T.C. YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANAYİ TİPİ BRÜLÖR-KAZAN SİSTEMİNDE YANMA EMİSYONLARININ İNCELENMESİ

MEHMET SALİH CELLEK

DOKTORA TEZİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI ISI PROSES PROGRAMI

DANIŞMAN PROF. DR. ALİ PINARBAŞI

İSTANBUL, 2017

T.C. YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SANAYİ TİPİ BRÜLÖR-KAZAN SİSTEMİNDE YANMA EMİSYONLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Salih CELLEK tarafından hazırlanan tez çalışması 07.11.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı Prof. Dr. Ali PINARBAŞI Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri Prof. Dr. Ali PINARBAŞI Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mesut GÜR İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Tahsin ENGİN Sakarya Üniversitesi

Prof. Dr. Ş. Özgür ATAYILMAZ Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. ÖVÜN IŞIN Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu doktora tezi, Ecostar Termo Isı Sistemleri Ticaret ve Sanayi Anonim Şirketi ve Yıldız Teknik Üniversitesi Teknopark tarafından Teknopark Tezleri Destek Programı (TEKNO-TEZ) kapsamında desteklenmiştir. Bu doktora tez çalışmasında, sanayi tipi bir brülör-kazan sisteminde doğal gaz yanması sonucu oluşan yanma emisyonları, farklı ısıl yükleri, hava fazlalık katsayıları, kazan uzunlukları ve kazan çapları için incelenmiştir. Ayrıca mevcut brülör-kazan sisteminde doğal gaz, metan, saf hidrojen ve doğal gaz-hidrojen karışımlarının yanması incelenmiş olup oluşan emisyonlar karşılaştırılmıştır. Öte yandan brülörde kullanılan girdap üreteci yerine yanma emisyonlarını düşürmek için yeni bir tasarım yapılmıştır. Yeni tasarlanan girdap üreteci ile kanat sayısı (7, 9, 11, 13, 15, 17) ve kanat açısı (15°, 20°, 25°, 30°) parametrik olarak incelenerek kanat sayısı ve kanat açısının yanma ve emisyonları üzerindeki etkileri belirlenmiştir.

Bu doktora tez çalışması, sanayi-üniversite iş birliği kapsamında Yıldız Teknopark ve Termo Isı Sistemleri Tic. San. A.Ş. firması tarafından desteklenmiştir. Doktora çalışmasındaki deneysel çalışmalar Termo Isı Sistemleri Tic. San. A.Ş. firmasının Çorlu'daki tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Her iki kuruma sağladıkları destekleri için teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Doktora tez çalışmasını yöneten, olumlu eleştirileri ve önerileri ile çalışmama büyük katkısı bulunan saygı değer tez danışmanım Prof. Dr. Ali PINARBAŞI hocama teşekkür ederim.

Bilgilerini, tecrübelerini ve deneyimlerini benden esirgemeyen tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Mesut GÜR ve Yrd. Doç. Dr. Övün IŞIN hocalarıma çok teşekkür ederim.

Doktora tezimde deneysel çalışmaları gerçekleştirmem konusunda desteğini esirgemeyen değerli Termo Isı Sistemleri Tic. San. A.Ş. Arge Müdürü Emir SAKALLI Bey, Tekniker Emir BİNGÖL ve Erdem APRA Bey'lere teşekkürü bir borç bilirim.

Zorlu doktora eğitimim süresince beni destekleyip motive eden fedakâr eşim ve kızıma şükranlarımı sunarım.

Kasım, 2017

Mehmet Salih CELLEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa
SİMGE LİSTESİix
KISALTMA LİSTESİxi
ŞEKİL LİSTESİxii
ÇİZELGE LİSTESİxvi
ÖZETxvii
ABSTRACTxix
BÖLÜM 1
GiRiŞ1
1.1 Literatür Özeti 3 1.2 Tezin Amacı 15 1.3 Hipotez 16 BÖLÜM 2 12 16
TEMEL KAVRAMLAR VAKITLAR VE VANMA 17
2.1 Temel Kavramlar 17 2.2 Gaz Yakıtlar 18 2.2.1 Doğal gaz 19 2.2.2 Metan 19 2.2.3 Hidrojen 20 2.2.4 Gaz Yakıt Yanması 21 2.2.5 Gaz Yakıt Yanma Reaksiyonları 22
BÖLÜM 3
YANMA EMİSYONLARI VE ZARARLARI
 3.1 CO₂ Emisyonu

3.3 SO ₂	2 Emisyonu	27
3.4 NO	x Emisyonu	27
3.4.1	Isıl NÖx Emisyonu	
3.4.2	Promt (Ani) NOx Oluşumu	29
3.4.3	Yakıtsal NOx Oluşumu	
3.5 NO	x Azaltma Teknikleri	
3.6 Yan	ıma Emisyonlarının Zararları	
3.6.1	Sera Etkisi	
3.6.2	Küresel Isınma Etkisi	
3.6.3	Hava Kirliliği	
	-	

BÖLÜM 4

KAZANLAR, BRÜLÖRLER VE GİRDAP ÜRETEÇLERİ
4.1 Kazanlar
4.1.1 Kazan Kapasitesi
4.1.2 Kazan Verimi
4.2 Brülörler
4.2.1 Gaz Yakıt Brülörleri
4.2.1.1 Çift Yakıtlı Brülörler
4.2.1.2 Üflemeli Brülörler
4.2.1.3 Atmosferik Brülörler
4.2.2 Brülörde Gaz Kontrol Hattı Ekipmanları
4.3 Girdap Üreteçleri 40
4.3.1 Radyal Girdap Üreteçleri43
4.3.2 Eksenel Girdap Üreteçleri 44
4.3.3 Isıl Yüke Göre Girdap Üreteci Kanat Sayısı ve Kanat Açısı Hesabı 4
4.3.4 Girdap Sayısı (SN) 46
4.3.5 Resirkülasyon Bölgesi Boyutu46
BÖLÜM 5
DENEYSEL ÇALIŞMA49
5.1 Deneysel Yöntem
5.2 Deneysel Sistem ve Ekipmanları

	<i>i i i i i i i i i i</i>	
5.2.1	Brülör	53
5.2.2	Kazan	
5.2.3	Debi, Sıcaklık ve Basınç Ölçerler	
5.2.4	Emisyon Ölçüm Cihazı	
5.3 Ölç	üm Cihazlarının Doğruluk-Belirsizlik Analizi	59

BÖLÜM 6

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ÇALIŞMALARI		61
6.1	Giriş	61
6.2	Korunum Denklemleri	61
6.3	Türbülanslı Akışın Modellenmesi	63

6	5.3.	1 Standard k-ε Modeliθ	63
e	5.3.2	2 Realizable k-ε Modeliθ	64
e	5.3.3	3 RNG k-ε Modeliθ	65
e	5.3.4	4 Reynolds Stress Modeli (RSM)	66
6.4	. `	Yanmanın Modellenmesi	66
e	5.4.	1 Laminer Sonlu-Hız Modeli (Laminar Finite-Rate Model)6	67
e	5.4.2	2 Girdap Ayrışma Modeli (Eddy Dissipation Model)6	68
e	5.4.3	3 Sonlu-Hızlı/Girdaplı Dağılım Modeli (Finite Rate/Eddy Dissipation).	69
e	5.4.4	4 Girdap Ayrışma Konsepti (Eddy Dissipation Concenpt)	70
e	5.4.	5 Ön Karışımsız Yanma Modeli (Non-Premixed Combustion)	70
e	5.4.0	6 Kısmi-Ön Karışımlı Yanma Modeli (Partially Premixed Combustion)	72
6.5		Radyasyon Modeli	73
6.6	5 I	Kazan ve Brülör Geometrisi ile Akış Hacimlerinin Oluşturulması	74
6.7	' .	Sayısal Ağ Oluşturma	77
6.8	; 1	Fiziksel Özellikler, Sınır Şartları ve Çözüm Metodu 8	81

BÖLÜM 7

SONUÇLARIN DE	ĞERLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI	
7.1 Gir	iş	
7.2 De	neysel Sonuçlar	
7.2.1	Brülör Isıl Yükünün Değişimi	
7.2.2	Hava Fazlalık Katsayısının Değişimi	
7.2.3	Kazan Ocak Uzunluğunun Değişimi	91
7.3 De	neysel ve HAD Sonuçların Karşılaştırılması	93
7.3.1	Türbülans Modellerinin İncelenmesi	93
7.3.2	Yanma Modellerinin İncelenmesi	102
7.3.3	Brülör Isıl Yükünün Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki Etkisi	112
7.3.4	Hava Fazlalık Katsayısının Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki E	Etkisi 120
7.3.5	Kazan Uzunluğunun Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki Etkisi	127
7.3.6	Kazan Ocak Çapının Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki Etkisi	132
7.4 Alt	ernatif Yakıtların Yanma ve Emisyonlar Üzerindeki Etkisi	138
7.4.1	Doğal gaz ve Metan Yakıtlarının Yanması	138
7.4.2	Doğal Gaz-Hidrojen Karışımı ve Saf Hidrojen Yanması	139
7.5 Gir	dap Üreteci Tasarımı Ve HAD Analizi	147
7.5.1	Girdap Üreteci Kanat Sayısı Değişimi	149
7.5.2	Girdap Üreteci Kanat Açısı Değişimi	154
7.5.2	2.1 7 Kanatlı Girdap Üretecinde Kanat Açılarının Etkisi	156
7.5.2	2.2 11 Kanatlı Girdap Üretecinde Kanat Açılarının Etkisi	160
7.5.2	2.3 17 Kanatlı Girdap Üretecinde Kanat Açılarının Etkisi	165
7.5.2	2.4 7, 9, 11, 13, 15 ve 17 Kanat Sayılı ve 15°, 20°, 25° ve 30° k	(anat
Açılı	Girdap Üreteçlerinin NOx Oluşumuna Etkisi	170
BÖLÜM 8		

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	. 173
KAYNAKLAR	. 181

ÖZGEÇMİŞ1	88
-----------	----

SIMGE LISTESI

α	Emilim katsayısı
Ar	Arrhenius faktörü
A_{sw}	Girdap üreteci kanatsız ön kesit alanı
С	Kanat genişliği
С	Karbon elementi
Cs	Sabit karbon
Cu	Uçucu karbon
CH_4	Metan
C_2H_6	Etan
C₃H ₈	Propan
C_4H_{10}	Bütan
C_5H_{12}	Pentan
C_6H_{14}	Hekzan
$C_{6.9}H_{14.5}$	Benzin
$C_{17}H_{34}$	Motorin
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
D_{hub}	Hub çapı
D_{sw}	Girdap üreteci çapı
Ea	Aktivasyon enerjisi
F	Dış kuvvet kaynağı
Н	Entalpi
HCN	Hidrosiyanik asit
HFCs	Hidroflorür karbonlar
Hu	Yakıt alt ısıl değeri
H ₂	Hidrojen
I	Toplam radyasyon yoğunluğu
k	Türbülans kinetik enerjisi
К	Kazanın birim ısıtma yüzeyine düşen ısıl güç
k _f	İleri reaksiyon oranı
kr	Ters reaksiyon oranı
m	Kütle
m _{sc}	Girdap üretecinde geçen havanın toplam yanma havasına oranı
ṁs	Kazan suyu kütlesel debisi
\dot{m}_{sw}	Girdap üretecinden geçen hava kütlesel debisi
ṁγ	Yakıt kütlesi

ρ	Yoğunluk
N ₂	Azot
NO	Azot monoksit
NO ₂	Azot dioksit
NOx	Azot oksitler
N ₂ O	Diazotoksit
0	Oksijen atomu
OH	Hidroksil radikali
O ₂	Oksijen
Р	Basınç
P_{sw}	Girdap üreteci basınç düşüşü
PFCs	Perfloro karbonlar
r	Yarıçap
RZ	Resirkilasyon bölgesi
S	Girdap üreteci kanat boşluğu
s/c	Girdap üreteci boşluk/kanat genişliği
S	Kükürt
S _h	Kimyasal reaksiyon ısısı
S _N	Girdap sayısı
SOx	Kükürt oksitler
SF6	Sülfür hekza florid
Т	Sıcaklık
Z	Eksenel Mesafe
z/c	Girdap üreteci kanat en-boy oranı
Z	Kazan yükü artırım katsayısı
β_r	Boyutsuz sıcaklık derecesi
η _k	Kazan verimi
Q	Brülör kapasitesi
Qĸ	Kazan kapasitesi
Q _h	Kazanın ısı yükü
W	Nem
3	Türbülans yitim hızı
ερ	Yakıt
ερ	Oksijen
λ	Hava Fazlalık Katsayısı
θ	Kanat açısı
Ŧ	Gerilme tensörü
Ω	Ortalama dönme tensörü
ω_k	Açısal Hız
Δ	Komşu buluşma noktaları arasındaki mesafe
μ	Moleküler viskozite
μ_t	Türbülans girdap viskozitesi

KISALTMA LİSTESİ

	Doğal gaz
DLE	Kuru Düşük Emisyonlu
ED	Eddy Dissipation (Girdap Yitimi)
EDC	Eddy Dissipation Concept
FM	Tam Model
FR/ED	Finite Rate/Eddy Dissipation
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HFCV	Hidrojen Yakıtlı Hücre Araçları
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
NPC	Non Premix Combustion
PDF	Olası Yoğunluklu Fonksiyon
PM	Periyodik Model
РРС	Partial-Premix Combustion
RSM	Reynolds Stress Modeli
7K	7 Kanat Sayılı Girdap Üreteci
9К	9 Kanat Sayılı Girdap Üreteci
11K	11 Kanat Sayılı Girdap Üreteci
13K	13 Kanat Sayılı Girdap Üreteci
15k	15 Kanat Sayılı Girdap Üreteci
17K	17 Kanat Sayılı Girdap Üreteci

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Şekil 2. 2 Şekil 3. 1 Şekil 3. 2 Şekil 4. 1 Şekil 4. 2 Şekil 4. 3 Şekil 4. 4	Ön karışımlı alev.22Difüzyon alevi.22Yakıtsal NO oluşumu mekanizması30NOx azaltma teknikleri.31Örnek bir sıcak su kazanı ve ekipmanları [70]35Örnek bir gaz yakıt brülörü ve ekipmanları [74]37Gaz Kontrol Hattı Elemanları [76]40Farklı kanat açılarında (30°, 45°, 55°) imalatı yapılmış girdap üreteçleri [78]
Şekil 4. 5	3D, 2D ve eksenel simetrik geometrilerde silindirik hız bileşenleri [80] 42
Şekil 4. 6	Güçlü girdapla oluşan akış devridaimi [81], [83]43
Şekil 4. 7	Radyal girdap üreteci
Şekil 4. 8	Eksenel girdap üreteci gösterimi
Şekil 4. 9	Eksenel girdap üreteci ölçüleri [81]
Şekil 4. 1	0 Resirkilasyon bölgesi (a), eksenel ve girdap akışlarının (b) gösterimi
Şekil 5. 1	Deneysel çalışmaların yapıldığı ve firmada kurulu bulunan test ünitesi [86]
Şekil 5. 2	Deneysel sistemin şematik gorunuşu
Şekii 5. 3	Testler de kullanilan ECO45 G C 3B gaz bruioru [86]
Şekii 5. 4	Testier için kullanılan dairesel kesitli su sogutmali kazan (86)
Şekii 5. 5	Gaz emisyonlarının olçulduğu kazan çıkışı ve baca bağlanti borusu [86]
Şekil 5. d	Festier için kullanılan ECO 45 G C 38 brulor-kazan montaji (86)
Şekil 5. 7	Sistemde delasan sogutina suyu debimetresinden su debisi ölsümü
ŞEKILD. C	Sistemue uolaşan sogurina suyu debimetresinden su debisi olçunu
ŞEKILD. S	fakit basilicilili 21 libar a duşurulduğu regulator seti ve gaz debililetresi 57
ŞEKILD. 1	1. Vanma sonu gaz omisyonları ölcümünde kullanılan ölcme sihazı [96]
ŞEKILD. 1	1 fallilla sollu gaz ellisyolilari olçullurlue kullarılılari olçille cillazi [66] 56
Şekil 5. 1	2 NOVA marka olçme cınazında anlık emisyon olçumlerin gösterimi
Şekil S. 1	3 NOVA marka cinazua aniik emisyonianii delayii oiçum raponan
Şekil o. 1	2.80 m kazan uzunlugu için test kazanının akiş nacminin oluşturulması 75 Brülör akış başminin oluşturulması
Sokil 6 2	Brulor akiş hacınının oluşturulması
SORI C. 3	Prülör'de vakit berusu ve pezullardaki akis hasminin elusturulması
	Brülör'de kullanılan girdan üretecinin medellenmesi
Sekile e	Brülör'de kullanılan aley tutucu dickin medellenmesi
JEKILO. C	

Şekil	6.	7	Brülör'de yakıt borusu, nozullar ve girdap üretecinin gösterilmesi76
Şekil	6.	8	Brülör'de yakıt borusu, nozullar, girdap üretecini ve diskin gösterilmesi 76
Şekil	6.	9	Brülör ve kazan akış hacimlerinin birleştirilmesi77
Şekil	6.	10	Brülör geometrisine ait oluşturulan sayısal ağ79
Şekil	6.	11	Simülasyona hazır hale getirilmiş brülör ve kazana ait sayısal ağ
Şekil	6.	12	Periyodik sınır şartı için 1/4'e bölünmüş geometriye ait sayısal ağ 80
Şekil	6.	13	Farklı düğüm sayılarında kazan eksen eksenindeki sıcaklık değişimleri 80
Şekil	6.	14	Farklı düğüm sayılarında kazan eksenindeki NOx değişimleri81
Şekil	7.	1	Brülör yüküyle atık gazdaki (a) CO ₂ , (b) O ₂ , (c) CO ve (d) NOx değişimleri 89
Şekil	7.	2	λ değişimi ile egzoz gazındaki (a) CO2, (b) O2, (c) CO ve (d) NOx değişimleri 91
Şekil	7.	3	Ocak uzunluğu değişimi ile atık gazdaki (a) CO2, (b) O2, (c) CO ve (d) NOx
			gazları değişimi92
Şekil	7.	4	Türbülans modellerinin kazan ocak ekseni boyunca (a) CO ₂ , (b) H ₂ O, (c) O ₂ ,
			(d) CO, (e) T ve (f) NOx üzerindeki etkisi
Şekil	7.	5	Deneysel ve farklı türbülans modellerinin kullanıldığı HAD
	_	_	simülasyonlarında (a) CO_2 (b) O_2 , (c) CO , (d) T ve (e) NOx karşılaştırılması. 98
Şekil	7.	6	(a) Standard k – ε , (b) Realizable k – ε , (c) RNG k – ε ve (d) RSM tubulans
с I · I	_	_	modellerinin kullanılmasıyla kazan eksen düzleminde oluşan sıcaklıklar . 100
Şekil	7.	/	Standard $K = \varepsilon$, (b) Realizable $K = \varepsilon$, (c) RNG $K = \varepsilon$ ve (d) RSM) turbulans
			modellerinin kullanılmasiyla kazan eksen düzleminde oluşan NOX
اند	7	0.	emisyoniari
Şekli	7.	ð	Turbulans modellerinin ((d) Standard $K = E$, (D) Realizable $K = E$, (C) RNG $K = 101$
Sakil	7	٥	c ve (u) KSIVI) kullallillasiyla kazali eksellillue oluşalı CO ethisyofilar 101 (a) Standard $k = c$ (b) Poalizablo $k = c$ (c) PNG $k = c$ vo (d) PSM türbülanc
Şekii	7.	9	(a) Standard K = ϵ , (b) Realizable K = ϵ , (c) River K = ϵ ve (d) RSIVI to bularis
Sakil	7	10	Thought the second definition of the second d
Şekii	1.	10	(a) = CO(a)
Sekil	7	11	Denevsel ve farklı vanma modellerinin kullanıldığı HAD simülasyonları icin
Şeki	7.		(a) sıcaklık ve vanma emisyonları (b) NOx (c) CO ₂ (d) O ₂ ve (e) CO
			(a) sisterill masi
Sekil	7.	12	Farklı vanma modellerinin kullanılmasıvla ((a) EDC. (b) FR/ED. (c) ED. (d)
3 -			PPC ve (e) NP) kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımları
Şekil	7.	13	Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla ((a) EDC, (b) FR/ED, (c) ED, (d)
-			PPC ve (e) NP) kazan eksen düzleminde oluşan NOx dağılımları
Şekil	7.	14	Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla ((a) EDC, (b) FR/ED, (c) ED, (d) PPC
			ve (e) NP) kazan eksen düzleminde oluşan CO dağılımları 111
Şekil	7.	15	Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla ((a) EDC, (b) FR/ED, (c) ED, (d)
			PPC ve (e) NP) kazan eksen düzleminde oluşan CO ₂ dağılımları111
Şekil	7.	16	Isıl yükün (Q) değişimiyle ocak ekseni boyunca (a) T, b) NOx, (c) CH ₄ , (d) CO ₂ ,
			(e) O ₂ ve (f) CO değişimleri115
Şekil	7.	17	Isıl Yükün (Q) değişimiyle (a) NOx, (b) CO ₂ , (c) O ₂ ve (d) CO değişimi 116
Şekil	7.	18	Isıl Yükün (Q) değişimiyle ((a) 1200 kW, (b) 1085 kW, (c) 866 kW, d) 668
			kW, (e) 459 kW) kazan içi sıcaklıklar118
Şekil	7.	19	Isıl Yükün (Q) değişimiyle ((a) 1200 kW, (b) 1085 kW, (c) 866 kW, d) 668
			kW, (e) 459 kW) kazan eksen düzleminde NOx değişimi119

Şekil 7. 20	Isıl Yükün (Q) değişimiyle ((a) 1200 kW, (b) 1085 kW, (c) 866 kW, d) 668 kW, (e) 459 kW) kazan eksen düzleminde CO değisimi
Şekil 7. 21	Hava fazlalık katsayısının (λ) kazan ocak ekseni boyunca (a) T ve b) NOx, (c)
Şekil 7. 22	CO ₂ , (d) H ₂ O, (e) O ₂ ve (f) CO için değişimi
Şekil 7. 23	Hava fazlalık katsayısının (λ) değişimiyle ((a) λ =1.05, (b) λ =1.20, (c) λ =1.38, d) λ =1.50) kazan eksen düzleminde sıcaklığın değişimi
Şekil 7. 24	Hava fazlalık katsayısının (λ) değişimiyle ((a) λ =1.05, (b) λ =1.20, (c) λ =1.38, d) λ =1.50) kazan eksen düzleminde NOx emisyonları değişimi 126
Şekil 7. 25	Hava fazlalık katsayısının (λ) değişimiyle ((a) λ =1.05, (b) λ =1.20, (c) λ =1.38, d) λ =1.50) kazan eksen düzleminde CO emisyonlarının değişimi 126
Şekil 7. 26	Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle ocak eksen çizgisi üzerinde (a) T ve b) NOx, (c) O ₂ , CO ₂ ve H ₂ O, (d) CO değişimi128
Şekil 7. 27	Farklı ocak uzunluğunda (L) kazan atık gazındaki (a) NOx, (b) CO ₂ , (c) O ₂ ve (d) CO değişimi
Şekil 7. 28	Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle (a) L=1.75 m, (b) L=2.10 m, (c) L=2.45 m ve (d) L=2.8 m) kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımlarının değisimi
Şekil 7. 29	Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle (a) L=1.75 m, (b) L=2.10 m, (c) L=2.45 m ve (d) L=2.8 m) kazan eksen düzleminde oluşan NOx dağılımları değisimi
Şekil 7. 30	Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle (a) L=1.75 m, (b) L=2.10 m, (c) L=2.45 m ve (d) L=2.8 m) kazan eksen düzleminde oluşan CO dağılımları değişimi
Şekil 7. 31	Kazan ocak çapının (D) değişimiyle ocak eksen çizgisi üzerinde (a) T ve b) NOx, (c) CO ₂ ve H ₂ O, (d) CH ₄ , (e) O ₂ ve (f) CO değisimi
Şekil 7. 32	Farklı ocak çaplarında (D) kazan atık gazındaki (a) NOx, (b) CO ₂ , (c) O ₂ ve (d) CO değişimi
Şekil 7. 33	Kazan ocak çapının (D) değişimiyle (a) D=0.55 m, (b) D=0.58 m, (c) D=0.61 m ve (d) D=0.64 m) kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımları değişimi 136
Şekil 7. 34	Kazan ocak çapının (D) değişimiyle (a) D=0.55 m, (b) D=0.58 m, (c) D=0.61 m ve (d) D=0.64 m) kazan eksen düzleminde oluşan NOx emisyon dağılımları değişimi
Şekil 7. 35	Kazan ocak çapının (D) değişimiyle (a) D=0.55 m, (b) D=0.58 m, (c) D=0.61 m ve (d) D=0.64 m) kazan eksen düzleminde oluşan CO emisyon dağılımları değisimi
Şekil 7. 36	Doğal gaz ve metan yakıtlarının yanmasıyla kazan ocak ekseni boyunca sıcaklık (T) ve NOx emisyonları değişimleri
Şekil 7. 37	Doğal gaz, hidrojen ve doğal gaz-hidrojen karışımlarının yanmasıyla ocak ekseninde (a) T, (b) NOx, (c) CO ₂ , (d)CO, (e)CH ₄ , (f)H ₂ , (g) O ₂ ve (h) H ₂ O değisimleri
Şekil 7. 38	Doğal gaz, doğal gaz-hidrojen karışımı ve saf hidrojen yanması durumunda (a) atık gaz sıcaklıkları (T), (b) NOx, (c) CO ₂ , (d) O ₂ ve (e) CO emisyonları değişimi

Şekil 7. 39	Doğal gaz, hidrojen ve doğal gaz-hidrojen kompozit yakıtların yanmasıyla kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımlarının değisimi
Sekil 7 40	Tasarımı ve simülasyonu vanılan eksenel girdan üreteci 148
Şekil 7. 41	Tasarımları ve simülasyonu yapılmış 30° 'de (a) 7K (b) 9K, (c) 11K (d) 13K, (e)
	15K (f) 17K düz kanatlı eksenel girdap üreteçleri149
Şekil 7. 42	30° düz kanatlı girdap üreteci için farklı kanat sayılarında (7K, 9K, 11K, 13K,
	15K, ve 17K) (a) (T), (b) NOx, (c) CH ₄ , (d) CO, (e) O ₂ ve (f) CO ₂ değişimleri 151
Şekil 7. 43	30° düz kanatlı girdap üreteci için farklı kanat sayılarında (7K, 9K, 11K, 13K,
	15K, ve 17K) kazan eksen düzlemi üzerinde sıcaklık dağılımlarının değişimi
Şekil 7. 44	30° düz kanatlı girdap üreteci için farklı kanat sayılarında (7K, 9K, 11K, 13K,
	15K, ve 17K) kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan NOx emisyonlarının
	değişimi
Şekil 7. 45	Tasarımları ve simülasyonu yapılmış 15°, 20°, 25° ve 30° 'de (a) 7K (b) 11K,
	(c) 17K düz kanatlı eksenel girdap üreteçleri155
Şekil 7. 46	7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin (a)
	(T), (b) NOx, (c) ısıl NO, (d) ani NO, (e)CH ₄ , (f)O ₂ , (g) CO ₂ ve (h)CO üzerindeki
	etkisi
Şekil 7. 47	7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin
	kazan eksen düzlemi üzerindeki sıcaklık değişimlerine etkisi159
Şekil 7. 48	7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin
	kazan eksen düzleminde oluşan NOx emisyonlarına etkisi
Şekil 7. 49	7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin
-	kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan CO emisyonlarına etkisi
Şekil 7. 50	11 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin (a)
	(T), (b) NOx, (c) CO ₂ , (d) CO, (e) O ₂ , (f) CH ₄ , (g) Isil NO ve (h) ani NO
	üzerindeki etkisi
Sekil 7. 51	11 kanatlı girdap üretecinde kanat acısı (15°.20°. 25° ve 30°) değişiminin
3	kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımlarına etkisi
Sekil 7. 52	11 kanatlı girdap üretecinde kanat acısı (15°.20°. 25° ve 30°) değişiminin
3 c / . c -	kazan eksen düzleminde oluşan NOx emişvonlarına etkişi
Sekil 7 53	11 kanatlı girdan üretecinde kanat acısı $(15^{\circ} 20^{\circ} 25^{\circ} \text{ ve } 30^{\circ})$ değişiminin
çekii 7.55	kazan eksen düzlemi üzerinde olusan CO emisyonlarına etkişi
Sekil 7 54	17 kapatlı girdan üretecinde kapat acısı (15° 20° 25° ve 30°) değisiminin (a)
ŞCKII 7. 54	(T) (b) NOx (c) CO ₂ (d) CO (e) O ₂ (f) CH ₄ (g) (g) NO ve (b) ani NO
	(1), (b) NOX, (c) CO ₂ , (d) CO, (e) O ₂ , (f) CH ₄ , (g) is in NO Ve (f) and NO (1)
Sokil 7 EE	17 kapatlı girdan ürotoginde kapat açışı (15° 20° 25° ve 20°) değiçiminin
Şekii 7. 55	17 Kallatlı girdap üretecinde kallat açısı (15,20,25, ve 50) degişininini kazan aksan düzlemi üzerindeki sıcaklık değişimlerine etkişi
Solul 7 EG	17 kapatlı girdan ürotoginde kapat açışı (15° 20° 25° ve 20°) değiçiminin
ŞEKII 7. 50	17 Kallatlı girdap üretecinde kallat açısı (15,20,25 ve 50) degişininini kazan aksan düzlemi üzerinde oluşan NOv emigyenlerine etkişi
Calil 7 F7	Kazan eksen duzienn uzerinde oluşan NOX emisyonlarına etkişi 109
Şekii 7.57	17 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) degişiminin
	kazari ekseri duziemi uzerinde oluşan CO emisyonlarına etkisi
Şekii 7.58	Farkii kanat sayisinda (/K, 9K, 11K, 13K, 15K ve 1/K) girdap uretecinde
	kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) degişiminin NOx emisyonu üzerindeki etkisi

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sa	yfa
Çizelge 2. 1	Deneysel ve HAD analizlerinde kullanılan doğal gaz ve bileşenleri [54].	.23
Çizelge 3. 1	Gaz yakıt yanmasında Azot oksit (NOx), Karbonmonoksit (CO),	
	hidrokarbon (CxHy) konsantrasyonu ve islilik derecesi [69]	33
Çizelge 5. 1	ECO45 GC 3B Gaz brülörü kapasitesi ve özellikleri [74]	53
Çizelge 5. 2	Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerin doğruluk-belirsizlik değerleri	.60
Çizelge 6. 1	Düğüm sayısının çıkış NOx emisyonlarına etkisi	80

SANAYİ TİPİ BRÜLÖR-KAZAN SİSTEMİNDE YANMA EMİSYONLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Salih CELLEK

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ali PINARBAŞI

Bu tezde, sanayi tipi bir brülör-kazan sisteminde yanma emisyonlarını araştırmak için farklı brülör ısıl yüklerinde, hava fazlalık katsayılarında ve kazan boylarında deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Sonrasında brülör-kazan test sonuçlarından elde edilen verilerle, yanma sisteminin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli oluşturulmuştur.

ANSYS FLUENT 16 yazılımında bulunan farklı yanma ve türbülans modelleri ile sayısal simülasyonlar gerçekleştirilip, deneysel sonuçlar ile uyumlu yanma ve türbülans modelleri belirlenmiştir. HAD modelinin doğrulanması sonrasında deneysel test parametreleri HAD yöntemiyle de incelenmiştir. Öte yandan aynı sistemde doğal gaz, metan, doğal gaza ısıl yükçe %25, %50 ve %75 oranlarında hidrojen eklenmesiyle oluşan yakıt karışımları ve saf hidrojen (% 100) yanmasıyla oluşan emisyonlar incelenmiştir. Son olarak brülör üzerinde bulunan girdap üreteci yerine yanma emisyonlarını düşürmek amacıyla yeni bir girdap üreteci tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni girdap üretecinin kanat sayısı (7, 9, 11, 13, 15, 17) ve kanat açısı (15°, 20°, 25°, 30°) parametrik olarak incelenmiştir. Böylece kanat sayısı ve kanat açısının yanma emisyonları üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.

Brülör-kazan sisteminde farklı ısıl yükler ile farklı kazan uzunluklarıyla yapılan deneysel çalışmalarda, yanma sonu gaz emisyonları olan NOx, CO ve CO₂ değişimleri sınırlı seviyede kalmaktayken farklı hava fazlalık katsayılarında değişimler daha belirgindir.

Örneğin, NOx emisyonu 32 ppm, CO emisyonu 46 ppm ve CO₂ % 24 oranında değişmektedir.

HAD sonuçlarına göre, doğal gaz metan gazı ile de modellenebildiği görülebilir. Ayrıca doğal gaz-hidrojen yakıt karışımında hidrojen miktarı arttıkça alev boyu ve çapının arttığı CO₂ ve CO emisyon seviyelerinin düştüğü belirlenmiştir. Yakıt olarak %100 H₂ kullanıldığında ise CO ve CO₂ emisyonların oluşmadığı fakat NOx emisyonun önemli derecede arttığı görülmüştür. Son olarak yeni tasarlanan girdap üretecinin 11 kanatlı uygulaması en düşük NOx emisyonuyla sonuçlandı. Ayrıca kanat açısının artması baca gazındaki NOx emisyonunun azalmasına neden olduğu saptandı.

Anahtar Kelimeler: Doğal gaz, hidrojen zenginleştirme, hidrojen, brülör, kazan, NOx, girdap üreteci, kanat sayısı, kanat açısı

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

INVESTIGATION OF COMBUSTION EMISSIONS IN INDUSTRIAL BURNER-BOILER SYSTEM

Mehmet Salih CELLEK

Department of Mechanical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ali PINARBAŞI

In this thesis, experimental tests were carried out at various burner thermal loads, excess air coefficients and boiler lengths in an industrial burner-boiler to investigate the combustion emissions. Subsequently, with the data that was obtained from the burner-boiler experimental tests, a Computational Fluid Dynamics (CFD) model of the combustion system was established.

Numerical simulations were performed with different combustion and turbulence models in ANSYS FLUENT 16 software to determine the optimal combustion and turbulence models in accordance with the experimental results. After validation of the CFD model, the experimental test parameters were also examined by the CFD method. On the other hand, combustion emissions of natural gas, methane, natural gas-hydrogen fuel mixtures (consisted of 25%, 50% and 75% hydrogen addition) and pure hydrogen (100%) were also investigated. Finally, a new swirl generator was designed and replaced with the original swirl generator on the burner to reduce the combustion emissions. Blade number (7, 9, 11, 13, 15, 17) and blade angle (15°, 20°, 25°, 30°) of the new swirl generator were examined parametrically. Thus, the effects of blade number and blade angle on the combustion emissions were determined.

The experimental study that was carried out with different thermal loads and boiler lengths resulted with limited variations in combustion emissions such as NOx, CO and CO₂. However, when different excess air coefficients (λ =1.05, λ =1.38) were used, the

variation in emissions were more pronounced. For instance, the differences in NOx, CO and CO₂ emissions were 32 ppm, 46 ppm and 24%, respectively.

According to the CFD results, it can be seen that natural gas can be modeled also with methane gas. Furthermore, as the hydrogen ratio of the natural gas-hydrogen fuel mixture was increased, the flame length and flame diameter were increased but the CO and CO₂ emission levels were decreased simultaneously. When 100% H₂ was used as fuel, CO and CO₂ emissions were zero but NOx emission was significantly increased. Finally, implementing the new swirl generator with 11 blades resulted with the lowest NOx emission. It was also found that increasing blade angle led to decreased NOx emission in the flue gas.

Keywords: Natural gas, hydrogen enrichment, hydrogen, burner, boiler, NOx, swirl generator, blade number, blade angle

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Hidroelektrik, biyokütle, jeotermal kaynaklar, rüzgâr ve güneş günümüzde enerji üretiminde kullanılan önemli yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Bu kaynaklar enerji formlarından belki de en faydalısı olan ve hayatın her alanında bir ihtiyaç olarak kullanılan elektrik enerjisini sağlamaktadırlar. Öte yandan enerji kaynağı olarak uzun yıllar fosil yakıtlarından kömür kullanılmıştır. Petrol ve petrol türevlerinin keşfedilmesiyle benzin, mazot ve gaz yağı gibi sıvı (akaryakıt) yakıtlar ve doğal gaz gibi diğer fosil yakıtlar ortaya çıkmıştır. Günümüzde enerji gereksinimin büyük kısmı fosil yakıtların yakılmasıyla elde edilen ısı enerjisinden sağlanmaktadır.

Isi enerjisinin açığa çıkmasına neden olan yanma olayı temelde bir yakıt, oksitleyici ve bir tutuşturucu kaynağı gerektiren bir prosestir. Yanma için bu üç faktörün sağlanması gerekir. Bununla birlikte iyi bir yanmanın gerçekleşebilmesi için sıcaklık, zaman ve türbülans gerekmektedir. Yanma bilimi; ısı transferi, termodinamik, kimyasal kinetik, çift fazlı akışkan akışı ve fiziğin bazı alanlarının birleştiren karmaşık bir prosestir. Bu nedenle yanma bilimi hala gelişmekte ve tam olarak anlaşılabilmesi için disiplinler arası bir çalışma gerektirmektedir. Böylece yanma daha iyi uygulanabilir ve kontrol edilebilir.

Yanma için kullanılan yakıtlar hidrojen ve/veya karbon kaynaklı olmaları sebebiyle hidrokarbonlar olarak tanımlanmaktadır. Isı, bu karbon ve hidrojenin oksijen ile tepkimesi sonucunda ortaya çıkar. Hidrokarbonlar katı, sıvı ve gaz fazlarında bulunabilmekte endüstriyel uygulamalarda bu üç faz da yaygın olarak kullanılmaktadır. Yakıtların birim kütlesinin oksitleyici ile yanması sonucu verdikleri enerji o yakıtın ısıl değerini ifade eder. Katı, sıvı ve gaz yakıtları ısıl değerleri bakımından farklılık göstermektedir. Gaz yakıtların ısıl değeri en yüksek, katı yakıtların alt ısıl değerleri ise en düşük değerleri alır.

Doğal gaz, hidrojen ve biyogaz gibi gaz yakıtlar endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir gaz yakıtlardır. Doğal gaz, doğa da bulunma miktarı, farklı coğrafi bölgelerde bulunma olasılığı, insan sağlığı için zararsız olması vb. özelliklerinden dolayı diğer gazlara göre daha geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Günümüzde nüfusun artmasıyla birlikte doğal gazın sanayide ve konutlarda kullanımı git gide artmakta, dolayısıyla dışa bağlılığımız artmaktadır. Bu nedenle enerji santralleri, demir-çelik sektörü, çimento üretim sektörü, cam ergitme fırınları, buhar kazanları vb. enerji yoğun kullanılan alanlar başta olmaz üzere enerji tasarrufu kaçınılmaz bir hal almaktadır. Enerji tasarrufu yapmanın en önemli yollarından biri de yanma teknolojilerine odaklanmak ve yanmayı daha verimli gerçekleştirmektir. Çünkü verimsiz bir yanmada yakıttan yeterince enerji elde edilmeden yakıtın bir bölümü duman gazlarıyla birlikte atılır.

Enerji kaynaklarının verimli kullanılmasının yanında çevre dostu olması da istenmektedir. Bu amaçla günümüzde en büyük enerji kaynağı olarak kullanılan fosil yakıtların yanma ve emisyon seviyeleri, zararlı emisyonların çevresel etkilerinin de bertaraf edilmesi büyük önem kazanmaktadır. Emisyonların en önemli ortak noktası çevre ve insan hayatı üzerindeki zararlı etkileridir. Bu emisyonlar azot oksit (NOx), karbondioksit (CO₂), karbonmonoksit (CO) ve kükürt oksitler (SOx) olarak bilinmektedir. Bu gazlardan NOx asit yağmurlarına neden olmakta, CO₂ atmosferde sera etkisi yaparak küresel ısınmayı tetiklemekte, CO yüksek orandaki zehirleyici bir etkiye sahip olmakla birlikte sera gazı olarak etki yaratmaktadır. Kükürt oksitlerin su ile reaksiyonu sonucu oluşan H₂SO₄, asidik özelliğinden dolayı metal, insan dokusu hatta taş gibi maddeler üzerinde aşındırma etkisi yapar ve konsantrasyona bağlı olarak farklı özellikler gösterebilir. Emisyon değerleri kullanılan brülöre, yanma verimine, alev sıcaklığına, yakıt cınsıne bağlı olarak değiştiği gözlemlenmektedir. Bu zararlardan dolayı gelişmiş ülkelerde yanma sonu emisyon değerleri için uluslararası standartlar getirilmekte ve yanma teknolojilerine önem verilmektedir.

Brülörler, endüstriyel uygulamalarda yakıt ve oksitleyiciyi ön karışım yaparak veya ön karışımsız olarak (difüzyon alevi) yanma hücresinde yakmaya yarayan cihazlardır. Katı,

sıvı veya gaz ile çalışan farklı brülörler olmakla birlikte iki farklı yakıtla çalışabilecek brülörler de mevcuttur. Brülörlü uygulamalarda enerjinin yoğun tüketimi dolayısıyla yanmadan maksimum ısı elde edilmesi bunun yanında emisyonların da minimize edilmesi istenilen bir durumdur. Öte yandan brülörlü yanma hücresinde (fırın, kazan vb.) oluşan alevin yanma hücresi duvarlarına temas etmesi de istenmeyen bir durumdur. Yanma hücresinde alev boyu ve çapının kontrol edilmesi kullanılan brülörler sayesinde gerçekleştirilir. Brülörlerin yaygın kullanımı, yanma verimi ve emisyonlar üzerindeki etkileri nedeniyle performanslarının geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir.

Bu doktora tez çalışmasında, sanayi tipi bir brülör ve kazan ile deneysel olarak farklı brülör ısıl yüklerinde, farklı hava fazlalık katsayılarında ve farklı kazan boylarında testler yapılıp yanma sonu gaz emisyonları incelenip karşılaştırılmıştır. Daha sonra deneysel sonuçlar yardımıyla brülör-kazan sisteminin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modeli geliştirilmiştir. HAD modeli ile ANSYS FLUENT yazılımında kullanılan dört farklı türbülans modeli ve beş farklı yanma modeli ile doğal gaz yanması gerçekleştirilmiş elde edilen sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılıp, deneysel sonuçlar ile uyumlu en uygun türbülans ve yanma modelleri belirlenmiştir. Bunun yanında HAD yöntemi ile tüm deneysel testler (farklı ısıl yükleri, farklı hava fazlalık katsayıları, farklı kazan boyları) gerçekleştirilmiş, her iki yöntemde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Öte yandan aynı brülör-kazan sisteminde doğal gaz, metan, doğal gaza ısıl yükçe %25, %50 ve %75 oranlarında hidrojen eklenmesiyle oluşan kompozit yakıtlar ve saf hidrojen yakılarak farklı yakıtların yanma ve emisyonları incelenmiştir. Son olarak brülör üzerinde bulunan girdap üreteci yerine yanma emisyonlarını düşürmek amacıyla yeni bir girdap üreteci tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni girdap üretecinin kanat sayısı ve kanat açısı parametrik olarak incelenmiş, kanat sayısı ve kanat açısının yanma emisyonları üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Zhou ve arkadaşları [1] biri standart biri de brülör başlığı üzerinde yapılan düzenlemeler ile optimize edilmiş iki brülör ile ikincil havanın da kullanıldığı kömür yakılan bir kazanda yanma sonu oluşan CO, O₂, NOx dağılımlarını ve alev şekillerini her iki brülör için incelemişlerdir. İki brülör ile yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar %6 hava fazlalığına

göre karşılaştırıldığında optimize edilmiş brülörün NOx miktarını 440 ppm değerinden 265 ppm değerine düşürdüğü tespit edilmiştir. Fakat oluşan CO miktarını da %1.02'den %1.33'e çıkarmıştır.

Kamal [2] farklı şekillerde tasarlanan kömür ve hava ön karışımlı yakma sistemlerinde, farklı açılarda jet akış şekillerini, kömür tanecik boyutu ve farklı nozul şekillerinin NOx değişimine olan etkilerini incelemiştir. Ayrıca farklı ısı oranlarının (doğal gaz ile giren ısının kömür ile giren ısıya oranı) artan birincil hava yüzdesine göre NOx değişimi incelenmiştir. Çalışmada helisel boru performansının NOx bakımından dairesel kesitli boru performansından daha iyi olduğu, kömür tanecik boyutunun küçülmesiyle NOx emisyonun azaldığı, bitümlü kömürün antrasit kömür ve kuru oduna göre en yüksek NOx emisyonu oluşturduğu, kuru odunun ise en düşük NOx emisyonu oluşturduğu vurgulanmıştır.

Adewole ve arkadaşları [3] LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) yakıtlı girdap üreteçli bir brülörün farklı girdap açılarında (35°- 60°) ve farklı ekivalans değerlerinde kullanılmasıyla elde ettikleri NOx, CO ve T (sıcaklık) deneysel sonuçlarıyla Yapay Sinir Ağı modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada girdap üreteci 35°- 40°- 45° derecelerdeki kanat açılarında düzensiz bir değişim gözlenmiş, artan kanat açılarıyla, (55°, 60°) NOx emisyon değerlerinin düştüğü saptanmıştır. Kanat açısının alev sıcaklığı üzerindeki etkileri de düzensiz iken, kanat açısının 35°'de olması durumunda en düşük alev sıcaklığı elde edilmiştir. Yapay sinir ağı tekniğiyle geliştirilen modelin, emisyonların tahmininde büyük doğruluk derecesine sahip olduğu ifade edilmiştir.

Bhoi ve Channiwala'nın [4] çalışmasında farklı debilerde, farklı kanat açılarında ve farklı hava/yakıt oranlarında emisyon karakteristiği ve eksenel sıcaklık dağılımları ön karışımlı 150 kW'lık girdap üreteçli bir brülör ile incelenmiştir. Genel olarak artan debi ve girdap açısıyla alev sıcaklığının maksimum olduğu saptanmıştır. Maksimum alev sıcaklığı, minimum basınç düşümü ve minimum emisyon değeri girdap açısının 60° olduğu ifade edilmiştir.

Abdelaal ve arkadaşları [5] 0.7-1.3 arasında değişen ekivalans oranlarında ve %21-23-25 oksijen zenginleştirme oranlarında çalışma yaparak bu iki parametrenin radyasyon verimliğine ve yüzey sıcaklıklarına etkilerini incelenmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalara göre radyasyon verimliliği yakma oranı ve yakıt hava oranına bağlı olarak %45 'e kadar ulaşılabilmiştir. Yüksek radyasyon verimliliği düşük yakma oranında ve düşük yakıt hava oranında ulaşılabilir olduğu vurgulanmıştır. Radyasyon verimliliği oksijen zenginleştirme ile ve bu oranın artması ile önemli derecede artmaktadır. Maksimum yüzey sıcaklığı stokiyometrik oranı civarında elde edilmekte, bu da açık alevli brülörler ile tutarlı olmaktadır. Oksijen oranının artmasıyla yüzey sıcaklığı artmaktadır. Yanma havasında oksijen miktarının artmasıyla egzoz gaz sıcaklığında düşüş meydana gelmektedir.

Jing ve arkadaşları [6] bir brülörde dıştaki ikincil hava bölümüne girdap üreteci eklenmesiyle kanat açısının (25°- 30°- 35°- 40°) akış karakteristiği, gaz sıcaklığı ve gaz bileşenleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan incelemede dıştaki ikincil hava kanat açısının azalması ile hava girdap (swirl) yoğunluğu, ayrılma (sapma) açısı, merkezi resirkülasyon bölgesinin maksimum uzunluğu ve çapının arttığı saptanmıştır. Jet akışın türbülans yoğunluğu ilk olarak arttığı ve sonrasında ani olarak düştüğü görülmüştür. İkincil hava bölümündeki girdap üreteci açının düşmesi ile ilk kademedeki gaz sıcaklığının artış oranı ve ikinci kademedeki azalma oranı jet akışı yönünde artmıştır. İkincil hava girdap üretecinde kanat açısının 30° ve 35° olması 25° ve 40° göre daha düşük NOx emisyonları oluşturur. Kanat açısının 35° olması daha uygun merkezi resirkülasyon bölgesi oluşmasına, yanma karakteristiğine ve daha düşük NOx oluşmasını sağlar.

Abuelnuor ve arkadaşları [7] bir laboratuvar ölçekli fırının çalışmasını ve emisyonlarını alevsiz yanma rejimi altında doğal gazın yakıtı ile incelemişlerdir. Sıcaklık ve yanma emisyon ölçümüne izin vermek için yanıcıya çeşitli bağlantı noktaları entegre edilmiştir. Ayrıca alevsiz yanma modunda havanın ön ısıtmalı ve ön ısıtmasız durumları incelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre yakma havasının ısıtılıp veya ısıtılmadan da alevsiz yanma moduna erişilebildiği ifade edilmiştir. Ayrıca doğal gaz kullanılarak başarılı bir şekilde alevsiz yanma modunda çalışılabileceği görülmüştür. Emisyon değerlerine gelince alevsiz yanma durumu geleneksel yanmaya göre emisyon değerleri bakımından daha elverişli olduğu ifade edilmiştir.

Tamura ve arkadaşları [8] geleneksel ve ikincil hava portları olan bir HTAC (high temperature air condition) modunda çalışabilen bir brülör ile pülverize kömür

yakılmasında NOx emisyon performanslarını incelemişlerdir. Brülörler ilk çalıştığında HTAC modunda çalışamazlar çünkü bir süre soğuk hava şartlarında çalıştırılması gerekmektedir. HTAC modundaki brülöre yüksek hava ön ısıtılma derecelerinde çalışma durumlarında ihtiyaç duyulmaktadır. Bu iki durumun göz önüne alınmasıyla tasarlanan yeni girdap üreteci her iki modda da çalışabilen bir brülördür. Yapılan incelemede ikincil hava portları olan ve HTAC modunda çalışabilen brülörün yanmada emisyon değerlerini düşürdüğü ve yanma verimini de muhafaza ettiğini vurgulanmıştır. Öte yandan hava ön ısıtılma derecesinin artmasıyla NOx emisyonları da yükselmiştir.

