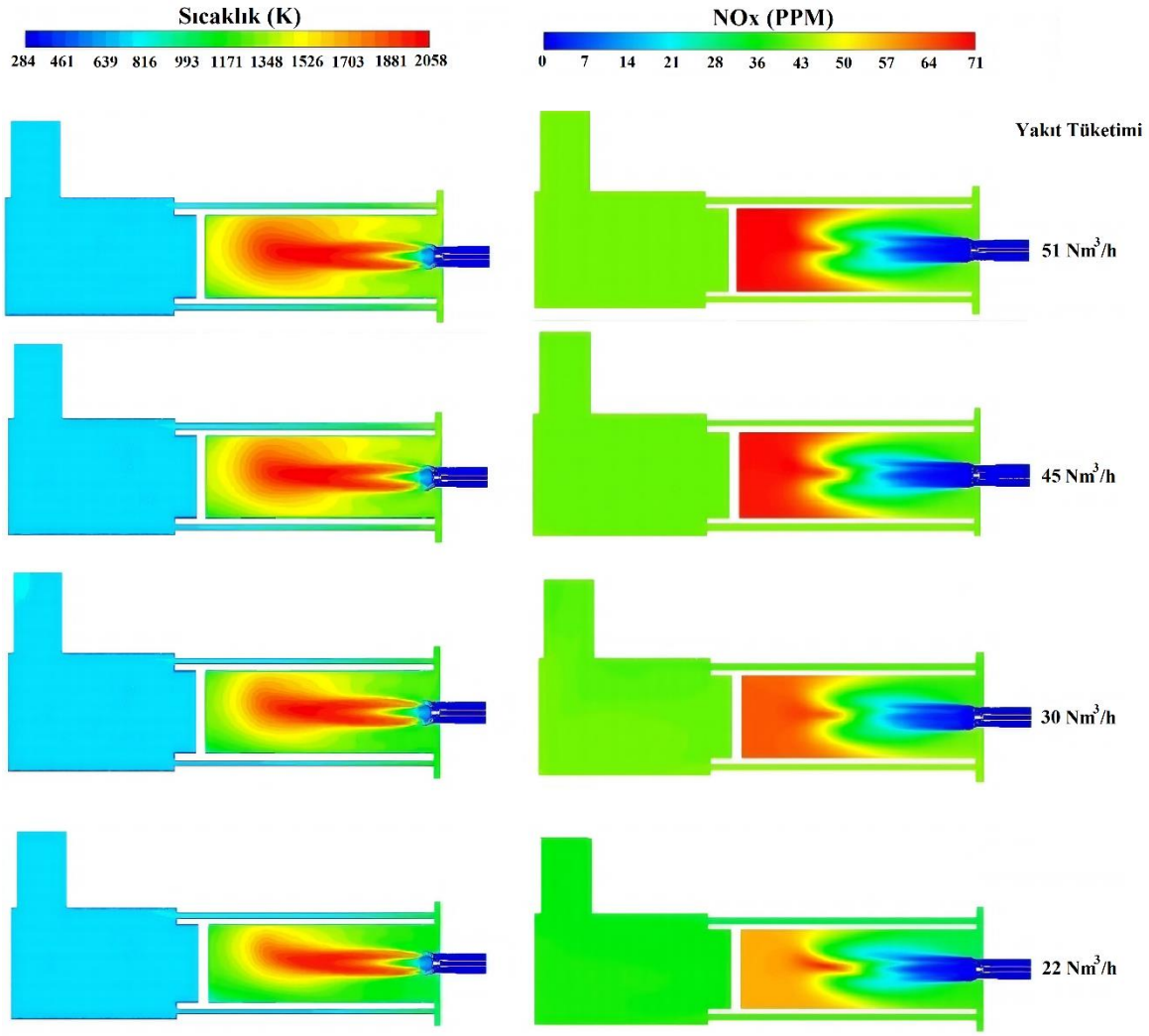
Şekil 7.21 Sabit Yakıt Tüketimi İçin (45 Nm^3/h) Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 7.20 ve Şekil 7.21'de verilen grafiklerden görüleceği üzere HAD analizleri CO_2 ve O_2 emisyonları için oldukça uygun sonuçlar vermektedir. Ayrıca HAD analizleri NO_X emisyonlarını da tatmin edici şekilde hesaplamıştır. NO_X emisyonları sabit hava fazlalık katsayısı değerinin kullanıldığı durumlar için maksimum %16'lık hata ile hesaplanmıştır. Bu hata değeri 22 Nm^3/h'lik yakıt tüketimi durumunda gerçekleşmiştir. Sabit yakıt tüketimi durumu için NO_X emisyonları maksimum %18'lik bir hata ile hesaplanabilmiştir ve bu da hava fazlalık katsayısı değerinin 1.35 olduğu durumda meydana gelmiştir. Bu hataların sebebi ön karışımsız yanma modelinin kullanılan metan-hava mekanizması (Nishioka, Takeno, Nagakawa ve Ishikawa,1993) ile birlikte yanma odasındaki fiziksel koşulları tam olarak oluşturamamasından kaynaklanmaktadır. Alev sıcaklıklarındaki düşük mertebedeki hatalar özellikle termal NO emisyonlarının oluşum hızları üzerinde önemli değişimlere sebep olabilmektedir. Ancak NO_X emisyonları PPM mertebesinde olduğu için bu hata değerleri göz ardı edilebilmektedir. Buradan çıkarılabilecek bir diğer sonuç da nümerik analizlerin yakıt tüketiminin çok düşük olmadığı durumlarda ve ortalama bir hava fazlalık katsayısı değeri (1.2-1.25) için en doğru sonuçları verdiğidir.

Baca gazı sıcaklık değerleri tüm durumlar için deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre daha yüksek hesaplanmıştır. Şekil 7.21'den görüleceği üzere, hava fazlalık katsayısı değerinin azalmasıyla baca gazı sıcaklık değeri için hata oranı artmaktadır. Bu durum, deneysel çalışmalarda duman boruları içerisinde bulunan ve HAD çalışmalarında modellenemeyen çelik plakalardan kaynaklanmaktadır. Deneysel çalışmalarda duman boruları içerisinde yer alan çelik plakalar, boruların içerisindeki ısı transfer yüzey alanını ve türbülans yoğunluğunu arttırmaktadır. Bu da duman borularından soğutma suyuna olan ısı transferi değerini arttırmaktadır. HAD analizlerinde duman boruları içerisindeki çelik plakalar modellenemediği için, analizlerde duman borularından yeterli miktarda ısı enerjisi çekilememektedir. Bu da HAD analiz sonuçlarında baca gazı sıcaklık değerlerinin deneysel verilere göre yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Bu durumun sadece duman borularından yeterince ısı çekilememesinden kaynaklandığının kanıtı ise hesaplanan NO_X emisyonlarının deneysel verilerle korelasyon oluşturulabilecek düzeyde olmasıdır. Zira NO_X emisyonları tamamen alev sıcaklık ve hız değerlerine bağlıdır. Diğer yandan bilinmelidir ki, duman borularından soğutma suyuna verilen ısı enerjisi miktarının emisyonlar ve alev sıcaklığı üzerinde bir etkisi yoktur. Duman boruları ve sandık duvarlarına adyabatik sınır şartı tanımlayarak yapılan ek analiz sonuçlarına göre, yanma odası içerisindeki alev sıcaklıklarında ve baca gazı NO_X emisyonu değerlerinde herhangi bir değişim elde edilmemiştir. Bu durum, duman boruları ve sandık duvarlarına uygulanan termal koşulların yanma odası içerisindeki alevi ve emisyonları etkilemediğini kanıtlar niteliktedir.

7.8.2 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen İkinci Çalışma

Bu çalışmada hava fazlalık katsayısı 1.2 olarak sabit tutulurken, yakıt tüketim değerleri değiştirilmiştir. Yakıt tüketim değerleri deneysel çalışmalarda olduğu gibi sırasıyla 22 Nm^3/h, 30 Nm^3/h, 45 Nm^3/h ve 51 Nm^3/h olmuştur. Kullanılan yakıt saf metan olmuştur. Radyasyon denkleminin çözümünde absorpsiyon katsayısı için "wsggm-domain based" yaklaşımı hesaba alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 7.22'de kazan içi sıcaklık ve NO_X emisyonu dağılımı olarak verilmiştir. Kazan içi O_2, CO_2 ve CO emisyonlarına ait sonuçlar ise bölüm 7.8.1'de elde edilen sonuçlar ile tam olarak aynı olduğu için bu bölümde tekrar verilmemiştir.

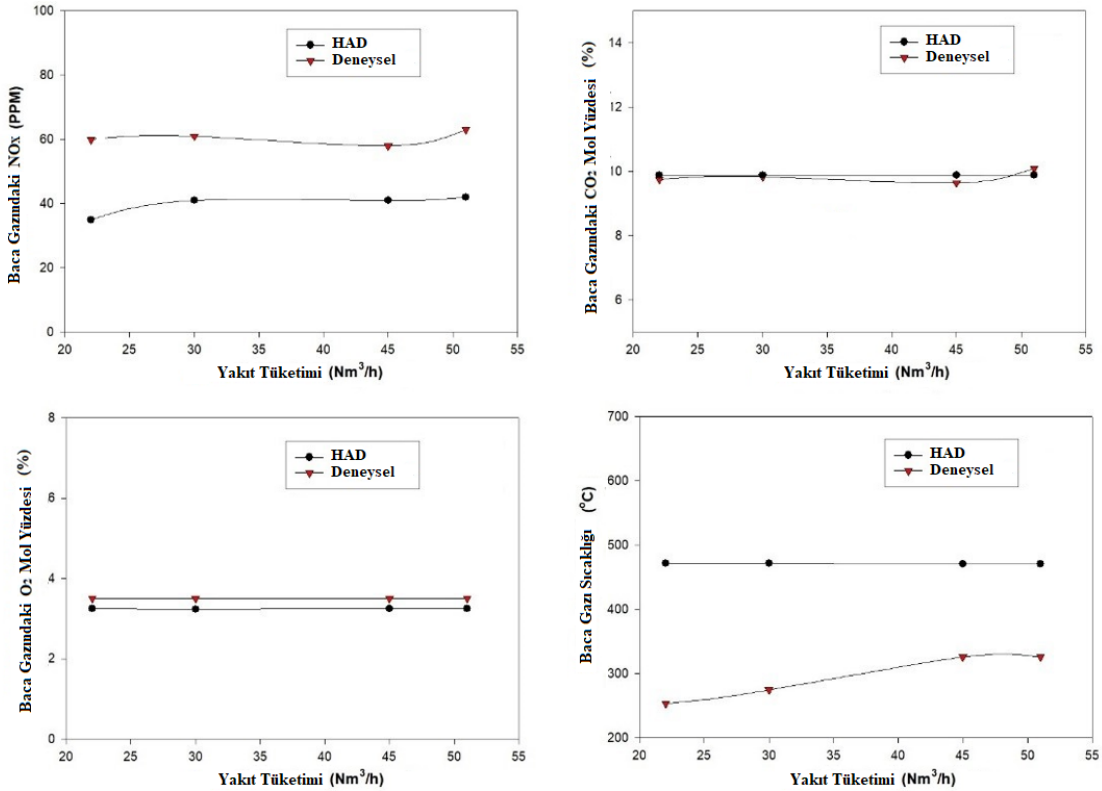


Şekil 7.22 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değerinde (1.2) Elde Edilen Sıcaklık ve NO_X Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)

Elde edilen sonuçlara göre yanma odasında oluşan alevin boyutları yakıt tüketimine paralel olarak küçülmektedir. Yakıt tüketimi 22 Nm^3/h olduğu zaman maksimum alev sıcaklık değeri 1991 K olurken, bu değer 51 Nm^3/h hızındaki yakıt tüketimi için 2058 K olmaktadır. Bu durum, brülörün yakıt tüketim değerinin yüksek değerlerde tutulduğu zaman, yanma alevi içerisindeki hava-yakıt karışımının yetersiz olduğu bazı bölgelerin meydana geldiğine dair bir işaret olmaktadır.

7.8.2.1 Ön Karışımsız Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen İkinci Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Deneysel Verilerle Kıyaslanması

Şekil 7.23'de ön karışımsız yanma modelinin kullanılması ile gerçekleştirilen ikinci çalışmadan elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların kıyaslanmasına yer verilmiştir.



Şekil 7.23 Sabit Hava Fazlalık Katsayısı Değeri (1.2) İçin Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 7.23'de görüleceği üzere HAD analizleri baca gazındaki O_2 ve CO_2 emisyonlarının hacimsel yüzdelerini doğru bir şekilde hesaplamıştır. Baca gazındaki CO_2 emisyonları hem deneysel hem de nümerik sonuçlar için %0 O_2 ve %0 H_2O bazında elde edilmiştir. HAD analizleri NO_X emisyonlarını deneysel sonuçlara göre düşük hesaplamıştır. Bu durum, mevcut çözüm parametreleri altında ön karışımsız yanma modelinin kullanılan metan-hava yanma mekanizması ile birlikte yanma odası içerisinde oluşan fiziksel şartları tam olarak oluşturmamasından kaynaklanmaktadır. HAD analizleri ile hesaplanan alev sıcaklık değerlerinin deneysel alev sıcaklık değerlerinden hafif derecede düşük olduğu

tahmin edilmektedir. Ancak yine de NO_X emisyonları için deneysel ve nümerik sonuçlar yakıt tüketimindeki değişim ile birlikte benzer bir değişkenlik göstermektedir. CO emisyonlarının baca gazındaki değerleri tüm durumlar için 0 PPM olarak hesaplanmıştır. Bu durum yine baca gazı bileşenlerinin tam kimyasal denge durumuna yakın olacak şekilde hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Baca gazı sıcaklık değerleri ise Şekil 7.20'de verilen sonuçlara çok yakın olacak şekilde, deneysel verilerden yine yüksek hesaplanmıştır. Bu durum yine HAD analizlerinde duman boruları içerisinde türbülatör levha kullanılamamasından kaynaklanmıştır.

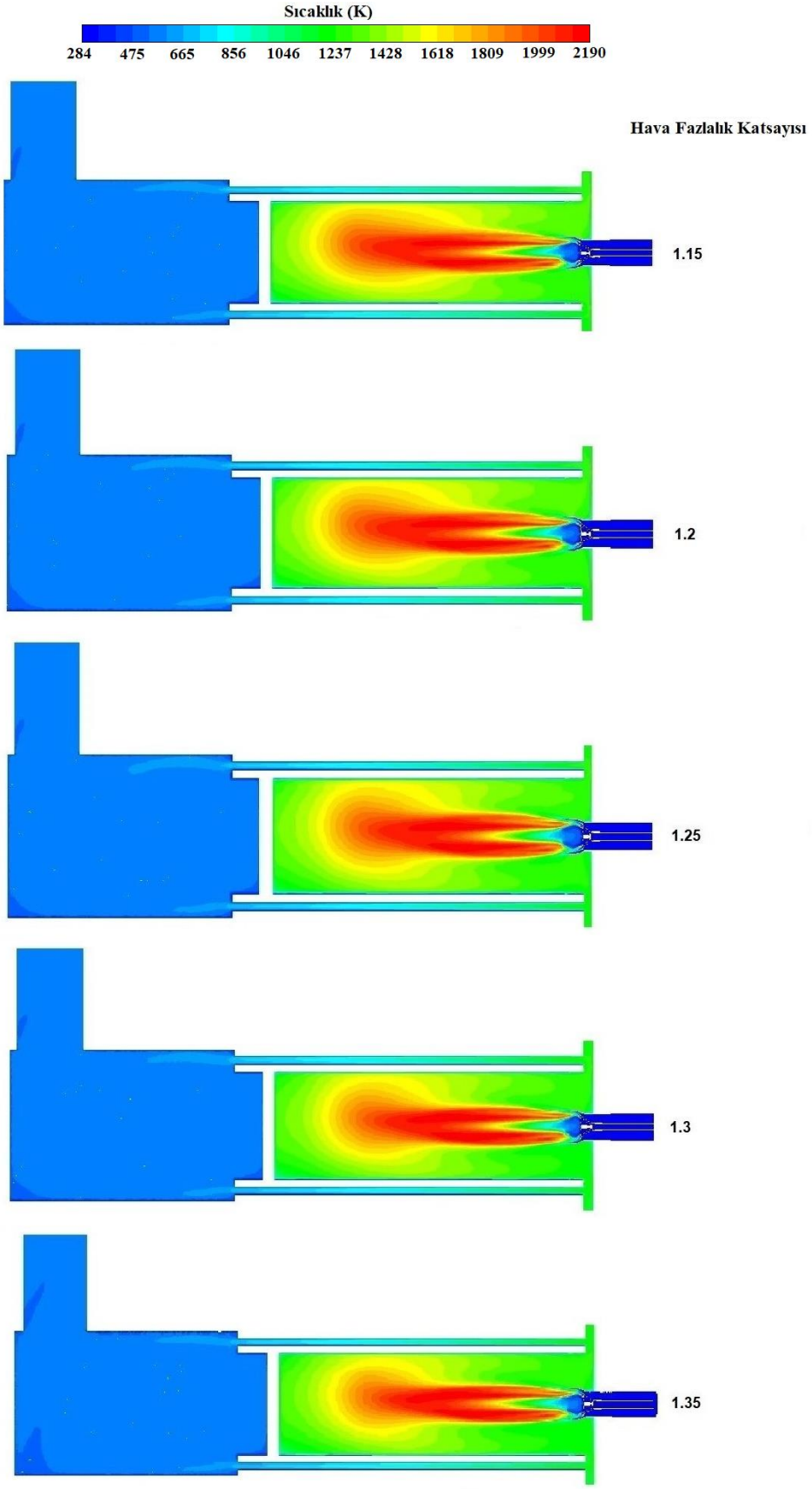
7.8.3 Eddy Yayılım Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Çalışma

Çalışmanın bu bölümünde kazan içi sıcaklık ve kimyasal tür dağılımları eddy yayılım yanma modelinin kullanılmasıyla elde edilmiştir. Nümerik analizler sabit yakıt tüketiminde (45 Nm^3/h) değişken hava fazlalık katsayısı değerlerinin kullanımı ile yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda olduğu gibi hava fazlalık katsayısı değerleri sırasıyla 1.15, 1.20, 1.25, 1.30 ve 1.35 alınmıştır. Radyasyon denkleminin hesabında absorpsiyon katsayısı için "wsggm-domain based" yaklaşımı kullanılmıştır. Analizlerde yakıt olarak hem saf metan hem de deneysel çalışmalarda kullanılan doğal gaz bileşeni kullanılmıştır. Bu iki yakıt türünden elde edilen sonuçlar görsel olarak bir fark oluşturmadıkları için sadece saf metan yakıtının kullanılması ile elde edilen görsel sonuçlara yer verilmiştir. Analizlerde kullanılan global reaksiyonlar Eş.(7.34)'de verilmiştir.

