T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FIRIN SİSTEMİNDE HİDROJEN GAZI KATKILI DOĞAL GAZ YAKITLI PROSES BRÜLÖRÜ YANMA ANALİZLERİ VE OPTİMİZASYONU

ONUR SALCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA

EDİRNE-2023

ONUR SALCI'nın hazırladığı "**FIRIN SİSTEMİNDE HİDROJEN GAZI KATKILI DOĞAL GAZ YAKITLI PROSES BRÜLÖRÜ YANMA ANALİZLERİ VE OPTİMİZASYONU**" başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği Anabilim Dalında** bir **Yüksek lisans tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri İmza

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA

Prof. Dr. Dilek KUMLUTAŞ

Doç. Dr. Çiğdem SUSANTEZ

Tez Savunma Tarihi: 24/07/2023

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

Prof. Dr. Hüseyin Rıza Ferhat KARABULUT
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü.FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

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

24/07/2023
Onur SALCI

Yüksek Lisans Tezi

Fırın Sisteminde Hidrojen Gazı Katkılı Doğal Gaz Yakıtlı Proses Brülörü Yanma Analizleri ve Optimizasyonu

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Hidrojen gazı, evrende bol miktarda bulunan ve kütlece en yüksek ısıl değere sahip eşsiz bir yakıttır. Saf yanması sonucunda karbondioksit ve karbonmonoksit emisyon gazları oluşmamaktadır. Yanma sistemlerinde yakıt olarak doğal gaza hidrojen gazı katılmasının amacı, karbondioksit ve karbon monoksit emisyon gaz oranlarını azaltmaktır.

Hidrojen gazı, proses brülörlerde, doğal gaz ile belirli oranlarda katılarak bir yakıt katkısı olarak kullanılabilmektedir. Brülörün yanma başlığı bölümünde, hava ve gaz yakıtı yanma öncesi karıştırmak için türbülatör parçası kullanılmaktadır.

Endüstride mevcut kullanılan Ecostar FPB 200 gaz proses brülörü, bu tez çalışmasında bir test brülörü olarak kullanılmıştır. Brülör, SAB ve NT olarak isimlendirilen iki farklı türbülatör tasarımına sahiptir. Bu türbülatörlerin yanma performansları, 150 kW ısıl güçte, 1.2, 1.3, ve 1.4 hava fazlalık katsayılarında, doğal gaz ve hacimce % 5, % 10, % 15 ve % 20 hidrojen gazı karışımlı doğal gaz yakıt ile test ve simüle edilmiştir. Deneysel çalışmalar doğal gaz ve hidrojen gazı karışımlı yanma test sisteminde, nümerik çalışmalar ise Ansys Fluent HAD yazılımında yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda ölçülen değerler, sayısal hesaplamalar ve sonuçların karşılaştırılması için kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda, yakma havası, doğal gaz ve saf hidrojen gazı hacimsel debileri doğal gaz ve hidrojen gazı karışımlı yanma deney sisteminde ölçülmüştür. Sıcaklık, basınç ve baca gazı emisyon değerleri, deney fırınında bulunan farklı noktalar

üzerinden ölçülmüştür. HAD analizlerinden sağlanan sayısal ve görsel sonuçlar incelenip, deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında, sabit ısıl güçte ve hava fazlalık katsayısında, doğal gaz yakıta hidrojen gazı katılmasıyla sağlanan yanma için gerekli yakma havası debisi yakıttaki hidrojen gazı oranı arttıkça düşmüştür. Yanmada hidrojen gazının varlığı arttıkça, karbondioksit gazının oranında azalma, azot oksitler kirletici emisyon gazlarının oranında ve yanma sonucu oluşan sıcaklıklarda artış gerçekleşmiştir. Hava ve yakıt oranının arttırılmasıyla, azot oksitler kirletici emisyon gazlarının oranında ve yanma sonucu oluşan sıcaklıklarda düşüş sağlanmıştır. Türbülatörün yakıt ve hava karıştırma performansının yakıt cinsine bağlı olduğu görülmüştür. Her iki türbülatörde doğal gaz ve hava karışımı aynı değerlerde sağlanırken, hidrojen gazı katkılı yanmada NT türbülatörünün SAB türbülatörüne göre daha fazla hidrojen gazı karışımlı doğal gaz yakıt ve hava karışımını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Dekarbonizasyon çalışmalarında, türbülatör değişimi ile yaklaşık % 28 oranında daha fazla karbondioksit gazı düşüşü sağlanmıştır.

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı : 149

Anahtar Kelimeler : Hidrojen Gazı, Hidrojen Gazı Katkılı Yakıt, Yanma, Dekarbonizasyon, Proses Brülörü, Türbülatör

Master Thesis

Hydrogen Gas Additive Natural Gas Fuel Combustion Analysis and Optimization of Process Burner in Furnace System

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences

Mechanical Engineering Department

ABSTRACT

Hydrogen gas is an unique fuel abundantly present in the universe and has the highest calorific value by mass. It does not produce carbon monoxide emission gases as a result of pure combustion. The purpose of adding hydrogen gas into natural gas at combustion systems as a fuel is to reduce the emission gas rates of carbon dioxide and carbon monoxide.

Hydrogen gas can be used as a fuel additive in process burners by adding it to natural gas in specific proportions by volume. In the combustion head section of the burner, a turbulator part is used to mix the air and gas fuel before combustion.

Ecostar FPB 200 gas process burner, which is currently used in the industry, was used in this thesis as a test burner. The burner has different two turbulator designs named as SAB and NT. Combustion performances of these turbulators were tested and simulated at 150 kW thermal power by burning fuel as natural gas and hydrogen gas added to natural gas as 5 %, 10 %, 15 % and 20 % by volume at 1.2, 1.3, and 1.4 excess air coeffients. Experimental studies were carried out in the combustion test system with a mixture of natural gas and hydrogen gas, and numerical studies were carried out in Ansys Fluent CFD software. In experimental studies, the measured values were used for numerical calculations and comparing the results.

In experimental studies, volumetric flow rates of combustion air, volumetric flow rates of natural gas and pure hydrogen gas were measured in a combustion test system

with a mixture of natural gas and hydrogen gas. Temperature, pressure and flue gas emission values were measured over different points in the test furnace. The numerical and visual results obtained from CFD analyzes were examined and compared with the experimental results.

In this thesis, for the combustion achieved by adding hydrogen gas to natural gas fuel at constant heat power and excess air ratio, the required combustion air flow rate decreased as the hydrogen gas ratio in the fuel increased. As the presence of hydrogen gas increased in combustion, there was a reduction in the proportion of carbon dioxide gas, an increase in the ratio of nitrogen oxides pollutant emission gases, and an increase in the temperatures resulting from combustion. Increasing the air-fuel ratio led to a decrease in the ratio of nitrogen oxide pollutant emission gases and temperatures resulting from combustion. It was observed that the performance of the turbulator in fuel and air mixing depended on the type of fuel. While the natural gas and air mixture were provided at the same values in both turbulators, the NT turbulator provided a higher mixture of hydrogen gas, natural gas fuel, and air compared to the SAB turbulator in hydrogen gas added natural gas combustion. In the decarbonization studies, approximately 28% more carbon dioxide gas reduced by changing the turbulator.

Year : 2023

Number of Pages : 149

Keywords : Hydrogen Gas, Hydrogen Gas Added Fuel, Combustion, Decarbonization, Process Burner, Turbulator.

TEŞEKKÜR

Tez çalışma sürecimde her türlü desteğini esirgemeyen, yol gösterici olan, olumlu tavır ve yaklaşımlarıyla motive eden, cesaretlendiren, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum ve duyacağım kıymetli tez danışmanım Prof. Dr. Semiha ÖZTUNA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel ve nümerik çalışmaların yapılması için desteklerini esirgemeyen, laboratuvar imkanları ve gerekli tüm ekipmanların kullanılmasında kolaylıklar sağlayan, yüksek lisans öğrenimimi her daim destekleyen TERMO ISI SİSTEMLERİ SAN. ve TİC. A.Ş.'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

TÜBAP (Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi), 2023/14 numaralı, "Fırın Sisteminde Hidrojen Gazı Katkılı Doğal gaz Yakıtlı Proses Brülörü Yanma Analizleri ve Optimizasyonu" adlı proje ve TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu), 3210596 numaralı, "Hacimce En Yüksek % 20 Hidrojen İçeren Doğal Gaz-Hidrojen Karışımlı Yakıt İçin 150 kW Kapasiteli, Yenilikçi ve Yüksek Performanslı Gaz Brülörünün Tasarımı ve Prototipinin Geliştirilmesi" proje destekleri için teşekkür ederim.

Hidrojen ve doğal gaz yakıtlı yanma deney sistemleri konusunda ve literatürde yaptığı değerli çalışmalarıyla teknik desteğini sağlayan ve yol gösterici olan olan değerli hocam Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ'a teşekkür ederim.

Tez yazımında, deneysel ve nümerik çalışmalarımı sağlarken, destekleyici, cesaretlendirici söz ve tavırlarıyla beni motive eden, beni her zaman yönlendiren, değerli hocam Arş. Gör. Dr. Mustafa Kemalettin BÜYÜKAKIN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın deneysel çalışmalarında deneyleri birlikte gerçekleştirdiğimiz ekip arkadaşlarım Emrah VAROL ve Günay İKİZ'e, model tasarım çalışmalarında desteğini sağlayan Sadık DOĞAN, Ömer TÜRKAY, Buket BOZKURT, Gökhan AKGÜN ve Berkay DÖNMEZ' e, tez yazım kuralları ile ilgili desteğini sağlayan Furkan HAMZAOĞLU ve Semih KORKMAZ'a, tüm süreçlerde desteğini esirgemeyen tasarım merkezi ekibine teşekkür ederim.

Malzeme tedarik, üretim ve planlama süreçlerinde desteğini sağlayan ve her daim yol gösterici olan Sn. Bünyamin UYSAL, Raif ERKOL, Anıl BOZOĞLU, Rojda ATLI, Çağatay ÜTEBAY, Furkan YILDIZ, Ramazan USLU ‘ya, tüm satınalma ve üretim ekibine teşekkür ederim.

Tez yazım sürecinde, beni motive eden, cesaretlendiren, azim ve kararlılık içinde çalışmamı tamamlamama destek olan değerli dostum Okan GAŞ arkadaşıma teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olduğunu hissettiğim, yaptığım her işi hakkıyla yapmam konusunda bana öğretilerde bulunan, hayatımın her anında hayata olumlu bakmamı, güçlü ve istikrarlı olmamı sağlayan ve pozitif enerjiler veren Sevgili Annem Fatma EŞİYOK’a, her zaman maddi ve manevi yanımda olduğunu bildiğim ve hissettiğim, hayatın tüm zorluklarına beni layıkıyla hazırlayan Sevgili Babam Şefik EŞİYOK’a, varlığıyla bile beni mutlu eden, her zaman yanımda olan, Sevgili Kardeşim Dinçer EŞİYOK’a teşekkürlerim sonsuzdur.

Hayatımın her alanında her daim beni destekleyen, yanımda olduğunu bildiğim, zorlandığım anlarda motivasyonumu arttırmak için elinden gelenin her zaman fazlasını yapan, kararlı ve istikrarlı olan, yoluma ışık tutmaya çalışan Sevgili Eşim Alev SALCI’ya teşekkürlerim sonsuzdur.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER x
SİMGELER LİSTESİ xiii
KISALTMALAR LİSTESİ xvii
ŞEKİLLER DİZİNİ xviii
ÇİZELGELER DİZİNİ xxi
BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1
1.1. Hidrojen Enerjisine Yönelik Yapılan Çalışmalar 1
1.1.1. Hidrojen Enerjisine Yönelik Dünyada Yapılan Çalışmalar 1
1.1.2. Hidrojen Enerjisine Yönelik Türkiye'de Yapılan Çalışmalar 4
1.2. Literatür Araştırması ve Tezin İçeriği 5
1.2.1. Literatür Araştırması 5
1.2.2. Tezin İçeriği 10
BÖLÜM 2 11
YANMANIN TEMEL KAVRAMLARI 11
2.1. Yanma 11
2.2. Gaz Yakıtlar 15
2.2.1. Doğal Gaz 15
2.2.2. Metan Gazı 15
2.2.3. Hidrojen Gazı 16
2.2.4. Hidrojen Gazı Karışımlı Doğal Gaz Yakıtı 17
2.3. Gaz Yakıtlarda Yanma ve Alev Tipleri 19
2.3.1. Ön Karışımsız (Difüzyon) Yanma ve Alev Tipi 19
2.3.2. Kısmi Ön Karışımlı Yanma ve Alev Tipi 19
2.3.3. Ön Karışımlı Yanma ve Alev Tipi 20
2.4. Metan ve Hidrojen Gazının Yanma Stokiyometrisi 20
2.4.1. Teorik Hava Gereksinimi 21

2.4.2. Eş değerlik Oranı 22
2.4.3. Fazla Hava 22
2.4.4. Lambda Sayısı 23
2.4.5. Isıl Değer 23
2.5. Doğal Gaz ve Hidrojen Gazının Yanma Emisyonları 24
2.5.1. CO_2 (Karbondioksit) 26
2.5.2. H_2O (Su Buharı) 26
2.5.3. CO (Karbonmonoksit Gazı) 26
2.5.4. O_2 (Oksijen Gazı) 27
2.5.5. NO_x (Azot Oksitler) 27
2.6. Kirletici Emisyon Limitleri ve Yönetmelikler 33
BÖLÜM 3 35
ENDÜSTRİ FIRINLARI 35
3.1. Yüksek Fırınlar 35
3.2. Sürekli Fırınlar 36
3.3. Vakum Fırınları 37
3.4. Yakma Fırınları 37
3.5. Ergitme Fırınları 38
3.6. Isıl İşlem Fırınları 39
BÖLÜM 4 40
ISI GEÇİŞİNE GENEL BAKIŞ 40
4.1. Isıl İletim (Kondüksiyon) 40
4.2. Isıl Taşınım (Konveksiyon) 41
4.3. Isıl Işınım (Radyasyon) 41
BÖLÜM 5 43
SAYISAL ANALİZ 43
5.1. Temel Korunum Denklemleri 43
5.1.1.Kütlenin Korunumu Denklemi (Süreklilik Denklemi) 43
5.1.2. Momentumun Korunumu Denklemleri (Navier Stokes Denklemleri) 44
5.1.3. Enerjinin Korunumu Denklemi 46
5.2. Akış Karakteristiğinin Belirlenmesi 47
5.2.1. Gelişmiş k - ε Türbülans Denklemleri 48
BÖLÜM 6 49
HAD ÇÖZÜM METODU 49
6.1. Sonlu Hacimler Metodu 49

6.2. HAD Problemi Çözümü 50
6.2.1. Ön İşlemci 51
6.2.2. Çözücü 54
BÖLÜM 7 57
BRÜLÖRLER 57
7.1. Brülörlerin Sınıflandırılması 57
7.1.1. Karışım Tipine Göre Brülörler 58
7.1.2. Yakıt Tipine Göre Brülörler 59
7.1.3. İşletim Tipine Göre Brülörler 59
7.1.4. Yakma Havası Sağlanmasına Göre Brülörler 60
BÖLÜM 8 63
DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMALAR 63
8.1. Deneysel Çalışmalar 63
8.1.1. Deney Sisteminin Açıklanması 63
8.1.2. Deney Brülörü Özellikleri 72
8.1.3. Yakıt Bileşim Özelliklerinin Belirlenmesi 76
8.1.4. Deney Koşullarının Belirlenmesi 79
8.1.5. Deneysel Sonuçlar 79
8.2. Nümerik Çalışmalar 87
8.2.1. Teorik Yakma Havası ve Yanma Ürünlerinin Hesaplamaları 87
8.2.2. Geometri ve Ağ Ayarlarının Yapılması 90
8.2.3. Analiz Sınır Koşullarının Belirlenmesi 93
8.2.4. Yanma Analizlerinde Kullanılan Nümerik Yöntemler 95
8.2.5. Nümerik Analizlerin Sonuçları 97
8.3. Deneysel ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması 111
BÖLÜM 9 117
SONUÇLAR 117
BÖLÜM 10 120
ÖNERİLER VE TARTIŞMA 120
KAYNAKLAR 122
ÖZGEÇMİŞ 128

SİMGELER LİSTESİ

ρ	Gelen ışınımın yansıtılma oranı
λ	Lambda sayısı, hava fazlalık katsayısı
$\rho_{\text{hava,STP}}$	Havanın standart koşullarda yoğunluğu (kg/m³)
ρ_{STP}	Gaz yakıtın standart koşullarda yoğunluğu (kg/m³)
M_{hava}	Havanın molar kütlesi (g/kmol)
$n_{H_2O\ \text{çıkan}}$	Buharlaşan suyun mol sayısı (mol)
$n_{H_2O\ \text{çıkan}}$	Yakılan yakıtın mol sayısı (mol
$n_{H_2O,\text{çıkan}}$	Buharlaşan suyun mol sayısı (mol)
$n_{\text{yakıt, çıkan}}$	Yakılan yakıtın mol sayısı (mol)
$\vec{F}$	Viskoz kuvvet vektörü (N)
c_p	Özgül ısı (kj/kg.°C)
$\vec{g}$	Yer çekimi ivmesi (m/s²)
$\vec{n}$	Normal vektörü
$\dot{q}$	İletimle ısı geçişi (W)
$\vec{v}$	Hız vektörü (m/s)
$\vec{\nabla}$	Diverjans
σ_ε	Türbülans yayınım oranı Prandtl sayısı
$\sigma_{i,j}$	Gerilme tensörü (N/m²)
σ_k	Türbülans kinetik enerjisi Prandtl sayısı
$\tau_{i,j}$	Kayma gerilme tensörü (N/m²)
A	Isı geçiş yüzeyine dik alan, Kontrol hacminin yüzey alanı (m²)
A_s	Taşınım ısı geçişine dik yüzey alanı (m²)
C	Karbon atomu
$C_{1\varepsilon}$	Denklem sabiti
C_2	Denklem sabiti

C_2H_6	Etan gazı
C_3H_8	Propan gazı
C_4H_{10}	Bütan gazı
C_5H_{12}	Pentan gazı
C_6H_{14}	Hekzan gazı
C_8H_{18}	Oktan
CH_4	Metan gazı
Cl	Klor atomu
CO	Karbonmonoksit gazı
CO_2	Karbondioksit gazı
$CO_{2,\ ıslak}$	Nem ihtiva eden karbondioksit gazı
$CO_{2,\ kuru}$	Kuru karbondioksit gazı
Ç	Islak Çevre (m)
D	Hidrolik çap (m)
E_a	Reaksiyon aktivasyon enerjisi (J)
ε	Türbülans yayınım oranı
f	Denklem katsayısı
F	Flor atomu
G_b	Taşınım için türbülans kinetik enerji üretimi
G_k	Hız gradyanları için türbülans kinetik enerji üretimi
H	Hidrojen atomu
h	Isı taşınım katsayısı ($W/m^2.K$)
H_2	Hidrojen gazı
H_2CO_3	Karbonik asit
H_2O	Su buharı
$H_2O_{mol\ fraksiyonu}$	Su buharı mol fraksiyonu
HCN	Hidrosiyonik asit
He	Helyum gazı
HNO_2	Nitröz asit
HNO_3	Nitrik asit
H_u	Yakıtın ısıl değeri ($kcal/Nm^3$)
Hw	Suyun buharlaşma ısıs ($kcal/Nm^3$)
$i - C_4H_{10}$	iso – Bütan gazı
$i - C_5H_{12}$	iso.-.Pentan gazı

k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
k	Türbülans kinetik enerjisi
M	Gaz yakıtın molar kütlesi (g/mol)
m	Kütle (kg)
n – C_4H_{10}	neo – Bütan gazı
n – C_5H_{12}	neo – Pentan gazı
N	Azot atomu
N_2	Azot gazı
N_2O	Di azot oksit gazı
NH_3	Amonyak gazı
NO	Azot oksit gazı
NO_2	Azot di oksit gazı
NO_{kuru}	Kuru azot oksit gazı
$NO_{mol\ fraksiyonu}$	Azot oksit gazının mol fraksiyonu
NO_x	Azot oksitler gazı
P	Basınç (Pa)
Q	Hacimsel debi (Nm^3/h)
R	Gaz sabiti
Re	Reynolds sayısı
R_xN	Azot içeren yakıt
S	Kükürt
S_ε	Kullanıcı tanımlı terim -1
SG	Spesifik yer çekimi
S_k	Kullanıcı tanımlı terim - 2
S_L	Laminer alev hızı
SO_2	Kükürt dioksit gazı
S_T	Türbülanslı alev hızı (m/s)
T	Sıcaklık (°C, K)
t	Zaman (s)
TC_∞	Yüzeyden yeterince uzakta akışkan sıcaklığı (°C)
T_s	Yüzey sıcaklığı (°C)
V	Kontrol hacmi
WI	Wobbe endeksi ($kcal/Nm^3$)
x	Mesafe (m)

Y_m	Toplam yayınım oranı
α	Gelen ışınımın soğurulma oranı
I	Türbülans yoğunluğu (%)
μ	Dinamik vizkozite (Pa.s)
σ	Stefan Boltzman Sabiti (5.67×10^{-8} W/m².K^4)
τ	Gelen ışınımın geçirilme oranı
ϕ	Eş değerlik oranı