Sarlej ve arkadaşları [9] girdap üretecine sahip bir brülörde iki kademeli yakıt yanmasını gerçekleştirdiler. Birinci kademede ana gövdeden yakıt gönderilmektedir. İkinci yakıt girişi de brülör etrafında farklı nozul konumlarında karışıma dâhil edilmektedir. Bu çalışmada ikincil yakıt nozul geometri konumlarının NOx emisyonuna olan etkisi incelenmişler. Yapılan araştırmada ikincil yakıt nozul konumlarını konumlarının NOx değerine etki ettiği görülmüş ve en uygun noktalar tespit edilmiştir.

Shin ve arkadaşları [10] deneysel ve CFD yöntemlerini kullanılarak bir fırında brülörlerin farklı noktalardaki konumlarının ve karşılıklı çalışabilen paralel ve karşıt konumlandırılabilen iki brülörün yanmaları esnasında emisyon değerlerine etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada CFD ile ölçülen emisyon değerleri deneysel değerlerden çok daha yüksek çıkmıştır.

Zeng ve arkadaşları [11] düşük NOx üreten eksenel-girdap üreteçli bir brülör ile yanma karakteristiği ve emisyon değerlerini incelemek için ikincil (sekonder) hava bölümünde bulunan girdap üreteci için kanat açısı etkisini deneysel (15°-25°-40°) ve nümerik olarak (10°-15°-25°-35°-45°) incelediler. Yapılan çalışmada kanat açılarının merkezi resirkülasyon bölgelerine etkisi, kazan ekseninde alev sıcaklıklarına etkisi ve akış alanının çıkış düzlemindeki ortalama NOx üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Yapılan incelemede deneysel sonuçlarla CFD sonuçlarının uyumlu olduğu vurgulanmış, eksen üzerinde alev sıcaklığının artan kanat açısıyla arttığı belirlenmiştir. Ayrıca ikincil hava için kullanılan girdap üretecinde artan kanat açısıyla NOx emisyonunun artma eğiliminde olduğu görülmektedir. NOx değerleri karşılaştırıldığında 15° kanat açısında minimum NOx değeri oluştuğu ifade edilmiştir.

Li ve arkadaşlarının [12] deneysel çalışmasında, farklı oranlarda baca gazının üç farklı yakıt türünün 100% biyokütle, 55% kömür+45% biyokütle ve 100% kömür yanmasına sevk edilmesiyle oluşan emisyon değerleri incelenmiştir. Bunun yanında oksijen zenginleştirmenin de emisyonlara etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda biyokütle yakıtlı yanma da oluşan emisyon değeri minimum iken, %100 kömür yanması durumunda emisyon değeri maksimumdur. Üç farklı yakıt türü ile farklı gaz sirkülasyon oranlarında emisyon değerleri ölçülmüş ve yapılan incelemede sirkülasyon oranının %3-%5 arasında önemli olduğu görülmüştür. Ayrıca havanın ön ısıtılması durumunda artan hava sıcaklığı ile NOx değerinde önemli artışlar (R=0 baca gazı sirkülasyonu olmadan) görülmüştür. Oksijen ile zenginleştirme ile NOx emisyonu artış göstermiş (R=0 için) fakat artan gaz sirkülasyon oranı ile (R=%7-%10 arası) NOx emisyonları 200 ppm seviyesinden 30 ppm seviyesine düşmüştür.

Tu ve arkadaşları [13] doğal gaz kullanılarak deneysel çalışması yapılmış brülör-firin sisteminin CFD analizlerini gerçekleştirip, yanma hücresi tasarımlarının NOx emisyonlarına, alev boyuna ve sıcaklık dağılımlarına etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada fırın çatısı ve yan duvar arası α açısı olarak tanımlanmış ve bu açının 80°, 85°, 90°, 95° ve 100° durumlarında simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemede deneysel ve CFD çalışmalarının bir uyum içinde olduğu ifade edilmekte, yanma hücresinin yanma karakteristiği ve karışım üzerinde etkili olduğu ifade edilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde artan yanma hücresi α açısının artmasıyla alev boyunun uzadığı, artan açıyla daha güçlü resirkülasyonlar meydana gelmektedir. Artan resirkülasyonlarla daha fazla yanma ürünün reaktantlar arasına karıştığı bu durumun da alev sıcaklığı ve NOx emisyonlarını düşürdüğü ifade edilmiştir.

İlbaş ve Yılmaz [14] hava fazlalık katsayısının yanma verimi ve emisyonlara etkisini araştırmışlardır. İki farklı fuel oil, üç farklı sıvı-yakıt kazanında yakılmış ve duman kanalının değişik radyal uzaklıklarda kazan yanma verimleri ve emisyon davranışları incelenmiştir. Yapılan ölçümlere göre hava fazlalık katsayısı artıkça NOx değerinin genellikle azaldığı, SO₂ değerinin fazla değişmediği, CO ve ısıl verimin de azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca SO₂ 'nin emisyondaki kükürt oranına bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

Khanafer ve Aithal [15] teorik olarak yanma olayından bahsederek ve CFD programlarından ticari FIDAP programı ile bir yanma odasında yanma olayını farklı duvar sıcaklıklarında ve girdap sayısında bir durum çalışması olarak incelemişler. Farklı girdap sayında ve farklı duvar sıcaklıklarında yapılan çalışmaya göre, girdap sayısı artınca radyal yöndeki fırın sıcaklık dağılımı düşmekte eksenel yönde ise farklılık göstermektedir. Girdap sayısının NOx değerleri üzerindeki etkisi farklılık göstermektedir.

Veríssimo ve arkadaşlarının [16] çalışmasında brülörün orta bölmesinden hava girişi, çevresindeki deliklerden de yakıt girişi (18 adet) olmaktadır. Hava borusunun çapı 6 mm-10 mm arasında olduğu deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Sonrasında CFD çalışması da yapılmış ve deneysel sonuçlar ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak hava boru çapı küçüldüğünde, alev boyunun biraz uzadığı görülmüştür. Aynı zamanda NOx emisyon değerinde düşme görülürken, CO ise artmaktadır. Hava fazlalık katsayısının 1.3 ve altında olması durumunda brülörün alevsiz modda çalıştığı görülmüş. Fakat hava fazlalık katsayısı 1.7 'nin üstüne çıktığında ise alevsiz yanma modundan çıkıp alevin göründüğü moda geçmektedir. Burada bir takım sıkıntıların meydana gelebileceği ifade edilmektedir.

Barakat ve arkadaşlarının [17] çalışmasında brülör ana girişinde hava akmakta dışında ise farklı delik sayısında yakıt akmaktadır. Bu delikler 12-24-36 adet olmak üzere çapları da sırasıyla 2 mm-1.4 mm-1.1 mm'dir. Bu delik sayıları ve çaplarında 3 farklı durum için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde boru toplam kesit alanı sabit kalmak şartıyla boru sayısı arttıkça merkez çizgi üzerindeki eksenel sıcaklığın arttığı, hava girişleri aynı kalmak şartıyla 3 durum için (12-24-26) boru sayısı artıkça alev uzunluğunun düştüğü ifade edilmektedir.

Webster'in [18] çalışmasında düşük NOx üreten bir brülör-kazan yakma sisteminde sıcaklığının NOx emisyonuna etkisi incelenmiştir. Deneyler için sadece ortam havası kullanıldığında oluşan NOx minimum iken, baca gazı ile ısıtılmış yüksek sıcaklıktaki yanma havasıyla kullanıldığında ise NOx miktarı artmaktadır. Sıcaklık artıkça oluşan NOx değeri de artmaktadır.

Kang ve arkadaşlarınının [19] çalışmasında dimetil eter/hava ön karışımı sonucu oluşan reaksiyon bölgesi boyutunu deneysel ve numerik olarak çalışılmış ve farklı hava fazlalık

oranlarında, farklı ısıl yüklerde çalışmalar yapılmıştır. Sonuç olarak alev yapısı üç bölgeden oluşmuş, alev çekirdek alanı (FCA), resirkülasyon bölgesi 1, RZ 1, ve resirkülasyon bölgesi 2, RZ2. FCA sıcaklığının büyük oranda hava fazlalık oranına bağlı olduğu, yüksek hava fazlalığı durumunda bu bölgedeki sıcaklığın düştüğü ifade edilmektedir. Hava fazlalığının emisyonlar üzerinde de önemli etkisi olduğu ve artan hava fazlalığıyla CO seviyesinin düştüğü görülmüş. Isıl(termal) yükün RZ1 ve RZ2'nin sıcaklığı üzerinde güçlü etkisi olduğu fakat akış yapısı üzerinde ise kısmi etkisi olduğu ifade edilmiştir. Fırın gaz çıkış sıcaklığı ısıl yüke bağlı olarak artma eğilimindedir. Akış yapısının sıcaklık üzerinde kısmi etkisi olduğu vurgulanmış.

Cozzi ve Coghe'nin [20] yapmış oldukları çalışmada, girdap üreteçli ön karışımlı bir yakıcıda kademeli yakıt püskürtme şekli eksenel ve radyal yönleri için incelenmiştir. Ayrıca farklı girdap sayısı ve farklı ekivalans değerlerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmaya göre, eksenel yönde kademeli yakıt püskürtmenin NOx üzerindeki etkisinin az olduğu söylenmiş, fakat radyal yönde yakıt püskürtmenin ise daha hızlı santrifüj karışım sağladığı ve böylece daha kısa kalma süresi gerektirmesi nedeniyle daha düşük NOx oluşturduğu belirtilmiş. Ayrıca radyal yönde püskürtme ile daha kararlı bir karışım sağlandığı ifade edilmektedir.

Kang ve arkadaşları [21] üç farklı yakıtın alev karakteristiğini farklı yakıt nozul hızlarında incelemiş, artan yakıt hızıyla alev boyu değişimini incelemişlerdir. Sonuçlara göre yakıt hızı artıkça alev boyunun bir miktar arttığı ve sonrasında sabitlendiği görülmüş. Sabitlenme nedeni olarak da sabit hava miktarında çalışılması gösterilmiştir.

Zhu ve Gore'nin [22] çalışmasında radyasyonun yanma ve emisyonlar üzerindeki etkisi basınca bağlı olarak difüzyon alevinde incelenmiştir. Bu çalışmada radyasyon ile ilgili literatür bilgileri verilmekte, bir boyutlu karşıt akışlı laminer metan/hava ile OPPDIF kodu kullanarak nümerik simülasyon gerçekleştirilmiş. 1 - 40 atm arasında basınç değişiminin NO emisyonlarına ve sıcaklığa etkisi gösterilmiştir. Artan basınçla CO, NO ve C₂H₂ kirleticilerin azaldığı fakat kurumun arttığı görülmektedir. Burada kurum hacimsel kesri basıncın karesi ile orantılı olarak artmakta, kurum kütle kesri ve kurum emisyonu basınçla lineer olarak artmaktadır. Basıncın 1 atm'den 40 atm değerine çıkarılması (u=10 cm/s) alev maksimum sıcaklığını 220 K artırmakta, kurum emisyon indeksini de 55 kat artırır fakat NO emisyon indeksini % 25 azaltmaktadır. Yüksek basınçta (P= 40 atm, u=10 m/s) radyasyon ısı kaybı ihmal edildiğinde alev pik sıcaklığı 90 K, kurum hacimsel kesri pik değeri %30, CO mol kesri %20 ve NO mol kesri %86 artmaktadır. Gaz molekül radyasyonun kurum partikül radyasyonundan daha güçlü olduğu ifade edilmiştir. Püskürtme hızının 10 cm/s 'den 100 cm/s ve 200 m/s çıkarılması, kurum hacimsel kesri ve kurum emisyon indeksini sırasıyla %85 ve %97 ile düşürmektedir.

Lee ve arkadaşlarının [23] çalışmasında, biyokütle ve hava yanmasına ilave olarak CO₂ gazı seyreltme amaçlı farklı oranlarda sisteme verilerek emisyonlara etkisi incelenmiştir. Radyasyon ısı yayınımı, CO₂ yüksek ısı yayınım hızı nedeniyle alev sıcaklığını daha da düşürmektedir. Seyreltmek amaçlı kullanılan CO₂ alev sıcaklığı üzerine etki ederek alev sıcaklığını düşürmekte, dolayısıyla oluşan ısıl NOx azaltmaktadır.

Bidi ve arkadaşlarının [24] çalışmasında türbülanslı ve ön karışımlı bir odada gaz radyasyonunun sıcaklık ve radikallere etkisi incelenmiş. Bu çalışmada radyasyon olduğunda maksimum alev sıcaklığı azalmış, çünkü H₂O ve CO₂ kütle kesirlerinde (mass fraction) radyasyonsuz duruma göre azalma söz konusudur. Ayrıca radyasyonun varlığı radikallerin konsantrasyonlarına daha çok etki ettiği vurgulanmış.

İlbas'ın [25] çalışmasında radyasyonlu ve radyasyonsuz ön karışımlı alev numerik olarak Fluent'te çalışılmış. Radyasyon olmadığı zaman sıcaklık ve NOx miktarı yüksek çıkıyor, aktifleştiğinde ise, her ikisi de düşüyor.

Costa ve arkadaşları [26] propan ve etilenin hava ile ayrı ayrı yanmasını test ederek farklı baca gazı resirkülasyon yüzdesinde (0, 10, 20, 30, 40, 50, 57) ve farklı hava fazlalık yüzdelerinde (%1, 7 ve 14) yanma emisyonlarının değişimini incelediler. Yapılan çalışmaya göre baca gazı (O₂, CO₂, CO, UHC, NOx) resirkülasyon oranının artması her iki yakıt yanmasında oluşan NOx emisyonlarını düşürmektedir. Ayrıca NOx ile birlikte CO ve UHC emisyonlarını da düşürücü etkiye sahip olan baca gazı resirkülasyonun en uygun oranları propan gazı için %30, etilen gazı için de %50 olduğu belirlenmiştir. Baca gazı resirkülasyon oranı yanma verimi, alev kararlılığı ve CO emisyon değerini azaltmadan NOx emisyonunu düşürdüğü anlaşılmıştır. Baca gazı resirkülasyonu yapılmaksızın etilen yanması sırasında oluşan NOx emisyonu seviyesi propana göre daha düşük olduğu görülmekte fakat baca gazı resirkülasyonu ve hava fazlalığının propan yanmasında oluşan NOx emisyonlarına etkisinin daha fazla olduğu görülmektedir. Öte yandan hava fazlalık yüzdesinin (%1 'den sırasıyla %7 ve %14 yükselmesi) artması her iki yakıt için NOx emisyonlarına olumsuz yönde etki etmiş ve her iki yakıt yanmasında NOx seviyesini artırmıştır.

Matsumoto ve arkadaşlarının [27] çalışmasında temel olarak dimetil eterin yanması farklı resirkülasyon oranlarında, farklı hava fazlalık oranlarında ve farklı hava ön ısıtma değerleri için incelenmiş bu parametrelerin yanma emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Çalışma incelendiğinde baca gazı resirkülasyonu (FGR) oranı artıkça emisyon değerleri düşmüştür. Bu durum havanın ön ısıtmasına (300 K, 600 K) bağlı olarak değişmektedir. FGR'nin en yüksek çıkacağı oran %85'tir. Bu durum için $\lambda = 1,5$, T_{air}=600 K şartları söz konusuyken erişilebilmektedir. FGR ile NOx emisyon değeri, ilk başlangıç değerine göre laboratuvar test ünitesinde (11 kW) % 85, endüstriyel ünitede (700 kW) %25 oranında düşmüştür. Ayrıca hava ön ısıtma derecesinin artmasıyla (300 K den 600 K'e) emisyon değerleri artmış. Hava fazlalık katsayısının artmasıyla NOx emisyonu düşmüş (11 kW). 700 kW test şartlarında ise $\lambda = 1,2$ değerinden $\lambda = 1,8$ değerine artması NOx emisyonunu düşürmüş, $\lambda = 1,8$ 'den $\lambda = 2,1$ 'e artması ise NOx emisyonunu artırmıştır.

Cuoci ve arkadaşları [28] deneysel ve numerik olarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında yarı endüstriyel iki fırında (0,78 MW ve 1MW) doğal gazı saf oksijen ile yakarak sıcaklık, CO_2 , O_2 ve NO_x ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlar. Simülasyon için türbülans-kimyasal kinetik etkileşimi için tavsiye edilen Eddy Dissipation Concept (EDC) modeli kullanarak deneysel sonuçlarını iki farklı mekanizma Glarborg (33 tür ve 152 reaksiyon), DRM22 (22 tür, 104 reaksiyon) ve bir kinetik post-processor sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Deneysel ölçümleri radyal yönde üç farklı mesafede (220mm, 820mm, 1420mm) ölçmüşler. Bu çalışmada doğal gazın bileşenleri %86 CH $_4$, %5.40 C₂H₆, %1.87 C₃H₈, %0.58 C₄H₁₀, %0.14 C₅H₁₂, %1.79 CO₂, %4.01 N₂, %0.21 O₂'dir. C₃H₈, C₄H₁₀ ve C₅H₁₂ kütlesel olarak hesaplanıp C₂H₆ olarak modellenmiştir. 50000 mesh kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada türbülansı için Standard κ - ε modeli, radyasyon modeli için DO, basınç-hız çifti için SIMPLE, basınç algoritması için PRESTO! Kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonunda emisyonların mekanizma ve post prosessing ile iki farklı şekilde tahmin edilmesinin zorluğu ve zayıflıkları olduğu ifade edilmekte, bu nedenle ara türlerin de bilinmesinin bir ihtiyaç olduğunu belirtilmektedir. Bunlara rağmen deneysel ve nümerik sonuçların kabul edilebilir olduğu vurgulanmaktadır.

Benítez ve arkadaşları [29] atmosferik bir brülörde birincil ve ikincil hava giriş mesafelerinin etkisini nümerik olarak iki ve üç boyutlu olmak üzere toplamda 9 simülasyon ile ortaya koymuşlardır. Nümerik çalışmalarında türbülans için Standard ĸ- ε modeli, radyasyon modeli için P1, basınç algoritması için PRESTO! kullanılmıştır. Yanma modeli olarak metan-hava iki basamaklı reaksiyon mekanizması kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada atmosfer şartlarında (P=1 atm) çalışılması yüksek basınç şartı olarak tanımlanmış. Gaz akışı için sıkıştırılabilir yaklaşım tercih edilmiş ve bunun nedeni olarak Mach sayısının 0.1'den büyük olmasına bağlamıştır. Mach sayısının bu değerden daha düşük olması durumunda sıkıştırılabilirlik etkisinin ihmal edilebileceği ifade edilmektedir. Sonuç olarak 2 boyutlu çözümün üç boyutlu çözüm kadar iyi bir yaklaşım olduğunu vurgulayarak, ikincil hava giriş regülatörü kapatıldığında yanma tamamlanamadığını ve bu nedenle CO ve alev sıcaklık değerlerinin yükseldiği ifade edilmektedir.

Silva ve arkadaşları [30] 2 boyutlu eksenel simetrik bir silindirik yanma odasında doğal gazı metan olarak ele alıp, metan-hava iki basamaklı reaksiyon mekanizması ile Eddy Breakup – Arrhenius modeliyle yakmışlardır. Bu çalışmada yanma odası ısıl radyasyonu bölgesel bir yaklaşımla çözümlenmiştir. Bu yaklaşımda dalga boyu o bölgedeki gaz özelliklerine bağlıdır. Bu gaz özellikleri Weighted-Sum-of-Gray-Gases-Model (WSGGM) ile çözümlenmektedir. Yanma odası diferansiyel denklemler hacimsel kontrol yaklaşımıyla çözülmüştür. Bu çalışmada literatürden elde edilmiş deneysel verilerin simülasyonu yapılmış ve yanma odası içerisinde CH₄, T, O₂, CO ve CO₂ sonuçları eksenel ve radyal yönlerde iki durum için karşılaştırılmıştır. Yanma odası boyunca iki durum arasında farklılıkların gözlemlendiği özellikle CO₂ için belirgin farklılıkların olduğu görülmüştür. Fakat reaktantların püskürtüldüğü noktanın 1.1 m mesafesinde, nümerik ve deneysel sonuçların birbiriyle iyi derecede uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Bouras ve arkadaşlarının [31] LES ve PDF modellerini kullanarak yaptıkları sayısal çalışma, deneysel verilerle uyum olup, sonuçlar tatmin edicidir. Çalışmada metana ilave edilen

hidrojen miktarının, reaktif sistemin kimyasal ve fiziksel verilerine etki ettiği ve yanan gazların sıcaklık ve hızının yükselmesine, CO gazlarının da azalmasına neden olmuştur.

Haj Ayed ve arkadaşlar [32] hidrojen yanmasında brülör tasarım parametreleri ve yanma modellerinin alev yapısı, akış alanı ve NOx emisyonları üzerindeki etkisini inceledi. Çapı 0,3 mm olan bir yakıt enjektörü, düşük enerji yoğunluğu için atmosferik koşullar altında mikromix brülöründe test edildi. Sayısal olarak gerçekleştirilen bu çalışma da hidrojen yanmasında alev yapısı ve NOx emisyon seviyesi, brülör performansı optimizasyonunu daha ileriye taşımak için akış karakteristiğinin anlaşılmasına yardımcı oldu. Haj Ayed ve arkadaşları [33] ayrıca enjektör çapı 1 mm olan yüksek enerji yoğunluğuna sahip mikromix brülör ile sayısal olarak farklı tasarım parametrelerinin NOx emisyonu ve alev yapısı üzerinde etkisini incelemiştir. Bulgular göstermiştir ki, mikromix brülörünün kurudüşük NOx seviyesi doğruladığında, enerji yoğunluğu artmaktadır. Artan enerji yoğunluğu, kalın ve uzun alev ve yüksek sıcaklık oluşumuna neden olduğu ifade edilmiştir.

Sandalcı ve Karagöz [34] 1300 rpm sabit motor devri ve 5,1 kW sabit gösterge gücü ile çalışan bir dizel motoru kullanılarak hidrojen enerji kesrinin gösterge termik verimliliği, belirgin gösterge emisyonları CO, CO₂ ve duman emisyonları üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlara göre gösterge ısıl verimi, belirgin CO, CO₂ ve duman emisyonlarının artan hidrojen kesriyle azaldığını, fakat isfc ve NOx değerlerinde artış (sırasıyla % 36 ve % 46 için) gerçekleşmiştir. Üstelik en yüksek ısı salınım oranı artan hidrojen enerji kesri ile arttığı gözlenmiştir.

Schefer ve arkadaşları [35] fakir karışım şartları altında, ön karışımlı girdapla kararlı hale getirilmiş alevde metanın hidrojen ile zenginleştirmesinin yanma karakteristiklerine etkisini incelediler. Sonuçlar metan-hava karışımına orta miktarda hidrojenin eklenmesinin OH pik değerini arttırdığını göstermektedir. Hidrojen ilavesi alev yapısında belirgin bir değişikliğe yol açmakta, görünümün daha kısa ve daha sağlam bir hal aldığı ifade edildi. Hesaplamalarda, metanın hidrojen ile zenginleştirilmesinin alevin gerilme direnci ve alevdeki OH seviyelerini artırdığını ortaya çıkardı.

Ouimette ve Seers'ın [36] çalışmasında, NOx emisyon endeksleri, geniş bir eşdeğerlik oranları aralığında beş farklı H₂ / CO / CO₂ yakıtının kısmi karışımlı laminer alevleri için

deneysel olarak ölçülmüştür. Bu yakıtlar aracılığıyla H₂/CO oranı ve CO₂ konsantrasyonunun NOx emisyonları, alev görünümü, görünür alev yüksekliği ve alev sıcaklığı üzerindeki etkileri sunulmaktadır. EINOx değerleri, $1.0 \le \Phi \le 1.6$ olduğunda artar, daha sonra $3.85 \le \Phi \le \infty$ aralığına yavaş yavaş azalmadan önce en yüksek değere yakındır. CO₂ konsantrasyonunun arttırılması eşdeğerlik oranları için EINOx değerini düşürürken, H₂ / CO oranındaki artış $\Phi \le 2.0$ olduğu zaman EINOx değerini düşürür ve daha zengin karışımlar için önemsizdir. Alev sıcaklıklarındaki değişim EINOx eğilimlerine yakındır. H₂/CO oranı arttıkça maviden turuncuya alev renginin değişimi, yanma ürünlerinde daha yüksek CO seviyeleri ile açıklanabilir.

Dutka ve arkadaşları [37] kısmi karışımlı bir brülörde CH₄ ve H₂ yanmasından kaynaklı NOx emisyonlarını ve hız alanını incelediler. NOx emisyonlarının ölçümü 15-25 kW brülör ısıl yükleri için ve 1050-1350°C yanma odası sıcaklığı bölgesi için gerçekleştirildi. Akış alanının yakıt tipi ve brülör tasarım parametreleri gibi faktörlerden nasıl etkilendiğini araştırmak için PIV ölçümleri yapıldı. Araştırmanın ana sonuçlarına göre brülör boğazına göre lance konumu, NOx emisyonlarını ve alev kararlılığını etkileyen önemli bir tasarım parametresidir. NOx emisyonlarını, mızrağı brülör boğazına doğru kaydırarak, boğazın hava-yakıt karışımının hızını arttırarak düşürülebilir. Bu etki yakıthava karışımındaki değişikliklerden ve yanma odasındaki baca gazının yüksek hızdaki hava akımı tarafından yanma bölgesine yakalanmasından kaynaklanabilir. Brülör boğazını (borusunu) fırına doğru itmek hızları arttırır ve devridaim alanının uzunluğunu azaltır. Devridaim bölgesinin uzunluğunun azaltılması, giriş boğaz hızının yüksek olmasından değil, sadece brülör geometrisinin değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır. Oda sıcaklığının arttırılması hem CH₄ hem de H₂ için 700°C-1050°C'lik bir sıcaklık aralığında NOx emisyonlarında yaklaşık 1.5 kat artış anlamına gelmektedir. Yüksek sıcaklık aralığında ateşleme sıcaklığının kısmi değişiklikleri bile NOx emisyonlarında önemli artışa neden olabileceği vurgulanmaktadır.

Çok amaçlı yoğun deneysel çalışmalar birçok araştırmacı tarafından gerçekleştirilmektedir. Öte yandan, bilgisayar teknolojisindeki son gelişmeler iş makinası, yüksek performanslı hesaplama sistemleri (HPC), bilgisayar destekli tasarım ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) gibi araçların gelişmesi herhangi bir makinenin tasarımında veya karmaşık ve yüksek türbülanslı iç akışlarının incelenmesinde belirgin

olarak önemli kolaylıklar sağlamaktadırlar. CAD ve CFD sadece tasarım aşamasını ve iç akışı yorumlamaya izin vermez, ürün bileşenlerini daha az maliyetle ve daha kısa zamanda optimize etmeye de imkân sağlar [38].

1.2 Tezin Amacı

Literatürden görüleceği üzere, doğal gaz ile ilgili birçok çalışma mevcut olup, birçok parametrenin etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiş bulunmaktadır. Fakat sanayi tipi brülör, kazan ve bunların farklı çalışma şartlarında çalıştırılmasıyla ilgili çalışma sayısı kısıtlı, brülör ve kazan sisteminde farklı yakıtla çalışma sayısı da yok denecek kadar azdır. Öte yandan hidrojenin yeni bir alternatif enerji kaynağı olduğu ve birçok alanda değerlendirilme potansiyelinin bulunması için daha fazla saha testi yapılması gerektiği literatürde ifade edilmektedir. Gaz türbini yakıcısında hidrojen yanması üzerine yoğunlaşan birçok çalışma olmasına rağmen, hidrojen yakıtlı brülör çalışması oldukça azdır. Başka bir deyişle, özellikle brülörlü yanma sistemlerinde hidrojen zenginleştirmeli doğal gaz yanması çalışmaları çok kısıtlıdır. Son olarak brülör-kazan sisteminde özellikle kullanılan girdap üreteçleri ilgili çalışma sayısı da pek azdır. Literatürde girdap üreteçleri ile var olan çalışmalarda da kanat açısı ele alınmış fakat kanat sayısı etkisi göz ardı edilmiştir.

Bu çalışmada, brülör-kazan sisteminde farklı ısıl yükleri, farklı hava fazlalık katsayıları, farklı kazan uzunlukları ve farklı kazan çaplarında doğal gaz yanmasıyla yanma emisyonları incelenmiş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonrasında mevcut brülör ile sabit ısı yükünde (1085 kW) alternatif yakıt olarak %25, %50 ve %75 oranlarında H₂ ile zenginleştirmiş doğal gaz yanması ve son olarak %100 H₂ yanmaları incelenmiş, emisyon değerleri karşılaştırılmış sonuçta hidrojen ilavesinin yanma ve emisyonlarına etkisi ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca brülörde kullanılan girdap üretecine alternatif bir tasarım yapılmıştır. Yeni tasarımla yanma emisyonlarının minimize edilmesi planlanmış bu amaçla kanat sayısı ve kanat açısının parametrik çalışma sonucunda en uygun değerleri tespit edilmiştir.

1.3 Hipotez

Belirlenen aralık değerlerinde orijinal brülör-kazan sisteminde brülörün farklı ısıl yüklerde çalıştırılması, kazanın farklı ocak boylarında kullanılması ve kazanın farklı ocak çaplarında kullanılması CO₂, CO ve NOx gibi yanma emisyonları üzerinde etkili olduğu fakat bu etkilerin sınırlı olduğu sapma miktarlarından anlaşılmıştır. Belirtilen parametrelerde maksimum sapma CO₂ için %3.2, CO için 8 ppm ve NOx için 10 ppm olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan kazan ocak uzunluğu dışındaki parametrelerin alev çapı ve alev uzunluğu üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir. Bu parametrelerden farklı olarak farklı hava fazlalık katsayısında gerçekleştirilen yanma testlerinde yanma emisyonlarıyla birlikte alev çapı ve alev boyuda kayda değer oranlarda değişmektedir. Farklı hava fazlalık katsayılarında gerçekleştirilen testlerde maksimum sapma miktarları CO₂ için %24.17, CO için 46 ppm ve NOx için 32 ppm olarak belirlenmiştir. Öte yandan, birçok literatür çalışmasında hidrojenin emisyon bakımından temiz bir yakıt olduğu ileri sürülse de bu ifadenin sadece CO ve CO₂ emisyonları için geçerli olduğu ortaya çıkarılmış, NOx emisyonu bakımından ise son derece yüksek kirliliğe neden olduğu belirlenmiştir. Orijinal girdap üretecli brülörün oluşturduğu alev ve yanma emisyonları göz önüne alınarak tasarımı yapılan yeni bir girdap üreteci ile kanat sayısı ve kanat açısı parametrik olarak incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda kanat açısının yanında kanat sayısının da yakıt-hava karışımına etki ettiği dolayısıyla yanma ve emisyonları üzerinde etkili olduğu ortaya çıkarılmıştır. Artan kanat açısıyla yanma emisyonlarından olan NOx emisyonu önemli ölçüde düştüğü belirlenmiştir. Öte yandan girdap üretecinde düşük kanat sayılarında (7, 9) yüksek NOx emisyonun oluştuğu görülürken, 11 kanatlı girdap üretecinin kullanılmasıyla yakıt-hava karışımının daha iyi sağlandığı ve NOx emisyonun minimum seviyeye düştüğü belirlenmiştir. 11 kanatlı girdap üretecinin kullanılmasıyla NOx emisyonu, orijinal girdap üretecinin kullanıldığı duruma göre 15° 'de %31.9, 20° 'de %51.5, 25° 'de %62.7 ve 30° 'de %69.6 düşürülmüştür.
BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR, YAKITLAR VE YANMA

Geçmişten günümüze birçok yakıt türü keşfedilmiş, halen de araştırmalar devam etmektedir. Genel olarak yakıtlar katı, sıvı ve gaz yakıtlar olarak sınıflandırılır. Gaz yakıtlardan olan doğal gaz günümüzde miktarca en çok bulunan ve erişimi kolay olan gazların başında gelmektedir. Yakın zaman da yer altında kaya katmanları arasından elde edilen kaya gazı ve biyokütleden elde edilen biyogaz en yeni gaz yakıtları olsa da gaz karışımlarından elde edilen yakıtlar da günümüzde güncel alternatif yakıtlar olarak nitelendirilmektedir. Örneğin, doğal gaza bir miktar hidrojen ilave edilmesi ile gaz karışımının doğal gaza göre tutuşma aralığı genişlemekte, gazın hava içindeki difüzyonu artmakta ve gaz karışımının yanmasından elde edilebilecek ısı miktarı da doğal gaza göre daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni hidrojenin daha düşük yoğunlukta olması ve hidrojenin alt ısıl değerinin doğal gazın alt ısıl değerinden yaklaşık iki buçuk kat daha yüksek olmasıdır. Öte yandan, doğal gaza ilave edilen küçük orandaki hidrojen, yanma sonu gaz miktarına da önemli derece etki etmektedir.

2.1 Temel Kavramlar

Yanma Prosesi: Bir yakıt ile bir oksitleyicinin belli bir sıcaklıkta kimyasal reaksiyona girmesi sonucunda oluşan, ısı ve kimyasal bileşenlere dönüşme prosesidir. En iyi bilinen yakıtlar hidrojen (H) ve karbondan (C) meydana gelir ve hidrokarbon (CnHm) adını alırlar. Örneğin; Metan (CH₄), Etan (C₂H₆), Propan (C₃H₈) vb. Oksitleyici olarak genelde hava kullanılır. Hava hacimsel olarak %21 O₂ içerir. Diğer bazı oksitleyiciler Flor ve Klor'dür.

Stokiyometrik Hava: Yakıtın yanması için gerekli minimum havaya stokiyometrik hava denir.

Tam yanma: Yakıtın stokiyometrik hava ile yanmasına denir. Tam yanma durumunda yanma ürünlerinde oksijen bulunmaz.

Eksik Hava ile Yanma: Teorik tam yanma için gerekli hava miktarından daha az havayla yakma gerçekleştirildiğinde yanma ürünleri yüksek miktarda karbonmonoksit (CO) ihtiva eder. Ayrıca eksik yanma da is ve kurum oluşur.

Fazla Hava ile Yanma: Teorik olarak tam yanma oranını yakalamak uygulamada pek mümkün olmadığından, stokiyometrik hava miktarından fazlası sağlanır fakat bu durumda yanma ürünleri bir miktar oksijen içerir. Bu tür yanma reaksiyonlar, fazla hava ile veya hava fazlalığı ile yanma reaksiyonlarıdır.

Tutuşma Sıcaklığı: Yakıtın oksijen (hava) ile temas etmesi, yanma işleminin başlaması için her zaman yeterli olmadığı bilinmelidir. Şayet hava veya yakıttan en az biri tutuşma sıcaklığından yüksek bir sıcaklık değerinde değilse, bir ısı kaynağı gerekmektedir. Reaksiyonu başlatmak için noktasal dahi olsa bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Isı kaynağı yakıt ve havanın tutuşma sıcaklığını sağladığı andan itibaren karışım varlığında kimyasal reaksiyon başlamış demektir.

Tutuşma Aralığı: Yakıt-hava oranı yanmanın başlaması ve devamı için bir başka önemli parametredir. Örneğin, doğal gazın yanması için hava-yakıt karışımdaki oranı hacimsel olarak %5 - %15 arasında olmalıdır. Hidrojen ise %4-%75 seviyesindedir.

Adiyabatik Alev Sıcaklığı: Yanma odasının çevresi ile ısı alışverişi olmadığı varsayımıyla alevden elde edilebilecek teorik, maksimum alev sıcaklığıdır.

Alev Hızı: Yanmamış gazlarla ile ilgili olarak, önceden karıştırılmış karışımın alev yayılma hızına yanma hızı veya alev hızı denir ve S∟ile gösterilir [39].

2.2 Gaz Yakıtlar

Doğada katı ve sıvı fazlı yakıtların dışında gaz fazında yakıtlar da bulunmaktadır. Gaz yakıtlar doğal ve yapay olmak üzere iki grupta toplanabilir. Yer gazı (doğal gaz) doğal olanı, hidrojen, asetilen, koklaştırmadan ve kömürün gazlaştırılmasından elde edilen gazlar, ağır yağların kısmi oksidasyonundan ve kömürün hidrojenlenmesinden üretilen gazlar da yapay gaz yakıtlardır [40].

2.2.1 Doğal gaz

Doğal gaz kokusuz, renksiz, zehirli olmayan bir gaz olup doğada gözenekli kaya ve kabuk oluşumlarında sıkıştırılmış olarak bulunur. Kaynağından çekildikçe gaz basıncı düşmektedir. Genellikle petrol yataklarının üzerinde veya yakınında bulunur. Kömürleşme safhasına dâhil olan uçucu bileşenlerin yatak değiştirip toplandığı yer gazı olarak da bilinir [41]. Doğal gaz, çıkarıldığı bölge itibariyle farklı bileşenlere, ısıl değer ve yoğunluğa sahip olabilirler. Doğal gaz, kaynağından çıkarıldıktan sonra direk olarak kullanılan bir yakıt değildir. Isı değerini düşüren su buharı ile birlikte korozif etkisi olan CO₂ ve zehirli etkisi olan hidrojen sülfür (H₂S) ve az miktarda helyum (He) bulunabilir. Doğal gaz, yatağında 400 bar seviyesinde iken, çıkarılma esnasında 100 bar'a düşmekte ve bu sırada su buharı ve diğer bazı maddeler yoğuşarak ayrışmaktadır. Ayrıca doğal gaz tasfiyesi ile CO₂ ve kükürtlü bileşenlerde arındırılmaktadır [40]. Aksi takdirde H₂S varlığında korozyon meydana gelir [41].

Günümüzde endüstri ve yerleşim alanlarında en çok faydalanılan gaz olma özelliğini taşıyan doğal gazın yanma sırasında kül ve duman oluşturmaması en belirgin özelliklerindendir. Doğal gaz boru hatlarıyla kaynağından kullanım alanlarına taşınmakla birlikte uygun sıcaklık ve basınç altında sıvılaştırılmış halde LNG olarak da taşınmakta ve depolanmaktadır.

2.2.2 Metan

Doğada bol miktarda bulunan ve bazı insan faaliyetlerinin ürünü olan metan, renksiz ve kokusuz olup hidrokarbonların parafin serisinin en basit üyesidir. Sera gazlarının en güçlü maddelerinden biri olan metanın kimyasal formülü CH4'tür. Fosil yakıt kaynaklı santraller, besleyici deniz tabanları, hidratlar ve klatratlar, insan ve hayvan atıkları, biyokütle kaynaklarının yanması ve toprak atmosferdeki metan kaynaklarıdır [42].

Doğal gazın ana bileşeni CH₄ olması münasebetiyle birçok çalışmada doğal gaz metan olarak da ifade edilebilmektedir. Etan (C₂H₆) ve propan (C₃H₈) hacimsel oranı yüksek diğer iki önemli bileşendir. Metan gazı da doğal gaz gibi kokusuz, renksiz ve zehirli olmayan bir gazdır. Yoğunluğu oda şartlarında hava yoğunluğunun yaklaşık yarısıdır. Doğru havalandırma ile tehlike oluşturmazken, havalandırma yetersizliği nedeniyle gaz kaçakları ortamdaki oksijen yerini alarak, yetersiz oksijen nedeniyle boğulmalara neden olabilmektedir.

Metanın karakteristik özellikleri saf hidrojen ve diğer hidrokarbonlar ile mukayese edildiğinde alevlenme limitleri, laminar yanma hızı, ateşleme ve difüzyon alevlerinin gerilme oranları ve ateşleme gecikmesi bakımından daha düşüktür. Metanın bu özellikleri az miktarda hidrojen ilave edilmesiyle iyileştirilebileceği ifade edilmiştir [43].

2.2.3 Hidrojen

Hidrojen son zamanlarda dikkati çeken ve birçok alanda alternatif yakıt olarak kullanılmak üzere saha testi gerektiren yenilenebilir bir sentetik yakıttır. Fosil yakıtlara benzemekle birlikte, oksijenle yakıldığı zaman yakıt kaynaklı yanma emisyonu olarak sadece su buharı (H₂O) ihtiva ettiği için, hidrojen çevre dostu ve sıfır emisyonlu gelecekteki yeşil yakıt olarak bilinir [44]. Artan güç gereksinimi karşısında, karbon bazlı yakıtların yerine hidrojen yakıtının kullanılması CO₂, CO, Kükürt oksit ve organik asitler gibi tehlikeli emisyonların önlenmesi için en etkili yol olarak düşünülebilir [34], [45], [46], [47]. Hidrojenin yakma sistemlerinde örneğin içten yanmalı motorlarda, brülörlerde ve gaz türbinlerinde yakıt olarak kullanılması durumunda her ne kadar yanma sonu emisyonu CO₂ ve CO içermese de oksitleyici olarak hava kullanılması durumunda NOx oluşması muhtemeldir ve reaksiyon sıcaklığına bağlı olarak değişmesi beklenmelidir.

Hidrojenin, hidrokarbon yakıtlarına göre ateşlenebilirliği, ateşleme gecikmesi, alev kararlılığı bakımından daha üstün özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Öte yandan hidrokarbon yakıtlarına az miktarda karıştırılmaları, hidrokarbon yakıtların özelliklerini iyileştirilmesine katkı sağlayacağı araştırmacılar tarafından vurgulanmaktadır [43].

Hidrojenin kullanıldığı alanlar giderek genişlemekte mevcut teknolojiyle ısı ve elektrik üretimi proseslerinde kullanılabilmektedir. Son zamanlarda hidrojen yakıtlı araçlar geliştirilmiş bu araçlarda bulunan yakıt hücrelerinde hidrojen ve oksijen kimyasal tepkimeye girerek araç için gerekli ısı ve elektriği üretirler. Aslında yakıt hücresi çalışma prensibi 1889'da keşfedilmiş olmasına rağmen 1960 yıllarında uzay çalışmalarında güç üretimi ihtiyacına kadar kullanım alanı bulamamıştır [48].

20

Hidrojen yakıtlı hücre araçları (HFCV) hava kirleticileri üretmez, sadece su buharı yayar ve hidrojeni sızdırır [49]. Ayrıca yakıt hücresinde hidrojen ve oksijen arasındaki reaksiyon çok kontrollüdür ve çok daha yavaş gerçekleşir ancak içten yanmalı motorlarda reaksiyon hızlı ve kontrolsüzdür [50]. Yakıt hücresi sisteminin performansı ağırlıklı olarak basınç, stokiyometri ve nem, hücre çalışma sıcaklığı, gazların tepken sıcaklığı ve bileşenlerin geometrisine dayanmaktadır [51].

Hidrojenin en belirgin dezavantajı yüksek olan alevlene bilirliği yanında birçok gaza göre daha düşük olan yoğunluğu nedeniyle depolama sisteminde ve taşınmasında zorluklar oluşturmasıdır. Bu dezavantajlarına rağmen, üstün özellikleri nedeniyle birçok araştırmacı tarafından ilgili çalışmalar devam etmektedir.

2.2.4 Gaz Yakıt Yanması

Gaz yakıtların yanması, yakıt ve oksitleyicinin karıştırılıp ya da ayrı ayrı yanma odasına gönderilmesi ve bir ısı kaynağı yardımıyla tutuşturulması ile başlar. Gaz yakıt ön karışımla yanma odasına gönderilmesi durumunda oluşan yanmaya ön karışımlı yanma denir. Yakıt ve oksitleyici ayrı ayrı yanma odasına gönderilmesiyle oluşan yanmaya da ön karışımsız (difüzyon) yanma denir. Öte yandan yakıt oksitleyici karışımı bazı uygulamalarda kısmi oranda sağlanması arzu edilebilir bu tür yanmaya da kısmi karışımlı yanma denir.

a) Ön Karışımlı Alev

Yanma bölgesine ulaşmadan oksitleyicinin yakıt ile karıştırıldığı alev tipidir. Örnek bir ön karışımlı alev yapısı Şekil 2. 1'deki gibidir. Alev türbülanslı veya laminer olabilir. Fakir karışımlı bunsen bek alevi (laminer) ve benzinli motorlar (türbülanslı) akış tiplerine örnek verilebilir. Ön karışımlı alevlerde, yanma öncesinde yapılan ayarlamalar ile karışım oranı ve yanma işlemi daha iyi kontrol edilir [52]. Tepkime oldukça hızlıdır. Ancak patlama riskleri daha yüksektir. Bu yüzden kullanımları sınırlıdır.



Şekil 2. 1 Ön karışımlı alev

b) Difüzyon Alevi

Oksitleyicinin yakıt ile birleşmesi difüzyon ile gerçekleşir. Alev hızı difüzyon hızı ile sınırlıdır. Bu alev tipi de türbülanslı veya laminer olabilir. Mum alevi (laminer), dizel motorlar (türbülanslı) akış tiplerine örnek verilebilir. Karışım oranı düzgün değilse, yanmamış karbon parçacıkların oluşumu olan kuruma neden olur ve alev sarı bir renk alır [52]. Hava-yakıt karışımı için bir takım yöntemler kullanılmaktadır. Enerji açığa çıkma hızı karışım hızı ile sınırlıdır. Reaksiyon bölgesi oksitleyici ve yakıt bölgesi arasında gerçekleşir. Örnek bir difüzyon alevi Şekil 2. 2'de ki gibidir.



Şekil 2. 2 Difüzyon alevi

2.2.5 Gaz Yakıt Yanma Reaksiyonları

Yanma denklemlerinde oksitleyici olarak kullanılan havanın miktarı yanma tipini ve reaksiyon denklemini belirlemektedir. Kullanılan havanın gerektiğinden eksik olduğu durumlarda yanma eksik hava ile yanma (HFK< 1), havanın tam olduğu yanmada tam yanma veya stokiyometrik yanma (HFK= 1) ve yanmanın gereğinden fazla hava ile gerçekleşmesi durumunda da fazla hava ile yanma (HFK> 1) şeklinde tanımlanır. Bu üç yanma reaksiyonu en basit hidrokarbon olan CH₄ için üç farklı şekilde gösterilmektedir.

Metanın %20 eksik hava ile yanma reaksiyonu [53] :

 $CH_4 + 2 \cdot (1 - 0.2) \cdot (0_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.73CO_2 + 0.27CO + 1.47H_2O + 0.53H_2 + 6.16N_2$ (2.1)

Metanın stokiyometrik (%100 hava) yanma reaksiyonu:

$$CH_4 + 2 \cdot (1) \cdot (0_2 + 3,76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7,52N_2$$
 (2.2)

Metanın %20 fazla hava ile yanma reaksiyonu:

$$CH_4 + 2 \cdot (1 + 0.2) \cdot (0_2 + 3.76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 9.02N_2 + 0.4O_2$$
 (2.3)

Doğal gazın yüksek miktarda metan içermesi nedeniyle özellikleri metan gazına yakındır. Çizelge 2. 5'te bu çalışmada kullanılan doğal gazın bileşimi ve diğer özellikleri görülmektedir.