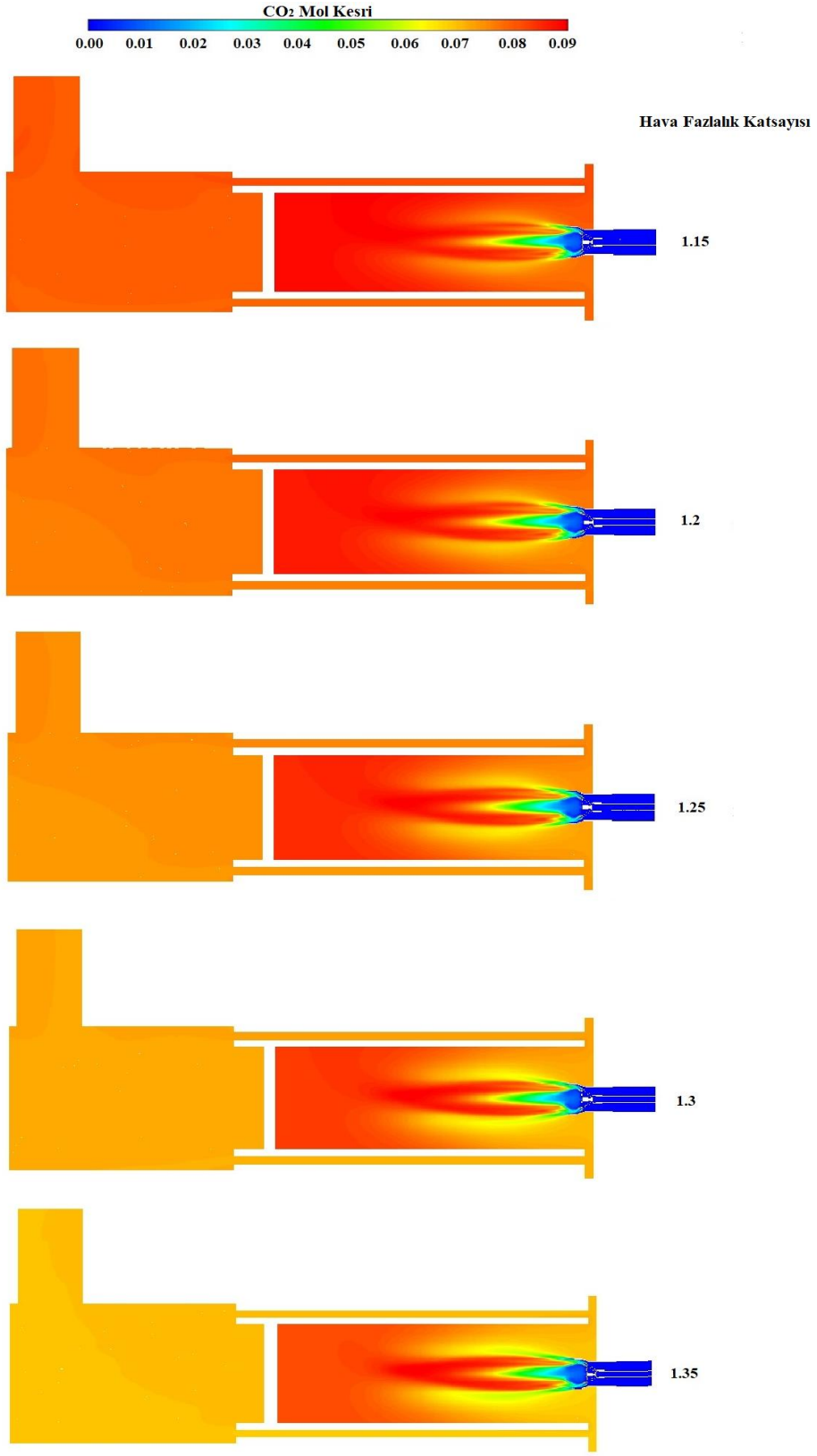
$$C_xH_{2x+2} + (x+0.5)O_2 \longrightarrow xCO + (x+1)H_2O$$

$$xCO + (0.5x)O_2 \longrightarrow xCO_2 \qquad (7.34)$$

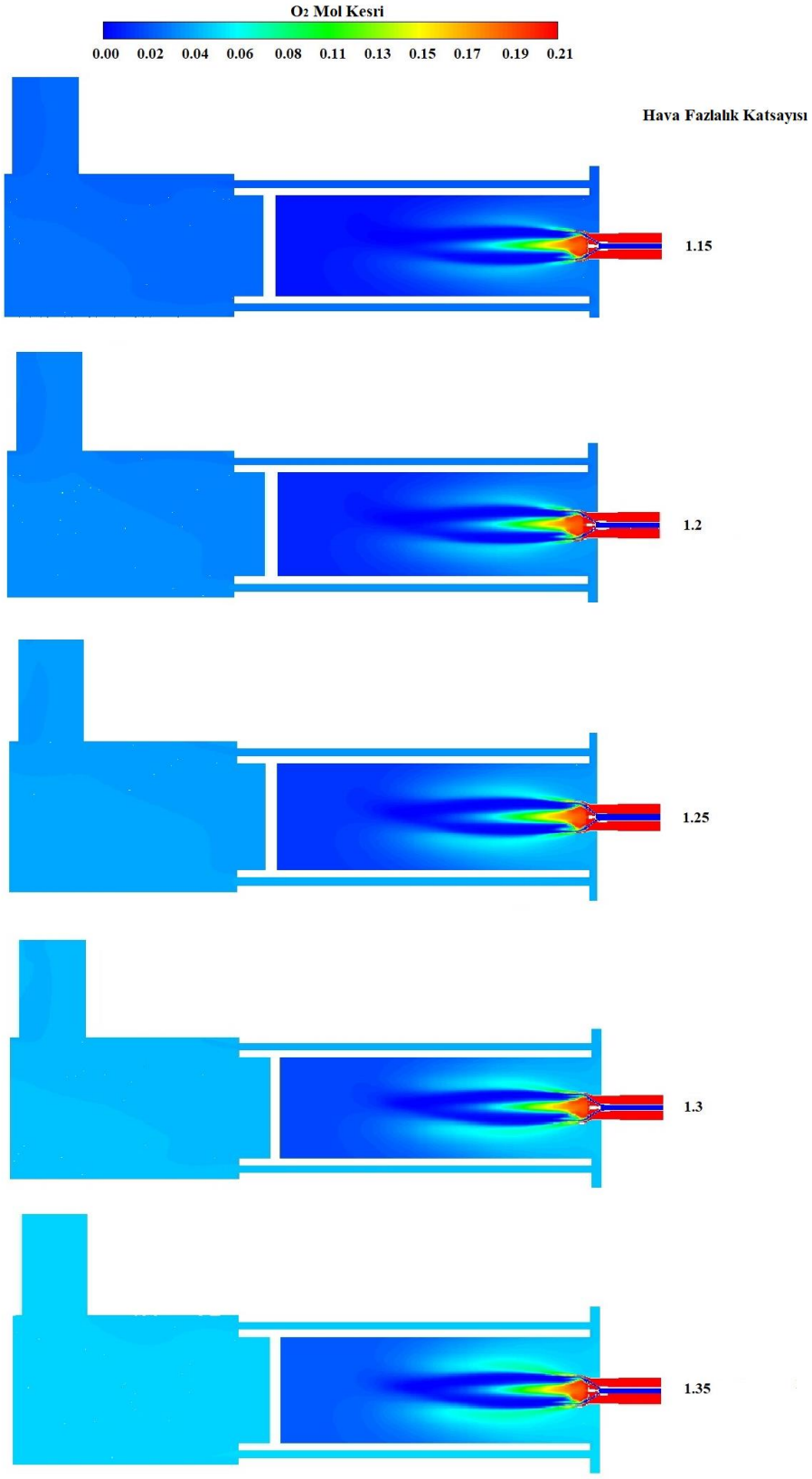
Elde edilen sonuçlar Şekil 7.24 ve Şekil 7.28 arasında gösterilmiştir.



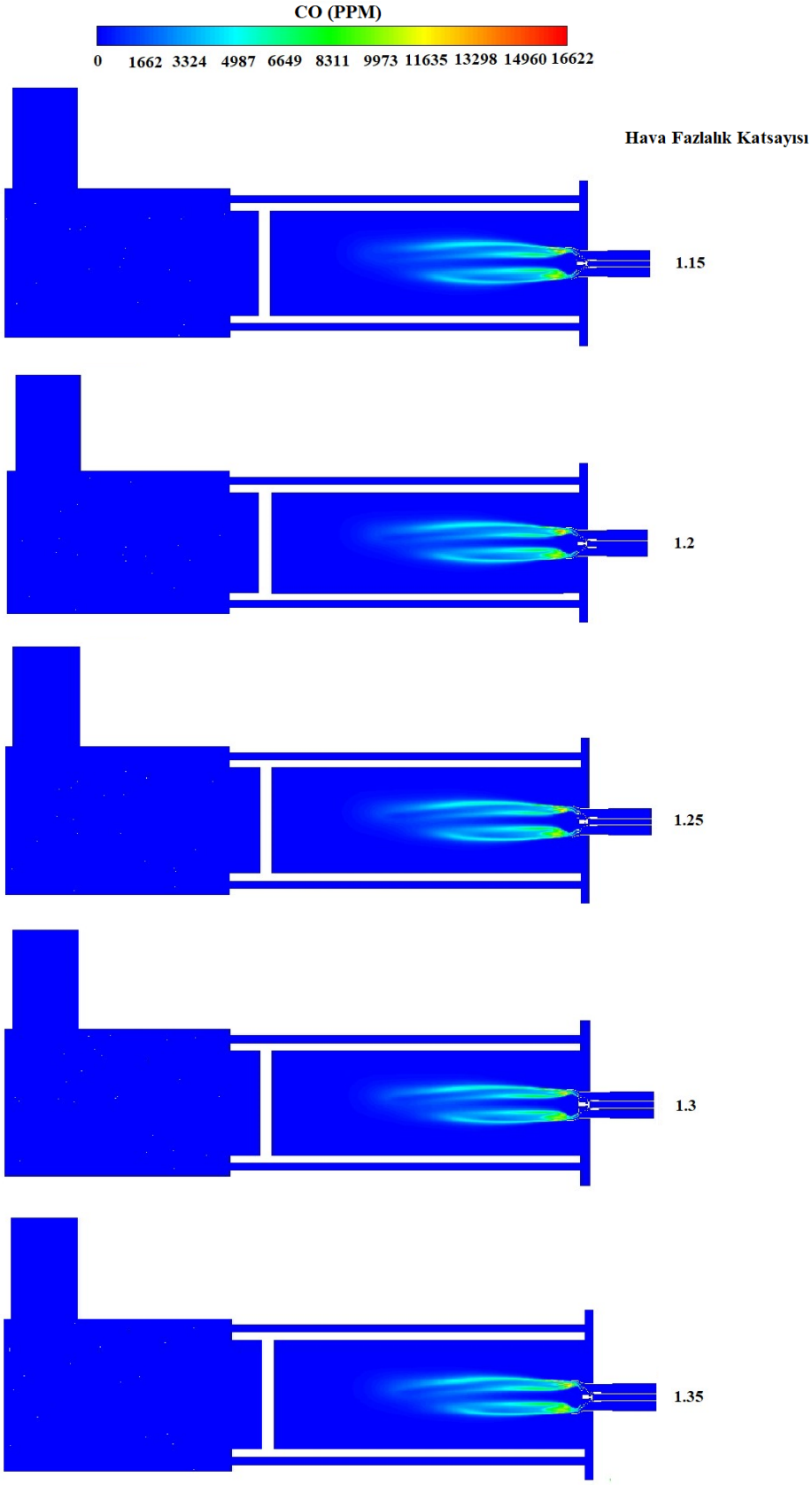
Şekil 7.24 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)



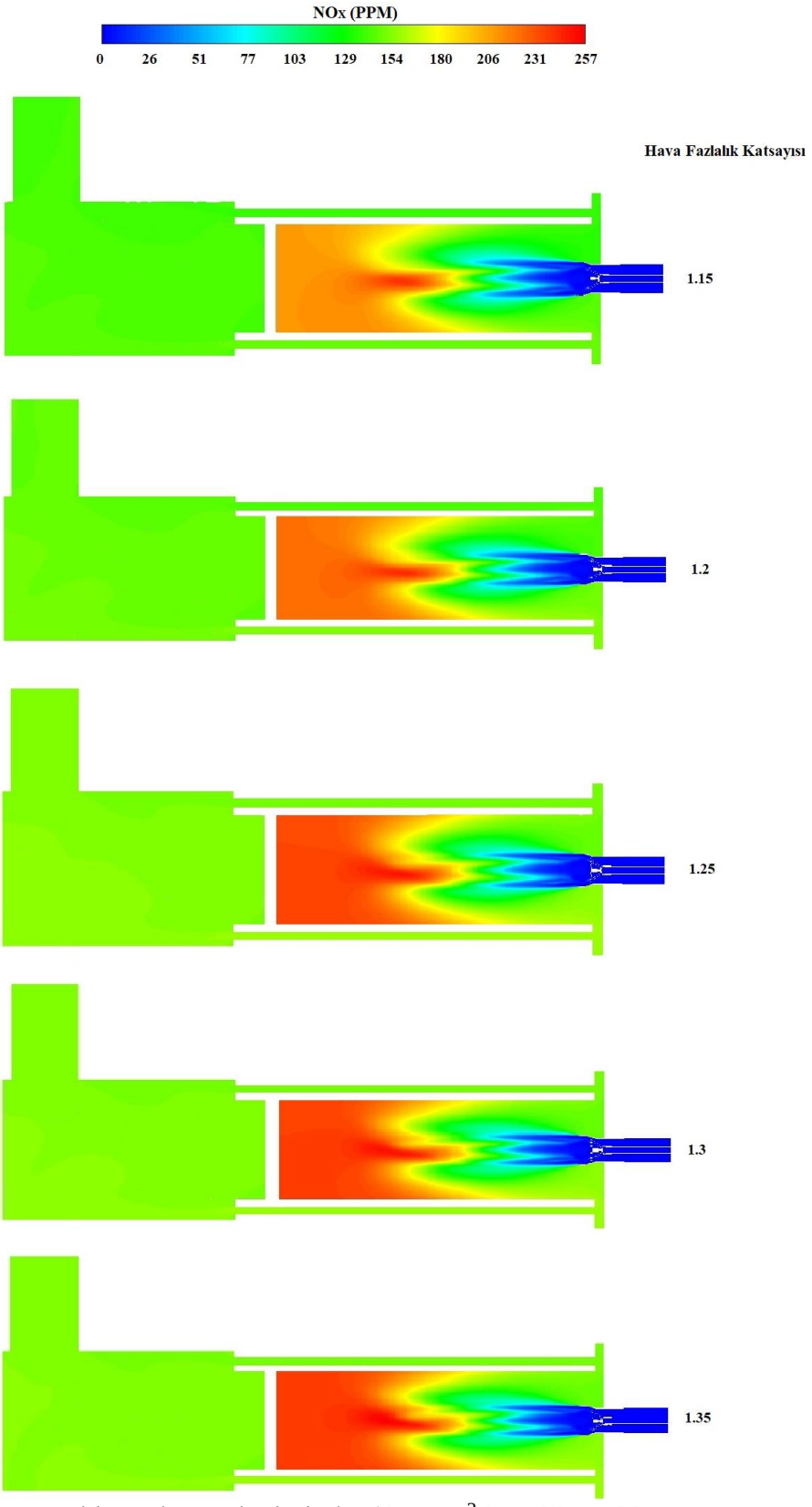
Şekil 7.25 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen CO_2 Dağılımları (yz Düzlemi)



Şekil 7.26 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen O_2 Dağılımları (yz Düzlemi)



Şekil 7.27 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen CO Dağılımları (yz Düzlemi)

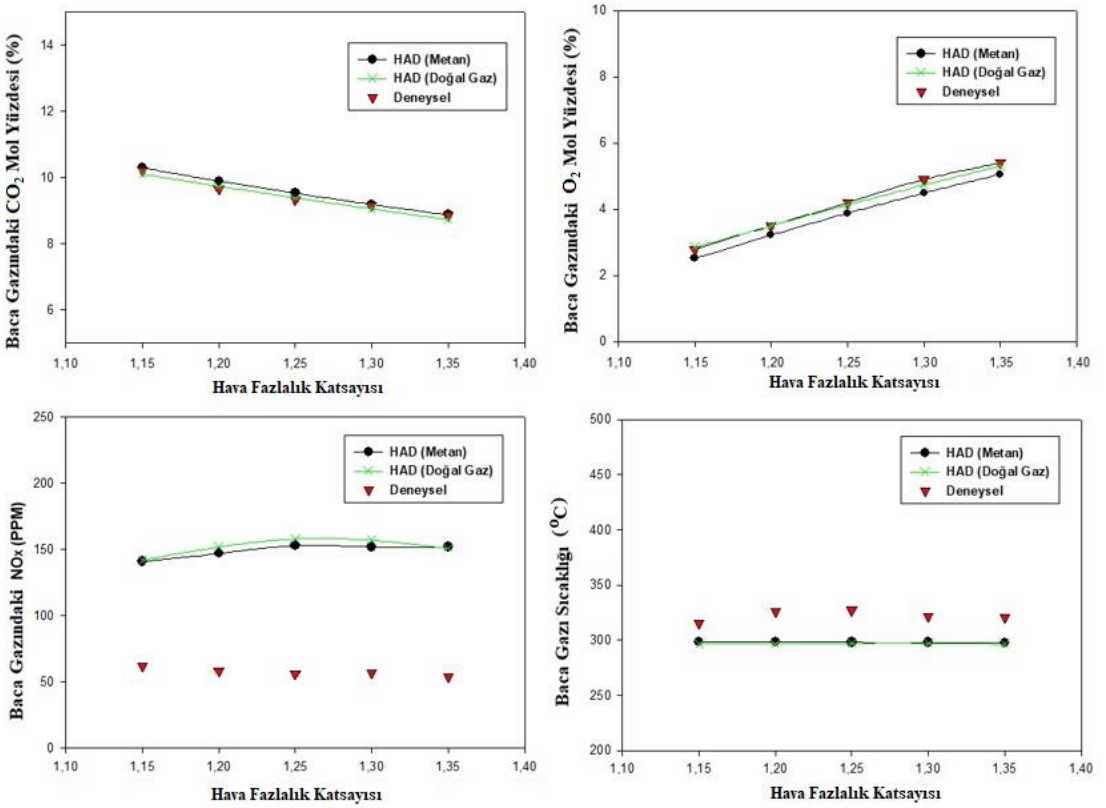


Şekil 7.28 Sabit Yakıt Tüketiminde (45 Nm^3/h) Elde Edilen NOx Dağılımları (yz Düzlemi)

Elde edilen sonuçlara göre hava fazlalık katsayısı değerindeki artış ile birlikte alev kalınlığında bir miktar azalma olmuştur. Diğer yandan alev sıcaklık değerleri ön karışımsız yanma modelinden daha yukarıda hesaplanmıştır. Bunun sebebi metan yakıtının sadece iki ileri reaksiyon ile tüketilmesinden ve ara radikallerin hesaba alınmamasındandır. Artan hava fazlalık katsayısı değeri ile birlikte beklenildiği üzere kazan çıkışında CO_2 emisyon değerleri mol yüzdesi olarak azalırken, O_2 emisyonları kazan çıkışında yükselmiştir. CO emisyonlarının oluşumu ve tüketilmesi birer reaksiyon üzerinden hesaplandığı için tüm durumlar için benzer sonuçlar verirken, önceki çalışmalarda kullanılan ön karışımsız yanma modeline göre yanma odası içerisinde daha düşük değerlerde hesaplanmıştır. NO_X emisyonlarının hesaplanması için gerekli O radikalleri kimyasal denge yöntemi ile hesaplanmıştır. Artan hava fazlalık katsayısı değeri ile birlikte yanma odası içerisindeki ve baca gazındaki NO_X emisyonlarında hafif bir artış olmuştur. Bunun sebebinin kimyasal denge yöntemi ile hesaplanan O radikal yoğunluğunun artan hava fazlalık katsayısı ile yükselmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

7.8.3.1 Eddy Yayılım Yanma Modelinin Kullanılması ile Gerçekleştirilen Çalışmadan Elde Edilen Sonuçların Deneysel Verilerle Kıyaslanması

Eddy yayılım modelinin kullanılması ile elde edilen sonuçların deneysel verilerle kıyaslanması Şekil 7.29'da verilmiştir. Şekil 7.29'da verilen CO_2 mol yüzdesi değerleri hem deneysel hem de nümerik sonuçlar için %0 H_20 ve %0 O_2 bazında verilmiştir.



Şekil 7.29 Sabit Yakıt Tüketimi İçin (45 Nm^3/h) Baca Gazı Emisyon ve Sıcaklık Sonuçlarının Karşılaştırılması

Şekil 7.29'da verilen grafik görüntülerinden anlaşılacağı üzere HAD analizlerinde CO_2 ve O_2 emisyonu değerleri deneysel verilerle tutarlı bir şekilde hesaplanabilmiştir. Diğer yandan alev sıcaklık değerleri hesaba alınan iki adet ileri reaksiyon sonucunda yüksek hesaplandığı için NO_X emisyonları deneysel verilerden yüksek çıkmıştır. Ön karışımsız yanma modelinin aksine, eddy yayılım modelinin kullanılması ile gerçekleştirilen analizler baca gazı sıcaklıklarını deneysel sonuçlara oldukça yakın hesaplamaktadır. Bu durumun sebebi ön karışımsız yanma modeline göre daha yüksek hesaplanan alev sıcaklıkları sonucunda, yanma odası duvarlarına radyasyon mekanizması ile gerçekleşen ısı transferi miktarının daha yüksek hesaplanmasıdır. Böylelikle duman boruları içerisindeki çelik levhaların modellenememesi sonucu ön karışımsız yanma modelinde yüksek değerlerde hesaplanan baca gazı sıcaklığı değerleri, bu model sayesinde deneysel verilerle daha uyumlu hale gelmiştir. Ancak bu durumun sonucu olarak da NO_X emisyonları daha yüksek hesaplanmıştır. Baca gazındaki CO emisyon değerleri ise tüm analizlerde 0 PPM olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla Şekil 7.29'da CO emisyonu ile ilgili bir sonuç yer almamıştır. Sonuç olarak CO emisyonlarını baca gazı

içerisinde doğru hesaplayabilmek için daha detaylı bir yanma modelinin kullanılması gerektiği açıktır. Ayrıca Şekil 7.29'dan görüleceği üzere, saf metan ve deneysel çalışmalarda kullanılan doğal gazın yakıt olarak kullanılması ile elde edilen sonuçlar birbirlerine çok yakın olmuştur. Bu durum doğal gazın yanma analizlerinde saf metan olarak ele alınmasının önemli derecede bir hataya sebep olmadığının göstergesi olmaktadır.