KISALTMALAR LİSTESİ

2D	İki boyutlu
3D	Üç boyutlu
AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
BM	Birleşmiş Milletler
DG	Doğal gaz
EFGR	Baca gazı resirkülasyonu
EN	Avrupa Birliğinin ilgili standartları
GAZBİR	Türkiye Doğal Gaz Dağıtıcıları Birliği
GAZMER	Doğal Gaz Sektörünün Teknik Merkezi
H/Y	Yakıt başına düşen hava oranı
HAD	Hesaplamalı akışkanlar dinamiği
HHV	Üst ısıl değer
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IFGR	İçten baca gazı resirkülasyonu
LHV	Alt ısıl değer
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
N	Normal
NT	Prototip türbülatör
PDF	Olasılık yoğunluk fonksiyonu
PLC	Programlanabilir mantıksal denetleyici
PM	Partikül madde
ppm	Milyonda bir parçacık miktarı
SAB	Standart alev borulu mevcut türbülatör
TS	Türk Standartları Enstitüsü
VOC	Uçucu organik bileşik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Hidrojen gazı ve doğal gazın λ katsayısına bağlı adyabadik alev sıcaklığı değişimi (Uza 2017 ve Baukal, 2012). 13
Şekil 2.2. Bir brülör yakma uygulamasında (solda) doğal gaza H_2 karıştırılması sonucu oluşan geri tepme (sağda) (Gersen, 2020). 14
Şekil 2.3. (a) Ön karışımsız, (b) kısmi ön karışımlı, (c) ön karışımlı yanma tipleri. 20
Şekil 2.4. Baca gazı ürünlerinin fazla havaya bağlı değişimi. 23
Şekil 2.5. Baca gazı ürünlerinin fazla havaya bağlı değişimi. 26
Şekil 2.6. Ani NO_x oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (Uza,2017). 29
Şekil 2.7. Yakıt NO_x oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (Uza, 2017). 29
Şekil 2.8. Bir gaz brülöründe içten baca gazı IFRG uygulaması. 30
Şekil 2.9. Bir gaz brülöründe EFGR uygulaması. 31
Şekil 2.10. Kademeli yakıt ve hava verme uygulaması. 31
Şekil 2.11. Ön karışımlı yanma uygulaması. 32
Şekil 3.1. Küçük kütükler için tasarlanmış bir sürekli hızlı ısıtma fırını (Trinks vd., 2003). 37
Şekil 3.2. Döner yakma fırını uygulaması (İZAYDAŞ, 2020). 38
Şekil 3.3. Döner yakma fırınında bir yanma uygulaması (Heat treatment, 2023). 39
Şekil 6.1. Matematiksel çözüm alanında kullanılan hücre tipleri (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,2012). 52
Şekil 6.2. 2D ve 3D Yapısal sayısal ağ geometrisi (Çengel & Cimbala, 2006). 53
Şekil 6.3. Hibrit sayısal ağ geometrisi (Çengel & Cimbala, 2006). 54
Şekil 6.4. Bütünleşik çözüm algoritması (Çengel & Cimbala, 2006). 55
Şekil 7.1. Ön karışımlı brülör (A) ve nozulda karışım brülör (B). 59
Şekil 7.2. Atmosferik brülör. 60
Şekil 7.3. Monoblok brülör tipleri (a) ECO NG, (b) ECO LNX FGR,(c) ECO Kare, (d) MIB, (e) ECO HP ve ECO WO (Monoblok Brülörler – Ecostar,2023). 61
Şekil 7.4. Duoblok brülör tipleri (a) ECO, (b) DIB, (c) DSE, (d) CIB, (e)FPB ve (f) FUSE (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023). 62
Şekil 8.1. Doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney sistemi. 64
Şekil 8.2. Doğal gaz hattı ve PLC panosu. 65
Şekil 8.3. H_2 gazı yüksek basınç hattı. 66
Şekil 8.4. H_2 gazı düşük basınç ve hava hatları. 67
Şekil 8.5. Seyyar karışım gaz hattı ve ekipmanları. 68
Şekil 8.6. Deney fırını ve üzerine montajlı FPB 200 brülörü. 69
Şekil 8.7. Deney fırını üzerinde emisyon ölçüm probu ve termokupların montajı. 69
Şekil 8.8. Emisyon ölçüm cihazı ve emisyon probu (paslanmaz metal). 70
Şekil 8.9. PLC dijital ekranı üzerinde verilerin okunması ve kaydının sağlanması. 71
Şekil 8.10. FPB 200 proses gaz brülörü (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023). 72

Şekil 8.11. Deney brülörü alt parçaları (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023). 73
Şekil 8.12. FPB 200 üzerinde alev borusu, SAB türbülatörü, ateşleme ve iyonizasyon elektrodu montajı. 74
Şekil 8.13. FPB 200 üzerinde NT türbülatör montajı. 75
Şekil 8.14. Doğal gaz yakıtın bileşim değerleri. 76
Şekil 8.15. Hacimce % 5 H_2 ve % 95 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri. 77
Şekil 8.16. Hacimce % 10 H_2 ve % 90 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri. 77
Şekil 8.17. Hacimce % 15 H_2 ve % 85 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri. 78
Şekil 8.18. Hacimce % 20 H_2 ve % 80 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri. 78
Şekil 8.19. Deneylerde kullanılan baca gazı emisyon fişleri. 81
Şekil 8.20. Fırın içi sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 SAB, 150 kW, $\lambda = 1.2$. 83
Şekil 8.21. Fırın içi sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 SAB, 150 kW, $\lambda = 1.3$. 83
Şekil 8.22. Fırın içi sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 SAB, 150 kW, $\lambda = 1.4$. 83
Şekil 8.23. Fırın iç sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 NT, 150 kW, $\lambda = 1.2$. 84
Şekil 8.24. Fırın iç sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 NT, 150 kW, $\lambda = 1.3$. 84
Şekil 8.25. Fırın iç sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 NT, 150 kW, $\lambda = 1.4$. 84
Şekil 8.26. O_2 (%); 150 kW, FPB 200 SAB ve NT, $\lambda = 1.2$, $\lambda = 1.3$ ve $\lambda = 1.4$. 85
Şekil 8.27. CO_2 (%); 150 kW, FPB 200 SAB ve NT, $\lambda = 1.2$, $\lambda = 1.3$ ve $\lambda = 1.4$. 85
Şekil 8.28. NO_x (ppm); 150 kW, FPB 200 SAB ve NT, $\lambda = 1.2$, $\lambda = 1.3$ ve $\lambda = 1.4$. 85
Şekil 8.29. % 100 DG (Solda) ve % 80 DG ,+ % 20 H_2 (Sağda) yakıt ile atmosferde yanma deneyi görsel sonucu; FPB 200 NT, 150 kW, λ=1.2. 86
Şekil 8.30. FPB 200 proses gaz brülörü 3 boyutlu katı modeli. 91
Şekil 8.31. FPB 200 proses gaz brülörünün SAB türbülatörü (solda) ve NT türbülatörü (sağda) ile hazırlanmış HAD analiz geometrileri. 91
Şekil 8.32. Brülör ve fırın sisteminin HAD analiz geometri modeli. 92
Şekil 8.33. Brülör ve fırın sisteminin akış hacmi üzerine oluşturulan ağ yapısı, tetrahedral hücre yapısı (solda), çok yüzlü hücre yapısı (sağda). 93
Şekil 8.34. Analiz sınır koşullarının geometri modeli üzerinde gösterimi. 93
Şekil 8.35. Kısmi ön karşımlı yanma modeli. 95
Şekil 8.36. Isıl radyasyon yanma modeli. 96
Şekil 8.37. İterasyon çözüm metotları ve kontrol ayarları. 96
Şekil 8.38. NO_x modeli. 97
Şekil 8.39. Sıcaklık (K) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, $\lambda = 1.2$, λ =1.3 ve λ =1.4. 101
Şekil 8.40. Sıcaklık (K) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, $\lambda = 1.2$, λ =1.3 ve λ =1.4. 102
Şekil 8.41. Hız (m/s) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, $\lambda = 1.2$, $\lambda = 1.3$ ve $\lambda = 1.4$. 103
Şekil 8.42. Hız (m/s) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, $\lambda = 1.2$, $\lambda = 1.3$ ve $\lambda = 1.4$. 104
Şekil 8.43. Yoğunluk konturları (kg/m³) ; FPB 200 SAB, 150 kW, $\lambda = 1.2$, $\lambda = 1.3$ ve $\lambda = 1.4$. 105
Şekil 8.44. Yoğunluk konturları (kg/m³) ; FPB 200 NT, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ=1.4 106
Şekil 8.45. CO_2 (%) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ =1.4. 107
Şekil 8.46. CO_2 (%) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, $\lambda = 1.2$, λ =1.3 ve λ =1.4. 108
Şekil 8.47. NO (ppm) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ =1.4. 109
Şekil 8.48. NO (ppm) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ =1.4. 110
Şekil 8.49. O_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, $\lambda = 1.2$. 111
Şekil 8.50. O_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, $\lambda = 1.3$. 112
Şekil 8.51. O_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, $\lambda = 1.4$. 112

Şekil 8.52. CO_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.2. 113
Şekil 8.53. CO_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.3. 113
Şekil 8.54. CO_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.4. 113
Şekil 8.55. NO (ppm) emisyonları ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.2. 114
Şekil 8.56. NO (ppm) emisyonları ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.3. 114
Şekil 8.57. NO (ppm) emisyonları ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.4. 115
Şekil 8.58. Baca gazı sıcaklık (°C) değerleri ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.2... 115
Şekil 8.59. Baca gazı sıcaklık (°C) değerleri ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.3... 115
Şekil 8.60. Baca gazı sıcaklık (°C) değerleri ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.4... 116

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Metan gazı ve hidrojen gazının bazı fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması. 22
Çizelge 2.2. Farklı gaz yakıtlara ait 15 °C' de HHV ve LHV değerleri (Speight,2018). 24
Çizelge 2.3. TS EN 676:2020 NO_x sınıfları ve limitleri (TS EN 676, 2020). 33
Çizelge 2.4. Doğal gaz için kirletici CO ve NO_x emisyonları dönüşümleri (Uza,2017). 33
Çizelge 2.5. Gaz yakıtlı yanmada NO_x, karbonmonoksit CO, hidrokarbon C_xH_y oranları (Wünning, 2011). 34
Çizelge 7.1. Brülörlerin sınıflandırılması. 58
Çizelge 8.1. Deney cihazlarının çalışma ve hassasiyet bilgileri. 71
Çizelge 8.2. FPB 200 Kapasite ve yakıt tüketim bilgileri..... 72
Çizelge 8.3. Deney brülörü genel özellikleri. 73
Çizelge 8.4. FPB 200 SAB ve NT türbülatörü için kullanılan deney koşulları. 79
Çizelge 8.5. FPB 200 SAB ve NT emisyonlarındaki değişim; 150 kW, λ =1.2. 82
Çizelge 8.6. FPB 200 SAB ve NT emisyonlarındaki değişim; 150 kW, λ =1.3. 82
Çizelge 8.7. FPB 200 SAB ve NT emisyonlarındaki değişim; 150 kW, λ =1.4. 82
Çizelge 8.8. Hacimce karışım oranlarına göre yakıt fiziksel özelliklerinin belirlenmesi (Çengel & Cimbala, 2006). 87
Çizelge 8.9. Hacimce % 100 DG için teorik hava oranının hesaplanması. 88
Çizelge 8.10. Hacimce % 95 DG ve % 5 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması. 88
Çizelge 8.11. Hacimce % 90 DG ve % 10 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması. 89
Çizelge 8.12. Hacimce % 85 DG ve % 15 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması. 89
Çizelge 8.13. Hacimce % 80 DG ve % 20 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması. 90
Çizelge 8.14. Nümerik çalışmalarda kullanılan ağ yapısının sayısal değerleri 92
Çizelge 8.15. Nümerik hesaplamalar için analiz sınır koşullarının hesaplanması..... 94
Çizelge 8.16. Yakıt ve havanın fiziksel değerleri (Çengel & Cimbala, 2006). 94
Çizelge 8.17. FPB 200 SAB nümerik hesaplama sayısal sonuçları..... 98
Çizelge 8.18. FPB 200 NT nümerik hesaplama sayısal sonuçları. 99

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Hidrojen Enerjisine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Hidrojen enerjisinin, son yıllarda artan kullanım potansiyeli önemli bir araştırma ve geliştirme alanı haline gelmiştir. Hidrojen enerjisinin kullanım alanları hızla genişlemektedir. Hidrojen yakıt hücreleri, elektrik enerjisi üretmek için yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir. Otomotiv sektöründe hidrojen yakıtlı araçların geliştirilmesi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Endüstriyel süreçlerde, enerji üretiminde ve evlerde hidrojen enerjisi kullanımı için yeni uygulamalar araştırılmaktadır. Hidrojen enerjisi ile ilgili çalışmalar, enerji sektöründe devrim niteliğinde bir dönüşüm potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmalar, temiz ve sürdürülebilir enerji kaynaklarına olan talebin artmasıyla birlikte hız kazanmaktadır. Hidrojen enerjisine yönelik dünyada ve Türkiye'de yapılan çalışmalar ve girişimlere ait bilgilere yer verilmiştir.

1.1.1. Hidrojen Enerjisine Yönelik Dünyada Yapılan Çalışmalar

Küresel ısınma ve iklim değişikliği, dünya genelinin ve günlük hayatın önemli bir sorunu haline gelmiştir. Devletler, sivil toplum kuruluşları ve sosyal organizasyonlar, kalkınma, sosyoekonomik istikrar ve karbon emisyonlarının azaltılması için enerji dönüşümünün önemini artık çok daha fazla kavramaktadırlar. BM (Birleşmiş Milletler) üyesi olan 66 ülkenin iklim değişikliğiyle mücadele kapsamında karbon salınımını 2050' ye kadar sıfıra indirme taahhüdünde bulunduğunu açıklamıştır.

Paris İklim Antlaşması, AB (Avrupa Birliği) 28 üye devleti tarafından imzalanmış ve sanayileşme öncesi seviyelerin üzerindeki küresel ısınmanın 2 °C altında tutulması ve sıcaklık artışının 1,5 °C ile sınırlandırılmasını hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşmak için, karbondan arındırma teknolojileri hayati bir rol oynamaktadır. Bu nedenle, hidrojene olan ihtiyaç daha da artacaktır. Hidrojen, yalnızca karbondan arındırma amacıyla kullanılmakla kalmayıp, aynı zamanda enerji depolama ve aktarım aracı olarak da kullanılabilmektedir.

Hidrojen, evrende en çok bulunan element olup, düşük karbonlu yenilenebilir enerji sistemlerine geçişte önemli bir role sahiptir. Hidrojen, temiz, güvenli ve çok yönlü bir enerji taşıcısı olarak bilinmesine rağmen keşfedilecek farklı yönleri olan heyecan verici bir enerji seçeneğidir (Hydrogen, 2020).

Hidrojen enerjisi, çevreye zararlı atıkların salınımını en aza indirir. Temiz ve yenilenebilir kaynaklardan elde edildiğinde oksijen ile yanması sonucu sadece H_2O ve ısı salınımı meydana getirir. Fosil yakıtlara göre daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahiptir. Verimli enerji üretimine ve depolanmasına olanak sağlar. Sera gazı emisyonlarının azaltılmasının ve küresel ısınmanın kontrol altına alınmasına yardımcı olur. Enerji depolama, araçlar, konutlar ve endüstriyel uygulamalar gibi bir çok alanda kullanılabilir.

Hidrojen, kamyon ve otobüs gibi ağır hizmet taşımacılığı için önemli, güvenli, düşük karbonlu bir ulaşım yakıtı olma potansiyeline sahiptir. Hidrojen yakıtlı araçlarda enerji, sıkıştırılmış hidrojen yakıtı olarak depolanır. Bu araçlar, uzun mesafeler yakıt ikmali yapmadan gidebilir ve yakıt ikmali sadece birkaç dakika sürebilir. Hidrojenli araçlarda sera gazı üretimi yok denecek kadar azdır. Tek emisyon H_2O'dur. Hidrojen üretmek için yenilenebilir elektrik enerjisi kullanıldığında, hidrojen ile çalışan bir aracı kullanma süreci neredeyse sıfır emisyonludur (Hydrogen, 2020).

Endüstrinin bazı proseslerinde güç sağlamak için bir ham madde veya yakıt olarak hidrojen kullanılmaktadır. Hidrojen yenilenebilir enerji kaynakları ile üretildiğinde, endüstriyel sürecin karbon emisyonlarını azaltabilecektir (Hydrogen, 2020). Hidrojen, endüstride özellikle, demir, çelik, cam, alüminyum ve yüksek sıcaklık prosesleri için düşük karbonlu enerji sağlayacak şekilde kullanılmaktadır (Hydrogen, 2022).

Isıtma, karbondan arındırılması zor olan başka bir alandır. Tüketici tercihine, bölgeye veya bina tipine göre farklılık gösterebilir. Hidrojen, sıvı veya gaz halinde yüksek enerji yoğunluğunda uzun süre depolanabilir (Hydrogen, 2020). Türkiye'de kış aylarında enerji ihtiyacı, yaz aylarındaki enerji ihtiyacına göre daha fazladır. H_2 (hidrojen gazı), merkezi ısıtma sistemlerinde, kazanlarda, kombilerde, ve ocaklarda alternatif yakıt olarak kullanılabilir.

Hidrojen ekonomisi, H_2'nin geniş ölçekte üretildiği, depolandığı, taşındığı ve kullanıldığı bir ekonomik sistemdir. Bu sistem, H_2'nin temiz enerji üretim kaynaklarında üretilerek, çevre dostu bir yakıt olarak kullanılması ve düşük karbon emisyonlarını sağlaması üzerine kuruludur. Hidrojen ekonomisi, fosil yakıtların yerini alarak düşük karbonlu bir ekonomiye geçiş yapmayı hedefler. Ancak hidrojenin üretimi ve depolanması gibi bazı teknik zorluklar vardır. Bu nedenle, hidrojen ekonomisi henüz gelişmekte olan bir alan olup, gelecekte temiz enerji sistemlerinde önemli bir rol oynayabilir.

IEA (Uluslararası Enerji Ajansı) tarafından "Hidrojen 2021-2025: Eylem Planı" adlı bir rapor yayınlanmıştır. Bu raporda, hidrojenin kullanımını teşvik etmek ve hidrojen ekonomisini geliştirmek için çeşitli öneriler sunulmaktadır (Hydrogen, 2021). Japonya, hidrojen ekonomisi konusunda önde gelen ülkelerden biridir. Ülke, hidrojen enerjisi kullanımını teşvik etmek için bir dizi teşvik programı başlatmıştır. Ayrıca, 2020 Tokyo olimpiyatlarında hidrojen enerjisi kullanımı teşvik edilmiştir (Euronews, 2021). AB hidrojen ekonomisini geliştirmek için "Avrupa Yeşil Mutabakatı" adı verilen bir plan hazırlamıştır. Avrupa Yeşil Mutabakatı, AB' nin hidrojen ekonomisi konusundaki stratejilerini belirlemektedir. Bu plan, hidrojenin kullanımını teşvik etmek, hidrojen ekonomisini geliştirmek ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için bir dizi eylem ön görmektedir (Energy, 2023). AB, hidrojen üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmayı teşvik etmektedir. AB' nin "Ufuk Avrupa" adlı araştırma ve geliştirme programı kapsamında, hidrojen üretimi ve depolama teknolojileri için finansman sağlanmaktadır (Horizon Europe, 2023). AB, hidrojen ekonomisi konusunda farkındalık yaratmak için bir dizi etkinlik düzenlemektedir. AB' de "Avrupa Hidrojen Haftası" adı verilen bir etkinlik, hidrojen teknolojileri konusunda farkındalık yaratmak ve iş birliği olanaklarını artırmak için düzenlenmektedir (Hydrogen Europe, 2023). Almanya' da "Ulusal hidrojen stratejisi" adlı bir plan, hidrojen ekonomisine geçişini belirlemektedir.

Bu plan, hidrojenin kullanımını teşvik etmek, geliştirmek ve sera gazı emisyonlarını azaltmak için bir dizi eylem ön görmektedir (BMWK, 2022). Almanya'da bir dizi hidrojen pilot projesi yürütülmektedir. "H_2 Mobilite" adlı bir proje, hidrojenle çalışan araçların kullanımını teşvik etmek için kurulmuştur. "H_2 Atlas" adlı bir proje ise, ülke genelinde hidrojenin üretim ve dağıtım potansiyelini belirlemeyi amaçlamaktadır (H2 LIVE, 2022). "H_2IT: (Hidrojen İtalya)" girişimi, İtalya' da hidrojen ekonomisini geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu girişim, hidrojen teknolojilerinin araştırılması, geliştirilmesi ve uygulanması için bir platform sağlamaktadır. İtalya, hidrojenle çalışan otobüslerin kullanımını teşvik etmektedir. Roma ve Milano gibi büyük şehirlerde, hidrojenle çalışan otobüsler işletilmektedir. Ayrıca, İtalya'da hidrojenle çalışan trenler de geliştirilmektedir.(H2IT-Italia, 2022). İtalya'da bir dizi araştırma merkezi ve şirket, hidrojen teknolojileri konusunda çalışmalar yürütmektedir. Örneğin, "Enea" adlı bir araştırma merkezi, hidrojenin yenilenebilir enerji kaynaklarından üretimi ve depolanması konusunda araştırmalar yürütmektedir (Hydrogen Europe, 2023a).