Doğal gaz Bileşenleri		Molekül Ağırlığı g/mol	Mol oranlar _{Yi}	Karbon Sayısı	Hidrojen Sayısı
Hidrokarbonlar	Metan, CH4	16,0430	0.950518	0.950518	3.802072
	Etan, C ₂ H ₆	30,0700	0.028707	0.057414	0.172242
	Propan, C ₃ H ₈	44,0989	0.009457	0.028371	0.075656
	Bütan, C₄H ₁₀	58,1200	0.002600 0.010400		0.026000
	Pentan C_5H_{12}	72,1500	0.000413	0.002065	0.004956
	Hekzan C $_6H_{14}$	86,1800	0.000158	0.000948	0.002212
Nitrojen, N ₂		28,0100	0.005808		
Karbondioksit, CO ₂		44,0100	0.002339		
Doğal Gaz		$\overline{\sum y_i M_{Ai}}$	$\sum y_i$	$\sum y_i C_i$	$\sum y_i H_i$
(C _{1,0583} H _{4,1166} +N ₂ +CO ₂)		Σ 16,9896	Σ 1,0000	Σ 1.0497	Σ 4.0831

Çizelge 2. 1 Deneysel ve HAD analizlerinde kullanılan doğal gaz ve bileşenleri [54]

Hidrokarbon yakıtların stokiyometrik yanmasının genel denklemi aşağıdaki gibidir [55]:

$$C_xH_y + (x + y/4)(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + (y/2)H_2O + (x + y/4)(3.76N_2)$$
 (2.4)

Doğal gaz karışımında hidrokarbon bileşenleri göz önüne alındığında denklem 2.4'e göre stokiyometrik yanma denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$CH_4 + 2 \cdot (1) \cdot (0_2 + 3,76N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7,52N_2$$
 (2.5)

$$C_2H_6 + 3.5 \cdot (1) \cdot (0_2 + 3.76N_2) \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O + 13.16N_2$$
 (2.6)

$$C_3H_8 + 5 \cdot (1) \cdot (0_2 + 3,76N_2) \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O + 18,80N_2$$
 (2.7)

$$C_4H_{10} + 6.5 \cdot (1) \cdot (0_2 + 3.76N_2) \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O + 24.44N_2$$
 (2.8)

$$C_5H_{12} + 8 \cdot (1) \cdot (0_2 + 3,76N_2) \rightarrow 5CO_2 + 6H_2O + 30,08N_2$$
 (2.9)

$$C_6H_{14} + 9.5 \cdot (1) \cdot (0_2 + 3.76N_2) \rightarrow 6CO_2 + 7H_2O + 35.72N_2$$
 (2.10)

Doğal Gazın Stokiyometrik (HFK=1) Yanması

$$0,9505CH_4 + 0,0287C_2H_6 + 0,0094C_3H_8 + 0,0026C_4H_{10} + 0,0004C_5H_{12}$$
(2.11)

$$+0,0001C_{6}H_{14} + 2,0705 \cdot (1) \cdot (0_{2} + 3,76N_{2}) \rightarrow 1,0497CO_{2} + 2,0415H_{2}O +$$

$$7,7850N_{2}$$
(2.12)

Doğal Gazın %20 Fazla Hava (HFK =1.2) İle Yanma Reaksiyonu

$$0,9505CH_4 + 0,0287C_2H_6 + 0,0094C_3H_8 + 0,0026C_4H_{10} + 0,0004C_5H_{12}$$
(2.13)

$$+0,0001C_{6}H_{14} + 2,0705 \cdot (1+0,2) \cdot (0_{2} + 3,76N_{2}) \rightarrow 1,0497CO_{2} + 2,0415H_{2}O + 9,3420N_{2} + 0,4141O_{2}$$
(2.14)

Doğal gazın kapalı formu $C_nH_m\;$ hesaplanarak $C_{1.0583}H_{4.1166}$ olarak ifade edilebilir.

$$C_{n} = \frac{\sum y_{i} C_{i}}{\sum y_{hidrokarbon}} = \frac{1.049716}{0.991853} = 1.0583$$
(2.15)

$$H_{\rm m} = \frac{\sum y_{\rm i} H_{\rm i}}{\sum y_{\rm hidrokarbon}} = \frac{4.083138}{0.991853} = 4.1166$$
(2.16)

İki basamaklı metan-hava yanma reaksiyonu:

$$CH_4 + 1.50_2 \rightarrow CO + 2H_2O$$
 (2.17)

$$CO + 0.5O_2 \leftrightarrow CO_2 \tag{2.18}$$

2 basamaklı metan-hava yanma reaksiyonu doğal gaza göre uyarlandığında iki basamaklı reaksiyon şu şekilde ifade edilir:

$$C_{1.058}H_{4.116} + 1.558O_2 \rightarrow 1.058CO + 2.058H_2O$$
(2.19)

$$CO + 0.5O_2 \leftrightarrow CO_2 \tag{2.20}$$

Doğal gaz-hidrojen karışımını modellemek için iki basamaklı doğal gaz-hava yanma reaksiyonu tek başına yetersiz kalmakta, hidrojenin parçalanmasını gerçekleştirecek reaksiyona ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyacı gidermek doğal gaz-hava mekanizmasıyla birlikte bir basamaklı hidrojen-hava (oksijen) yanma reaksiyonu kullanılmıştır.

$$H_2 + 0.50_2 \to H_20$$
 (2.21)

Bu ilave denklem sayesinde karışım durumunda tepkimeye giren hidrojenin yanması ve bileşenlerine ayrılması sağlanmış olur.

BÖLÜM 3

YANMA EMİSYONLARI VE ZARARLARI

Katı, sıvı ve gaz yakıtlıların yanma sonu ürünlerinde CO₂, CO, NOx ve SO₂ gibi emisyonlar bulunabilmektedir. Bu emisyonlar kullanılan yakıta, çalışma şartlarına, yanma kalitesine ve proses sıcaklığına bağlı olarak farklı oranlarda açığa çıkmakla birlikte doğada kalma süreleri de farklık göstermektedir. İnsan, bitki ve çevreye olan zararları bakımından da önem sıralamaları da farklılık göstermektedirler. Bu gazlar, doğrudan veya dolaylı olarak hava kirliliğine, asit yağmurlarına, ozan tabakası tahribatına, küresel ısınmaya ve iklim değişikliklerine neden oldukları ifade edilmekte, bu yüzden ulusal ve uluslararası boyutta önem teşkil eden bir sorun olarak görülmektedir.

3.1 CO₂ Emisyonu

CH₄, C₂H₆, C₃H₈ gibi hidrokarbon yakıtların oksitlenmesiyle yanma reaksiyonu sonucunda açığa çıkar. İnsanın nefesi içerisinde %4 oranında bulunan ve sürekli ortama bırakılan bir gaz olan CO₂, sera gazı olarak da adlandırılır. En belirgin özelliği boğucu bir gaz olmasıdır. Havadan ağır olduğu için, ortamdaki oksijeni derhal uzaklaştırarak doğrudan yer seviyesine çökelir bu yüzden tahliyesi oldukça güçtür.

3.2 CO Emisyonu

CO gazı doğal gaz, motorin ve kömür gibi yapısında karbon bulunan yakıtların tam yanmaması sonucunda (eksik yanma) oluşan zararlı bir gazdır. CO emisyonu, genel olarak hava ve yakıt karışımının kötü olduğu, yeterli büyüklükte boyutlandırılmamış yanma odalarında ve yetersiz hava uygulamalarında oluşur [56], [57].

3.3 SO₂ Emisyonu

Çoğu fosil yakıtta kükürt esas olarak bitki ve hayvansal maddelerin çürümesinden kaynaklanır. Çürüme sürecinin bir ürünü olan hidrojen sülfürden (H₂S) kaynaklanır. Yakıt içerisindeki kükürt kaynakları arasında demir sülfit ve demir sülfat bulunur. Kükürt içeren yakıtların yakılması, kükürt dioksit (SO₂) oluşumuyla sonuçlanır. Kükürt emisyonlarının iki temel endüstriyel kaynağı fosil yakıt yanması ve metalürjik cevher arıtımıdır [58], [59].

SO₂ atmosferde oksitlendiğinde sülfürik aside (H₂SO₄) dönüşür. Sülfürik asidin oluştuğu iki mekanizma vardır. Birinci mekanizmada gaz halindeki SO₂, sıvı suyla birleşerek sulu bir sülfürlü asit (H₂SO₃) çözeltisi oluşturabilir ki bu da atmosferde oksitlenerek H₂SO₄ oluştururken, ikinci mekanizmada ise gaz halindeki SO₂, atmosferde oksitlenerek SO₃ üretebilir ki bu da su buharı ile birleşerek H₂SO₄ oluşturur [58].

3.4 NOx Emisyonu

Yanma olayında reaksiyona katılan reaktantlar olan yakıt ve oksitleyicinin yanma emisyonlarının oluşumunda önemli rolleri vardır. Yakıt kaynaklı emisyon oluştuğu gibi oksitleyici kaynaklı emisyonlarda oluşur. Bu emisyonların en bilineni ve zararlısı azot oksit (NOx) olarak adlandırılan ve azot monoksit (NO), azot dioksit (NO₂), diazotoksit (N₂O), diazottrioksit (N₂O₃) ve diazotpentaoksit (N₂O₅) oluşan emisyondur. Yanma ortamında oksitleyici olarak kullanılan havadaki azot (N) yüksek sıcaklıklarda oksijen (O) ile tepkimeye girerek oluşturduğu NOx, yakıt içerisinde bulundurduğu azot (N) ve oksijen (O) kaynaklı da olabilir. Dolayısıyla azot içermeyen yakıt ve oksitleyici kullanılması NOx oluşumunu ortadan kaldıracaktır. NOx emisyonu bileşenlerinden en kayda değerde olanı NO emisyonudur ve yanma emisyonların %95 civarını oluşturur. Geri kalan emisyonun çoğunluğunu da NO₂ bileşeni oluşturduğu birçok uygulamada gözlenmektedir. NO emisyonu renksiz olup, kan zehirlenmesi ve felce yol açarken, NO₂ ise sarı-kahve renkli olup, keskin kokulu olup ciğerlere etki eder [52]. NOx oluşumu üç farklı mekanizma ile gerçekleşmektedir.

3.4.1 Isil NOx Emisyonu

Isıl NOx yüksek sıcaklıklarda oksijen molekülleri ve atomların atmosferik azot ile oksidasyonu sonucu oluşur. Bu tepkimeler 0.5-1s aralığında gelişirler. Azot oksitler yüksek sıcaklıklarda oluştuklarından dolayı 1400°C ve altı sıcaklıklarda oluşum seviyeleri düşüktür ve ihmal edilebilirdir [60].

Oksijen moleküllerinin atomlarına dönüşmesi şu şekilde gerçekleşir [43]:

$$O_2 \leftrightarrow 2O$$
 (3.1)

$$O_2 + M \leftrightarrow O + O + M \tag{3.2}$$

Isıl NOx oluşum mekanizması Zeldovitch [61] tarafından bulunduğu için Zeldovich mekanizması olarak da adlandırılmaktadır. Isıl NOx mekanizması reaksiyonların ilk ikisini Zeldovich önermiş olup bu reaksiyonlar kısmen zengin (λ <0,85) ve fakir yanma şartlarında NO oluşumlarında önemlidir. Bu iki reaksiyon aşağıdaki gibidir [43].

$$O+N_2 \stackrel{1}{\leftrightarrow} NO+N$$
 (3.3)

$$N+O_2 \stackrel{2}{\leftrightarrow} NO+O$$
 (3.4)

Zeldovich reaksiyonlarına ilave olarak Lavoie ve ark. [62] zengin karışımların yanmasında aşağıdaki reaksiyonu önermişlerdir [43].

$$N+OH \stackrel{3}{\leftrightarrow} NO+H$$
 (3.5)

Bir yanma reaksiyonunda Denk. 3.5'in etkili olabilmesi alev sıcaklığının seviyesine bağlıdır ve ancak yüksek sıcaklıklarda (1800 K) etkindir. Bununla birlikte her 90 K sıcaklık artışı, NO seviyesinin yaklaşık olarak iki kat artmasına neden olmaktadır [63].

Isıl NOx reaksiyon denklemlerinin oran sabitleri birçok deneysel çalışmada ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Baulch [64] tarafından derlenmiştir [65]. Bu denklemlerde $k_{f,1}$, $k_{f,2}$ ve $k_{f,3}$ ileri oran sabitlerini, $k_{r,1}$, $k_{r,2}$ ve $k_{r,3}$ ise ters reaksiyon oran sabitlerini temsil eder.

$$k_{f,1} = 1.8x 10^8 e^{-38370/T}$$
(3.6)

$$k_{f,2} = 1.8x 10^4 T e^{-4680/T}$$
(3.7)

$$k_{f,3} = 7.1x 10^7 e^{-450/T}$$
(3.8)

$$k_{r,1} = 3.8x 10^7 e^{-425/T}$$
(3.9)

$$k_{r,2} = 3.81 \times 10^3 T e^{-20820/T}$$
(3.10)

$$k_{r,3} = 1.7x 10^8 e^{-24560/T}$$
(3.11)

Denklem (3.4) ve (3.5)'te belirtilen reaksiyonlar yoluyla NO oluşumunun net oranı denklem (3.12)'deki gibi hesaplanabilir [65].

$$\frac{d[NO]}{dt} = k_{f,1}[O][N_2] + k_{f,2}[N][O_2] + k_{f,3}[N][OH] - k_{r,1}[NO][N] - k_{r,2}[NO][O] - k_{r,3}[NO][H]$$
(3.12)

Bu denklemdeki tüm konsantrasyonlar mol/m³ birimindedir. NO ve N oluşum oranların hesaplayabilmek için O, H ve OH konsantrasyonlarının ölçülmesi gerekmektedir [65].

3.4.2 Promt (Ani) NOx Oluşumu

Bir diğer önemli NOx oluşum mekanizması özellikle düşük sıcaklıklarda, yakıt bakımından zengin karışımlı yanma proseslerinde ve yanma bölgesinde kalma süresinin uzun olduğu alevlerde üretilen ani NOx'dur. Yüzey yakıcıları, kademeli yanma sistemleri ve gaz türbinleri yanma proseslerinde bu şartlar gözlenebilir. Fenimore tarafından ortaya konulmuştur. Aslında NO_x emisyonunun toplam NOx'e katkısı kısıtlıdır ancak ultra-düşük NOx brülör gibi ultra düşük NOx kondisyon tasarımı için önemlidir [65].

Ani NOx mekanizması çoğunlukla zengin karışımlarda etkindir. Gerçek oluşumları bir dizi karmaşık reaksiyonları ve birçok ara radikalleri içermektedir. Reaksiyonların yeni kabul edilen şekli aşağıdaki gibidir [65]:

$$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N$$
 (3.13)

$$N + O_2 \leftrightarrow NO + O \tag{3.14}$$

$$HCN + OH \leftrightarrow CN + H_2O \tag{3.15}$$

 $CN + O_2 \leftrightarrow NO + CO$ (3.16)

De Soete [66] tarafından rapor edilen Ani NO mekanizması reaksiyon oranı Denk.(3.16)'da belirtildiği gibi hesaplanabilir. Burada f düzeltme katsayısıdır. Ayrıca toplam Ani NOx oluşumu Denk.(3.17)'deki gibi de yaklaşık olarak hesaplanabilir [65].

$$\frac{d[NO]_{pr}}{dt} = f \times A \times \left(\frac{RT}{P}\right)^2 [Fuel][O_2]^b[N_2] e\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$
(3.17)

$$\frac{d[NO]_{pr}}{dt} = k_{pr}[O_2]^a[N_2][YAKIT] e\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$
(3.18)

3.4.3 Yakıtsal NOx Oluşumu

Azot içeren organik bileşenli sıvı ve katı yakıtlı fosil yakıtlar yanma proseslerinde NOx emisyonlarının oluşmasına neden oldukları bilinir. %0.3-2 ağırlıkça azot içeren sıvı yakıt ve kömürde yakıt Nitrojen (azot) NOx emisyonlarının önemli bir kaynağıdır. Yakıtta bulunan azotun oksitlenmesiyle NOx oluşabilmektedir. Özellikle amonyak içeren gazlarda önem arz eder. Doğal gaz ve propan gibi daha kaliteli yakıtlarda bir etkisi yoktur [65]. Hidrosiyanik asit (HCN) kaynaklı yakıt NOx emisyonunda ara ürünler Şekil 3. 1'deki gibi olur [65].



Şekil 3. 1 Yakıtsal NO oluşumu mekanizması

3.5 NOx Azaltma Teknikleri

Yanma prosesinin sürdürülmesi esnasında açığa çıkan zararlı emisyonlar bir takım geliştirilen yöntemler ile kontrol altına alınabilmektedir. Bu yöntemlerden bazıları Şekil 3. 2 'de görülmektedir. Doğal gaz yanması sırasında açığa çıkan en zararlı emisyonlardan biri olan NOx'u düşürmek için geliştirilen dört genel teknik bulunmaktadır ve aşağıdaki şekilde gösterilmektedir [60].



Şekil 3. 2 NOx azaltma teknikleri

NO_x azaltıcı teknoloji seçiminde göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlar şunlardır [60].

- Artan İşletim Ve Bakım Maliyetleri
- ✓ Kazan Verimliliğinde Azalma
- Çıkış Kapasitesinde Azalma
- ✓ CO Emisyonlarını Artırma
- ✓ Kazan Ömründe Azalma

3.6 Yanma Emisyonlarının Zararları

3.6.1 Sera Etkisi

Dünya atmosferi çeşitli gazları ve küçük miktarlarda asal gazları bulundurur. Bu gazlar; CO₂, CH₄, Nitröz oksit veya Azot Protoksit (N₂O), Hidroflorür karbonlar (HFCs), Perfloro karbonlar (PFCs), Sülfürhekza florid (SF6) gibi gazlardan oluşur. Bu gazların ortak özelliği atmosferde ısı tutma kabiliyetleridir bu yüzden bu gaz bileşiklerine sera gazı denir [67].

Güneş kaynağından gelen ışınlar atmosferi geçerek yeryüzünü ulaşır ve ısıtır. Atmosferdeki gazlar yeryüzündeki ısının bir kısmını tutar ve tamamını yansıtmasını önleyerek yeryüzünün belli bir sıcakta kalmasını sağlar. Bu sayede dünyanın bir ucundaki büyük buz kütleleri sıcaklığını korur ve okyanus-deniz vb. suların sıcaklığı dengede kalır. Sera etkisi, atmosferin bu ısıtma ve yalıtma özelliğine denir. Ayrıca havada en çok ısı tutma özelliği CO₂ gazlarına aittir [68].

3.6.2 Küresel Isınma Etkisi

Son bir asırdır enerji üretiminde kullanılan en önemli kaynak şüphesiz fosil kaynaklardır. Yakın gelecekte de bu durumun değişeceği beklenmemektedir. Öte yandan teknolojinin gelişmesi, daha yoğun enerji ihtiyacını beraberinde getirmekte dolayısıyla fosil kaynakların tüketimi de kaçınılmaz olarak artmaktadır.

Tüm fosil kaynakların yanma sonu emisyonları CO₂ içerir. Bu durumun bir sonucu olarak hava kirliliği artmakta CO₂ ve diğer ısı tutan gaz miktarları da hava kirlenmesine bağlı olarak hızla artmaktadır. Bu durum zamanla atmosfer ısısının artmasına neden olmakta küresel ısınma olarak adlandırılmaktadır. Buzulların erimesi, okyanusların yükselmesi, binlerce bitki ve hayvan türlerinin yok olması, susuzluk, kuraklık gibi diğer meteorolojik afetlerin artmasına sebep olan küresel ısınmanın iklim değişikliklerine neden olabileceği ifade edilmektedir [68].

3.6.3 Hava Kirliliği

Ülkemizde konut, sanayi ve benzeri yerlerde ısınma amaçlı kullanılan yakma tesisleri dış havaya atılan is, duman, toz, gaz emisyonları gibi kirleticilerin hava kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için denetlenmektedir. Hava kalitesi sınır değerleri "Isınmadan kaynaklanan hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği" hükmünce belirlenmektedir. Gaz yakıt yanma emisyonlarının kapasiteye göre minimum ve maksimum sınırları Çizelge 3. 1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1 Gaz yakıt yanmasında Azot oksit (NOx), Karbonmonoksit (CO), hidrokarbon (CxHy) konsantrasyonu ve islilik derecesi [69].

İlgili	Isıl Güç rt (kW)		Azot oksit	Azot oksit	Karbonmonoksit	Hidrokarbon
Standart			(NOx)	(NOx)	(CO)	(CxHy)
			(NO ₂ . olarak) (mg/kWh)	(NO2.olarak) (ppm -%3 O2)	(mg/kWh)	(ppm) (CH4- olarak)
TS * veya EN*	70 <ig≤1000< td=""><td>260</td><td>127</td><td>1070</td><td>20</td></ig≤1000<>		260	127	1070	20
	30 <ig≤70< td=""><td>Sınıf 1**</td><td>260</td><td>127</td><td>-</td><td>20</td></ig≤70<>	Sınıf 1**	260	127	-	20
		Sınıf 2**	200	95	-	20
		Sınıf 3**	150	73	-	20
		Sınıf 4**	100	48	-	20

(TS)* Türk Standartları Enstitüsü ve (EN)*Avrupa Birliğinin ilgili standartları

(Sınıf)** TS ve EN'de belirtilen sınıflar

BÖLÜM 4

KAZANLAR, BRÜLÖRLER VE GİRDAP ÜRETEÇLERİ

4.1 Kazanlar

Brülörlerin kullanılmasıyla yakıt kimyasal bağ enerjisinin açığa çıkarılıp ısı enerjisine dönüştüğü cihazlar kazanlardır. Farklı amaçlar için farklı tasarımlı kazanlar mevcuttur. Kazan yanma sistemde kullanılan yakıtlar katı, sıvı ve gaz yakıtlar olabilmekte, bazı yanma uygulamalarında farklı yakıtların bir arada kullanılması sağlanabilmektedir. Gaz ve sıvı yakıtlar brülörde nozullar yardımıyla direk olarak kullanılabilirken, kömür gibi katı yakıtların kazan uygulamalarında sürekli olarak herhangi bir aksamaya neden olmaması için pulverize haline getirilip, sıvı ve gaz yakıtları gibi püskürtülmesi gerekmektedir. Pulverize edilmiş kömürün yakılması sonucunda yanmamış katı atıklar ve cüruflar kazan içerisinden uzaklaştırılır. Yanma sonu açığa çıkan atık gazların ısısı kazana aktarılması sağlanarak basınca bağlı olarak yoğuşma sıcaklığının üzerinde dışarı atılmaktadır. Kazanlar farklı amaçlarla tasarlanıp kullanıldıkları için kazanlarda elde edilen ısılar da belirlenen amaca göre değerlendirilmektedir. Örneğin sıcak su kazanı için tasarlanan bir kazanda yanmadan elde edilen ısı şebeke suyunu ısıtmak için kullanılırken, buhar kazanlarında, yanma ısısı buhar elde etmek için kullanılmaktadır. Şekil 4. 1'de bir sıcak su kazanı görülmektedir.



Kazan yanma odası refrakter yüzeyi

Şekil 4. 1 Örnek bir sıcak su kazanı ve ekipmanları [70]

4.1.1 Kazan Kapasitesi

Baca gazı analizörü yardımıyla kazan veriminin (η_k) yaklaşık olarak hesaplandığı gibi kazan kapasitesi de yaklaşık olarak bulunabilmektedir. Bunun için kazanda birim zamanda kullanılan yakıt miktarının tam olarak bilinmesi gerekir. Kazan kapasitesi şu şekilde hesaplanabilir [71]:

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_y \times H_u \times \eta_k \tag{4.1}$$

 \dot{Q}_k = Kazan Kapasitesi (kW)

H_u = Yakıt Alt Isıl Değeri (kJ/kg)

 η_k = Kazan Verimi (%).

4.1.2 Kazan Verimi

Baca gazı analizörü ile baca gazlarındaki oksijen, karbondioksit, karbonmonoksit, baca gazı sıcaklığı ve ortam sıcaklığı gibi parametreler ile yanma verimi (η_y) hesaplanabilir. Yanma verimine bakılarak, kazan veriminden (η_k) söz ederken; kazan radyasyon kayıpları, külde yanmamış karbon kayıpları gibi ölçülmeyen değerler için yakıt cinsine ve kazan kapasitesine bağlı, yanma veriminden belli bir azaltma yapmak gerekir. TS.4041'de kazan radyasyon kayıpları, kapasite ve yakıt cinsine göre %0.7 ile %3.0 arasında bir orana sahiptir. Baca gazındaki is ve kurum ile küldeki yanmamış karbon (C) miktarından kaynaklanan kayıplar ise kazan verimini yaklaşık olarak; doğal gazda %1, fuel-oil'de %2-3, kömürde ise %4-5 azaltır. Bu şekilde baca gazı analizörü kullanılarak kazan veriminin tespiti, yanmanın optimizasyonu ile verimin yüksek bir değerde tutularak enerji ekonomisi sağlamaya yönelik olmalıdır. Yine aynı yöntem kazan verim ve kapasite değerlerinin tescilinde kullanılmamalıdır [71].

Isi enerjisi üretmek için kullanılan cihazların verimlerinin ifade edilmesinde, fayda ve bedel kavramlarındaki farklılıklar nedeniyle değişik verim değerleri elde edilir. Bir sıcak su kazanında elde edilmek istenilen fayda, kazana T_g [°C] sıcaklığında ve \dot{m}_s (kg/s) debisi ile giren suyun, T_ç [°C] sıcaklığına kadar ısıtılması, yani özgül ısısı C_p [kj/kg K] olan suya;

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s c_p \left(T_{\varsigma} - T_g \right) \ [kW] \tag{4.2}$$

kadar ısıl enerji aktarılmalıdır. Bu enerjinin elde edilmesi için sisteme verilmesi gereken kimyasal enerji; kazanda $\dot{m_y}$ (kg/s) debisi ile yakılan ve yanma ısısı (ısıl değeri) H (kj/kg) olan yakıtın sahip olduğu enerjidir ve şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{Q}_{y} = \dot{m}_{y} H_{u} \quad [kW] \tag{4.3}$$

Kazanın verimi de aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir [72].

$$\eta = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_y} = \frac{\dot{m}_s c_p (T_c - T_g)}{\dot{m}_s H_u}$$
(4.4)

4.2 Brülörler

Brülörler yakıt ve havayı ön karışımlı veya ön karışımsız şekilde yanma hücresine sevk ederek emniyetli bir şekilde yakmaya yarayan cihazlardır. Brülörler kullanılan yakıt ve özelliklerine, kullanım amacına ve yerine göre farklılık göstermektedir. Genelde uygulamaya özel olarak ve kullanılan yakıt özellikleri göz önüne alınarak üretilirler. Bu özellikler [73] şunlardır:

- Isıl değeri
- Hava ihtiyacı
- Brülöre iletim basıncı
- Yoğunluk oranı
- Kimyasal kompozisyonu

Basit yapılı brülörler olduğu gibi karmaşık yapılı brülörler de mevcuttur. Hava emiş fanı gövdesinde bulunan gelişmiş bir brülör ve ekipmanları Şekil 4. 2'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 2 Örnek bir gaz yakıt brülörü ve ekipmanları [74]

4.2.1 Gaz Yakıt Brülörleri

Sıcak su ve buhar kazanlarında gaz yakıtlarını yakmaya yarayan cihazlardır. Genellikle yardımcı bir fan ile kullanılırlar. Bu fan dış ortamdan emişle aldığı havayı fan çarkından geçirerek yanma başlığına gönderir. Burada yanma havası tesisattan gelen yakıtla girdap üreteci yardımıyla belli oranda karışarak ve yanma başlığından geçerek yanma odasına püskürtülür. Bu arada yanma başlığında yakıt-hava karışımı ateşleme elektrotu ile tutuşturularak yakılır.

Gaz brülörü, genellikle alüminyum prese dökümden imal edilen bir gövdeden oluşur. Ana elemanları hava ayar klapesi, fan, fan motoru, ateşleme başlığı ve yanma başlığıdır [75].

4.2.1.1 Çift Yakıtlı Brülörler

Üflemeli brülörlerin doğal gaz ve sıvı yakıtları yakabilen çeşitleridir. Boyut olarak tek yakıt brülörlerine göre daha kabadır. Çift yakıtlı brülörler 1000 kg/h ve daha büyük kapasiteli olup termik santral yanma uygulamalarında tercih edilir. Bunun nedeni doğal gazı kesintili tarifeden daha ucuza almaktır. 500 kg/h değerinden daha küçük kapasitelerde tercih edilmeleri pek uygun değildir. Verim düşük, işletme ve servis problemleri ise fazla olur. Satın alma maliyeti de çok fazla olur [76].

4.2.1.2 Üflemeli Brülörler

Tekli kazanda 700 kW ve üstü ısıl kapasitelerde atmosferik brülör yerine üflemeli brülörlerin kullanımı daha ekonomiktir. Üflemeli brülörlerde fan bulunur. Fan tepkime için gerekli yanma havasını sağlar ve kazandaki yük kayıplarının bir kısmını karşılar. Üflemeli brülörlerde sesi önlemek için özel susturucu brülör hücresi kullanılır. Baca çıkışına da baca susturucusu monte edilebilir. Üflemeli brülörlerde üç çeşit kontrol sistemi vardır [76]:

A- Tek kademeli ON-OFF kontrol: Doğal gaz yakıtlı tek kademeli brülörler, çekilen ısı miktarına göre dur-kalk sistemine göre çalışır. Sıvı yakıt brülörlerinden farklı olarak, kalkış hızı belirli ölçüde ayarlanabilmektedir. Tek kademeli brülörler 300 kW ısıl gücüne ulaşılabilse de genellikle 100 kW'lık kapasiteden sonrası tavsiye edilmez [76].

B- İki kademeli ON – OFF kontrol: İki kademeli brülörler ısı yükü ihtiyacına göre iki kademede çalışabilir. B tür brülörlerde birinci kademe ihtiyacı karşılayamazsa ikinci kademe belli bir süre sonra devreye girer. Büyük ısı kapasitelerinde ve karşı basınçlı kazanlarda iki kademeli brülörlerin kullanılması daha iyi bir çözümdür. Çift kademeli brülörlerin üst kullanım sınırı 1500 kW'tır [76].

C- Oransal kontrollü brülörler: Sanayide kullanılan büyük kapasiteli kazanlarda kullanılır. Bu brülörlerin çalışma prensibi iki kademeli brülörler gibi olsa da yükle orantılı olarak gönderilen yakıtın miktarı ayarlanır. Konutlarda ısıtma amacı ile kullanılan üflemeli brülörler geniş bir kapasite aralığına sahiptirler. Monoblok brülörlerde kapasite 10 kW ile 4000 kW güç arasındadır. Daha büyük kapasitelerde oransal kontrol kullanmak uygun olur [76].

4.2.1.3 Atmosferik Brülörler

Atmosferik brülörler üflemeli brülörlerden farklı olarak fan bulundurmazlar ve yanma için gerekli oksitleyici hava ortamdan emilir. Tesisattan gelen basınçlı doğal gazın bir lülede genişlemesi sırasında birincil hava çevreden emilir. İkincil (sekonder) hava termik olarak, alevle ısınıp yükselen gazlar yerine yakıcının altındaki açık alandan emilir. Alevin oluşumu yukarı yönde olur. Atmosferik brülörler basit yapıya ve iyi bir yanma verimine sahiptir. Genellikle sanayi uygulamalarında kullanılsalar da, bu tip brülörleri kullanan kazanlarda mevcuttur ve kazanlar özel tasarlanmıştır. Atmosferik brülörlerde bu kazanlarla monteli bulunurlar [76].

4.2.2 Brülörde Gaz Kontrol Hattı Ekipmanları

Brülöre gelen yakıtın emniyetli bir şekilde brülör ağzına beslenmesi için gaz hattında Şekil 4. 3'deki gibi bir takım yardımcı ekipmanlar kullanılmaktadır. Böylece sürekli veya kademeli yanma gerçekleşirken gaz hattı emniyete alınmış olur.



Şekil 4. 3 Gaz Kontrol Hattı Elemanları [76]

4.3 Girdap Üreteçleri

İyi bir yanmanın gerçekleşme şartlarından biri de hava ile yakıtın iyi derece karıştırılmasıdır. Bu noktadan çıkışla brülörlerde ön karışımlı alev tasarımının iyi bir yanmanın gerçekleşmesi amacına yönelik gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Ön karışımlı alevlerin difüzyon alevlerine göre avantajlarından biri yakıt-hava karışımının yanma öncesi sağlanması nedeniyle yanmanın genellikle stokiyometrik şartlar dışında gelişmesidir. Bu durum düşük alev sıcaklığına dolayısıyla düşük NOx emisyon oluşmasına neden olur.

Difüzyon alevlerinde jet akışı ve çevresi arasında momentum değişiminin sonucu olarak cevreden jet akışı sınırları boyunca değişim katsayısı ve hız gradyenlerine bağlı olarak değişen sürtünme kuvveti özelliklerinden kaynaklı hava emilir. Burada türbülanslı değişim katsayısı (akış halinde) moleküler değişimden (difüzyon halinde) daha yüksektir. Jet akışı yönünde, dışardan bir kuvvet etki etmediği sürece momentum korunmakta, öte yandan jet akışı yönünün dışında herhangi bir kuvvet etki ettiğinde, türbülans streslerinin mevcut olduğu akış bölgelerinde ve basıncın değişken olduğu akış alanında momentum değişimi korunmamaktadır. Bu nedenle akış bölgesinde akışın her üç koordinatındaki değişimleri önem arz etmekte, akış boyunca eksenel kuvvetin yanında teğetsel bileseninin de etkisi edilmemelidir kuvvet göz ardı [77]. Difüzyon alevlerinde hava ve yakıtın birbiri içerisinde karışımı kütle difüzyonu ile sınırlı olduğundan, ön karışımlı alevdeki gibi bir karışım elde edilmesi mümkün değildir. Fakat difüzyon alevli brülörlerde yaygınca kullanılan girdap üreteci yardımıyla karışım daha iyi sağlanabilmektedir. Girdap üreteci kullanılmasıyla hava yakıt karışımı sağlanarak alev bölgesinde stokiyometrik şartların oluşması engellenmeye çalışılmaktadır. Bu durum tam olarak gerçekleştirilemese de kısmi olarak gerçekleştirilmesi NOx seviyesini düşürücü etkiye sahiptir. Farklı kanat açılarında girdap üreteçleri Şekil 4. 4'te görülmektedir.



Şekil 4. 4 Farklı kanat açılarında (30°, 45°, 55°) imalatı yapılmış girdap üreteçleri [78]

Girdap üreteçlerinin bir başka önemli özelliği de resirkülasyon bölgeleri oluşturarak yanma ürünlerini yanma reaktantlarıyla karıştırmak ve böylece ani sıcaklık yükselmesini engellemektir. Girdap üreteçleri dışında, akış yönü doğrultusunda düşük hız by-pass portlarının kullanılması, akışın önüne bir katı cisimle set çekilmesi veya ani alan değişiklikleri de resirkülasyon bölgelerinin oluşmasını sağlayan başka yöntemlerdir. Girdap üreteçleri ayrıca gaz türbini yakıcıları ile brülörlerin çalışma şartlarında alev kararlılığı sağlayarak alevin cihaz üzerinden geri tepmesini (flash back), sönmesini (blow off) ve yükselmesini (lift off) engeller. Bu özellikler türbülatörlerin bu iki alanda yaygın olarak kullanılmasını sağlar [79].

Silindirik koordinatlarda hız bileşenleri Şekil 4. 5'daki koordinat sistemlerinde gösterildiği gibi eksenel, radyal ve teğetsel bileşenlerdir. Silindirik koordinat sisteminde pozitif radyal hızlar dönme ekseninden radyal olarak dışarı doğru, pozitif eksenel hızlar dönme ekseni vektörü yönündedir ve pozitif teğetsel hızlar, pozitif dönme eksenini kullanarak sağ el kuralına dayanmaktadır. Eksenel simetrik uygulamaları ve üç boyutlu akış uygulamalarında girdap hızları teğetsel hız olarak ifade edilmektedir [80].



Şekil 4. 5 3D, 2D ve eksenel simetrik geometrilerde silindirik hız bileşenleri [80]

Birincil bölge hava akış deseni, alev kararlılığı oluşturmak için oldukça önemlidir. Birçok farklı tip hava akış deseni kullanılmaktadır fakat hepsinin ortak bir özelliği tersine toroidal akış oluşturak sıcak yanma ürünlerinin bir kısmını sirküle ederek gelen hava ve yakıt ile karıştırmaktır. Oluşan vorteksler sürekli olarak hava portlarından, girdap ürecinden ve atomizasyondan gelen hava yardımıyla yenilenir. Birincil bölgede akış devridaimini tetiklemenin en etkili yollarından biri, yakıt enjektörünün etrafındaki kubbe içine bir girdap üreteci yerleştirmektir [81].

Vorteks kırılması, dönen akışlarda iyi bilinen bir olgudur [81],[82]. Şekil 4. 6'da gösterildiği gibi akışa uygulanan dönme miktarı yüksek olduğunda çekirdek bölgede devridaime neden olur. Bu şekilde elde edilen resirkülasyon, diğer resirkülasyon yöntemlerinden daha iyi bir karıştırma sağlar, çünkü girdap komponentleri güçlü kayma bölgeleri, yüksek türbülans ve hızlı karıştırma oranları üretirler. Dönen akışların bu özellikleri uzun süredir bilinmekte ve yanmanın kararlılığını ve şiddetini ve alev bölgesinin boyut ve şeklini kontrol etmek için birçok pratik yanma cihazında kullanılmaktadır [81].



Şekil 4. 6 Güçlü girdapla oluşan akış devridaimi [81], [83]

Girdap üreteci hem boru hem de halka tipi yakıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarım şekline göre iki tip girap üreteci bulunmaktadır. Bunlar radyal ve eksenel girdap üreteçleridir. Girdap üreteçleri genelde tek olarak kullanılırlar fakat birden fazla kullanıldıkları uygulamalar da bulunmaktadır.

4.3.1 Radyal Girdap Üreteçleri

Radyal girdap üreteçleri hem konvansiyonel hem de kuru düşük emisyonlu (DLE) yakıcılarda yaygın şekilde kullanılmaktadır. Akış karakteristikleri, eksenel girdap üreteçleri ile aynı ölçüde incelenmemiştir. Ancak deneyimler iki farklı girdap üreteci tipi tarafından üretilen akış alanlarının geniş ölçüde aynı olduğunu göstermiştir. Bu nedenle eksenel girdap üreteçleri için oluşturulan tasarım kuralları, radyal girdap üreteçleri içinde geçerlidir [81]. Tipik bir radyal girdap üretecinin gösterimi Şekil 4. 7'deki gibidir.



Şekil 4. 7 Radyal girdap üreteci

4.3.2 Eksenel Girdap Üreteçleri

Eksenel girdap üreteçlerinin klasik gösterimi Şekil 4. 8 'daki gibidir. Burada düz kanatlı eşit kanat mesafeli olan girdap üreteci sabit kanat açılıdır ve θ 'ye eşittir. Bir girdap üretecinden beklenen husus, istenilen debiyi düşük bir basınç kaybı ΔP_{sw} ile iletmektir.



Şekil 4.8 Eksenel girdap üreteci gösterimi

$$\dot{\mathbf{m}}_{sw} = \left(\frac{2\rho_3 \Delta \mathbf{P}_{sw}}{\mathbf{K}_{sw}[(\sec\theta/\mathbf{A}_{sw})^2 - 1/\mathbf{A}_{\mathrm{L}}^2]}\right)^{1/2} \tag{4.5}$$

Burada ΔP_{sw} , girdap üreteci boyunca meydana gelen toplam basınç kaybı, A_{sw} girdap üretecinin kanatsız ön kesit alanıdır ve şu şekilde hesaplanır [81]:

$$A_{sw} = (\pi/4) (D_{sw}^2 - D_{hub}^2) - 0.5\eta_v t_v (D_{sw} - D_{hub})$$
(4.6)

Düz kanatlı girdap üretecinin diğer özellikleri Şekil 4. 9'da gösterilmektedir.



Şekil 4. 9 Eksenel girdap üreteci ölçüleri [81]

Burada θ kanat çıkış açısı, c kanat genişliği, s boşluk, z/c en-boy oranı, s/c boşluk/kanat genişliğidir.

4.3.3 Isıl Yüke Göre Girdap Üreteci Kanat Sayısı ve Kanat Açısı Hesabı

Brülörlerde artan ısıl yükle birlikte yakıt miktarı artar. Artan yakıt miktarı hava fazlalık katsayısına bağlı olarak da hava miktarını artırmaktadır. Dolayısıyla brülörde farklı ısıl yüklerde çalışma söz konusu olduğundan girdap üreteci geometrik boyutları değişmesi söz konusu olabilmektedir. Brülörde çalışılan yüke bağlı olarak optimum girdap üreteci kanat parametreleri, brülör ısıl yükü denklemi, yanma sisteminde gerekli hava miktarı denklemi ve girdap üretecinde geçen optimum hava debisi denklemlerinden aşağıdaki gibi türetilebilir:

$$Q_{\rm brülör} = \dot{m}_{y} H_{\rm u} \quad [kW] \tag{4.7}$$

Burada $\dot{Q}_{\rm brülör}$ brülör ısıl yükü, \dot{m}_y yakıt kütlesel debisi, H_u yakıt alt ısıl değeridir. Brülörde kapasiteye göre gerekli hava miktarı ise şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{m}_{\text{hava}} = \frac{\dot{m}_y}{\left[\left(M_{A,yakit} \times 1/\lambda \right) / \left(M_{A,hava} \times n_{stok} \right) \right]} \quad [kg/s]$$
(4.8)

Burada $M_{A,yakıt}$, yakıt molekül ağırlığı, $M_{A,hava}$ havanın molekül ağırlığını, n_{stok} ise stokiyometrik yanmada H/Y mol oranıdır. Öte yandan girdap üretecinden geçen havanın kütlesel debisi denklem 4. 5'deki gibidir. Girdap üretecinden geçen hava miktarı toplam hava miktarına eşit olabileceği gibi yarısı veya belirli bir oranı olabilir. Bu nedenle $m_{sc} = \dot{m}_{sw}/\dot{m}_{hava}$ olarak tanımlanırsa;

$$m_{sc} = \frac{\dot{m}_{sw}}{\dot{m}_{hava}} = \frac{\left(\frac{2\rho_3 \Delta P_{sw}}{K_{sw}[(\sec\theta/A_{sw})^2 - 1/A_L^2]}\right)^{1/2}}{\frac{\dot{m}_y}{\left[(M_{A,yakıt} \times 1/\lambda)/(M_{A,hava} \times n_{stok})\right]}}$$
(4.9)

$$\frac{m_{sc}\dot{m}_{y}}{\left[\left(M_{A,yakit} \times 1/\lambda\right)/\left(M_{A,hava} \times n_{stok}\right)\right]} = \left(\frac{2\rho_{3}\Delta P_{sw}}{K_{sw}\left[(\sec\theta/A_{sw})^{2} - 1/A_{L}^{2}\right]}\right)^{1/2}$$
(4.10)

Yukarıdaki eşitlikte \dot{m}_y yerine $\dot{Q}_{\rm brülör}/{\rm H}_{\rm u}$ ifadesi yazılır ve $\dot{Q}_{\rm brülör}$ için düzenlenirse:

$$\frac{m_{sc} \dot{Q}_{brülör}/H_{u}}{\left[\left(M_{A,yakıt} \times 1/\lambda\right)/\left(M_{A,hava} \times n_{stok}\right)\right]} = \left(\frac{2\rho_{3}\Delta P_{sw}}{K_{sw}\left[(\sec\theta/A_{sw})^{2} - 1/A_{L}^{2}\right]}\right)^{1/2}$$
(4.11)

$$\dot{Q}_{\rm brülör} = \frac{\left(\frac{2\rho_3 \Delta P_{\rm sw}}{K_{\rm sw}[(\sec\theta/A_{\rm sw})^2 - 1/A_{\rm L}^2]}\right)^{1/2} \frac{M_{A,yakit} H_{\rm u}}{\lambda}}{m_{sc} (M_{A,hava} \times n_{stok})}$$
(4.12)

Elde edilir. $m_{sc} = \frac{\dot{m}_{sw}}{\dot{m}_{hava}} = 1$ olması durumunda, ısıl yüke bağlı olarak girdap üreteci parametreleri (A_{sw}) şu şekilde hesaplanır:

$$\dot{Q}_{\rm brülör} = \frac{\left(\frac{2\rho_3 \Delta P_{\rm sw}}{K_{\rm sw}[(\sec\theta/A_{\rm sw})^2 - 1/A_{\rm L}^2]}\right)^{1/2} \frac{M_{A,yakit} H_{\rm u}}{\lambda}}{\left(M_{A,hava} \times n_{stok}\right)}$$
(4.13)

Başlangıçta belirlenen ısıl yük ve kanat açısına bağlı olarak girdap üreteci kanat sayısı (η_v) denklem 4.6'dan yani A_{sw} 'den hesaplanır.

4.3.4 Girdap Sayısı (S_N)

Beer ve Chigier [84] eksenel akıma uygulanan dönme miktarını karakterize etmek için boyutsuz girdap sayısını (S_N) önermişlerdir:

$$S_{\rm N} = 2G_{\rm m}/(D_{\rm sw}G_{\rm t}) \tag{4.14}$$

Burada, G_m, açısal momentumun eksenel akısı ve G_t, eksenel itme şeklindedir. Yaklaşık 0,4'ten küçük girdap sayıları için akışın devridaimi sağlanamaz ve girdap zayıf olarak tanımlanır. Pratikte ilgi çeken çoğu girdap üreteci, güçlü girdap koşulları altında çalışırlar (yani S_N> 0.6). Çeşitli türden girdap üretecinin girdap sayılarının hesaplanması için ifadeler Beer ve Chigier tarafından türetilmiştir. Sabit kanat açısı θ olan dairesel bir girdap üreteci için bu araştırmacılar son olarak girdap sayısı için aşağıdaki formülü önermişlerdir [84] :

$$S_{N} = \frac{2}{3} \left[\frac{1 - (D_{hub} - D_{sw})^{3}}{1 - (D_{hub} - D_{sw})^{2}} \right] \tan\theta$$
(4.15)

Böylece basit bir eksenel girdap üreteci için, D_{hub}/D_{sw} = 0.5 olan tipik bir girdap üreteci için güçlü hava dolaşımı (sirkülasyon) (S_N > 0.6) elde etmek için gereken minimum kanat açısı Denk. 4.15'te 38 ° olarak hesaplanmaktadır [81].

4.3.5 Resirkülasyon Bölgesi Boyutu

Serbest dönen akıştaki resirkülasyon bölgesi Şekil 4.10(a)'da gösterilmektedir. Akışın eksenel simetri olduğu varsayıldığından akış modelinin sadece yarısı düşünülür. Resirkülasyon bölgesi, ACB eğrisi içerisindedir. B noktasına durgunluk noktası denir. ACB'nin dışındaki akım, resirkülasyonu AB eğrisi boyunca yönlendiren ana akıştır. Sıfır eksenel hız koşulları kesikli AB eğrisi ile gösterilir. Tipik eksenel ve girdap hız profilleri Şekil 4. 10(b)'de gösterilmektedir. Tüm hız komponentleri akış yönünde bozunurlar. Durma noktasından sonra, ters eksenel hızlar kaybolur ve eksensel hız profilinin tepe noktası, girdap etkisinin azaldığı yerden merkez çizgiye doğru kayar [81].



Şekil 4. 10 Resirkilasyon bölgesi (a), eksenel ve girdap akışlarının (b) gösterimi

Resirkülasyon bölgesi boyutunu düzenleyen faktörler çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. En kapsamlısı Kilik'in [85] kanat tipi (düz veya eğri), kanat açısı, kanat boy oranı ve aralık/kord oranı farklılıklarının resirkülasyon bölgesi boyutu üzerindeki etkilerini inceleyen araştırmasıdır. Kilik'in çalışmalarında [85] elde ettiği deneysel verilere göre, resirkülasyon bölgesi boyutu şu aşağıdaki durumlarda artar [81]:

- Kanat açısındaki artış
- Kanat sayısındaki artış
- Kanat en-boy oranındaki azalma
- Düz kanattan eğrisel kanatlara geçiş

Kilik yaptığı çalışmalarda ayrıca resirkülasyon bölgesindeki debinin girdap üreteci kanat tasarımına, girdap sayısına bağlı olduğunu ifade etmiştir. Sonuç olarak eğrisel kanadın daha fazla debinin resirkülasyonuna neden olduğu ve ayrıca girdap sayısının artmasıyla debi resirkülasyonunun arttığı, düşük girdap sayısında neredeyse hiç debi resirkülasyonu gözlenmediği ifade edilmiştir [85].

Girdap akışları üzerinde yapılmış çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre tüm kanıtlar, eğrisel kanatların düz kanatlardan aerodinamik olarak daha verimli olduğunu göstermektedir. Bunun nedeni, eğrisel kanatların gelen aksiyal akışın kademeli olarak dönmesine izin verdikleri için kanadın emme tarafındaki akış ayırımını engellemesidir. Öte yandan düz kanatlı girdap üreteçlerinin avantajı da, ucuz ve kolay üretilebilir olmalarıdır. Üstelik düz kanatlı girdap üreteçleri ile ilişkili akış çizgileri, her bir kanala tutturulmuş duran bölgeler tarafından oluşturulur ve daha kararlı bir alevi teşvik etme ve yanma gürültüsünü azaltma eğilimindedirler [81].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışma için gerekli olan brülör, sıcak su kazanı, kazan soğutma sistemi, yardımcı ekipmanlar, sıcaklık, basınç ve debi ölçüm aletleri ve emisyon ölçüm cihazı Termo Isı Sistemleri Ticaret ve Sanayi Anonim Şirketi firması tarafından sağlanmış olup, bu bölümü oluşturan deneysel testler ilgili firmanın Çorlu'daki tesislerinde kurulu bulunan deneysel test ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Testler için kullanılan doğal gaz, bileşenleri ve mol oranları Çorlu'da gaz tedarikçisi olan ÇORDAŞ tarafından sağlanmış olup, doğal gaz özellikleri testlerin yapıldığı gün/ay için temin edilmiştir.

Bu bölümde, çalışmanın deneysel yöntemi, deney tesisatı ve ekipmanları ile kullanılan ekipmanlar ve belirsizlik analizleri detaylarına yer verilmiştir.

5.1 Deneysel Yöntem

Bu çalışmanın deneysel tesisatı brülör, kazan, kazan yardımcı ekipmanları ve ölçüm aletlerinden oluşmaktadır. Ölçüm aletleri ile bir yakma sisteminde yakıt debisi, yakıt sıcaklığı, hava giriş sıcaklığı, gaz çıkış sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, kazan egzoz gazındaki O₂, CO₂, CO, NO₂, NO, NOx ölçümleri yapılabilmektedir. Bu nedenle mevcut test ünitesinin imkân verdiği ölçüde test parametreleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar için kullanılan test ünitesi [86] Şekil 5. 1'de görülmektedir.

Bu çalışmada, doğal gaz yanmasında yanma sonu emisyonları farklı test parametreleri değişimleri altında araştırılmıştır. Deneysel çalışma da beş farklı ısıl yükte (459 kW, 668 kW, 866 kW, 1085 kW ve 1200 kW) çalışılarak brülör yükünün emisyon değerleri üzerindeki etkisi, üç farklı hava fazlalık katsayısında (1.05, 1.2, 1.38) çalışılarak hava fazlalığının emisyon değerleri üzerindeki etkisi ve üç farklı kazan boyunda (2.10 m, 2.45

m, 2.80 m) testler gerçekleştirilmiş olup yanma odası uzunluğunun emisyon değerleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan testler ile yanma sonu gazları olan CO₂, O₂, CO, CH₄, NOx (NO, NO₂) NOVA plus marka ölçüm cihazı [87] ile ölçülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5.2 Deneysel Sistem ve Ekipmanları

Deney sistemi, bir adet Ecostar Combustion Systems markalı ECO45 G C 3b oransal gaz brülörü [86] ile gaz yolu armatürleri (ekipmanları), dairesel kesitli ST37 çelik malzemeli yanma hücresine (odası) sahip duman borulu sıcak su kazanı ile ekipmanları ve kazan soğutma suyu ile ekipmanlarından oluşmaktadır. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi amacıyla yakma sisteminde kullanılan yakıt miktarı, sıcaklığı ve basıncı, brülör gövde basıncı, kazan karşı basıncı ölçümü, soğuk su debisiyle birlikte giriş ve çıkış sıcaklıkları, yanma sonu gaz emisyonların ölçümleri için ölçüm cihazları kullanılmıştır.