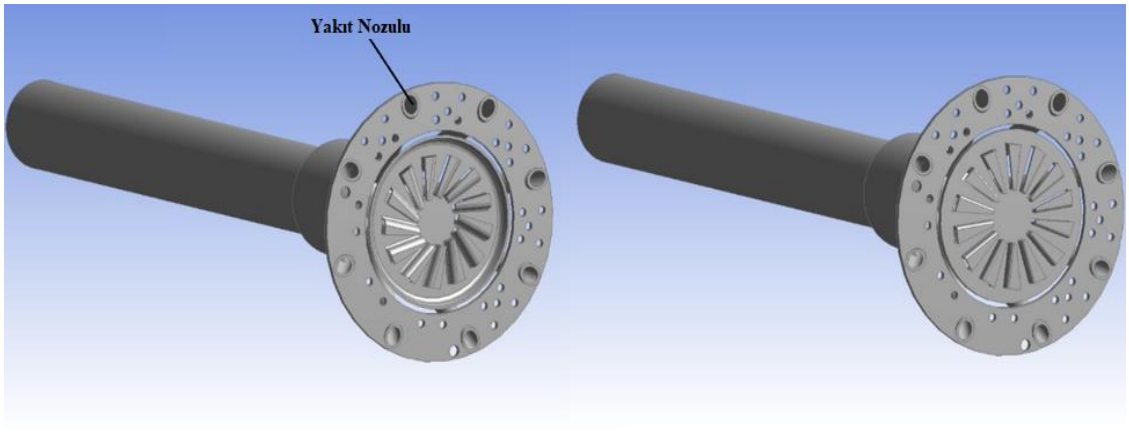
BÖLÜM 8

BRÜLÖR BAŞLIK YAPISININ ALEV YAPISI VE EMİSYONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Tez çalışmasının bu bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan ECO30.0 gaz brülörünün başlık yapısının yanma parametreleri üzerine olan etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Bu bağlamda brülör hava türbülatörü kanat sayısı ve açı değerinin alev yapısı ve sıcaklığı ile emisyon değerleri üzerindeki etkileri çıkarılmıştır. Bu çalışma için HAD analizlerinde ön karışımsız yanma modeli kullanılmıştır. Yakıt olarak saf metan alınmıştır. Kullanılan çözüm metotları, sınır şartları ve parametreler ise bölüm 7.7'de verildiği şekilde alınmıştır. Radyasyon denklemi için absorpsiyon katsayısı 0.275 m^{-1} olarak sabit alınmıştır. Bu bölümdeki tüm analizlerde yakıt tüketimi 45 Nm^3/h ve hava fazlalık katsayısı değeri de 1.2 olarak alınmıştır.

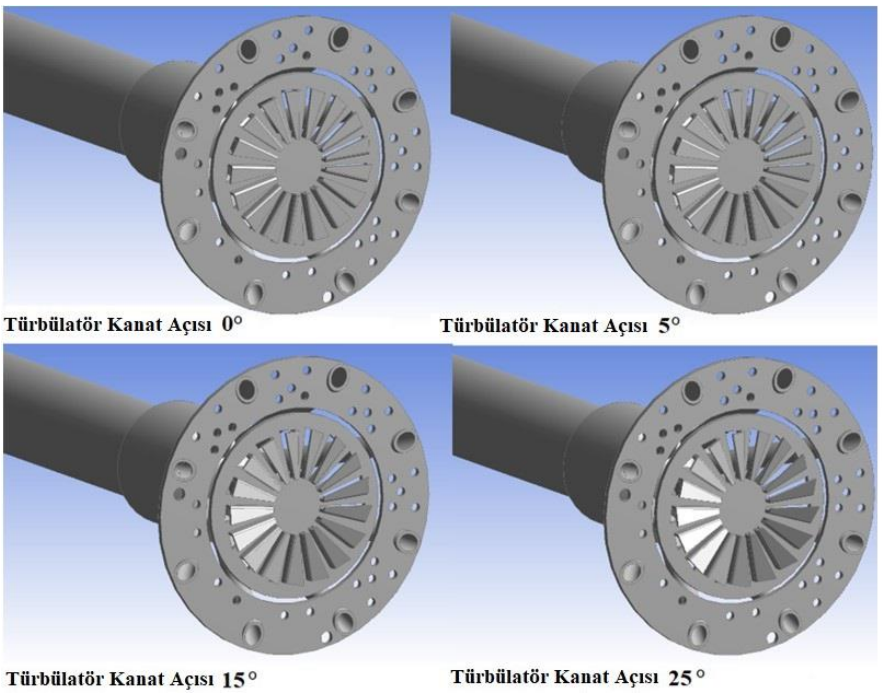
8.1 Brülör Başlık Yapısında Gerçekleştirilen Modifikasyonlar ve Elde Edilen Sonuçlar

Brülör hava türbülatörü kanat sayısının ve açısının değişikliğe uğratılabilmesi için, brülör başlık yapısında bazı modifikasyonlar yapılmıştır. Şekil 8.1'de mevcut orijinal brülör başlık yapısı (13 türbülatör kanatlı ve 0° kanat açılı) ile modifiye edilmiş brülör başlık yapılarından bir tanesi (14 türbülatör kanatlı ve 0° kanat açılı) verilmiştir.

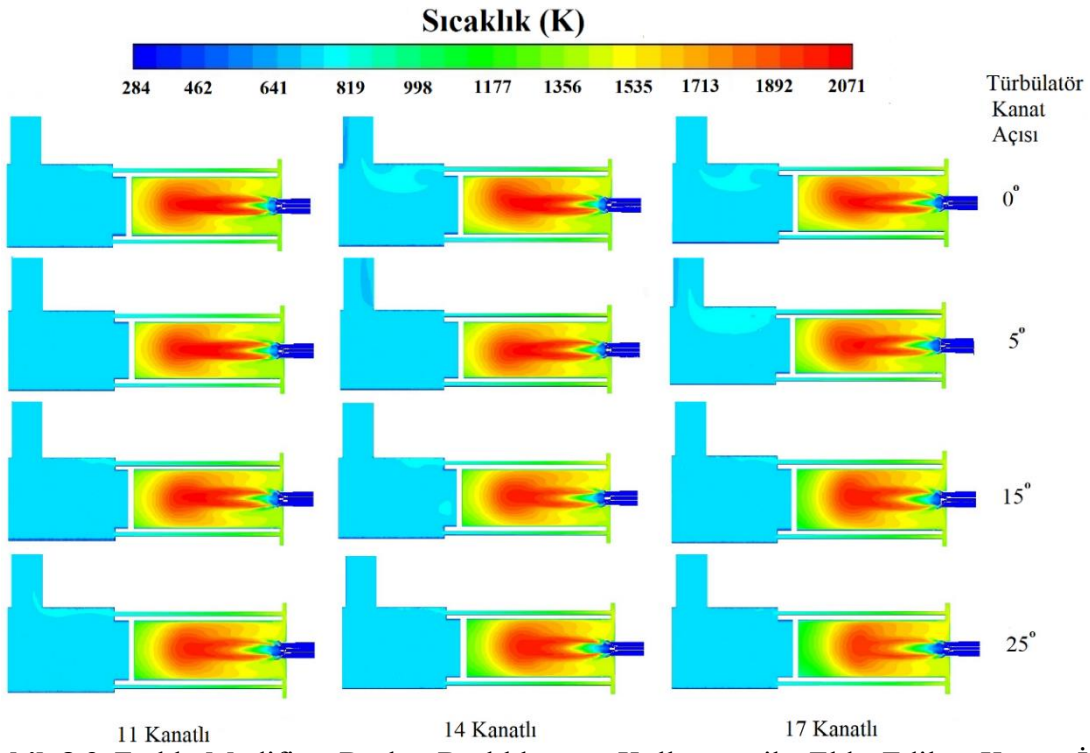


Şekil 8.1 Orijinal Brülör Başlığı (Solda) ve Modifiye Edilmiş Brülör Başlığı (Sağda)

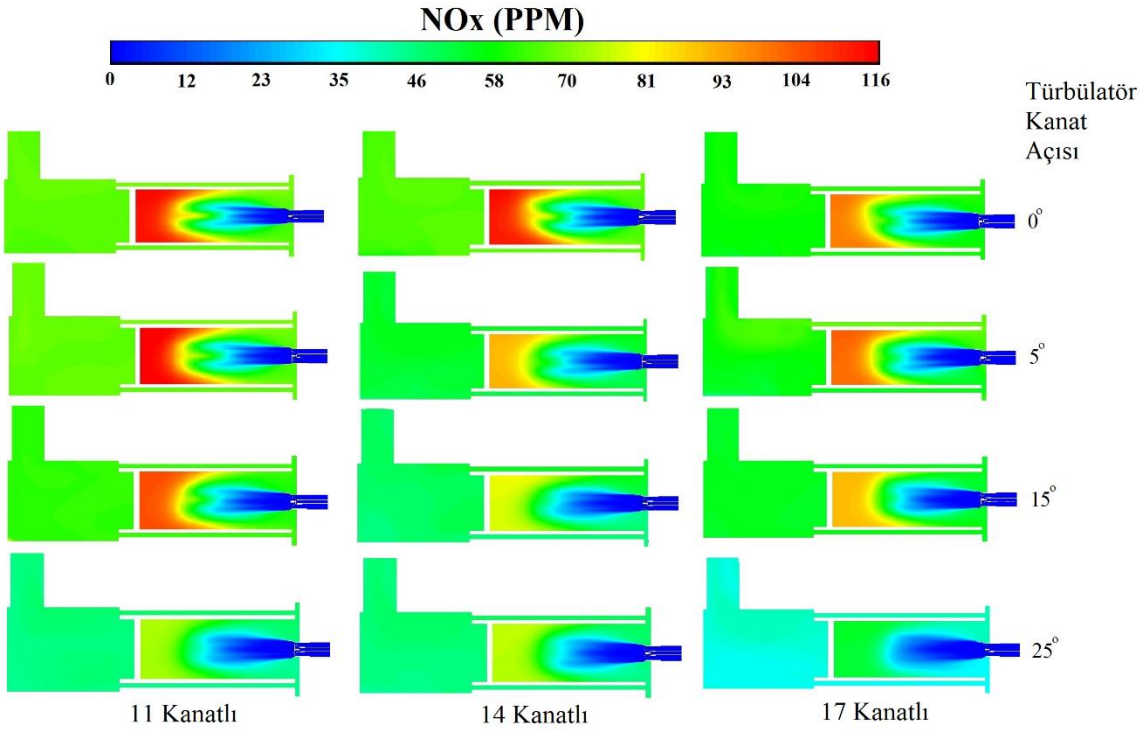
HAD analizleriyle sırası ile 11, 14 ve 17 hava türbülatör kanadına sahip modifiye brülör başlıklarının yanma parametreleri üzerine olan etkileri çıkarılmıştır. Her bir durum için türbülatör kanat açısı değerleri sırası ile 0°, 5°, 15° ve 25° olmuştur. Şekil 8.2'de 17 hava türbülatör kanadına sahip modifiye brülör başlığının farklı kanat açılarına göre görselleri verilmiştir. Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'de elde edilen sonuçlar sırası ile kazan içi sıcaklık ve NO_X emisyon dağılımı olarak verilmiştir.



Şekil 8.2 17 Adet Hava Türbülatör Kanadına Sahip Modifiye Brülör Başlığının Farklı Kanat Açılarına Göre Görselleri

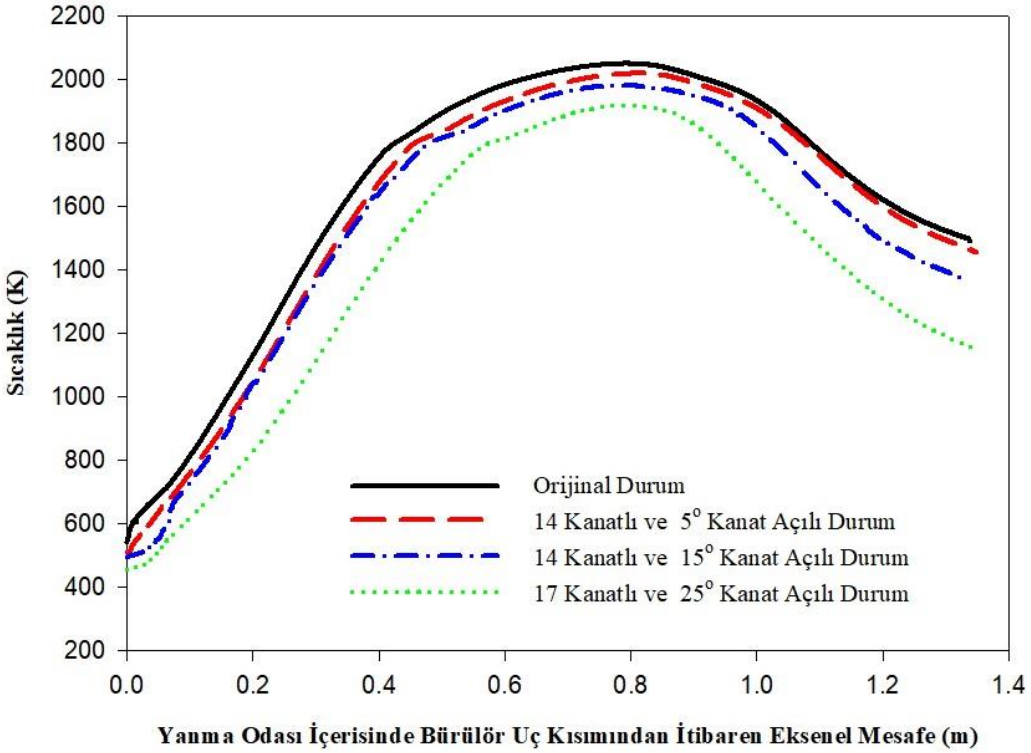


Şekil 8.3 Farklı Modifiye Brülör Başlıklarının Kullanımı ile Elde Edilen Kazan İçi Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)

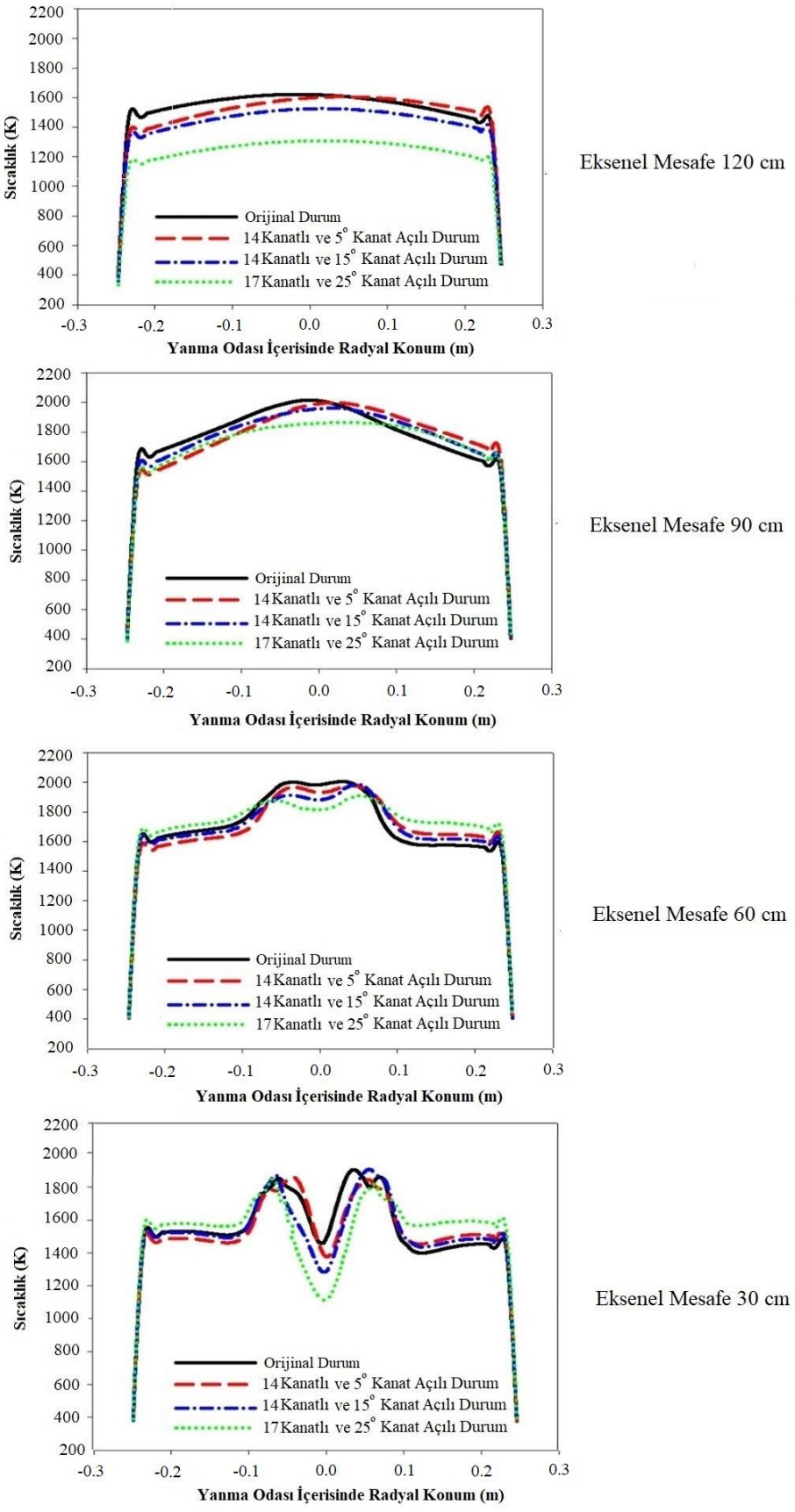


Şekil 8.4 Farklı Modifiye Brülör Başlıklarının Kullanımı ile Elde Edilen Kazan İçi NO_X Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)

Şekil 8.3 ve Şekil 8.4'de ki sonuçlara göre brülör hava türbülatör kanat sayısının ve açısının arttırılması alev sıcaklığını düşürürken, yanma odasındaki ve baca gazındaki NO_X emisyonlarını da azaltmıştır. 14 türbülatör kanatlı modifiye brülör başlığı, kanat açısının 5° ile 15° arasında olması durumunda, yanma odasındaki ve baca gazındaki NO_X emisyonlarının azaltılması bakımından en iyi performansı vermiştir. Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da yanma odasında elde edilen eksenel ve radyal sıcaklık değerleri, orijinal durum ve üç farklı modifiye brülör başlığı durumu için verilmiştir. Çalışmanın bu bölümündeki tüm şekillerde orijinal durum olarak atfedilen durum, yakıt tüketiminin 45 Nm^3/h ve hava fazlalık katsayısının da 1.2 olduğu şartlarda deneysel çalışmalarda kullanılan brülör başlığından elde edilen nümerik sonuçları temsil etmektedir.