1.1.2. Hidrojen Enerjisine Yönelik Türkiye'de Yapılan Çalışmalar

Türkiye'de hidrojen ekonomisi için çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Hidrojen üretim teknolojileri geliştirme, hidrojenle çalışan araçlar üretme ve hidrojen kullanımını artırmaya yönelik projeler yer almaktadır. Türkiye Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, hidrojen ekonomisi için çeşitli projeler yürütmektedir. Bunlar arasında hidrojen üretimi, depolama, dağıtımı ve kullanımını içeren bütüncül bir yaklaşımla Türkiye' nin hidrojen ekonomisine katkı sağlaması amaçlanmaktadır. Bu projeler kapsamında aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Hidrojen teknolojileri stratejisi belirleme projesi, hidrojen ekonomisi için gerekli altyapının ve teknolojilerin belirlenmesini hedeflenmektedir. Proje, Türkiye' de hidrojen teknolojileri ekosistemini güçlendirerek, ülkenin hidrojen ekonomisindeki rolünü artırmayı amaçlamaktadır.

Hidrojene geçiş yol haritası projesinde, Türkiye' nin hidrojen üretim kapasitesini ve kullanımını artırmak için çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar 2021 - 2025 yılları arası Ar - Ge çalışmaları, 2025 - 2030 yılları arası küçük ölçekli entegrasyon, 2030 - 2040 yılları arası yeni altyapılar ile hidrojen konsantrasyonunda artış sağlanması ve 2040 -

2050 yılları arası %100 hidrojene uygun gaz altyapısı faaliyetlerinden oluşmaktadır (GAZMER, 2020).

GAZBİR (Türkiye Doğalgaz Dağıtıcıları Birliği) ise Türkiye' de hidrojen ekonomisi, hidrojen dağıtım ağları, hidrojen üretim ve depolama tesisleri, gibi projelerin hayata geçirilmesi için çalışmalar yapmaktadır (GAZBİR Çalışmalar, 2023). GAZMER (Doğal Gaz Sektörünün Teknik Merkezi) ve GAZBİR işbirlikleri ile kurulan "Clean Gas Türkiye", yenilenebilir kaynaklar kullanılarak iklim değişikliği etkilerinin azaltılması ve karbondan arındırma çalışmalarının yürütülmesi için kurulmuş bir girişimdir. Bu girişim, hidrojen ve biyogazın doğal gaz sistemlerine karıştırılarak enjekte edilmesi gibi, doğal gazın çevresel etkilerini azaltmaya yönelik teknolojilerin geliştirilmesi ve uygulanması için çalışmalar yürütmektedir. Clean Gas Türkiye, doğal gaz ve H_2 karışım gazının endüstriyel brülörlerde denenmesi konusunda laboratuvar deneyleri gerçekleştirmektedir (CLEAN GAS CENTER, 2022).

1.2. Literatür Araştırması ve Tezin İçeriği

1.2.1. Literatür Araştırması

Literatürde yapılmış farklı çalışmalarda hidrojen katkılı doğal gaz yakıtın yanma özellikleri, reaksiyon mekanizmaları ve emisyonlar üzerindeki etkileri, endüstriyel gaz brülörlerinin tasarım optimizasyonlarının deneysel koşulları ve nümerik analizler ile ilgili bilgiler, araştırılmış olup, çalışmaların içerikleri özetle açıklanmıştır.

Büyükakın ve Öztuna (2020) CH_4 ve hava yanması üzerinde H_2'nin etkisi, deneysel ve nümerik yöntemlerle incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, doğal gaz kullanılarak yapılmış ve H_2'nin hacimce oranı değiştirilerek farklı yakıt karışımları sağlanmışır. Nümerik hesaplamalar Ansys Fluent HAD analiz yazılımı ve Eddy yayınım konsept yanma analiz modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, H_2 ile zenginleştirilmiş CH_4'ün karbon emisyonlarını azalttığını ve NO emisyonlarını artırdığını göstermektedir. Özellikle, % 75 H_2 ile zenginleştirilmiş metan gazının NO emisyonları üzerinde ciddi bir etkisi olduğu belirlenmiştir (Büyükakın & Öztuna, 2020).

Öztuna ve Büyükakın (2020) CH_4 yanmasında H_2 ile yakıtı zenginleştirmenin difüzyon tipi alev yapısına ve emisyon değişimlerine olan etkisi nümerik yöntemlerle incelenmiştir. Ansys Fluent yazılımı kullanılarak yapılan nümerik analizlerde, CH_4 ve

hava yanma mekanizması kullanılmış ve H_2'nin oksidasyon mekanizması da eklenmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılarak baca gazı emisyonları ve sıcaklıkları doğrulanmıştır. H_2 ile zenginleştirilen yakıt, difüzyon tipi alev yapısını değiştirmiş ve daha geniş bir alev oluşumuna neden olmuştur. CH_4'e H_2 eklenmesi, ön karışımı artırarak ısıl NO emisyonlarını düşürmüştür. Ancak, H_2' nin oranının artmasıyla birlikte baca gazı sıcaklıkları ve ısıl NO emisyonları artmıştır. Bu çalışma, CH_4 yanmasında yakıtı H_2 ile zenginleştirmenin ısıl NO ve CO_2 emisyonlarını düşürme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Öztuna & Büyükakın, 2020).

Uza (2017) kullandığı endüstriyel bir gaz brülörünün yanma odası geometrisi ve H/Y oranının NO_x emisyonları üzerindeki etkisini deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Brülörün tasarım optimizasyonları, alev borusu ve türbülatör üzerinde yapılan değişikliklerin NO_x emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Nümerik hesaplamalar, doğal gaz brülörünün yanma özelliklerini ve NO_x emisyonlarını daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmeye olanak sağlamıştır. Reaktif analiz çalışmaları, farklı kazan ve brülör geometrileri kullanılarak yapılmış ve yanma emisyonlarının fraksiyonları ile sıcaklık konturları incelenmiştir. Hem deneysel hem de nümerik sonuçlar, tasarım optimizasyonlarının endüstriyel gaz brülöründe NO_x emisyonlarını azaltmak için etkili olduğunu göstermiştir (Uza, 2017).

Ilbas (2005) H_2, doğal gaz ve bu iki gazın karışımının yanması üzerinde ısıl radyasyonun etkisini araştırmıştır. Nümerik çalışmalarda, ısıl radyasyon modelleri kullanılarak, türbülanslı yanma ve NO_x emisyonlarını hesaplamıştır. Radyasyonun yanma süreci üzerindeki etkisi iki farklı modelle hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Radyasyon modellemesi için kullanılan hesaplamalarda daha düşük sıcaklık seviyeleri gözlemlenmiştir. H_2'nin yanması sırasında, ısıl NO_x oluşumu artmıştır. Yakıt bileşiminde bulunan, C (karbon atomu) içermeyen saf hidrojen gazının yanmasıyla HCN oluşmadığından, ani NO_x oluşumu gözlenmemiştir (Ilbas 2005).

Ilbas vd. (2005) bir model yakıcıda türbülanslı ön karışımsız H_2'nin difüzyon alevinin nümerik hesaplama ve deneysel çalışmalarını yapmıştır. HAD kullanılarak H_2 yakıtından doğalgaza kadar dört farklı gaz yakıt üzerinde yanma hesaplamaları yapılmıştır. Yanma sürecinde türbülansın etkisi ve yanma tepkimeleri göz önünde bulundurularak yanma emisyonları hesaplanmıştır. Nümerik analiz sonuçları, deneysel

ölçüm sonuçlarıyla doğrulanmış ve H_2 katkısıyla alev sıcaklığının arttığı, doğal gaz katkısıyla ise azaldığı görülmüştür. Hava kademelendirme kullanımı zengin ve fakir yanma bölgelerinin oluşmasına ve düşük NO_x emisyonlarının oluşmasına neden olmuştur. Doğal gazdan H_2 yakıta geçişte ise CO_2 (karbon dioksit) ve CO (karbon monoksit) oluşumu sıfırlanmış, dekarbonizasyon gerçekleşmiştir (Ilbas vd., 2005).

Ilbas vd. (2006) H_2, CH_4 ve farklı karışım oranlarıyla gaz yakıtlarının farklı ϕ (eşdeğerlik oranı) yanması sonucunda oluşan laminer alev hızları ölçülmüştür. Yüksek hızlı Schlieren fotoğrafçılığı tekniği kullanılarak alev hızları ölçülmüştür. Nümerik analizlerde, Chemkin reaksiyon mekanizması kullanılarak yanma hızlarının genleşme oranları hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, H_2 oranının artmasıyla yanma hızının ve tutuşma limitlerinin arttığını göstermiştir. Yakıt tiplerinde eşdeğerlik oranının artmasıyla alev hızları önce artmış, sonra düşmüştür. Bu çalışma, hidrojen-metan karışım gazının mevcut yakma tesislerinde rekabetçi bir alternatif yakıt olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Ilbas vd., 2006).

Ilbas vd. (2015) sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış ön karışımlı yakma sistemlerinde H_2 yanma alev karakteristikleri ve emisyonları nümerik yöntemler kullanarak incelemiştir. HAD kodları kullanılarak nümerik hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılarak uyum göstermiştir. Sınırlandırılmış ön karışımlı sistemde maksimum alev sıcaklığı 2000 K' e kadar yükselmiştir ve hava fazlalık katsayısı arttıkça alev sıcaklığı da artmıştır. Sınırlandırılmış ön karışımlı sistemde, sınırlandırılmamış sistemden daha yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir. NO_x emisyonları açısından, ön karışımlı H_2 alevi, difüzyon H_2 alevine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Çalışma, H_2'in hem sınırlandırılmış hem de sınırlandırılmamış ön karışımlı yakma sistemlerinde bir yakıt olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Ilbas vd., 2015).

Ilbas ve Yılmaz (2011) bir model yakma sisteminde, farklı karışım oranlarında H_2 ve CH_4 içeren yakıt karışımlarını türbülanslı yanma ile yakarak, emisyon değerlerini incelemişlerdir. Yanma tepkimesi sonucunda oluşan, CO ve O_2 gibi emisyonları bir gaz analizörü ile ölçülürken, NO_x emisyonları ise bir NO_x analizörü ile ölçülmüştür. Yakıt karışımdaki H_2 miktarı arttıkça, tepkimedeki H_2 oranı artmış, yanma sonucu daha fazla ısı enerjisi açığa çıkarak, daha yüksek sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Yakıt karışımındaki H_2 miktarı arttıkça, CO kirletici emisyon oranı düşerek, yanma verimi belirgin bir şekilde

artmıştır. Yakıt karışımındaki H_2 arttıkça ölçülen NO_x emisyonları artmıştır. Çalışma, bir doğalgaz brülöründe herhangi bir değişiklik yapılmadan, H_2 ve CH_4 karışımlı yakıt ile yakılabileceğini göstermiştir (Ilbas & Yılmaz, 2011).

Merlo vd. (2014) O_2 (oksijen gazı) ile zenginleştirilmiş yakma havasının CH_4 ile gerçekleşen ön karışımsız dönel türbülanslı yanma işlemi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneyler, bir su soğutmalı yanma hücresinde yapılmış ve baca gazı bileşimleri ölçülmüştür. Ayrıca dönme dinamikleri ve emisyonlar da değerlendirilmiştir. O_2 eklenmesi, yanma verimini ve alev kararlılığını arttırmıştır. Dönme sayısının artması da alev stabilitesini iyileştirmiştir. O_2 oranının artması CO_2 emisyonlarını artırırken, CO emisyonlarını azaltmıştır. O_2 oranının artması genellikle NO_x emisyonlarını artırmıştır. Ayrıca girdap yoğunluğunun artması, ters akış hızlarını artırmıştır (Merlo vd., 2014).

Zhao vd. (2008) CH_4 yanmasına H_2 katkısıyla oluşan etkiler incelenmiştir. Deneyler, atmosfer basıncında ve belirli bir karışım debisi altında gerçekleştirilmiştir. Yanma sonucunda tutuşma ve yanma sıcaklıklarının H_2 katkısıyla sürekli olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, H_2 oranının artmasıyla CO emisyonlarının azaldığı ve H_2 yakıtına geçildiğinde sıfırlandığı görülmüştür (Zhao vd., 2008).

Cellek ve Pınarbaşı (2018) doğal gaz yakıt ile çalışan bir türbülanslı konvansiyonel gaz brülörünün, laboratuvar deney kazanında yanmasını incelemişlerdir. Deneysel veriler, nümerik hesaplamalar için kullanılmış ve Ansys Fluent yazılımı kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Yanma analizleri için Eddy yayınım yöntemi ve CH_4-hava iki kademeli tepkime mekanizmaları kullanılmış ve deney verileriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Farklı yakıt bileşimlerinde dört farklı geometrik model incelenmiş ve deney verileriyle karşılaştırılmıştır. Düşük türbülanslı akışlarda NO_x emisyonlarını hesaplamak için gelişmiş k - ε türbülans modeli kullanılmıştır. H_2 içeren yakıtlarda CO_2 ve CO gazı oranı azalmış ve H_2 yakıtına geçişte ise sıfırlanmıştır. Yakıt bileşimindeki H_2 oranının artması NO_x emisyonlarını önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca, H_2 katkısıyla doğalgaz tüketimi azalmıştır (Cellek & Pınarbaşı, 2018).

Ilbas ve Sahin (2017) bir yakıcıda türbülatör açısı ve biyogaz yakıta H_2 katkısının yanma özellikleri üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Türbülatör açısı, 15° ve 45° arasında farklı değerlerle ayarlanmıştır. HAD analizi nümerik yöntemleri kullanılarak çalışma yapılmış ve analizlerde PDF (olasılık yoğunluk fonksiyonu) yöntemi ve k - ε standart

türbülans modelleri kullanılmıştır. 15° türbülatör açısında hesaplanan sıcaklık ve emisyon profilleri, deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Nümerik hesaplama sonuçlarının deney sonuçları ile doğrulanması sonrasında türbülatör açıları olan 30° ve 45° için HAD analizleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. H_2, biyogazın yanma özelliklerini iyileştirmek için kullanılmış ve H_2 katkısının sıcaklık değerlerini yaklaşık % 15 oranında artırdığı görülmüştür. Türbülatör açısı değişimine bağlı olarak alev bölgesi konumu değişmiş ve CO ve CO_2 emisyonları artmıştır. Radyal sıcaklık değerleri incelendiğinde H_2 katkısının biyogazın yanma performansını olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir (Ilbas & Sahin, 2017).

Halter vd. (2007) yakıta hacimce H_2 eklenerek CH_4 ve hava ön karışımlı alevin karakteristiğine etkilerini, laminer ve yüksek basınçlı türbülanslı akışta incelemişlerdir. Alev önü bölgesi, alev yüzey yoğunluğu ve anlık alev önü ısıl dağılım kalınlığındaki değişimler Mie alev topoğrafisi ve Rayleigh yayınımı yöntemleriyle ölçülmüştür. Hem deneysel sonuçlar hem de nümerik hesaplamalar kullanılarak doğrulama yapılmıştır. H_2 katkısı, laminer yanma hızını artırırken, alevin gerilmeye karşı bağımlılığında bir düşüşe neden olmuştur. CH_4 alevine az miktarda H_2 eklenmesi, alev özelliklerinde değişikliklere sebep olmuştur. H_2 ilavesiyle alevin küresel yüksekliği azalmış ve alevin ortalama yüksekliği düşmüştür. H_2 mol fraksiyonu arttıkça alev yüzey yoğunluğu ve ortalama alev kalınlığı artmıştır. Türbülanslı alev tabakası kalınlığı ise hidrojen ilavesiyle azalmıştır (Halter vd., 2007).

Capurso vd. (2020) H_2 ve doğal gaz karışımının girdaplı bir BERL brülöründe yakılmasıyla alev karakteristiğini ve CO emisyonlarımı incelemişlerdir. Nümerik hesaplamalarda HAD analizleri yapılmıştır. Ön karışımsız ve kısmi ön karışımlı yanma modelleri ile farklı türbülans modelleri ve kimyasal kinetik mekanizmaları kullanılmıştır. Nümerik hesaplamalar, kısmi ön karışımlı yanma modelinin daha iyi sonuçlar verdiğini ve Reynolds gerilme türbülans modeliyle birlikte kullanıldığında daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir. Yakıt olarak, hacimce % 70 doğal gaz ve % 30 H_2 kullanıldığında, yakıt bileşimindeki H_2 zenginleştirmesi sıcak bölgenin küçülmesine ve CO emisyonlarının düşürülmesini sağlamıştır (Capurso vd., 2020).

Syred vd. (2012) girdaplı brülörlerde hidrojen içeren yakıt karışımlarının patlama ve geri tepme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Farklı yakıt karışımlarında girdap

katsayısını etkileri incelenmiştir. Daha düşük girdap sayılarında dış duvar sınır tabakası boyunca gerçekleşen geri tepme ve daha yüksek girdap sayılarında merkezi resirkülasyon bölgesinin genişlemesiyle gerçekleşen geri tepme olarak iki farklı geri tepme fiziksel olayı gözlenmiştir. H_2 içeren yakıtların yakılmasıyla, resirkülasyon bölgesinden hızlanarak geri tepme meydana gelmektedir. Farklı girdaplı brülörler arasında en düşük basınç düşümü düşük girdaplı sistemde elde edilmiştir. Bu çalışma, farklı oranlarda H_2 yakıt karışımlarıyla girdaplı brülörlerin kullanılmasıyla geri tepme davranışının önemli ölçüde azaltılabileceğini ve NO_x emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabileceğini göstermektedir (Syred vd., 2012).

1.2.2. Tezin İçeriği

Literatür araştırmasının yapılmasıyla H_2 katkılı doğal gaz yanma uygulamaları ile ilgili teknik bilgiler sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında, endüstride kullanılan bir proses gaz brülörü olan Ecostar FPB 200 'ün mevcut ekipmanları, SAB (standart alev borulu mevcut türbülatör) türbülatörü ve prototip geliştirilen NT (prototip türbülatör) türbülatörü ile 150 kW ısıl güçte, λ=1.2, λ=1.2 ve λ=1.3 katsayılarında, hacimce % 100 DG, % 95 DG - % 5 H_2 , % 90 DG - % 10 H_2, % 85 Doğal gaz - % 15 H_2 ve % 80 DG - % 20 H_2 karışım yakıtlarında sağlanan yanma, deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. 30 farklı konfigürasyon oluşturup, deneysel ve nümerik olmak üzere toplamda 60 farklı çalışma yapılarak, brülör işletimi, basınç, sıcaklık, emisyon ve yanma reaksiyon değişimleri araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalar PLC kontrollü doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney sisteminde, nümerik çalışmalar ise Ansys Fluent 17.0 HAD yazılımında, reaktif analizler ile yapılmıştır. Deneysel ölçüm verileri, nümerik analiz hesaplama değerleri ile karşılaştırılıp, tez çalışmasının çıktıları sağlanmıştır.

BÖLÜM 2

YANMANIN TEMEL KAVRAMLARI

2.1. Yanma

Yanma, yakıt içeriğindeki yanabilir bileşenlerin, oksitleyici ile belirli bir sıcaklık ve basınçta tepkimeye girerek ısı açığa çıkarmasıdır. Günümüzde yanma için genellikle, fosil bir yakıt türü olan, H (hidrojen atomu) ve C'den oluşan,C_xH_y (hidrokarbonlar) kullanılır. C_xH_y doğada, katı ,sıvı ve gaz fazında bulunur. CH_4, C_2H_6 (etan gazı), C_3H_8 (propan gazı), ve C_8H_{18} (oktan) sık kullanılan C_xH_y yakıtlara örnek verilebilir.

Yanma tepkimesinin başlaması için yakıtların bir oksitleyiciye ve bir tutuşma kaynağına ihtiyacı vardır. Oksitleyici olarak genellikle hava kullanılmaktadır. Havanın bileşiminde hacimce yaklaşık % 21 oranında O_2 bulunmaktadır. Farklı oksitleyicilere F (flor gazı) ve CI (klor gazı) örnek verilebilir. Yanma, genellikle ekzotermik (ısı enerjisi açığa çıkaran) ve nadiren endotermik (ısı enerjisi ihtiyacı olan) bir kimyasal tepkimedir. Hidrokarbonların yanması ekzotermik iken, NH_3 (amonyak) yanması endotermiktir.

Oksitleyici, kimyasal reaksiyonlarda diğer bileşenleri oksitlendirerek elektronları alarak veya oksijen ilave ederek oksidasyonu tetikleyen bir bileşendir. Bu nedenle oksitleyici madde, oksidasyon yoluyla diğer bileşenleri oksitler. Yanma sürecinde havadaki O_2, yanıcı maddeyi oksitleyici madde olarak kullanarak yanma reaksiyonunu başlatır ve devam etmesini sağlar.