Sistemde kullanılan doğal gaz şebekeden alınıp brülöre ulaşmadan önce sırasıyla açmakapama vanası olan küresel vana ve filtreden geçerek toz vb. kirlerden temizlenir. 300 mbar olan şebeke basıncı, gaz yolu ekipmanlarından olan basınç regülatörü yardımıyla 21 mbar düşürülür. Gaz daha sonra sırasıyla manometre, küresel vana, emniyet ventili, küresel vana, kompansatör ve selonoid valf ekipmanlarından geçerek brülörün gaz yakıt besleme bölümüne ulaşır. Yakma sisteminde kullanılan oksitleyici hava ise brülör gövdesinde monteli bulunan radyal fan ile emilerek brülör içerisine basılır. Hava ve yakıtın brülör ağzında kıvılcım ateşlemeli elektrot kullanılarak tutuşturulması sonucu gaz yakıt yanması gerçekleşir. Yanma sonrası alev oluşur. Alev kazan eksenine paralel olarak oluşur. Oluşan alev yüksek sıcaklıkta olması dolayısıyla kazan duvarları arasında bir ısı ışınımı söz konusudur. Alevin kazan içerisinde yayılması beraberinde yanma sonu gazlarının kazan içerisinde hareketini sağlar. Fakat kazan karşı basıncı nedeniyle yanma sonu gazları alev etrafından geri dönerek duman borularına yönelir. Bu sırada ısı enerjisinin bir kısmını taşınım ve ışınımla ile kazan duvarı ve oradan da su ceketine aktarır. Sıcak yanma sonu gazları geri kalan enerjisinin bir kısmını da duman borularında su ceketine iletir. Geri kalan enerjisini de sıcak egzoz gazı bünyesinde kazandan ayrılıp baca bağlantı borusu yardımıyla bacadan ortama atar. Bu arada kazan çıkışı ölçüm noktasında gaz çıkış sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, kazan egzoz gazındaki O₂, CO₂, CO, NO₂, NO, NOx, CH₄ gaz ölçümleri gerçekleştirilmektedir. Diğer taraftan kazan soğutma suyu sistemde kullanılan bir adet pompa ile kazana beslenmiş ve kazan ocak duvarından ve 26 adet duman borularından aktarılan ısı ile ısınmış bulunmaktadır. Sürekli çalışan pompa sayesinde ısınan su devri daim amaçlı soğutma kulesine yönlendirilmekte, burada bir adet eksenel fanın da kullanılmasıyla, ikinci bir kaynaktan su püskürtülerek besleme suyu soğutulmakta ve tekrar kazana yönlendirilmektedir. Gaz yolu ekipmanları, brülör, kazan, kazan ekipmanları ve soğutma kulesinin da resmedildiği deney sisteminin şematik görünüşü Şekil 5. 2'de görülmektedir.



Şekil 5. 1 Deneysel çalışmaların yapıldığı ve firmada kurulu bulunan test ünitesi [86]



Şekil 5. 2 Deneysel sistemin şematik görünüşü
5.2.1 Brülör

Testler için kullanılan brülör, Termo Isı Sist. Tic.ve San. A. Ş. firmasının testler için temin ettiği ve kendi imalatları olan "Ecostar Combustion Systems" markalı ECO45 G C 3B oransal brülörüdür [86] ve Şekil 5. 3'te görülmektedir. Oransal brülöre beslenen yakıt ve hava istenen değerlere ayarlanabilmektedir. Test brülörünün kapasite ve özellikleri Çizelge 5. 1'de görülmektedir.



Şekil 5. 3 Testlerde kullanılan ECO45 G C 3B gaz brülörü [86]

Çizelge 5. 1 ECO45 GC 3B Gaz brülörü kapasitesi ve özellikleri [74]

BRÜLÖR TİPİ	KAF	PASITE	КАР	ASİTE	DOĞAI TUKE	_gaz Timi	FAN Motor Gucu	50 Hz te GERILIM	300mbar	21mbar
	Min. Kcal/h	Max. Kcal/h	Min.k W	Max kW	Min. Nm³/h	Max. Nm³/h	kW	v	Gazyolu ölçüsü	Gazyolu ölçüsü
ECO 45 G C 3b	172 000	1 032 000	200	1200	20.8	125.1	1.50	220-380	1 1/2"-DN40	2"-DN50

5.2.2 Kazan

Testlerde kullanılan test kazanı st37 çelik malzemeden üretilmiş olup dairesel kesitlidir. Kazan ocak uzunluğu ileri geri hareketini sağlayan bir mekanizma ile minimum 2.10 m, maksimum 2.80 m uzunluğuna çıkabilmektedir. Kazan etrafında yerleştirilmiş 26 adet duman borusu mevcuttur. Kazan ve duman boruları su ceketi ile çevrelenmiş olup su soğutmalıdır. Testlerde kullanılan silindirik kazan Şekil 5. 4'te görülmektedir. Test kazanı gaz çıkış emisyonlarının ölçüldüğü nokta Şekil 5. 5' de verilmektedir. Brülörün kazana monte edilmesi ve sistemin çalışmaya hazır hale gelmiş durumu Şekil 5. 6'da görülmektedir.



Şekil 5. 4 Testler için kullanılan dairesel kesitli su soğutmalı kazan [86]



Şekil 5. 5 Gaz emisyonlarının ölçüldüğü kazan çıkışı ve baca bağlantı borusu [86]



Şekil 5. 6 Testler için kullanılan ECO 45 G C 3B brülör-kazan montajı [86]

5.2.3 Debi, Sıcaklık ve Basınç Ölçerler

Sistemde dolaşan soğutma suyu debisi, sıcaklığı ve basıncı ABB marka test ölçüm cihazları [88] kullanılarak ölçülmüştür. Bu cihazlar Şekil 5. 7'de sağdan itibaren sırasıyla termoeleman, debimetre, manometre ve dijital manometrelerdir. Test şartlarında ölçülmüş soğuk su debisinin bir ekran görüntüsü Şekil 5. 8'de görülmektedir.

Yakma sisteminde kullanılan yakıtın şebekeden 300 mbar basınçla alınıp, brülör uygulama basıncına düşürüldüğü basınç regülatörü ve yakıt debimetresi Şekil 5. 9'da görülmektedir. Basınç regülatöründen ayarlanan yakıt basıncı daha sonra gaz şekil 5. 10'daki gaz debimetresinden geçerek gaz iletim borusuyla brülör gaz başlığına gelene kadar bir miktar daha basınç kaybederek brülörden püskürtülmektedir.



Şekil 5. 7 Sistemde dolaşan soğutma suyu sıcaklık, debi ve basınç ölçüm cihazları



Şekil 5.8 Sistemde dolaşan soğutma suyu debimetresinden su debisi ölçümü



Şekil 5. 9 Yakıt basıncının 21 mbar'a düşürüldüğü regülatör seti ve gaz debimetresi



Şekil 5. 10 Doğal gaz debimetresinde debi ve sıcaklık ölçümlerinin gösterimi

5.2.4 Emisyon Ölçüm Cihazı

Test kazanında doğal gazın yanma sonucu gaz emisyonları, sıcaklığı ve hava fazlalık değeri ölçümü için kullanılan NOVA marka emisyon ölçüm cihazı şekil 5. 11 ve 5. 12'de görülmektedir. Bu cihazın ölçüm probu kazan çıkışına yerleştirmiş olup (Şekil 5. 5)

ölçümler ölçüm cihazında okunmaktadır. Ayrıca bu cihazdan şekil 5. 13'deki gibi detaylı ölçüm raporu da alınabilmektedir.



Şekil 5. 11 Yanma sonu gaz emisyonları ölçümünde kullanılan ölçme cihazı [86]



Şekil 5. 12 NOVA marka ölçme cihazında anlık emisyon ölçümlerin gösterimi

Dide	5-201	@ Jas	- Gene	3 ölasm		
TERMO ISI SIS Terkguna Org. Bulent Ecevit I COELU / TER WWW.ecoster.	TERMO ISI SISTEMLERI Tarkgura Org. San Bil. Bulant Rowalt Bin. Bar? CORLU / FRENKRAD WWW.acaster.com.tr		TERMO ISI SISTEMILEI Tarkapun Org. San. Bal. Bulant Ecrevit Biv. Nor7 CORLU / TEKEDAG www.ecostor.com.fr		TERMO ISI SISTEMETEI Tarkasos Org. Sam. Bol. Bulant Ecevit Bir. No.7 CORLU / TEXEDAO www.ecostar.com.fr	
SAL 26.04.2016	14,20:25	SAL 26.04.2016	14:40:13	SAL 26.04.2016	15:04:23	
Doğal gaz	11.9 %	Dağal gaz	11.9%	Doğal gaz	11.9 %	
Program 1		Program 1		Program 1	(Sec. 2	
02 [%]	3.5	02 [%]	3.4	02 [%]	3.5	
CO2 [%]	9.54	CO2 [%]	9.67	CO2 [%]	9.44	
CO [ppm]		CO [ppm]	41	CO [ppm]	8	
NO [ppm]		NO [ppm]	4	NO [ppm]	3/	
NOr (ppm)	45	NOr [ppm]	65	NO2 [ppm]	61	
SO2 [gam]		507 [ppm]	0	SO2 [ppm]	0	
CH4 [ppm]	440	CH4 [ppm]	60	CH4 [ssm]	0	
Gar stenkligt ["C]	183.7	Gar sicakliği ["C]	181.7	Gar sicakliği ["C]	165.6	
Have steaklik [C]	18.7	Hova sicaklik ["C]	19.0	Have szcaklak ["C]	18.5	
Kayıplar nev [%]	7.7	Kayıplar nev [%]	7.6	Kayıplar nev [%]	6.9	
Verim nev [%]	92.3	Verim nev [%]	92.4	Verim nev [96]	93.1	
Verim gcv [%]		Verim gev [%]		Verim gev [%]		
Çiğleşme noktusi ["C]	54.8	Çiğleşme noktası [C]	59.1	Çiğleşme noktusi ["C	54.7	
Have Orent []	1.20	Rave Gran []	1.29	Heve Orshi []	1.20	
Farla hava [%]	20	Farla have [76]	20	Fazla hava [%]	20	
Çekiş [hPu]	-9.07	Cents [nra]	-0.11	Çekiş [hPu]	-0.10	
CO [ppm/0%02]		co [bbm/owor]		CO [ppm/0%07]	10	
Kanan Hau		Kenne No.:				

Şekil 5. 13 NOVA marka cihazda anlık emisyonların detaylı ölçüm raporları

5.3 Ölçüm Cihazlarının Doğruluk-Belirsizlik Analizi

Deneysel sistemde elde edilen sonuçların doğruluğu, yapılan ölçümler kadar ölçümlerde kullanılan cihazların uygunluğu, cihazların kendi içindeki hassasiyeti ve bunların birlikte çalışması durumundaki uyuma bağlıdır. Deney sonucuna etki eden ve olması gereken değerden farklı bir değer almasını sağlayan her bir faktör hata olarak kabul edilir. Deney sonuçlarına etki edecek hataların başında deneyi yapan araştırmacıdan kaynaklanan hatalar gelmekte, bunu deneysel sistem hataları izlemektedir. Araştırmacının deneyim ve tecrübesi ilk hatayı ortadan kaldırabilir fakat ikinci hatayı ortadan kaldırmak bazen mümkün olmayabilir. İkinci hata araç ve gerecin imalatından kaynaklanan hatalar, kesin olarak bilinmeyen sabit hatalar (ölçüm cihazında kalıbrasyon eksikliği vb.) ve deney ve gereçlerinde meydana gelen rastgele hatalardan (elektronik salınımlar vb.) oluşmaktadır. Bu hataların minimize edilmesi veya hata oranlarının belirlenmesi sonuçların doğru şekilde değerlendirilmesi açısından son derece önemlidir.

Bu çalışmada deneysel testlerde kullanılan cihazlar ile bu cihazların çalışma aralığında belirsizlik değerleri Çizelge 5. 2'de belirtilmektedir. Ayrıca ölçüm sonuçları ile hesaplanan brülör ısıl yükü ve NOx emisyon sonuçları aynı çizelgede belirtilmektedir. Deneysel çalışmalarda hesaplanan brülör ısı yükü, yakıt kütlesel debisiyle yakıtın alt ısıl değerinin çarpılmasına eşit olduğu bilinmektedir. Doğal gazı oluşturan gaz bileşenleri ve bu bileşenlerin yüzdeleri ÇORDAŞ [54] tarafından sağlanması ve alt ısıl değerinin de doğal gaz içeriği ve yüzdelerine bağlı olarak sabit değer olarak hesaplanması [89] sonucu brülör ısıl yükünün belirsizliği gaz ölçüm debisi belirsizliğine eşit olduğu değerlendirilmektedir. Öte yandan NOx emisyonun da NO ve NO₂ emisyonları toplamına eşit olması nedeniyle toplam NOx belirsizliği de Kline ve McClintock yöntemine göre aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$NOx = NO + NO_2$$
(5.1)

$$w_{NOx} = \pm \left[\left(\frac{\partial NOx}{\partial NO} w_{NO} \right)^2 + \left(\frac{\partial NOx}{\partial NO_2} w_{NO_2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$
(5.2)

$$w_{NOx} = \pm \left[(1w_{NO})^2 + (1w_{NO_2})^2 \right]^{1/2} = 5.38 \, ppm \tag{5.3}$$

Ölçümler	Ölçüm Cihazları	Aralık	Doğruluk Hassasiyet
$\dot{Q}_{\text{ gaz}}$	Sensyflow iG	Maks. 6500 Nm ³ /h	± % 0.3
\dot{Q} soğutma suyu	ProcessMaster300	Maks. 600 m ³ /h	± % 0.4
O ₂	NOVA plus	% 0-21	± % 0.2
СО	NOVA plus	0-300 ppm	<u>+</u> 2 ppm
СО	NOVA plus	0-4000 ppm	\pm 100 ppm
CO ₂	NOVA plus	% 0-3	<u>+</u> % 0.5
NO	NOVA plus	0-300 ppm	<u>+</u> 2 ppm
NO	NOVA plus	0-1000 ppm	<u>+</u> 5 ppm
NO ₂	NOVA plus	0-200 ppm	<u>+</u> 5 ppm
CH ₄	NOVA plus	% 0-3	<u>+</u> % 0.03
T _{hava}	NOVA plus	0-100 °C	<u>±</u> 1 °C
T _{gaz}	NOVA plus	0-650 °C	<u>+</u> 2 °C
Hesaplananlar			Belirsizlikler
$\dot{Q} = \dot{m}H_u$			± % 0.3
NOx			<u>+</u> 5.38 ppm

Çizelge 5. 2 Deneysel çalışmada yapılan ölçümlerin doğruluk-belirsizlik değerleri

BÖLÜM 6

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ÇALIŞMALARI

6.1 Giriş

Sıvı ve gaz akışkan akışlarında kütle, momentum ve enerji denklikleri korunum yasalarınca kısmi diferansiyel denklemler ile temsil edilir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), bu gibi kısmi diferansiyel denklem sistemlerini bir dizi cebirsel denklem ile değiştirerek dijital bilgisayarlar kullanarak çözme yöntemidir [90].

HAD akışkan akışlarını matematiksel modelleme (kısmi diferansiyel denklemler), sayısal yöntemler (ayrıklaştırma ve çözüm teknikleri) ve yazılım araçları (çözücüler, öncesi ve sonrası işlemler) vasıtasıyla niteliksel ve bazen de niceliksel tahminini sağlar. Kısacası HAD sanal akış laboratuarında sayısal deneyler (bilgisayar simülasyonları) yapmayı sağlar. HAD akışkan akışının söz konusu olduğu aşağıdaki uygulamalarda kullanılabilmektedir [90].

6.2 Korunum Denklemleri

Kütle veya süreklilik denkleminin korunumu denklemi genel formda aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla . \left(\rho \vec{v} \right) = S_m \tag{6.1}$$

Bu denklem hem sıkıştırılabilir hem de sıkıştırılamaz akışlar için geçerlidir. Bu denklemde S_m , sürekli faza ikinci ve ayrık bir fazdan (sıvı damlacıklarının buharlaşması) kütle eklenmesi veya herhangi bir harici kaynak olabilir [65].

İvmesiz bir referans çerçevede momentum korunumu denklem 6.2'deki gibi tanımlanır [65]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla (\bar{\tau}) + \rho\vec{g} + \vec{F}$$
(6.2)

Burada p statik basınç, $\overline{\overline{\tau}}$ gerilme tensörü ve $\rho \vec{g}$ yerçekimi kuvveti ve F dış kaynaklı kuvvetlerdir. $\overline{\overline{\tau}}$ gerilme tensörü şu şekilde hesaplanır:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right]$$
(6.3)

Burada μ moleküler viskozite, I birim tensör, denklemin en sağ ifadesi de hacim genişlemesini ifade eder. Diğer taraftan enerji korunumu denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir [65].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \left(\vec{v}(\rho E + p)\right) = \nabla \left(k_{eff}\nabla T - \sum_{j}h_{j}\vec{J}_{j} + \left(\bar{\bar{\tau}}_{eff}\cdot\vec{v}\right)\right) + S_{h}$$
(6.4)

Bu denklemde k_{eff} efektif iletkenlik $k + k_t$ toplamına eşittir. Burada k_t türbülanslı ısıl iletkenliktir ve kullanılan türbülans modeline göre değişmektedir. \vec{J} türlerin difüzyon akısına eşittir. Parantez içindeki ilk terim, kondüksiyonla (iletimle) olan enerji transferi, ikinci terim ise türlerin difüzyonu ile enerji transferi, üçüncü terimde viskoz dağılımlardan kaynaklı enerji transferidir. S_h ise kimyasal reaksiyon ısısı ve diğer hacimsel ısı kaynaklarıdır [65].

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$
(6.5)

Denklem 6.5 'te h, ideal gazlar için duyulur entalpi şöyle ifade edilir:

$$h = \sum_{j} Y_{j} h_{j} \tag{6.6}$$

Sıkıştırılamaz akışlar için, bu ifade denklem 6.7'deki gibidir.

$$h = \sum_{j} Y_{j} h_{j} + \frac{p}{\rho} \tag{6.7}$$

Burada h_i ifadesi şu şekildedir:

$$h_{j} = \int_{T_{ref,j}}^{T} c_{p,j} \, dT + h_{j}^{o} \big(T_{ref,j} \big) \tag{6.8}$$

Burada $h_i^o(T_{ref,i})$ türlerin referans sıcaklıklarındaki oluşum entalpileridir [65].

6.3 Türbülanslı Akışın Modellenmesi

Akışkanlar hızlarına göre laminer, geçiş ve türbülanslı akışlar olarak sınıflandırılırlar. Bu durum boyutsuz Re sayısıyla karekterize edilebilir. Boru akışlarında Re sayısı 2300 değerinden küçük ise laminer akış, 2300-4000 değerleri arasında geçiş akışı ve 4000 değeri üzerinde ise türbülanslı akışlar söz konusudur. Bu akışlar arasında türbülanslı akışlar karmaşıklığı nedeniyle birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve yapılan çalışmalar sonucunda modeller geliştirilmiştir. Gerçekte bu akışları modelleyebilmek çok zor ve neredeyse imkânsızdır. Çünkü akış karmaşık, rastgele ve anlık olarak değişmektedir. Fakat günümüzde gelişmiş CFD programlarıyla uygulamalar da türbülanslı akışlar yaklaşık olarak modellenebilmekte ve tahmin edilebilmektedir. Fluent programı bünyesinde bulunan türbülans modellerinden Standard $k - \epsilon$ modeli, Realizable $k - \epsilon$ modeli ve RNG $k - \varepsilon$ modeli yaygın olarak kullanılan $k - \varepsilon$ türbülans modelleri olarak bilinmekte ve en gelişmiş türbülans modelleri arasında görülmektedir. Bunların dışında, k-omega, Reynolds stress, Scala-Adaptive Simulation (SAS), Detached Eddy Simulation (DES) ve Large Eddy Simulation (LES) türbülans modelleri de diğer önemli türbülans modelleri arasında sayılmaktadır. Bu türbülans modelleri zamanla farklı uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Bu nedenle birbiri yerine kullanılabilseler de uygulama alanları farklılık gösterebilmektedir.

Türbülans modellerinde k türbülans kinetik enerjisi ve ε disipasyon (yayınım) oranını temsil ederken, Standard k – ε modeli, Realizable k – ε modeli ve RNG k – ε modelleri arasındaki temel farklılıklar da türbülanslı vizkozitenin hesaplanma yöntemi, k – ε türbülans yayılımıyla ilgili olan Prandtl sayıları ve ε denklemindeki üretim ve tüketim terimleridir [65].

Aşağıda türbülanslı akış uygulamalarında en yaygın kullanılan türbülans modelleri hakkında bilgiler verilmiş diğerleri hakkında bilgiler [65] dokümanında ulaşılabilir.

6.3.1 Standard $k - \epsilon$ Modeli

Standard $k - \varepsilon$ modeli türbülansın iki deklemle tanımlandığı en basit ve en temel modeldir. Bu modelde türbülans hızı ve uzunluk skalası iki ayrı tranport denkleminin çözümüyle birbirinden bağımsız olarak belirlenebilmektedir. Launder ve Spalding tarafından önerilen bu model, doğru tahmin, ekonomiklik ve sağlamlığı dolayısıyla türbülanslı endüstriyel akış ve ısı transfer uygulamalarında oldukça popülerdir [91]. Yarı ampirik bir model olmakla birlikte jet akışları ve kanal akışlarının modellenmesinde tercih edilmektedir [43].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k$$
(6.9)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}$$
(6.10)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6.11}$$

$$C_{1\varepsilon}$$
 = 1.44, $C_{2\varepsilon}$ = 1.92, C_{μ} = 0.09, σ_k = 1.0 ve σ_{ε} = 1.3

Zamanla k — ϵ modelindeki eksiklikler tesbit edilerek düzeltme ve eklemeler yapılarak iki ayrı k — ϵ modeli geliştirilmiştir [91].

6.3.2 Realizable $k - \epsilon$ Modeli

Yüksek dönümlü ve girdaplı türbülanslı akışların modellenmesinde Standard k – ε modeli iyi bir tercih değildir. Bunun yerine türbomakinalarda akışın dönümlülüğünü, brülör ve yakılarda girdapları göz önüne alabilecek Realizable k – ε modelinin kullanılması daha uygundur. Bu modelin düşük girdap sayılı (S<0.5) türbülanslı akışlarda kullanılması uygundur [91]. Realizable k – ε türbülans modelinin iki denklemli ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k$$
(6.12)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$
(6.13)

$$C_1 = mak. \left[0.43 \frac{\eta}{\eta+5} \right], \ \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$
(6.14)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6.15}$$

$$C_{\mu} = \frac{1}{A_0 + A_S^{\frac{kU^*}{\varepsilon}}}$$
(6.16)

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \widetilde{\Omega}_{ij}\widetilde{\Omega}_{ij}}$$
(6.17)

$$\widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \tag{6.18}$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k \tag{6.19}$$

Burada μ_t , ε , $\tilde{\Omega}_{ij}$, ω_k ve A_o - A_s sırasıyla türbülans girdap viskozitesi, türbülans dağılım oranı, ortalama dönme tensörü, açısal hız ve model sabitleridir. Burda A_o ve A_s şu şekilde ifade edilmektedirler [91].

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6}\cos\Phi$$
 (6.20)

$$\Phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W), \ W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \ \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \ S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$$
(6.21)

Bu denklemlerde G_k ortalama hız gradyenleri nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjisi üretimi ve G_b kaldırma kuvveti nedeniyle üretilen türbülans kinetik enerjisi, Y_m sıkıştırılabilir türbülansta dalgalı genişlemenin toplam dağılım oranına katkısını temsil eder. C_2 ve $C_{1\epsilon}$ sabitlerdir. σ_k ve σ_{ϵ} sırasıyla k ve ϵ için türbülans Prandtl sayılarıdır. S_k ve S_{ϵ} kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir. $C_{1\epsilon}$, C_2 , σ_k ve σ_{ϵ} denklemlerdeki ayarlanabilen sabitlerdir varsayılan değerleri de şöyledir. $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\epsilon} = 1.2$ [65].

6.3.3 RNG $k - \epsilon$ Modeli

Düşük girdap sayılı (S < 0.5) türbülanslı akışlarda önerilen Realizable k — ε ile birlikte kullanılabilen bir başka model de RNG k — ε modelidir. Bu modelin de girdap üreteçli brülör ve siklon tipi yakıcılarda Standard k — ε yerine kullanılması önerilmektedir [91].

RNG metodu matematiksel teknikler kullanılarak anlık Navier-Stokes denklemlerinden türetilmektedir. Bu modelde analitik türev Standard k — ε modeldekinden farklı sabitler kullanılarak sonuçlar vermektedir. Dahası taşınım dekleminde k ve ε için farklı ve ilave terimler içermektedir [43].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho k u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\alpha_{k} \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_{j}} \right) + G_{k} + G_{b} - \rho \varepsilon - Y_{m} + S_{k}$$
(6.22)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_{i}}(\rho\epsilon u_{i}) = \frac{\partial}{\partial x_{j}}\left(\alpha_{k}\mu_{eff}\frac{\partial\epsilon}{\partial x_{j}}\right) + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}(G_{k} + C_{3\epsilon}G_{b}) - C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^{2}}{k} - R_{\epsilon} + S_{\epsilon} \quad (6.23)$$

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1.72 \frac{\hat{\nu}}{\sqrt{\hat{\nu}^3 - 1 + C_{\nu}}} d\hat{\nu}$$
(6.24)

$$\hat{v} = \mu_{eff} / \mu \tag{6.25}$$

$$C_{\nu} \approx 100 \tag{6.26}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{6.27}$$

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_s, \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right) \tag{6.28}$$

$$R_{\varepsilon} = \frac{C_{\mu}\rho\eta^3(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}\frac{\varepsilon^2}{k}$$
(6.29)

6.3.4 Reynolds Stress Modeli (RSM)

Reynolds Stress Modeli diferansiyel taşınım denklemlerini kullanarak her bir Reynolds gerilmenin $\overline{u'_i u'_j}$ hesaplanmasını içerir. Reynolds gerilmeleri daha sonra Reynolds ortalama momentum denkleminin kapalı formunu elde etmek için kullanılır. Reynolds gerilme taşınım denklemleri tam momentum denkleminin momenti alınarak türetilebilir [65].

Reynolds Stress Modeli düşük girdap sayılı türbülans akışlarında kullanılan Realizable $k - \varepsilon$ ve RNG $k - \varepsilon$ türbülans modellerinin aksine yüksek girdaplı (S > 0.5) akışlar için kullanılması önerilmektedir [65]. Öte yandan Reynold Stress, geri dönüş bölgesinin meydana geldiği ters akış gradyenlerini tespit etmede diğer iki yöntemden daha başarılı olduğu ayrıca denklemlerinde bulunan stres komponentleri sayesinde akışın anizotropik davrandığı düşük hızlı ters akış bölgelerinde hız profillerini daha gerçekçi tespit ettiği ifade edilmektedir. Bu modelin handikapları ise yakınsamadaki zorluklar ve çözümleme süresinin diğer modellere göre daha fazla olmasıdır. Daha detaylı bilgilere [91] kaynağından ulaşılabilir.

6.4 Yanmanın Modellenmesi

Kimyasal türler için korunum denklemlerinin çözümü her bir türün yerel kütle kesri, her bir tür için Fluent programı ile konveksiyon-difüzyon denkleminin çözümü ile tahmin edilir. Korunum denkleminin genel formu şu şekilde ifade edilebilir [65].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i$$
(6.30)

Bu denklemde ilk ifade her bir türün kütle kesrinin değişimini, ikinci ifade türlerin konveksiyonunu ifade eder. Denklemin sağ tarafındaki ilk terim difüzyon değişim oranını, ikinci terim kimyasal reaksiyon sonucu türlerin net üretimini ifade eder. Son terim ise diğer kaynakların değişimini ifade eder [92]. Laminer ve türbülanslı akışlarda i türünün difüzyon akısı \vec{J}_i şu şekilde ifade edilir [65].

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i - D_{T,i} \frac{\nabla T}{T}$$
(6.31)

$$\vec{J}_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{sc_t}\right) \nabla Y_i \tag{6.32}$$

Burada $D_{i,m}$ her bir i türü için kütle difüzyon katsayısı, $D_{T,i}$ ısıl difüzyon katsayısıdır.

Burada $D_{i,m}$ karışımdaki her bir türün (i) difüzyon katsayısını, $D_{T,i}$ ısıl difüzyon katsayısını ifade eder. Sc_t Schmidt sayısı (varsayılan olarak 0.7), μ_t türbülans viskozitesidir. Çoklu akış uygulamalarında türlerin difüzyonu dolayısıyla entalpi taşınımı entalpi alanı üzerinde önemli bir yer tutar ve ihmal edilmemelidir [65].

$$\nabla \left[\sum_{i=1}^{n} h_i \vec{J}_i \right] \tag{6.33}$$

Kimyasal türlerin korunum denkleminde reaksiyon hızı R_i , şu üç şekilde hesaplanır [65]:

- Laminer sonlu-hız modeli (Laminar Finite-Rate Model)
- Girdap Ayrışma Modeli (Eddy Dissipation Model)
- Girdap Ayrışma Konsepti (Eddy Dissipation Concept)

6.4.1 Laminer Sonlu-Hız Modeli (Laminar Finite-Rate Model)

Laminer sonlu hız modeli Arrhenius ifadelerini kullanarak kimyasal kaynak terimlerini hesaplar ve türbülans dalgalanmalarının etkilerini göz ardı eder. Model laminer alevler için geçerlidir ve büyük ölçüde lineer olmayan Arrhenius kimyasal kinetik nedeniyle türbülanslı alevler için genellikle yanlıştır. Bununla birlikte, laminer model nispeten yavaş kimyasal ve küçük türbülans-kimya etkileşimi uygulamalarında (süpersonik alevler) tercih edilebilir [65].

Reaksiyona bağlı kimyasal türlerin net kaynağı, türlerin katıldığı N_R reaksiyonları üzerindeki Arrhenius reaksiyon kaynaklarının toplamı olarak hesaplanmaktadır [65]:

$$R_i = M_{w,i} \sum_{r=1}^{N_R} \hat{R}_{i,r}$$
(6.34)

Burada $M_{w,i}$ her bir türün molekül ağırlığı, $\hat{R}_{i,r}$ i türlerin r reaksiyonu içinde oluşan veya yok olan Arrhenius molar oranıdır. Tersinir bir reaksiyon için, r reaksiyonunda i türlerinin oluşturulması / yok edilmesi molar oranı şöyle hesaplanır [65].

$$\widehat{R}_{i,r} = \Gamma(\nu_{i,r}'' - \nu_{i,r}') \left(k_{f,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta_{j,r}'} - k_{b,r} \prod_{j=1}^{N_r} [C_{j,r}]^{\eta_{j,r}''} \right)$$
(6.35)

Burada $C_{j,r}$, j türünün r reaksiyonundaki molar konsantrasyonu ($kgmol/m^3$), $\eta'_{j,r}$ r reaksiyonu içindeki reaktantlart türleri j için oran üssü, $\eta''_{j,r}$ r reaksiyonu içindeki ürün türleri j için oran üssüdür.

Herhangi bir r reaksiyon için ileri hız sabiti $k_{f,r}$ Arrhenius ifadesi ile hesaplanır [65].

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-E_r/RT} \tag{6.36}$$

Burada A_r , ön üslü faktör, β_r sıcaklık derecesi (boyutsuz), E_r reaksiyon aktivasyon enerjisi (J/kgmol), R evrensel gaz sabitidir (J/kgmol-K).

Eğer reaksiyon tersinir ise r reaksiyonu için geriye doğru hız sabiti, $k_{b,r}$ aşağıdaki ilişki kullanılarak ileri hız sabitinden hesaplanır:

$$k_{b,r} = \frac{k_{f,r}}{K_r} \tag{6.37}$$

Burada K_r , r reaksiyonu için denge sabitidir ve termodinamik tablolarda mevcuttur [65].

6.4.2 Girdap Ayrışma Modeli (Eddy Dissipation Model)

Çoğu yakıtlar hızlı yanma eğilimindedir ve toplam reaksiyon hızı türbülans karışımı tarafından kontol edilir. Ön karışımsız alevlerde, türbülans yakıt ve oksitleyiciyi reaksiyon bölgesi içinde karıştırır. Ön karışımlı alevlerde, türbülans soğuk reaktantları ve sıcak ürünleri reaksiyon bölgesi içinde yavaşça karıştırır. Bazı uygulamalarda karışım sınırlı, karmaşık ve bazen bilinmezdir, bu durumlarda kimyasal kinetik hızı güvenli bir şekilde ihmal edilebilir. Fluent, Eddy Dissipation olarak bilinen Magnussen ve Hjertager'ın çalışmalarına dayanan bir türbülans-kimyasal etkileşim modeli geliştirmiştir. Her bir i türünün r reaksiyonu dolayısıyla üretim hızı, $R_{i,r}$, aşağıdaki iki denklemde küçük olana göre belirlenir [65].

Reaktantların kütle fraksiyonunu için:
$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{\omega,i} A \rho \frac{\epsilon}{k} min\left(\frac{Y_R}{\nu'_{R,r} M_{\omega,R}}\right)$$
 (6.38)

Ürünlerin kütle fraksiyonunu için:

$$R_{i,r} = \nu'_{i,r} M_{\omega,i} A B \rho \frac{\epsilon}{k} \frac{\sum P Y_P}{\sum_j^N \nu'_{i,r} M_{\omega,j}}$$
(6.39)

Burada,

Y_P= Herhangi bir ürün türünün kütle kesri, P

 Y_R = Belirli bir reaktantın kütle kesri, R

A= Bir ampirik sabiti, 4'e eşittir

B = Bir ampirik sabiti, 0.5'e eşittir

Denklem 7.26 ve 7.27'de kimyasal reaksiyon hızı, Spalding modeli [93] olan Eddy Breakup yanma modelindeki gibi büyük girdap karıştırma zaman ölçeği k/ε tarafından hükmedilir. Yanma türbülansın varlığında $k/\varepsilon > 0$ gelişir ve yanmayı başlatacak bir tutuşturucuya ihtiyaç duyulmaz. Bu durum ön karışımsız alevler için geçerlidir. Fakat ön karışımlı alevlerde, reaktantlar hesaplama bölgesine girer girmez yanmaya başlar. Bu durumun önüne geçmek için ANSYS Fluent ayrıca Finitre-Rate Eddy Dissipation modelini geliştirmiştir. Burada Hem Arrhenius ve eddy dissipation reaksiyon hızları hesaplanır ve reaksiyon hızı en düşük olana eşit olur. Uygulamada Arrhenius hızı alev tutucundan önce reaksiyonu önleyen bir anahtar görevini görür. Alev tutuştuğunda, girdap ayrışma hızı (Eddy Dissipation rate) genellikle Arrhenius hızından daha küçük olmakta ve reaksiyon karışım oranı ile sınırlanmaktadır [65].

6.4.3 Sonlu-Hızlı/Girdaplı Dağılım Modeli (Finite Rate/Eddy Dissipation)

Eddy Dissipation modeli, reaksiyonların hızlı olduğunu ve sistemin tamamen karıştığını varsaymaktadır. Eğer durum tam olarak böyle değilse, sonlu oranda kimya ile birleştirilebilir. FLUENT'de buna sonlu-hızlı / girdaplı dağılım modeli (Finite Rate / Eddy Dissipation) denir. Bu durumda kinetik hız, girdap dağılım modeli tarafından öngörülen reaksiyon hızına ek olarak hesaplanır. Sonuçta en yavaş reaksiyon hızı kullanılır [65].

- Türbülans düşükse, karışım yavaştır ve bu reaksiyon hızını sınırlar.
- Türbülans yüksekse fakat kinetik hız düşükse, bu da reaksiyon hızını sınırlandırılacaktır.

Bu model çeşitli sistemler için kullanılabilir ancak model sabitleri A ve B, her bir sistemdeki her reaksiyon için ampirik olarak ayarlanmalıdır. Bir ve iki basamaklı yanma işlemleri için sırasıyla 4 ve 0.5 varsayılan değerleri olarak belirlenmiştir. Model, reaksiyonların devam etmesi için her zaman bir ürünün mevcut olmasını gerektirir. Eğer bu istenmiyorsa ürününün başlangıç kütle kesri ve model sabiti ayarlanmalıdır [92].

6.4.4 Girdap Ayrışma Konsepti (Eddy Dissipation Concenpt)

Eddy Dissipation Concept modeli Eddy Dissipation modelinin geliştirilmiş bir versiyonudur ve türbülanslı akışlarda detaylı kimyasal mekanizma içermektedir. Bu model, reaksiyonun küçük bir türbülans yapısında (fine-scale) gerçekleştiğini kabul eder. Eddy Dissipation Concept modeli detaylı kimyasal mekanizmaları türbülanslı reaksiyon akışları içine dâhil eder. Fakat bu detaylı kimyasal mekanizmaların çözümü her zaman zor, sayısal hesaplamaları çok maliyetli ve çözümleri uzun sürmektedir. Ortalama i türleri için korunum denklemi içindeki kaynak terim şu şekilde modellenir [65].

$$R_{i} = \frac{\rho(\zeta^{*})^{2}}{\tau^{*}[1-(\zeta^{*})^{3}]} (Y_{i}^{*} - Y_{i})$$
(6.40)

$$\zeta^* = C_{\zeta} \left(\frac{\nu\varepsilon}{k^2}\right)^{1/4} \tag{6.41}$$

$$\tau^* = C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon}\right)^{1/2} \tag{6.42}$$

Burada * ince ölçeklerin miktarını, ζ^* ince türbülanslı ölçeklerin uzunluk kesrini ve ζ^{*^3} ince türbülans ölçeklerin hacimsel kesri olarak ifade edilmektedir. Türlerin, ince yapılarda zaman ölçeğinde (τ^*) tepkimeye girdiği varsayılır. Y_i^* zaman ölçeğinde (τ^*) gelişen reaksiyonda ince türbülans ölçekli türlerin kütle kesrini ifade eder. C_{ζ} hacim kesri sabitidir ve 2.1377 eşittir. C_{τ} zaman ölçeği sabitidir ve 0.4082 eşittir. v ise kinematik viskozitedir [65].

6.4.5 Ön Karışımsız Yanma Modeli (Non-Premixed Combustion)

Yakıt ve havanın reaksiyon bölgesine ayrı ayrı gönderilmesiyle oluşan yanma ön karışımsız yanma olarak ifade edilir. Pulverize kömür ve içten yanmalı dizel motorlarındaki yanma bu yanma modeline örnek olarak gösterilebilir [65]. Belirli varsayımlarla termokimya tek bir parametreye indirgenebilir. Bu parametre karışım kesri veya fraksiyonudur. *f* ile gösterilen karışım fraksiyonu, yakıt akışından kaynaklanan kütle fraksiyonudur. Diğer bir değişle, yanmış ve yanmamış yakıt akım elementlerinin (C, H ve diğerleri) tüm türler (CO₂, H₂O, O₂ ve diğerleri) içerisindeki yerel kütle kesridir. Bu yaklaşımda kimyasal reaksiyonundaki atomik elementler korunduğundan son derece mükemmel bir yaklaşımdır. Karışım fraksiyonu korunan skalar bir büyüklüktür ve bu yüzden onun taşınım denklemi bir üretim terimi içermez. Yanma basitleştirilerek bir karışım problemine indirgenir ve non-linear olan ortalama reaksiyon hızlarından kaynaklanan zorluklar ortadan kalkmış olur. Karışım sağlandığında, kimya denge modeli ile kimyasal denge olarak modellenebilir. Daimi difüzyon flama (flamalet) modeli ile kimyasal denge yaklaşımı sergilenebilir veya daimi olmayan (kararsız) difüzyon flama modeliyle kimyasal dengeden önemli ölçüde ayrılır [65].

Ön karışımsız yanma modeli karışım fraksiyonları için taşınım denklemlerin çözümlerini kapsar ve her bir tür için bir denklem çözülmez. Bunun yerine türlerin konsantrasyonları tahmin edilen karışım fraksiyon alanları elde edilir. Kimya ile türbülans etkileşimi Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF-Probability Density Function) ile göz önüne alınır [65],[94].

Karışım fraksiyonu atomik kütle fraksiyonu cinsinden şu şekilde ifade edilir [65]:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,yakut} - Z_{i,oks}}$$
(6.43)

Burada Z_i i elementinin elementsel kütle fraksiyonunu temsil eder. Eğer difüzyon katsayısı tüm türler için de aynı ise karışım fraksiyonu ifadesi tüm elemanların türü için de aynı olur. Eşit difüzyon varsayımı ile bileşen denklemleri tek bir denkleme indirgenebilir. Bu durum türbülanslı akışlar için kabul edilebilir seviyededir [65]. Daha detaylı bilgilere [65] ve [94]kaynaklarından erişilebilir.

Aynı yayılım katsayısı varsayımıyla, kimyasal reaksiyona giren reaktantlar ve çıkan ürünlere ait denklemler, kütle kesri ile ifade edilebilen tek bir aktarım denklemine indirgenebilir [95]

Favre ortalama (yoğunluk ortalama) karışım kesri denklemi şu şekildedir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla (\rho v \bar{f}) = \nabla \left[\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}\right] + S_m + S_{user}$$
(6.44)

Burada μ_l laminer viskozite, μ_t türbülans viskozitesidir. Ayrıca S_m sıvı yakıt damlacıklarından veya katı yakıt parçacıklarından gaz fazına geçen kaynak terimini göstermekte, S_{user} kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimidir. Bu denkleme ilave olarak hesaplamalarda bir başka korunum denklemi olan karışım kesri varyansı ($\overline{f'^2}$) eşitliği de Fluent tarafından göz önüne alınmaktadır [65].

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \overline{f'^2} \right) + \nabla \left(\rho v \overline{f'^2} \right) = \nabla \left[\frac{\mu_l + \mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right] + C_g \mu_t \left(\nabla \overline{f} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user}$$
(6.45)

Burada $f' = f - \bar{f}$. Denklem sabitleri varsayılan olarak $\sigma_t = 0.85$, $C_g = 2.86$ ve $C_d = 2.0$ değerlerini almaktadırlar [65].

6.4.6 Kısmi-Ön Karışımlı Yanma Modeli (Partially Premixed Combustion)

ANSYS Fluent, ön karışımsız ve ön karışımlı yanma modellerini temel alarak kısmi-ön karışımlı yanma modelini (Partially Premixed Combustion) geliştirmiştir. Kısmi ön karışımlı yakma sistemleri, üniform olmayan yakıt-oksitleyici karışımıyla (eşdeğerlik oranları) ön karışmış alevlerdir. Difüzyon pilot alevleri olan fakir ön karışımlı yakıcılar, soğutma havası jetleri ve iyi derecede ön karıştırılmamış girişleri olan alevler bu yanma modeli için birer örnek sayılabilirler. ANSYS Fluent programında bu modelin üç farklı alt uygulaması mevcuttur. Bunlar kimyasal denge, daimi difüzyon alevciği (flamelet) ve alevcik üretim manifoldudur [65].

Kısmi ön karışımlı yanma modeli, ön karışımsız ve ön karışımlı yanma modellerini temel alması dolayısıyla bu modelde de termokimya tek bir parametreye indirgenir bu karışım kesri ifadesidir. Reaksiyon bölgesine giren ikincil bir yakıt veya kimyasal reaksiyona girebilecek olan farklı bir tür akımı söz konusu olduğunda girenlerin karışım kesirleri toplamı bire eşit olması gerekmektedir [65].

Karışım kesrinden başka sayısal hesaplamalarda göz önüne alınan başka bir ifade de gelişim değişkenidir (progress variable, c). Hava-yakıt karışımının, önceden belirlenen bir sınır koşuldaki durumunum tarif edilmesi amacıyla yararlanılmaktadır [95]. Alev ortalama reaksiyon ilerlemesini gösteren c değeri 0 ve 1 arasında değişmektedir. Alev formu üzerinde c=0 bölgesi yanmamış reaktanların olduğu, c=1 olduğu bölgede ise yanmış ürünlerin olduğu anlaşılmaktadır. Türbülanslı ön karışım alevde dalgalanan bir alev için c değeri 0 ile 1 arasında değişmektedir [65].

Yoğunluk ağırlıklı ortalama skalar (türlerin kesri ve sıcaklık gibi), \emptyset ile gösterilir ve f ve c'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu ile çözülür [65].

$$\overline{\emptyset} = \int_0^1 \int_0^1 \emptyset(f,c) p(f,c) df dc$$
(6.46)

İnce alevler varsayımıyla sadece yanmamış reaktifler ve yanmış ürünler bulunur. Bu tür alevlerde ortalama skalars şöyle hesaplanır:

$$\overline{\emptyset} = \int_0^1 \emptyset_b(f) p(f) df + (1 - \overline{c}) \int_0^1 \emptyset_u(f) p(f) df$$
(6.47)

Burada, b yanmış, u yanmamış olduğunu gösterir. Yanmış skalar (\emptyset_b) karışım kesrinin bir fonksiyonudur ve bir (f) yakıt kütlesi ve bir (1-f) oksitleyici kütlesinin karışımı ile ve bu karışımın dengelenmesine izin verilerek hesaplanır. Yanmamış skalar (\emptyset_u) benzer şekilde bir (f) yakıt kütlesi ve bir (1-f) oksitleyici kütlesinin karışımı ile hesaplanır fakat bu karışım tepkimeye girmeyen bir karışımdır [65].

6.5 Radyasyon Modeli

Discrete ordinates (DO) en kapsamlı ANSYS Fluent ışınım modellerinden biridir. Bu model, yarı saydam ortamı, yansıtıcı yüzeyleri ve dalga boyuna bağlı geçirmeyi hesaba katmaktadır. Ayrıca bu model konservatif bir metot olup kaba ayrıklaştırma için ısı dengesi sağlanabilmekte, ince ayrıklaştırma yapılarak da hassasiyet arttırılabilmektedir. DO radyasyon modeli ışınımsal olan transfer denklemini (RTD) her biri kartezyen sistemi içerisinde belirlenmiş \vec{s} vektör yönüyle ilgili sonlu sayıdaki ayrık katı parçacık açıları için çözer [95]. Çözüm yöntemi, akışkan akışı ve enerji denklemleri için kullanılan yöntemlerle aynıdır. RTD \vec{s} yönünde \vec{r} konumunda soğurma (absorbing), yayma (emitting) ve ortalama bir saçılma (scattering) için şu şekilde ifade edilir [65].

$$\frac{dI(\vec{r},\vec{s})}{ds} + (\alpha + \sigma_{\rm s})I(\vec{r},\vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_{\rm s}}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r},\vec{s}')\phi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega'$$
(6.48)

Burada \vec{r} konum vektörü, \vec{s} yön vektörü, \vec{s}' saçılma yönü vektörü, s yol uzunluğu, α soğurma (yutma) katsayısı, n yansıtma indeksi, σ_s saçılma katsayısı, σ Stefan Boltzmann sabiti (5.672x10⁻⁸W/m²-K⁴), I konum ve yöne bağlı olarak radyasyon yoğunluğu (şiddeti), ϕ faz fonksiyonu, Ω' katı açısı, T yerel sıcaklık değerleridir.

DO modeli, \vec{s} yönündeki radyatif transfer denklemini (RTD) bir alan denklemi olarak kabul eder. Böylece (6.49) denklemi şu şekilde yazılabilir [65].

$$\nabla \cdot (I(\vec{r}, \vec{s})\vec{s}) + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = \alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega'$$
(6.49)

FLUENT ayrıca gri cisim ışınım modellemesini gri-bant (gray band) modeli kullanarak sağlar. $I_{\lambda}(\vec{r}, \vec{s})$ X'in spektral yoğunluğu için RTE şu şekilde yazılabilir [65]:

$$\nabla \cdot (I_{\lambda}(\vec{r},\vec{s})\vec{s}) + (\alpha_{\lambda} + \sigma_{s})I_{\lambda}(\vec{r},\vec{s}) = \alpha_{\lambda}n^{2}I_{b\lambda} + \frac{\sigma_{s}}{4\pi}\int_{0}^{4\pi}I_{\lambda}(\vec{r},\vec{s}')\phi(\vec{s},\vec{s}')d\Omega'$$
(6.50)

Burada λ dalga boyu, α_{λ} spektral soğurma katsayısı, $I_{b\lambda}$ Plank fonksiyonu ile verilen siyah cisim yoğunluğudur. Burada saçılma katsayısı, saçılma faz fonksiyonu ve n yansıtma indeksi dalga boyundan bağımsız oldukları varsayılmıştır [65].

6.6 Kazan ve Brülör Geometrisi ile Akış Hacimlerinin Oluşturulması

Deneysel testlerde ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyon çalışmalarında kullanılan test kazanı ve ECO 45 G C 3B brülörün şematik resmi deneysel bölümde Şekil 5. 2'de gösterilmişti. Simülasyon çalışmalarında sayısal analizleri gerçekleştirebilmek için yapılması gereken ilk adım, çalışılacak boyutta (2 veya 3 boyut) akış hacimlerinin geometrik modellerinin elde edilmesidir. Kazan ve brülör geometrilerinin 2 boyutta çalışmaya uygun olmaması nedeniyle 3 boyutlu yanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, türbülanslı, girdaplı ve karmaşık akışları daha iyi gözlemleyebilmek için 3 boyutlu çalışmalar daha gerçekçi olsa da analiz sürelerinin uzun sürmesi ve yakınsama noktasında bazı zorlukların ortaya çıkması üstesinden gelinmesi gereken handikaplardır.