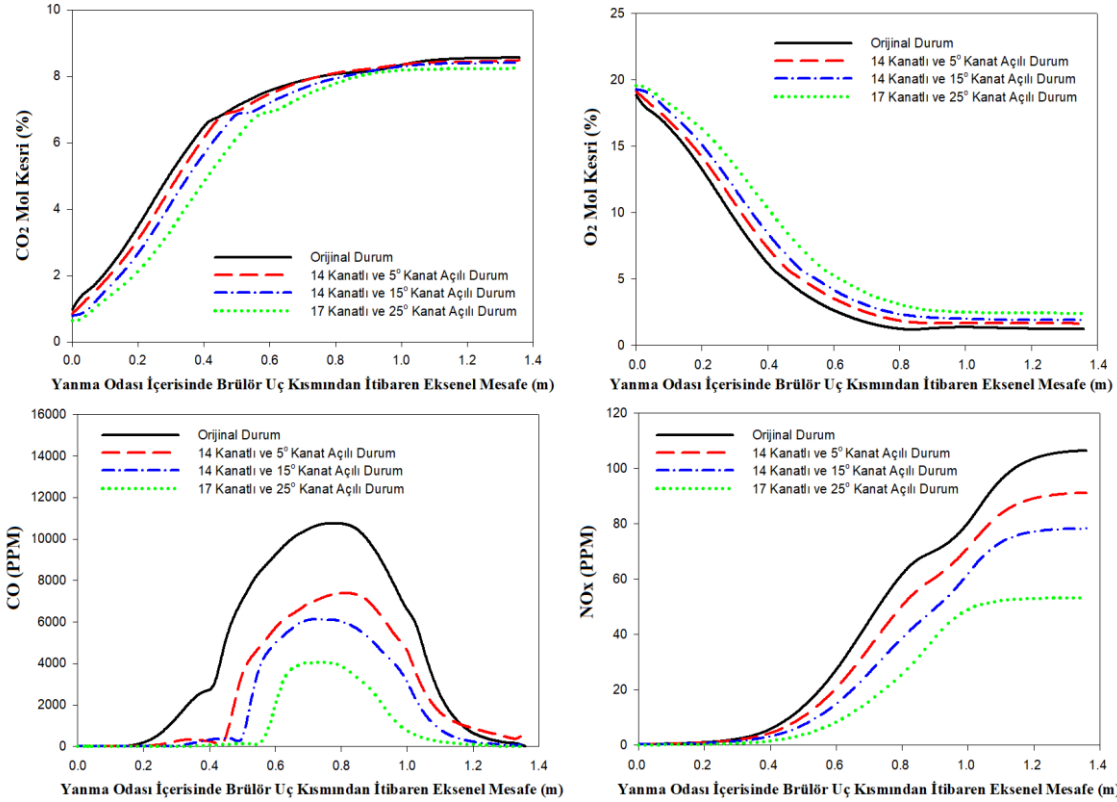


Şekil 8.5 Yanma Odası İçerisinde Eksenel Mesafeye Göre Sıcaklık Değişimleri



Şekil 8.6 Yanma Odası İçerisinde Radyal Konuma Göre Sıcaklık Değişimleri

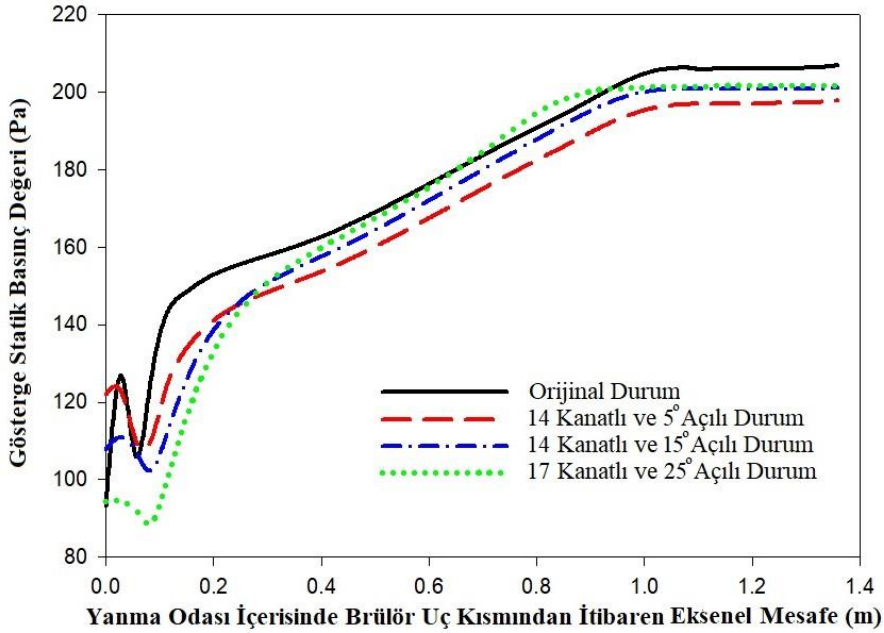
Şekil 8.5'den çıkarılacağı üzere hava türbülatör kanat sayısındaki ve açısındaki artış yanma odası içerisindeki eksenel sıcaklık değerlerini önemli derecede düşürmüştür. Bu durum Şekil 8.6'da gösterildiği gibi enerjinin korunumu gereği yanma odasındaki radyal konumlardaki sıcaklık değerlerinin yükselmesine sebep olmuştur. Bu sayede daha üniform alev yapıları elde edilebilmiştir. Alev yapısının bu şekilde daha üniform hale gelmesi, yanma odası içerisinde yakıt ile havanın ve de yanma ürünlerinin birbirleriyle daha iyi bir şekilde karışabilmesinden ve lokal olarak stokiometrik oranda da karışmalarının önlenmesinden kaynaklanmaktadır. Daha iyi karışım sonucunda yanma odasındaki alev boyu kısalırken, alev radyal olarak genişletilmiştir. Bu sayede daha düşük sıcaklıkta alev yapıları elde edilirken NO_X emisyonlarında da düşüş sağlanmıştır. Şekil 8.6'da gösterildiği gibi 17 türbülatör kanatlı ve 25° kanat açılı modifiye edilmiş başlıklı brülörün kullanılması sonucunda, yanma odasının arka kısmına kadar sıcaklık bakımından en üniform alev yapısı sağlanmıştır. Diğer yandan bu brülör başlık yapısı yanma odasının arka kısımlarında diğer durumlara göre en düşük radyal sıcaklık değerlerini vermektedir. Bunun sebebi de bu brülör başlık yapısı ile yanma odası içerisinde en kısa alev formunun elde edilmesi olmaktadır. Ek olarak orijinal durum için maksimum alev sıcaklığı 2056 K olurken, 17 kanatlı ve 25° kanat açılı modifiye başlıklı brülörün kullanılması ile maksimum alev sıcaklığı 1938 K olmuştur. Maksimum sıcaklık değerlerindeki bu fark da NO_X emisyonlarının oluşum hızını ve miktarını azaltıcı önemli parametrelerden biri olmuştur. Ek olarak belirtilmelidir ki, brülör başlığındaki türbülatör kanat sayısı 17'den ve türbülatör kanat açısı değeri de 25°'den büyük olduğu zaman, yanma odasındaki alev boyu kabul edilemeyecek derecede kısalmıştır. Ortaya çıkan bu durum, brülör başlık yapısına uygulanabilecek modifikasyonların bir limit değerinin olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.7 Yanma Odası İçerisinde Eksenel Mesafeye Göre Emisyonlardaki Değişim

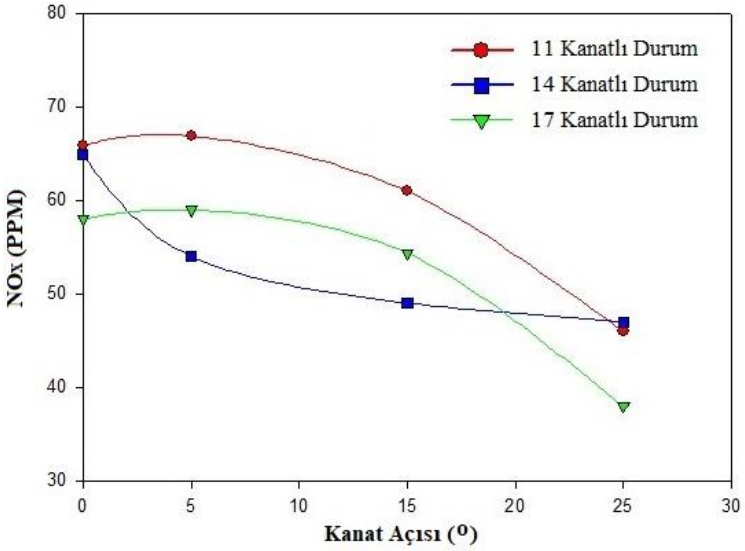
Şekil 8.7'de orijinal durum ve üç farklı modifiye brülör başlığı durumu için yanma odası içerisinde eksenel konumdaki emisyon değerlerinin değişimi verilmiştir. Hava türbülatör kanat sayısı ve açısı arttıkça eksenel konumdaki CO_2 emisyonları azalırken, O_2 emisyonları yükselmiştir. Bu durum alev bölgesinde yakıt ile havanın yanma ürünleri ile birlikte daha iyi bir karışım oluşturmasının bir sonucu olmaktadır. Ek olarak, artan hava türbülatör kanat sayısı ve açısıyla eksenel konumdaki CO emisyon değerleri de dikkate değer şekilde düşüş göstermiştir. Bu durum da esasen yanma odası içerisinde elde edilen daha üniform ve yaygın alev formunun bir kanıtı olmaktadır. Böylelikle, yanma odası içerisinde eksenel konumdaki NO_X emisyonu değerleri de azalan alev sıcaklığı ve elde edilen daha iyi karışım oranlarıyla azaltılmıştır. Şekil 8.8'de yanma odası içerisinde eksenel konuma göre değişen ve atmosferik basınca bağlı (101,325 Pa) olan gösterge statik basınç değerleri orijinal durum ve üç farklı modifiye brülör başlığı durumu için verilmiştir. Hava türbülatör kanat sayısı ve açısı arttıkça brülör uç kısmına yakın olan bölgedeki statik basınç değerlerinde düşüş gerçekleşmiştir. Bu da brülör uç kısmı ile yanma odası arka kısmındaki statik basınç farkını arttırmıştır. Bahsedilen bu statik basınç farkı yükseldikçe, yanma odası eksenel konumunda bulunan ve reaksiyona girmemiş

durumda olan metan yakıtı yoğunluğunun azalması ve radyal yönde yayılım göstermesi beklenir. Bu sayede sonuçlardan da görüleceği üzere, artan hava türbülatör kanat sayısı ve açısıyla yanma odasında daha kısa ve yaygın alev yapıları oluşturulmuştur. Sonuç olarak, yanma odası boyunca oluşan statik basınç farkı alev yapısını etkileyen önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır.



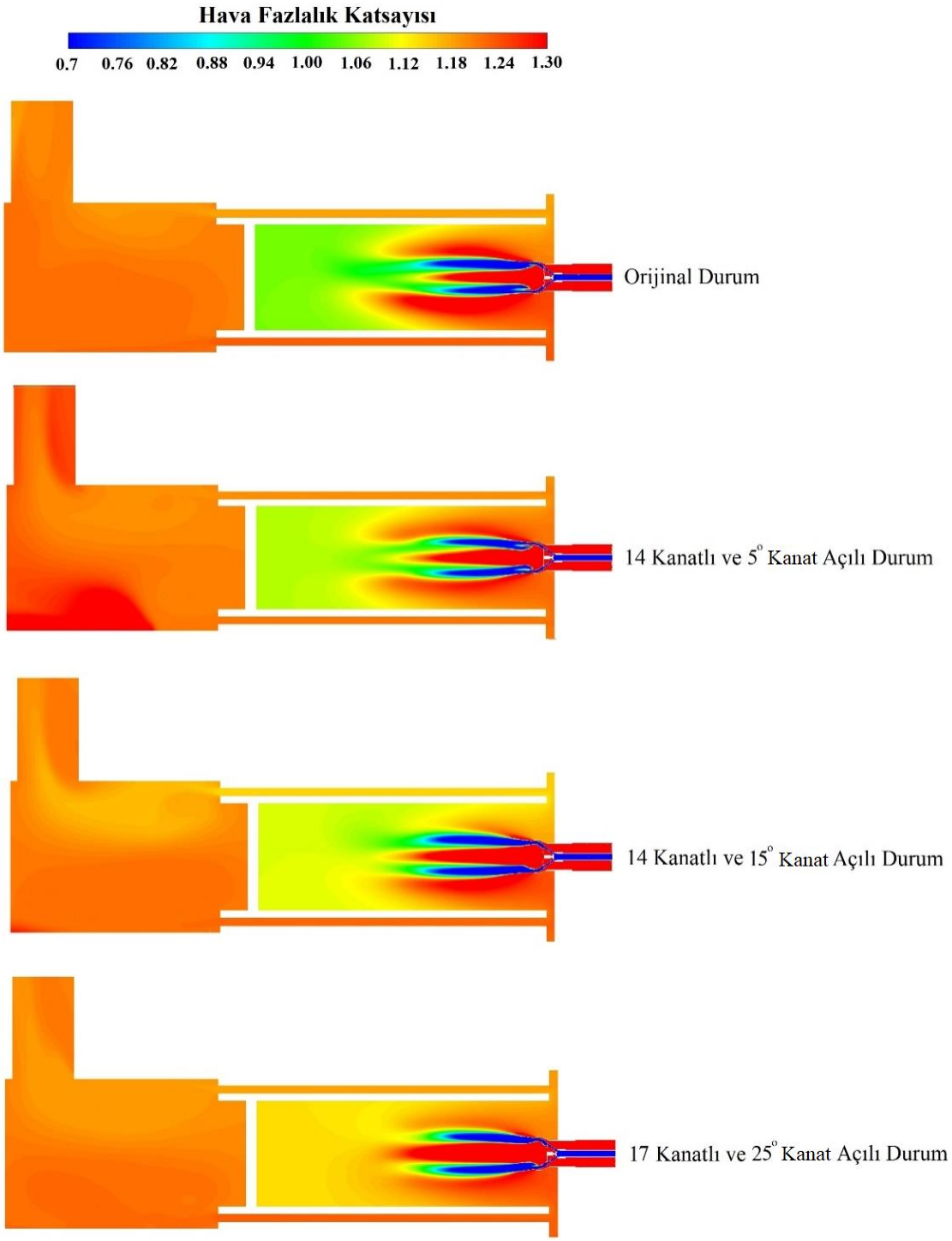
Şekil 8.8 Yanma Odası İçerisinde Eksenel Mesafeye Göre Gösterge Statik Basınç Değişimi

Baca gazındaki NO_X emisyonları 12 farklı durum için Şekil 8.9'da grafiksel olarak verilmiştir. 17 kanatlı ve 25° kanat açısına sahip modifiye başlıklı brülör, baca gazında en düşük miktarda NO_X emisyonu vermektedir. Bu emisyon değeri 38 PPM olup, orijinal duruma göre %38'lik bir azalmaya karşılık gelmektedir. Bununla birlikte brülör hava türbülatör kanat açısının 5° ile 15° arasında olması durumunda, 14 kanatlı hava türbülatörü NO_X emisyonlarının indirgenmesi bakımından en iyi seçeneği sunmaktadır.



Şekil 8.9 Farklı Modifiye Başlıklı Brülörler ile Elde Edilen Baca Gazı NO_X Emisyonu Değerleri

Ek olarak, brülör başlığı üzerindeki modifikasyonlar baca gazındaki CO_2, O_2 ve CO emisyonları ve baca gazı sıcaklığı üzerinde herhangi bir değişikliğe sebep olmamaktadır. Bu da brülör başlık yapısındaki değişikliklerin alev yapısında ve NO_X emisyonlarında değişikliğe yol açarken, yanma ve kazan veriminde herhangi bir değişikliğe sebep olmadığının bir göstergesidir. Şekil 8.10'da ise hava fazlalık katsayısının yanma ortamındaki dağılımı orijinal durum ve üç farklı modifiye başlıklı brülör durumu için verilmektedir. Ayrıca belirtilmelidir ki Şekil 8.10'daki ölçek 0.7 ile 1.3 arasında kısıtlanmıştır. Görüleceği üzere modifiye edilmiş brülör başlığındaki hava türbülatör kanat sayısı ve açısı arttıkça, yanma odasındaki karışım oranı stokiometrik orandan uzaklaşarak iyileşmektedir. Orijinal durum için ise alev bölgesi ve yanma odası arka bölümü stokiometrik karışımdan meydana gelmektedir. 17 kanatlı ve 25° kanat açılı durumda ise stokiometrik orandaki karışım en aza indirgenmiş durumdadır ve bu karışımın meydana geldiği bölge alev bölgesinin oldukça küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Bu durum kanıtlamaktadır ki hava türbülatör kanat sayısı ve açısındaki artış yanma odası içerisindeki hava-metan ile yanma ürünlerinin karışım oranını iyileştirmektedir ve alev sıcaklık değerlerini düşürmektedir. Bu sayede özellikle termal NO emisyonlarının oluşumunda önemli derecede indirgenme sağlanmaktadır. Bunda daha önce bahsedildiği üzere, brülör başlığı yapısındaki değişim ile yanma odası boyunca elde edilen statik basınç farklılığındaki değişimin de etkisi bulunmaktadır.



Şekil 8.10 Yanma Ortamında Hava Fazlalık Katsayısının Dağılımı (yz plane)

BÖLÜM 9

EDDY YAYILIM YANMA MODELİ İLE METANA HİDROJEN EKLENTİSİNİN YANMA PARAMETRELERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Çalışmanın bu bölümünde saf metan yakıtına hidrojen katkısının yanma parametreleri üzerine olan etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Bu inceleme için brülör başlık yapısında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Metan – hidrojen karışımında hidrojen yakıtının oranı kütlece sırasıyla %25, %50 ve %75 olmuştur. Çalışılan tüm durumlar için ısıl kapasite değeri 432 kW olarak sabit tutulmuştur ve hava fazlalık katsayısı da tüm durumlar için 1.2 olarak alınmıştır. HAD analizlerinde yanma modeli olarak eddy yayılım modeli kullanılmıştır. Radyasyon denkleminde absorpsiyon katsayısının belirlenmesi için "wsggm-domain based" modeli kullanılmıştır. NO_X hesabı için sadece termal NO emisyonları hesaba alınmıştır. Kullanılan çözüm metotları, sınır şartları ve parametreler ise bölüm 7.7'de verildiği şekilde olmuştur. Çizelge 9.1'de analizlerde kullanılan yakıt içerikleri ve toplam yakıt ile hava debisi değerleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Çizelge 9.1 HAD Analizlerinde Kullanılan Metan-Hidrojen Karışım Oranları ile Debi Değerleri

Hidrojen Katkısı (% Kütle)	Hidrojen Mol Oranı (%)	Giren Yakıt Kütlesi (kg/s)	Giren Hava Kütlesi (kg/s)
0	0	0.008625	0.1776
25	72	0.0064	0.164736
50	89	0.005082	0.156968
75	96	0.0042144	0.15187

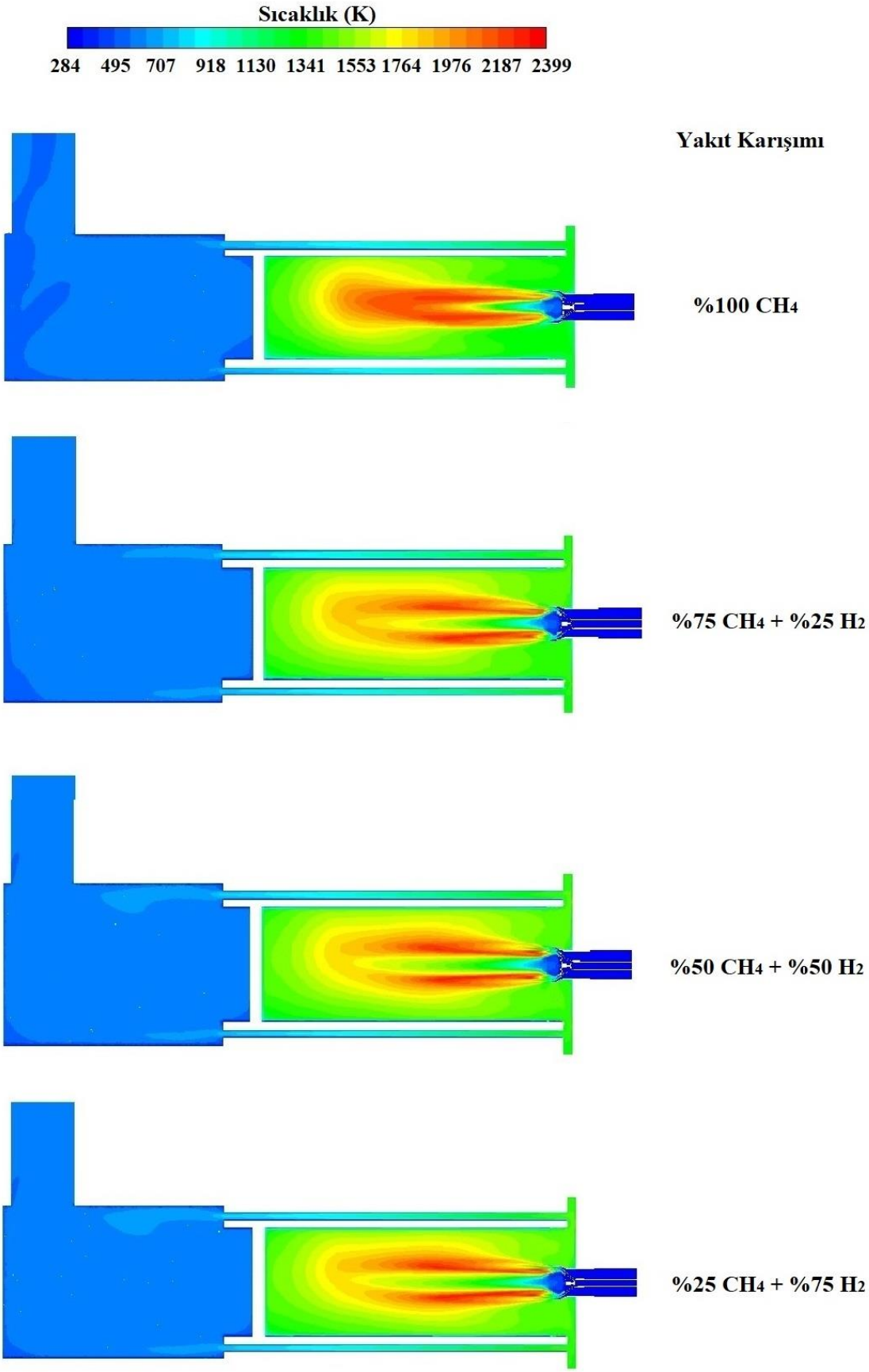
HAD analizlerinde yanma modeli olarak eddy yayılım modeli kullanıldığı için metan yakıtının iki ana reaksiyon üzerinden, hidrojen yakıtının ise bir ana reaksiyon üzerinden oksijenle tepkimeye girdiği kabul edilmiştir. Bu reaksiyonlar Eş.(9.1) ile Eş.(9.3) arasında verilmiştir.