Sitokiyometrik hava, bir yakıtın tam yanması için gereken minimum hava miktarına stokiyometrik veya teorik hava denir. Bir yakıt teorik hava ile tamamen yandığında, yanma gazlarında birleşmemiş O_2 bulunmaz. Teorik hava, kimyasal olarak

doğru miktarda hava olarak adlandırılır. Bir yakıtın tamamen teorik hava ile yakıldığı ideal yanma işlemi, o yakıtın stokiyometrik veya teorik yanması olarak adlandırılır (Çengel vd., 2014).

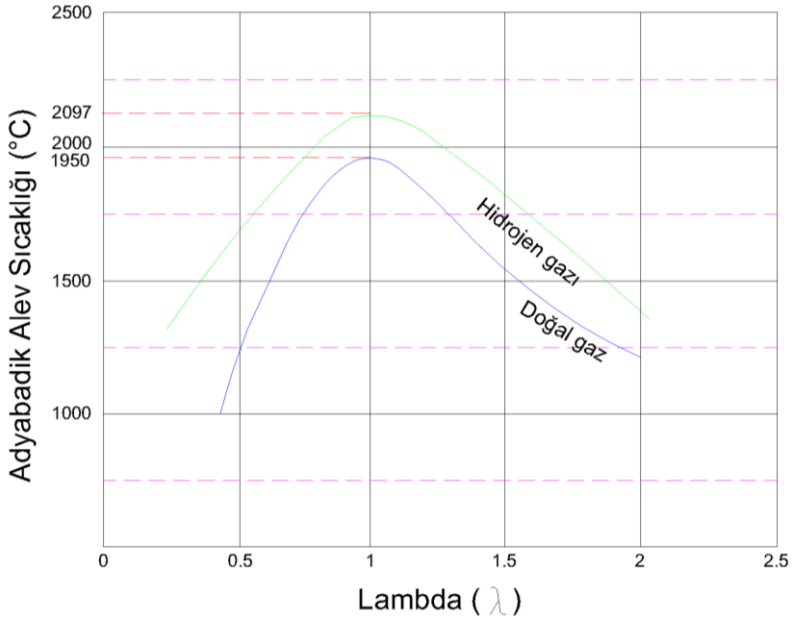
Tam yanma, yakıt ile belirlenen sitokiyometrik havanın reaksiyonuna denir. Bu durum, tamamlanmış bir reaksiyondur. Tam yanma için, yanma havasının yetersiz olduğu koşullarda baca gazlarında yanmamış bileşenler bulunabilir. Ancak oksijen ve yanmamış bileşenlerin birlikte bulunması mümkün değildir. Bu durumda, eksik yanma durumu ortaya çıkar (Wünning, 2007).

Eksik yanma, tam yanmanın gerçekleşmediği durumdur. Tam yanma genellikle teknik olarak istenmeyen bir durumdur. Teknik yanmanın ayrımı yanma havası miktarıdır. Yanma reaksiyonu, sitokiyometrik havadan daha fazla hava ile sağlanırsa aşırı sitokiyometrik veya fazla havalı yanma veya zayıf yanma olarak adlandırılır. Yanma reaksiyonu, sitokiyometrik havadan daha az hava ile sağlanırsa havaca fakir veya düşük havalı yanma, sitokiyometrik havadan daha fazla hava ile sağlanırsa, havaca zengin yanma olarak adlandırılır (Cellek & Pınarbaşı, 2018). Eksik yanmanın görüldüğü reaksiyonlar sonucu oluşan emisyonlarda, O_2 ve yanmamış yakıt oranları ölçülebilir. Ayrıca eksik yanmada is ve kurum oluşur (Cellek & Pınarbaşı, 2018).

Tutuşma sıcaklığı, yanma reaksiyonunun başlamasında, alev, kıvılcım veya sıcak yüzey gibi bir ısı kaynağı varlığında tutuşacağı ve yanmaya başlayacağı minimum sıcaklıktır. Bu sıcaklık yakıta, maddenin kimyasal bileşime, fiziksel durumuna ve basınç gibi farklı faktörlere bağlıdır.

Tutuşma aralığı, yakıtın oksidizer ile yanabilmesi için gerekli olan minimum ve maksimum yakıt konsantrasyonlarını ifade eder. Bu aralık, yakıtın oksidizer ile kararlı bir yanma oluşturacak şekilde doğru oranda karıştırılması gerektiğini gösterir. Tutuşma aralığı, her bir yakıt için farklıdır. Yakıtın kimyasal ve fiziksel özellikleri ve basınç gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Örneğin, doğal gazın yanması için hava-yakıt karışımdaki oranı hacimsel olarak % 5 - % 15 arasında olmalıdır. H_2 ise %4 - % 75 seviyesindedir (Cellek & Pınarbaşı, 2018). Tutuşma aralığı, endüstriyel uygulamalarda önemli bir parametredir ve güvenli işlemler ve ekipman tasarımı için dikkate alınması gereken bir faktördür.

Adyabadik alev sıcaklığı: Çevreye ısı kaybı olmadan bir yanma reaksiyonu ile elde edilebilecek teorik maksimum sıcaklıktır. Girenler ve ürünlerin sabit basınçta olduğu ve yanma reaksiyonu tarafından üretilen tüm ısının ürünlerin sıcaklığını artırmak için kullanıldığı varsayılarak hesaplanır. Gerçekte, çevreye ısı kaybı, eksik yanma ve diğer faktörler, gerçek alev sıcaklıklarının düşmesine neden olabilir (Warnatz vd., 2006). Doğal gazın ve hidrojen gazının λ katsayısına bağlı adyabadik alev sıcaklığı değişimi Şekil 2.1'de verilmiştir.

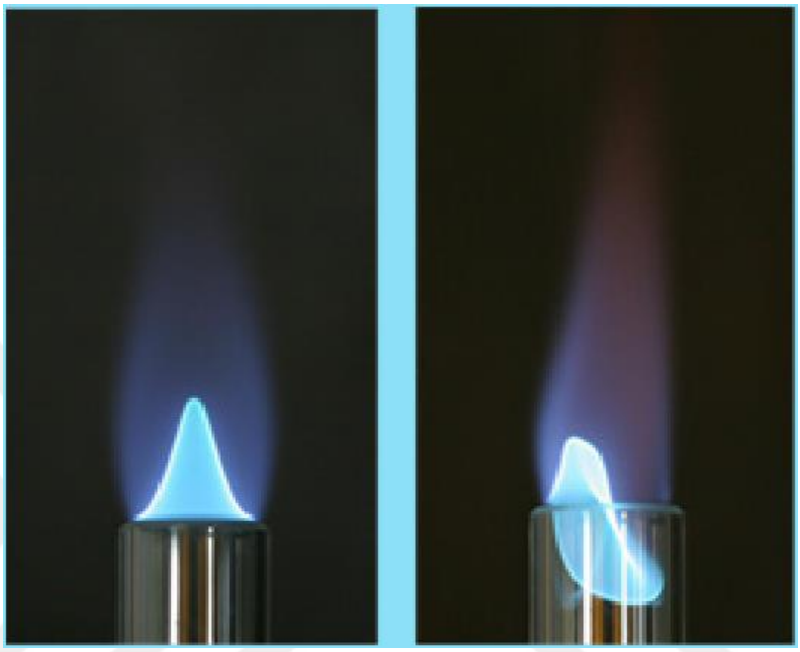


Şekil 2.1. Hidrojen gazı ve doğal gazın λ katsayısına bağlı adyabadik alev sıcaklığı değişimi (Uza 2017 ve Baukal, 2012).

Laminer alev hızı, yakıt ve oksitleyici karışımının ihmal edilebilir türbülansa sahip bir sistemdeki yayılma hızını ifade eder. Literatürde S_L olarak gösterilir. Laminer alev hızı büyük ölçüde yanma işleminin kimyasal kinetiği tarafından kontrol edilir ve sıcaklık, basınç ve yakıt bileşimi gibi faktörlere bağlıdır (Kuo, 1986).

Türbülanslı alev hızı, alevin türbülanslı bir yakıt ve oksitleyici karışımı içinde yayılma hızını ifade eder. Literatürde S_T olarak gösterilir. Türbülans, karıştırmayı geliştirerek ve etkili alev alanını artırarak yanma hızı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Türbülanslı alev hızı, türbülans yoğunluğu, Re (Reynolds sayısı) ve yakıt enjeksiyon hızı gibi faktörlere bağlıdır (Kuo, 1986).

Geri Tepme, Brülörden çıkan gaz hızının alev hızından daha düşük olması durumunda meydana gelir. Alev önünün brülöre doğru hareket etmesine neden olur. Yakıt ve oksitleyici ön karışımlıysa, alev brülör muhafazasının içinde yanabilir ve bu durum patlama potansiyeli yaratır (Baukal, 2013). Bir brülörde H_2 karışımlı yanmada yaşanabilecek en büyük risk, geri tepme eğilimidir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Bir brülör yakma uygulamasında (solda) doğal gaza H_2 karıştırılması sonucu oluşan geri tepme (sağda) (Gersen, 2020).

Wobbe endeksi, Bir yakma sisteminde farklı bileşim değerlerine sahip gaz yakıtların yanma enerji çıkışını ifade etmek için kullanılır. WI (Wobbe endeksi) (2.1) denkleminde ifade edilir. Birimi MJ/m³ veya kcal/m³ olarak ifade edilebilir.

$$\mathrm{WI} = \frac{\mathrm{HHV}}{\mathrm{SG}} \tag{2.1}$$

$$\mathrm{SG} = \frac{\rho_{\mathrm{STP}}}{\rho_{\mathrm{hava,STP}}} = \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{M_{hava}}} \tag{2.2}$$

SG spesifik yer çekimi (2.2), ρ_{STP} standart koşullarda (0 °C, 101,325 kPa) gaz yoğunluğu, $\rho_{\mathrm{hava,STP}}$ standart koşullarda havanın yoğunluğu, M gazın molar kütlesi ve $\mathrm{M_{hava}}$ havanın molar kütlesidir(yaklaşık 28.96 kg/kmol).

2.2. Gaz Yakıtlar

Gaz yakıtlar, doğal ve yapay gazlar olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Doğal gazlar, petrol yataklarından veya kömür yataklarının yakınında doğal olarak oluşan gazlardır. Ana bileşenleri CH_4 olan doğal gaz, diğer bileşenler olarak C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, N_2, CO_2 ve He içerir. Yapay gaz yakıtlar ise, genellikle kömür gazlaştırma işlemiyle elde edilen gazlardır. Bu gazlar arasında H_2, CO, CO_2 ve CH_4 gibi bileşenler yer alır. Ayrıca, gaz yakıtları arasında endüstride yaygın olarak kullanılan diğer gazlar arasında C_3H_8, C_4H_{10}, O_2, C_2H_2 ve doğal gazın işlenmesi sonucu elde edilen gazlar da bulunur. Gaz yakıtlarının avantajları arasında yüksek ısıl değerlerinin, temiz yanma özelliklerinin, kolay taşınabilirliklerinin ve düşük S içeriklerinin bulunması sayılabilir. Bu özelliklerinden dolayı, gaz yakıtları endüstriyel uygulamalarda, evsel ısınma sistemlerinde, elektrik üretiminde ve taşıtlarda sıklıkla kullanılır (Telli, 1998).

2.2.1. Doğal Gaz

Doğal gaz, genellikle petrol yatakları ve kömür yataklarının yakınında doğal olarak oluşan gazdır. Ana bileşeni CH_4 olan doğal gaz, diğer bileşenler olarak C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, N_2, CO_2 ve He içerir. Doğal gazın içeriği ülkelere ve sahip olduğu kaynaklara göre değişiklik gösterir. Doğal gazın yüksek ısıl değeri, düşük kirletici emisyonları, düşük maliyeti ve düşük CO_2 emisyonları gibi avantajları bulunmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı, doğal gaz endüstride ve evlerde ısınma, pişirme, elektrik üretimi ve taşımacılık gibi birçok farklı amaç için kullanılmaktadır. Ayrıca, doğal gazın üretimi ve taşıması kolay olduğu için, çevre dostu bir enerji kaynağı olarak da kabul edilir (Telli, 1998).

Doğal gaz üretimi genellikle petrol arama ve çıkarma işlemleri sırasında gerçekleştirilir. Gazın bileşimindeki diğer gazları ve kirleticileri ayıklamak için yapılan işleme doğal gazın işlenmesi denir. İşleme işlemi çöktürme, H_2S giderme, CO_2 giderme, bileşen ayırma ve kurutma aşamalarından oluşur. Bu aşamalar, gazın yanıcılığını ve kalitesini arttırır. İşlenen doğal gaz boru hatlarıyla taşınır veya sıvılaştırılarak taşınabilir (Telli, 1998).

2.2.2. Metan Gazı

Metan, kimyasal formülü CH_4 olan, en basit C_xH_y bileşiğidir. Doğal gazın ana bileşenidir. Renksiz, kokusuz ve zehirsizdir. Atmosferik gazlar arasında en yüksek sera

gazı etkisine sahiptir. CH_4 ana kaynakları arasında C_xH_y kaynaklı gazlar, organik atıkların ayrışması ve çürümesi, su bataklıkları ve diğer sulak alanlar, yanardağlar ve diğer jeolojik kaynaklar yer almaktadır. CH_4, enerji üretimi, ısıtma ve yakıt olarak kullanılırken, aynı zamanda üretim, depolama ve taşıma sırasında kaçakları engellemek için kontrol edilmesi gereken bir sera gazıdır (Akyıldız,2008).

2.2.3. Hidrojen Gazı

Hidrojen, sadece bir proton ve bir elektrondan oluşan en basit element olarak kabul edilebilir. Aynı zamanda, evrende ve yer kabuğunda en çok bulunan elementtir. Hidrojen gazı, literatürde H_2 ile gösterilir. Bolluğuna ve basitliğine rağmen, hidrojen yeryüzünde doğal olarak oluşmaz ve su, kömür ve petrol gibi bileşik formdaki diğer elementlere birleşik olarak bulunur (Yılmaz, 2006). Örneğin, O_2 birleştiğinde H_2O meydana getirirken, C birleştiğinde CH_4, kömürü ve petrolü oluşturmaktadır. Ayrıca, gelişen her türlü maddenin (biyokütle gibi) içeriğinde bulunmaktadır (Dincer,2021).

Hidrojenin farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Benzin, doğal gaz, metanol ve propan gibi hidrokarbon bileşiklerinin içeriğinde bulunan hidrojen, hidrokarbonlardan ayırarak elektroliz veya buhar reformu olarak bilinen ısıl işlem yoluyla üretilebilir. Buhar reformu, günümüzde hidrojen üretmek için en ucuz yöntemdir ve çoğu hidrojen bu şekilde doğal gazdan üretilmektedir. Endüstride, metan içindeki C'yi ayırmak için H kullanılır. Ancak, metan fosil yakıt olduğu için, bu üretim süreci sera gazı emisyonlarının oluşmasına ve küresel ısınmaya neden olur (Yılmaz,2006). Hidrojen üretimi için bilinen bir diğer yöntem ise elektrolizdir. Bu işlem, su bileşiğinin elementlerine ayırmak için bir elektrik akımının sudan geçirilmesini içerir. Hidrojen ve oksijen elementlerinin elde edilmesini sağlar. Hidrojen, negatif olarak yüklü katot ve oksijen pozitif olarak yüklü anot tarafından ayrıştırılır. Hidrojen analizi son derece saftır ve yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik kullanıldığından emisyon oluşturmaz. Elektroliz halen çok pahalı bir işlemdir. Hidrojen üretmenin farklı yöntemleri de vardır. Termokimyasal su ayrıştırma yönteminde su, yüksek sıcaklıkta reaksiyona girer ve hidrojen gazı ve oksijen gazı olarak ayrıştırılır. Bu yöntem, nükleer enerji kaynaklarından veya güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen ısı enerjisi ile çalışabilir. Biyokütle gazlaştırması, organik materyallerin ısıl olarak ayrıştırılması işlemidir. Bu işlem sırasında, biyokütleden H_2, CO gazı ve diğer gazlar üretilir. Bu gazlar daha sonra

ayrıştırılarak H_2 elde edilir. Bazı mikroorganizmalar ve yeşil bitkiler, fotosentez yoluyla H_2 üretebilirler. Bu işlemde, H_2O ve CO_2 güneş ışığından enerji alarak H_2 ve O_2 ayrıştırılır. Ancak bu yöntem, H_2 üretimi için henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır ve araştırma aşamasındadır (Nikolaidis, 2017).

Hidrojen, fosil yakıtlara yüksek yoğunlukta bulunabilen bir enerji kaynağıdır. Hidrojen en hafif elementtir ve normal sıcaklık ve basınçta bir gaz halindedir. Hidrojen, diğer elementlerden ayrıldıktan sonra yakıt olarak yakılabilir veya elektriğe dönüştürülebilir. Dekarbonizasyon (karbondan arındırma) özelliğine sahiptir. Örneğin, Doğal gaz yakıtlı bir yakma sisteminde hacimce hidrojen oranı arttıkça CO_2 ve CO emisyonları düşmektedir. Buna karşın, yanabilirlik ve hidrojen korkusu üstesinden gelinmesi gereken bir efsanedir. Günümüz teknolojisinde kullanılan bazı brülörlerde % 100 H_2 kullanılabildiği bilinmektedir. Yakma uygulamalarında H_2 gazı yakıt oranı arttıkça alev çekirdeğindeki pik sıcaklığı artar. Alev pik sıcaklığının artması ise ısıl NO_x oluşumunu arttırır. H_2 oranı arttıkça ani NO_x oluşumu düşmektedir. Yakıt kaynaklı NO_x oluşumuna hidrojenin doğrudan etkisi yoktur. Teknikte, brülör veya bir yakma sisteminde NO_x oranını düşürebilmek farklı yöntemler kullanılabilmektedir (Baukal,2021).

2.2.4. Hidrojen Gazı Karışımlı Doğal Gaz Yakıtı

Hidrojenin doğal gaz ile karıştırılarılarak, yoğun bir dekarbonizasyon geçişi sağlanmaktadır. Ayrıca elektrik şebekesine kıyasla doğal gaz altyapısı, daha büyük hacimleri daha uzun mesafelerde daha az maliyetlerle taşıyabilmektedir. Avrupa'da karbondan arındırmayla ilgili çalışmaların çoğunda doğal gaz kullanımındaki azalma, gaz altyapısı ihtiyaçlarının sonradan azaldığını göstermektedir. Ancak yenilenebilir ve düşük karbonlu hidrojene geçişle, Avrupa genelinde uygun maliyetli bir karbondan arındırma olarak kullanılabilecektir (Warnatz vd., 2013). Türkiye'de hidrojen kullanımının arttırılması için yeşil hidrojen üretim maliyetini 2035 yılında 2,4 ABD doları / kgH ve 2053'e kadar 1,2 ABD doları / kgH altına düşürmek, elektrolizör kurulu güç kapasitesinin ise 2030 yılında 2 GW, 2035 yılında 5 GW ve 2053 yılında 70 GW'a ulaşması hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda, mevcut mevzuatlar, gözden geçirilerek, hidrojen üretimi, taşıma, depolama için uygun hale getirilecektir. Yeşil hidrojen üretiminde ve depolanmasında yerlilik oranı arttırılacaktır. Karbon salımının azaltılması zor olan sektörler (kimya, demir-çelik, ulaşım, cam, seramik vb.) öncelikli olmak üzere

ilgili tüm sektörlerde yeşil hidrojenin kullanımının yaygınlaştırılması sağlanacaktır. Mevcut doğal gaz hatlarına hidrojen karıştırılmasıyla ısı sektörünün kademeli olarak dekarbonizasyon çalışmalarına katkı sağlanacaktır (Ceylan, 2023).

Metan gazına az miktarda hidrojen gazı ilave edilmesi, yanma verimliliğini artırabilir ve bazı olumsuz yanma özelliklerini düzeltebilir. Hidrojenin yüksek yanma hızı, yanma süresinin kısaltılmasına ve düşük yanma sıcaklıklarına neden olurken, metanın yüksek yanma sıcaklığı ve yavaş yanma hızı sağlayarak, yanma süresini uzatır. Bu nedenle, H_2 ve CH_4 karışımı, yanma süresi ve sıcaklığı açısından daha dengeli bir yanma karakteristiği gösterir. Ayrıca, hidrojenin yüksek yanma hızı, yanma sırasında oluşan NO_x emisyonlarını azaltabilir. Bu nedenle, hidrojen-metan karışımları, daha yüksek yanma verimliliği, daha düşük NO_x emisyonları ve daha düşük sıcaklık değerleri gibi avantajlara sahip olabilirler (The Editors of Encyclopaedia Britannica,2023).

Bir brülörde, birim hacim hidrojeni yakabilmek için gereken hava debisi, birim hacim doğal gazı yakabilmek için gereken hava debisinden düşüktür. Bir brülörde, birim ısıl güçte, doğal gaz yakıt içeriğindeki hidrojen gazı oranı arttıkça, bu yakıtı yakabilmek için gereken hava debisi düşer. Bir doğal gaz yakıtlı brülörde, hidrojen gazı karştırılarak yakıldığında daha düşük toplam basınçlı fan kullanımı sağlanabilir. Brülörü, birim ısıl güç sağlamak için işleten fan sistemi , hidrojeni yakmak için daha düşük debide hava sağlayacağından, elektrik tüketimi de düşürülen debiye bağlı olarak düşürülebilir.