Şekil 6. 2 - 6. 10 arasında test kazanı, brülör ekipmanlarından yakıt borusu, girdap üreci, disk ve bunların montajını görünmektedir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programı yardımıyla oluşturulmuş 3 boyutlu akış hacimleri görülmektedir.

Şekil 6. 1 - 6. 9 arasında Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) programı yardımıyla oluşturulmuş 3 boyutlu test kazanı, brülör, brülör ekipmanlarından yakıt borusu, girdap üreteci ve alev tutucu disk ile bunların akış hacimlerinden oluşan montaj resmi görülmektedir.



Şekil 6. 1 2.80 m kazan uzunluğu için test kazanının akış hacminin oluşturulması



Şekil 6. 2 Brülör akış hacminin oluşturulması



Şekil 6. 3 Brülör gövdesinde hava akış hacminin oluşturulması



Şekil 6. 4 Brülör'de yakıt borusu ve nozullardaki akış hacminin oluşturulması



Şekil 6. 5 Brülör'de kullanılan girdap üretecinin modellenmesi



Şekil 6. 6 Brülör'de kullanılan alev tutucu diskin modellenmesi



Şekil 6.7 Brülör'de yakıt borusu, nozullar ve girdap üretecinin gösterilmesi



Şekil 6.8 Brülör'de yakıt borusu, nozullar, girdap üretecini ve diskin gösterilmesi



Şekil 6.9 Brülör ve kazan akış hacimlerinin birleştirilmesi

6.7 Sayısal Ağ Oluşturma

Test kazanı ve brülörün 3 boyutlu akış hacimleri elde edilmesi sonrasında fiziksel alanları için sayısal hacim ağlarının (mesh) oluşturulması gerekmektedir. Sayısal hacim ağları, yapısal ve yapısal olmayan ağlardan oluşabilir. Yapısal ağlar tipik olarak 3D çalışmalar için altıgen (hexahedral) ve 2D çalışmaları için dörtgen (quadrilateral) elemanlardan oluşan tek blok halinde oluşan ve üniform bir dağılım sergileyen ağ tipidir. Genellikle ağ sayısı düşüktür ve analizin yakınsaması daha kısa sürede gerçekleşir. Dez avantajı ise tüm geometrilere uygulanamamasıdır. Bu durum bazen geometrinin sadeleştirilip, gereksiz parçaların silinmesiyle, bazen geometrinin bölünmesiyle giderilebilir. Öte yandan yapısal olmayan ağlar ise, genellikle 2D çalışmalarda üçgen (triangle) elemanlarından oluşan ve 3D çalışmalarda dört yüzlü (tetrahedron) elemanlardan oluşan üniform olmayan bir dağılımı takip eder. Bu ağ türünde, eleman sayısı fazla olmakla birlikte, analiz uzun sürer ve yakınsama problemleri ortaya çıkabilmektedir. En önemli avantajı neredeyse tüm geometrilere kolaylıkla uygulanabilmesidir. Bu ağ türlerinin seçimi genellikle geometri ve çözücü kapasitesine bağlıdır. İyi bir sayısal hacim ağı için, mümkün olduğunca üçgen (2D) ve dört yüzlü (3D) elaman yerine dörtgen (2D) ve altı yüzlü (3D) elaman kullanılmalıdır. Ayrıca iki komşu elamanın uzunluk hacim oranları, sayısal ağın çarpıklık seviyesi (skewness), sınır tabaka ağının gerekip gerekmediği kontol edilmeli gerek görülmesi durumunda ağın kötü elaman olan bölgelerine adaptasyon yapılmalı veya yeni ağ oluşturulmalıdır.

Sayısal hacim ağları simülasyon çalışmasının en önemli aşamalarından birini teşkil etmektedir. İlkin oluşturulan hesaplama ağı akış kontrol hacmini belirlemektedir[43].

Bunun yanında oluşturulan sayısal hacim ağının kalitesi elde edilen sonuçların güvenirliğini ve doğruluğu üzerindeki en önemli faktördür. Oluşturulan sayısal ağ, çözüm için gerekli zamanı belirler. Ayrıca sayısal çözüm ağı modelin yakınsama hızını belirlediği gibi çözümün yakınsayamamasına da etki edebilir. Son olarak sayısal hacim ağı oluşturulurken ağın yoğunluğu yani ağ sayısının yeterli olup olmaması kontrol edilmelidir. Bunun için farklı ağ sayısında çalışmalar yapılarak, sonuçların ağdan bağımsız bir seviyeye gelmesi sağlanmalıdır.

Bu çalışmada brülör için oluşturulmuş sayısal ağ Şekil 6. 10 'da gösterilmiştir. Kazan ve brülörün tam ve periyodik olarak modellenmesi için brülör ve kazan geometrileri her iki model için hazırlanmış ve gerekli sayısal ağlar Şekil 6. 11 ve Şekil 6. 12'de gösterilmiştir. Periyodik modelleme için brülör ve kazan üzerinde bir takım düzeltmeler yapılarak periyodik modelleme şartı sağlanmaya çalışılmıştır. Bu düzeltmeler, 26 adet olan duman borusu sayısının 7x4 şeklinde 28 olarak ayarlanması, kazan gaz çıkış bölümünün eksenel yönde ayarlanması ve girdap üretecinde 13 olan kanat sayısının 12 olarak ayarlanmasıdır.

Yapılan çözümlerin ağdan bağımsızlığını ortaya koymak amacıyla 5 farklı düğüm sayısında (668655, 695374, 725406, 114642 ve 2674862) sayısal ağlar oluşturulmuştur. Farklı düğüm sayılarında yapılan çözümlerde kazan çıkışında elde edilen NOx emisyon sonuçları Çizelge 6. 1'de, kazan eksen çizgisi üzerinde sıcaklık ve NOx seviyeleri de Şekil 6. 13 ve Şekil 6. 14'te karşılaştırılmıştır.

Şekil 6. 13'te sıcaklığın eksenel mesafeyle değişimi incelendiğinde brülörün çıkışından itibaren oluşan alev sıcaklığı nedeniyle eksen sıcaklığı yaklaşık olarak 0.7 m'ye kadar artış eğilimi göstermiş, daha sonra [0.7-1.1 m] arasında sabit sıcaklıkta kalarak sonrasında ocak karşı duvarına kadar git gide azalmıştır. Düğüm sayısının kazan eksen sıcaklığı üzerindeki etkisi kazan ilk bölümde kısmi olarak belirgin olmasına rağmen, eksen sıcaklığının düşmeye başladığı kısımda ise etkili olmadığı görülmektedir. Özellikle 725406, 114642 ve 2674862 düğüm sayılarında sıcaklık farkı yok denecek kadar azdır.

Şekil 6. 14 ve Çizelge 6. 1 yardımıyla eksenel mesafe ve kazan çıkışı NOx emisyonlarının değişimi incelendiğinde ise düğüm sayısının NOx seviyeleri üzerindeki etkisi daha belirgindir. Bu farkın sebebi NOx emisyonlarının sıcaklık seviyesine karşı çok hassas

olması ve sıcaklıklar arasındaki küçük bir farkın NOx seviyelerinde belirgin bir sapmaya neden olduğudur. Buna rağmen 695374, 725406 ve 114642 düğüm sayılarında NOx seviyeleri birbirine yakın değerler almaktadır. Mesh bağımsızlığı çalışmasında 725406 ve 1144642 düğüm sayılarıyla periyodik modelleme ile doğal gaz yanması sonuçları karşılaştırıldığında NOx emisyonları bakımından standart sapmanın %1 'in altında olduğu hesaplanmıştır. Düşük düğüm sayısında ağ ile çalışmak, hem çözücü performansı hem de çözüm süresi üzerinde etkili olması dolayısıyla düğüm sayısı olarak periyodik model için 725406 düğüm sayısı tercih edilmiştir. Öte yandan, periyodik modellemede kullanılan sayısal ağ elamanlarıyla brülör ve kazan tam olarak modellendiğinde oluşturulan sayısal ağda düğüm sayısı da 2674862 olmaktadır. Şekil 6. 13, Şekil 6. 14 ve Çizelge 6. 1 incelendiğinde periyodik sınır şartı için oluşturulmuş kazan ve brülörün 1/4 modeliyle (PM), kazan ve brülörün tam modellenmesiyle (TM) elde edilen sonuçların birbirine çok yakın olduğu, sonuçlar arasındaki hatanın % 1'in de altında oluğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre tam model için oluşturulan sayısal ağın da güvenilir bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. 10 Brülör geometrisine ait oluşturulan sayısal ağ



Şekil 6. 11 Simülasyona hazır hale getirilmiş brülör ve kazana ait sayısal ağ



Şekil 6. 12 Periyodik sınır şartı için 1/4'e bölünmüş geometriye ait sayısal ağ

Düğüm	Türbülans	NOx	Geometrik
sayısı	modeli	[ppm]	model
668655	Realizable	74.64	PM
695374	Realizable	69.61	PM
725406	Realizable	67.38	PM
1144642	Realizable	67.46	PM
2674862	Realizable	67.94	ТМ

Çizelge 6. 1 Düğüm sayısının çıkış NOx emisyonlarına etkisi



Şekil 6. 13 Farklı düğüm sayılarında kazan eksen eksenindeki sıcaklık değişimleri



Şekil 6. 14 Farklı düğüm sayılarında kazan eksenindeki NOx değişimleri

6.8 Fiziksel Özellikler, Sınır Şartları ve Çözüm Metodu

Bu çalışmada sayısal analiz ve hesaplamalar için NOx hesaplama modülünü de bünyesinde barındırılan, kapsamlı bir CFD uygulama alanına sahip ANSYS Fluent 16 [65] programı seçilmiştir.

Brülör girişinde yakıt ve hava hızlarıyla yapılan hesaplamalarda Mach sayısının 0.2'den küçük olması nedeniyle, brülör girişlerinde, yoğunluk sıkıştırılamaz ideal gaz varsayımı yapılmış ve türlerin yoğunluğu belirlenmiştir [96].

Doğal gaz-hidrojen karışımları için soğurma (emilim) katsayısı, doğal gaz-hidrojen yakıt karışımları için 0.5, saf hidrojen için 0.45 alınmış, saçılma katsayıları da bu yakıtlar için 0.01 m⁻¹ olarak seçilmiştir [25]. Ayrıca, doğal gaz ve metan soğurma katsayıları için Wsggm-domain-based kullanılmışken, her iki durumda da kullanılan saçılma katsayıları ise 1e-09 alınmıştır [97].

Brülör giriş sınır şartları olarak genellikle kütlesel debi kullanılmış, kazan çıkışı için basınç çıkışı sınır koşulları tanımlanmıştır.

Bu çalışmada hava fazlalık katsayısının etkisini ortaya koymak için λ =1.05, 1.20, 1.38 ve 1.50 hava fazlalık katsayılarında yanma analizleri gerçekleştirilmiş, bu analizler dışında

diğer tüm parametreler için fakir karışımlı yanma yani λ =1.20 hava fazlalık katsayısı kullanılmıştır.

Deneysel çalışma ile emisyon sonuçları elde edilmiş olan farklı ısıl yükler (Q), farklı hava fazlalık katsayısı (λ) ve farklı kazan uzunlukları (L) parametreleri dışındaki tüm parametrelerde (doğal gaz-hidrojen karışımları, saf hidrojen yanması, girdap üreteci kanat sayısı ve kanat açısı vb.) ısıl yük için 1085 kW, kazan uzunluğu için 2.1 m, hava-yakıt giriş sıcaklıkları, duvar yüzey sıcaklıkları sırasıyla 291, 292 ve 373.65 K'dir.

Önemli miktarda girdaplı türbülans akışları için RNG k-ε modeli, Realizable k-ε modeli veya Reynolds Gerilme Modeli (RSM) gibi gelişmiş türbülans modellerinden biri kullanılmalıdır. Bu modellerin seçiminde girdap yoğunluğunu karakterize eden girdap sayısı belirleyici parametredir. Eğer girdap sayısı 0.5'in altında, yani orta derecede girdaplıysa, sadece Realizable k-ε modeli değil aynı zamanda RNG k-ε modeli de Standard k-ε modelinden daha etkilidir. Öte yandan, yüksek girdap sayısı için (S> 0.5) RSM şiddetle tavsiye edilmektedir [98]. Bu çalışmada kullanılan brülörde düşük girdap sayısı (S <0.5) söz konusu olması dolayısıyla, türbülans modellerinin karşılaştırılması dışındaki tüm simülasyon çalışmalarında Realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır.

P1, Rosseland, Discrete Ordinates (DO) ve Discrete Transfer (DTRM) modelleri arasında uygun olan radyasyon modelini seçmek için optik kalınlık aL güzel bir ipucudur. Burada a soğurma (emilim) katsayısı, L ise uzunluk ölçeğidir. Brülör-kazan uygulamalarında , Lyanma odası (ocak) çapına eşit alınır. P1 modeli aL > 1 uygulamalarında, Rosseland modeli $aL \gg 1$ uygulamalarında kullanılması önerilirken, aL < 1 uygulamaları için DTRM ve DO modellerinin kullanılması daha elverişlidir ve önerilmektedir [99]. DO modelinin kullanımı yüksek hesaplama maliyeti ve işlemci yoğunluğu gerektirse de, diğerlerinin yanı sıra dağınıklık (Scattering), parçacık etkisi, yarı şeffaf duvarlar, speküler duvarlar, gri olmayan radyasyon ve yerel ısı kaynakları uygulamalarında kullanılabilir olması gibi birçok avantajdan dolayı tercih edilebilir [98]. Tüm bu avantajları yanında aL< 1 olması dolayısıyla radyasyon hesaplamaları için DO modeli (aL <1) kullanılmıştır.

Akış alanındaki girdaptan veya dönmeden kaynaklanan yüksek dereceli dönme akışı eksenel ve radyal yönde büyük basınç gradyenlerinin meydana gelmesine neden olur. Bu tür akışlar çözüm sürecinde istikrarsızlıklara neden olabilir ve akışın tam modellenememesi veya çözümün yakınsayamamasına neden olabilir. Dönme akışlarında yer alan basınç gradyanlarının tespit edilip modellenebilmesi için çok uygun bir yöntem olan PRESTO!, girdaplı ve dönme akışları için bir çözüm stratejisi ortaya koyabilmektedir [98]. Bu çalışmada üç boyutlu akış alanını ayrıklaştırmak için PRESTO! yöntemi tercih edilmiştir. Basınç ve hız çifti için de COUPLED yöntemi kullanılmıştır. Akış alanının fiziğini tanımlamak için, daimi şartlar altında Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemleri kütle, momentum, enerji ve skalar taşınımı için kullanılmıştır.

BÖLÜM 7

SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

7.1 Giriş

Deneysel çalışma ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak yapılan simülasyon çalışmalarına geçmeden önce deneysel olarak çalışılan parametreler ile HAD ile incelenen parametrelerin özetlenmesi sonuçların daha iyi anlaşılması açısından faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

A) Deneysel Çalışmalar

- a) 5 farklı ısıl yükte (459 kW, 668 kW, 866 kW, 1085 kW, 1200 kW), λ=1.20,
 L=2.10 m ve D=0.58 m çalışma şartlarında kazan emisyon değerleri incelenmiştir.
- b) 1085 kW ısıl yükünde, L=2.10 m ve D=0.58 m çalışma şartlarında 3 farklı hava fazlalık katsayısında (λ =1.05, λ =1.20, λ =1.38) testler gerçekleştirilmiştir.
- c) 1085 kW ısıl yükünde, λ=1.20 ve D=0.58 m çalışma şartlarında 3 farklı kazan uzunluğunda (L=2.10 m, L=2.45 m L=2.80 m) testler gerçekleştirilmiştir.

B) HAD Çalışmaları

- a) Q=1085 kW, λ=1.20, L=2.1 m ve D=0.58 m çalışma şartlarında, 4 farklı türbülans modeli ile analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar 1085 kW ısıl yükünde yapılan deneysel sonuç ile karşılaştırılmıştır. En uygun türbülans modelleri belirlenmiştir.
- b) Q=1085 kW, λ=1.20, L=2.1 m ve D=0.58 m çalışma şartlarında, 5 farklı yanma modeli ile analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar 1085 kW ısıl

yükünde yapılan deneysel sonuç ile karşılaştırılmıştır. En uygun yanma modelleri belirlenmiştir.

- c) Deneysel çalışmada incelenen 5 farklı ısıl yükte kazan emisyon değerleri aynı çalışma şartlarında HAD ile incelenmiştir.
- d) Deneysel çalışmada incelenen 3 farklı HFK (λ)'da kazan emisyonları aynı çalışma şartlarında HAD ile incelenmiştir. Ayrıca λ =1.50 de incelenmiştir.
- e) Deneysel çalışma ile incelenen 3 farklı kazan uzunluğunda kazan emisyonları aynı çalışma şartlarında HAD ile incelenmiştir. İlaveten L=1.75 m ocak uzunluğu da incelenmiştir.
- f) Kazanın çapını deneysel olarak değiştirme imkânı olmaması nedeniyle Q=1085 kW, λ=1.20, L=2.1 m çalışma şartlarında kazan emisyonları 4 farklı kazan ocak çapında sadece HAD ile incelenebilmiştir.
- g) Q=1085 kW, λ=1.20, L=2.1 m ve D=0.58 m çalışma şartlarında, metan, % 100 doğal gaz, % 75 DG-% 25 H₂, % 50 DG-% 50 H₂, %25 DG-%75 H₂ ve % 100 H₂ yanma analizleri gerçekleştirilmiş olup farklı yakıtların yakılması durumunda yanma emisyonları karşılaştırılmıştır.
- h) Brülör üzerinde bulunan mevcut girdap üreteci yerine alternatif bir girdap üreteci tasarlanmış olup Q=1085 kW, λ=1.20, L=2.1 m ve D=0.58 m çalışma şartlarında, 7, 9, 11, 13, 15 ve 17 kanat sayılarında HAD simülasyon çalışmaları yapılmış olup kanat sayısının NOx sonuçlarına etkileri incelenmiştir.
- Tasarımı yapılan girdap üreteci ile Q=1085 kW, λ=1.20, L=2.1 m ve D=0.58 m çalışma şartlarında, 6 farklı kanat sayısı için kanat açıları 15°, 20°, 25° ve 30° olmak üzere 4 farklı kanat açısıyla çalışma yapılmış olup, kanat açısının NOx üzerindeki etkisi incelenmiştir.

7.2 Deneysel Sonuçlar

Brülör-kazan sisteminde doğal gaz yakıtı kullanılarak brülör ısıl gücü, hava fazlalık katsayısı ve ocak uzunluğu parametrelerinin yanma sonu gaz emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla beş farklı ısıl yükte (459 kW, 668 kW, 866 kW, 1085 kW ve 1200 kW) çalışılarak brülör yükünün emisyon değerleri üzerindeki etkisi, üç farklı hava fazlalık katsayısında (1.05, 1.2, 1.38) çalışılarak hava fazlalığının emisyon değerleri üzerindeki etkisi ve üç farklı kazan boyunda (2.1 m, 2.45 m, 2.80 m) testler gerçekleştirilmiş olup yanma odası uzunluğunun emisyon değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bazı testler üçer kez yapılmak suretiyle tekrarlanmış, her bir test ile yanma sonu gazları olan CO₂, O₂, CO, CH₄, NOx (NO, NO₂) NOVA marka ölçüm cihazı ile ölçülerek sonuçlar kayıt altına alınmış ve karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada elde edilen veriler ışığında sayısal simülasyon çalışmaların sınır şartları belirlenmiş ve HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

7.2.1 Brülör Isıl Yükünün Değişimi

Şekil 7. 1'de 5 farklı brülör ısıl yüküyle yapılan testlerde (a) CO₂, (b) O₂, (c) CO ve (d) NOx emisyonlarının değişimi görülmektedir. Isıl yük değerinin artmasıyla gaz emisyonundaki CO₂ yüzdesinin değişimi bir miktar artmış sonrasında düşmüş görünmektedir. Tam yanmanın da bir göstergesi olan CO2 seviyesi, karbon kaynaklı hidrokarbonun yanma verimini ortaya çıkarır. Doğal gaz yakıtının $\lambda = 1.2$ değeriyle tam yanması durumunda, yanma emisyonlarındaki beklenen CO₂ emisyon seviyesi yaklaşık % 9.71'dir. Yapılan test ölçümlerine bakıldığında, 459 kW ısıl yükü için (%9,44, %9,54 ve %9,67), 668 kW ısıl yükü için (%9,64, %9,70 ve %9,78), 866 kW değeri için (%9,72, %9,76 ve %10,01), 1085 kW değeri için (9,50, 9,55 ve 9,60) ve 1200 kW değeri için (%9,62, %9,74 ve %9,75) emisyon değerleri elde edilmiştir. Yapılan ölçümler incelendiğinde CO₂ emisyonu seviyesinde %9,72 altı ve üstü değerlerin olduğunu görmekteyiz. Bu durumun iki nedeni vardır. Her ne kadar ölçüm cihazı tüm bu değerleri λ = 1.2 değerine karşılık verse de %9,72 seviyesinin altındaki değerler, λ 'nın 1.2 değerinden daha düşük bir değerde (λ = 1.195 gibi) yakılmış olabileceği öte yandan %9,72 üzerindeki değerlerde ise λ 'nın 1.2'nın daha yüksek değerde (λ = 1.205 gibi) olabileceği ihtimalidir ki bu durum gaz emisyonundaki % O₂ seviyesindeki değişimlerde de açıkça görülmektedir (Şekil 7. 1 (a)). İkinci neden olarak hava ve yakıtın tam olarak karıştırılamadan yakıldığını bu yüzden daha düşük % CO₂ elde edildiğidir. Bu kanıların oluşmasında ölçüm cihazının yapılan ölçümlerde λ değerlerini (1.19, 1.20, 1.21) şeklinde vermesi nedeniyle düşük hassasiyet altında gerçekleşmiş olabileceği ve ayrıca kazan çıkışı gaz emisyonunda bir miktar yanmamış CH₄ değerinin ölçülmesidir. Ölçümlerde okunan CH₄ emisyon değerleri (ppm) olarak 459 kW ısıl yükü için (0, 60, ve 440), 668 kW ısıl yükü için (110, 0 ve 0), 866 kW değeri için (340, 460 ve 380), 1085 kW değeri için (100, 0 ve 0) ve 1200 kW değeri için (0, 0 ve 0) emisyon değerleri elde edilmiştir. CH₄ emisyon değerlerine baktığımızda tam yanmanın düşük yüklerden ziyade yüksek ısıl yüklerde (1085 kW ve 1200 kW) elde edilmiştir. Bunun nedeni de yüksek ısıl yüklerde sabit brülör gövdesinde hava akış hızının daha büyük olması münasebetiyle türbülans seviyesinin daha yüksek olması ve karışımın daha iyi sağlanmış olması gösterilebilir. Yapılan test sonuçlarına bakıldığında CO₂ seviyesinin yaklaşık olarak %9.72 seviyesine yakın olduğu, maksimum sapmanın 866 kW için % 2.98 olduğunu görmekteyiz. Dolayısıyla bu oranın da düşük bir hata payı olması nedeniyle, farklı ısıl değerlerde tam yanma şartları yaklaşık olarak sağlandığı ifade edilebilir.

Şekil 7. 1 (b) yanma sonu egzoz gazındaki % O₂ seviyesinin brülör ısıl yükünün değişimiyle değişimi göstermektedir. Baca gazındaki O₂ miktarı % 3 - %4 aralığında olması hava fazlalık yüzdesinin %16 - %23 arasında değiştiğini ifade eder. Her bir ısıl yük için %20 hava fazlalık değerinde yapılan testlerde % O₂ seviyesi %3.4-%3.5 aralığında λ = 1.2 değerine karşılık gelmektedir. Bazı ilave testlerde bu oranın dışına çıkılmasıyla %3.6 (668 kW), %3 (866 kW) ve %3.1 (1200 kW) değerinde hava fazlalık katsayıları sırasıyla λ = 1.21, λ = 1.6 ve 1.7 değerlerini almaktadır. Bu testler sırasıyla %21, %16 ve %17 hava fazlalık değerlerinde gerçekleşmiştir.

Şekil 7. 1 (c) atık gazdaki CO seviyelerinin ısıl yükün değişimiyle eğilimini göstermektedir. Tam yanmanın bir belirtisi olan CO₂ seviyesinin beklenenden düşük olması, CO₂ yerine CO oluşmuş olması ihtimalini güçlendirmektedir. Çünkü hidrokarbon yakıtları yeterli oksijen varlığında CO₂ oluşturma eğilimindedirler. Eğer oksitleyici içindeki oksijen miktarı olması gerekenden az ise eksik yanma meydana gelir ve eksik yanmanın da göstergesi atık gazdaki CO varlığıdır. Bu duruma yakıttaki karbon atomlarının oksijen atomları ile birleşerek CO oluşturması neden olmaktadır. Şekil incelendiğinde 459 kW ısıl yükünde en yüksek CO seviyesi oluşmuş, ısıl yükün artmasıyla birlikte CO seviyesi kademeli olarak düşmüştür. Daha önce de ifade edildiği gibi düşük ısıl yüklerde hava akış hızının düşük olması sebebiyle, yakıt-oksitleyici havanın tam olarak karışamamış olması neden gösterilebilir. Brülör ısıl yükünün 1085 kW değerinden 1200 kW değerine çıkarılmasıyla CO seviyesi çok az da olsa (2 ppm) artmıştır. Bu durumun nedeni de yüksek ısıl yüklerde ise sabit brülör gövdesinde hava akış hızının aşırı yükselmesiyle karışım için gerekli zamanı bulamaması gösterilebilir.

Şekil 7. 1 (d) kazan çıkışı egzoz gazındaki NOx seviyesinin brülör ısıl yüküyle değişimini göstermektedir. Brülör ısıl yükünün 459 kW değerinden 866 kW değerine yükseltilmesiyle NOx seviyesinde kademeli olarak bir artma söz konusudur. Bu durumun nedeni olarak artan ısıl yükle birlikte ocak içerisinde daha fazla enerji girdiği, artan enerji seviyesinin de alev sıcaklığının artmasına neden olmasıdır. Alev sıcaklığının artmasıyla birlikte ısıl NOx seviyesindeki artma toplam NOx dereceğinin de artmasına neden olur. Brülör ısıl yükünün 866 kW değerinden sırasıyla 1085 kW ve 1200 kW değerine yükselmesi NOx seviyesinde bir miktar düşüşle sonuçlanmıştır. Bu durum artan hava debisiyle girdap üretecinden geçen hava miktarının artmasına, aynı zamanda daha fazla girdap oluşumuna ve hava-yakıt karışımının daha iyi sağlanmasına neden olur. Bu üç durumun sonucu olarak alev çapının büyümesi ve alevin yayılmasıyla alev sıcaklığının bir miktar düşmesi neden olarak gösterilebilir. Karışımının miktarının arttırılması ve böylece alev sıcaklığını bir bölgeye yığılmasını engellemek girdap üreteçlerinden istenen bir durum ve özelliktir.




Şekil 7. 1 Brülör yüküyle atık gazdaki (a) CO₂, (b) O₂, (c) CO ve (d) NOx değişimleri

7.2.2 Hava Fazlalık Katsayısının Değişimi

Hava fazlalığı yanma olayına etki eden önemli parametrelerden biridir. Hava fazlalığı ile tam yanma durumu olan stokiyometrik şartlarda (λ =1) çalışmak mümkün olduğu gibi yakıtça zengin şartlarda (λ <1) ve yakıtça fakir karışım şartlarında (λ >1) çalışmakta mümkündür. Uygulamada stokiyometrik şartlarda çalışmak pek tercih edilen bir durum değildir bunun nedeni alev sıcaklığının en yüksek değeri alması sonucu NOx emisyonlarının en yüksek değerleri almasıdır. Teoride stokiyometrik durumu λ =1'de sağlanmasına rağmen, pratikte yaklaşık olarak λ =1.05 değerinde sağlanır. Bu çalışmada fakir karışım şartlarında (λ >1) üç farklı hava fazlalık katsayısında (1.05, 1.2, 1.38) yanma ve emisyon değerleri incelenmiştir.

Şekil 7. 2(a)'da hava fazlalık katsayısının değişimiyle baca gazındaki % CO₂ miktarının değişimi görülmektedir. Hava fazlalık katsayısının λ =1.05 değeri için CO₂ seviyesi en yüksek değerde, λ 'nın artmasıyla CO₂ seviyesi lineer bir şekilde düşmektedir. Artan hava fazlalığı ile egzoz gazında tepkimeye girmeyen O₂ seviyesi de lineer olarak artmaktadır (Şekil 7. 2(b)). Artan hava fazlalığı ile N₂ ve O₂ seviyesi de kademeli olarak artmaktadır. Burada O₂ yakıttaki C atomlarıyla tepkimeye girerek CO₂ oluştur iken, N₂ tepkimeye girmeyerek veya bir miktar O atomları veya O₂ molekülleri ile tepkimeye girerek NO veya NO₂ oluşturur. Yakıt miktarına bağlı olarak gerekli O₂ miktarından fazlası N₂ ile birlikte tepkimeye girmeden yanma sonu gazlarıyla (CO₂, CO, NOx vb.) birlikte dışarı atılır.

Şekil 7. 2(c)'de hava fazlalık katsayısının değişimiyle baca gazındaki CO (ppm) değişimi görülmektedir. Yapılan incelemede λ =1.05 durumu için yanma stokiyometrik seviyeye gelememiş, oksijen eksikliğinden dolayı yanma eksik yanma modunda gerçekleşmiştir. Bu nedenle CO seviyesi en yüksek değer olan 47 ppm olmakta, λ =1.2 için ise yanma tam yanma moduna geçip fazla hava ile bu oranın da ötesine geçmektedir. Bu durumda CO seviyesi neredeyse yok olma seviyesine gelmekte yani 1 ppm'e düşmektedir. Artan λ ile CO seviyesi 1 ppm olarak sabit kalmaktadır. Önemli bir emisyon olan CO seviyesinin oksijen miktarına ne denli bağlı olduğu bu sonuçlardan (grafikten) net biçimde görülmektedir.

Şekil 7. 2(d)'de hava fazlalık katsayısının değişimiyle baca gazındaki NOx (ppm) değişimi görülmektedir. Yanma olayında en önemli parametrelerden biri şüphesiz oksitleyicidir burada O2 'dir. Stokiyometrik çalışma şartlarında oksijen miktarının tamamı reaksiyona girer ve böylece adyabatik alev sıcaklığı kullanılan yakıt için en yüksek değerini alır. Bu durum yanma emisyonundaki NOx seviyesine de etki eder ve NOx seviyesi de en yüksek değerlere erişir. Bunun nedeni NOx'u oluşturan ısıl NO mekanizması ile yüksek sıcaklıklarda NO seviyesi her 90 °C'de iki katı seviyesine yükselmesidir. Dolayısıyla uygulamalarda artan NOx seviyesini düşürmek için hava fazlalığı ile çalışılarak alev bir miktar soğutulur. Fakat bu durum yanma verimine olumsuz yönde etki eder. Çünkü yakıttan elde edilen enerji fazla hava ile soğutularak bacadan dışarı atılmış olur. Bu nedenle hava fazlalık katsayısı veya hava fazlalığı seviyesi katı, sıvı ve gaz yakıtları yanması için önem arz etmektedir. Bu bilgiler ışığında λ =1.05 değeri için NOx yüksek olması (81 ppm) ve λ =1.2 için NOx seviyesi orta seviyede bir değer (63-65 ppm) ve son olarak λ =1.38 için de NOx seviyesi en düşük değeri (49 ppm) alması şaşırtıcı olmaz. NOx seviyesinin de CO seviyesi gibi O₂ miktarıyla doğrudan ilişkili olduğu bu sonuçlardan ve ilgili grafikte lineer olarak değişen eğriden görülmektedir.

90



Şekil 7. 2 λ değişimi ile egzoz gazındaki (a) CO₂, (b) O₂, (c) CO ve (d) NOx değişimleri

7.2.3 Kazan Ocak Uzunluğunun Değişimi

Kazan ocak uzunluğu (L) değişiminin yanma sonu emisyonları üzerindeki etkisi Şekil 7. 3'te görülmektedir. Şekil 7. 3(a)'da CO₂ emisyonu artan ocak uzunluğu ile bir miktar arttığı ve sonrasında uzunluğun daha da arttırılmasına rağmen değişmediği gözlenmiştir. Şekil 7. 3(b)'de artan ocak uzunluğu ile yanma sonu gazlarındaki % O₂ miktarı görülmektedir. Artan ocak boyu ile emisyondaki %O₂ seviyesinin çok etkilenmediği görülmektedir. Şekil 7. 3(c)'de artan ocak uzunluğu ile yanma sonu gazlarındaki CO (ppm) seviyesi görünmektedir. Yapılan incelemede artan kazan ocak uzunluğu ile CO seviyesinde bir değişiklik olmadığıdır. Son olarak artan kazan ocak uzunluğu ile atık gazlardan NOx seviyesinin değişimi Şekil 7. 3(d)'de gösterilmiştir. Diğer emisyonların aksine NOx seviyesinde bir miktar artış (%7-8) gözlenmiştir. Bunun temel nedeni ocak içerisindeki yanma gazında bulunan havanın oyalanma süresinin artması sonucu NOx miktarının artması olarak açıklanabilir. Yanma sonu gazlarının alev bölgesinden bir an önce uzaklaştırılması NOx seviyesinin düşük tutulması için önemli bir prosedürdür. Çünkü yanma sonu gazlarında bulunan hava yüksek miktarda N₂ gazı ve hava fazlalığı dolayısıyla O₂ mevcudiyeti içerir bu nedenle bu iki bileşen uygun ısı ve sıcaklık koşullarında tepkimeye girerek NO ve NO₂ oluşturma eğilimindeler.



Şekil 7. 3 Ocak uzunluğu değişimi ile atık gazdaki (a) CO₂, (b) O₂, (c) CO ve (d) NOx gazları değişimi

7.3 Deneysel ve HAD Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde deneysel ve HAD analiz sonuçları karşılaştırılmadan önce türbülans modellerinden en yaygın kullanılan 4 yöntem ile ilgili HAD analizleri yapılmış, bu modellerin kullanılmasıyla yanma ve emisyonların değişimi incelenmiştir. Sonrasında ANSYS Fluent programında bulunan yanma modelleri ile ilgili HAD analizleri yapılmış, doğal gazın modellenmesinde en uygun yanma yöntem belirlenmiştir.

7.3.1 Türbülans Modellerinin İncelenmesi

İyi bir yanma için gerekli koşullardan biri olan türbülansın doğru bir şekilde modellenmesi yapılan HAD analizlerin doğruluğu ve güvenirliği bakımından son derece önemlidir. Her bir modelin kullanıldığı türbülanslı akış koşulları türbülans yöntemleri bölümünde detaylıca ifade edilmişti. Bu yöntemler Standard k – ε , Realizable k – ε , RNG k – ε ve RSM modelleridir. Bu modellerin kullanılmasıyla kazan eksen mesafesi boyunca CO₂, H₂O, O₂, CO, sıcaklık (T) ve NOx değişimleri Şekil 7. 4'te grafikler halinde verilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Dört farklı türbülans modeli ile yapılan HAD simülasyonlarında, kazan ocak ekseni yönünde verilen CO₂ ve H₂O değişimleri Şekil 7. 4 (a) ve (b)'de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde ocak girişinden itibaren CO₂ ve H₂O miktarlarının artmasından anlaşılacağı üzere kazan giriş ağzından itibaren yanma olayı gerçekleşmektedir. Yanma ürünleri olan CO₂ ve H₂O eğilimleri incelendiğinde 0 m - 0.8 m arasında her iki tür artma eğiliminde 0. 8 m- 2.3 m arasında sabit oranda devam eden eğilimler söz konusudur. Bu sonuçlara göre doğal gazın püskürtülmesiyle yanma sürecinin başladığı, yakıtın tepkimeye giren miktarında 0 m - 0.8 m arasında artış gözlendiği, 0.8 m 'den sonra ocak ekseni boyunca tepkimeye giren hidrokarbon seviyesi eksenel mesafe boyunca yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Şekiller incelendiğinde her iki türün (CO₂ ve H₂O) oluşumunda türbülans modelleri aynı eğilimleri göstermektedir. Bunun nedeni belli bir bölgedeki hidrokarbonların yanması sonucu aynı anda CO₂ ve H₂O ürünlerinin oluşmasıdır.



Şekil 7. 4 Türbülans modellerinin kazan ocak ekseni boyunca (a) CO₂, (b) H₂O, (c) O₂, (d) CO, (e) T ve (f) NOx üzerindeki etkisi

Her iki tür için de ocak ilk bölümünde (0 - 0.3 m) RNG k – ε türbülans modeli diğer modellerden farklı bir eğilim göstermekte iken, Standard k – ε türbülans modeli 0.5 m 2.3 m aralığında ve Realizable k – ε modeli 0.3 m - 0.7 m aralığında farklı bir eğilim göstermektedir. Ayrıca 0.3 m -2.3 m arasında RNG k – ε ve RSM modelleri birbiriyle aynı eğilimi göstermekte ve 0.75 m ve 2.3 m arasında RNG k – ε , Realizable k – ε ve RSM modelleri birbiriyle aynı

Şekil 7. 4(c)'de ocak eksen mesafesi boyunca O_2 kütle kesri için 4 türbülans modeli eğilimleri incelendiğinde, kazan girişinden itibaren gerçekleşen tepkime nedeniyle kazana giren O_2 miktarında sürekli bir düşüş gözlenmekte, ocak 0.8 m eksen mesafesinden sonra alev çapının en büyük olduğu alev sonunda O_2 miktarı neredeyse tükenmiş (Standard k – ε hariç) bulunmaktadır. Sonrasında alev etrafından gelen O_2 miktarıyla tekrar bir miktar artış gözlenmektedir. Bu durum Standard k – ε dışındaki üç türbülans modelinde benzer şekilde gerçekleşmiş bulunmaktadır. Ayrıca incelenen türbülans modellerinin davranışları tıpkı CO_2 ve H₂O kütle kesirlerinde olduğu gibidir ve aynı mesafelerde aynı eğilimler sergilenmektedir.

Şekil 7. 4(d)'de ocak eksen mesafesi boyunca CO seviyesindeki değişimler dört türbülans modelinin kullanıldığı HAD yanması yardımıyla tahmin edilebilmektedir. Grafik incelendiğinde kazan girişinden itibaren yanmanın başlamasıyla CO seviyesinde artışlar gözlenmekte, 0.5 m mesafesinden sonra Standard k – ε , 0.6 m mesafesinden sonra Realizable k – ε , 0.7 m mesafesinden sonra RSM, 0.75 m mesafesinden sonra RNG k – ε modelinde CO seviyesinde düşüşlerin başladığı görülmektedir. Azalan CO seviyesinde 1.2 m eksenel mesafesinde küçük çaplı bir artış gerçekleşmiş (standard k – ε hariç) ve sonra tekrar azalarak tükenmiştir. Bu durumun nedeni Şekil 7. 4(c) de görüleceği üzere alev sonu bölgesinde yeterince oksijen kalmayışı nedeniyle karbon elementlerinin O elementleriyle birleşip CO oluşturması, sonrasında alev etrafından gelen oksijen ile bu CO bileşiğin tekrar reaksiyona girerek CO₂ oluşturmasıdır.

Şekil 7. 4(e) yardımıyla ocak ekseni boyu boyunca sıcaklık değişimi dört farklı türbülans modeli yardımıyla tahmin edilmektedir. Yapılan incelemede kazan girişinden itibaren yanmanın başlamasıyla ocak eksen sıcaklıklarında yükselişlerin olduğu ve bu kısımda (0 - 0.3 m) RNG k – ε modelinin farklı bir eğilim gösterdiği görülmekte, z=0.4 m'den sonra da Realizable k – ε farklı bir sıcaklık profili sergilemektedir. Şöyle ki, diğer üç modelde (standard k – ε , RNG k – ε ve RSM) yaklaşık olarak 0 - 0.8 m eksenel mesafesine kadar artarken, bu aralıktan sonra her üçün de sıcaklık parabolik olarak düşüşe geçerek kazan boyunca belli bir sıcaklık değerine (800-850 K) düşmektedirler. Fakat Realizable k – ε modelinde 0.4 m – 0.65 m arasında sıcaklık artarken 0.65 m noktasında sıcaklık en yüksek (pik) değerine ulaşmakta ve hemen sonrasında 0.65 m-1.15 m arasında sabit sıcaklık değerine yakın bir eğilim göstermekteyken, 1.15 m mesafesinden sonra non-lineer (lineer olmayan) bir şekilde azalarak belli bir değere (800 K) kadar düşmektedir. Ayrıca Realizable k – ε modeli alev formundan sonra ocak eksen sıcaklığını diğer modellerden daha düşük değerlerde tahmin etmektedir. Şekilden ayrıca Standard k – ε dışındaki modellerde ocak ekseni maksimum sıcaklıklar birbirine yakın değerler alırken, Standard k – ε modelinde ise bu değer yaklaşık olarak 120 K daha düşük çıkmıştır.

Şekil 7. 4(f) yardımıyla ocak eksen mesafesi boyunca farklı türbülans modelleri kullanılması durumunda NOx emisyon değerleri tahmin edilmiştir. Özellikle yüksek sıcaklık değerlerine aşırı derecede hassas olan NOx seviyeleri, küçük sıcaklık değişimlerinden bile etkilenerek artabilir veya azabilir. Bu nedenle Şekil 7. 4(e)'de eksenel mesafe boyunca sıcaklık değişimleri yanında ocak içerisindeki sıcaklık dereceleri NOx seviyeleri üzerinde birinci derecede etki etmektedirler. Yapılan incelemelerde düşük ocak eksen sıcaklığına rağmen Standard $k - \varepsilon$ türbülans modeliyle NOx emisyonu en yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bu durumun nedeni ocak içi maksimum sıcaklığın Standard $k - \epsilon$ modeliyle en yüksek değeri (2196.28 K) almasıdır. Ayrıca Standard $k - \epsilon$ ile ocak eksen mesafesi boyunca NOx emisyonları diğer modellerden farklı bir eğilim göstererek, kazan girişinden itibaren artmaya başlamakta z=1 m mesafesinde en yüksek değeri almakta (≈190 ppm), bu mesafeden sonra bir miktar düşerek z=1.2 m mesafesinden sonra sabit değerde (\approx 165 ppm) devam etmektedir. Diğer üç model birbirine benzer eğilimleri göstermekle birlikte farklı değerler almaktadırlar. Her üç modelde NOx seviyesi girişten itibaren artmakta, Realizable $k - \epsilon$ modelinde 0.6< z < 0.9 m arasında, RNG k – ε ve RSM modellerinde 0.75< z < 1 m aralığında bir miktar azalarak sonra tekrar artmakta ve son olarak 1.2 m mesafesinden sonra sabit değerde devam etmektedirler. Alev bölgesinin sonundan itibaren kazan ocak eksenel mesafesi boyunca NOx seviyesi Realizable $k - \varepsilon$ (100 ppm) ve RSM türbülans modellerinde (95 ppm) birbirlerine yakın tahmin edilmekte ve RNG $k - \varepsilon$ türbülans modelinden (80 ppm) farklıdırlar. Bu değerler çıkış egzoz gazındaki NOx seviyesi üzerinde etkilidirler.

Standard k – ε , Realizable k – ε , RNG k – ε ve RSM modellerinin kullanılmasıyla kazan ocak eksen mesafesi boyunca CO₂, H₂O, O₂, CO, sıcaklık ve NOx değişimleri incelenmesinin ardından bu modellerin kazan egzoz gazındaki emisyon değerleri üzerindeki etkileri Şekil 7. 5'te verilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan inceleme de deneysel çalışmada ölçülen %CO₂ ve %O₂ seviyeleri HAD simülasyonlarından daha düşük değerler almakta ve bu değer farkı yaklaşık olarak CO₂ için %8, O₂ için de %10.5 civarında çıkmaktadır (Şekil 7. 5(a),(b)). Ayrıca kullanılan türbülans modellerinin CO₂ ve O₂ seviyeleri üzerinde kayda değer bir fark yaratmadığı görülmektedir.

Hava fazlalık katsayısının λ =1.2 değerinde yapılan deneysel ve HAD çalışmalarında deneysel CO seviyesi 1 ppm olurken, HAD analizlerinde O'a yakın değerler çıkmaktadır (Şekil 7. 5(c)). Bu değerler « 1 olması münasebetiyle 0 olarak ifade edilmiştir.

Deneysel ve HAD simülasyon gaz çıkış sıcaklıkları incelendiğinde, deneysel sıcaklık sonuçlarının HAD sonuçlarından daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 7. 5(d)). Aradaki farkın türbülans modellerine göre yaklaşık olarak % 13.5-15 arasında olduğu hesaplanmıştır. Bunun nedeni, deneysel çalışmada duman borularında 26 adet kıvrımlı yapıda türbülans artırıcı ve baca gazı sıcaklığı düşürücü saç profillerin varlığı ve bunların HAD simülasyonlarında yüksek ağ elemanı gerektirmesi nedeniyle modellenmemesidir.

Son olarak deneysel çalışmada ölçülen NOx seviyesi ile farklı türbülans modellerinin kullanılmasıyla hesaplanan NOx seviyeleri Şekil 7. 5 (e)'de görülmektedir. Yapılan incelemede Standard $k - \varepsilon$ modeli NOx seviyesini deneysel sonuçtan ve diğer tüm modellerden daha yüksek tahmin etmekte, hesaplanan değerin deneysel modele göre hata oranı % 78.6 olduğu belirlenmiştir. Realizable $k - \varepsilon$ model sonucu ise deneysel model ile iyi bir uyum sergilemekte ve hata oranı % 5.2 seviesinde kalmaktadır. RSM model sonucu ise Realizable $k - \varepsilon$ model sonucundan sonra en iyi ikinci sonuçtur ve hata oranı % 5.6'dır. RNG $k - \varepsilon$ modeli ise NOx emisyonu Realizable ve RSM modellerinden daha düşük hesaplamakta ve bu modelin hata oranı % 21 olarak hesaplanmıştır. Bu

sonuçlardan da görüleceği üzere düşük girdap sayısında S < 0.5, Realizable k — ε modeli RNG k — ε ve Standard k — ε modellerinden daha iyi emisyon sonucu vermektedir. Her ne kadar RSM modeli yüksek girdap sayısında S > 0.5 kullanılması önerilsede düşük girdap sayılarında da iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Analizlerin yakınsayabilmesi ve deneysel sonuçlarla olan uyumu dolayısıyla Realizable k — ε modelinin tüm analizler için iyi bir seçenek olduğu görülmektedir.











Şekil 7. 5 Deneysel ve farklı türbülans modellerinin kullanıldığı HAD simülasyonlarında (a) CO₂ (b) O₂, (c) CO, (d) T ve (e) NOx karşılaştırılması

Şekil 7. 6'da dört farklı türbülans modelinin kullanılmasıyla kazan içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları görülmektedir. Yapılan incelemede Realizable k – ε modeli dışındaki türbülans modellerinde alev formları birbirine çok benzemekte ve alevler ocak içerisinde yayılmaktadır. Realizable k – ε modelinde ise alev sonunda alev daha dairesel bir form almaktadır. Yanma sırasında en yüksek sıcaklık değeri Standard k – ε modelinde (2196.28 K) oluşurken, en düşük maksimum sıcaklık değeri RSM modeli (2163.77 K) ile oluşmaktadır. Realizable ve RNG k – ε modellerinde ise yaklaşık olarak aynı maksimum sıcaklık değerleri (2173 K) elde edilmiştir. En uzun alev formu RSM modeli ile oluşurken en kısa form Realizable k – ε modelinin kullanılmasıyla oluşur. Alev çapları ise birbirne yakın değerler almaktadır. Her bir modelde kazan çıkışına doğru sıcaklıkların düştüğü görülmektedir.

Şekil 7. 7'de dört farklı türbülans modelinin kullanılmasıyla NOx emisyon oluşumları aynı skala üzerinde karşılaştırılmıştır. Şekiller incelendiğinde en yüksek NOx seviyesinin Standard $k - \varepsilon$ modelinin kullanılmasıyla oluştuğu, en düşük değerlerin de RNG $k - \varepsilon$ modeli ile oluştuğu görülmektedir. Bu durumda kullanılan türbülans modelleriyle ocak içerisinde oluşan maksimum alev sıcaklıklarının NOx üzerinde etkili olduğu fakat tek etken olmadığı görülmektedir. Çünkü Realizable ve RNG $k - \varepsilon$ modellerinde maksimum alev sıcaklıkları aynı değerleri alırken NOx değerleri arasında 17 ppm'lik bir fark oluşmaktadır.

Şekil 7. 8'de kazan içerisinde oluşan CO emisyonlarının girişten çıkışa doğru değişimleri görülmektedir. Yapılan incelemede alev bölgelerinde oksijen yetersizliğinde CO emisyonlarının oluştuğu, alev bölgesi dışında bu emisyonların da oksijen atomları varlığında CO₂ oluşturmak amacıyla tepkimeye girerek tükendikleri görülmektedir. Standard k — ε modelinin kullanılması durumunda oluşan CO miktarı diğer modellerden farklı olarak daha kısa mesafede dönüştüğü görülmektedir.

Şekil 7. 9 doğal gazın dört farklı türbülans modeli ile modellenmesi durumunda kazan içerisinde oluşan CO₂ emisyonu dağılımını göstermektedir. Şekiller incelendiğinde Standard $k - \varepsilon$ modeli dışındaki modellerde CO₂ seviyeleri birbirine benzerlik gösterirken, bu modelde alev bölgesinde oluşan CO₂ seviyesi daha düşüktür.