$$CH_4 + \mathbf{1.5}O_2 \longrightarrow CO + \mathbf{2}H_2O \quad (9.1)$$

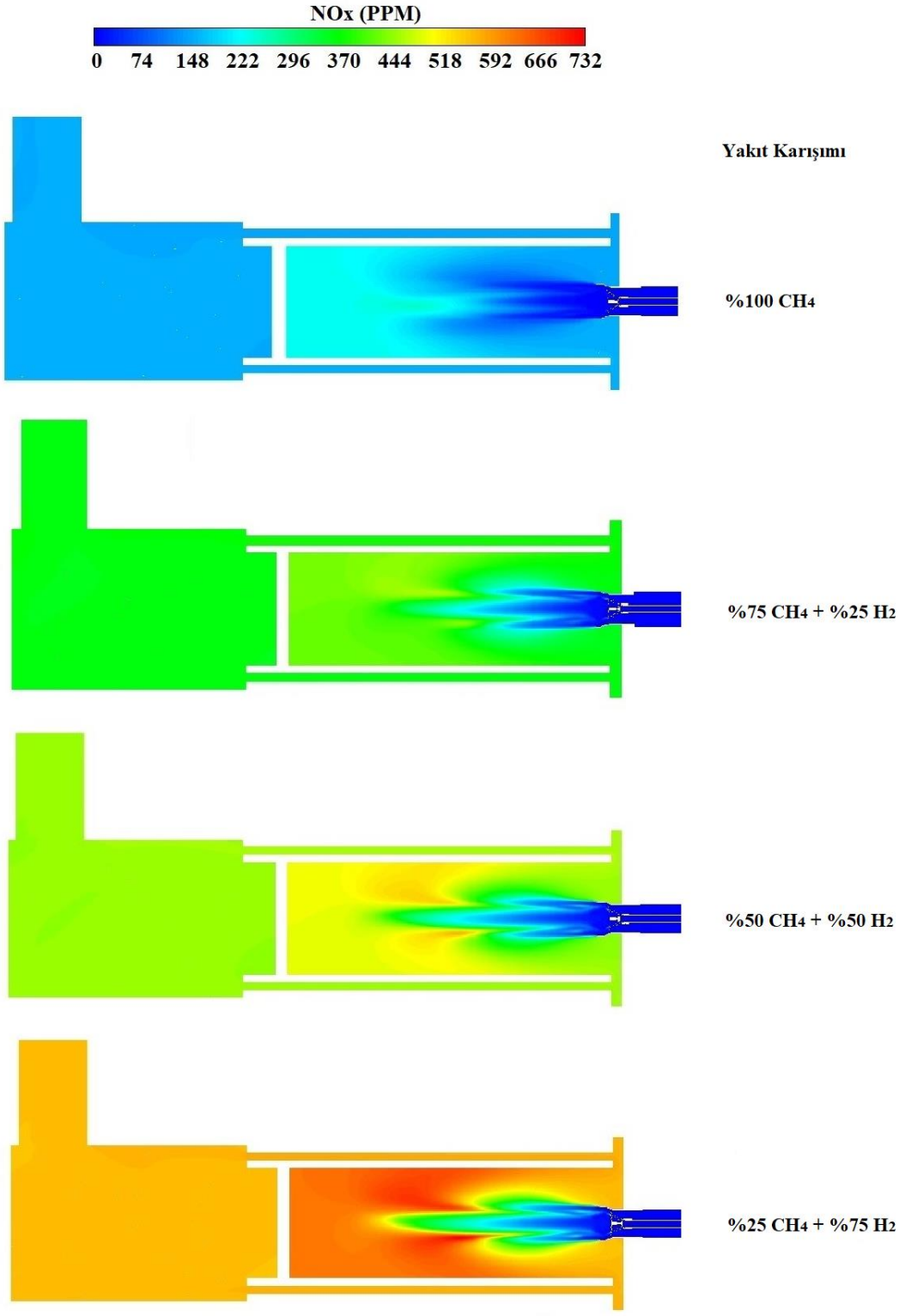
$$CO + \mathbf{0.5}\ O_2 \longrightarrow CO_2 \quad (9.2)$$

$$H_2 + \mathbf{0.5}\ O_2 \longrightarrow H_2O \quad (9.3)$$

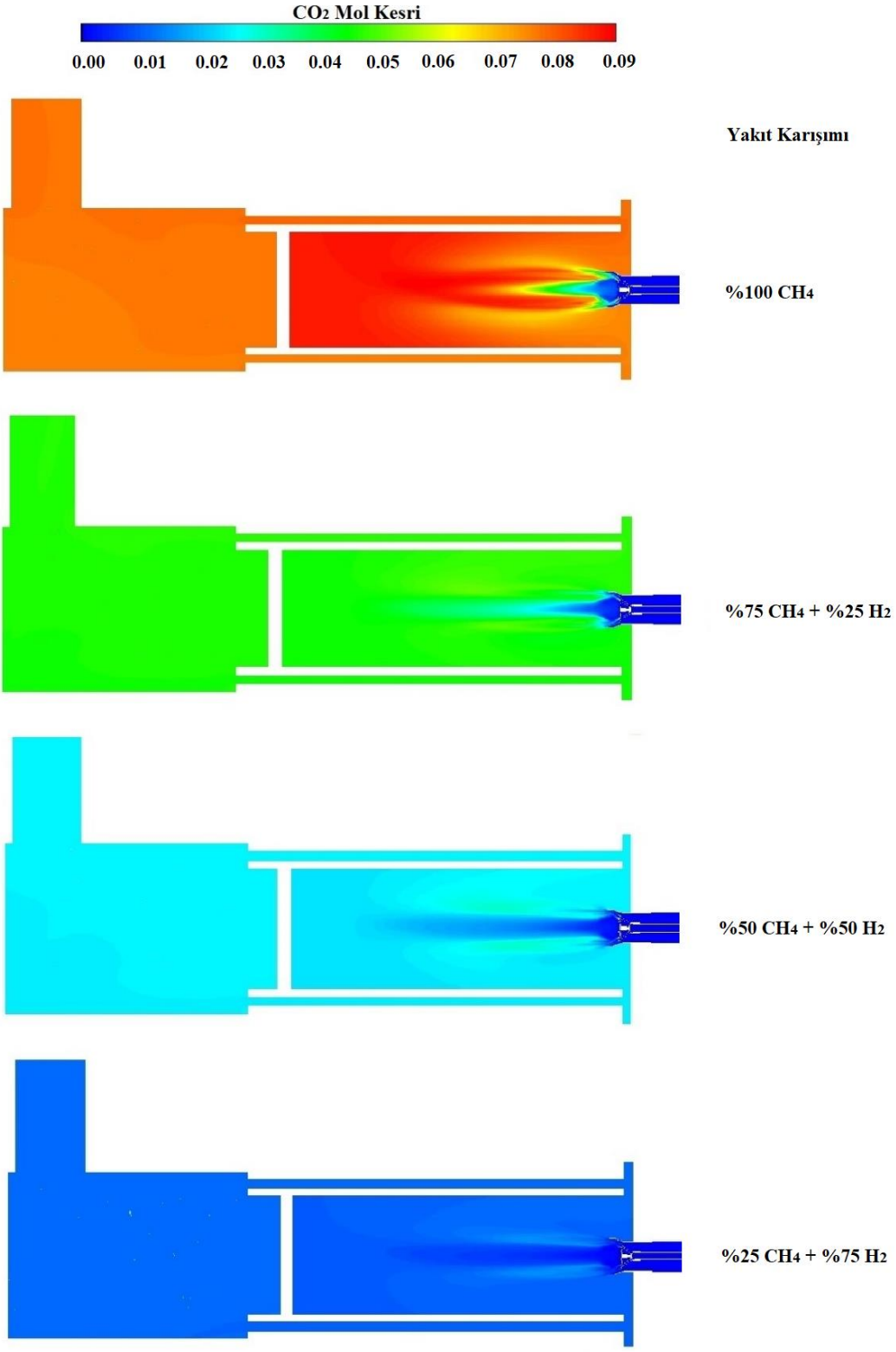
HAD analizlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 9.1 ile Şekil 9.5 arasında kazan içi sıcaklık ve emisyon dağılımları olarak verilmiştir.



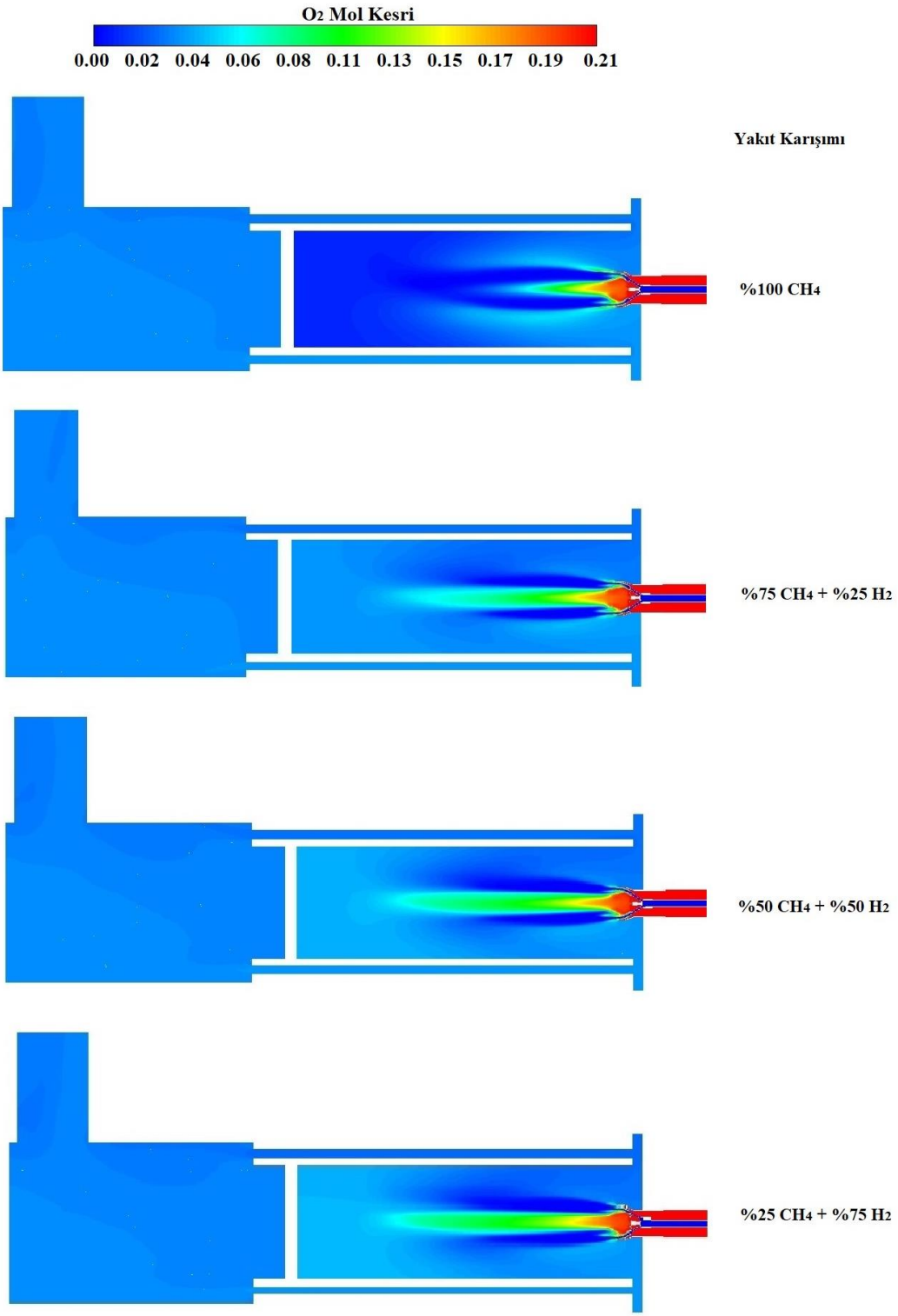
Şekil 9.1 Elde Edilen Sıcaklık Dağılımları (yz Düzlemi)



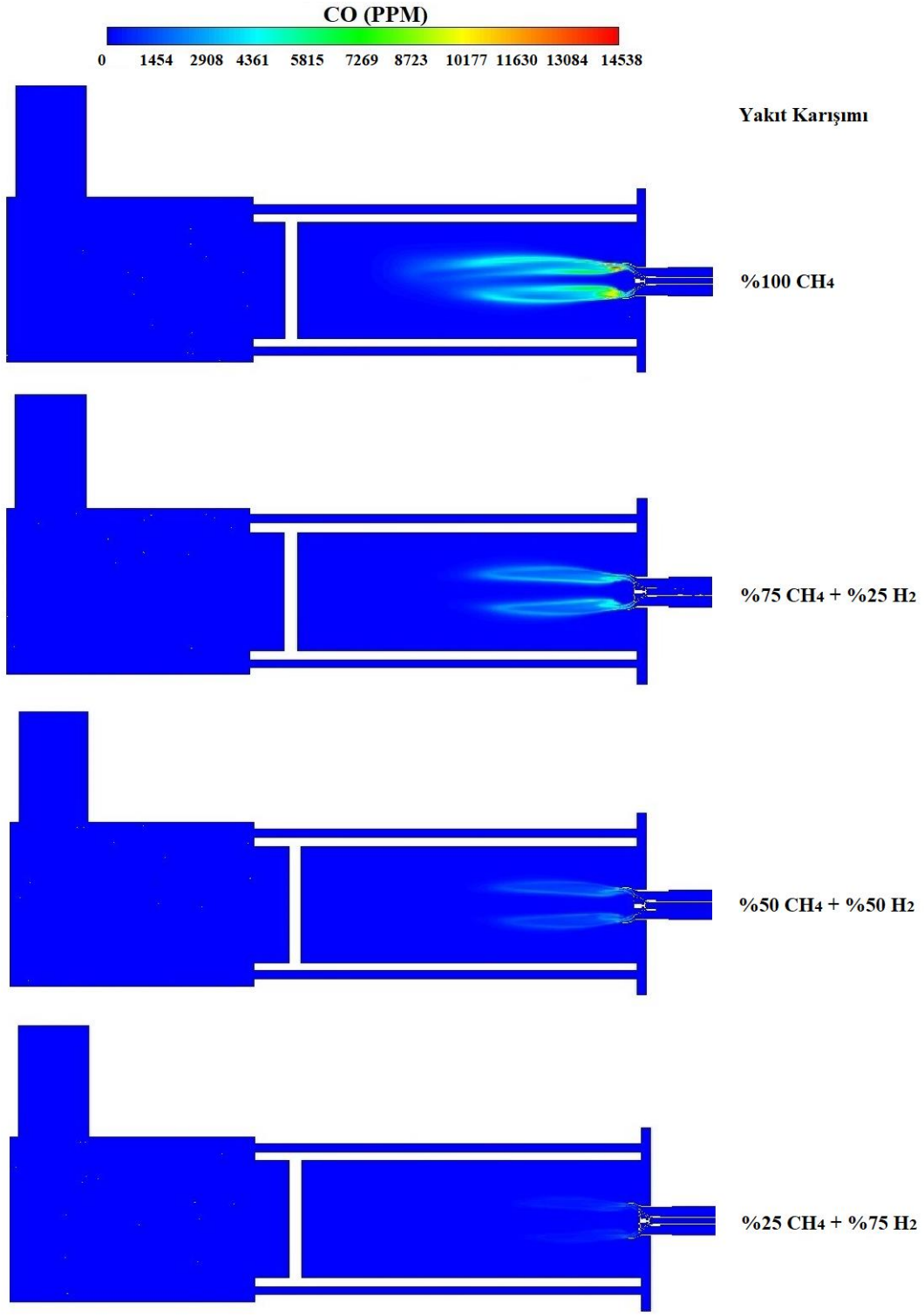
Şekil 9.2 Elde Edilen NO_X Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)



Şekil 9.3 Elde Edilen CO_2 Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)



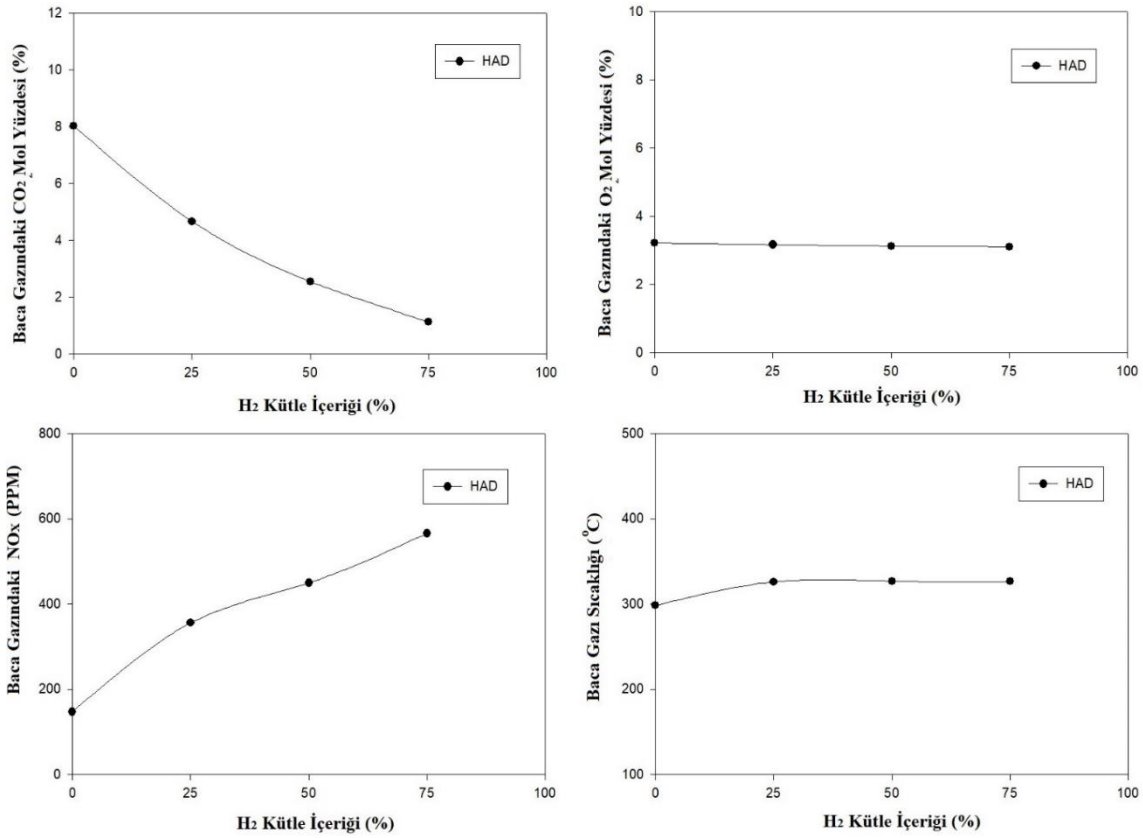
Şekil 9.4 Elde Edilen O_2 Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)



Şekil 9.5 Elde Edilen CO Emisyonu Dağılımları (yz Düzlemi)

Şekil 9.1'de ki kazan içi sıcaklık dağılımı sonuçlarına göre, metan yakıtına hidrojen ilavesi alev yapısında değişikliğe yol açmaktadır. Hidrojen ilavesiyle birlikte alev sıcaklık

değerleri kazan merkez ekseninde düşerken, merkezden uzaklaştıkça yükseliş göstermektedir. Bu durumun, hidrojenin metana göre daha az yoğunlukta olmasından ve alt ısıl değerinin de yüksek olmasından dolayı, gaz akış hız değerlerindeki artıştan kaynaklandığı düşünülmektedir. Hidrojenin alt ısıl değerinin metandan oldukça yüksek olmasından dolayı, yanma ürünleri sıcaklık değerlerindeki artışın da bu alev yapısının ortaya çıkmasında etkisi olmaktadır. Sonuç olarak, bahsedilen sebeplerden ötürü hidrojen katkılı yanma alevleri kazan merkezinde yoğunlaşamamaktadır. Maksimum alev sıcaklık değeri kütlece %75'lik hidrojen katkısı durumunda 2399 K olarak elde edilmiştir. Bu değer, aynı yanma modelinin kullanılması ile elde edilen saf metana ait maksimum alev sıcaklığı değerinden (2190 K) oldukça yüksektir. Bu durum ise NO_X emisyonlarının artması yönünde itici bir güç oluşturmaktadır. Şekil 9.2'den görüleceği üzere NO_X emisyonu değerlerinde hidrojen katkısı ile birlikte önemli derecede artış meydana gelmektedir. NO_X emisyonlarındaki bu artış, yükselen alev sıcaklık değerleri ile birlikte oluşum hızında artış gösteren termal NO emisyonlarından kaynaklanmaktadır. Şekil 9.3'de ise artan hidrojen ilavesi ile birlikte beklenildiği gibi CO_2 emisyon dağılımlarında düşüş elde edilmiştir. Ancak hava fazlalık katsayısının 1.2 olarak sabit tutulmasından dolayı, Şekil 9.4'de verildiği üzere, kazan içi O_2 dağılımı hidrojen katkılı tüm durumlar için çok benzer olmuştur. Alev yapısındaki farklılıklardan dolayı ise saf metan yanması durumunda kazan içi O_2 dağılımı farklılık göstermektedir. Yine beklenildiği üzere kazan içi CO emisyon dağılım değerleri artan hidrojen katkısı ile birlikte önemli derecede azalmaktadır. Bu durum Şekil 9.5'de görülmektedir. Analizlerden elde edilen baca gazı sıcaklık ve emisyon değerleri ise Şekil 9.6'da yer almıştır.