Doğal gazın içeriğinde H_2 oranını arttırılarak yakılması sonucu yanma ürünü olan CO_2 gazı ve kirletici bir emisyon türü olan CO oranları, yakıt karışımındaki H_2 oranı arttıkça, düşer ve H_2 yakıtında sıfırlanarak dekarbonizasyon işlemi tamamlanır. Dekarbonizasyon, karbon emisyonlarının azaltılması ve atmosferdeki CO_2 seviyelerinin düşürülmesi amacıyla çeşitli faaliyetlerin uygulanmasıdır. Bu faaliyetler arasında fosil yakıt kullanımının azaltılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artırılması, enerji verimliliğinin artırılması, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve karbon nötr hale gelmek için farklı teknik uygulamalar sağlanır. Dekarbonizasyon, iklim değişikliği ile mücadele için önemli bir adımdır ve dünya genelinde birçok ülke tarafından benimsenmiştir.

H_2 belirli oranlarda doğal gaz ile karıştırılarak yakıldığında, alev hızı artacağından, maksimum alev sıcaklığı ve ısıl NO_x oranı doğrudan artar. Isıl NO_x

reaksiyonları havanın içeriğinde bulunan O_2 ve N_2 arasında gerçekleşir. Isıl NO_x, yanma sonucu oluşan alev sıcaklığı düşürülerek sağlanabilir. İçten baca resirkülasyonu, hava ve gaz kademelendirme yöntemleri uygulanarak yanmanın geciktirilmesi sağlanabilir. N_2, O_2 ve C_xH_y radikalleri arasında hızlı reaksiyon sonucunda oluşan ani NO_x, doğal gaz içeriğinde hidrojen gazı oranı arttıkça düşürülebilir. Yakıt içeriğinde bulunan N radikallarinin oksidasyonu ile oluşan yakıt NO_x oluşumunun H_2 ile doğrudan etkisi yoktur (Baukal,2021).

2.3. Gaz Yakıtlarda Yanma ve Alev Tipleri

Gaz yakıtlarda yanma, bir kimyasal reaksiyon sürecidir. Gaz yakıt ve oksitleyici (genellikle atmosfer havası) karıştırılarak veya ayrı bölümlerden yanma odası içerisine taşınarak, bir ısı kaynağı kullanılarak yanma reaksiyonu başlatılabilir. Yanma reaksiyonu başlamadan önce gaz yakıt ve oksitleyici karıştırılma şekline göre yanma ve alev tipi değişir.

2.3.1. Ön Karışımsız (Difüzyon) Yanma ve Alev Tipi

Yakıt ve oksitleyici yanma odasına ayrı hatlardan verilip, sağlanan yanmaya ön karışımsız veya difüzyon tipi yanma denir. Ön karışımsız yanma sonucu oluşan aleve ise ön karışımsız veya difüzyon tipi alev denir (Şekil 2.3a). Yakıt ve oksitleyici alev önünde sitokiyometriye ulaşır. Alev önünde bir karaktestik hız oluşmaz (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,2012). Yanma ürünleri difüzyon ile yanma bölgesinden uzaklaşır. Bütün yanma reaksiyonlarında olduğu gibi tam ve verimli bir yanmanın sağlanabilmesi için yakıt ve oksitleyicinin yanma odası içerisinde iyice karışması ve reaksiyona girmesi gerekmektedir. Ön karışımsız yanma, ön karışımlı yanmalara kıyasla daha kararlı alevler oluşturabilir. Bu tür alevler ön karışımlı alevlere göre daha uzun alev boyuna ve daha düşük sıcaklık dağılımına sahiptir (Baukal,2012).

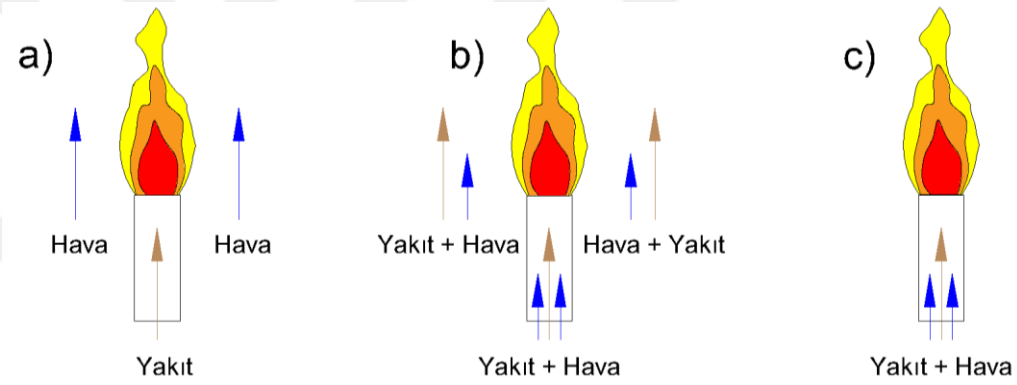
2.3.2. Kısmi Ön Karışımlı Yanma ve Alev Tipi

Yanma başlamadan hemen önce yakıt ve oksitleyicinin belirli bir kütlesi yanma öncesi karıştırılır. Yakıtın kalan diğer kütlesi ise ayrı bir yoldan yanma odasına, yanma bölgesine gönderilir. Yakıtın hem ön karışımlı ve hem de yanma odası içerisine doğrudan gönderilerek sağlanan yanmaya, kısmi ön karışımlı yanma denir (Şekil 2.3b). Kısmi ön karşımlı yanmanın oluşturduğu aleve ise kısmi ön karışımlı alev denir. Kısmi ön karşımlı

alevler, ön karışımlı ve ön karışımsız alevler arasında bir alev uzunluğuna ve sıcaklık dağılımına sahiptir (Baukal,2012).

2.3.3. Ön Karışımlı Yanma ve Alev Tipi

Yakıt ve oksitleyici (genellikle atmosfer havası) karıştırılarak veya ayrı bölümlerden yanma odası içerisine taşınarak, bir ısı kaynağı kullanılarak yanma reaksiyonu başlatılır. Yanma reaksiyonu başlamadan önce gaz yakıt ve oksitleyici karıştırılarak sağlanan yanma sonucu oluşan aleve ön karışımlı alev denir (Şekil 2.3c). Alev önü yanmış ve yanmamış bölge arasında düzensiz bir yüzey oluşturur. Karakteristik bir hızla alev önü dağılımı gerçekleşir (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,2012). Ön karışımlı alevler, kısmi ön karışımlı ve ön karışımsız alevlere göre daha kısa ve daha yoğun olurlar (Baukal,2012).



Şekil 2.3. (a) Ön karışımsız, (b) kısmi ön karışımlı, (c) ön karışımlı yanma tipleri.

2.4. Metan ve Hidrojen Gazının Yanma Stokiyometrisi

Yakıt ile kuramsal oksitleyicinin reaksiyona girerek tamamen yanması sonucu oluşan yanma ürünlerinin meydana geldiği ideal yanma işlemine, stokiyometrik veya kuramsal yanma denir. Bu ideal karışım maksimum alev sıcaklığını verir ve yanma sonrası açığa çıkan ısı enerjisi, ürünleri ısıtmak için kullanılır (Riello S.p.A 2001, Libretexts, 2020).

CH_4'ün, O_2 ile stokiyometrik yanması sonucu, yanma ürünü olarak sadece CO_2 ve H_2O oluşurken, H_2'nin O_2 ile stokiyometrik yanması sonucu yanma ürünü olarak sadece H_2O oluşur.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O \qquad (2.3)$$

$H_2 + 0{,}5O_2 \rightarrow H_2O$ (2.4)

Bir C_xH_y yakıtın oksitleyici ile eksik yanması sonucu, yanma ürünleri olarak CO_2, H_2O, C ve CO açığa çıkar. Yanma ürünlerindeki CO nedeniyle, tam yanmaya göre daha az ısı enerjisi açığa çıkar. CO kirletici ve zehirli bir gazdır. CH_4 gazının oksiyen gazı ile eksik yanma reaksiyonu:

$CH_4 + 0{,}5O_2 \rightarrow CO + 2H_2O$ (2.5)

$CH_4 + O_2 \rightarrow C + 2H_2O$ (2.6)

CH_4'ün, atmosferik hava ile stokiyometrik yanmasında atmosfer havasının hacimce yaklaşık % 21 O_2 ve yaklaşık % 79 N_2 kabul ederek yanma reaksiyonu:

$CH_4 + a(O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow bCO_2 + cH_2O + dN_2$ (2.7)

$H_2 + e(O_2 + 3{,}76\ N2) \rightarrow f(H_2O) + gN_2$ (2.8)

$CH_4 + 2(O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow CO_2 + 2H_2O + 7{,}52\ N_2$ (2.9)

$H_2 + 0{,}5(O_2 + 3{,}76\ N_2) \rightarrow H_2O + 1{,}88N_2$ (2.10)

(2.9) Denklemine göre bir hacim CH_4 stokiyometrik oranda tam yanması için iki hacim O_2 gerekmektedir. (2.10) Denklemine göre ise bir hacim H_2'nin stokiyometrik oranda tam yanması için yarım hacim O_2 gerekmektedir. Bu durum CH_4 ve H_2 karışımlı kompozit yakıtta hacimce H_2 oranı arttıkça stokiyometrik oranda tam yanma sağlanması için gereken hava oranının azaldığını göstermektedir.

2.4.1. Teorik Hava Gereksinimi

Tam yanma için gereken hava miktarı, stokiyometrik hava miktarı olarak adlandırılır. 1 Nm³/h metan gazının, stokiyometrik tam yanması için 9,52 Nm³/h hava gerekli iken 1 Nm³/h hidrojen gazının stokiyometrik tam yanması için 2,38 Nm³/h hava gerekmektedir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Metan gazı ve hidrojen gazının bazı fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması.

Fiziksel Özellik	CH4	H2	Oran (CH4 / H2)
Yoğunluk (kg/m³) (Turns, 1996)	0,648	0,0813	7,97
Stokiyometrik yakma havası gereksinimi (m³/m³)	9,52	2,38	4
Laminer alev hızı (m/s) (Turns, 1996)	0,4	2,1	0,19
Alt ısıl değer (MJ/Nm³) (Ackland, 2019)	34	10,23	3,32
Üst ısıl değer (MJ/Nm³) (Ackland, 2019)	37,73	12,1	3,12
Alt tutuşma limiti (%) (Glassmann, 2014)	5	4	1,25
Üst tutuşma limiti (%)(Glassmann, 2014)	15	75	0,2
Ateşleme sıcaklığı (°C) (Reed, 1986)	632	572	1,1
Spesifik yer çekimi (SG) (Baukal, 2021)	0,554	0,07	7,91
Wobbe endeksi (MJ/Nm³)	50,69	45,73	1,11

2.4.2. Eş değerlik Oranı

Gerçek koşullardaki H/Y oranının, stokiyometrik koşullardaki H/Y oranı ile eşdeğerlik oranı tanımlanır (Riello S.P.A, 2001).

$$\Phi = \frac{(H/Y)_{Stokiyometrik}}{(H/Y)_{Gerçek}} \tag{2.11}$$

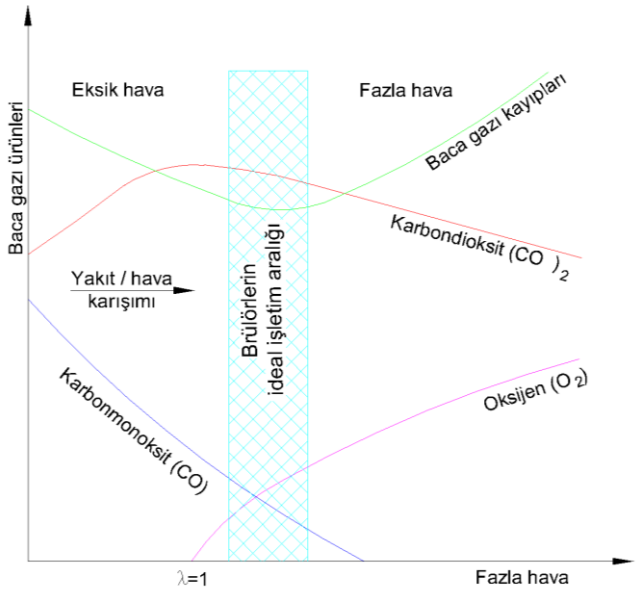
(2.11) Denkleminde hava ve yakıt karışımı için $\Phi > 1$ ise zengin karışım, $\Phi < 1$ fakir karışım ve $\Phi = 1$ stokiyometrik karışım olarak ifade edilir.

2.4.3. Fazla Hava

Stokiyometrik hava gereksinimi üzerindeki artış yüzdesidir.(2.12) denklemi ile ifade edilir. Gerçek deney koşullarında genellikle stokiyometrik hava gereksinimi yanma sağlanamadığı için fazla havaya ihtiyaç duyulmaktadır.

$$\text{Fazla Hava} = \frac{(H/Y)_{Gerçek} - (H/Y)_{Stokiyometrik}}{(H/Y)_{Stokiyometrik}} \tag{2.12}$$

Yanma reaksiyonu sırasında üretilen ısı enerjisinin bir bölümü fazla havada depolandığından, fazla hava kullanımı her zaman yanma prosesinin verimini düşürür. Fazla hava baca gazı emisyonlarının değişimi Şekil 2.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Baca gazı ürünlerinin fazla havaya bağlı değişimi.

2.4.4. Lambda Sayısı

Gerçek H/Y oranının, stokiyometrik H/Y oranına, oranı lambda sayısı ile ifade edilir. λ sembolü ile gösterilir. (2.13) denklemi ile ifade edilir.

$$\lambda = \frac{(H/Y)_{Gerçek}}{(H/Y)_{Stokiyometrik}} = \frac{1}{\Phi}$$

(2.13)

Eğer bir yanma reaksiyonunda, λ >1 ise yakıtça fakir karışım, λ <1 ise yakıtça zengin karışım sağlanır. Yanmada fazla hava kullanımı alev sıcaklığını ve yanma odası sıcaklığını düşürür. Fazla havadaki aynı ısıl gücü elde etmek için daha fazla yakıt yakılması gerekir (Baukal,2013b, Strehlow,1984b).

2.4.5. Isıl Değer

Yakıtın ısıl değeri, sıvı yakıtlarda, 1 kg sıvı yakıt başına, gaz yakıtlarda ise 1 Nm³ gaz yakıt başına yanma sırasında açığa çıkan ısı enerjisidir. H_u ile ifade edilir. Baca gazlarındaki H_2O'ya bağlı olarak iki tip ısıl değer vardır.

Alt ısıl değer, yakıtın tam yanması durumunda açığa çıkan enerjinin, yakıtın içindeki H_2O gaz halinde bırakarak serbest bırakılan ısı enerjisi miktarını ifade eder. LHV

olarak belirtilir. LHV, yakıtın tam yanması sonucu açığa çıkan ısı enerjisi ile buharlaşma ısısını hesaba katarak hesaplanır (Riello S.P.A, 2001).

Üst ısıl değer yanma sürecindeki tüm suyun yanma işleminden sonra tamamen yoğuşarak sıvı halde olduğu durum için serbest bırakılan ısı enerjisi miktarını ifade eder. HHV olarak belirtilir. Tüm yanma ürünlerinin yanmadan önceki sıcaklığa kadar soğutulacağı şekilde elde edilir (Riello S.P.A, 2001).

HHV ile LHV ilişkisi (2.14) denkleminde belirtilmektedir (Baukal, 2013b):

$$HHV = LHV + H_W.\left(\frac{n_{H_2O\ çıkan}}{n_{yakıt\ giren}}\right) \quad (2.14)$$

H_W : Suyun buharlaşma ısısı

$n_{H_2O\ çıkan}$: Buharlaşan suyun mol sayısı

$n_{H_2O\ çıkan}$: Yakılan yakıtın mol sayısı

Isıl değer, kcal/m³ biriminde hacimsel olarak veya kcal/kg gibi kütlesel olarak sağlanabilir. Isıl değerler yakıt bileşimine ve türüne göre değişebilir. Farklı gaz yakıtların LHV ve HHV 'si Çizelge 2.2'de gösterilmektedir.

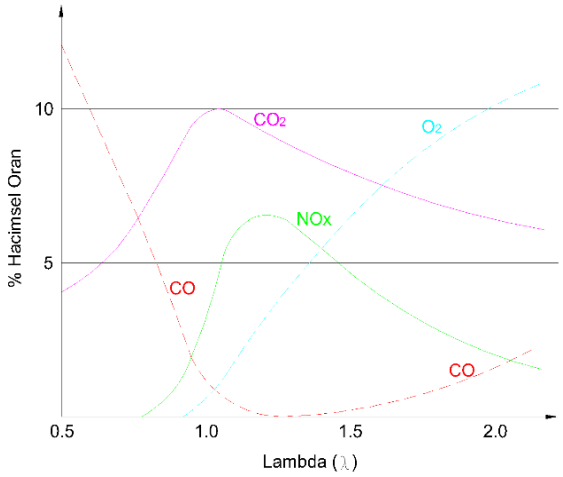
Çizelge 2.2. Farklı gaz yakıtlara ait 15 °C' de HHV ve LHV değerleri (Speight,2018).

Gaz Yakıt	HHV (kcal/m³)	LHV (kcal/m³)
Doğal gaz	8455	7565
Hidrojen	2893	2448
Metan	8998	8099
Etan	15869	14507
Propan	22891	21102
Bütan	28703	26495
Pentan	35431	32743
Karbonmonoksit	2875	2875

2.5. Doğal Gaz ve Hidrojen Gazının Yanma Emisyonları

Tez çalışmasının bu bölümünde doğal gaz ve H_2' nin yanma reaksiyonu sonucunda açığa çıkan emisyonlar incelenmeştir. Doğal gazın yanması sonucunda ana yanma ürünleri olarak, CO_2 ve H_2O oluşur. CO_2, doğal gazın yanmasından yayılan birincil sera gazıdır ve küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine önemli bir etkisi vardır.

Kirletici emisyon olarak ise CO, NO_x, CH_4 oluşur. Doğal gazın eksik yanma reaksiyonu sonucu oluşan CO, renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. CO oranının artması eksik ve verimsiz bir yanmayı ifade eder. Bir brülörde, yanma sonucu ölçülen CO oranının belirli bir sınırın üzerine çıkması, talep edilen birim ısı gücü için gereken yakıt tüketimini arttırır. NO_x, doğal gazın yanma reaksiyonu sırasında yüksek sıcaklıkta ara reaksiyonlar ile üretilir. İnsan sağlığına ve çevreye zararlı kitletici gazlardır. Doğal gaz esas olarak CH_4 oluşmasına rağmen, bir kısmı yanma işlemi sırasında yanmadan çevreye salınabilir. CH_4, güçlü bir sera gazıdır ve küresel ısınmaya etki potansiyeli CO_2'den daha fazladır. Bir yakma sisteminde baca gazı ürünleri fazla havaya göre değişebilir (Şekil 2.5). Ayrıca, doğal gazın yanması sonucunda SO_2 (sülfür dioksit) gazı, PM (parçacıklı madde) ve VOC (uçucu organik bileşikler) oluşabilir. SO_2, doğal gaz yanmasının bir yan ürünüdür ve bitki ve hayvan yaşamına zarar vermektedir. PM, yanma sırasında açığa çıkabilecek küçük kül, kurum ve diğer malzemeleri içerir. PM, özellikle solunum problemi olan kişiler için insan sağlığına zararlı olabilir. VOC' ler, doğal gazın yanması sırasında açığa çıkabilmektedir. İnsan sağlığına ve çevreye zararlı olabilecek yer seviyesinde ozon ve duman oluşumuna katkıda bulunabilen organik kimyasallardır. H_2'nin yanma reaksiyonu sonucu oluşan ana ürün H_2O'dur. H_2O çevre ve insan sağlığı için zararsızdır. H_2' nin yanmasında oluşan ana kirletici NO_x'dur. H_2'nin kaynağına bağlı olarak, yanma sırasında eser miktarda farklı kirletici emisyonlar üretilebilir. Örneğin, H_2, buhar CH_4 reformasyonu kullanılarak doğal gazdan üretilirse, yan ürünler olarak az miktarda CO, CO_2 ve diğer sera gazları üretilebilir. Eğer H_2'nin üretimi yenilenebilir enerji kaynaklarından suyun elektroliz yöntemiyle sağlanırsa, yanma sonucu karbon kaynaklı emisyon salınımı gerçekleşmez. Doğal gaz yanma sistemlerinde H_2 karıştırılarak oluşan yanmada dekarbonizyon sağlanarak, sera gazlarının salınımı düşürülür.



Şekil 2.5. Baca gazı ürünlerinin fazla havaya bağlı değişimi.

2.5.1. CO_2 (Karbondioksit)

Hidrokarbonların yanması sonucu açığı çıkan ana ürünlerden biridir. Yanma sonucu oluşan CO_2 oranı, açığa çıkan enerji ile doğru orantılıdır. Dünya atmosferinde doğal olarak bulunan renksiz, kokusuz bir gazdır. En önemli sera gazlarından biridir. Atmosferdeki ısıyı hapsederek, küresel ısınmaya ve iklim değişikliğine etki eder. CO_2, şeker ve diğer organik bileşikleri üretmek için fotosentez sürecinde kullanıldığı için bitki büyümesi için önemlidir. Aşırı miktarda CO_2 insanlar ve çevre üzerinde zararlı etkilere sahiptir. CO_2 atmosfere salındığında,H_2O ile reaksiyona girerek H_2CO_3 (karbonik asit) oluşturur. Bu durum, okyanus asitlenmesine ve deniz ekosistemleri üzerinde olumsuz etkilere yol açar. Bir yanmada H_2 yakıt oranı arttıkça, CO_2 emisyon oranı düşer. Sera gazı salınımı düşürülür.