99



Şekil 7. 6 (a) Standard k – ϵ , (b) Realizable k – ϵ , (c) RNG k – ϵ ve (d) RSM tübülans modellerinin kullanılmasıyla kazan eksen düzleminde oluşan sıcaklıklar



Şekil 7. 7 Standard k – ϵ , (b) Realizable k – ϵ , (c) RNG k – ϵ ve (d) RSM) türbülans modellerinin kullanılmasıyla kazan eksen düzleminde oluşan NOx emisyonları



Şekil 7. 8 Türbülans modellerinin ((a) Standard k – ϵ , (b) Realizable k – ϵ , (c) RNG k – ϵ ve (d) RSM) kullanılmasıyla kazan ekseninde oluşan CO emisyonları



Şekil 7. 9 (a) Standard k – ϵ , (b) Realizable k – ϵ , (c) RNG k – ϵ ve (d) RSM türbülans modellerinin kullanılmasıyla ocak ekseninde oluşan CO₂ emisyonları

7.3.2 Yanma Modellerinin İncelenmesi

HAD analizleri için ANSYS Fluent yazılımında birden çok yanma modeli mevcuttur ve bunların seçimi yakıt-oksitleyici karışım şekli, laminer ve türbülanslı alevler, yakıtın hızlı yanma eğilimi, reaksiyonun hızlı gelişip gelişemeyeceği ve kullanılan kimyasal kinetik mekanizmasına bağlıdır. ANSYS Fluent yazılımında bulunan EDC, FR/ED, ED, PPC ve NPC yanma modelleri ile doğal gaz karışımı, 1085 kW brülör ısıl yükünde λ =1.2 hava fazlalık değeri için 2.1 m kazan ocak uzunluğunda ve 0.58 m ocak çapında Realizable k — ε türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda kazan ocak ekseninde sıcaklık, yanma sonu ürünlerin değişimi ve kazan çıkışı gaz emisyon sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Doğal gaz yanmasının beş farklı yanma modeli ile modellenmesi durumunda kazan ocak ekseni boyunca sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak şekil 7. 10(a)'da gösterilmiştir. Yapılan incelemede ED modeli ile NPC modelleri kazan girişinden itibaren benzer eğilimleri sergilemekte, 0 < z < 0.6 m aralığında sıcaklıkların kademeli olarak arttığı ve doğrusala yakın birer eğriyi izlediği görülmektedir. Ayrıca NPC yanma modeli bu gölgede ED modelinden daha yüksek değerler almaktadır. Bu iki modelin dışındaki EDC ve FR/ED modelleri de ocak eksen mesafesi boyunca benzer eğilim sergilemektedirler. Bu iki modelde, kazan girişinde (brülör ağzında) yanmanın başladığı ve yüksek sıcaklık değerlere eriştiği görülmektedir. Çok kısa bir mesafede alev sıcaklıkları pik değerlerine eriştikten sonra alev sonuna (z=1.2 m) doğru kademeli olarak azalma söz konusudur. Özellikle z>1.2 m mesafesinden sonra eksen sıcaklıkları keskin bir şekilde düştükleri görülmektedir. PPC modelinde de EDC ve FR/ED modelleri gibi yanma kazan girişinde (brülör ağzında) başladığı fakat PPC modelinde ocak eksen sıcaklığı bu iki modele kıyasla daha düşük sıcaklıktadır. Ayrıca bu modelde sıcaklık artışı kazan girişinden itibaren ED ve NPC modellerine kıyasla daha yavaş ve azalan bir artış profili sergilemektedir. Tüm modellerde sıcaklıklar yaklaşık olarak 1.1 m < z < 1.2 m aralığında keskin olarak düşmektedirler. Bunun nedeni, bu aralığın oluşan alevlerin sonu olması dolayısıyla, bu bölgede yanmanın bittiği dolayısıyla ocak ekseninde sıcaklık derecelerin gitgide düşmesi ile açıklanabilir. Ocak sonuna doğru özellikle z=1.18 m mesafesinden sonra PPC ve NPC modellerinde sıcaklık sabit devam ederken, diğer üç modelde kazan karşı duvara kadar sıcaklıklar düşmeye devam etmektedir. Alev formunun bittiği aralıktan sonra kazan karşı

duvarına kadar ki bölgede ED ile FR/ED aynı eğilimi gösterirken, PPC ile NPC benzer eğilimi göstermekte, EDC modeli ise EDC ve FR/ED modelleriyle benzerlik gösterse de aldığı değerler bakımından epeyce farklıdır.

Yanma modellerinin ocak eksen üzerindeki NOx emisyon değerleri, ocak ekseni sıcaklık seviyeleri ile doğrudan orantılıdır. Bunun nedeni daha önce de belirtildiği üzere yüksek sıcaklık bölgeleri ve bu bölgelerde kalma süresi NOx oluşumunu artırıcı etkiye sahiptir. Şekil 7. 10(b) grafiği her bir yanma modeli için ocak eksen mesafesi boyunca NOx değişimi görülmektedir. Yapılan incelemede ED modeli ile NPC modeli birbirleriyle benzer eğilimler göstermekte, kazan girişinden itibaren her iki model için yanmanın gelişmesiyle NOx seviyeleri kademeli olarak artmakta, 0.5 < z < 1.2 m aralığında sabit değerde devam etmekte, z>1.2 m için NOx seviyeleri sabit değerde devam etmektedir. Bununla birlikte ED modelinin kullanılmasıyla NOx değerleri NPC göre daha yüksek tahmin edilmektedir. PPC modelinin bu iki modelden farkı ise brülör ağzından itibaren yanma sürecinin daha gelişmiş olması dolayısıyla girişten itibaren bu iki modelden daha yüksek NOx değeri oluşmakta, ocak eksen mesafesiyle genellikle her iki modelden daha yüksek tahminlerde bulunmaktadır. PPC modeli ocak ekseni boyunca iki modele benzer eğilimi göstermesine rağmen 0.5< z <1.2 m aralığında her iki modelden farklı bir davranış göstermektedir. Öte yandan EDC ve FR/ED modellerinin kullanılması durumunda oluşan yüksek alev sıcaklıkları nedeniyle NOx değerleri diğer tüm modellerden daha yüksektir. Bu iki modelin eğilimleri birbirine benzemekle birlikte NOx değerleri alev bölgesinde EDC modeli ile NOx seviyesi daha düşük kalmasına rağmen, alev sonrasında ise FR/ED modelinden daha yüksek seviyelerde kalmaktadır.

Şekil 7. 10(c) ve (d) sırasıyla ocak eksen çizgisi üzerinde oluşan CO₂ ve H₂O seviyelerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Doğal gazın yanmasında hidrokarbon kaynaklı yakıtın yanması sırasında oluşan CO₂ ve H₂O ürünlerin kazan eksen çizgisi boyunca eğilimleri birbirine çok benzerdir. Aradaki en belirgin farkın kütle kesri değerleridir. Birde NPC modeli ile yapılan simülasyonda CO₂ seviyesi 0.5 < z < 1 m arasında azalma eğiliminde iken, H₂O seviyesinde bu aralıkta artma eğiliminde olmasıdır. Farklı yanma modellerinin CO₂ ve H₂O oluşum süreçlerine etkisi 0 < z < 0.5 m aralığında doğal gazın yanmasıyla ocak eksen sıcaklık değişimlerine çok benzemektedir. Eksenel yöndeki sıcaklık değişiminde alev bitiş noktasından sonra sıcaklıklar keskin şekilde düşerken CO₂ ve H₂O



Şekil 7. 10 Yanma modellerinin kazan ocak ekseni boyunca (a) CO₂, (b) O₂, (c) H₂O, (d) CO, (e) T ve (d) NOx üzerindeki etkisi

oluşum eğrileri bu noktadan sonra sabit değerde devam etmektedirler. Öte yandan ocağın 1.2 m< z <2.3 m aralığında CO_2 ve H_2O oluşum seviyeleri NPC ve ED modellerinde en yüksek, EDC ve FR/ED modellerinde ise en düşük değerleri almaktadır.

Şekil 7. 10(e) ve (f) sırasıyla ocak eksen çizgisi üzerinde oluşan O₂ ve CO kütle kesri seviyelerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekil incelendiğinde EDC ve FR/ED modellerinde yanmanın brülör ağzında gelişmesiyle bu iki modelde O₂'nin daha kısa mesafede tepkimeye girip tükenme noktasına geldiği, sonradan ani olarak tekrar yükselmeye başladığını göstermektedir. ED ve NPC modellerinde ise kazan girişinden itibaren yanmanın kazan ekseni boyunca kademeli olarak gelişmesiyle O₂ seviyesi de kademeli olarak azalmaktadır. Yanma prosesinin bu dört modelin arasında bir davranış sergileyen PPC modelinde O2 eğilimi de bu modellerin arasında bir eğilim göstermekte ve seviyesi de ortalama seviyededir. Öte yandan CO seviyesi bakımından EDC modeli diğer modellerden farklı bir tutum sergilemekte ve kazan eksen çizgisi üzerinde CO oluşmadığı görülmüştür. Bu durum, doğal gaz yanmasını tam yanma prosesi olarak gerçekleştirdiğini varsaymaktadır. ED modeline göre de ocak eksen çizgisi üzerinde oluşan CO seviyesi çok düşüktür. PPC modeline göre oluşan CO seviyesi yaklaşık olacak ED seviyesinin 2 katı miktarında olup, benzer şekilde alev sonrasında ortadan kalkmaktadır. Öte yandan FR/ED modeline göre ise ocağın girişine yakın bölgede 0 < 1z <0.37 m aralığında CO seviyesi maksimumum değerine ulaşmakta ve sonrasında kademeli olarak alev sonuna doğru azalarak tükenmektedir. Son olarak NPC modelinde ise CO seviyesi kazan girişinden itibaren logaritmik olarak artmakta, z=1 m mesafesinde CO değeri maksimum değerini alarak sonrasında keskin bir şekilde düşüşe geçerek alev sonunda tükenmektedir.

Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla kazan ocak eksen mesafesi boyunca CO₂, O₂, H₂O, CO, sıcaklık ve NOx değişimleri incelenmesinin ardından parametrelerin egzoz gazındaki değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak Şekil 7. 11'de verilmiştir.

Şekil 7. 11(a)'da yapılan incelemelerde, kazan gaz çıkış sıcaklıkları deneysel çalışmaya en yakın model ED modelidir. EDC ve FR/ED modellerinde ise çok yüksek olan alev sıcaklıklarına rağmen gaz çıkış sıcaklıkları ED modelinde hesaplanan gaz çıkış sıcaklığına yakın değerler almaktadır. Öte yandan PPC ve NPC modellerinde gaz çıkış sıcaklık değerleri birbirine yakın değerler almışlardır. Bu sonuçlara göre tüm modeller gaz çıkış sıcaklığını yüksek tahmin etmektedir. Bunun bir nedeni olarak daha önce ifade edildiği gibi duman borularında kıvrımlı yapıdaki türbülans artırıcı levhaların yüksek ağ elamanı gerektirmesi dolayısıyla modellenmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

En önemli yanma emisyonlarından olan NOx'un gaz çıkışındaki seviyeleri Şekil 7. 11(b)'de görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere EDC ve FR/ED modelleri NOx seviyesini deneysel seviyeden oldukça yüksek tahmin etmişlerdir. Bu iki modelin hata oranları sırasıyla %611 ve %342,73'tür. Öte yandan NPC yanma modeli deney sonucu dâhil en düşük NOx tahmini gerçekleştirmiştir. Bu modelin deneysel sonuca göre hata oranı %39'dur. Deneysel çalışma şartlarında farklı yanma modelleriyle yapılan analizlerde NOx emisyonu bakımından deneysel sonuçlarla en uyumlu model ED ve PPC modelidir. Bu iki modelde hata oranları sırasıyla %3.66 ve % 4 'dir.

Şekil 7. 11(c) yanma sonu gazlarındaki % CO₂ miktarını Şekil 7. 11(d)'de % O₂ miktarını göstermektedir. Grafikler incelendiğinde her iki türün HAD simülasyon sonuçları deneysel sonuçlardan daha yüksek oldukları görülmektedir. Sonuçlar arası hata oranları CO₂ gazı için en fazla %1.76 ile EDC modeliyle ve O₂ gazı için en fazla % 7.44 ile NPC modeliyle oluşmaktadır.

Son olarak yanma sonu gazlardaki CO değerleri deneysel ve HAD yanma modelleri için Şekil 7. 11(e)'de karşılaştırılmıştır. Grafik incelendiğinde, λ =1.2 hava fazlalık değerinde yapılan çalışma da deneysel sonucun 1 ppm olduğu, HAD analizlerinde tüm modeller için $0 < CO \ll 1$ ppm olduğu hesaplanmıştır. Buna göre sonuçlar 0 ppm olarak ifade edilmiştir. Bu sonuçların elde edilmesinde hava-yakıtın iyi derecede girdap üreteci yardımıyla karıştırılmasının büyük etkisi vardır. Böylece hava fazlalığı ile alev bölgesinde tam yanma hali sağlanmış demektir. Öte yandan daha doğru CO emisyonları için daha detaylı kimyasal mekanizmaların kullanılması gerekmektedir.









(c)





Şekil 7. 11 Deneysel ve farklı yanma modellerinin kullanıldığı HAD simülasyonları için (a) sıcaklık ve yanma emisyonları (b) NOx, (c) CO₂, (d) O₂ ve (e) CO karşılaştırılması

Doğal gazın beş farklı yanma modeli ile modellenmesi sonucunda kazan içerisinde elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 7. 12'de görselleştirilmiştir. En yüksek sıcaklık seviyesi referans alınarak oluşturulmuş renk skalası yardımıyla farklı modellerin kullanılmasıyla kazanlarda oluşan sıcaklık seviyeleri daha anlaşılır şekilde karşılaştırılabilmektedir. Yapılan incelemede EDC ve FR/ED modellerinin kullanılmasıyla alev bölgesinde oluşan sıcaklıkların, ED, PPC ve NPC modellerine göre daha yüksek oldukları görülmektedir. Bunun nedeni EDC ve FR/ED modellerinde doğal gaz mekanizmasının (2 basamaklı uyarlanmış metan mekanizması) iki adımlı olması nedeniyle normal şartlarda oluşması beklenen birçok ara ürünün oluşumunu ihmal etmesi ve özgül ısıların olmasından daha yüksek değerde olmasıdır. Fakat ocak son kısmında ve kazan çıkış bölgesine PPC ve NP modellerinin kullanılmasıyla oluşan sıcaklıklar EDC, FR/ED ve ED modellerin kullanılmasıyla oluşan sıcaklıklardan daha yüksek değerler almaktadır.

Şekil 7. 13 beş farklı yanma modeli ile modellenen doğal gazın yanması sonucu kazan boyunca oluşan NOx seviyesinin değişimini göstermektedir. EDC ve FR/ED yanma modellerinin kullanılmasıyla oluşan NOx seviyesi diğer modellerden kat ve kat yüksek olması nedeniyle iki farklı skala kullanılmıştır. Birinci skala yardımıyla EDC ve FR/ED modelleri kullanılmasıyla olaşan NOx değerleri karşılaştırılmış, ikinci skala yardımıyla da ED, PPC ve NPC modellerinde oluşan NOx emisyonları karşılaştırılmıştır. Şekiller incelendiğinde EDC, FR/ED ve kısmen PPC modellerinde alev çekirdek bölgesinde NOx oluşumları görülebilmektedir. ED ve NPC modellerinde ise bu durum görülememektedir. Çekirdek bölgesi dışında NOx seviyeleri, bu bölgelerin daha düşük sıcaklıklarda olması ve NOx oluşum mekanizmalarının tamamlanması nedeniyle sabit değerlerde kaldıkları görülmektedir. Yapılan incelemede EDC modeli ile en yüksek NOx emisyonu oluşurken, en düşük NOx emisyonun da NPC modelinin kullanılmasıyla elde edildiği görülmektedir.

EDC modelinde en yüksek sıcaklık ve NOx seviyeleri elde edilmesinin bir başka nedeni de hava fazlalığı dolayısıyla alev bölgesinde yeterince oksijenin varlığı olarak görülebilir. Bu durum Şekil 7. 14'te de EDC modelinde düşük CO seviyesinden görülebilmektedir. Şekil incelendiğinde fazla oksijen miktarı nedeniyle CO emisyonunun diğer modeller ile kıyaslandığında çok düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir. Diğer modellerin kullanılması ile CO seviyeleri değişkenlik göstermekte, en yüksek CO seviyesi de NP modeli ile elde edilmektedir.

Şekil 7. 15 doğal gazın yanma sonu oluşan CO₂ emisyonlarını farklı modeller için göstermektedir. EDC ve FR/ED modellerinde brülör ağzından itibaren yoğun CO₂ oluştuğu gözlenirken, diğer üç modelde ocağın ilerleyen mesafelerinde CO₂ oluşumu gözlenmektedir. Ayrıca çıkış CO₂ seviyeleri birbirine yakın olduğu görülmektedir.

109



Şekil 7. 12 Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla ((a) EDC, (b) FR/ED, (c) ED, (d) PPC ve (e) NP) kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımları



Şekil 7. 13 Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla ((a) EDC, (b) FR/ED, (c) ED, (d) PPC ve (e) NP) kazan eksen düzleminde oluşan NOx dağılımları



Şekil 7. 14 Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla ((a) EDC, (b) FR/ED, (c) ED, (d) PPC ve (e) NP) kazan eksen düzleminde oluşan CO dağılımları



Şekil 7. 15 Farklı yanma modellerinin kullanılmasıyla ((a) EDC, (b) FR/ED, (c) ED, (d) PPC ve (e) NP) kazan eksen düzleminde oluşan CO₂ dağılımları

7.3.3 Brülör Isıl Yükünün Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Farklı brülör ısıl yükünde kazan gaz çıkış sıcaklığı ve emisyon sonuçları daha önceki bölümlerde (Bölüm 7. 2.1 Deneysel Sonuçlar) sunulmuştu. Bu kısımda ise HAD sayesinde ocak eksen çizgisi üzerinde ısıl yük değişiminin sıcaklık ve emisyonlara etkisi incelenmiş olup, kazan çıkışı gaz sıcaklığı ve emisyon değerleri deneysel ve HAD simülasyonları için karşılaştırılmıştır.

Şekil 7. 16(a)'da farklı brülör ısıl yüklerinde ocak eksen sıcaklıkları eksenel mesafe boyunca PPC yanma modeli kullanılarak gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde kazan girişinden itibaren (brülör ağzı) yanmanın başladığı ve 0 < z < 1.2 m eksen mesafelerinde alev sıcaklığının arttığı fakat bu artışın git gide azaldığını görmekteyiz. Öyle ki alev sonuna doğru neredeyse sabit kalmıştır. Alev sonu z > 1.2 m itibariyle alev sıcaklıklarında keskin düşüşlerin meydana geldiği ve z > 1.7 m mesafesinden sonra düşük ısıl yüklerden başlayarak tüm yüklerde sıcaklığın sabitlendiği görülmektedir. Bu grafikte ayrıca brülör ısıl yükünün en yüksek değerden en düşük değere kademeli olarak düşürülmesiyle ocak içerisindeki sıcaklık dağılımının da kademeli olarak düştüğü görülmektedir. 1200 kW ısıl yükünde eksen mesafesi üzerinde maksimum alev sıcaklığı 2125 K seviyesinde iken, 459 kW ısıl yükünde ise 1990 K civarındadır. Ocağın son kısmında alev sıcaklıkların yaklaşık değerlerde kaldığı görülmektedir.

Şekil 7. 16(b) ısıl yük değişimiyle ocak eksen çizgisi üzerindeki NOx emisyon değişimini göstermektedir. Yapılan incelemede kazan girişinden itibaren NOx seviyesinin eksenel mesafeyle arttığı, eksenin 0.4 < z < 0.9 m arası mesafesinde bu artışın her bir ısıl yük için benzer ve lineer olduğu görülmektedir. Tüm ısıl yüklerde z \cong 1.16 m mesafesinde NOx emisyonları pik noktasına erişmekte 1.15 < z < 1.45 m aralığında ise bir miktar azalmakta ve z > 1.45 m mesafesinde alev sonuna doğru (z > 0.9 m) ısıl yüke bağlı olarak NOx pik değerleri ve ocağın geri kalan kısmındaki NOx değerleri değişkenlik göstermektedir. Şöyle ki 459 kW için pik değeri yaklaşık olarak 122 ppm, 1200 kW için 128 ppm, 1085 kW için 132 ppm, 668 kW için 133 ppm ve 866 kW için 136 ppm'dir. Bu değerlerden görüleceği üzere sonuçlar birbirine çok yakın çıkmakta en yüksek (866 kW için) ve en düşük (459 kW için) NOx arasındaki fark yaklaşık %11'dir. Öte yandan ocak

son bölümlerinde (z > 1.4 m) emisyon seviyeleri farklılık göstermektedir. En düşük NOx 459 kW değerinde oluşurken, en yüksek NOx seviyesi 668 kW ısıl yükünde oluşmaktadır. Daha sonra artan ısıl yüküyle birlikte 866 kW-1200 kW NOx seviyesinde kademeli olarak azalma söz konusudur. Bu durumun nedeni olarak artan hava debisiyle brülör hava hızı artmakta, bu durum hem türbülans seviyesini artırmakta hem de girdap üretecinin yakıthava karışımını iyi derecede sağlamasına imkan tanımaktadır. Bunların yanında artan kapasite ile birlikte ocak içerisindeki yanma sonu gazlarının hızı artar ve artan hızla birlikte yanma ürünleri alev bölgesinden daha çabuk uzaklaşır. Böylece yüksek sıcaklıklarda NOx oluşumu engellenmiş olmaktadır.

Şekil 7. 16(c) ısıl yük değişimiyle ocak eksen çizgisi üzerindeki doğal gazı oluşturan en önemli bileşen olan CH₄ 'ün emisyon değişimini göstermektedir. Yapılan incelemede kazan girişinden itibaren ocak eksen çizgisi üzerinde bulunan CH₄ miktarının azaldığı, 0.05 < z < 0.25 m ve 1.1 < z < 1.1 m arasında iki farklı genlikte artışın olduğu görülmektedir. Bu iki durumun nedeni, girdap üreteci ile dönen havanın kendisiyle birlikte yakıtıda sürükleyerek döndürmesi ve belli bir periyot sonrasında tekrarlamasıyla eksen üzerinde miktar değişimin gerçekleşmesiyle oluştuğu düşünülmektedir. Yapılan incelemelerde yaklaşık olarak z = 1.1 m mesafesinde CO₂ veya H₂O oluşumu gözlenmediğinden bu noktada yanmanın bittiği anlaşılmaktayken, CH₄ gazının eksen üzerinde z = 1.6 m noktasında tamamen tükendiği görülmektedir. Bu durumda z = 1.1m mesafesinde reaksiyona girmeyen CH₄ miktarının da NOx oluşumuna dâhil olarak tükendiği değerlendirilmektedir. Bu durum [100] çalışmasında ısıl NO oluşumu

Şekil 7. 16(d)'de ısıl yük değişimiyle ocak eksen çizgisi üzerindeki CO₂ ve H₂O kütle kesri değişimleri gösterilmektedir. Yapılan incelemede kazanın 0 < z < 1 m mesafelerinde düşük ısıl yükte yanmalarda daha az yakıt girişi olması dolayısıyla oluşan CO₂ ve H₂O seviyeleri de düşük çıkmaktadır. Öte yandan eksenel çizginin z> 1.2 m mesafesinden sonra bu bileşenlerin seviyeleri değişen ısıl yükle birbirine yakın çıkmakla ayrıca artan yükle azaldıkları görülmektedir. Şekilde ayrıca CO₂ kütle kesri değerlerinin H₂O değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Yanma ürünlerinde hava fazlalık katsayısına bağlı olarak bulunabilen O₂ kütle kesrinin ocak ekseni boyunca değişimi Şekil 7. 16(e)'de görülmektedir. Yapılan incelemede aynı eksenel mesafe 0 < z < 1.15 m aralığında artan brülör yüküyle O₂ kütle kesri miktarı düşmektedir. Öte yandan z > 1.15 m için O₂ kütle kesri seviyeleri sabit kalmakta ve artan yükle birlikte yüksek değerler almaktadır.





Şekil 7. 16 Isıl yükün (Q) değişimiyle ocak ekseni boyunca (a) T, b) NOx, (c) CH₄, (d) CO₂,
(e) O₂ ve (f) CO değişimleri

Şekil 7. 16(f) ocak ekseni boyunca CO seviyesindeki değişimi farklı ısıl yükleri için karşılaştırmıştır. Yapılan incelemede her bir ısıl yük için, kazan girişinden itibaren CO seviyesi kademeli olarak artmakta, burada z > 1.2 m eksenel mesafesinden sonra oluşan miktarlar keskin olarak düşerek tükenmişlerdir. Kazan girişinden itibaren oluşan CO emisyonları ısı ortamında etraftan gelen O₂ ile tepkimeye girerek CO₂ oluşturma eğilimindeler.

Farklı ısıl yükler altında kazan çıkışı gaz emisyonları deneysel ve HAD analiz çalışmaları ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 7. 17 'de karşılaştırılmıştır. Şekil 7. 17 (a)'da NOx emisyonları ile ilgili yapılan incelemede HAD analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında düşük ısıl yüklerde (459 kW ve 668 kW) benzer eğilimlerin olduğu, değer bakımından da bir miktar fark olduğunu (%10.76) fakat ppm seviyesindeki ölçümlerde bu farkın kabul edilebilir olduğu değerlendirilmektedir. Yüksek ısıl değerlerde (866 kW, 1085 kW ve 1200 kW) de benzer eğilimin olduğu ve aradaki farkın oldukça azaldığı gözükmektedir. Ayrıca 866 kW ve 1200 kW değerlerinde sonuçlar arasındaki benzerlik oldukça tatmin edicidir. Diğer taraftan Şekil 7. 17(b) 'de görüldüğü üzere % CO₂ emisyonu bakımından deneysel ve HAD simülasyon sonuçları arasında oldukça benzerlikler olduğu görülmektedir. Hem NOx hem de CO₂ seviyesi bakımından HAD analizleri deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmektedir. Öte yandan Şekil 7. 17(c) ve (d)'de sırasıyla HAD simülasyonlarından hesaplanan % O₂ ve CO seviyesi ile deneysel ölçümler ile elde edilmiş değerler karşılaştırılmıştır. % O₂ seviyesi bakımından her iki yöntem arasında benzerlikler ve farkların olduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalarda ölçülen O₂ yüzdesinin genel itibariyle HAD sonuçlarından daha düşük olduğu görülmüştür. HAD analizlerinde yüksek O₂ değerleri nedeniyle CO emisyon değeri de etkilenmektedir. Yapılan incelemede deneysel çalışmalarda ölçülen CO seviyesi ile HAD analizlerinde elde edilen CO arasında belirgin bir fark görülmektedir. Her iki çalışmada λ değerinin 1.2 olması dolayısıyla oluşan CO seviyelerinin düşük olması ve HAD yönteminde yüksek seviyede O₂ içermesi CO (0 < CO < 1 ppm) emisyonunu tespitini zorlaştırmaktadır.



Şekil 7. 17 Isıl Yükün (Q) değişimiyle (a) NOx, (b) CO₂, (c) O₂ ve (d) CO değişimi

Farklı ısıl yüklerinde kazan içi sıcaklık dağılımları Şekil 7. 18'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde ısıl yükün artması ile ocağa giren enerjinin artması sonucu alev uzunluğu ve alev çapında artma meydana gelmektedir. 1200 kW ısıl yükünde alev çapının ocağı neredeyse kapladığı görülmektedir. Bu durum uygulamalarda çok da istenen bir durum değildir. Çünkü yüksek sıcaklığa maruz kazan malzemesinde yüksek gerilme farklarından dolayı kazan ömrü kısalacaktır. Öte yandan brülörün 459 kW gibi küçük ısıl yüklerde çalıştırılması kazandan beklenen verimi ve performansı sağlayamama gibi olumsuzluklara da neden olur.

Şekil 7. 19 farklı ısıl yüklerde kazan içerisinde oluşan NOx seviyelerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde 459 kW ısıl değerinde en düşük NOx emisyonları oluşurken, en yüksek NOx emisyonun da 866 kW ısıl yükte oluştuğu görülmektedir. Isıl yükün 866 kW değerinden 1200 kW değerine artması NOx seviyesini düşürmüştür. Bu durumun nedenlerden biri artan ısıl yükle birlikte sisteme giren hava miktarının dolayısıyla hızın artması sonucu yanma bölgesinde yanma ürünlerinin daha kısa sürede uzaklaştırılması sonucu daha düşük NOx oluşumu meydana gelmiş olma ihtimalidir. Diğer yandan alev bölgesinde alev sıcaklığına bağlı olarak oluşan NO'ların artan hava miktarıyla orantılı olarak artan nitrojenlerle tepkimeye girip daha düşük miktarda NO₂ ve N₂ oluşturması gösterilebilir. Bu durum 7. 19 (a) ve (b) 'de alev bölgelerinden sonra NOx seviyelerinin düşmesi nedenleri olarak sayılabilir. Şekil 7. 20 'de farklı ısıl yüklerde kazan içinde oluşan CO emisyonları gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde kazanlarda oluşan CO emisyon seviyeleri birbirine yakın değerler almakta, ocak sonuna doğru CO'dan CO₂'ye doğru dönüşümler yaklaşık olarak tamamlanmaktadır.



Şekil 7. 18 Isıl Yükün (Q) değişimiyle ((a) 1200 kW, (b) 1085 kW, (c) 866 kW, d) 668 kW, (e) 459 kW) kazan içi sıcaklıklar



Şekil 7. 19 Isıl Yükün (Q) değişimiyle ((a) 1200 kW, (b) 1085 kW, (c) 866 kW, d) 668 kW, (e) 459 kW) kazan eksen düzleminde NOx değişimi



Şekil 7. 20 Isıl Yükün (Q) değişimiyle ((a) 1200 kW, (b) 1085 kW, (c) 866 kW, d) 668 kW, (e) 459 kW) kazan eksen düzleminde CO değişimi

7.3.4 Hava Fazlalık Katsayısının Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Deneysel çalışmada üç farklı hava fazlalık katsayısında (λ) testler yapılmasına rağmen, HAD ile dört farklı λ değerinde (λ =1.05, λ =1.2, λ =1.38 ve λ =1.5) simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. HAD yanma analizlerinde ocak eksen çizgisi üzerindeki sıcaklık ve yanma sonu emisyonları elde edilmiş, sonuçlar farklı λ için Şekil 7. 21'de karşılaştırılmıştır.

Şekil 7. 21(a) incelendiğinde ocak sıcaklığının 0<z<1.1 m aralığında her bir λ değeri için azalan hızla artma eğilimi göstermekte özellikle alev sonuna (0.7<z<1.1 m) doğru bu

artış git gide azalıp sabitlenmektedir. Ocak eksen sıcaklığı 1.1<z<1.7 m aralığında her bir λ için keskin olarak düşmektedir. Ayrıca z=1.7 m'den sonra λ =1.05 için, z=1.8 m'den sonra λ =1.2 için sıcaklıklar ocak boyunca sabitlenirken, λ =1.38 ve λ =1.5 değerleri için eksen sonuna kadar düşmektedir. Öte yandan λ =1.05 değeri için en yüksek eksen sıcaklığı elde edilirken, λ artmasıyla kademeli olarak eksen sıcaklık değerleri düşmektedir. Bu durum λ değerinin 1'e yaklaşık olmasıyla tam yanma şartlarına yaklaşmasıdır. Artan λ değeri alevi soğutma görevi görmekte, dolayısıyla eksenel alev sıcaklığını da düşürmektedir.

Şekil 7. 21(b) incelendiğinde ocak ekseninde NOx değişimi farklı λ değerleri için görülmektedir. Yapılan incelemede 0<z<1.1 m aralığında NOx seviyeleri her bir λ değeri için artmakta, z=1.1 m değerinde pik değerine ulaşıp, bu noktadan sonra 1.1<z<1.4 m aralığında azalarak sabitlenmektedir. Şekil 7.21 (a) ve (b) birlikte değerlendirildiklerinde λ değerinin 1'e yaklaşık olmasıyla yüksek eksen sıcaklığı elde edilmekte buna bağlı olarak yüksek NOx değerleri oluştuğu görülmektedir. Artan λ değeriyle ilk olarak alev sıcaklıkları düşmekte buna bağlı olarak da NOx seviyeleri de düşmektedir. Pik noktalarına karşılık gelen NOx değerleri incelendiğinde en küçük λ için NOx değeri, en büyük λ için NOx değerinin yaklaşık 3 katıdır.

Şekil 7. 21(c) ve (d) ocak eksen çizgisi üzerinde CO₂ ve H₂O kütle kesri değerlerinin farklı λ değerleri için değişimlerini göstermektedir. Yapılan incelemede her iki türün oluşumları birbirine benzerlik göstermekte, kütle kesri değerleri de birbirine yakın çıkmaktadır. Her iki tür için 0<z<1.1 m değerleri arasında azalan hızla artış meydana geldiği, sonrasında λ' ya bağlı olarak değerlerinde bir miktar düşüş meydana gelmekte (CO₂ için λ =1.05) ve sonrasında sabit seviyede devam ettikleri görülmektedir. CO₂ kütle kesrinde (λ =1.05) z=1.1 m mesafesinde O₂ miktarı kaynaklı olduğu tahmin edilen, bir miktar artış görünmektedir. 1085 kW sabit yüklerde yani aynı yakıt miktarında yapılan çalışmalarda küçük λ değerlerinde yanmanın tam yanmaya yaklaştığı, yakıtın tepkimeye girmesiyle oluşan CO₂ ve H₂O değerlerinden görülebilmektedir. Artan λ değeri ile her iki türün kütle kesri değerleri giderek azalmaktadır.

121



Şekil 7. 21 Hava fazlalık katsayısının (λ) kazan ocak ekseni boyunca (a) T ve b) NOx, (c) CO₂, (d) H₂O, (e) O₂ ve (f) CO için değişimi

Şekil 7. 21(e)'de ocak eksen çizgisi üzerinde O₂ kütle kesri miktarının değişimi farklı λ değerleri için karşılaştırılmıştır. Şekilden görüleceği üzere, O<z<1.1 m arasında O₂ kütle kesri miktarı oksijenin yanmaya katılmasıyla azalmakta ve en çok azalmanın da küçük λ katsayılarında olduğu görülmektedir. Hatta λ =1.05 için, z=1.4 m civarında oksijen miktarı tamamen tükendiği dolayısıyla tam yanmanın gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca λ =1.05 dışındaki hava fazlalık değerlerinde z=1.1 m konumundan sonra O₂ kütle kesri seviyelerinin arttığı ve kısa bir mesafeden sonra sabitlendiği görülmektedir.

Şekil 7. 21(f)'de ocak eksen çizgisi üzerinde CO kütle kesri değerlerinin değişimi gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere λ değerinin artmasıyla ocak içerisinde oluşan CO seviyesi kademeli olarak düşmektedir. Bunun nedeni CO türünün O₂ eksikliğinden oluştuğu artan hava fazlalığı ile hava içerisinde oksijen miktarının artmasıyla oluşan CO seviyesi minimize edilmiştir. Hava fazlalığı λ =1.05 için ocak eksen çizgisinde O₂ eksikliği nedeniyle CO seviyesi yüksek değerde kalmıştır.

Kazan atık gazında bulunan emisyonların deneysel ve HAD analiz sonuçları Şekil 7. 22'de gösterilmiştir. Şekil 7. 22(a)'da atık gazdaki NOx emisyonu her iki yöntem için karşılaştırılmış ve aradaki benzerlikler ortaya çıkarılmıştır. Özellikle λ =1.05 ve λ =1.2 değerlerinde sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmekte, λ =1.38 değerinde ise arada belirgin bir fark olduğu görülmektedir. Fakat her iki yöntemde eğilimin aynı yönde olduğu görülmektedir. Her iki yöntemde de artan λ ile NOx seviyesi önemli ölçüde düşürülmüştür. Öte yandan atık gazdaki % CO₂ miktarı Şekil 7. 22(b)'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, HAD analizleri ile deneysel çalışmada ölçülen % CO₂ değerleri arasındaki uyumun mükemmel olduğu görülmektedir. Burada artan λ ile % CO₂ oranın azaldığı görülmektedir.

Şekil 7. 22(c) ve (d)'de atık gazdaki % O₂ ve CO (ppm) seviyeleri deneysel ve HAD olmak üzere karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemede % O₂ seviyesi her iki yöntem de benzer eğilim göstermekte ve sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğu görülmektedir. Artan λ ile % O₂ oranının git gide arttığı görülmektedir. Öte yandan düşük λ değerinde CO seviyesinin HAD yöntemiyle yapılan ölçümde beklenenden düşük hesaplandığı görülmektedir. Yüksek λ ile CO seviyesinin her iki yöntemde düşük değerler aldığı görülmekte ve sonuçların benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 7. 22 Farklı hava fazlalık katsayısında (λ) kazan atık gazındaki (a) NOx, (b) CO₂, (c) O₂ ve (d) CO değişimi

Doğal gazın dört farklı hava fazlalık katsayısında yanması sonucunda kazan içi eksenel düzlemde sıcaklık dağılımları Şekil 7. 23'de görselleştirilmiştir. Şekiller incelendiğinde λ değerinin artmasıyla alev uzunluğunun ve çapının düştüğü görülmektedir. Ayrıca kazan içi sıcaklıklarında λ değerinin artmasıyla azaldığı görülmektedir. Hava fazlalık değerinin λ 1.38 ve 1.50 olması durumunda kazan içinde homojen olmayan sıcaklık dağılımları meydana gelmektedir.

Öte yandan farklı hava fazlalık katsayılarında kazan içinde oluşan NOx seviyeleri Şekil 7. 24'te görülmektedir. Şekiller incelendiğinde hava fazlalık katsayısının artmasıyla NOx
emisyonları bariz bir şekilde düşmektedir. Bu durum beklenen bir durumdur. Çünkü artan hava miktarı alev sıcaklığını düşürücü etkiye sahip olmakla birlikte, yanmamış hidrokarbon miktarını önemli ölçüde azalttığı için NOx oluşumunu da sınırlandırmaktadır.

Şekil 7. 25 farklı hava fazlalık katsayısında kazan içinde CO emisyonlarının dağılımını vermektedir. Şekiller incelendiğinde düşük hava fazlalık katsayısında yani stokiyometrik şartlara yaklaşıldığında yanma bölgesinde oksijen yetersizliğinden dolayı CO seviyeleri yüksek değerlere çıkmaktadır. Artan hava fazlalığı ile alev bölgesindeki CO seviyesi git gide azalmaktadır.



Şekil 7. 23 Hava fazlalık katsayısının (λ) değişimiyle ((a) λ =1.05, (b) λ =1.20, (c) λ =1.38, d) λ =1.50) kazan eksen düzleminde sıcaklığın değişimi



Şekil 7. 24 Hava fazlalık katsayısının (λ) değişimiyle ((a) λ =1.05, (b) λ =1.20, (c) λ =1.38, d) λ =1.50) kazan eksen düzleminde NOx emisyonları değişimi



Şekil 7. 25 Hava fazlalık katsayısının (λ) değişimiyle ((a) λ =1.05, (b) λ =1.20, (c) λ =1.38, d) λ =1.50) kazan eksen düzleminde CO emisyonlarının değişimi

7.3.5 Kazan Uzunluğunun Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Kazan ocak uzunluğu yanma odası seçim parametrelerinden biridir. Doğru bir seçim kazan verimine etki ettiği gibi yanma emisyonlarına da etki etmektedir. Deneysel olarak üç farklı uzunlukta yapılan çalışmanın yanında HAD analizleriyle dört farklı kazan uzunluğunda simülasyonlar gerçekleştirilmiş, kazan eksen çizgisi boyunca sıcaklık, NOx, CO₂, H₂O, O₂ ve CO emisyonları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca kazan çıkışı gaz emisyon sonuçları her iki yöntem için karşılaştırılmıştır.

Şekil 7. 26(a)'da dört farklı ocak uzunluğunda gerçekleşen yanma tepkimelerinde eksenel yönde sıcaklık değişimleri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde 0<z<1.3 m mesafeleri arasında alev sıcaklıkları aynı değer ve aynı eğilimleri göstermekteyken 1.3<z<1.7 m aralığında kısa ocak uzunluğuklarında ölçülen sıcaklık değerleri uzun ocak uzunluklarından daha yüksektir. L=1.75 m dışındaki ocak uzunluklarında ocağın son kısımlarında benzer sıcaklık değerlerinin oluştuğu gözlenmektedir.

Şekil 7. 26(b)'de NOx emisyonları farklı kazan uzunlukları için karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde girişten itibaren NOx emisyon değerleri artmakta ve pik değerlerinden sonra kısa ocak uzunluklarında azalıp sabitlenmekteyken, uzun ocak uzunluklarında azalmalar devam etmektedir. Ocağın 0 <z<1.1 m aralığında en kısa ocak uzunluğunda (L=1.75 m) girişten itibaren oluşan NOx seviyesi diğer kazan uzunluklarında daha yüksektir. Öte yandan L=2.1 m, L=2.45 m ve L=2.80 m ocak uzunluklarında eksenel yöndeki NOx seviyelerinin kazan içindeki eğilimleri birbirine benzemekte olup, ocak son bölümünde artan ocak uzunluğuyla NOx seviyesi düşüşe geçmektedir. Bu bölümde en büyük düşüş en uzun kazan uzunluğunda (L=2.80 m) meydana gelmektedir.

Farklı kazan uzunluklarında yapılmış HAD çalışmalarında eksenel yöndeki O₂, CO₂, H₂O, ve CO emisyonlarının değişimi Şekil 7. 26(c) ve (d)'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde bu emisyonların değişimi tüm kazan boyları için yaklaşık olarak eşit seviye ve değerde olmaktadır. Ayrıca z=1.1 m mesafesinde O₂ miktarının tükenmesi aynı zamanda oluşan H₂O emisyon değerinde anlık bir tepki oluşturmuş ve kütle kesri miktarı azalan hızla artarken birden düşüşe geçmiştir. Fakat bu noktada CO₂ seviyesinde belirgin bir değişimin olmadığı gözlenmektedir. Bu noktada ayrıca CO miktarında keskin bir düşüş

yaşanmakta ve z=1.5 m değerinde tamamen tükenmektedir. Bunun nedeni eksen çizgisi üzerinde C kaynaklı yakıtın bitme sınırına gelmesidir.



Şekil 7. 26 Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle ocak eksen çizgisi üzerinde (a) T ve b) NOx, (c) O₂, CO₂ ve H₂O, (d) CO değişimi

Üç farklı kazan uzunluğunda (L=2.10 m, 2.45 m ve 2.80 m) yapılan deneysel çalışma ve dört farklı kazan uzunluğunda (L=1.75 m, 2.10m, 2.45 m ve 2.80 m) yapılan HAD analizleriyle elde edilen gaz emisyon sonuçları Şekil 7. 27'de karşılaştırılmıştır.

Şekil 7. 27(a) ocak uzunluğunun NOx emisyonu üzerindeki etkisini göstermektedir. Yapılan incelemede L= 1.75 m değerinde HAD analizi ile yapılan çalışmada NOx seviyesinin diğer ocak uzunluklardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Deneysel ve HAD sonuçları arasında L=2.1 m ocak uzunluğunda bir miktar farklılık olduğu fakat artan ocak uzunluğu ile bu farkın ortadan kalktığı görülmektedir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre ocak uzunluğunun L=2.10 m'den L=2.45 m 'e uzaması bir miktar NOx artmasına neden olmaktayken, L=2.80 m 'e arttırılması durumunda değişmediği görülür. Öte yandan HAD analiz sonuçlarına göre ise ocak uzunluğunun artması (L=2.10 m-L=2.80 m) NOx miktarını az da olsa arttırdığı görülmektedir. Bu durumun nedeni artan ocak uzunluğu ile yanma ürünlerinin yüksek sıcaklık bölgesinde oyalanma süresinin artmasıdır.

Şekil 7. 27(b) ocak uzunluğunun değişimiyle atık gazdaki % CO₂ miktarı görülmektedir. Üç farklı uzunlukta yapılan deneysel ve HAD analizler sonuçlarına göre CO₂ emisyon değerlerinin birbiriyle uyumlu ve yakın olduğu görülmektedir. Şekil 7. 27(c) ocak uzunluğunun değişimiyle atık gazdaki % O₂ miktarı karşılaştırılmıştır. Üç farklı uzunlukta yapılan deneysel ve HAD sonuçlarına göre % O₂ değerlerinin HAD analizlerinde daha yüksek tahmin edildiği görülmektedir. Üç farklı ocak uzunluğu için yapılmış deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir.

Şekil 7. 27(d) ocak uzunluğunun değişimiyle atık gazdaki CO (ppm) miktarları karşılaştırılmıştır. Üç farklı uzunlukta yapılan ve 1085 kW ve λ =1.2 hava fazlalığında yapılan deneysel çalışmalarda CO değerlerinin 1 ppm olduğu, HAD analizlerinde ise 0 < CO < 1 ppm olduğu hesaplanmıştır. Ocak uzunluğunun değişimi CO seviyesinde bir değişime neden olmadığı her iki yöntemde görülmektedir.





Şekil 7. 27 Farklı ocak uzunluğunda (L) kazan atık gazındaki (a) NOx, (b) CO₂, (c) O₂ ve (d) CO değişimi

Doğal gazın farklı ocak uzunluklarında yanmasıyla kazan içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 7. 28'de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde alev formunun ocak uzunluğundan etkilenmediği görülmektedir. L= 1.75 m ocak uzunluğunda ocak alev formundan hemen sonraki bölgede sıcaklıkların diğer ocak uzunluklarına kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca şekiller incelendiğinde alev formundan ocak karşı duvarına kadar sıcaklıkların kademeli olarak azaldığı ve ocak son bölümlerinde sabit kaldığı görülmektedir.

Doğal gazın kazan içerisinde farklı ocak uzunluklarında yanması sırasında oluşan NOx emisyonlarının dağılımı Şekil 7. 29'da görülmektedir. Kazanlar incelendiğinde maksimum NOx emisyonu en küçük ocak uzunluğunda oluştuğu görülmektedir. En küçük ocak uzunluğunda alev bölgesi ile ocak karşı duvarı arasındaki sıcaklığın diğer ocaklara kıyasla daha yüksek olması bu bölgede daha yüksek seviyede NOx oluşum nedenlerindendir. Diğer ocak uzunluklarında NOx seviyeleri birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir.

Farklı ocak uzunluklarında doğal gazın yanması sırasında kazan içerisinde oluşan CO seviyeleri Şekil 7. 30'da göründüğü gibi birbirine yakın değerler almaktadır.



Şekil 7. 28 Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle (a) L=1.75 m, (b) L=2.10 m, (c) L=2.45 m ve (d) L=2.8 m) kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımlarının değişimi



Şekil 7. 29 Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle (a) L=1.75 m, (b) L=2.10 m, (c) L=2.45 m ve (d) L=2.8 m) kazan eksen düzleminde oluşan NOx dağılımları değişimi



Şekil 7. 30 Kazan ocak uzunluğunun (L) değişimiyle (a) L=1.75 m, (b) L=2.10 m, (c) L=2.45 m ve (d) L=2.8 m) kazan eksen düzleminde oluşan CO dağılımları değişimi

7.3.6 Kazan Ocak Çapının Yanma Ve Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Kazan ocak uzunluğuyla birlikte yanma odası parametrelerinden biri olan kazan ocak çapının yanma, yanma verimine ve kazan maliyetine etki eden önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Bunların yanında ocak çapının değişiminin eksenel yönde sıcaklık ve yanma ürünleri değişimine etkisi ile atık gazdaki yanma emisyonlarına etkisi incelenmiştir. 1085 kW brülör ısıl yükünde, L=2.10 m ocak uzunluğunda ve λ =1.2 hava fazlalık katsayısında farklı ocak çapları için yapılmış HAD analiz sonuçları Şekil 7. 31'de karşılaştırılmıştır.

Farklı ocak çaplarının kullanılmasıyla ocak eksenel yönünde sıcaklık değişimleri Şekil 7. 31(a)'da verilmiştir. Yapılan incelemede 0<z< 0.95 m aralığında ocak eksenel sıcaklık değişimleri aynı değerde ve aynı eğilimleri göstermektedirler. Fakat z>1 m'den sonra D=0.55 m ocakta, z>1.10 m'den sonra D=0.58 m ocakta, z>1.20 m'den sonra D=0.61 m ocakta ve z>1.28 m'den sonra D=0.64 m ocakta eksen sıcaklıkları keskin bir şekilde düşüşe geçtikleri görülmektedir. Küçük ocak çaplarında kazanın son bölümlerinde ocak sıcaklığı sabit bir değerde devam ederken, ocak çapının artmasıyla bu değer düşmeye devam etmektedir.

Şekil 7. 31(b)'de ocak ekseninde farklı ocak çaplarının kullanılmasıyla NOx değişimleri görülmektedir. Yapılan incelemede 0<z< 0.8 m aralığında NOx eğilimleri her bir çap için benzer şekildedir ve değişim miktarları da yaklaşık olarak aynıdır. Fakat z>0. 8 m'den sonra değişim miktarları farklılık göstermektedir. 0.8<z< 1 m aralığında küçük çaplı ocaklarda NOx değeri büyük çaplı ocaklardan daha yüksektir. Öte yandan ocak ekseninde NOx pik noktaları ve değerleri artan çapla birlikte ötelenmekte ve yükselmektedir. Fakat pik noktalarından sonra her bir çapta NOx seviyesi azalıp sabitlenmektedir. Bu azalma artan ocak çapıyla artmaktadır.