Şekil 9.6 HAD Analizlerinden Elde Edilen Baca Gazı Sıcaklık ve Emisyon Değerleri

HAD analiz sonuçlarına göre baca gazı sıcaklık değerleri hidrojen eklentisi ile birlikte önemli bir derecede artış göstermemiştir. Hava fazlalık katsayısı 1.2 olarak sabit tutulduğu için baca gazındaki O_2 mol yüzdesi de sabit kalmaktadır. Hidrojen yakıtı karbon atomu içermediği için baca gazındaki CO_2 mol yüzdesi düşmektedir. Baca gazındaki CO emisyonu tüm analiz sonuçlarında 0 PPM olarak çıkmaktadır. Bunun anlamı, kullanılan yanma modeline göre metan yakıtının eksiksiz olarak tüketildiğidir. Bu analizlerden çıkarılacak en önemli sonuç baca gazındaki NO_X emisyonlarının hidrojen eklentisiyle artmasıdır. Yani hidrojen yakıtı karbon emisyonlarını düşürmekle beraber, NO_X emisyonları bakımından kirletici bir yakıt olmaktadır. Bunda en önemli etken hidrojen katkısı ile birlikte artan alev sıcaklık değerleridir. Diğer yandan, kullanılan yanma modelinin alev sıcaklık değerlerini gerçek değerlerden daha yukarıda hesapladığı bilinmektedir. Bu da doğal olarak baca gazındaki NO_X emisyon değerlerinin olması gerekenden yukarıda hesaplanmasına sebep olmaktadır. Ancak kullanılan bu yanma modeli sayesinde hidrojen katkısı ile emisyonlarda oluşacak değişimler öngörülebilmektedir.

BÖLÜM 10

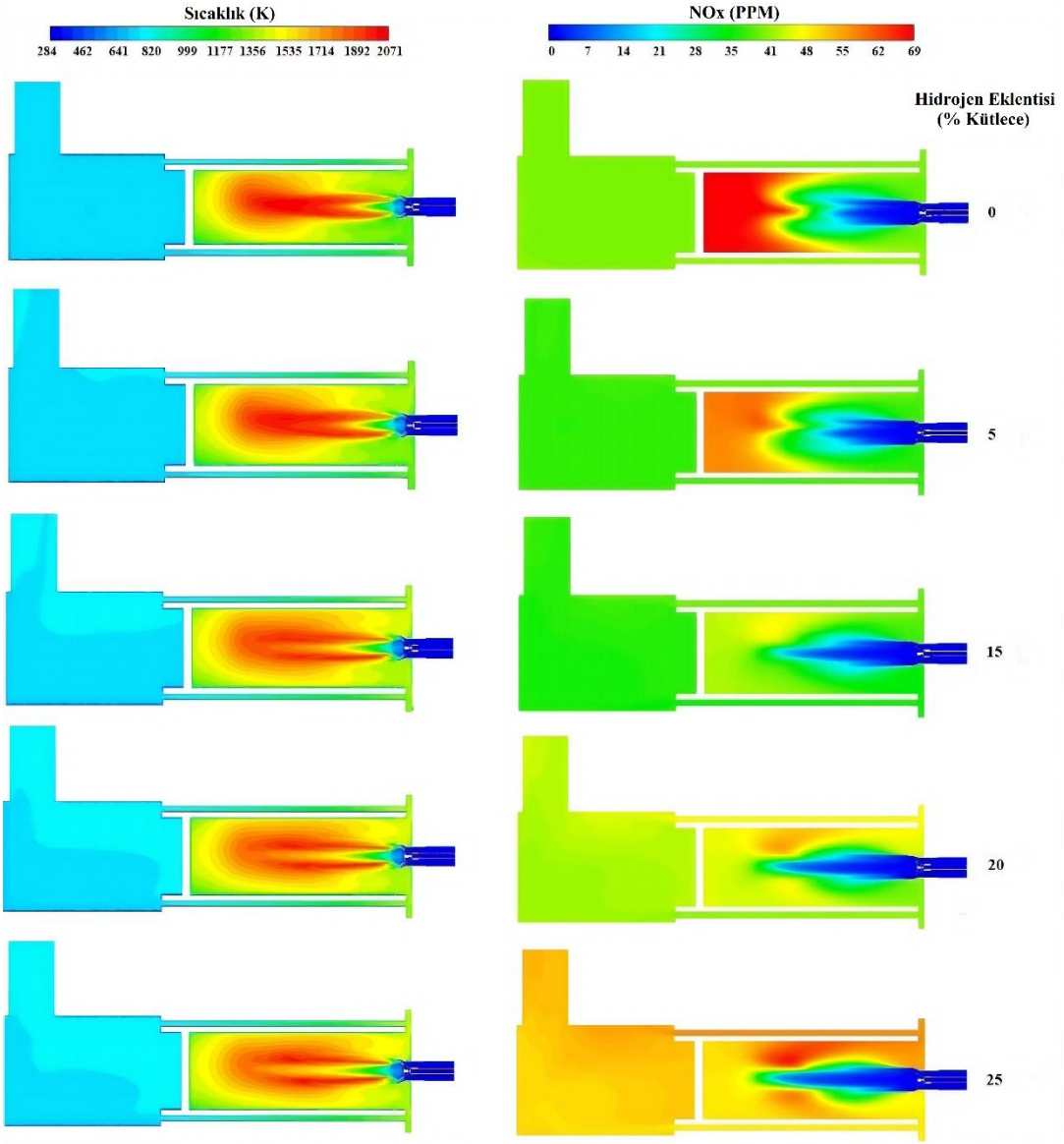
ÖN KARIŞIMSIZ YANMA MODELİ İLE METANA HİDROJEN EKLENTİSİNİN YANMA PARAMETRELERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Metan (CH_4) en hafif hidrokarbon molekülüdür. Metan oksidasyonu sırasında hidrojen atomu sürekli olarak ana molekülden kopartılarak yeni ara kimyasal türler oluşturulur. Bu işlemin sonucunda, ortaya çıkan CO oksitlenerek CO_2 oluşturulur. Diğer yandan metan ve ara ürünlerden kopartılan hidrojen atomları ise oksitlenerek H_2O oluşturulur (Law, 2006). Buradan çıkarılan sonuç, metanın oksitlenme mekanizması içerisinde CO ve H_2 moleküllerinin oksitlenme mekanizmalarının da yer aldığıdır. Bu yüzden, çeşitli hesaplamalarda ve analizlerde kullanılan metana ait detaylı veya iskelet oksitlenme mekanizmaları CO ve H_2 moleküllerine ait oksitlenme mekanizmalarını birer alt mekanizma olarak içermelidir. Çalışmanın bu bölümünde, ön karışımsız yanma modeli kullanılarak, metanın hidrojenle zenginleştirilmesinin yanma parametreleri üzerine olan etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan brülör başlığı deneysel çalışmalarda kullanılan orijinal brülör başlığı olmuştur. Radyasyon denkleminin çözümünde absorpsiyon katsayısı için "wsggm-domain based" yaklaşımı kullanılmıştır. Kullanılan çözüm metotları, sınır şartları ve parametreler ise bölüm 7.7'de verildiği şekilde alınmıştır. Yanma mekanizması olarak ise çalışmanın daha önceki bölümlerinde kullanılan ve 58 reaksiyon ile 17 kimyasal tür içeren metan-hava yanma mekanizması kullanılmıştır (Nishioka, Takeno, Nagakawa ve Ishikawa, 1993). Bu yanma mekanizması CO ve H_2 moleküllerine ait yanma mekanizmalarını da içermektedir. Nümerik analizlerde metan yakıtı hidrojenle kütlece sırasıyla %5, %15, %20 ve %25 oranlarında zenginleştirilmiştir. Tüm durumlar için hava fazlalık katsayısı 1.2 olarak sabit tutulmuştur. Elde edilen yakıt karışımları kazana 432 kW değerinde sabit ısıl kapasitenin

sağlanabileceği şekilde ayarlanmıştır. Bu enerji değeri saf metan için 45 Nm^3/h değerinde bir tüketime denk gelmektedir. Çizelge 10.1'de kullanılan yakıt karışım oranları, yakıt ve yanma havasına ait tüketim değerleriyle birlikte verilmiştir. Şekil 10.1'de ise elde edilen sonuçlar kazan içi sıcaklık ve NO_X emisyonu dağılımı olarak verilmiştir.

Çizelge 10.1 Nümerik Analizlerde Kullanılan Yakıt Karışımlarına Ait H_2 İçerikleri ve Debi Değerleri

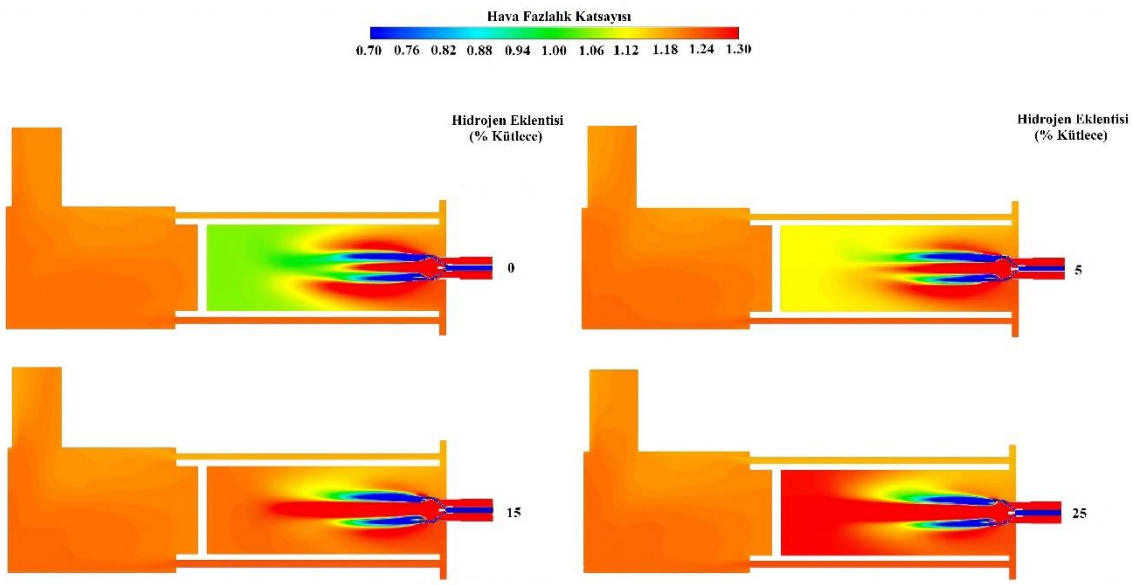
H_2 Kütle İçeriği (%)	**H_2 Mol İçeriği (%)**	**Yakıt Tüketim Hızı (kg/s)**	**Yanma Havası Tüketim Hızı (kg/s)**
0	0	0.008625	0.177600
5	29.5	0.008074	0.174587
15	58.5	0.007140	0.169093
20	66.6	0.006750	0.166794
25	72.6	0.006400	0.164736



Şekil 10.1 Hidrojen-Metan Karışımlarından Elde Edilen Sonuçlar (yz Düzlemi)

Şekil 10.1'de ki sonuçlardan görüleceği üzere metana hidrojen eklentisi difüzyon alev yapısını önemli bir biçimde değiştirmektedir. Hidrojen eklentisi alev yapısını genişletmektedir. Hidrojen eklentisi ile elde edilen bu alev yapıları literatürdeki diğer sonuçlarla uyum göstermektedir (Abubakar, Shakeel ve Mokheimer, 2018) (Rajpara, Shah ve Banerjee, 2018). Yer çekimi etkisi alevin kazanın üst duvarına biraz daha yakın şekilde oluşmasına sebep olmuştur. Bu etki esasen yanma odası içerisindeki NO_X emisyonlarının dağılımından gözlemlenebilmektedir. Kullanılan kazan karşı basınçlı bir kazan olduğu için, hidrojen eklentisiyle genişleyen alev yapısı yanma ortamında reaksiyona giren türler ile yanma ürünlerinin daha iyi bir oranda karışmasını

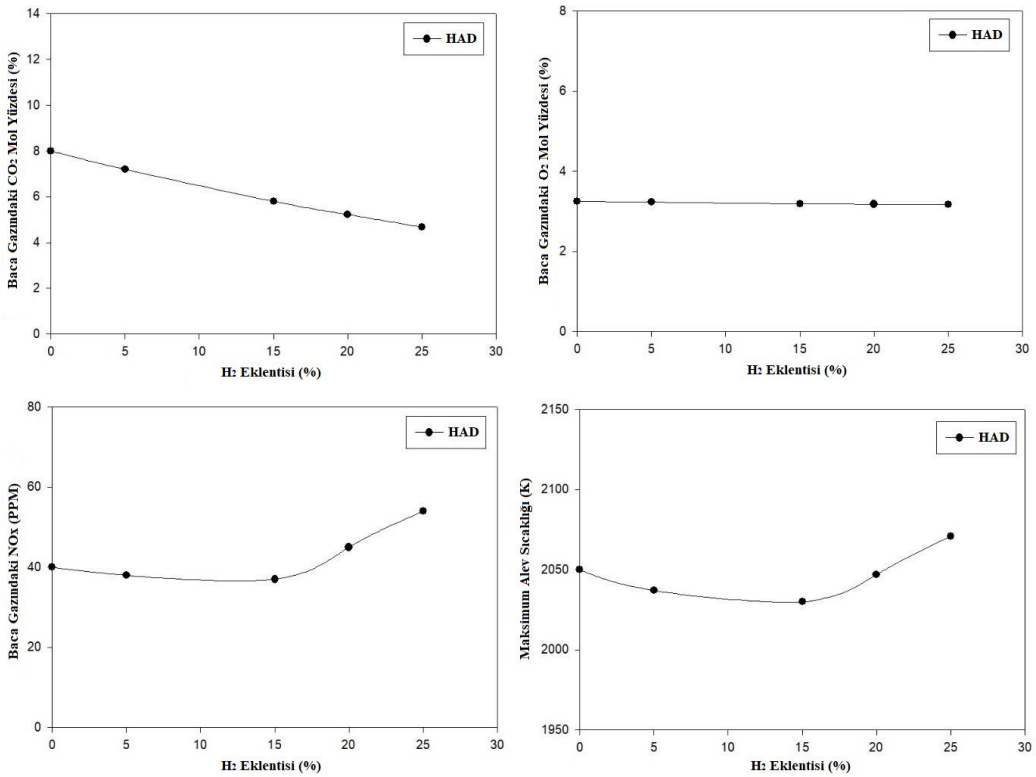
sağlamaktadır. Yanma odasının karşı duvarından geri dönen ve alevi çevreleyen reaksiyon ürünleri, hidrojen eklentili metan alevleri ile saf metan alevine göre daha iyi bir karışım etkileşimi oluşturmaktadır. Bu durum yanma odası içerisindeki hava fazlalık katsayısı dağılımlarının kıyaslanması ile kanıtlanabilmektedir. Şekil 10.2'de elde edilen hava fazlalık katsayısı dağılımı sonuçları saf metan ve üç farklı hidrojen-metan yakıt karışımının yanması durumuna göre verilmiştir. Sonuçlar 0.7-1.3 değerleri arasında verilmiştir.



Şekil 10.2 Yanma Ortamındaki Hava Fazlalık Katsayısı Değerleri (yz Düzlemi)

Şekil 10.2'den görüleceği üzere hidrojenle zenginleştirilmiş yanma durumları için reaksiyona girenler ile reaksiyon ürünleri arasında daha iyi bir karışım sağlanmaktadır. Ön karışımsız yanma durumunda artan karışım miktarı ile birlikte stokiometrik karışımdan uzaklaşılabilmektedir (Yakıcı girişindeki hava fazlalık katsayısının 1'den büyük olması şartı ile). Böylelikle alev sıcaklık değerleri de düşürülebilmektedir. Bu sayede Şekil 10.1'den de görüleceği üzere, hidrojen eklentisi ile birlikte NO_X emisyonlarında bir miktar düşüş sağlanmaktadır. Ancak NO_X emisyonlarındaki düşüş belirli bir hidrojen katkısına kadar sağlanabilmektedir. Hidrojen katkısı kütlece %15'i geçtiği zaman, alev sıcaklık değerleri NO_X emisyonlarının indirgenemeyeceği bir şekilde artmaktadır. Bunun sebebi ise hidrojenin alt ısıl değerinin metana göre oldukça yüksek olmasıdır. Şekil 10.3'de nümerik analizlerden elde edilen baca gazı emisyonları ve yanma

odasında elde edilen maksimum alev sıcaklık değerleri verilmiştir. Hidrojen eklentisi baca gazındaki CO_2 mol kesrini azaltırken, O_2 mol kesri tüm durumlar için neredeyse sabit bir değerde kalmıştır. Bunun sebebi tüm durumlarda sabit hava fazlalık katsayısının (1.2) kullanılmasıdır. Baca gazındaki NO_X emisyonları ise yanma odasında elde edilen maksimum alev sıcaklık değerleri ile aynı değişim eğilimini göstermektedir. Baca gazında bulunan NO_X emisyonlarındaki bu değişim, hidrojen eklentisiyle artan karışım oranı sayesinde olan soğutma etkisiyle, hidrojenin yüksek alt ısıl değeri sonucu ortaya çıkan yüksek sıcaklıklı alev yapılarının oluşturduğu ters etkinin bir sonucudur.

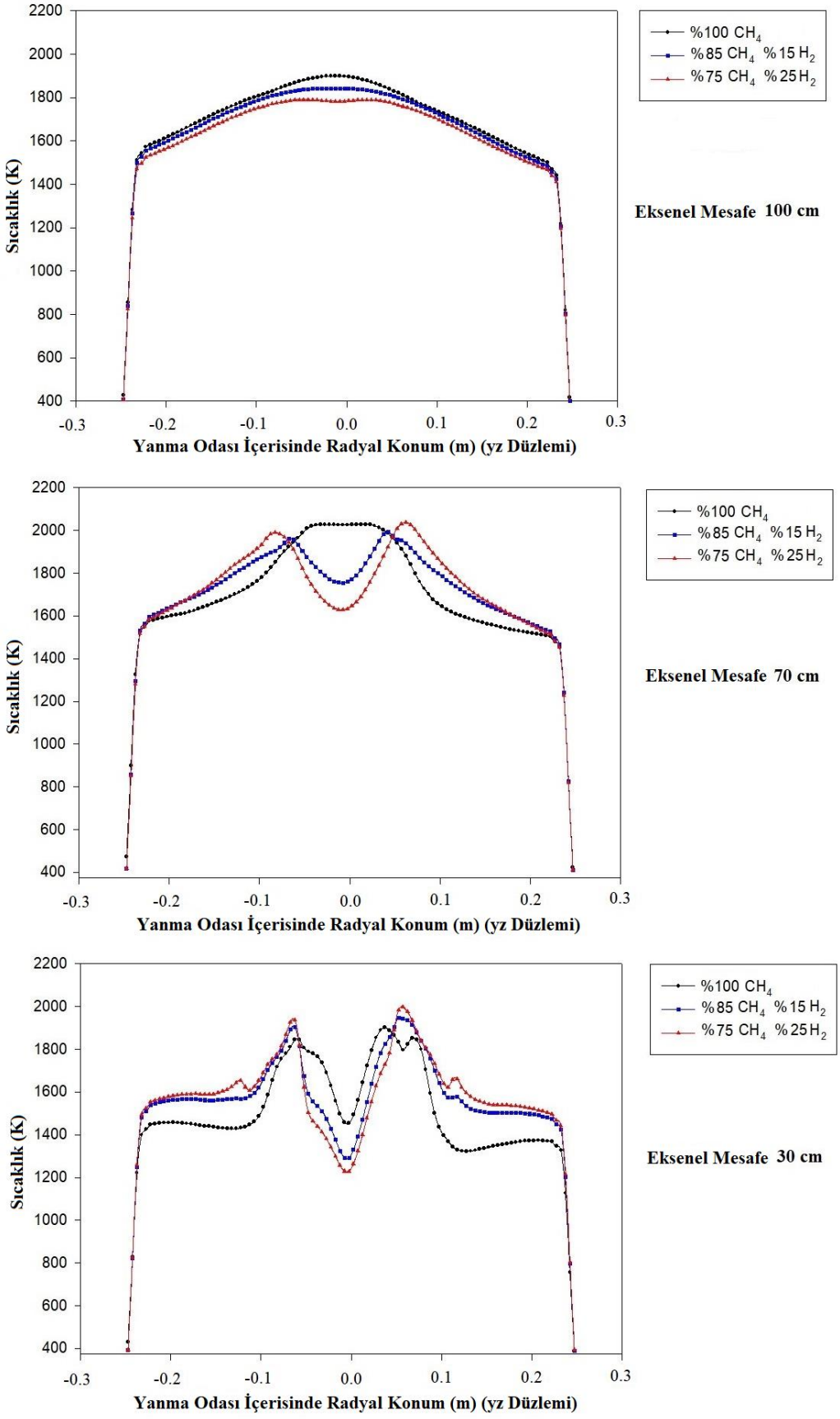


Şekil 10.3 Baca Gazı Emisyonları ve Maksimum Alev Sıcaklık Değerleri

10.1 Hidrojen Eklentisinin Yanma Odasındaki Sıcaklık Değerleri Üzerine Etkileri

Yanma odasındaki sıcaklık değişimlerinin incelenmesi için saf metan yakıtının yakılması durumu iki farklı oranda hidrojenle zenginleştirilmiş metan yakıtının yanması durumu ile kıyaslanmıştır. Bu iki durum kütlece %15 ve %25 oranda hidrojenle zenginleştirilmiş metanın yakıldığı durum olmuştur. Şekil 10.4 üç farklı eksenel konum için yanma odasındaki radyal sıcaklık değişimlerini göstermektedir. Metana hidrojen

eklentisi alev sıcaklık değerlerini yanma odası merkezi çevresinde düşürmektedir. Bunun sebebi, hidrojenin yoğunluğunun düşük ve alt ısıl değerinin yüksek olmasıyla birlikte, alev içerisindeki gaz akış hız değerlerini arttırmasıdır. Kullanılan brülörün yakıt nozulları merkez eksene göre radyal olarak konumlandırıldığı için, akış hızındaki artış hidrojenle zenginleştirilmiş alevin merkez eksende yoğunlaşmasını engelleyen etmenlerden biri olmaktadır. Yakıt olarak saf metanın kullanılması durumunda ise alev yanma odası merkez ekseni civarında dar bir bölgeye sıkışmaktadır. Bu da saf metan alevini daha uzun yapmaktadır. Bu yüzden yanma odası arka duvarına yakın bir konum olan 100 cm'lik eksenel mesafede, tüm radyal konumlardaki metan alevi sıcaklık değerleri diğer durumlardan daha yüksektir. Ek olarak belirtilmelidir ki, hesaplanan sıcaklık değerleri merkez eksene göre simetrik değildir. Bunun sebebi ise kullanılan brülör hava türbülatörünün simetrik bir yapıda olmamasıdır. Elde edilen sonuçlara göre, hidrojenle zenginleştirilmiş metan alevleri karşı basınçlı bir yanma odası içerisinde yanma ürünleri ile daha iyi bir etkileşime sahip olabilecek konumda olmaktadır. Bunun sebebi, karşı basınçlı bir yanma odası içerisinde reaksiyon ürünlerinin yanma odası karşı duvarından geri dönerek yanma alevini çevrelemesi ve hidrojen katkılı metan alevlerinin saf metan alevinden daha geniş bir formda olmasıdır. Bu durumun, emisyonların ve ara reaksiyon ürünlerinin oluşum hızları ve yoğunlukları üzerinde etkili olacağı açıktır.