2.5.2. H_2O (Su Buharı)

H_2O, O_2 varlığında bir yakıt yandığında üretilebilen yanma ürünlerinden biridir. C_xH_y bir yakıt veya H_2 yandığında, havadaki O_2 ile reaksiyona girerek birincil yanma ürünü olarak oluşur. Çevreye ve insan sağlığına doğrudan zararlı bir etkisi yoktur.

2.5.3. CO (Karbonmonoksit Gazı)

CO, C_xH_y gibi yakıtların eksik yanması sonucu oluşan kirletici bir emisyon türüdür. Renksiz, kokusuz ve tehlikeli bir gazdır. Solunum yoluyla alınan CO kan dolaşımındaki hemoglobine bağlanarak vücudun dokularına taşınabilen oksijen miktarını

azaltır. Bu durum baş ağrısı, baş dönmesi, mide bulantısı, kafa karışıklığı veya yüksek oranda maruz kalınması durumunda ölüme sebep olabilir. Yanma sistemlerinde CO salınımını azaltmak veya sıfırlamak için yakıt ve hava ön karışımının artırılması sağlanabilir. Ayrıca, doğal gaz gibi C_xH_y yakıtlara H_2 karıştırılarak, CO düşümü sağlanabilir. Çünkü H_2'nin hava ile yanması sonucu C içerikli emisyonlar oluşmaz. Dekarbonizyon işlemi gerçekleşerek, daha çevre dostu ve yanma verimi yüksek bir yanma sağlanır.

2.5.4. O_2 (Oksijen Gazı)

Yakıtın fazla hava ile yanması sonucu oluşur. λ arttıkça, yanma ürünlerinde O_2 emisyonu artar. Yanma ürünlerinde O_2 oranı arttıkça maksimum alev sıcaklığı düşer. Bu durum yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan NO_x düşmesine sebep olabilir.

2.5.5. NO_x (Azot Oksitler)

NO_x, yanma reaksiyonu sırasında yüksek sıcaklıkta yanma karışımının içinde bulunan azot ve oksijenin endotermik reaksiyona girmesi sonucu oluşur. NO_x, NO (azot oksit), NO_2 (azot dioksit) ve N_2O (di azot monoksit) bileşiklerinden oluşan genel bir terimdir. NO kolayca atmosferik havadaki O_2 ile birleşerek NO_2 oluşturur. NO_2 atmosferik havadaki H_2O ile birleşerek HNO_2 (nitröz asit) ve HNO_3 (nitrik asit) oluşturur. Çok önemli bir kirletici emisyon olan NO_x, fotokimyasal duman oluşumuna öncü madde olarak, asit yağmuru oluşumu ve ozon tabakasının incelmesine sebep olur. Doğalgazın yanması sonucu oluşan, kirletici emisyon olarak NO_x ve CO insan sağlığı ve çevre için son derece tehlike oluşturmaktadır. NO_x yanma proseslerinin tamamında, yoğun olarak NO formunda, çok düşük konsantrasyonlarda ise NO_2 ve N_2O formunda oluşur (Miller & Bowman, 1989, Speight, J. G. 2018).

2.5.5.1. NO_x Oluşum Mekanizmaları

C_xH_y yakıtlı yanmada NOx genellikle ısıl NOx , ani NOx ve yakıt NOx mekanizmaları ile oluşmaktadır (Miller & Bowman, 1989, Speight, J. G. 2018).

Isıl NO_x mekanizması, yanma reaksiyonu sırasında alev sıcaklıklarının 1500 K' nin üzerine ulaşmasıyla, moleküler N_2'nin atmosferik havadan ısıl yolla ayrışmasıyla oluşur. Oksijence zengin yanmada ve sıcak havalı yanmada alev sıcaklıkları ve sıcaklığa

bağlı ısıl NO_x oluşumu artar. Özellikle yakıta bağlı N_2 içeren yakıtların yanmasında NO_x oluşumunun büyük bir oranını oluşturur (Miller & Bowman, 1989, Speight, J. G. 2018). Isıl NO , Zeldovich reaksiyon mekanizmasıyla açıklanmaktadır (Ilbas, 2005b).

$$O + N_2 \rightarrow N + NO \quad (2.15)$$

$$N + O_2 \rightarrow O + NO \quad (2.16)$$

$$N + OH \rightarrow H + NO \quad (2.17)$$

Kütlenin korunumu denklemi NO hesaplamaları için konveksiyon, difüzyon, NO ve ilgili türlerin enerji üretimi ve tüketimi dikkate alınarak NO oluşumu (2.18) denklemiyle ifade edilir (Merlo, 2014).

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

Ani NO_x mekanizmasında, yakıttaki C_xH_y ile yakma havasındaki N_2 ani bir şekilde reaksiyona girer ve HCN (hidrosiyanik asit) oluşturur. HCN yakma havasındaki N_2 ve O_2 ile reaksiyona girerek NO_x oluşturur (Miller & Bowman, 1989). Ani NO_x oluşumu, Fenimore mekanizmasıyla açıklanmaktadır(Ilbas, 2005b). Fenimore'un NO_x oluşum reaksiyonları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir.

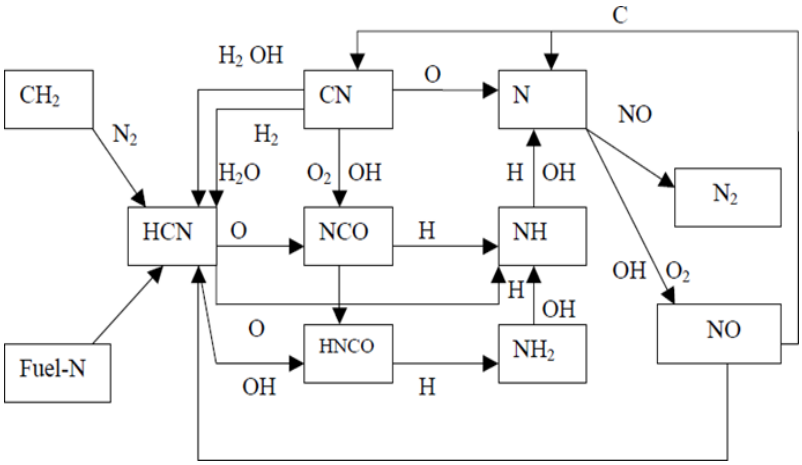
$$CH + N_2 \rightarrow HCN + N \quad (2.19)$$

$$N + O_2 \rightarrow NO + O \quad (2.20)$$

$$HCN + OH \rightarrow CN + H_2O \quad (2.21)$$

$$CN + O_2 \rightarrow NO + CO \quad (2.22)$$

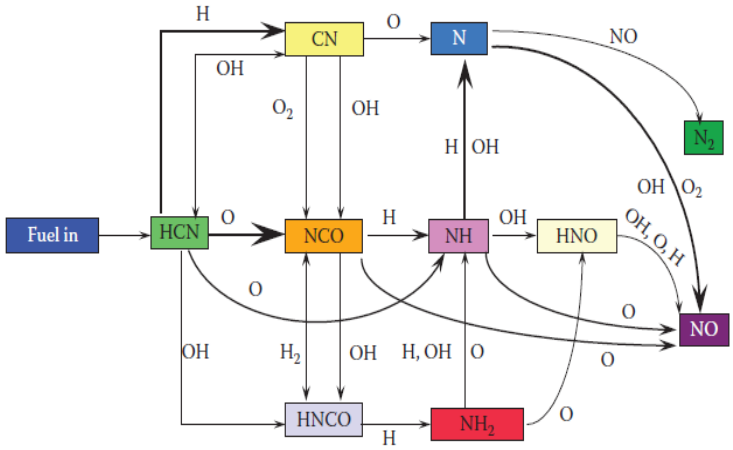
Ani NO_x oluşumu, çoğu C_xH_y yanma koşullarında, özellikle düşük sıcaklıklarda, kısa kalma sürelerinde ve yakıtça zengin koşullarda önemlidir. Toplam NO_x oluşumuna ani NO katkısı, yakıt içeriğinde C varlığı nedeniyle CH_4 yanması ve H_2-CH_4 karışımlı bileşik yakıt yanmalarında dikkate alınmalıdır. Hızlı mekanizma reaksiyonları çok karmaşıktır (Şekil 2.6) ve yüzlerce reaksiyondan oluşur (Uza,2017).



Şekil 2.6. Ani NO_x oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (Uza,2017).

Isıl NO_x ve ani NO_x oluşumları farklı mekanizmalarda gerçekleştiği için ayrı hesaplanabilir.

Yakıt NO_x mekanizması, yakıt içeriğinde bulunan N_2 havadaki O_2 ile oksitlenmesi sonucu oluşur. Sıvı yakıtların ve katı yakıtların yanması sırasında, yakıt NO_x nedeniyle %20 - 50 oranında NO_x oluşur. Doğal gaz, CH_4, C_3H_8 ve H_2 gibi gaz yakıtların yanmasıyla yakıt NO_x oluşmaz(Uza, 2017). Yakıt NO_x oluşum mekanizması Şekil 2.7' de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Yakıt NO_x oluşum mekanizmasının şematik gösterimi (Uza, 2017).

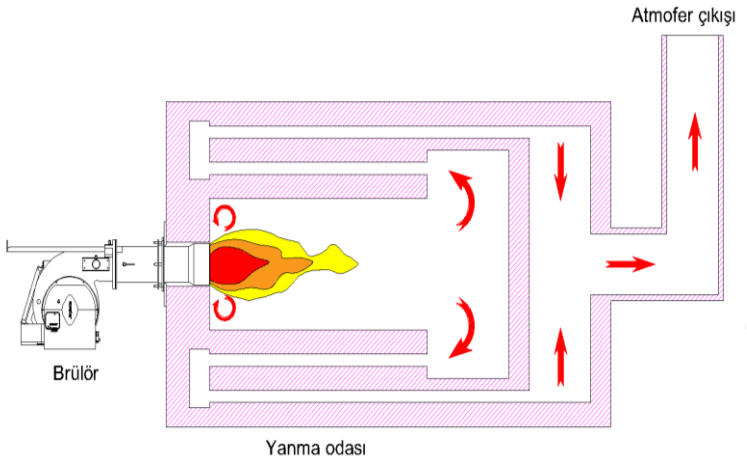
Yakıt NO_x yakıtın içerdiği azota bağlı olarak (2.25) denkleminde genel olarak ifade edilebilir.

$$R_xN + O_2 \rightarrow NO, NO_2, CO_2, H_2O, \text{diğer türler} \quad (2.25)$$

2.5.5.2. NO_x Düşürme Teknikleri

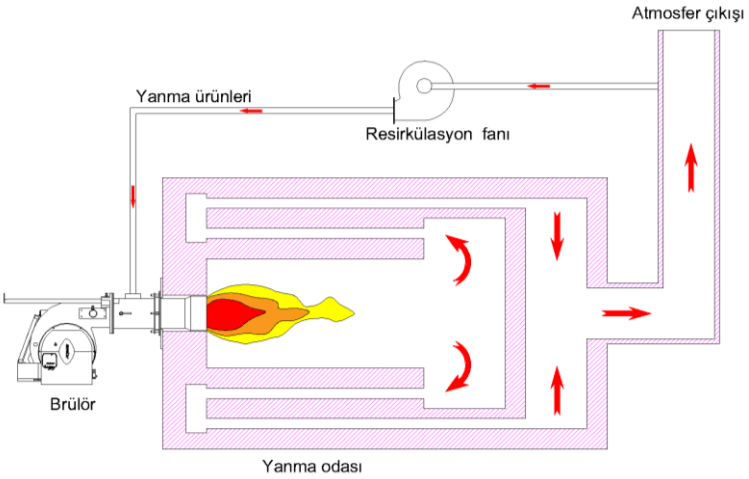
NO_x düşürme teknikleri yanma proseslerinin geliştirilmesiyle sağlanmaktadır. Bilinen teknikte yaygın uygulanan NO_x düşürme teknikleri, IFGR (içten baca gazı resirkülasyonu), EFGR (harici baca gazı resirkülasyonu), kademeli yanma ve ön karışımlı yanmadır.

IFRG tekniğinde NO_x emisyonları yanma odası içinde yanma bölgesinde baca gazlarının resirkülasyonu ile düşürülür. Yanma bölgesinin sınırlarında alevin başladığı yere doğru resirkülasyon akımları oluşur (Şekil 2.8). Resirkülasyon akımları başta ısıl NO_x olmak üzere NO_x emisyonlarının düşürülmesine fayda sağlar.



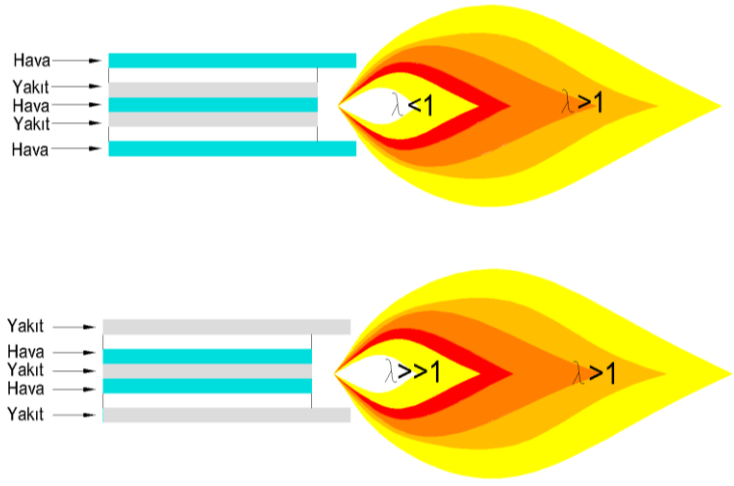
Şekil 2.8. Bir gaz brülöründe içten baca gazı IFRG uygulaması.

EFGR, düşük NO_x emisyonları elde etmek için etkili ve düşük maliyetli bir tekniktir. Bacadan brülörün emişine geri beslenen baca gazları yanma odasına geri gönderilir (Şekil 2.9). Bu işlem ile maksimum alev sıcaklığı düşürülerek ve yanma reaksiyon hızı yavaşlatılarak NO_x emisyonları düşürülür. NO_x emisyonları düşürme miktarı, brülörün tipine, yanma odasına, yakma havası sıcaklığına ve diğer faktörlere bağlıdır.



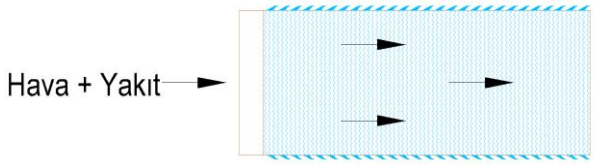
Şekil 2.9. Bir gaz brülöründe EFGR uygulaması.

Kademeli yanma, NO_x emisyonlarını düşürmek için en etkili tekniklerden biridir. Brülörde, hava ve yakıt kademelendirme, ayrı veya birlikte kullanılabilir. Bu yöntemde, hava ve yakıtın farklı debilere ayrılması sağlanır. Hava veya yakıt birincil, ikincil ve üçüncül olmak üzere farklı yollardan yanma odasına verilir (Şekil 2.10). Hava ve yakıt debileri kontrol edilerek alev çekirdeğinin maksimum sıcaklığı ve NO_x emisyonları düşürülür.



Şekil 2.10. Kademeli yakıt ve hava verme uygulaması.

Ön karışımlı yanma, tekniğinde hava ve gaz yakıt yanma başlığı öncesinde homojen olarak karıştırılır (Şekil 2.11). Düşük ısıl güçler için tercih edilen bir yöntemdir. Homojen karışım sonunda yanma başlığı üzerinde kısa boylu alevler oluşur. Alev sıcaklıkları konvansiyonel brülörlerin maksimum alev sıcaklıklarına göre daha düşük olduğu için NO_x emisyonları düşüktür. Yüksek ön karışım özelliği ile yüksek yanma verimi sağlanır.



Şekil 2.11. Ön karışımlı yanma uygulaması.

2.6. Kirletici Emisyon Limitleri ve Yönetmelikler

Endüstride bir brülör üretildiğinde, yanma deneyleri ile atmosfere salınan kirletici emisyonların miktarı ölçülür. Bu emisyonların miktarı, çevresel etkileri azaltmak amacıyla sınırlandırılır. Brülör tasarımı ve işletimi, kirletici emisyon limitleri ve yönetmelikleri göz önünde bulundurularak optimize edilir. Emisyonların mümkün olan en düşük seviyede olması sağlanır. Bu sebeple, emisyon düşürme çalışmaları, çevre ve insan sağlığı açısından önemlidir.

Bu tez çalışmasında gaz yakıtlı bir brülör işletimi incelendiğinden, gaz yakıtlı cebri çekişli brülörler için yürürlükte olan TS EN 676:2020 standardının belirttiği CO ve NO_x kirletici emisyon limitleri kullanılmıştır.

Gaz yakıtlı cebri çekişli bir brülörde yanma sonucu oluşan kirletici CO limiti 100 mg/kWh (93 ppm) belirlenmiştir. Kirletici NO_x gazı için limitler Çizelge 2.3'de belirtilmiştir (TS EN 676, 2020).Kirletici NO_x ve CO gazı için Çizelge 2.4' te dönüşüm değerleri belirtilmiştir (TS EN 676, 2020).

Çizelge 2.3. TS EN 676:2020 NO_x sınıfları ve limitleri (TS EN 676, 2020).

SINIF	mg/kWh	mg/m³	ppm
1	170	169.59	82.56
2	120	119.71	58.28
3	80	79.1	38.85

Çizelge 2.4. Doğal gaz için kirletici CO ve NO_x emisyonları dönüşümleri (Uza,2017).

% 3 O_2	Birimler	G20		G25	
		mg/kWh	mg/MJ	mg/kWh	mg/MJ
NOx	1 ppm	2.059	0.572	2.098	0.583
	1 mg/m³	1.002	0.278	1.021	0.284
CO	1 ppm	1.253	0.348	1.278	0.355
	1 mg/m³	1.002	0.278	1.021	0.284

Türkiye'de hava kalitesi sınır değerleri "Isınmadan kaynaklanan hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği" adlı yönetmelik ile belirlenmektedir. Bu yönetmelik, ısınma amaçlı kullanılan tesislerin hava kirliliğinin kontrolüne ilişkin esasları belirlemektedir. Gaz yakıtlı yanma emisyonlarının ısıl güce bağlı olarak minimum ve maksimum limit

değerleri Çizelge 2.5'de belirtilmektedir. Hava kalitesi bu limit değerlerine göre değerlendirilmektedir. Limit değerlere uyumun sağlanması için tesislerin belirli periyotlarda ölçümler yapması ve ölçüm sonuçlarını ilgili kurumlara bildirmesi gerekmektedir.

Çizelge 2.5. Gaz yakıtlı yanmada NO_x, karbonmonoksit CO, hidrokarbon C_xH_y oranları (Wünning, 2011).

İlgili Standart	Isıl Güç (kW)		Azotoksit (NOx) (NO2 olarak) (mg/kWh)	Azotoksit (NOx) (NO2 olarak) (ppm - %3 O2)	Karbonmonoksit (CO) (mg/kWh)	Hidrokarbon (CxHy) (ppm) (CH4 - olarak)
TS* ve ya EN*	20<IG≤1000		260	127	1070	20
	30<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

(EN)* Avrupa Birliğinin ilgili standartları

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

BÖLÜM 3

ENDÜSTRİ FIRINLARI

Endüstriyel fırınlar, farklı proseslerde malzemelerin ısıl işlem, dövme, kurutma ve ergitme gibi işlemler için kullanılan özel ısıtma ekipmanıdır. Yüksek sıcaklıklara dayanım sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır ve tipik olarak yüksek ısıl verimlilik sağlamak için refrakter ve yalıtım malzemeleri kullanılarak üretilirler. Proses fırınlarının refrakter malzemeleri uygulamaya bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Proses fırınlarında gerekli ısıl gücün sağlanabilmesi için kömür, linyit, motorin, fuel-oil, doğal gaz ve H_2 yakıtlı brülörler kullanılmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisi ile çalışan fırınlar çoğunlukla kullanılmaktadır (Usalan, 2015).

Farklı endüstriyel prosesler için farklı tipte endüstriyel fırın vardır. En yaygın endüstriyel fırın türlerinden bazıları şunlardır:

3.1. Yüksek Fırınlar

Yüksek fırınlar, çeşitli hammaddelerin (genellikle demir cevheri, kok, taş kömürü, kireç taşı ve dolomit) eritilmesi için kullanılan büyük ölçekli bir endüstriyel fırınlardır. Yüksek fırınlar, demir ve çelik endüstrisi için kritik öneme sahiptir ve dünya çapındaki metal üretiminin önemli bir bölümünü oluştururlar.

Yüksek fırınlar, büyük ölçekli demir ve çelik üretiminde kullanıldığı için, önemli miktarda enerji tüketirler ve büyük miktarda sera gazı emisyonu üretimine neden olabilirler. Bu nedenle, yüksek fırınların verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak için sürekli olarak iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır (Tiwari vd., 2005).