Yanma sonu gaz emisyonlarından olan CO_2 ve H_2O kütle kesirleri Şekil 7. 31(c) 'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde her iki türün tepkimeler sonucu oluşumları birbirine benzemektedir. Ocak girişinden itibaren her iki türün kütle kesri değerleri azalan hızla artmakta ve sonra sabitlenmektedir. Alev sonuna doğru ocak ekseni üzerindeki değerleri artan çapla birlikte azalmaktadır. Bunun nedeni aynı hava yakıt miktarları için artan ocak hacmi ile birlikte eksen üzerindeki yoğunluğun düşmesidir. Ocak içerisinde CH4 gazının kütle kesri değerinin eksen boyunca değişimi Şekil 7. 31(d)'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde CH₄ kütle kesri değeri genel anlamda ocak ekseni boyunca düşmekteyken iki noktada kısa süreli artma gözlenmekte ve bu iki artmanın girdap üretecinden geçen havanın dönerek ilerlemesi ve havayla birlikte yakıtı da sürükleyerek döndürmesi sonucu ocak ekseni üzerinde miktarının belli periyotlarla yükselebilmesi olarak yorumlanmaktadır. Ocak çapının artmasıyla CH₄ gazının ocak ekseni boyunca tüketilme hızı azalmakta ve tükenme mesafesi ötelenmektedir.

Ocak içerisinde tepkimeye girmeden kalan O₂ kütle kesri ve yanma sonu emisyonlarından olan CO (ppm) değişimleri Şekil 7. 31(e) ve (f)'de görülmektedir. O₂ kütle kesrinde artan çapla birlikte beklenmeyen bir değişim gözlenmemekte, ocak sonuna doğru ocak içindeki O₂ miktarı artan ocak çapıyla birlikte artmaktadır. Ocak ekseni üzerinde oluşan CO seviye incelendiğinde ocak girişinden itibaren her bir çap için CO seviyesinin arttığı, ocak çapının artmasıyla oluşan CO pik değeri artma eğiliminde olduğu görülmekte fakat D= 0.61 m için bu durumun geçerli olmadığı görülmektedir.

133



Şekil 7. 31 Kazan ocak çapının (D) değişimiyle ocak eksen çizgisi üzerinde (a) T ve b) NOx, (c) CO₂ ve H₂O, (d) CH₄, (e) O₂ ve (f) CO değişimi

Öte yandan alev boyunca oluşan CO seviyesinin artan ocak çapıyla birlikte eksenel yönde ötelenmektedir. Bu durum artan çapla birlikte alev uzunluğunun artmasının bir sonucu olabileceği değerlendirilmektedir.

Ocak çapının yanma sonu gazları olan NOx, CO_2 , O_2 ve CO üzerindeki etkisi Şekil 7. 32'de görülmektedir. Şekil 7. 32(a) incelendiğinde, ocak çapının artması NOx emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bunun nedeni artan ocak çapıyla birlikte alev uzunluğunun artması ve yanma ürünlerinin artan alev uzunluğuyla yüksek sıcaklığa daha uzun süre maruz kalmasıdır. HAD simülasyonları ile 1085 kW, L=2.1 m ocak uzunluğu ve λ =1.20 hava fazlalık katsayısıyla yapılmış çalışma sonuçlarına göre kazan atık gazdaki % CO₂, % O₂ ve CO (ppm) miktarları şekil 7. 32(b), (c) ve (d)'den de görüleceği üzere artan ocak çapı ile kayda değer bir oranda değişmedikleri görülmektedir.



Şekil 7. 32 Farklı ocak çaplarında (D) kazan atık gazındaki (a) NOx, (b) CO₂, (c) O₂ ve (d) CO değişimi

Doğal gazın dört farklı ocak çaplı kazanda yanması sırasında kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 7. 33'de görülmektedir. Kazanlar incelendiğinde artan ocak çapı ile alev çapı küçülmekte fakat alev boyu uzamaktadır. Ayrıca ocak çapının artması ile ocak girişinde daha düşük sıcaklık bölgeleri elde edilmektedir. Öte yandan farklı ocak çaplarında kazanlarda oluşan NOx emisyonları dağılımı Şekil 7. 34 'te görünmektedir. Şekiller incelendiğinde artan ocak çapıyla NOx seviyelerinde kademeli bir şekilde artma söz konusudur. En düşük NOx seviyesi D= 0.55 m de (132.844 ppm) iken, en yüksek NOx seviyesi de D= 0.64 m' de (138.536 ppm) elde edilmiştir. Şekil 7. 35'te görüldüğü üzere farklı ocak çaplarında yanma sırasında oluşan CO seviyelerinde ise benzerlikler görünse de artan ocak çapıyla alev formu boyunca oksijen eksikliğinde CO emisyonları meydana gelmekte, daha sonra tersine tepkime reaksiyonlarının gerçekleşmesiyle CO ürünleri, CO₂ emisyonlarına dönüşmektedir.



Şekil 7. 33 Kazan ocak çapının (D) değişimiyle (a) D=0.55 m, (b) D=0.58 m, (c) D=0.61 m ve (d) D=0.64 m) kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımları değişimi



Şekil 7. 34 Kazan ocak çapının (D) değişimiyle (a) D=0.55 m, (b) D=0.58 m, (c) D=0.61 m ve (d) D=0.64 m) kazan eksen düzleminde oluşan NOx emisyon dağılımları değişimi



Şekil 7. 35 Kazan ocak çapının (D) değişimiyle (a) D=0.55 m, (b) D=0.58 m, (c) D=0.61 m ve (d) D=0.64 m) kazan eksen düzleminde oluşan CO emisyon dağılımları değişimi

7.4 Alternatif Yakıtların Yanma ve Emisyonlar Üzerindeki Etkisi

7.4.1 Doğal gaz ve Metan Yakıtlarının Yanması

Doğal gaz metan, etan, propan, bütan, pentan, hekzan, azot, karbondioksit, oksijen ve hidrojen gibi gazları içeren bir karışımdır. Doğal gazın bileşimleri ve miktarları bölgeden bölgeye değişebilir. Bu çalışmada incelenen doğal gazın bileşenleri ve mol kesri Çizelge 2. 5'te gösterilmişti. Doğal gaz içeriğinden de görüldüğü üzere, doğal gazın çoğu metan gazıdır. Dolayısıyla HAD simülasyonlarında doğal gaz bir yandan metan-hava-2 adımlı reaksiyon mekanizması ile (Denk. 2.18-2.19) metan olarak modellenmiştir. Öte yandan varsayılan metan-hava-2 adımlı reaksiyon mekanizması tüm türleri kapsayacak şekilde, karışım yoğunluğu, alt ısıl değeri ve karışım molekül ağırlığı vb. dikkate alınarak doğal gaz bileşiminin modellenmesi için modifiye edilmişti (Denk. 2.20-2.21). Bu 2 adımlı iki reaksiyon ile Eddy Dissipation yanma modeli ve Realizable $k - \epsilon$ türbülans modeli kullanılarak 1085 kW, L= 2.10 m, D=0.58 m ve λ =1.20 hava fazlalık katsayısı ile doğal gaz ve metan gazlarının yanması gerçekleştirilmiş ocak ekseni üzerinde sıcaklıklar ve NOx değerleri her iki yakıt için Şekil 7. 36'da karşılaştırılmıştır. Yapılan incelemede her iki yakıt için sıcaklık dağılımlarının aynı eğilimi gösterdiği görülebilir. Bununla birlikte, doğal gazın maksimum alev sıcaklığı (2173.24 K), metan alev sıcaklığından (2171.72 K) biraz daha yüksek hesaplanmıştır. Bu durum doğal gaz ve metan gazlarının yanmasıyla eksenel yöndeki NOx değişimi üzerinde grafiklerden de görüleceği üzere bir fark yaratmıştır. Bu durum aynı zamanda kazan çıkışı NOx emisyonu seviyesine de etki etmiş ve her iki yakıt NOx sevileri arasında % 6'lık bir sapma meydana getirmiştir. Detaylı bilgi için [100] referansı incelenebilir.



Şekil 7. 36 Doğal gaz ve metan yakıtlarının yanmasıyla kazan ocak ekseni boyunca sıcaklık (T) ve NOx emisyonları değişimleri

7.4.2 Doğal Gaz-Hidrojen Karışımı ve Saf Hidrojen Yanması

Bu kısımda iki adımlı doğal gaz yanma reaksiyonu (Denk. 2.20-2.21) ile tek adımlı hidrojen-hava yanma reaksiyonu (Denk. 2.22) Eddy Dissipation yanma modeli ve Realizable k – ε türbülans modeli kullanılarak 1085 kW brülör ısı yükünde, L= 2.10 m ocak uzunluğunda, D=0.58 m ocak çapında ve λ =1.20 hava fazlalık katsayısında doğal gaz (% 100 DG), saf hidrojen (% 100 H₂) ve doğal gaz-hidrojen gaz karışımları (ısıl yükçe: % 75 DG +% 25 H₂, % 50 DG +% 50 H₂ ve % 25 DG +% 75 H₂) yanması gerçekleştirilmiş olup ocak ekseni üzerinde sıcaklıklar ve gaz emisyonları kullanılan yakıtlar için Şekil 7. 37'de karşılaştırılmıştır.

Şekil 7. 37(a) farklı yakıt türleri için ocak eksenindeki sıcaklık dağılımlarını vermektedir. Şekil incelendiğinde doğal gaza ilave edilen hidrojen miktarının eksenel yöndeki sıcaklık değişim eğilimini pek etkilemediği görülmektedir. Doğal gaz yanması sırasında eksenel yönde oluşan alev sıcaklığı minimum iken doğal gaza kademeli olarak hidrojen ilavesi ile sıcaklık değerlerinin kademeli olarak arttığı görülmektedir. Fakat ocağın ilk bölümünde (0 < z < 0.55 m) hidrojen miktarının değişmesi alev sıcaklığını sadece doğal gaza göre artırmaktadır. Bu bölgede hidrojen miktarının artmasına rağmen sıcaklığın pek değişmediği görülmektedir. Öte yandan bu noktanın dışında artan hidrojen miktarıyla sıcaklığın da yükseldiği grafikten görülmektedir. Ocak ekseni üzerinde maksimum alev sıcaklığı ve kazan içindeki sıcaklık dağılımları beklenildiği gibi saf hidrojen yakma işlemi sırasında maksimum seviyelerdedir. Doğal gaz, hidrojen açısından zengin doğal gaz ve saf hidrojenin yanması sırasında NOx eğilimleri Şekil 7. 37(b)'de eksenel yönde değerlendirildiğinde, NOx emisyon seviyesi hidrojen zenginleştirmesi ile ocağın her noktasında artar. Bu durum esas olarak artan hidrojen miktarıyla orantılı olarak hidrojenin yüksek alev sıcaklığından ötürü alev uzunluğu boyunca (0-1.5 m) termal NO seviyesindeki artıştan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Sabit brülör ısıl yükünde H₂ yüzdesinin artması daha fazla hidrojen miktarı anlamına geldiğinden bu durum alev sıcaklığının artmasına sonra da yanma sonu emisyonu olan NOx seviyesinin ısıl NO nedeniyle artmasıyla sonuçlanmaktadır. NOx emisyon değişiminden de görüleceği üzere doğal gaz miktarının fazla olduğu ısıl yükçe %100 DG ve %75 DG+%25 H₂ yakıtlarında oluşan NOx iki kademe de artarken, hidrojen miktarının artmasıyla NOx miktarındaki artış tek kademeye düşmektedir. Bu durumun nedeni yüksek oranda doğal gaz bulunan yakıtlarda ısıl NO 'nun iki kademeli artışından kaynaklanmaktadır. Detaylı bilgi için [100] incelenebilir.

Şekil 7. 37(c) ve (d) CO₂ ve CO emisyonlarının ocak ekseni boyunca değişimlerini göstermektedir. Şekiller incelendiğinde en yüksek CO₂ ve CO kütle kesri değerleri doğal gazın yakılmasıyla ile elde edildiği görülmektedir. Artan hidrojen miktarıyla bu iki türün ocak ekseni üzerindeki değerleri düşmektedir. Her iki tür için ayrıca %100 H₂ kullanılması durumunda CO₂ ve CO oluşmadığı görülmektedir. Bunun nedeni saf hidrojen yakıtında C bulunmaması ve dolayısıyla CO₂ ve CO reaksiyonlarının gerçekleşmemesidir. Özellikle ocak içindeki CO seviyeleri, doğal gaz ve doğal gaz-hidrojen karışımlarında yani karbon (C) bileşenli yakıtlarda çok yüksek olmasına rağmen, eksen hattındaki değerleri ocak sonuna doğru oksijen mevcudiyetiyle CO₂ oluşturmak suretiyle yok olmaktadır (0 ppm). Ayrıca doğal gaz yükünün yarısı kadar azaltılması CO₂ emisyonlarının yarı yarıya azalmasına neden olmaktadır.

Doğal gazın en yüksek değerdeki bileşeni olan CH_4 ve H_2 'nin yanması sırasında ocak içerisindeki kütle kesri değerleri eksenel yönde Şekil 7. 37(e) ve (f)'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde ocak girişinden itibaren içeriye püskürtülen yakıtlardan dolayı her iki yakıtın seviyesi bir miktar yükselmektedir. Ocak içerisinde z = 0.3 m mesafesine kadar H₂ kütle kesri değeri artarken, bu mesafeden sonra kademeli olarak azalıp z=1.30 m civarında tamamen tükenmiştir. Öte yandan ocak içerisinde z = 0.9 m mesafesine kadar doğal gaz yakıtının kütle kesri değerinin arttığı, bu mesafeden sonra z = 1.50 m mesafesine kadar azalıp tükenmektedir. Bu iki sonuçtan anlaşılacağı üzere hidrojenin doğal gaza göre daha önce yandığı ve seviyesinin azaldığı görülmektedir. Buna H₂ difüzyonunun CH4'e göre daha yüksek olması neden olarak gösterilebilir. Doğal gazhidrojen karışımlarında CH₄ ve H₂ miktarlarının değişmesiyle ocak içerisinde kütle kesri değerlerinin pik değeri noktasına ulaştıkları mesafe ve tükendikleri mesafelerin değiştiği görülmektedir. Doğal gaza hidrojen ilavesiyle CH4'ün tüketilme mesafesi kısalmaktayken, artan hidrojen miktarıyla hidrojenin tüketilme mesafesi pek değişmediği görülmektedir.

Şekil 7. 37(g) ve (h) incelendiklerinde O₂ ve H₂O kütle kesri değerlerinin değişimi görülmektedir. Yapılan incelmede ocak eksen çizgisi boyunca H₂ karıştırılmış yakıtların yanmasıyla ocak ilk bölümlerinde O₂ miktarını daha az olduğu, ocak son kısımlarında ise O₂ miktarının doğal gaza göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni H₂ yakıtının difüzitesinin doğal gazdan daha yüksek olması sonucu ocak içerisinde ilk yanan gazın hidrojen gazı olduğu ve kısa mesafede tükendiği, daha sonra doğal gazın yandığı ve bu yanmanın daha uzun bir bölgeye yayılması ile açıklanabilir. Öte yandan ocak içerisinde oluşan H₂O kütle kesri değerleri incelendiğinde H₂O miktarı doğal gaz yanmasında en düşük seviyelerde iken artan H₂ miktarıyla H₂O değerinin arttığı görülmektedir. Bu durumun nedeni H₂ gazının yanması sonucu oluşan ana ürünün H₂O olmasıdır. Dolayısıyla yakıttaki artan H₂ miktarı H₂O miktarının artmasına neden olmaktadır. Dahası hidrojen, doğal gaz yerine yakıt olarak yakıldığında H₂O seviyesi neredeyse iki katına çıkar.





Şekil 7. 37 Doğal gaz, hidrojen ve doğal gaz-hidrojen karışımlarının yanmasıyla ocak ekseninde (a) T, (b) NOx, (c) CO₂, (d)CO, (e)CH₄, (f)H₂, (g) O₂ ve (h) H₂O değişimleri

Deneysel ve HAD simüləsyonu ile doğal gaz yanması incelenmiş ve aynı şartlarda doğal gaza ilave edilen hidrojenin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Doğal gaz ve doğal gazhidrojen karışımlarının yanması sonucu atık gazda bulunan emisyonların değişimi Şekil 7. 38'de doğal gaz deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Kazan çıkışındaki tahmini gaz sıcaklık seviyeleri Şekil 7. 38 (a) 'da gösterilmektedir. CH₄ ve doğal gazın (DG)' ın yanma sonu gaz sıcaklıkları birbirine yakın ve saf hidrojen ve doğal gaz-hidrojen karışımı sıcaklıklarından daha yüksektir. Hidrojen ilavesinin atık gaz sıcaklığını doğal gaz ve CH₄ göre bir miktar düşürmesinin nedeni sabit duvar sıcaklığında artan hidrojen oranıyla kazana geçen ısı miktarının artması dolayısıyla gaz sıcaklığının düşmesi gösterilebilir. Ayrıca artan H₂ miktarıyla gaz çıkış sıcaklığı kademeli olarak arttığı görülmektedir.

Yanma sonu en önemli gaz emisyonlardan biri olan NOx'un farklı yakıtların kullanılması durumunda atık gazdaki miktarları Şekil 7. 38 (b)'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde doğal gaz ve metan seviyelerinin birbirine yakın ve deneysel sonuç ile uyumlu oldukları görülmektedir. Öte yandan, doğal gaz-hidrojen karışımları ve saf hidrojenin yanması durumunda NOx, doğal gaza kıyasla oldukça farklılıklar göstermektedir. Hidrojen gazının % 25, % 50, % 75 ve % 100 ısıl yüklerindeki yanmalarında oluşan NOx seviyeleri doğal gaza kıyasla sırasıyla% 92.81, % 219.72, % 360 ve % 659.30 oranında artmaktadır. Doğal gaz ve CH₄ 'ün NOx gibi CO₂ emisyon değerleri de birbirine yakın olmakla birlikte Şekil 7. 38(c) 'de gösterildiği gibi hafif bir sapma vardır. Bunun yanında, doğal gaza artan oranlarda hidrojen eklenmesiyle atık gazda bulunan CO₂ miktarı kademeli olarak azalır. Dahası doğal gaz yerine saf hidrojen kullanıldığında CO₂, hidrojen yakıtında karbon elementinin bulunmaması nedeniyle yok olmuştur. H₂ gazının ısıl yükçe % 25, % 50, % 75 ve % 100 olarak kullanılması durumunda CO₂ emisyonları doğal gaza göre sırasıyla % 19.45, % 42.58, % 69.15 ve % 100 oranında azalmıştır.

Doğal gaz ve diğer yakıtların yanmasında atık gazdaki %O₂ miktarı Şekil 7. 38(d)'de karşılaştırılmıştır. Doğal gaz ve metan için O₂ konsantrasyonları arasında bir miktar fark vardır ve bu yaklaşık olarak % 11'dir. H₂ gazının ısıl yükçe % 25, % 50, % 75 ve % 100 olarak kullanılması durumunda O₂ konsantrasyonları doğal gaza göre sırasıyla % 12.91, % 15.64, % 18.78 ve % 22.43 oranında artmıştır.

CO'nun tahmin edilen emisyon değerleri tüm yakıtlar için ≪1 olması dolayısıyla yaklaşık olarak 0 ppm iken ölçülen seviye, Şekil 7. 38(e) 'de gösterildiği gibi doğal gaz yakma sırasında 1 ppm'dir.

Doğal gaz deneysel test sonuçları referans alındığında, HAD ile yapılan çalışmalarda doğal gaz yanmasında NOx, CO₂, O₂ ve T_{çıkış} için sapmalar sırasıyla % 6.16, % 0.86, % 10.51 ve % 14.15'dir.



(a)

144











(d)

145



Şekil 7. 38 Doğal gaz, doğal gaz-hidrojen karışımı ve saf hidrojen yanması durumunda
(a) atık gaz sıcaklıkları (T), (b) NOx, (c) CO₂, (d) O₂ ve (e) CO emisyonları değişimi

Doğal gaz, hidrojen ve doğal gaz-hidrojen kompozit yakıtların yanmasıyla kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımları Şekil 7.39 'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde en düşük alev sıcaklığı doğal gaz yanması sırasında oluştuğu görülmekte, en yüksek alev sıcaklığı da saf hidrojen yanmasında oluştuğu görülmektedir. Ayrıca doğal gaza hidrojen ilavesi ile alev çapının kademeli olarak arttığı görülmekte, alev uzunluğunda ise uzama sınırlı seviyede kalmaktadır. Alev sıcaklıkları dışında kazan içerisinde oluşan NOx, CO, CO₂, O₂ ve H₂O emisyonlarının dağılımları için Cellek ve Pınarbaşı'nın [100] doğal gaz, saf hidrojen ve doğal gaz hidrojen kompozit yakıtlarının yanması ile ilgili çalışması incelenebilir.



Şekil 7. 39 Doğal gaz, hidrojen ve doğal gaz-hidrojen kompozit yakıtların yanmasıyla kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımlarının değişimi

7.5 Girdap Üreteci Tasarımı Ve HAD Analizi

Ön karışımlı yanmanın difüzyon yanmasına göre avantajların biri alev sıcaklığının daha düşük olması ve sıcaklığının belli bir bölgede yükselmesinin önüne geçilmesidir. Bu durum yüksek sıcaklık bölgelerinin önüne geçtiği gibi bu bölgelerde oluşan NOx emisyonlarını da engeller. Ön karışımsız veya kısmi ön karışımlı yanma sistemlerinde kullanılan girdap üreteci ile yakıt hava karışımı iyileştirilerek benzer bir durum sağlanmaya çalışılmaktadır.

Girdap üretecinden geçen havanın girdaplar meydana getirerek dönmesi, havayla birlikte yakıtı da sürükleyerek dönmesini sağlar. Bu durum hava ile yakıt karışımını daha

üniform bir hal almasını sağlar. Ayrıca girdap üreteçleriyle resirkülasyon bölgeleri meydana getirilerek gaz türbini yakıcıları ile brülörlerde alev kararlılığı sağlanır. Girdap üreteçleri girdap sayısı ile karakterize edilir. Girdap sayısı da girdap üreteci çapı, kanat uzunluğu (çapı) ve kanat açısı yardımıyla hesaplanır.

Brülör üzerinde bulunan mevcut girdap üreteciyle oluşan alev yapısı incelendiğinde özellikle sıcaklığın maksimum olduğu alev çekirdek bölgesi NOx emisyonlarının ana kaynağıdır. Yüksek sıcaklığa erişen bu bölgeye hava akımı yönlendirmesiyle sıcaklığın bir miktar düşürülmesi NOx emisyonlarını da düşürücü bir etkiye neden olacağı değerlendirilmiştir. Öte yandan brülör geometrisinin karmaşık oluşu, yakıt borusunun dallanması, alev tutucu bir diskin varlığı basınç düşüşlerini meydana getirmekte yeni tasarlanan girdap üretecinin de bu basınç düşüşünü daha fazla artırmaması ve hava akışının kazan karşı basıncı altına düşürmemesi gerekmektedir. Ayrıca mevcut girdap üreteci çapının küçük olması, brülör üzerinde ayrılan bölgenin dar olması bu girdap üretecinde kullanılacak kanat formunu da etkilemekte, eğrisel profilli kanat kullanmasını zorlaştırmaktadır. Nihayetinde belirtilen bu dezavantajlar göz önüne alınarak Şekil 7. 40'daki düz kanatlı girdap üreteci tasarımı gerçekleştirilmiştir. Girdap üreteçleri ile yapılan çalışmalar sonucunda tasarlanan girdap üretecinin ocak eksen sıcaklığını düşürerek en düşük emisyon değerini sağladığı belirlenmiştir. Dolayısıyla mevcut brülör için kullanılabilir olması, imalatının kolay olması bakımından tercih edilebilir olduğu değerlendirilmiştir. Yeni tasarımda kanat sayısı ve kanat açısı değiştirilerek bu iki parametrenin yanma ve emisyonlarına etkisi incelenmiş sonuçlar karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. 40 Tasarımı ve simülasyonu yapılan eksenel girdap üreteci

7.5.1 Girdap Üreteci Kanat Sayısı Değişimi

Seçilen girdap üretecinin 7, 9, 11, 13, 15 ve 17 kanatlı tasarımları Şekil 7. 41'de gibidir. Tasarımları yapılan girdap üreteçleri mevcut brülöre entegre edilerek doğal gazın Partial Premix Combustion (PPC) yanma modeli ve Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak 1085 kW brülör ısı yükünde (L= 2.10 m, D=0.58 m, λ =1.20) HAD simülasyonları gerçekleştirilmiştir. HAD analizleri sonucunda ocak ekseni üzerinde oluşan sıcaklıklar ve gaz emisyonları Şekil 7. 42'de karşılaştırılmıştır.





Şekil 7. 41 Tasarımları ve simülasyonu yapılmış 30° 'de (a) 7K (b) 9K, (c) 11K (d) 13K, (e) 15K (f) 17K düz kanatlı eksenel girdap üreteçleri

Girdap üretecinde farklı kanat sayısı kullanımının ocak eksen sıcaklığı üzerindeki etkisi Şekil 7. 42(a)'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde ocak ekseni üzerinde z=0.25 m mesafesinden sonra sıcaklığın arttığı görülmekte, 11K, 13K ve 17K kullanılmasıyla sıcaklık profillerinin birbirine yakın eğilim ve değerler aldığı görülürken, 7K ve 9K'da ise bu eğilimin farklı olduğu görülmektedir. 11K, 13K ve 17K kullanılmasıyla ocak içerisinde z=1.2 m civarında alev sıcaklıkları pik değerine yükselirken, 7K ve 9K için bu mesafeler sırasıyla z=1.5 m ve z=1.35 m'dir. Ocakta ekseninde alevin pik değerine eriştiği mesafelerden sonra her bir kanat sayısı için alev sıcaklığı keskin şekilde düşmektedir. Ocak ekseninin 1.5 m<z<2.35 m mesafeleri arasında kanat sayısının artmasıyla ocak eksen sıcaklığı düşmektedir. Kanat sayısının maksimum ocak eksen sıcaklığına da etkisi olduğu görülmektedir. Artan kanat sayısında ocak eksen sıcaklığının artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni kanat sayısının az alması durumunda brülörden giren havanın büyük kanat boşluklarından akmasıyla eksen çizgisi üzerinde hava miktarının yakıta oranla fazla olması, bu fazla havanın da bu bölgede alevi soğutma görevi görmesidir. Ocak ekseni maksimum alev sıcaklığı 11K ve 17K için 1475 K civarındayken, 7K için bu değer 1275 K civarındadır.

Girdap üretecinde farklı kanat sayısı kullanımının NOx emisyonu üzerindeki etkisi Şekil 7. 42 (b)'de görülmektedir. Yapılan incelemede orijinal girdap üretecine nazaran emisyon değerleri beklendiği gibi düşüktür. Yapılan incelemede ocak ekseninde 11K, 13K ve 17K alev sıcaklıkları nispeten yüksek olmasına rağmen NOx seviyeleri 7K ve 11K'dan daha düşük çıkmaktadır. Bu durumun nedeni düşük sıcaklıklarda T_{alev} <1600 K durumunda ısıl NO ile birlikte ani NO'nun da etkin olduğudur. Şekil 7.42 (c)'den de görüleceği üzere alev sonuna doğru (1<z<1.5 m) ocaktaki hidrokarbon miktarı 7K ve 9K girdaplı üreteçlerin kullanılmasıyla daha yüksek değerlerdedir. Bu durumda yanmamış hidrokarbonlar havadan gelen N₂ ve O₂ ile bir dizi reaksiyon sonucunda NO emisyonunu oluşturur. Ayrıca aynı Şekil 7. 42 (c)'den görüleceği üzere 11K kullanılması durumunda CH₄ tüketimi diğer kanat sayılarından daha iyi sağlandığı için yüksek alev sıcaklığına rağmen en düşük NOx emisyonu verdiği görülmektedir.

Şekil 7. 42 (d) incelendiğinde eksenel yönde CO emisyon seviyesinin yüksek kanat sayısında (11K, 13K ve 17K) daha yüksek olduğu görülmektedir ve CO seviyesi her bir kanat sayısı için ilerleyen mesafelerde 0 ppm seviyesine düşmektedir.

Şekil 7. 42 (e) ve (f) incelendiğinde yüksek kanat sayılarında (11K, 13K ve 17K) O₂ tüketimi ve CO₂ üretimi daha fazla olmaktadır. Diğer bir ifadeyle yüksek kanat sayılarında yakıthava karışımı daha iyi sağlanarak yanma gerçekleşmektedir. Düşük kanat sayılarında karışım iyi sağlanamadığı için ocak ekseninde O₂ miktarları yüksek, ocak eksenindeki CO₂ seviyeleri düşük oranlarda kalmaktadır.



Şekil 7. 42 30° düz kanatlı girdap üreteci için farklı kanat sayılarında (7K, 9K, 11K, 13K, 15K, ve 17K) (a) (T), (b) NOx, (c) CH₄, (d) CO, (e) O₂ ve (f) CO₂ değişimleri

1085 kW ısıl yükünde, 2.10 m ocak uzunluğunda, 0.58 m ocak çapındaki kazanda doğal gazın farklı kanat sayılarında (7, 9, 11, 13, 15, 17) tasarlanan girdap üreteçli brülörlerin kullanılmasıyla yakılması incelenmiş olup kazan içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları karşılaştırmalı olarak Şekil 7. 43'de görülmektedir. Kazanlar incelendiğinde kanat sayısının 7'den 17'a artması alev çapını arttırdığı gibi alev boyunu da kısaltmaktadır. Artan kanat sayısıyla kanatlar arası boşluk azalmakta girdap üreteciyle birlikte brülör başlık kısmında bulunan alev tutucu disk, yakıt nozulları brülör girişinde hava basıncını düşürerek, alevin kazan karşı basıncını yenmesini güçleştirmektedir. Ayrıca yüksek kanat sayılı girdap üreteçlerinin kullanılması alev boyunu kısaltması nedeniyle ocak karşı duvar bölgesinde üniform olmayan sıcaklık dağılımlarının oluşmasına neden olur (Şekil 7. 43 (d), (e) ve (f)).

Farklı kanat sayılı 6 girdap üretecinin kullanılması durumunda kazan içerisinde oluşan NOx emisyonları değişimi Şekil 7. 44 'de görülmektedir. Şekiller incelendiğinde 7 kanatlı girdap üretecinin kullanılması durumunda kazanlarda oluşan NOx emisyonu seviyesi en yüksek değeri almaktadır. 9 kanatlı girdap üretecinin kullanılması durumunda NOx seviyesi 7 kanatlı girdap üretecine göre bir miktar düşmektedir. Şekil 7. 44 (c), (d), (e) ve (f) incelendiklerinde aynı skala ölçeğinde 11 kanatlı girdap üretecinde en düşük NOx emisyon seviyesinin oluştuğu görülmektedir. Diğer kanat sayılarında (13, 15, 17) NOx seviyeleri birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 7. 43 30° düz kanatlı girdap üreteci için farklı kanat sayılarında (7K, 9K, 11K, 13K, 15K, ve 17K) kazan eksen düzlemi üzerinde sıcaklık dağılımlarının değişimi



Şekil 7. 44 30° düz kanatlı girdap üreteci için farklı kanat sayılarında (7K, 9K, 11K, 13K, 15K, ve 17K) kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan NOx emisyonlarının değişimi

7.5.2 Girdap Üreteci Kanat Açısı Değişimi

Girdap üreteçlerinde kanat açısının en önemli parametrelerden biri olduğu bilinmektedir. Kanat sayısı yanında kanat açısının da doğal gaz yanması ve emisyonları üzerindeki etkisini ortaya çıkarabilmek için 7K, 9K, 11K, 13K, 15K ve 17K girdap

üreteçlerinde 15°, 20°, 25° ve 30° derecelik kanat açılı tasarımlar yapılmış ve emisyon sonuçları HAD ile incelenmiştir. Tasarımı ve analizi yapılmış girdap üreteçlerinden bazıları Şekil 7. 45'te görülmektedir. Farklı kanat sayısında benzer eğilimler dolayısıyla sadece 7K, 11K ve 17K ile ilgili görsel simülasyon sonuçları verilmiş fakat NOx değişimleri tüm kanatlar için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.









15°

(b) 11K



(c) 17K

Şekil 7. 45 Tasarımları ve simülasyonu yapılmış 15°, 20°, 25° ve 30° 'de (a) 7K (b) 11K, (c) 17K düz kanatlı eksenel girdap üreteçleri

7.5.2.1 7 Kanatlı Girdap Üretecinde Kanat Açılarının Etkisi

7 kanatlı (7K) girdap üretecinde farklı kanat açılarının kullanılmasıyla ocak eksen sıcaklığı değişimi Şekil 7. 46 (a) 'da görülmektedir. Şekil incelendiğinde ocak girişinde (brülör ağzında) z< 0.3 m aralığında yanma gerçekleşmediği için sabit sıcaklık söz konusu fakat z>0.3 m mesafesinden sonra sıcaklıklar kanat açısına bağlı olarak farklı eğilimler göstererek yükselmektedir. Bu sıcaklık yükselmesinin de iki kademede gerçekleştiği görülmektedir. Birinci kademede giriş havası etkinliği dolayısıyla sıcaklık artışı sınırlıyken ikinci kademede giriş havasının etkinliğinin azalmasıyla yanmanın ocak eksenine nüfus etmesiyle sıcaklığın ani olarak yükselmesi ile açıklanabilir. Kazanın büyük bölümünde artan kanat açısıyla ocak eksenindeki alev sıcaklığı yükselmektedir. Fakat ocak ekseni son kısmında (z>1.6 m) artan kanat açısıyla daha düşük ocak eksen sıcaklıkları elde edilmiştir.

Artan kanat açısıyla ocak eksenindeki NOx emisyonu değişimi Şekil 7. 46 (b)'de görüldüğü gibidir. Yapılan incelemede z=1.4 m mesafesine kadar kanat açısının etkisi önemsiz iken, bu noktadan sonra yani giriş havasının etkinliğini kaybettiği noktadan itibaren artan kanat açısıyla NOx emisyonu seviyesi kayda değer bir şekilde azalmaktadır. Bu durumun nedenlerinden biri büyük kanat açılarında hava ve yakıtın girişten itibaren daha iyi karıştırılabilmesi böylece yanma bölgesinde oksijen ve yakıt fazlalığını dağıtması ve yanmanın başlamasıyla alevin daha büyük çapta gerçekleşmesiyle hidrokarbonların tükenme seviyesine gelmesidir. Bu durum büyük kanat açılı girdap üreteçlerinde ocağın ilerleyen bölümlerinde hidrokarbon miktarının küçük kanat açılı girdap üreteçlerine oranla daha az olmasını sağlamakta böylelikle NOx oluşumunu sınırlandırmaktadır. Diğer yandan orta derece sıcaklıklarda ısıl NO ile birlikte ani NO'nun etkili olduğu Şekil 7. 46(c) ve (d)'de görülmektedir. Küçük kanat açılarında ısıl NO ve ani NO'nun daha etkili olduğu görülmektedir. Ani NO 'nun oluşumuna neden olan yanmamış hidrokarbon (CH₄) seviyeleri Şekil 7. 46(e)'den görülebilmektedir. Şekil incelendiğinde, küçük kanat açılarında yanmamış hidrokarbon seviyesi ocak ekseni sağına doğru ötelenmekte bu durum ani NO oluşumunu küçük kanat açıları için artırmıştır. Bu durum ocak ekseni üzerindeki Şekil 7. 46(f) ve (g)'de sırasıyla O₂ ve CO₂ kütle konsantrasyonlarından da anlaşılabilmektedir. Artan kanat açısıyla hidrokarbon ve O₂ tüketimi artarken, yanma sonu oluşan CO₂ miktarı da artmaktadır. Kanat açısının artmasıyla ocak ekseni üzerindeki CO pik değeri artarken (Şekil 7. 46 (h), ocak sonuna doğru miktarı tamamen CO_2 dönüşmektedir.





Şekil 7. 46 7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin (a)
(T), (b) NOx, (c) ısıl NO, (d) ani NO, (e)CH₄, (f)O₂, (g) CO₂ ve (h)CO üzerindeki etkisi

2.10 m ocak uzunluğunda ve 0.58 m ocak çapındaki kazanda doğal gaz 7 kanatlı 15°,20°, 25° ve 30° kanat açılarına sahip girdap üreteçli 4 brülörün kullanılması ile yakılması sırasında kazan içerisinde oluşan sıcaklık dağılımlarının karşılaştırmalı olarak Şekil 7. 47'de görülmektedir. 7 kanatlı tasarlanan girdap üreteçlerinde aynı kanat boşluklarına sahip 4 farklı kanat açısında yapılan simülasyonlarda 15° kanat açılı girdap üretecinde ocak eksen bölgesinde hava daha yoğun miktarda bulunmakta, alevler eksen etrafında oluşmaktadır. Artan kanat açısıyla kanatların yönlendirmesi sonucu alev çapı büyürken alev uzunluğu da nispeten kısalmaktadır. Girdap üreteci kanat açısının artmasıyla eksen çizgisi üzerinde hava yoğunluğu azalmaktadır. Düşük kanat açılarında kazan içerisinde üniforma yakın bir sıcaklık dağılımı gerçekleşirken, artan kanat açısıyla alev boyunun kısalması etkisiyle üniformluk git gide bozulmaktadır. Öte yandan kanat açısının değişimiyle kazan içinde oluşan NOx emisyon dağılımları Şekil 7. 48'de görülmektedir. Yapılan inceleme de kanat açısının artması kazanda NOx seviyesini kademeli olarak düşürmektedir. Yapılan inceleme de kazan ekseninde oluşan NOx seviyeleri her bir kanat açısında kayda değer bir şekilde azalmış olduğu görülmektedir. Ayrıca farklı kanat açılı girdap üreteçlerinin kullanılmasıyla kazan içinde oluşan CO seviyeleri Şekil 7. 49'da görülmektedir. Yapılan incelemede kanat açısı yönlendirmesine bağlı olarak ocak ekseni etrafında CO seviyeleri oluşmuş ve belli bir mesafeden sonra oluşan CO emisyonları oksijen varlığında CO₂ 'ye dönüşmüşlerdir.



Şekil 7. 47 7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzlemi üzerindeki sıcaklık değişimlerine etkisi



Şekil 7. 48 7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzleminde oluşan NOx emisyonlarına etkisi



Şekil 7. 49 7 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan CO emisyonlarına etkisi

7.5.2.2 11 Kanatlı Girdap Üretecinde Kanat Açılarının Etkisi

11 kanatlı girdap üretecinin farklı kanat açılarında simülasyon sonuçları Şekil 7. 50'te görülmektedir. Şekil incelendiğinde 11 kanatlı girdap üreteçlerinin yanma davranışları 7 kanatlı girdap üreteçlerine benzerlik gösterdiği, kanat açısı değişimlerinin etkileri de benzer eğilimler gösterdiği ancak önemli farkların da olduğu görülmektedir. İki farklı kanat sayılı girdap üreteçleri ile ilgili farklar şu şekilde sıralanabilir.

- Şekil 7. 46(a) ve Şekil 7. 50(a) incelendiklerinde 11 kanatlı girdap üretecinde ocak ekseninde oluşan sıcaklıkların 7 kanatlı girdap üretecine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.
- Şekil 7. 46(b) ve şekil 7.50(b) incelendiğinde 11 kanatlı girdap üretecinde ocak ekseninde oluşan NOx seviyesinin 7 kanatlı girdap üretecine göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni 7 kanatlı girdap üreteci için hem ısıl NO hem de ani NO miktarının sadece küçük açılarda değil aynı zamanda büyük kanat açılarında da çok yüksek olmasıdır (Şekil 7. 46(c),(d) ve Şekil 7. 50 (c),(d)).
- 7 kanatlı girdap üretecinde NO miktarının 11 kanatlıya göre yüksek olmasının temel nedenleri arasında karışımın iyi sağlanamaması, oksijence ve yanmamış
hidrokarbon miktarınca (Şekil 7. 46(e) ve Şekil 7. 50(e)) zengin bölgelerin ısıl NO ve ani NO seviyelerinde artış meydana getirmesidir.

- 11 kanatlı girdap üretecinde tüm kanat açıları için ocak ekseni üzerinde oluşan O₂ miktarı 7 kanatlı girdap üretecine göre düşük, CO₂ miktarı ise yüksektir (Şekil 7. 46(f), (g) ve Şekil 7. 50(f), (g)). Bu durum 7 kanatlı girdap üreteçlerinde yanmamış hidrokarbonların varlığını ortaya koymaktadır.
- 11 kanatlı girdap üreteçlerinde daha fazla yakıt hava reaksiyona girmesi sonucu, O₂ eksiliğinde oluşan CO miktarı da benzer şekilde daha fazla çıkmıştır. 7 kanatlı girdap üreteçlerinde daha düşük CO oluşması bu kanat sayısında tam yanma seviyesine daha çok yaklaşmış olduğunu göstermez. Böyle bir durumun gerçekleşmesi için aynı ısıl yükte 7 kanatlı girdap üreteçleri için daha yüksek CO₂ seviyeleri (kütle kesri değerleri) oluşması beklenirdi.





Şekil 7. 50 11 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin (a) (T), (b) NOx, (c) CO₂, (d) CO, (e) O₂, (f) CH₄, (g) ısıl NO ve (h) ani NO üzerindeki etkisi

1085 kW ısıl yükündeki 11 kanatlı 15°,20°, 25° ve 30° kanat açılarında tasarlanan girdap üreteçli brülörler ile 2.10 m ocak uzunluğunda, 0.58 m ocak çapındaki kazanda doğal gaz yakılması sırasında kazan içerisinde oluşan sıcaklık dağılımlarının karşılaştırmalı olarak Şekil 7. 51'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde kanat açısının artmasıyla alev çapının arttığı görülmekte, ocak ekseni üzerindeki sıcaklık seviyesinin arttığı görülmekte ve ocak son bölümünde üniform ısı dağılımı bozulmaktadır.

Kazan içerisinde oluşan NOx emisyonlarının 4 farklı kanat açısıyla değişimi Şekil 7. 52 'de görülmektedir. Yapılan incelemede kanat açısının artmasıyla NOx emisyon değerleri düşmekte ve en büyük kanat açısı olan 30° de NOx seviyesi önemli ölçüde düştüğü

görülmektedir. Bir diğer önemli emisyonlardan olan CO seviyeleri ise Şekil 7. 53'te gösterilmektedir. Yapılan incelemede CO miktarının artan kanat açısıyla azaldığı görülmektedir. Bu durum büyük kanat açılı girdap üreteçlerinin kullanılmasıyla yakıt ve oksitleyici karışımının daha iyi sağlanmasının bir sonucudur.



Şekil 7. 51 11 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzleminde sıcaklık dağılımlarına etkisi



Şekil 7. 52 11 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzleminde oluşan NOx emisyonlarına etkisi



Şekil 7. 53 11 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan CO emisyonlarına etkisi

7.5.2.3 17 Kanatlı Girdap Üretecinde Kanat Açılarının Etkisi

17 kanatlı girdap üretecinde kanat açılarının değiştirilmesi ile ocak eksen sıcaklık değişimi ve yanma sonu emisyonların değişimi Şekil 7. 54 gösterilmiştir. Yapılan incelemede 17 kanatlı girdap üreteçleriyle elde edilen sonuçların 11 kanatlı girdap üreteçleriyle elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu ve kanat açıların değişmesiyle her iki girdap üretecinde aynı eğilimler gözlenmektedir. Her iki kanat için benzerlik ve farklılıklar şunlardır:

- 17 kanatlı girdap üretecinde farklı açıların eğilimleri tıpkı 11 kanatlı girdap üreteçleri gibidir. Her iki girdap üretecinde en yüksek ocak eksen sıcaklığı (Şekil 7. 54(a) ve Şekil 7. 50(a)) 30° kanat açısı için elde edilmişken, en düşük ocak sıcaklığı 15° kanat açısı için elde edilmiştir. Öte yandan 17 kanatlı girdap üreteçlerinin maksimum ocak sıcaklıkları küçük bir farkla 11 kanatlı girdap üreteçleri ocak sıcaklarından yüksektir.
- 17 kanatlı girdap üretecinde kanat açılarının değişimiyle ocak giriş bölgesinden itibaren 0.25 < z < 1.3 m aralığında NOx değerleri arasındaki farklar, 11 kanatlı girdap üreteçleri arasındaki farklardan daha büyüktür. Her iki kanat için Şekil 7. 54 (b) ve Şekil 7. 50(b) incelendiğinde en yüksek NOx emisyonu 15°'lik kanat açısında elde edilmekteyken, en düşük NOx emisyonu 30° kanat açısında elde edilmektedir. 17 kanatlı girdap üreteçlerinde elde edilen NOx değerleri 11 kanatlı girdap üreteçlerinden elde edilen NOx değerlerinden bir miktar daha yüksektir.
- Şekil 7. 54(c) ve Şekil 7. 50(c)'den de görüldüğü üzere ocak ekseni üzerinde ısıl NO seviyeleri 17 ve 11 kanatlı girdap üreteçlerinde birbirine yakın değerler almakta, artan kanat açısıyla ısıl NO değerinin düştüğü görülmektedir. Ayrıca her iki kanat sayısında da ısıl NO değerlerinin ocağın 1.2 m<z<1.5 m aralığında oluştukları ve artan kanat açısıyla ısıl NO oluşumları sola kaydığı görülmektedir.
- Şekil 7. 54(d) ve Şekil 7. 50(d)'den de görüldüğü üzere ocak ekseni üzerinde ani NO seviyeleri 17 ve 11 kanatlı girdap üreteçlerinde birbirine benzer eğilimler sergilemekte, artan kanat açısıyla ani NO değerinin düştüğü görülmektedir. Ani NO değerlerinin de tıpkı ısıl NO değerleri gibi ocağın 1.2 m<z<1.5 m mesafeleri arasında oluştukları görülmektedir.

- Şekil 7. 54(e) ve Şekil 7. 50(e)'den görüleceği üzere 17 kanatlı girdap üreteçlerinde ocak ekseni üzerinde bulunan CH₄ seviyesi 11 kanatlı girdap üreteçlerinden daha düşüktür. Bu durum yanmamış hidrokarbon seviyesinin 17 kanatlı girdap üreteçlerinde daha fazla olduğu anlamına gelir. Bu durum kazan genelinde NOx emisyonu seviyesine etki etmektedir. Her Bu durum CO₂ ve O₂ kütle kesri seviyelerinin birbirine yakın olmaları dolayısıyla (Şekil 7. 54(d), (e) ve Şekil 7. 50(d),(e)) çok güç fark edilebilmektedir.
- Şekil 7. 54(f) ve Şekil 7. 50(f)'de her iki kanat sayısında kanat açılarına bağlı olarak ocak eksen üzerindeki O₂ kütle kesri değerleri görülmektedir. Yapılan incelemede O₂ kütle kesri değerleri iki kanat içinde benzer eğilim ve değerleri almakta, aynı konum için artan kanat açısıyla eksen üzerindeki seviyeleri azalmaktadır.
- Şekil 7. 54(g) ve Şekil 7. 50(g)'de 17 ve 11 kanatlı girdap üreteçlerinde ocak ekseni üzerindeki yanma sonu ürünü olan CO₂ oluşumu ve seviyeleri görülmektedir. Şekiller incelendiğinde her iki kanat için CO₂ seviyeleri yakın çıkmaktadır. Kanat eğilimleri de genellikte aynı eğilimi göstermektedir. Her iki kanat sayısında kanat açılarının arttırılmasıyla yanma ürünü olan CO₂ seviyesinde artma meydana gelmektedir.
- Şekil 7. 54(h) ve Şekil 7. 50(h)'den de görüldüğü gibi 17 kanatlı girdap üreteçlerinde ocak ekseni üzerinde oluşan CO seviyesi 11 kanatlı girdap üreteçlerinden daha düşüktür. Bu durum 17 kanatlı girdap üreteçlerinde daha az hidrokarbonun reaksiyona katıldığını ifade etmektedir. Öte yandan kanat açılarının eğilimleri benzerlik göstermekte, genellikle artan kanat açısıyla oluşan CO seviyesi artmaktadır.





Şekil 7. 54 17 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin (a) (T), (b) NOx, (c) CO₂, (d) CO, (e) O₂, (f) CH₄, (g) ısıl NO ve (h) ani NO üzerindeki etkisi

1085 kW ısıl yükündeki 17 kanatlı 15°,20°, 25° ve 30° kanat açılarıyla tasarlanan girdap üreteçli brülörler ile 2.10 m ocak uzunluğunda, 0.58 m ocak çapındaki kazanda doğal gaz yakılması sırasında kazan içerisinde oluşan sıcaklık dağılımlarının Şekil 7. 55'te gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde tıpkı 7 ve 11 kanatlı girdap üreteçlerinde olduğu gibi artan kanat açısıyla alev çapı büyümekte, alev uzunluğu küçük bir miktar azalmakta, ocak ekseni üzerindeki sıcaklık seviyesi artmakta, ocak sonu üniform olmayan sıcaklık dağılımları meydana gelmektedir. Diğer yandan 17 kanatlı girdap üretecinde kanat açısının artmasıyla NOx seviyeleri (Şekil 7. 56) diğer kanat sayılarında (7, 11) olduğu gibi azalmaktadır. Yapılan incelemede oluşan NOx değerlerinin ocak ekseni dışındaki bölgelerde oluştuğu görülmekte, kanat açısının artmasıyla da bu gölgelerde oluşan NOx miktarının kademeli olarak düştüğü görülmektedir. Öte yandan Şekil 7.57 'den de görüleceği üzere CO emisyon değerleri artan kanat açısıyla alev çapının artması ve alev uzunluğunun kısalması nedeniyle daha kısa mesafede oluştukları görülmektedir.