Şekil 10.4 Yanma Odası İçerisindeki Sıcaklık Değişimleri (yz Düzlemi)

10.2 Hidrojen Eklentisinin Yanma Odasındaki Termal NO Emisyonlarının Oluşum Hızına Etkisi

Termal NO oluşumunda hız belirleyici reaksiyonun Eş.(10.1)'de gösterildiği gibi olduğu bilinmektedir (Law, 2006).

$$N_2 + O \longrightarrow NO + N \quad (10.1)$$

Bu reaksiyonun gerçekleşebilmesi için yüksek kuvvetli N_2 molekül bağının kırılması gerekmektedir (Law, 2006). Bu yüzden, bu reaksiyon yüksek sıcaklık ve yüksek serbest O radikali yoğunluğunun bulunduğu şartlarda gerçekleşebilir. Dolayısıyla, bu bölümde ilk olarak, hidrojen eklentisinin serbest O radikalinin yoğunluğu üzerine olan etkisi incelenmiştir. Kullanılan metan-hava yanma mekanizmasında (Nishioka, Takeno, Nagkawa ve Ishikawa, 1993) serbest radikallerin oluşumunu içeren temel reaksiyonlar Eş.(10.2) ile Eş.(10.4) arasında verilmiştir.

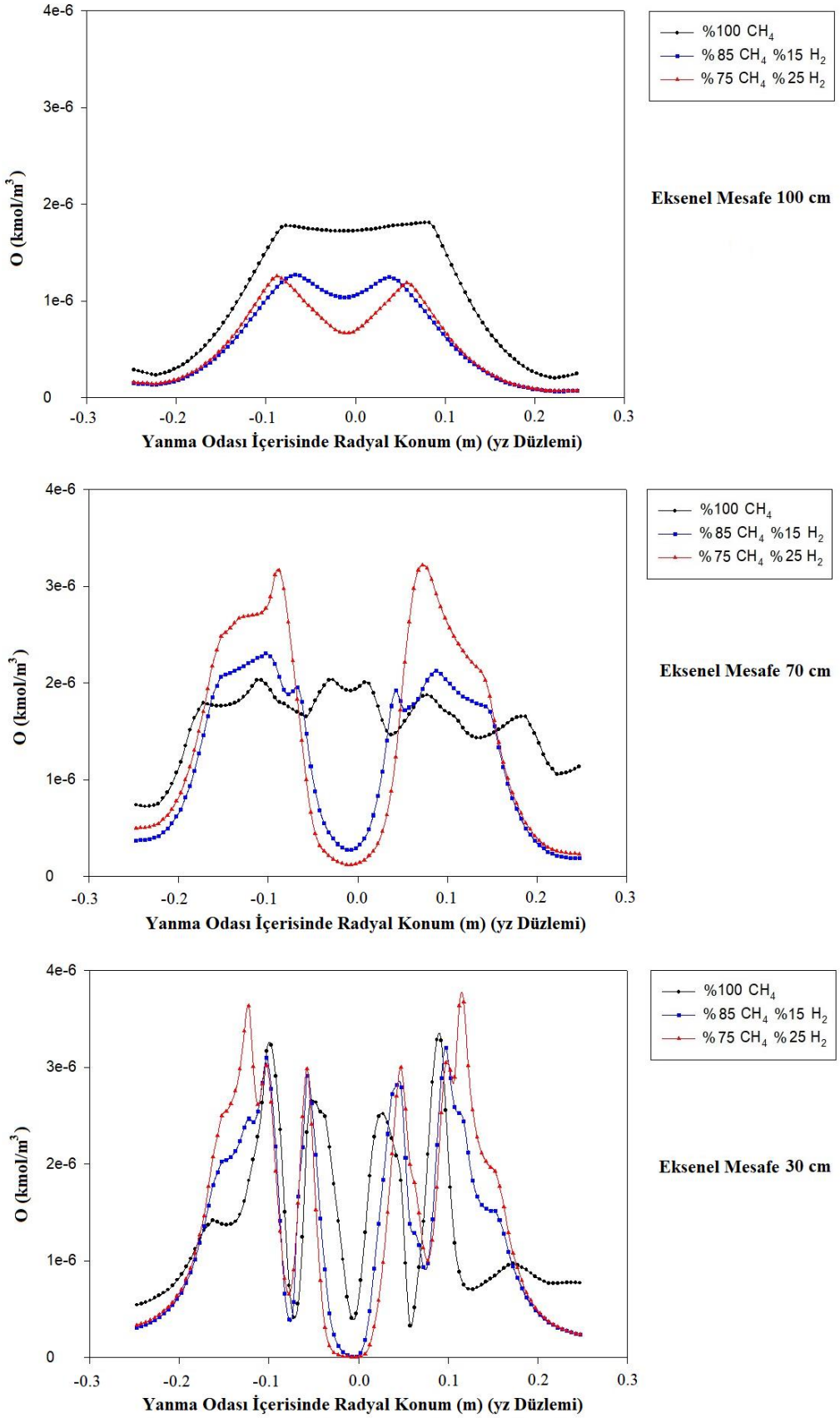
$$H + O_2 \longrightarrow OH + O \quad (10.2)$$

$$OH + H_2 \longrightarrow H_2O + H \quad (10.3)$$

$$O + H_2 \longrightarrow OH + H \quad (10.4)$$

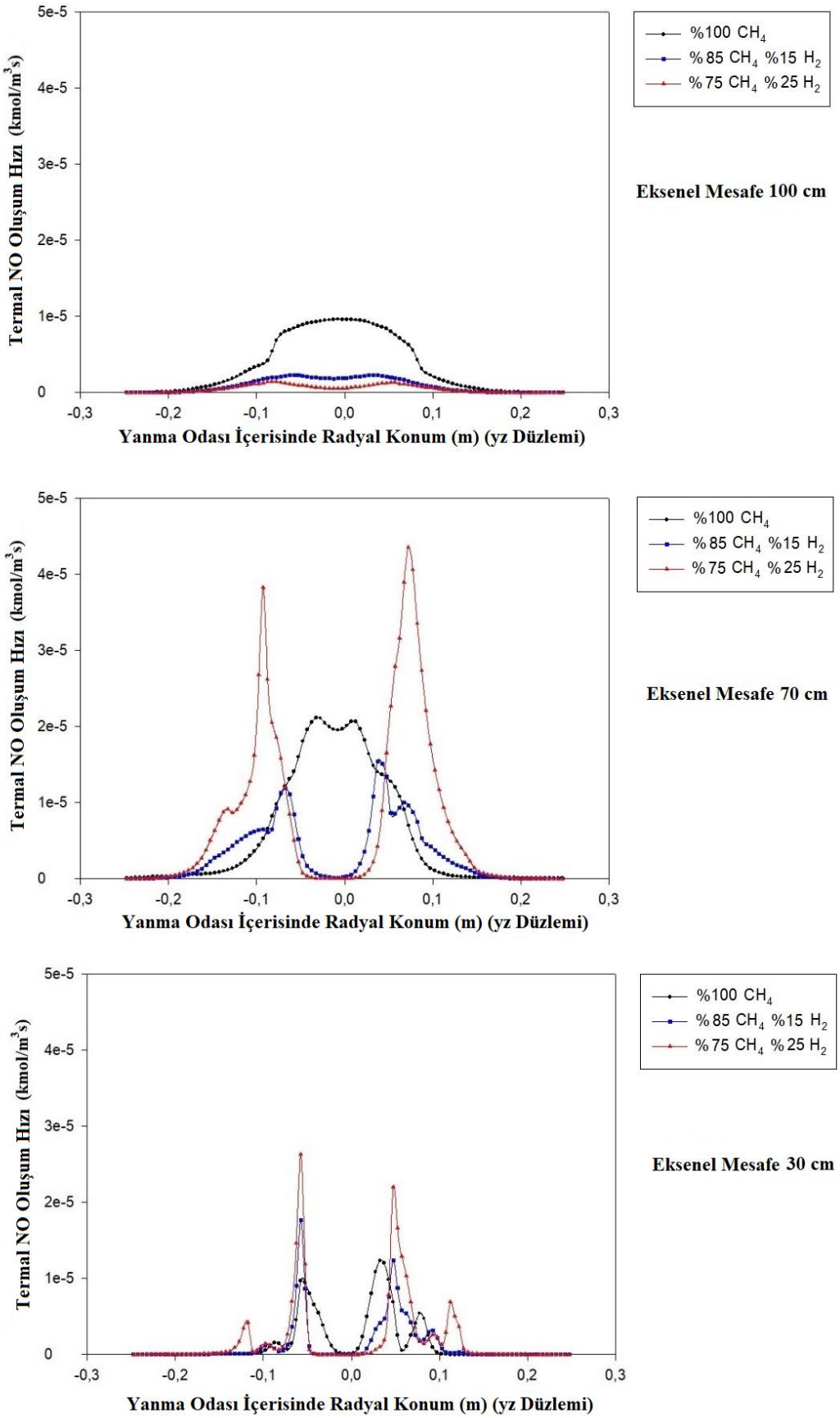
Eş.(10.2)'deki reaksiyon en yüksek aktivasyon enerjisine sahip reaksiyon olmaktadır. Bu yüzden serbest O radikal yoğunluğunun yüksek serbest H radikal yoğunluğu ve yüksek sıcaklık koşullarında artması beklenir. Şekil 10.5'de yanma odasındaki O radikal yoğunlukları farklı eksenel mesafeler için verilmiştir. Saf metanın yakılması durumunda elde edilen sonuçlar iki farklı oranda hidrojenle zenginleştirilmiş metan yakıtının (kütlece %15 ve %25 hidrojen katkılı yakıt) yakılmasıyla elde edilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Şekil 10.5'den görüleceği üzere hidrojen eklentisiyle birlikte reaksiyon ortamında O radikal yoğunluğu oldukça değişmektedir. Brülör uç kısmına yakın noktalarda (30 cm eksenel mesafe) yakıt tam olarak tüketilmediği için, O radikal yoğunlukları radyal bölgelerde üniform olmayan bir dağılım göstermektedir. Alev yoğunluklarının en fazla olduğu bölgede ise hidrojen katkılı yanma durumları için O radikal yoğunlukları radyal bölgelerde yüksek çıkmaktadır. Bu durum 70 cm'lik eksenel mesafedeki sonuçlar incelenerek çıkarılabilir. Bununla birlikte, hidrojen katkılı metan alevi sıcaklıkları yanma odası merkezine yakın bölgelerde saf metan alevi sıcaklıklarından düşük olduğu için, bu bölgedeki O radikal yoğunlukları da düşük çıkmaktadır. İki farklı hidrojen katkılı

durumun alev sıcaklıkları radyal bölgelerde birbirine yakın olsa da, Şekil 10.5'den görüleceği üzere aynı bölgelerdeki serbest O radikali yoğunluk değerlerinde oldukça farklılık oluşmaktadır. Buradan çıkarılan sonuç, hidrojen katkı oranı kütlece %15'i geçtiği zaman serbest O radikal oluşum miktarı önemli derecede artmaktadır. Bu durum yine alev sıcaklık değerlerinin yüksek olduğu bölgelerden elde edilen sonuçların kıyaslanması ile görülebilir (70 cm'lik eksenel mesafe). Ek olarak, O radikal yoğunlukları saf metan kullanılması durumunda yanma odası içerisindeki tüm bölgelerde daha üniform bir dağılım sergilemektedir. 100 cm eksenel mesafeden elde edilen sonuçlar incelenecek olursa, saf metan yakıtının yakılmasıyla oluşan serbest O radikal yoğunlukları tüm radyal bölgelerde hidrojen katkılı durumlardan daha fazladır. Bunun sebebi ise saf metan alevinin hidrojen katkılı alevlerden daha uzun olmasıdır.



Şekil 10.5 Yanma Odası İçerisinde Serbest O Radikalinin Yoğunluk Değişimi

Şekil 10.6'da üç farklı durum için termal NO emisyonu oluşum hızları gösterilmiştir. Bu emisyon oluşum hızları alev içerisindeki anlık serbest radikal yoğunluklarının (O, OH ve H) ve alev sıcaklık değerlerinin kullanılmasıyla hesaplanmıştır. Brülör hava türbülatörünün yanma odası merkez eksenine göre simetrik olmamasından dolayı elde edilen sonuçlar da simetrik olmamıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki saf metan alevi içerisindeki termal NO oluşum hızları merkez eksen civarında yüksek iken, hidrojen katkılı durumlar için radyal bölgelerde yüksek olmaktadır. Tüm durumlar için alev yoğunluklarının en fazla olduğu bölgede (70 cm'lik eksenel mesafe), saf metan yakıtı içerisindeki toplam termal NO oluşum hızının kütlece %15 hidrojen katkılı metan alevi içerisindeki toplam termal NO oluşum hızından yüksek olduğu açıktır. Diğer yandan yine aynı bölgede, kütlece %25 hidrojen katkılı metan alevi içerisindeki toplam termal NO oluşum hızının en yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar bu bölgede (70'lik cm eksenel mesafe) elde edilen serbest O radikali yoğunluk sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Saf metan alevi, yanma odasının arka duvarına yakın olan 100 cm'lik eksenel mesafede en yüksek termal NO oluşum hızına sahiptir. Bu durum yine saf metan alevinin daha uzun olan yapısından kaynaklanmaktadır. Buradan çıkarılan sonuç metana hidrojen eklentisinin yanma alevi içerisinde ki serbest O radikal yoğunluğunu arttırdığıdır. Diğer yandan, metana belirli bir orana kadar hidrojen ilavesi karşı basınçlı bir yanma odasında termal NO oluşum hızlarını azaltabilmektedir. Bu durum, yanma ortamında hidrojen eklentisiyle oluşturulan daha iyi bir yakıt-hava ve yanmış ürün karışım oranı ile alev sıcaklık ve serbest O radikal yoğunluklarının kontrol altında tutulmasıyla sağlanabilmektedir. Çalışılan durum için, termal NO emisyonlarının kütlece %15'lik hidrojen katkı oranına kadar azaltılabildiği belirlenmiştir.



Şekil 10.6 Yanma Odası İçerisinde Termal NO Oluşum Hızları

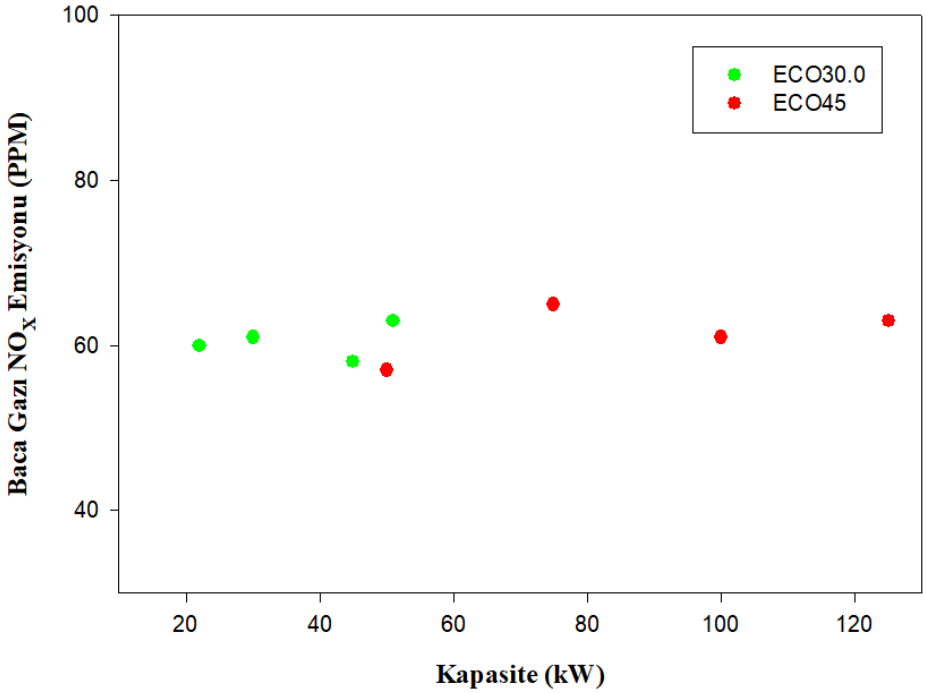
BÖLÜM 11

DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN BRÜLÖRÜN FARKLI BİR BRÜLÖR İLE EMİSYONLAR AÇISINDAN KIYASLANMASI

Çalışmanın bu bölümünde deneysel çalışmalarda kullanılan ECO30.0 brülörü emisyon performansı bakımından ön karışımsız ECO45 doğal gaz brülörü ile kıyaslanmıştır. ECO45 brülörü kapasite bakımından ECO30.0 brülöründen daha büyük bir brülördür ve yine karşı basınçlı bir kazanda kullanılmaktadır. Ancak brülör başlık yapısı bakımından ECO30.0 brülörü ile aynıdır. Bu iki brülörün emisyonlar bakımından kıyaslanması adına, bu çalışmada ECO30.0 brülöründen alınan deneysel sonuçlar ile ECO45 brülöründen alınan deneysel sonuçlar (Uza, 2017) kullanılmıştır. Sağlıklı bir kıyaslama yapılabilmesi adına hava fazlalık katsayısının 1.2 olarak alındığı sonuçlara yer verilmiştir. Çizelge 11.1'de ECO45 brülörünün deneysel emisyon değerleri farklı kapasite değerlerine göre verilmiştir. Şekil 11.1'de ise ECO30.0 ve ECO45 brülörlerinin kullanıldığı test düzeneklerinden alınan baca gazı NO_X emisyon değerlerinin kıyaslanmasına yer verilmiştir.

Çizelge 11.1 ECO45 Brülörü ve Test Kazanına Ait Emisyon Değerleri (Uza, 2017)

Yakıt	**Yakıt Tüketim Hızı (Nm^3/h)**	**Hava Fazlalık Katsayısı**	**Baca Gazındaki CO_2 (% Molar)**	**Baca Gazındaki O_2 (% Molar)**	**Baca Gazındaki NOx (PPM)**
Doğal Gaz	50	1.2	9.44	3.5	57
Doğal Gaz	75	1.2	9.72	3.4	65
Doğal Gaz	100	1.2	9.55	3.5	61
Doğal Gaz	125.1	1.2	9.76	3.5	63



Şekil 11. 1 ECO30.0 ve ECO45 Brülörlerinden Elde Edilen Deneysel Baca Gazı NO_X Emisyonları

Çizelge 11.1'den görüleceği üzere, ECO45 brülörünün çalışabildiği minimum kapasite 50 Nm^3/h değerindeki doğal gaz tüketimi ile sağlanabilmiştir. Diğer yandan bu çalışmada kullanılan ECO30.0 brülörünün sağlayabildiği maksimum kapasite 51 Nm^3/h değerindeki doğal gaz tüketimi ile olmuştur. Her iki brülörün de baca gazı CO_2 ve O_2 emisyon değerleri tüm kapasiteler için aynı olmaktadır. Hava fazlalık katsayısının 1.2 olmasından ötürü bu beklenen bir durumdur. Şekil 11.1'den görüleceği üzere ise her iki brülörün kapasite sınırları oldukça farklı olsa da, baca gazından elde edilen deneysel NO_X emisyonu değerleri oldukça yakın durumdadır. Buradan çıkarılacak sonuç karşı basınçlı kazanlarda, brülör başlık yapısının aynı kalması şartıyla, yanma odası içerisindeki difüzyon alev yapılarında ve sıcaklıklarında artan brülör kapasitesi ile bir değişimin meydana gelmediğidir. Dolayısıyla yüksek kapasiteli bir brülör-kazan sistemi üzerinde gerçekleştirilmesi düşünülen nümerik çalışmalar, hem çözüm maliyeti hem de çözüm zamanı avantajı bakımından düşük kapasiteli bir brülör-kazan sisteminde uygulanabilir.