3.2. Sürekli Fırınlar

Sürekli fırınlar, malzemelerin yüksek sıcaklıklarda sürekli olarak ısıtılmasını gerektiren imalat ve endüstriyel işlemlerde kullanılır. Bu fırınlar, genellikle bir üretim hattının parçası olarak sürekli bir şekilde ısıtılması veya işlenmesi gereken büyük miktarlardaki malzemeleri işlemek üzere tasarlanmıştır. Sürekli fırınlar tipik olarak tavlama, lehimleme, sinterleme, kurutma, sertleştirme ve temperleme gibi işlemler için kullanılır.

Sürekli bir fırının tasarımı, imalat veya endüstriyel sürecin özel gereksinimlerine bağlıdır. Bazı yaygın kullanılan sürekli fırın türleri:

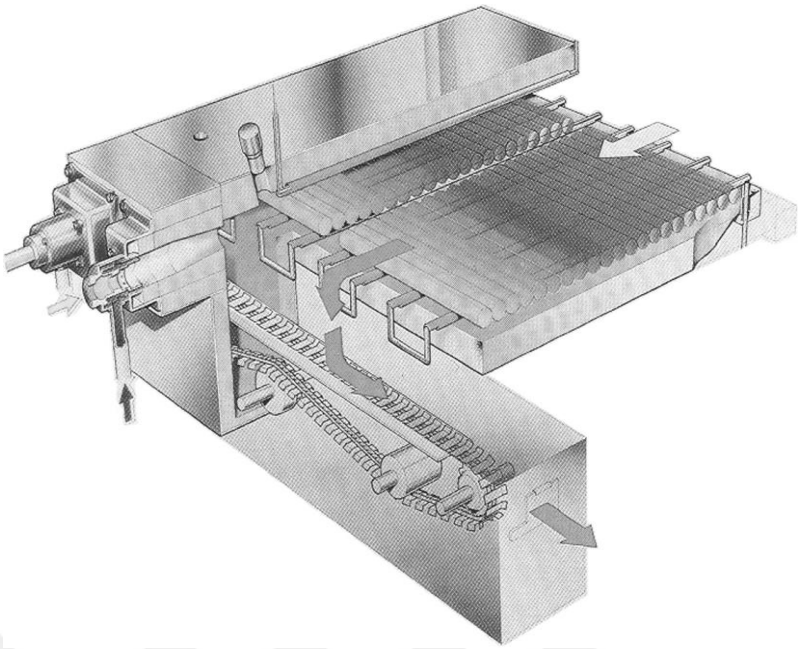
Hasır bantlı fırınlar, malzemeleri fırın boyunca taşımak için bir örgü konveyör bant kullanır. Genellikle sinterleme, lehimleme ve tavlama gibi işlemler için kullanılmaktadır.

Makaralı ocak fırınları, malzemeleri fırın boyunca taşımak için bir makaralı konveyör kullanır. Temperleme, tavlama ve gerilim giderme gibi işlemler için yaygın olarak kullanılmaktadır.

İtici fırınlar, malzemeleri fırın içinde hareket ettirmek için bir itici mekanizma kullanır. Genellikle sinterleme ve lehimleme gibi işlemler için kullanılmaktadır.

Yürüyen kiriş fırınları, malzemeleri fırın boyunca hareket ettirmek için bir yürüyen kiriş mekanizması kullanır. Genellikle yeniden ısıtma, dövme ve haddeleme gibi işlemler için kullanılmaktadır.

Sürekli fırınlar, yüklenen malzemeyi, stoğu veya yükü ısıtırken hareket ettirir. Isıtılacak malzeme sabit bir ocağın üzerinden geçer veya ocağın kendisi malzeme üzerinde hareket eder. Eğer ocak sabit ise malzemenin hareketi, kızakların veya ruloların üzerinden mekanik itiçilerle itilmesi veya tel kayışlarla çekilmesi sağlanır. Gecikmeler hariç sürekli bir ısı giriş akısında çalışır. Brülör genellikle sürekli çalışır ve nadiren kapatılır. Sürekli hareket eden veya sıklıkla hareket eden bir konveyör, ocak için soğutma veya yeniden ısıtma işlemini ortadan kaldırır. Fırın kapatıldığında kaybedilen ısıyı en aza indirir. Bu sayede enerji tasarrufu sağlanır (Trinks vd., 2003). Şekil 3.1'de küçük kütüklerin ısıtılması için bir sürekli fırın örneği verilmiştir.



Şekil 3.1. Küçük kütükler için tasarlanmış bir sürekli hızlı ısıtma fırını (Trinks vd., 2003).

3.3. Vakum Fırınları

Vakum fırınları, düşük iç basınç veya vakumda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Yatay veya dikey tipte olarak mevcuttur. Alet, uçak, güç üretimi, elektronik ve diğer endüstri kollarında ısıl işlem uygulamalarında kullanılabilmektedir. Vakum fırınları, yüksek, orta ve düşük alaşımlı çeliklerin sertleştirmesini mümkün kılmaktadır. Homojen, hızlı ısıtma ve soğutma sağladıkları için çok amaçlı olarak kullanılmaktadır (Oleinik,2004).

3.4. Yakma Fırınları

Yakma, yan ürünler olarak elektrik ve ısı üretmek için atıktan enerjiyi geri kazanmak ve aynı anda atık hacmini % 90' a kadar azaltmak için gelişmiş ve yaygın olarak kullanılan bir teknolojidir (Lombardi, 2015). Yakma fırınları, atıkları veya artıkları yüksek sıcaklıklarda yakarak kül ve gaza dönüştürmek üzere tasarlanmıştır (Şekil 3.2). Kentsel katı atıklar, endüstriyel atıklar, biyokütle, fosil yakıtlatr, tehlikeli atık bertarafı ve tıbbi atık arıtma gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar.



Şekil 3.2. Döner yakma fırını uygulaması (İZAYDAŞ, 2020).

Büyük ölçekli atık yakma tesislerinde, biyokütle veya atık gibi zor yakıtların yanması için ek bir kontrol değişkeni olarak yakıt yatağı stoklaması bulunmaktadır. Yakıt yatağı stoklama, bazı atık yakma tesislerinde yakma sürecini optimize etmek ve verimliliği artırmak için kullanılan bir tekniktir. Kül ve diğer yanma yan ürünlerini alttan aynı anda çıkarırken yakıt yatağının üstüne taze atık ekleyerek stoklama işlemi, atık malzemenin mümkün olduğunca eksiksiz ve verimli bir şekilde yakılmasını sağlamaya yardımcı olur.

3.5. Ergitme Fırınları

Ergitme fırınları, metalleri ve alaşımları eritmek ve işlemek için endüstriyel proseslerde kullanılan fırınlardır. Başlıca yaygın kullanım prosesleri, seramik, çelik üretimi, metal, cam, alüminyum ergitme vb. işlemlerdir. Doğal gaz, LPG, fuel oil, motorin, kömür, alternatif yakıtlar ve elektrik enerjisi, ısı enerjisi üretmek için kullanılır. Yakıt ile çalışan ergitme fırınları, yakıtı bir yanma odasında yakarak oluşan ısıyı ergitme odasına veya potaya aktarır. Üretilen ısı enerjisi, yanma verimliliğinin arttırılması için yakıt ve hava debisi ile kontrol edilir. Yakıtla çalışan ergitme fırınları, farklı yakıtlar ile çalışabilme esnekliği, yüksek sıcaklık sağlama, ısıl verimlilik ve bakım kolaylığı sağlarlar. Yakıtla çalışan bazı endüstri ergitme fırınlarının bazı olumsuz yönleri de olabilmektedir. Yanmada kirletici emisyon üretimi gerçekleşebilir. Fosil yakıtların kullanımı belirli çevresel düzenlemelere ve standartlara tabi olabilir. Bu nedenle yakıtla çalışan ergitme fırınlarının risklerini minimuma indirmek ve faydalarını arttırmak için

tüm güvenlik protokollerine ve düzenlemelere uymak, ekipmanları belirtildiği şekilde uygun seçerek korumak ve fırın tasarım parametreleri ile çalışmasını sağlamak önemlidir. H/Y oranı, fırın basıncı, alev izleme, üst sınır sıcaklıkları ve kirlilik üst sınırları için ek kontrol sistemleri gerekebilmektedir (Trinks,2003).

3.6. Isıl İşlem Fırınları

Malzemeleri belirli bir sıcaklığa kadar ısıtmak ve özelliklerini değiştirmek için belirli bir süre bu sıcaklıklarda tutmak için endüstriyel proseslerde ısıl işlem fırınları kullanılmaktadır (Şekil 3.3). Isıl işlem, çelik gibi metallerin imalatında yaygın olarak kullanılır. Isıl işlemde kullanılan orta dereceli sıcaklıklar, metal yüzey bileşiklerini metalürjik olarak değiştirebilmektedir. Bu değişim sürecinde metalin kristal yapıları, sertlikleri ve süneklikleri değişebilmekte ve gerilimleri giderilebilmektedir. Metallerin üretim proseslerinde yaşlandırma, tavlama, karbonlama, sertleştirme, gerilim giderme ve temperleme gibi ısıl işlem uygulamaları sağlanabilmektedir (Çağrı,2022).



Şekil 3.3. Döner yakma fırınında bir yanma uygulaması (Heat treatment, 2023).

BÖLÜM 4

ISI GEÇİŞİNE GENEL BAKIŞ

Bir sistemden başka bir sisteme geçen ısı miktarıyla termodinamik bilimi ilgilenir. Isı, sıcaklık farkıyla bir sistemden diğerine transfer edilen enerji türüdür. Isı geçişinin sağlanması için sıcaklık farkının olması gerekmektedir. Isı geçişi daima yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru gerçekleşir. Yüksek sıcaklıktaki ortam ile düşük sıcaklıktaki ortam aynı sıcaklığa ulaşınca ısı geçişi durur. Sıcaklıktaki değişim hızı sıcaklık gradyanı ile açıklanır. Isı transferinin belirli bir yöndeki ısı transfer hızı, o yöndeki sıcaklık gradyanı büyüklüğüne bağlıdır. Sıcaklık gradyanı büyüklüğü artınca, ısı transfer hızı artar. Isı geçişi genellikle, iletim (kondüksiyon), taşınım (kondüksiyon) ve radyasyon ile sağlanır.

4.1. Isıl İletim (Kondüksiyon)

Bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklarından, bitişiğindeki daha düşük enerjili parçacıklara iletim (kondüksiyon) yoluyla ısı geçişi sağlanır. İletim maddenin katı, sıvı ve gaz fazında gerçekleşebilir. Katılarda iletim, kafeslerdeki moleküllerin titreşimleri sonucu serbest elektronlarla, sıvılarda ve gazlarda iletim moleküllerin rastgele hareketinden oluşan çarpışmaları ve yayınımları ile gerçekleşir.

Isı iletim hızı, sıcaklık farkına, geometriye, kalınlığa ve malzeme cinsine bağlıdır. Isı iletimi (4.1) denklemiyle ifade edilir.

$$\dot{Q}_{iletim} = k.A.\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -\,k.A.\frac{\Delta T}{\Delta x}\ (W) \qquad (4.1)$$

(4.1) Denklemi , $\Delta x \rightarrow 0$ limit durumuna getirilerek diferansiyel formuna indirgenir ve (4.2) denkleminde Fourier ısı iletim kanunu olarak belirtilir.

$$\dot{Q}_{iletim} = - k.A. \frac{dT}{dx} (W) \quad (4.2)$$

(4.2) denkleminde k, bir malzemenin ısı iletim katsayısını, $\frac{dT}{dx}$, sıcaklık gradyanını, A ise ısı geçişi doğrultusuna daima dik, ısı geçiş yüzey alanını ifade eder. Isı azalan sıcaklık sıcaklık yönüne doğru iletilir. Sıcaklık artan x yönünde, sıcaklık gradyanı negatif olur. (4.2) denkleminde bulunan – işareti, pozitif x yönünde ısı geçişinin pozitif bir nicelik olmasını sağlar.

4.2. Isıl Taşınım (Konveksiyon)

Isıl taşınım, katı yüzey bitişiğindeki akışkan arasında enerji aktarım türüdür. İletim ve akışkan hareketinin birleşik etkilerini kapsar. Akışkan hareketi arttıkça, taşınım ile ısı transferi de artar. Yığın akışkan hareketinin oluşmaması durumunda ise, ısı transferi iletim ile gerçekleşir.

Akışkanın katı yüzeyden fan, pompa veya rüzgar gibi dış etkilerle zorlanmış taşınım, sıcaklık değişimleri ile akışkanın yoğunluk farkından oluşan kaldırma kuvvetleri akışkan hareketini sağlayarak, doğal taşınım gerçekleşir.

Isı taşınım hızı sıcaklık farkıyla orantılı olup, Newton soğuma kanunu ile ifade edilir.

$$\dot{Q}_{taşınım} = h.A_s.(T_s - T_\infty) \quad (4.3)$$

(4.3) denkleminde h ısı taşınım katsayısını (W / m^2 .°C) ifade eder. Isı taşınım katsayısı, yüzey geometrisine, akışkan hareketinin karakteristiğine ve akışkan özelliklerine bağlı bir parametredir. A_s taşınım ısı geçişine dik yüzey alanı (m^2), T_s yüzey sıcaklığı (°C) , T_∞ yüzeyden yeterince uzaklıkta akışkanın sıcaklığını (°C) ifade eder.

4.3. Isıl Işınım (Radyasyon)

Atom ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişimleri sonucunda maddeden elektromanyetik dalgalar oluşur. Elektromanyetik dalgalar şeklinde yayılan ısı enerji türüne ışınım (radyasyon) ısıl enerjisi denir. Isıl iletim ve taşınımdan farklı olarak bu ısı

geçiş türünde ortama gerek duyulmaz. Mutlak sıcaklığın üzerinde her madde ısı ışınımı yapar.

Isıl ışınım Stefan Boltzman kanunu olarak (4.4) denkleminde ifade edilir.

$$\dot{Q}_{ışınım} = \varepsilon.\sigma.A_s T_s^4 \quad (4.4)$$

σ değeri Stefan Boltzman sabitidir ($5.67x10^{-8}$.W/m².K^4). ε değeri yüzey yayıcılığı 0 ile 1 arasında malzemenin fiziksel bir özelliği olarak değişkenlik gösterir. ε = 1 tam ısıl soğurgan malzemeyi ifade ederken, ε = 0 değeri ise tam ısıl yalıtkan malzemeyi ifade eder.

Bir yüzeye gelen ısıl ışınımının belirli bir miktarı soğurulma oranı (4.5) denkleminde ve yansıtılma oranı (4.6) denkleminde, diğer kalan miktarının geçirilme oranı (4.7) denkleminde belirtilmektedir. Üç durumun toplamı 1'e eşittir ve (4.8) denklemi ile ifade edilir.

$$\alpha = \frac{\text{Soğurulan Işınım}}{\text{Gelen Işınım}} \quad (4.5)$$

$$\rho = \frac{\text{Yansıtılan Işınım}}{\text{Gelen Işınım}} \quad (4.6)$$

$$\tau = \frac{\text{Geçirilen Işınım}}{\text{Gelen Işınım}} \quad (4.7)$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.8)$$

BÖLÜM 5

SAYISAL ANALİZ

5.1. Temel Korunum Denklemleri

Korunum denklemleri, HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği) çözümleme yönteminin temelini oluşturur. Kütle, enerji ve momentum korunum kanunlarından oluşur. Kütlenin korunumu literatürde süreklilik denklemi ile açıklanır. Momentumun korunumu denklemi ise Newton'un 2. hareket kanununun akışkanlar mekaniğine uyarlanmış halidir. Momentumun korunumu denklemi literatürde Navier Stokes denklemi olarak da bilinir. Enerji denklemi ise termodinamiğin 1. yasasına dayanır.

Kütle, momentum ve enerji korunum denklemlerinin elde edilmesi için kontrol hacmi yaklaşımı uygulanır. Kontrol hacmi, kütle, momentum ve enerji için çözüm alanını ifade eder. Süreklilik denklemi tek bir denklemle vektörel formda ifade edilirken, momentum denklemi x, y ve z denklemi için vektörel bir formda ifade edilir. Enerji denklemi ise skaler formda ifade edilir. Eğer çözümlenen problem içerisinde türbülans, faz değişimi, radyasyon ve yanma gibi kompleks özellikler bulunduruyorsa, korunum denklemlerine ek denklemlerin de çözülmesi gerekebilir.

5.1.1.Kütlenin Korunumu Denklemi (Süreklilik Denklemi)

Akış alanı içerisinde seçilmiş sonsuz küçüklükte bir V kontrol hacmi ve bu kontrol hacminin bir yüzeyinin alanı A olmak üzere kütle korunumu, kontrol hacminin sınırlarından giren ve çıkan kütle akışının kütle değişimi hızına eşit olduğunu belirtir. Bu tanıma göre kütle korunumu (5.1) denklemi ile ifade edilir.

$$\int_V \frac{\partial_\rho}{\partial_t}.dV + \int_A \rho.\vec{v}.\vec{n}.dA = 0 \quad (5.1)$$

(5.1) denkleminde 2. Terime diverjans teoremi uygulanırsa:

$$\int_V [\frac{\partial_\rho}{\partial_t} + \vec{\nabla}.(\rho.\vec{v})].dV = 0 \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial_\rho}{\partial_t} + \vec{\nabla}.(\rho.\vec{v}) = 0 \quad (5.3)$$

(5.3) denkleminde ifade edilebilir. Akışın sıkıştırılamaz olduğu durumlarda ise $\frac{\partial_\rho}{\partial_t} \cong 0$ ve diverjans operatörünün dışına alınabilir. Bu durumda (5.3) denklemi (5.4) denklemi halini alır.

$$\vec{\nabla}.\vec{v} = 0 \quad (5.4)$$

Kartezyen koordinatlarda (5.4) denklemi (5.5) denklemi halini alır. (5.5) denklemi akışın kartezyen 3 boyutlu koordinatlarda süreklilik denklemidir.

$$\frac{\partial_u}{\partial_x} + \frac{\partial_v}{\partial_y} + \frac{\partial_w}{\partial_z} = 0 \quad (5.5)$$

5.1.2. Momentumun Korunumu Denklemleri (Navier Stokes Denklemleri)

Newton'un 2. Hareket kanunu sonsuz küçük sabit bir kontrol hacmine uygulandığında lineer momentumun zamana bağlı değişiminin kontrol hacmine etki eden dış kuvvetlerin toplamına eşit olduğu söylenebilir. Bu eşitlik (5.6) denkleminde ifade edilebilir.

$$\int_V \frac{\partial(\rho.\vec{V})}{\partial}.dV = \Sigma\vec{F} \quad (5.6)$$

Kontrol hacmine etki eden dış kuvvetler hacim kuvvetleri ve yüzey kuvvetleri olarak ikiye ayrılabilir. Hacim kuvvetleri akışkanın ağırlığından kaynaklanan kuvvetler iken normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri yüzey kuvvetleridir.

Reynolds Transport denkleminin en genel formu denklem (5.7) şeklinde yazılırsa:

$$\frac{d\phi}{dt} = \int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho.\phi).dV + \int_A \rho.\vec{V}.\vec{n}.dA \quad (5.7)$$

$$\phi = m.\vec{V} \quad (5.8)$$

$$\phi = \vec{V} \tag{5.9}$$

Reynolds transport (5.10) denklemi aşağıdaki form elde edilir.

$$\vec{F} = \int_V \frac{\partial}{\partial t}(\rho.\vec{V}).dV + \int_A \rho.\vec{V}.\vec{V}.dA \tag{5.10}$$

Viskoz kuvvetlerin etkili olduğu bir akışta kayma ve normal kuvvetleri gerilme tensörü şeklinde yazıp hacim kuvvetleriyle birleştirilirse (5.11) denklemi elde edilir.

$$\Sigma\vec{F} = \int_V(\rho.\vec{g}).dV + \int_A(\sigma_{i,j}\vec{n}).dA \tag{5.11}$$

Burada ilk terim hacim kuvvetleri iken 2. terim viskoz kuvvetlerden kaynaklı terimdir. (5.10) denkleminde ve (5.11) denklemindeki yüzey integrallerine (5.12) denklemindeki diverjans teoremi uygulanıp 2 denklem birleştirilse (5.13) denklemi elde edilmiş olur.

$$\int_V(\vec{\nabla}.\vec{G}).dV = \oint_A(\vec{G}.\vec{n}).dA \tag{5.12}$$

$$\rho\frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho.\vec{g} + \vec{\nabla}.\vec{\sigma}_{i,j} \tag{5.13}$$

Gerilme tensörü olarak ifade edilen $\vec{\sigma}_{i,j}$ ifadesi,

$$\sigma = -p.\vec{G} + \tau \tag{5.14}$$

(5.14) denklemi matris biçiminde yazılırsa,

$$\vec{\sigma}_{i,j} = \begin{pmatrix} \vec{\sigma}_{xx} & \vec{\sigma}_{xy} & \vec{\sigma}_{xz} \\ \vec{\sigma}_{yx} & \vec{\sigma}_{yy} & \vec{\sigma}_{yz} \\ \vec{\sigma}_{zx} & \vec{\sigma}_{zy} & \vec{\sigma}_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \tag{5.15}$$

(5.15) denkleminde $\tau_{i,j}$ viskoz gerilme tensörü olup, Newton tipi akışkanlar için aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\tau_{i,j} = 2\mu\varepsilon_{i,j} \tag{5.16}$$

(5.16) denkleminde $\varepsilon_{i,j}$ şekil değiştirme tensörüdür.