Şekil 7. 55 17 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzlemi üzerindeki sıcaklık değişimlerine etkisi



Şekil 7. 56 17 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan NOx emisyonlarına etkisi



Şekil 7. 57 17 kanatlı girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin kazan eksen düzlemi üzerinde oluşan CO emisyonlarına etkisi

7.5.2.4 7, 9, 11, 13, 15 ve 17 Kanat Sayılı ve 15°, 20°, 25° ve 30° Kanat Açılı Girdap Üreteçlerinin NOx Oluşumuna Etkisi

HAD yöntemi ile 7 kanatlı (7K), 9 kanatlı (9K), 11 kanatlı (11K), 13 kanatlı (13K), 15 kanatlı (15K) ve 17 kanatlı (17K) girdap üreteçleri ve her birinin 15°, 20°, 25° ve 30° kanat açılarındaki tasarımları ile oluşturulan brülör-kazan sisteminde (1085 kW, L= 2.10 m, D=0.58 m ve λ =1.20 çalışma şartlarında) doğal gaz yanması sonucunda kazan atık gazındaki NOx emisyon sonuçları Şekil 7. 58'de karşılaştırılmıştır.

Şekil incelendiğinde 15°'de en yüksek NOx emisyonu 7 ve 9 kanatlı girdap üreteçlerinin kullanılmasıyla oluştuğu görülmektedir. 11, 13 ve 15 kanatlı girdap üreteçlerinin brülörde kullanılması ile yaklaşık NOx değerleri (≅ 47 ppm) elde edilmektedir.

Kanat açısının 15°'den 20°'ye artması tüm kanat sayılarında NOx emisyonun düşmesine neden olmaktadır. 20° kanat açısında en büyük NOx değeri 7 kanatlı (\cong 53 ppm) girdap üreteciyle oluşurken, en düşük NOx değeri 11 kanatlı (\cong 33 ppm) girdap üretecinin

kullanılmasıyla elde edilir. Bu arada 13, 15 ve 17 kanatlı girdap üreteçleri benzer NOx sonuçları (37 ppm) vermektedir.

Kanat açısının 20°'den 25°'ye artması da tüm girdap üreteçlerinde NOx emisyon seviyesini düşürmektedir. Kanat açısının 25° olması durumunda en düşük emisyonu veren girdap üretecinin 11 kanatlı (≅ 25.5 ppm) olduğu, en yüksek emisyonu verenin de 7 kanatlı (≅ 45.24 ppm) olduğu görülmektedir. 25° kanat açısında 13, 15 ve 17 kanatlı girdap üretecileri 11K girdap üretecine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Kanat açısının 25° 'den 30° 'ye artması da tüm girdap üreteçlerinde NOx emisyon seviyesini düşürmektedir. Şekilden görüleceği üzere 30° kanat açılı girdap üreteçlerinin kullanılmasıyla, NOx emisyonu her bir kanat sayısı için kayda değer bir şekilde düşmüştür. 7 kanat için NOx seviyesi 37. 50 ppm, 9 kanat için 31.74 ppm, 11 kanat için 20.80 ppm, 13 kanatlı için 25.07 ppm, 15 kanatlı için 24.61 ppm ve 17 kanatlı girdap üreteci için 23.21 ppm değerine düşmüştür. Bu sonuçlar neticesinde girdap üreteci kanat açısının artması NOx emisyonlarını düşürdüğü görülmekte, kanat sayısının artması da düşük kanat sayılarında NOx seviyesini düşürürken, büyük kanat sayılarında ise farklılık gösterebilmektedir.

Yakıt ve doğal gaz karışımını en iyi sağlayan, bu nedenle ani NO oluşması için gerekli hidrokarbon seviyesini minimize eden girdap üretecinin 11 kanatlı olduğu ve bu 11 kanatlı girdap üretecinin 15°, 20°, 25° ve 30° kanat açılarında kullanılmasıyla NOx emisyonlarının en düşük seviyelere düştüğü görülmektedir. Öte yandan 13, 15 ve 17 kanatlı girdap üreteçlerinin kullanılmasıyla oluşan NOx seviyelerinin 11 kanatlı girdap üreteci emisyon sonuçlarına yakın olduğu, 7 ve 9 kanatlı girdap üreteçlerinin emisyon sonuçları ise belirgin bir şekilde farklı olduğu anlaşılmaktadır.

171



Şekil 7. 58 Farklı kanat sayısında (7K, 9K, 11K, 13K, 15K ve 17K) girdap üretecinde kanat açısı (15°,20°, 25° ve 30°) değişiminin NOx emisyonu üzerindeki etkisi

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, sanayi tipi bir brülör ve kazan sisteminde deneysel olarak farklı brülör ısıl yüklerinde, farklı hava fazlalık katsayılarında ve farklı kazan boylarında testler yapılıp yanma sonu gaz emisyonları incelenip sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçlar brülör-kazan sisteminin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) modelini oluşturmak için kullanılmıştır. HAD modeli literatürden elde edilmiş bilgiler ışığında ve deneysel çalışma sonucunda elde edilmiş sınır şartları yardımıyla oluşturulmuştur. Oluşturulan sayısal model ile ANSYS FLUENT yazılımında kullanılan beş farklı yanma modeli ve dört farklı türbülans modelinin doğal gaz yanması durumu incelenmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılıp, en uygun yanma modeli ve türbülans modeli belirlenmiştir. Ayrıca HAD yöntemi ile tüm deneysel testler (farklı ısıl yükleri, farklı hava fazlalık katsayıları, farklı kazan boyları) gerçekleştirilmiş, her iki yöntemde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu parametrelere ilave olarak aynı brülör-kazan sisteminde 1085 kW sabit ısıl yükünde doğal gaz, metan, doğal gaza ısıl yükçe %25, %50 ve %75 oranlarında doğal gazın hidrojenle zenginleştirilmesi ve saf hidrojenin yakılarak farklı yakıtların yanma karakteristiği incelenmiştir. Son olarak brülör üzerinde bulunan girdap üretecine alternatif tasarlanan girdap üreteci ile yanma emisyonları düşürülmeye çalışılmış bu amaçla girdap üreteci kanat sayısı ve kanat açısı parametrik olarak incelenip en uygun kanat sayısı ve kanat açısı veya aralıkları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada öne çıkan sonuçlar şu şekildedir:

• Doğal gaz yanmasında oluşan en önemli egzoz emisyonları CO₂, CO, NOx ve CH₄ emisyonlarıdır. Yapılan deneysel ve HAD analizlerinde genellikle λ = 1.20 kullanıldığı için baca gazında CO, CH₄ seviyesi düşük çıkmakta, karbon kaynaklı yakıtların yanma sonu ürünü olan CO₂ seviyesi ise beklenen aralık değerlerindedir. Ayrıca yanma ürünlerinden olup yanmanın gerçekleşme şekli (eksik yanma, tam yanma, fazla hava ile yanma veya zengin karışım, fakir karışım vb.) hakkında bilgiler veren O₂ ise zararsız bir gazdır. Asit yağmurlarına neden olan NOx emisyonları bu çalışmada üzerinde durulan ve brülörde kontrol altına alınması hedeflenen zararlı bir emisyondur.

- Brülör-kazan sisteminde yanma gerçekleşmesi durumunda akış denklemleri, enerji denklemleri, momentum denklemleri, kimyasal tepkime denklemleri ve radyasyon denklemi çözüldüğü için yanma analizi yoğun işlemci gücü gerektirmektedir. Bu tür çözümlemeler için model üzerinde yapılabilecek bir takım düzeltmeler ve bazı kabuller sonucunda brülör-kazan sistemi gibi tam geometrik modelleme yerine 1/4 oranında yani periyodik olarak modellenebilmekte, böylece kullanılan sayısal ağ sayısı 1/4'e düşmektedir. Böylece yoğun yanma analizleri için daha az işlemci gücü ile analizler yapılabilmekte ve daha kısa sürede sonuçlar elde edilmektedir. Bu çalışmada periyodik modelleme ile elde edilen sonuçlarının tam model sonuçları ile büyük bir uyum sağladığı görülmüştür.
- 1085 kW brülör ısıl yükünde gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen NOx emisyon değerlerine en uyumlu türbülans modelin Realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli ile olduğu görülmüştür. Bunun yanında Reynolds Stress Modeli (RSM) ile elde edilen sonuçların da deneysel sonuçlara yakın olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni olarak çalışılan brülörün düşük girdap sayısına sahip olması ve Realizable $k - \varepsilon$ modelinin de bu tür akışlar için daha uygun olduğudur. Öte yandan yüksek girdaplı akışlarda daha uygun olduğu ifade edilen 7 denklemli RSM modelinin de düşük girdaplı akışlar için de yaklaşık sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylece her iki sonucun da literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.
- Standard k ε modeli 2 denklemli en genel türbülans modeli olmasına rağmen girdap akışları ve dönümlü akışlarda kullanılmasının doğru bir yaklaşım olmayacağı HAD analiz sonuçlarının deneysel sonuçlardan ciddi oranda farklı olmasıyla ortaya

çıkmıştır. Bu girdaplı ve dönümlü akışlarda geri dönüşleri tespit edememesinden kaynaklanmaktadır.

- 1085 kW brülör ısıl yükünde gerçekleştirilen deneysel ve HAD analiz çalışmalarına göre NOx emisyon değerlerini en iyi tahmin eden modellerin Partial-Premix Combustion (PPC) ve Eddy Dissipation oldukları görülmüştür. PPC modelinin kısmi karışımlı yanma uygulamalarına özel olarak geliştirilmiş olması öte yandan kullanılan brülör yakıt nozullarının da yanmadan önce hava-yakıt karışımını sağlaması dolayısıyla kısmi karışımlı yanma modunun geçerli olması PPC ile deneysel sonuçların birbiriyle uyumlu olmasının temel nedenidir. Diğer yandan Eddy Dissipation (ED) modelinin de hızlı yanabilen gaz yakıtların yanmasında önerilen bir yöntem olması, doğal gazın da hızlı yanabilen bir gaz yakıtı olması dolayısıyla bu modelin de uygun sonuçlar vermesinin nedenlerindendir. Sistemde kullanılan brülörün kısmi karışım sağlaması nedeniyle non-premix (ön karışımsız) yanma modeli uygun görülmediği gibi HAD sonuçları da farklılık göstermektedir. FR/ED ve EDC modelleri ile yapılan HAD analiz sonuçları deneysel sonuçlardan çok yüksek tahminlerde bulunmuşlardır. Bu durumun gerçekleşme nedeni iki denklemli doğal gaz yanma reaksiyonu modelinde yanma sırasında ara türlerin (radikallerin) oluşumunu ihmal etmesi ve mevcut türlerinde özgül ısılarını yüksek değer alması sonucu alev sıcaklığının yüksek çıkmasıdır. Yüksek alev sıcaklıkları da her iki model için yüksek NOx oluşmasına neden olmuştur. Bu iki modelin verimli sonuçlar verebilmesi için kullanılan yakıtın detaylı kimyasal mekanizma reaksiyonları tanımlanmalı ve kullanılmalıdır.
- Deneysel ve HAD analizlerinde kullanılan brülörün farklı ısıl yükler altında çalışması yanmaya ve yanma emisyonlarına etki ettiği görülmüştür. Düşük ısıl yüklerinde kazan içerisinde alev boyu kısalmakta ve alev çapı küçülmektedir. Artan ısıl yükle birlikte kazana giren enerjinin artması sonucu alev formu (alev uzunluğu, alev çapı) büyümektedir. Çalışma şartlarında kazanın verimli çalışabilmesi yanında kazan malzemesinin zarar görmemesi için alev çapı ve alev uzunluğunun dolayısıyla kapasitenin iyi ayarlanması gerekir.

- Brülörün farklı ısıl yükler altında çalışması durumunda % CO₂ ve % O₂ seviyeleri normal değerlerde seyrederken, düşük ısıl yükten (459 kW) ve yüksek ısıl yüke (1200 kW) geçişte CO seviyelerinde maksimum 8 ppm oynamaktadır. Öte yandan NOx seviyesindeki en büyük sapma miktarı da 10 ppm olarak belirlenmiştir bu değer en yüksek ve en düşük emisyon seviyelerine göre % 15-18 sapma demektir.
- Düşük ısıl yüklerde kazan içerisinde düşük sıcaklıkların oluştuğu, yüksek ısıl yüklerinde ise yüksek sıcaklıkların oluştuğu HAD analizlerinde görülmüştür. Bu sonuçlardan yüksek ısıl yüklerde daha yüksek NOx oluşur beklentisi oluşsa da yüksek ısıl yüklerde hava-yakıt hızının yüksek olması girdap üreteci yardımıyla karışımın daha iyi sağlanmasına neden olduğu bu durumun da NOx üzerinde etkili olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca artan ısıl yükle birlikte hava-yakıt hızlarının artması alev hızının da artmasına neden olmakta, bu durum ocak içerisinde oluşan türlerin de ocağı daha hızlı terk etmesi dolayısıyla yüksek sıcaklıkta kalma süresinin azalması nedeniyle oluşan NOx üzerinde etkili olduğu değerlendirilmektedir.
- Hava fazlalık katsayının 1.05-1.50 aralığında değiştirilmesi ile brülör-kazan sisteminde gerçekleştirilen yanma olayı ve emisyonları HAD ile incelendiğinde, λ değerinin 1'e yaklaşmasıyla yanmanın stokiyometrik yanmaya yaklaştığı bu nedenle kazan içerisinde alev sıcaklıklarının (T), NOx, CO, CO₂ ve H₂O değerlerinin pik değerine ulaştığı O₂ emisyonun da tam tersi azaldığı görülmüştür. Ayrıca alev formunun girişten itibaren kalınlaştığı ve alev çapının ocak çapına dayandığı görülmektedir. Öte yandan artan hava fazlalık katsayısı ile alev etki alanın küçüldüğü, alev çapının büzüştüğü ve küçüldüğü, kazan çıkışına doğru alev sıcaklığının kayda değer bir oranda düştüğü görülmektedir. Kazan çıkışında ölçülen emisyon değerleri incelendiğinde hava fazlalık değerinin stokyometrik değere (1) yaklasmasıyla NOx, CO₂ artarken, O₂ azalmakta, CO ise λ =1.05 iken maksimum 48 ppm, λ =1.20, 1.38, 1.50 değerlerinde ise 1 ppm seviyesinde ölçülmüştür. Burada λ =1.05 değeriyle yapılan yanmada O₂ yetersizliğinden dolayı eksik yanmanın meydana geldiği buna bağlı olarak CO seviyesinin en yüksek değere eriştiği deneysel olarak ölçüldüğü gibi HAD analizinde ocak içerisinde oluşan CO seviyesinden anlaşılmıştır.

- Kazan ocak uzunluğunun yanma ve emisyonları üzerindeki etkisi deneysel olarak incelendiğinde ocak uzunluğunun standart değerinden (2.1 m) fazla arttırılması yanma ve emisyonları üzerinde çok belirgin bir fark oluşturmadığı görülmekte sadece NOx emisyonu üzerinde % 9 civarında bir fark yarattığı görülmüştür. Fakat bu artışın ocak uzunluğunu daha fazla artmasıyla artmadığı görülmüştür. Ayrıca aynı koşullarda yapılan HAD analizlerinde, artan ocak uzunluğu ile NOx seviyesi de az da olsa artmaktadır. Bu artışın artan ocak uzunluğu ile yanma ürünlerinin ocak içeriside oyalanma süresini arttırdığı buna bağlı olarak NOx seviyesinde bir miktar artışla sonuçlandığı değerlendirilmektedir. Öte yandan kazan ocak uzunluğu standart değerinin çok altına düşürülmesi durumunda ocak içerisinde sıcaklığın daha yüksek değerlerde seyretmesi nedeniyle yanma emisyonlarının sıcaklığa bağlı olarak çok arttığı görülmüştür.
- Kazan ocak çapının kazan seçiminde önemli bir parametre olduğu bilinen bir gerçektir. Kazan ocak çapının değiştirilmesiyle yanma ve emisyonları da etkilenmektedir. Olması gereken standart kazan ocak çapından daha küçük çaplarda çalışılması durumunda ocağın içinde alevin ileri doğru hareketini ve yanma gazlarının da alev üzerinden geri gelip duman borularına yönelmesini sağlayacak ölçüde yeterli ocak çapına ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan CFD çalışmalarında 1085 kW brülör ısıl gücünde ocak çapının 0.53 m ve daha küçük çaplara düşürülmesiyle yanmanın gerçekleşmediği görülmektedir. Öte yandan HAD simülasyonlarından elde edilen sonuçlara göre aynı kapasite ve aynı şartlarda kazan ocak çapının artırılmasıyla alev çapının küçüldüğü alev boyunun ise uzadığı görülmektedir. Ayrıca ocak çapının arttırılmasıyla ocak içerisinde ve kazan çıkışında ölçülen NOx emisyon değerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni uzayan alevde yanma ürünlerinin sıcaklığa maruz kalma süresinin daha fazla olması ve uzayan alevle birlikte ocak sıcaklığının daha yüksek değerde olmasıdır.
- Doğal gaz ile metan gazlarının yanması karşılaştırıldığında doğal gaz yanmasında oluşan alev sıcaklığının daha yüksek olduğu bu sonuca bağlı olarak artan alev sıcaklığıyla doğal gaz yanmasında oluşan NOx miktarının % 6 daha fazla olduğu görülmüştür.

- Mevcut brülör-kazan sisteminde doğal gaz yerine doğal gaz-hidrojen gazları karışımı alternatif yakıt olarak HAD simülasyonları ile yakılıp incelendiğinde doğal gaza hidrojen eklenmesiyle kazan boyunca alev sıcaklıkları ve yanma emisyonları doğal gaz yanmasına göre değiştiği görülmüştür. Yapılan incelemede artan hidrojen yüzdesiyle alev çapı ve alev boyunun küçük bir oranda arttığı görülmektedir.
- Doğal gaza ısıl yükçe %25, %50 ve %75 hidrojen gazının eklenmesiyle yanma sonu emisyonlarında NOx miktarı sırasıyla %92. 81, %219.72 ve %360 oranlarında artmaktadır.
- Hidrojen yakıtı bileşenlerinde C elementi içermediğinden dolayı doğal gaz-hidrojen gaz karışımları yanmasında CO ve CO₂ emisyonları NOx emisyonlanın aksine düşmektedir.
- Saf hidrojen gazının (%100 H₂) mevcut brülör-kazan sisteminde yakılmasıyla NOx değeri doğal gaza göre %659.30 oranında artmaktayken, CO ve CO₂ değerleri de sıfır seviyesine düşmektedir. CO ve CO₂ değerleri bakımından temiz bir yakıt olduğu görünsede havayla yakılması durumunda oluşan NOx değerleri için aynı şey söylenemez.
- HAD simülasyon sonuçlarına göre ocak ekseninde oluşan ısıl NO miktarı artan H₂ yüzdesiyle arttığı görülürken, ani NO emisyonu değişimi farklılık göstermektedir. %100 doğal gaz ve %75 DG+%25 H₂ gaz karışımları yanmasında ani NO değerleri en yüksek seviyelerde seyrederken bu değerleri ocağın 0.3 m<z< 0.6 m eksen aralığında almaktadır. Öte yandan %50DG+%H₂, %25DG+%75H₂, %100H₂ yanmasında ani NO değerleri nispeten daha düşük olmasına rağmen daha geniş bir aralıkta (0.3 m<z<1.3 m) oluştuğu gözlenmiştir.
- Doğal gaz-hidrojen karışımı yanması yakıt tüketimi üzerinde de bir etkiye sahiptir. Yapılan incelemede doğal gaz hidrojen ile % 25, % 50 ve % 75 oranında zenginleştirilirse, aynı brülör kapasitesi için tüketilen yakıt miktarı % 14.70, % 29.40 ve % 44.11 oranında azalır. Doğal gaz yerine % 100 hidrojen yakıldığında, yakıt miktarı ise % 58.81 oranında azalır.

- Brülörde kullanılan orijinal girdap üreteciyle oluşan alev formu ve oluşan NOx emisyonu dikkate alınarak tasarlanan yeni girdap üreteci farklı kanat sayısı ve farklı açılarda kullanılması durumunda kazan içi alev formuyla birlikte alev sıcaklığı ve oluşan NOx ve CO emisyonları değişmiştir. Yapılan incelemede yeni girdap üreteciyle alev eksen etrafına yayılıp alev çekirdek bölgesi daha düşük sıcaklık değerlerine düşürülmüş, yanma esnasında oluşan NOx ve CO emisyon seviyeleri de daha düzgün bir karışım sayesinde düşürülmüştür.
- Yeni girdap üretecinde kanat sayılarının (7, 9, 11, 13, 15, 17) da alev sıcaklığı üzerinde etkili olduğu görülmüş, düşük kanat sayılarında (7, 9) ocak ekseni üzerinde alev sıcaklıkları minimum iken, 11 ve 17 kanatlı girdap üreteçlerinin kullanılmasıyla eksen üzerindeki alev sıcaklıkları maksimum değerleri almaktadır.
- Yeni girdap üretecinin 11 kanatlı kullanılması durumunda ocak ekseni üzerinde oluşan NOx emisyonu minimum iken 7 kanatlı girdap üretecinin kullanılmasıyla NOx değeri maksimum olmaktadır. 9 kanatlı girdap üreteci de 7 kanatlı girdap üreteci gibi yüksek NOx emisyonuna neden olduğu görülürken, 13, 15 ve 17 kanatlı girdap üreteçlerinin kullanılmasıyla nispeten daha düşük NOx değerlerinin oluştuğu, bu değerlerin de 11 kanatlı girdap üreteci ile oluşan NOx emisyon değerlerine yakın olduğu görülmüştür.
- 11 kanatlı girdap üretecinin kullanılmasıyla kazan atık gazında en düşük NOx emisyonu oluşmasının nedeni, 11 kanatlı girdap üretecinin diğer kanatlara göre karışımı daha iyi sağladığı bu karışımın da alev sonuna doğru yanıp tükenmesi dolayısıyla alev sonunda yanmamış hidrokarbon seviyesininin diğer kanatlara göre daha az olmasıdır. Çünkü yanmamış hidrokarbon radikalleri (O, H, OH) yüksek sıcaklık bölgelerinde havadan gelen N₂ molekülleri ile reaksiyona girdiği ve NO ve NO₂ oluşturduğu bilinmektedir.
- Kanat açısı ve girdap üreteci çapı girdap sayısının belirlenmesinde kullanılan en önemli parametrelerdir. Artan kanat açısı ve girdap üreteci çapı girdap sayısını artırmakta, karışım iyileştirilmekte ve alev kararlılığı sağlanmaktadır. Öte yandan kazanlarda kullanılan brülör yardımıyla oluşan alev formunun ocak içerisini yaklaşık olarak doldurması alevden kazana aktarılan ısının artmasını sağlayacağı için istenen

bir durumdur. Diğer bir hususta, ocakta oluşan alevin ocak cidarlarına ve ocak ön ve arka duvarlarına çok yaklaşmaması istenmekte aksi halde bu durumun kazan malzemesine zarar vereceği ve ömrünü kısaltacağı bilinmektedir. Brülör-kazan yanma sisteminde bu üç durumun sağlanması brülörde kullanılan girdap üretecinin doğru şekilde seçilmesi ile mümkündür.

- Tasarlanan girdap üretecinde 15°, 20°, 25° ve 30° kanat açılarının kullanılmasıyla alev şekli ve yanma emisyonlarının değiştiği açının daha da artırılmasıyla emisyonların aynı eğilimi sürdürdüğü öte yandan kanat açısının artırılmasıyla alev çapının da arttığı fakat alev boyunun da kısaldığı yapılan HAD analizlerinde görülmüştür.
- Yeni tasarlanan girdap üretecinde kanat açısının 30° üzerinde çıkarılması alev çapını ocak cidarlarına yaklaştırması, alev boyunun kısa ve kazan girişinde kalması dolayısıyla kullanılmasının doğru olmayacağı değerlendirilmiştir.
- Girdap üretecinde 15°, 20°, 25° ve 30° kanat açılarıyla yapılan HAD çalışmalarında, artan kanat açısıyla karışımın daha üniform hale geldiği, ani sıcaklık bölgelerinin ortadan kalkmasına neden olduğu bu durumun da ocak içerisinde oluşan NOx ve CO seviyesini indirdiği gibi kazan atık gazlarındaki NOx emisyonlarını da düşürdüğü belirlenmiştir. Fakat yüksek kanat açılı girdap üreteçlerinde kazan son bölümlerinde üniform olmayan sıcaklık dağılımları söz konusu olmaktadır.
- Her bir kanat sayısında (7, 9, 11, 13, 15 ve 17) artan kanat açısıyla baca gazındaki
 NOx emisyon değeri düşmektedir.
- 7 kanatlı girdap üretecinin 15°, 20°, 25° veya 30° kanat açılarında kullanılması diğer kanat sayılarına göre en yüksek NOx emisyon değeri sağlarken, 11 kanatlı girdap üretecinin kullanılması durumunda en düşük NOx emisyonları elde edilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Zhou, H., Yang, Y., Liu, H. ve Hang, Q., (2014). "Numerical Simulation Of The Combustion Characteristics Of A Low NOx Swirl Burner: Influence Of The Primary Air Pipe", Fuel, 130:168–176.
- [2] Kamal, M. M., (2008). "Parametric Study Of Combined Premixed And Non-Premixed Flame Coal Burner", Fuel, 87:1515–1528.
- [3] Adewole, B. Z., Abidakun, O. A. ve Asere, A. A., (2013). "Artificial Neural Network Prediction Of Exhaust Emissions And Flame Temperature In LPG (Liquefied Petroleum Gas) Fueled Low Swirl Burner", Energy 61:606–611.
- [4] Bhoi, P. R. ve Channiwala, S. A., (2009). "Emission Characteristics And Axial Flame Temperature Distribution Of Producer Gas Fired Premixed Burner". Biomass and Bioenergy, 33:469–477.
- [5] Abdelaal, M. M., El-Riedy, M.K. ve El-Nahas, A.M., (2013). "Effect Of Oxygen Enriched Air On Porous Radiant Burner Performance And NO Emissions", Exp. Therm. Fluid Sci, 45:163–168.
- [6] Jing, J., Li, Z., Liu, G., Chen, Z. ve Ren, F., (2010). "Influence of Different Outer Secondary Air Vane Angles on Flow and Combustion Characteristics and NOx Emissions of a New Swirl Coal Burner", Energy&Fuels, 24:346–354.
- [7] Abuelnuor, A.A.A., Wahid, M.A., Saat, A. ve Osman, M., (2014). "Characterization of a Low NO x Flameless Combustion Burner Using Natural Gas", 66:121–125.
- [8] Tamura, M., Watanabe, S., Komaba, K. ve Okazaki, K., (2015). "Combustion Behaviour Of Pulverised Coal In High Temperature Air Condition For Utility Boilers", Applied Thermal Engineering, 75:445-450.
- [9] Sarlej, M., Petr, P., Hajek, J. ve Stehlik, P., (2007). "Computational Support In Experimental Burner Design Optimisation", 27: 2727–2731.
- [10] Cho, E.S., Shin, D., Lu, J., Jong, W. de ve Roekaerts, D.J.E.M., (2013).
 "Configuration Effects Of Natural Gas Fired Multi-Pair Regenerative Burners In A Flameless Oxidation Furnace On Efficiency And Emissions", 107:25–32.
- [11] Zeng, L., Li, Z., Zhao, G., Shen, S. ve Zhang, F., (2011). "Effect of the Vane Angle for Outer Secondary Air on the Flow and Combustion Characteristics and NOx Emissions of the Low-NOx Axial-Swirl Coal Burner", Numerical Heat Transfer, Part A, 59:43–57.
- [12] Li, J., Zhang, X., Yang, W. ve Blasiak, W., (2013). "Effects of Flue Gas Internal

Recirculation on NOx and SOx Emissions in a Co-Firing Boiler", International Journal of Clean Coal and Energy, 2:13–21.

- [13] Tu, Y., Liu, H., Chen, S., Liu, Z., Zhao, H. ve Zheng, C., (2014). "Effects Of Furnace Chamber Shape On The MILD Combustion Of Natural Gas", Applied Thermal Engineering, 76:64-75.
- [14] İlbas, M. ve Yilmaz, I., (2002). "Farklı Isıl Güçlerdeki Kazanlarda Yanma Ve Emisyon Davranışının Araştırılması", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 18:18–27.
- [15] Khanafer, K. ve Aithal, S. M., (2011). "International Journal of Heat and Mass Transfer Fluid-Dynamic And NO x Computation In Swirl Burners", Int. J. Heat Mass Transf., 54:5030–5038.
- [16] Barakat, H. Z., Salem, M. R., Morgan, A. ve Saad, H. E., (2013). "Importance Of The Inlet Air Velocity On The Establishment Of Flameless Combustion In A Laboratory Combustor", Experimental Thermal And Fluid Science, 44:75–81.
- [17] Barakat, H. Z., Salem, M. R., Morgan, A. ve Saad, H. E., (2013). "Study Of Effects Of Burner Configuration And Jet Dynamics On Characteristics Of Inversed Diffusion Flames", Journal of Mechanical Engineering Research, 5:128–144.
- [18] Webster, T., (2001). "Burner Technology For Single Digit NOx Emissions In Boiler Applications", CIBO NOx Control XIV. Conference, 13 March, 2001, San Diego.
- [19] Kang, Y. Lu, X., Wang, Q., Ji, X., Miao, S., Xu, J., Luo, G. ve Liu H., (2013). "Experimental And Modeling Study On The Flame Structure And Reaction Zone Size Of Dimethyl Ether/Air Premixed Flame in An Industrial Boiler Furnace", Energy and Fuels, 27:7054–7066.
- [20] Cozzi, F. ve Coghe, A., (2012). "Effect Of Air Staging On A Coaxial Swirled Natural Gas Flame", Exp. Therm. Fluid Sci.,43:32–39.
- [21] Kang, Y.H., Wang, Q.H., Lu, X.F., Ji, X.Y., Miao, S.S., Wang, H., Guo, Q., He, H.H. ve Xu, J., (2015). "Experimental And Theoretical Study On The Flow, Mixing, And Combustion Characteristics Of Dimethyl Ether, Methane, And LPG Jet Diffusion Flames", Fuel Process. Technol., 129:98–112.
- [22] Zhu, X. L. ve Gore, J. P., (2005). "Radiation Effects On Combustion And Pollutant Emissions Of High-Pressure Opposed Flow Methane/Air Diffusion Flames", Combust. Flame, 141:118–130.
- [23] Lee, K., Kim, H., Park, P., Yang, S. ve Ko, Y., (2013). "CO₂ Radiation Heat Loss Effects On NOx Emissions And Combustion Instabilities In Lean Premixed Flames", Fuel, 106:682–689.
- [24] Bidi, M., Hosseini, R. ve Nobari, M. R. H., (2008). "Numerical Analysis Of Methane-Air Combustion Considering Radiation Effect", Energy Convers. Manag., 49:3634– 3647.
- [25] Ilbas, M., (2005). "The Effect Of Thermal Radiation And Radiation Models On Hydrogen-Hydrocarbon Combustion Modelling", Int. J. Hydrogen Energy, 30:1113–1126.

- [26] Costa, M., Ruão, M. ve Carvalho, M., (1996). "On The Influence Of Flue-Gas Recirculation On Pollutant Emissions From A Small-Scale Laboratory Furnace", Arch. Combust., 16:77–86.
- [27] Matsumoto, R., Ozawa, M., Terada, S. ve Lio, T., (2008). "Low NOx Combustion of DME by Means of Flue Gas Recirculation", Journal of Power Energy Systems, 2:1074–1084.
- [28] Cuoci, A., Frassoldati, A., Faravelli, T., Tolazzi, D., (2010). "CFD Simulation Of A Turbulent Oxy-Fuel Flame", Process. Technol. a Sustain. Energy,1–6.
- [29] Lezcano Benitez, J.C., Correa Restrepo, D., Amell Arrieta, A.A. ve Cadavid Sierra, F. J., (2011). "Numerical Simulation Of High Pressure Burner With Partially Premixed Flame", C.T.F Cienc. Tecnol. Futuro, 4:89–104.
- [30] Da Silva, C.V., Vielmo, H.A. ve Franca, F.H.R., (2006). "Numerical Simulation of the Combustion of Methane and Air in a Cylindrical Chamber", Therm. Eng., 5:13–21.
- [31] Bouras, F., El Hadi Attia, M., Khaldi, F. & Si-Ameur, M., (2017). "Control Of Methane Flame Properties By Hydrogen Fuel Addition: Application To Power Plant Combustion Chamber", Int. J. Hydrogen Energy, 42:8932–8939.
- [32] Ayed, A.H., Kusterer, K., Funke, H.H.W., Keinz, J., Striegan, C. ve Bohn, D., (2015) "Experimental And Numerical Investigations Of The Dry-Low-Nox Hydrogen Micromix Combustion Chamber Of An Industrial Gas Turbine", Propuls. Power Res., 4:123–131.
- [33] Ayed, A.H., Kusterer, K., Funke, H.H.W., Keinz, J., ve Bohn, D., (2017). "CFD Based Exploration Of The Dry-Low-Nox Hydrogen Micromix Combustion Technology At Increased Energy Densities", Propuls. Power Res., 6:15–24.
- [34] Sandalci T. ve Karagöz, Y., (2014). "Experimental Investigation Of The Combustion Characteristics, Emissions And Performance Of Hydrogen Port Fuel Injection In A Diesel Engine", Int. J. Hydrogen Energy, 39:18480–18489.
- [35] Schefer, R. W., Wicksall, D. M. ve Agrawal, A. K., (2002). "Combustion Of Hydrogen-Enriched Methane In A Lean Premixed Swirl-Stabilized Burner", Proc. Combust. Inst., 29:843–851.
- [36] Ouimette, P. ve Seers, P., (2009). "NOx Emission Characteristics Of Partially Premixed Laminar Flames Of H₂/CO/CO₂ Mixtures", Int. J. Hydrogen Energy, 34:9603–9610.
- [37] Dutka, M., Ditaranto, M. ve Løvås, T., (2016). "NOx Emissions And Turbulent Flow Field In A Partially Premixed Bluff Body Burner With CH₄ And H₂ Fuels", Int. J. Hydrogen Energy, 41:12397–12410.
- [38] Cellek, M.S. ve Engin, T., (2016). "3-D Numerical Investigation and Optimization of Centrifugal Slurry Pump Using Computational Fluid Dynamics", 36:69–82.
- [39] Cecchetto, F., (2015) "Combustione e Formazione Di Inquinanti Laminar Flame Speed and Sensitivity Analysis, Exam of Combustione e Formazione Di Inquinanti-Prof.A.Frassoldati",<u>https://www.docsity.com/it/laminar-flame-speed-andsensitivity-analysis/616742/, 05.06.2017.</u>

- [40] Telli Z.K., (1998). Yakıtlar ve Yanma, Üçüncü Baskı, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [41] Onat, K., Genceli, O.F. ve Arısoy A., (1998). Buhar Kazanlarının Isıl Hesaplamaları, Genişletilmiş 3. baskı, Teknik Yayıncılık Tanıtım A.Ş., İstanbul.
- [42] Encyclopædia Britannica, Methane Chemical Compound, <u>https://www.britannica.com/science/methane</u>, 5 Mayıs 2017.
- [43] Yılmaz, İ., (2006). Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [44] Yilmaz, T, Yilmaz, A. ve Erdinç, M.T., (2017). "Energy Recovery From Hydrogen Combustion At Elevated Pressures", Int. J. Hydrogen Energy, 42:23361-23365.
- [45] Wu, W., Wang, B., Shi, W. ve Li, X., (2014). "Absorption Heating Technologies: A Review And Perspective", Appl. Energy, 130:51–71.
- [46] Hammond, G. P. ve Norman, J. B., (2014). "Heat Recovery Opportunities In UK Industry", Appl. Energy, 116:387–397.
- [47] Mokheimer, E. M. A., Sanusi, Y.S. ve Habib, M., (2016). "Numerical Study Of Hydrogen-Enriched Methane–Air Combustion Under Ultra-Lean Conditions", International Journal of Energy Research, 40:743–762.
- [48] Enerji Üretiminde Verimliliği Artırmaya, Çevreyi Korumaya Yönelik İleri Teknolojiler- Alt Grup Raporu- 4. Yakıt Hücreleri, <u>http://www.inovasyon.</u> <u>org/pdf/euva.bolum4.pdf</u>, 15 Şubat 2017.
- [49] Colella, W. G., Jacobson, M. Z. ve Golden, D. M., (2005). "Switching To A U.S. Hydrogen Fuel Cell Vehicle Fleet: The Resultant Change In Emissions, Energy Use, And Greenhouse Gases", J. Power Sources, 150:150–181.
- [50] Michalovic, B.M., (2007). "Beyond Hydrogen", ChemMatters, 17–19.
- [51] Kahveci E.E. ve Taymaz, I., (2014). "Experimental Investigation On Water And Heat Management In A PEM Fuel Cell Using Response Surface Methodology", Int. J. Hydrogen Energy, 39:10655–10663.
- [52] Küçüka, S., Yanma ve Alev, <u>http://kisi.deu.edu.tr/serhan.kucuka/YANMA ve</u> <u>ALEV.pdf</u>,02 Mayıs 2017.
- [53] İskender, S., (2012). Doğal Gazlı Sürekli Isıl İşlem Fırınlarında Brülör Tasarımı, İmalatı Ve Baca Gazı Analizleriyle Doğal Gaz Tüketiminin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [54] ÇORDAŞ Çorlu Doğalgaz Dağıtım Anonim Şirketi, 2016.
- [55] Mcgrattan, K., Floyd, J. ve Hostikka, S., (2001). "A Mixture Fraction Combustion Model for Large Scale Fire Simulation", Proc. IMECE'01, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-16, 2001, New York.
- [56] İşyarlar B. ve Kirbaş, İ., (2015). "Doğal Gaz Yakıtlı Bir Yanma Odasında Hava ve Yakıt Hızlarının Sıcaklık, Entalpi ve Entropi Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi", GÜFBED/GUSTIJ, 5:60–66.
- [57] Keating, E.L., (1993). Applied Combustion. Marcel Dekker, Inc., New York, Basel,

Hong Kong.

- [58] Oland, C.B., (2002). Guide to Low-Emission Boiler and Combustion Equipment Selection,<u>https://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/guide low emission</u> .pdf, 14.06.2017.
- [59] Woodruff, E. B., Lammers, H. B. and Lammers, T. F., (1998). Steam Plant Operation, 7 th. McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- [60] Thomas, M., "Advance Combustion Technology-NOx Fundamentals", CANMET Energy Technology Centre - Ottawa Advanced Combustion Technologies, <u>http://cleanboiler.org/workshop/workshop-presentations/</u>, 1 Kasım 2017.
- [61] Fluent Inc. (2002).FLUENT 6, Vol. 2, Fluent incorporated., LEI.
- [62] Lavoie, G. A., Heywood, J. B. ve Keck, J. C. (1970). "Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines, Combustion Science and Technology", Combustion Science and Technology, 4:313–326.
- [63] İlbaş, M., (1997). Studies of Ultra Low NOx Burner, Ph.D. Thesis, University of Wales, Cardiff, UK.
- [64] Baulch, D. L., Drysdall, D. D., Horne, D. G. ve Lloyd, A. C., (1973). "Evaluated Kinetic Data for High Temperature Reactions", 1.2.3. Butterworth.
- [65] ANSYS Inc. (2015). ANSYS Fluent Theory Guide-Release 16.0, Canonsburg, USA.
- [66] De Soete, G.G., (1975). "Overall Reaction Rates of NO and N₂ Formation from Fuel Nitrogen", 15th Symposium (International) on Combustion, 15:1093–1102.
- [67] AURA Belgelendirme Doğrulama Muayene Eğitim, Sera Gazı, <u>http://www.seragazidogrulama.com/sera-gazi-nedir-sera-gazlari-nelerdir-nasilolusur-sera-gazi-etkisi-nedir-sera-gazi-emisyonu-nedir-nasil-azaltilir</u>.19Ocak 2016.
- [68] Özmen, M.T., (2009) "Sera Gazı Küresel Isınma ve Kyoto Protokolü", Türkiye Mühendislik Haberleri, 453:42–46.
- [69] Mevzuati Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü, Mevzuat Bilgi Sistemi, e.mevzuat, Isınmadan Kaynaklanan Hava Kirliliğinin Kontrolü Yönetmeliği, <u>http://mevzuat.basbakanlik.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.7265&Mevzuat</u> <u>Iliski=0&sourceXmlSearch=</u>, 20 Eylül 2017.
- [70] Park, C. ve Liu, S.T, (1998). "Performance of A Commercial Hot Water Boiler", Report NISTIR 6226, U.S. Department of Commerce, Gaithersburg.
- [71] Bilgin, A., (2011). "Kazanlarda Enerji Verimliliği ve Emisyonlar", Tesisat Mühendisliği, 122:59–65.
- [72] Uralcan, İ.Y., (2004). Sıcak Su Kazanları, 1.Basım, Doğa Yayıncılık Ltd.Şti., İstanbul.
- [73] Akçaoğlu, A., (2005). "Yüksek Kapasiteli Endüstriyel Sıvı Yakıtta Rotatif Tip Brülörler", TESKON2005, Doğal gaz Semineri, 127–141.
- [74] Termo Isı Sistemleri San.Ve Tic.A.Ş., (2016). Ecostar Combustion Systems-Monoblok Gaz Brülörleri Kurulum, Kullanma Ve Bakım Talimatı, Bir Kademeli, İki

Kademeli Ve Oransal İşletim, 6. baskı, <u>http://www.ecostar.com.tr/mp-include/</u>

<u>uploads/2016/12/1-45-g-t.pdf</u>, 03 Eylül 2017.

- [75] TMMOB Makina Mühendisleri Odası., (2001). Periyodik kontrol mühendis el kıtabı-II Basınçlı kaplar.pdf, Yayın No: MMO/2001/272-2, Özkan Matbaacılık Ltd. Şti., Ankara.
- [76] Küçükçalı, R., (1993). Isısan Çalışmaları No. 70 Kalorifer Tesisatı, Isısan Isıtma ve Klima Sanayii A.Ş Yayınları.
- [77] Yıldıran, M.R.,(2016). Pulverize Kömür Yakıcısı Aerodinamiğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [78] Borsuk, A., Williams, J., Meadows, J. ve Agrawal, A. K. (2012). "Swirler Effects On Passive Control Of Combustion Noise And Instability In A Swirl-Stabilized Combustor", Proc. ASME Turbo Expo, 2:1267–1275.
- [79] Turns, S.R., (1996). An Introduction to Combustion Concepts and Applications, McGraw-Hill Book Co, Singapore.
- [80] ANSYS FLUENT, Velocity Reporting Options, <u>https://www.sharcnet.ca/Software/</u> Fluent6/html/ug/node1217.htm, 26 Eylül 2017.
- [81] Lefebvre, A. H. ve Ballal, D. R., (2010). Gas Turbine Combustion Alternative Fuels and Emissions, Third Edit. CRC Press Taylor-Francis Group Boca Raton, London, New York.
- [82] Frieder, A.J., Felix, P.C., (1974). "Experiences with Gas Turbines Burning Non-Refined Fuel Oils and Related Theoretical Investigations", ASME International Gas Turbine Conference and Products Show, Paper 74-GT-12, Zurich.
- [83] Gupta, A.K., Lilley, D.G., Syred, N., (1984). Swirl Flows. Abacus Press, Tunbridge Wells, UK.
- [84] Beer, J.M. ve Chigier, N. A., (1972). Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers, London.
- [85] E. Kilik, (1976). The Influence of Swirler Design Parameters on the Aerodynamics of the Downstream Recirculation Region, Phd. Thesis, Cranfield Institute of Technology, UK.
- [86] Termo Isı Sistemleri San. ve Tic. A.Ş., (2016).
- [87] NOVA Plus, MRU Baca Gazı ve Emisyon Ölçüm Cihazları Limited Şirketi., (2016).
- [88] ABB Automation Products GmbH, <u>http://new.abb.com/products/measurement-products/flow/thermal-mass-flowmeters/sensyflow-fmt500-ig</u>, 26 Nisan 2017.
- [89] UNITROVE Natural Gas Density Calculator, <u>http://unitrove.com/engineering/tools/gas/natural-gas-density</u>, 26 Nisan 2016.
- [90] Kuzmin, D., Introduction to Computational Fluid Dynamics, <u>http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf</u>, 27 Eylül 2017.
- [91] Fluent Inc., (2005). Fluent 6.2 User Guide, 2A.

- [92] Bakker, A., (2006). Modeling Chemical Reactions with CFD, Reacting Flows -Lecture 10, <u>http://www.bakker.org/dartmouth06/engs199/10-react.pdf</u>, 30 Temmuz 2017.
- [93] Spalding, D.B., (1970). "Mixing And Chemical Reaction In Steady Confined Turbulent Flames", In 13th Symp. (Int'l.) on Combustion, 23-29 August 1970, University of Utah, Salt Lake City.
- [94] Özdemir, F., (2014). Tunçbilek Termik Santrali'nin 5. Ünite Kazanındaki Alev Oluşumunun Sayısal Modellemesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [95] Özçelik, M.O., (2012). "Doğrudan Ateşlemeli, Kanatlı Borulu Isı Değiştiricinin Modellenmesi", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [96] Colorado, A., ve McDonell, V., (2013). "Prediction Of NOx Emissions From Premixed Natural Gas And Hydrogen Enriched Flames Stabilized With A Low-Swirl Burner", Fall Tech. Meet. West. States Sect. Combust. Institute, WSS/CI 2013 Fall Meet., Paper 084IC-0015, Colorado State University in Ford Collins, 7-8 October 2013, Colorado.
- [97] ANSYS Inc., (2010). Tutorial: 2D Simulation of A 300 KW BERL Combustor Using the Magnussen Model.
- [98] Fluent Inc., (2005). Fluent 6.2 User Guide.
- [99] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Choosing a Radiation Model, <u>https://www.</u>

sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node583.htm, 28 Nisan 2016.

[100] Cellek M.S., ve Pinarbaşi, A., (2017). "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", Int. J. Hydrogen Energy, (Baskıda).

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	: Mehmet Salih CELLEK
Doğum Tarihi ve Yeri	: 20.03.1986 - Şirvan
Yabancı Dili	: İngilizce
E-posta	: mscellek@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği	Sakarya Üniversitesi	2013
Lisans	Makine Mühendisliği	Sakarya Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri (Y.D.A)	Ümraniye Atakent Lisesi	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-	Yıldız Teknik Üniversitesi	ÖYP Araştırma Görevlisi
2011-2013	Sakarya Üniversitesi	ÖYP Araştırma Görevlisi
2011-2011	İstanbul Teknik Üniversitesi	ÖYP Araştırma Görevlisi
2010-2011	Bingöl Üniversitesi	ÖYP Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

- Cebi A, Celen A, Donmez A, Cellek M.S, Celen P, Karakoyun Y, Dalkılıç A.S, Taner T, Wongwises S., A review of flow boiling in mini and microchannels for enhanced geometries, Journal of Thermal Engineering, 2017. (Baskıda)
- Cellek M.S., Pinarbasi A., 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 xxx, 1-14, 2017. doi.org/10.1016/j.ij hydene.2017.05. 107
- Cellek M.S., Engin T., Parametric Investigation Of A Centrifugal Slurry Pump While Handling Clear Water J. of Thermal Science and Technology, 36, 2, 19-28, 2016.
- 4. Cellek M.S., Engin T., 3-D numerical investigation and optimization of centrifugal slurry pump using computational fluid dynamics, J. of Thermal Science and Technology, 36, 1, 69-82, 2016.
- Kıncay O, Cellek M.S, Acıkgoz O, Dalkilic A.S, Wongwises S., Investigation On The Relation Between Exergy Loss And NTU, J. of Thermal Science and Technology, 35, 2, 153-164, 2015.
- Cellek M.S., Engin T., 2 kanatlı radyal tipteki bir çamur pompası çarkının optimizasyonu ve analizi, (SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17:2, 231-239, 2013.

Bildiri

 OKBAZ A, OLCAY A.B, CELLEK M.S, PINARBAŞI A, Computational investigation of heat transfer and pressure drop in a typical louver fin-and-tube heat exchanger for various louver angles and fin pitches, Experimental Fluid Mechanics 2016, Marianske Lazne 15th November 2016.

- CELLEK M.S, ÖZERK K, DOĞAN A, OKBAZ A, ŞAHİN İ, PINARBAŞI A, Numerical investigation on journal bearing lubrication, Conferance On Advance In Mechanical Engineering Istanbul, Turkey ,11-13 May 2016, YTU.
- CELLEK M.S, ,ENGIN T, PINARBASI A, 2-D numerical investigation on the effects of blade number on the centrifugal blower, Conferance On Advance In Mechanical Engineering Istanbul, Turkey, 11-13 May 2016, YTU.
- 4. CELLEK M.S, ENGİN T., Santrifüj Çamur Pompası Performans
 Eğrilerinin HAD Yardımıyla Belirlenmesi, 8. Pompa Vana Kongresi, 2 4 Mayıs 2013.
- CELLEK M.S, ENGİN T., Santrifüj Çamur Pompası Performans Eğrilerinin HAD Yardımıyla Belirlenmesi, 8. Pompa Vana Kongresi, 2-4 Mayıs 2013.
- CELLEK M.S, ENGİN T., Nuh Çimento Döner Fırın Sistemleri İçin Enerji Bilanço Hesabı ve Muhtemel Geri Kazanımları Üzerine Bir Durum Çalışması, 18. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi, ULIBTK'11, 2011.

Proje

- "Isı değiştirici kanat geometrilerinin ısıl ve hidrolik performansa etkisi", SAN TEZ, 0649. STZ.2014, Yardımcı Araştırmacı, Proje bütçesi : 335.113,80 TL
- "Hermetik kompresörlerde krank yataklarının optimizasyonu ve rulmanlı yatak kullanımının incelenmesi", SAN TEZ, 01228.STZ.2012-1, Yardımcı Araştırmacı, Proje bütçesi : 193.166,00 TL