BÖLÜM 12

SONUÇLAR

Bu çalışmada ilk olarak doğal gaz yakıtı ile ön karışımsız bir brülör ve karşı basınçlı bir kazan kullanılarak yanma deneyleri yapılmıştır. Deneysel sonuç olarak baca gazı sıcaklık ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan sonra HAD analizlerine başlanmıştır. Bu analizlerde yakıt olarak hem saf metan hem de doğal gaz ele alınmıştır. HAD analizlerinde ön karışımsız ve eddy yayılım yanma modelleri kullanılmıştır. HAD analizleri belirli hata oranları karşılığında deneysel veriler ile doğrulanmıştır. Ardından ilk olarak deneysel brülörün başlığında gerçekleştirilen modifikasyonların yanma parametreleri üzerine olan etkileri nümerik olarak incelenmiştir. Daha sonra yine nümerik analizler ile metana hidrojen katkısının yanma parametreleri üzerine olan etkileri çıkarılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

1-) HAD analizlerinde yanma simülasyonları için doğal gaz yakıtı saf metan olarak ele alınabilir.

2-) Analizlerde kullanılan ön karışımsız yanma modeli ve eddy yayılım modeli ile baca gazındaki CO_2 ve O_2 emisyonları doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Eddy yayılım modeli aynı ısıl sınır şartları altında baca gazı sıcaklık değerlerini ön karışımsız yanma modeline göre daha düşük hesaplamaktadır. Bu durum eddy yayılım modelinin alev sıcaklık değerlerini yüksek hesaplamasından kaynaklanmaktadır. Böylelikle yanma odası duvarlarına radyasyon mekanizması ile geçen ısı transferi miktarı daha fazla hesaplanmaktadır ve baca gazı sıcaklık değerleri de ön karışımsız yanma modeline göre düşük çıkmaktadır.

3-) Ön karışımsız yanma modeli ve eddy yayılım modeli baca gazındaki CO emisyonlarını hesaplayamamaktadır.

4-) Ön karışımsız yanma modeli baca gazındaki NO_X emisyonlarını deneysel verilere yakın olacak şekilde belirli bir hata oranı ile hesaplayabilirken, eddy yayılım modeli baca gazındaki NO_X emisyonlarını deneysel verilerden yüksek hesaplamaktadır. Ancak her iki yanma modelinden alınan sonuçlar deneysel verilerle benzer eğilim içerisinde olmaktadır.

5-) Ön karışımsız yanma modeli detaylı kimyasal reaksiyonların hesabını ele aldığı için elde edilen sonuçlar eddy yayılım modelinden elde edilen sonuçlara göre daha hassas ve gerçeğe yakın olmaktadır.

6-) Modifiye başlıklı brülörün kanat sayısı ve açısındaki artış yanma havası ve metan ile yanma ürünlerinin daha iyi bir oranda karışmasını sağlamaktadır. Bu sayede alev boyu kısalırken, radyal olarak genişlemektedir. Böylelikle yanma odası içerisinde daha üniform alev yapılarının oluşturulması mümkün olmaktadır.

7-) Karşı basınçlı bir yanma odası içerisinde yanma odası merkezi boyunca gerçekleşen statik basınç farkı artış miktarı brülör başlığı yapısı tarafından doğrudan etkilenmektedir. Bu basınç farkı değerindeki artış sayesinde, brülörden yanma odası içerisine verilen yakıt radyal yönde daha iyi bir şekilde dağılabilmektedir. Bu sayede daha yaygın ve üniform alev yapıları oluşturulabilmektedir.

8-) Modifiye başlıklı brülörün kanat sayısı ve açısındaki artış ile alev sıcaklık değerlerinde düşüş sağlanmaktadır. Bu sayede baca gazındaki NO_X emisyonlarında azalma sağlama olanağı doğmaktadır.

9-) Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki modifiye başlıklı brülörün kanat ve açı değerlerindeki artışla, baca gazındaki NO_X emisyonlarında deneysel verilere göre maksimum %38 oranında bir düşüş elde edilmiştir. Bu durum 17 kanatlı ve 25° kanat açılı durumda gerçekleşmiştir.

10-) Nümerik sonuçlara göre metana hidrojen katkısı difüzyon alev yapısını genişletmektedir. Bu sonuç literatürdeki deneysel sonuçlar ile uyum göstermektedir. Hidrojen katkısı ile difüzyon alevindeki genişlemenin sebebi ise yanma odası içerisindeki alevin daha az yoğun hale gelmesi ve gaz akış hız değerlerinin artmasıdır.

12-) Eddy yayılım modeli kütlece minimum %25 oranında hidrojen katkısının yapıldığı yanma durumları için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki metana hidrojen eklentisi alev sıcaklık ve baca gazı NO_X emisyon değerlerini arttırmaktadır.

13-) Ön karışımsız yanma modeli ile kütlece %25 oranına kadar hidrojen katkılı yanma durumları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre metana hidrojen katkısı belirli bir katkı oranına kadar alev sıcaklık ve baca gazı NO_X emisyonlarını düşürmektedir. Bu katkı oranı incelenen durum için (432 kW sabit ısıl kapasite) kütlece %15 olmuştur. Hidrojen katkısı ile genişleyen alev yapısı sayesinde, karşı basınçlı bir kazanın kullanımı reaksiyona giren türler ile reaksiyon ürünlerinin karışım oranını arttırmaktadır. Böylelikle, alev sıcaklık değerleri ve alev içerisindeki serbest radikal yoğunlukları düşürülmektedir ve bu da NO_X emisyonu oluşum hızını azaltmaktadır. Hidrojen katkısının kütlece %15'in üzerinde olduğu durumlarda baca gazı ve yanma odası içerisindeki NO_X emisyon değerleri alev sıcaklıkları ile birlikte artan bir eğilim göstermektedir. Bunun sebebi ise hidrojenin alt ısıl değerinin metanın alt ısıl değerinden oldukça yüksek olmasıdır.

14-) Elde edilen sonuçlara göre, karşı basınçlı bir kazanda hidrojen ile zenginleştirilmiş metan yakıtının kullanımı hem karbon hem de NO_X emisyonlarını indirgeme potansiyeline sahiptir.

15-) Bu çalışma hem deneysel hem de nümerik olarak karşı basınçlı bir kazanın boyutlarının yanma parametreleri üzerine olan etkilerinin incelenmesi şeklinde devam ettirilebilir.

16-) Elde edilen deneysel sonuçlar var olan başka bir brülöre ait deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında, brülör ve kazan yapısının aynı olması şartıyla, brülör ve kazan kapasitesinin artmasıyla emisyonlarda önemli bir değişikliğin meydana gelmediğidir. Bu da yanma odası alev yapısı ve sıcaklıklarında bir değişiklik meydana gelmediğinin göstergesi olabilmektedir.

KAYNAKLAR

Abubakar, Z., Shakeel, M.R., & Mokheimer, E.M.A. (2018). Experimental and numerical analysis of non-premixed oxy-combustion of hydrogen-enriched propane in a swirl stabilized combustor. Energy, 165 (Part B), 1401-1414

Andersen, J., Rasmussen, C.L., Giselsson, T., & Glarborg, P. (2009). Global combustion mechanisms for use in CFD modeling under oxy-fuel conditions. Energy Fuels, 23(3), 1379-1389

ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide. (2009). ANSYS Inc

Ballester, J.M., Dopazo, C., Fueyo, N., Hernandez, M., & Vidal, P.J. (1997). Investigation of low-NOx strategies for natural gas combustion. Fuel, 76(5), 435-446

Bilger, R.W. (1975). A note on favre averaging in variable density flows. Combustion Science and Technology, 11(5-6), 215-217

Bordbar, M.H., Węcel, G., & Hyppänen, T. (2014). A line by line based weighted sum of gray gases model for inhomogeneous CO_2–H_2O mixture in oxy-fired combustion. Combustion and Flame, 161(9), 2435-2445

Bouras, F., Attia, M.E.H., Khaldi, F., & Si-Ameur, M. (2017). Control of methane flame properties by hydrogen fuel addition: Application to power plant combustion chamber. International Journal of Hydrogen Energy, 42(13), 8932-8939

Cedengineering. (2019). Online courses. 28.09.2019 tarihinde https://www.cedengineering.com/courses/boiler-classification-and-application adresinden erişildi

Cellek, M.S., & Pınarbaşı, A. (2018). Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels. International Journal of Hydrogen Energy, 43(2), 1194-1207

Çengel, Y. (2008). Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları. İzmir: İzmir Güven Kitapevi

Çengel, Y. (2011). Termodinamik, Mühendislik Yaklaşımıyla. İzmir: İzmir Güven Kitapevi

Çordaş Çorlu Doğalgaz Dağıtım A.Ş. Ocak (2018)

Ecostar. (2016). İki kademeli gaz brülörleri. 28.09.2019 tarihinde https://www.ecostar.com.tr/urunlerimiz/iki-kademeli-gaz-brulorleri?s=true adresinden erişildi

Ecostar. (2016). Kare iki kademeli gaz brülörleri. 28.09.2019 tarihinde https://www.ecostar.com.tr/urunlerimiz/kare-iki-kademeli-gaz-brulorleri?s=true adresinden erişildi

El-Ghafour, S.A.A., El-dein, A.H.E., & Aref, A.A.R. (2010). Combustion characteristics of natural gas–hydrogen hybrid fuel turbulent diffusion flame. International Journal of Hydrogen Energy, 35(6), 2556-2565

Energyeducation. (2018). 28.09.2019 tarihinde https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photochemical_smog adresinden erişildi

Epa. (2019). 28.09.2019 tarihinde https://www.epa.gov adresinden erişildi

Feyz, M.E., Esfahani, J.A., Pishbin, I., & Modarres Razavi, S.M.R. (2015). Effect of recess length on the flame parameters and combustion performance of a low swirl burner. Applied Thermal Engineering, 89(5), 609-617

Ge, B., Tian, Y., & Zang, S. (2016). The effects of humidity on combustion characteristics of a nonpremixed syngas flame. International Journal of Hydrogen Energy, 41(21), 9219-9226

Genceli, O.F., & Parmaksızoğlu, İ.C. (2008). Kalorifer Tesisatı, İstanbul: MMO/352/5.baskı

Hashemi, S.A., Hajialigol, N., Mazaheri, K., & Fattahi, A. (2014). Investigation of the effect of the flame holder geometry on the flame structure in non-premixed hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 50, 32-41

Hossain, M., & Malalasekera, W. (2001). Comparison of turbulent nonpremixed combustion models for modelling a bluff body flame. 4th International Conference on Mechanical Engineering, December 26-28, Dhaka, Bangladesh, IV 9-14

Hu, Z., & Zhang, X. (2019). Experimental study on flame stability of biogas / hydrogen combustion. International Journal of Hydrogen Energy, 44(11), 5607-5614

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

Ilbas, M., & Karyeyen, S. (2017). Turbulent diffusion flames of a low-calorific value syngas under varying turbulator angles. Energy, 138, 383-393

Ilbas, M., & Sahin, M. (2017). Effects of turbulator angle and hydrogen addition on a biogas turbulent diffusion flame. International Journal of Hydrogen Energy, 42(40), 25735-25743

Ilbas, M., Bektas, 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

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

Kashir, B., & Tabejamaat, S. (2013). A numerical study on the effects of H_2 addition in non-premixed turbulent combustion of C_3H_8–H_2–N_2 mixture using a steady flamelet approach. International Journal of Hydrogen Energy, 38(23), 9918-9927

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

Khanafer, K., & Aithal, S. M. (2011). Fluid-dynamic and NOx computation in swirl burners. International Journal of Heat and Mass Transfer, 54(23-24), 5030–5038

Law, C.K. (2006). Combustion Physics. Cambridge University Press, New York

Mayr, B., Prieler, R., Demuth, M., Potesser, M., & Hochenauer, C. (2015). CFD and experimental analysis of a 115 kW natural gas fired lab-scale furnace under oxy-fuel and air–fuel conditions. Fuel, 159, 864–875

Mevzuat. (2005). Mevzuat bilgi sistemi. 28.09.2019 tarihinde http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.7265&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch=%C4%B1s%C4%B1nmadan%20kaynaklanan adresinden erişildi

Nishioka, M., Takeno, T., Nagakawa, S., & Ishikawa, Y. (1993). NOx emission characteristics of rich methane-air flames. Dynamics of Gaseous Combustion, 151, 141-162

Noor, M. M., Wandel, A. P., & Yusaf, T. (2014). The simulation of biogas combustion in a mild burner. Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 6, 995-1013

Oilon. (2019). Oil, gas and dual fuel burners. 28.09.2019 tarihinde https://oilon.com/system/files?file=2019-04/5_400-2500_ME_EN_NA.pdf adresinden erişildi

Peters, N. (1984). Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 10(3), 319-339

Raghavan, V. (2016). Combustion technology: essentials of flames and burners. United Kindom: John Wiley & Sons Ltd

Rajpara, P., Shah, R., & Banerjee, J. (2018). Effect of hydrogen addition on combustion and emission characteristics of methane fuelled upward swirl can combustor. International Journal of Hydrogen Energy, 43(36), 17505-17519

Saini, R., Prakash, S., De, A., & Yadav, R. (2018). Investigation of NOx in piloted stabilized methane-air diffusion flames using finite-rate and infinitely-fast chemistry based combustion models. Thermal Science and Engineering Progress, 5, 144-157

Shakeel, M.R., Sanusi, Y.S., & Mokheimer, E.M.A. (2017). Numerical modeling of oxy-fuel combustion in a model gas turbine combustor: effect of combustion chemistry and radiation model. Energy Procedia, 142, 1647-1652

Shinomori, K., Katou, K., Shimokuri, D., & Ishizuka, S. (2011). NOx emission characteristics and aerodynamic structure of a self-recirculation type burner for small boilers. Proceedings of the Combustion Institute, 33(2), 2735–2742

Spangelo, ∅. (2004). Experimental and theoretical studies of a low NOx swirl burner. Doctoral Thesis, The Norwegian University of Science and Technology

Sungur, B. (2013). Çok yakıtlı kazanlarda yanma ve emisyon oluşumunun nümerik ve deneysel modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun

Ti, S., Chen, Z., Kuang, M., Li, Z., Zhu, Q., Zhang, H., Wang, Z., & Xu, G. (2016). Numerical simulation of the combustion characteristics and NOx emission of a swirl burner: influence of the structure of the burner outlet. Applied Thermal Engineering, 104, 565-576

Uza, E. (2017). Numerical and experimental investigation of a domestic natural gas burner and analysis of modifications to achieve low Nox emissions, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi/ Institute for Graduate Studies in Pure and Applied Sciences

Yegm. (2008). Kazanlar. 28.09.2019 tarihinde http://www.yegm.gov.tr/verimlilik/document/kazanlar.pdf adresinden erişildi

Zadghaffari, R., Moghaddas, J. S., & Rahimiahar, Z. (2012). Numerical investigation of a burner configuration to minimize pollutant emissions. APCBEE Procedia, 3, 177 – 181

Zohra, K. F., Mounir, A., & Salah, C. (2017). Numerical simulation of CH4-H2-Air non-premixed flame stabilized by a bluff body. Energy Procedia, 139, 530–536

EK

HAD analizlerinde kullanılan metan-hava yanma mekanizması (Nishioka, Takeno, Nagakawa ve Ishikawa, 1993):

$$k_f = AT^{\beta} \exp(-E/RT)$$

	A	β	E
CH3+H+M=CH4+M	8.0E26	-3.	0.
CH4+O2=CH3+HO2	7.9E13	0.	56000.
CH4+H=CH3+H2	2.2E4	3.	8750.
CH4+O=CH3+OH	1.6E6	2.36	7400.
CH4+OH=CH3+H2O	1.6E6	2.1	2460.
CH3+O=CH2O+H	6.8E13	0.	0.
CH3+OH=CH2O+H2	1.0E12	0.	0.
CH3+OH=CH2+H2O	1.5E13	0.	5000.
CH3+H=CH2+H2	9.0E13	0.	15100.
CH2+H=CH+H2	1.4E19	-2.	0.
CH2+OH=CH2O+H	2.5E13	0.	0.
CH2+OH=CH+H2O	4.5E13	0.	3000.
CH+O2=HCO+O	3.3E13	0.	0.
CH+O=CO+H	5.7E13	0.	0.
CH+OH=HCO+H	3.0E13	0.	0.
CH+CO2=HCO+CO	3.4E12	0.	690.
CH2+CO2=CH2O+CO	1.1E11	0.	1000.
CH2+O=CO+H+H	3.0E13	0.	0.
CH2+O=CO+H2	5.0E13	0.	0.
CH2+O2=CO2+H+H	1.6E12	0.	1000.
CH2+O2=CH2O+O	5.0E13	0.	9000.
CH2+O2=CO2+H2	6.9E11	0.	500.
CH2+O2=CO+H2O	1.9E10	0.	-1000.
CH2+O2=CO+OH+H	8.6E10	0.	-500.
CH2+O2=HCO+OH	4.3E10	0.	-500.
CH2O+OH=HCO+H2O	3.43E9	1.18	-447.
CH2O+H=HCO+H2	2.19E8	1.77	3000.
CH2O+M=HCO+H+M	3.31E16	0.	81000.
CH2O+O=HCO+OH	1.81E13	0.	3082.
HCO+OH=CO+H2O	5.0E12	0.	0.
HCO+M=H+CO+M	1.6E14	0.	14700.
HCO+H=CO+H2	4.0E13	0.	0.
HCO+O=CO2+H	1.0E13	0.	0.
HCO+O2=HO2+CO	3.3E13	-0.4	0.
CO+O+M=CO2+M	3.2E13	0.	-4200.
CO+OH=CO2+H	1.51E7	1.3	-758.
CO+O2=CO2+O	1.6E13	0.	41000.
HO2+CO=CO2+OH	5.8E13	0.	22934.
H2+O2=2OH	1.7E13	0.	47780.
OH+H2=H2O+H	1.17E9	1.3	3626.
H+O2=OH+O	5.13E16	-0.816	16507.
O+H2=OH+H	1.8E10	1.0	8826.
H+O2+M=HO2+M	3.61E17	-0.72	0.
H2O/18.6/ CO2/4.2/ H2/2.86/ CO/2.11/ N2/1.26/			

	A	β	E
OH+HO2=H2O+O2	7.5E12	0.	0.
H+HO2=2OH	1.4E14	0.	1073.
O+HO2=O2+OH	1.4E13	0.	1073.
2OH=O+H2O	6.0E8	1.3	0.
H+H+M=H2+M	1.0E18	-1.0	0.
H+H+H2=H2+H2	9.2E16	-0.6	0.
H+H+H2O=H2+H2O	6.0E19	-1.25	0.
H+H+CO2=H2+CO2	5.49E20	-2.0	0.
H+OH+M=H2O+M H2O/5/	1.6E22	-2.0	0.
H+O+M=OH+M H2O/5/	6.2E16	-0.6	0.
H+HO2=H2+O2	1.25E13	0.	0.
HO2+HO2=H2O2+O2	2.0E12	0.	0.
H2O2+M=OH+OH+M	1.3E17	0.	45500.
H2O2+H=HO2+H2	1.6E12	0.	3800.
H2O2+OH=H2O+HO2	1.0E13	0.	1800.

***** Birimler mol, cm^3, saniye, Kelvin ve Kalori/mol cinsindendir.

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılı Konya doğumludur ve ilköğretimini bu şehirde tamamlamıştır. 2002 yılında girdiği Üsküdar Anadolu Lisesi'nden 2006 yılında mezun olmuştur ve aynı yıl girdiği Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun olmuştur. 2011 yılı Eylül ayında, Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Enerji Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaya başlamıştır ve halen bu görevine devam etmektedir.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

1-) Öztuna, S., & Büyükakın, M.K. (2019). Effects of hydrogen enrichment of methane on diffusion flame structure and emissions in a back-pressure combustion chamber. International Journal of Hydrogen Energy, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.187

2-) Büyükakın, M.K., & Öztuna, S. (2019). Study on non-premixed methane/air combustion from flame structure and NO_X emission aspect for different burner head structures. International Journal of Energy Research, 43(10), 5421-5437

3-) Büyükakın, M.K., & Öztuna, S. (2019). Metan gazının yakılmasında iki farklı yanma modelinin nümerik olarak kıyaslanması. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, S. 119, Kocaeli, Türkiye

4-) Büyükakın, M.K., & Öztuna, S. (2019). Numerical investigation of hydrogen enriched methane/air combustion from pollutants aspect. 4th International Hydrogen Technologies Congress, June 20-23, 176-179, Edirne, Turkey

5-) Büyükakın, M.K., & Öztuna, S. (2018). $CH_4 - H_2$ karışımlarının hava ile ön karışımsız olarak yakılmasının iki boyutlu olarak nümerik incelenmesi. Uluslararası Katılımlı Anadolu Enerji Sempozyumu, Cilt II, 932-940, Edirne, Türkiye