$\tau_{i,j}$ her koordinat için ayrı ayrı yazıldığında

$$\tau_{xx} = 2\,\mu\frac{\partial_U}{\partial_x} \tag{5.17}$$

$$\tau_{yy}= 2\,\mu\frac{\partial_v}{\partial_y} \tag{5.18}$$

$$\tau_{zz}= 2\,\mu\frac{\partial_w}{\partial_z} \tag{5.19}$$

$$\tau_{xy}= \tau_{yx}= \mu(\frac{\partial_u}{\partial_y}+\frac{\partial_v}{\partial_y}) \tag{5.20}$$

$$\tau_{xz}= \tau_{zx}= \mu(\frac{\partial_u}{\partial_z}+\frac{\partial_w}{\partial_x}) \tag{5.21}$$

$$\tau_{yz}= \tau_{zy}= \mu(\frac{\partial_v}{\partial_z}+\frac{\partial_w}{\partial_y}) \tag{5.22}$$

Yukarıdaki viskoz gerilme ifadeleri gerilme tensörünün içersine yerleştirilir, momentum korunumu ifadesine geçilirse,

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\rho g_x+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \tag{5.23}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\rho g_y+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \tag{5.24}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\rho g_z+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \tag{5.25}$$

Şeklinde 3 eksen takımı için 3 momentum denklemi sırasıyla x ekseni için (5.23) denkleminde, y ekseni için (5.24) denkleminde ve z ekseni için (5.25) denkleminde ifade edilmektedir.

5.1.3. Enerjinin Korunumu Denklemi

Termodinamiğin 1. yasası gereği bir kontrol hacmine giren enerji, sistemden çıkan enerjiye ideal koşullarda eşit olmalıdır. Enerjinin korunumu denklemini (5.26) denkleminde belirtilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\nabla.[V(\rho E+P)]=\nabla.\left[k_{eff}\nabla T-\sum_J h_j J_j+(\tau_{eff}.V)\right]+S_h \tag{5.26}$$

(5.26) denklemi sırasıyla, düzensizlik, adveksiyon, iletim, türlerin difüzyonu, viskoz yayınım ve entalpi kaynağı terimlerinden oluşmaktadır (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,2012). Tez çalışmasının nümerik hesaplamalarında enerji denklemi kullanılmıştır.

5.2. Akış Karakteristiğinin Belirlenmesi

Bir boru içinden geçen akışkanın akış karakterinin laminer veya türbülanslı olduğunu saptamak için boyutsuz bir sayı olan Reynolds sayısı kullanılır. Reynolds sayısı boyutsuz bir parametre olup Re ile gösterilir.

$$Re = \frac{V_{ort}D}{v} = \frac{\rho v_{ort}D}{\mu} \tag{5.27}$$

(2.27) denkleminde V_{ort} akışkanın boru içindeki ortalama hızı (m/s), v kinematik viskozite (m²/s), D hidrolik çap, ρ akışkanın yoğunluğu (kg/m³) ve μ dinamik viskozite (Pa.s) olarak belirtilir. Ayrıca hidrolik çap aşağıdaki (5.28) denklemi ile ifade edilir.

$$D = \frac{4A}{\text{Ç}} \tag{5.28}$$

(5.28) denkleminde A akışkanın geçtiği alan (m²), Ç ıslak çevre (m) olarak belirtilmektedir. Bazı geometrik şekillerin hidrolik çapı bu şekillerin bir kenar uzunluğuna eşittir. Kare için karenin bir kenar uzunluğu, daire için ise çap uzunluğudur.

İç akışlarda sınır koşulu için tanımlanan türbülans yoğunluğu (I) tamamen akışın gelişimine bağlıdır. Eğer akış yeterince gelişmemiş ise düşük yoğunluğu kullanılabilemektedir. Akış tam gelişmiş ise bir kanal akışının merkezindeki türbülans yoğunluğu, boru için ampirik bir korelasyondan türetilen (5.29) denklemi ile ifade edilebilir.

$$I = \frac{u'}{u_{ort}} = 0{,}16.\,(Re_{D_H})^{-1/8} \tag{5.29}$$

(5.29) denkleminde türbülans yoğunluğu (I) hız dalgalanmarının (u') ortalama akış hızına (u_{ort}) oranı olarak ifade edilir (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,2012). Hız dalgalanmalarının ölçülme imkanı olmayabilir. Bu durumda türbülans yoğunluğu Re_{D_H} (hidrolik çaptan geçen akışın Reynolds sayısı) üzerinden de yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bu tez çalışmasında, nümerik çalışmalarda hesaplanan I değeri, $\mathrm{Re_{D_H}}$ sayısı üzerinden hesaplanarak türbülans giriş sınır koşulu olarak kullanılmıştır.

5.2.1. Gelişmiş k - ε Türbülans Denklemleri

Bu tez çalışmasında yakıt ve havanın akış karakteristiği, tüm durumlar için türbülanslı akış olarak belirlenmiştir. HAD analizlerinde kullanılan, türbülans modellemesi, Ansys Fluent yazılımında bulunan ve bir RANS (Reynolds ortalamalı akışkanlar simülasyonu) modeli olan, gelişmiş k - ε modeli (k - ε, Realizable) ile yapılmıştır.

Türbülans kinetik enerjisi olarak ifade edilen "k" için korunum (5.30) denklemiyle belirtilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_k \qquad (5.30)$$

Türbülans yayınım oranı olarak ifade edilen "ε" için korunum (5.31) denklemiyle belirtilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\upsilon\varepsilon}} + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \qquad (5.31)$$

(5.31) denkleminde belirtilen (5.32), (5.33) ve (5.34) eşitlikleri kullanıcıya bağlı değişen denklem değerleridir.

$$C_1 = max\left[0.43, \frac{\mu}{\mu+5}\right] \qquad (5.32)$$

$$\mu = S\frac{k}{\varepsilon} \qquad (5.33)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \qquad (5.34)$$

(5.30) ve (5.31) denklemlerinde belirtilen G_k hız gradyanları için türbülans kinetik enerji üretimini G_b taşınım için türbülans kinetik enerji üretimini Y_m toplam yayınım oranını, C_2 ve $C_{1\varepsilon}$ denklem sabitlerini, σ_k ve σ_ε değerleri k ve ε için türbülanslı Prandtl sayılarını, S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı terimleri ifade eder(ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,2012).

BÖLÜM 6

HAD ÇÖZÜM METODU

HAD çözüm metodu, endüstriyel ve endüstriyel olmayan uygulama alanlarında hesaplama yaparak sistemlerin analizini inceler. Havacılık endüstrisi, gemi, güç üretim tesisleri, brülör üretimi, turbomakineler, elektrik ve elektronik mühendisliği, kimya proses mühendisliği, binaların iç ve dış cepheleri, gemi mühendisliği, çevre mühendisliği, meteoroloji ve biyomedikal mühendislik gibi birçok alanda kullanılır. HAD çözüm metodu çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Yeni tasarımların hesaplama işlemlerini ve sürelerini ciddi bir oranda azaltabilir. Gerçekleştirilmesi zor veya imkansız olan deneysel çalışmaların yapılabilmesine imkan sağlar. Tehlikeli şartlar altında gerçekleşen sistemlerin normal performans limitlerinin üzerinde hesaplama yapabilir.

6.1. Sonlu Hacimler Metodu

Sonlu hacimler metodu, özel bir sonlu farklar metodundan geliştirilmiştir. Günümüzde sonlu hacimler metoduna göre çalışan ticari yazılımlar mevcuttur: ANSYS FLUENT, SIEMENS FLOEFD/STARCCM+, SOLIDWORKS FLOW SIMULATION, OPENFOAM vs. Bu tez çalışmasının nümerik çözümleme çalışmalarında ANSYS FLUENT yazılımının 17.0 versiyonu kullanılmıştır.

Nümerik algoritmalar aşağıdaki adımlardan meydana gelmektedir.

I. Çözüm bölgesine ait bütün kontrol hacminde çözülecek olan akış denklemleri bütünleşmiştir.

II. Ayrıklaştırma işleminde akış prosesini hesaplayabilmek için çeşitli sonlu farklar yaklaşımları terimlerini kullanarak akış için gereken denklemler bütünleştirilir.

III. Cebirsel denklemlerin çözümü iterasyonlar ile gerçekleşir.

İlk adım, kontrol hacmi bütünleşmesi, sonlu hacimler metodunu diğer HAD tekniklerinden ayırır. Sonuçlar her sonlu hücre için ilgili özellikler korunarak hesaplanır. Sonlu hacimler metodu hesaplamaları fiziksel korunum prensibine uyarak nümerik algoritmaları kullanarak yapar. Hesaplama kontrollerini basite indirger. Bu özelliğiyle sonlu hacimler metodunun mühendisler tarafından anlaşılması, sonlu elemanlar ve spektral metodlardan daha basit olur.

HAD kodları belirlenen sürede transport denklemleri , akışkan akışından kaynaklanan taşınım denklemleri ve noktadan noktaya neden olan bilinmeyenlerin hareketinin neden olduğu difüzyon denklemleri ve bilinmeyenlerin değişim oranı ile birlikte ayrıklaştırma tekniklerini içerir. Lineer olmayan ve karmaşık fiziksel olaylar iteratif çözüm yaklaşımını gerektirir. Cebirsel denklemlerin satırdan satıra çözüm tekniği olan basınç ile hız arasındaki doğru bağlantıyı sağlayan SIMPLE algoritmasıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan COUPLED algoritması, karmaşık problemlerin (Örneğin: türbülanslı yanma, katılaşma ve erime vb.) farklı değişkenlerin olduğu kompleks fiziksel olayların etkileşimlerini hesaba katarak eş zamanlı çözüm sağlar

6.2. HAD Problemi Çözümü

Akışkan akışı problemlerinde HAD kodları kullanılır ve bu kodların niteliği kullanıcının tecrübesine bağlıdır. HAD simülasyonu için giriş verileri belirlenir ve akış denklemleri formüle edilir. Fiziksel veya kimyasal olayların parametreleri dikkate alınır. 2D veya 3D modelleme yapılırken bazı durumlarda ortam sıcaklığı ve basıncının etkisi ihmal edilebilir. Doğru kararlar alarak iyi bir modelleme yapmak önemlidir. Çünkü basit problemler için yapılan varsayımlar karmaşıklığı azaltır. Ancak, bu kabuller gerçek çözümle farklılık gösterebilir. Bu nedenle yapılan kabuller, çözülecek problemin önemli bir bölümünü oluşturur.

Nümerik çözüm algoritması, anlaşılması gereken önemli konulardan biridir ve üç matematiksel kavramı içerir: yakınsama, tutarlılık ve kararlılık. Yakınsama, nümerik yöntemin bir özelliğidir. Yaklaşımlar, kontrol hacmi veya hücre boyunca ızgara boşluğunu gerçek çözüme kadar azaltarak yapılır. Tutarlılık, çözülecek cebirsel denklemlerin nümerik planıdır. Gerçek korunum denklemleriyle eşitlik sağlanması ve ispatlanması hedeflenir. Bu işlemler her ızgara boşluğunda sıfıra kadar gerçekleştirilir. Kararlılık, nümerik yöntemler ilerledikçe hataların sönümlenmeyle birleştirilmesidir. Eğer bir teknik başlangıç koşullarında kararlı değilse, ıraksama meydana gelir. Iraksama HAD simülasyonlarının en büyük problemidir. Iraksama yaşanmaması için ön işlemci ve çözücü prosesleri iyi planlanmalıdır.

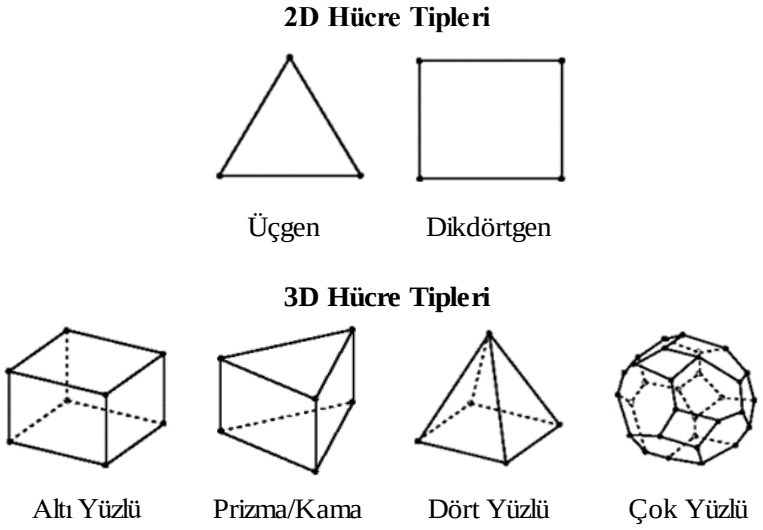
Sonlu hacim metodu hesaplanacak olan akışkan özelliğinin yerel olarak korunumunu her kontrol hacmi için garanti eder. Bütün hesaplama bölgesi için akışkan özelliğinin korunması dikkate alınarak nümerik plan oluşturulur. Buna korunumluluk ilkesi denir. Hesaplanacak akışkan özellikleri için hesaplar komşu hücre veya hacim ile birlikte gerçekleşir (Versteeg & Malalasekera, 2007).

6.2.1. Ön İşlemci

Ön işlemci bir HAD probleminin giriş sınır koşullarından oluşarak, program arayüzü ile bu bilgileri HAD programına girer ve sonra bu bilgilerin çözücünün okuyabileceği formata dönüştürür. Hesaplama kontrol hacminin oluşturulması, matematiksel çözümleme için ağ yapısının hazırlanması, modellenmesi gereken fiziksel ve kimyasal koşulların belirlenmesi, akışkan özelliklerinin tanımlanması ve gereken sınır şartlarının belirlenmesi ön işlemci tarafından sağlanan işlemlerdir.

6.2.1.1. Çözüm Alanının Ayrıklaştırılması

HAD problemlerinin çözücüde çözümü için ön işlemci ayarlarında, çözüm alanına tanımlanan sınır şartları içerisinde akışı tanımlayan denklemlerin çözüleceği parçalara ayrılması gerekir. Çözüm alanındaki en küçük parçalar hücrelerdir. Geometriye ve çözüme göre değişkenlik gösteren farklı hücre tipleri Şekil 6.1.‘de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Matematiksel çözüm alanında kullanılan hücre tipleri (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide,2012).

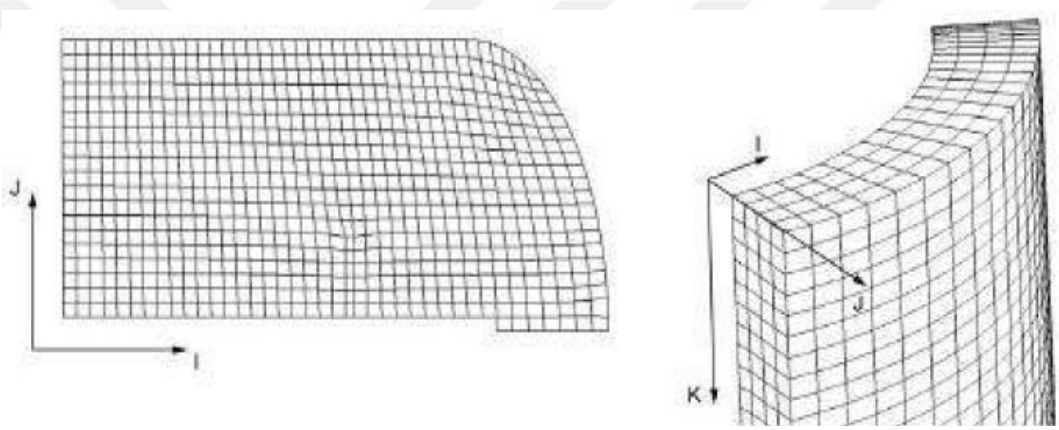
Altı yüzlü hücreler, altı yüzü, on iki kenarı ve sekiz köşesi olan hücrelerden oluşur. Bu yapısal kafesler, düzenli bir ızgara benzeri düzenlemeye sahiptir ve genellikle iyi tanımlanmış ve düzenli geometrilere uygun olan HAD simülasyonlarında kullanılır. Altı yüzlü kafesler, sayısal doğrulukta avantaj sağlar. Komşu hücreler arasındaki interpolasyonu kolaylaştırır. Katı mekaniği, ısı transferi ve sıvı akışı gibi alanlarda tercih edilir.

Tetrahedral hücreler (Prizma/Kama/Dört yüzlü),Tetrahedra adı verilen hücrelerden oluşur. Her tetrahedron, dört üçgen yüzü, dört kenarı ve dört köşesi olan üç boyutlu bir şekildir. Tetrahedral kafesler, geometriye iyi uyum sağlayabildikleri ve şekli doğru bir şekilde yakalayabildikleri için karmaşık ve düzensiz geometriler için daha uygundur. Tetrahedral kafesler, türbülanslı akış, serbest yüzey akışı ve çok fazlı akış gibi karmaşık akış HAD simülasyonlarında yaygın olarak kullanılır. Karmaşık akış olaylarını çözmede esneklik sunarlar, ancak benzer doğruluk seviyeleri elde etmek için altı yüzlü hücrelere göre daha fazla sayıda hücre gerektirebilirler.

Çok yüzlü hücreler, Altı yüzlü ve dört yüzlü ağlardan daha genel ve çok yönlüdür. İsteğe bağlı sayıda yüz ve köşeye sahip hücrelerden oluşabilirler. Çok yüzlü bir ağdaki hücreler, altı yüzlü, dört yüzlü, prizmalar, piramitler ve daha fazlası dahil olmak üzere farklı şekillere sahip olabilir. Çok yüzlü kafesler yapılandırılmamış olabilir ve düzensiz şekiller ve topolojilere sahip karmaşık geometrileri yakalamada daha fazla

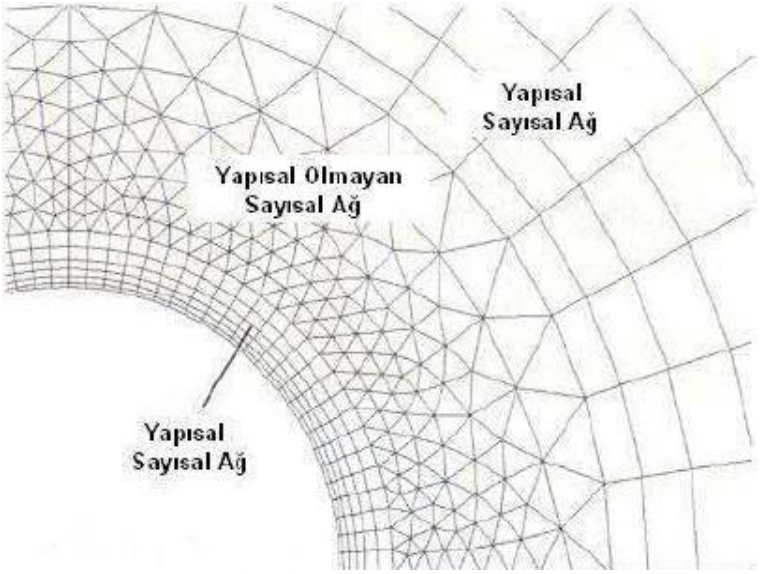
esneklik sunar. Çok fazlı akışlar, türbülanslı akışlar ve gözenekli ortamdaki akışlar gibi karmaşık akışların HAD simülasyonlarında yaygın olarak kullanılırlar. Çok yüzlü ağlar, daha verimli ağ üretimine izin verir ve doğruluk ile hesaplama maliyeti arasında iyi bir uyum sağlayabilir.

Bu tez çalışmasında kullanılan, Ansys Fluent HAD simülasyon yazılımı, hem yapısal hem de yapısal ağ olmayan sayısal ağ geometrileri ile çalışabilmektedir. Yapısal ağ elemanları daima dörtgen (2D) ya da prizmatik (3D) elemanlardan oluşur. Bu elemanlar I, J, K uzayında bir adres ile belirtilir ve I, J, K her bir sayısal çözüm ağı yönünde elemanları numaralamak için kullanılan indekslerdir. I, J, K doğrultularının koordinat sisteminin x, y, z doğrultuları ile çakışmalarına gerek yoktur.



Şekil 6.2. 2D ve 3D Yapısal sayısal ağ geometrisi (Çengel & Cimbala, 2006).

Karmaşık geometrik modeller için yapısal olmayan ağ üretimi nispeten daha kolaydır. Sınır tabakaların modellenmesinde duvara yakın bölgelerde akışa paralel yapısal ağ kullanımı, yapısal olmayan ağ kullanımına göre daha iyi sonuç verebilmektedir. Yapısal ve yapısal olmayan sayısal ağ üretim yaklaşımlarının her ikisinin avantajlarından yararlanmak için hibrit (melez) çözüm şemaları geliştirilmiştir (Çengel & Cimbala, 2006).



Şekil 6.3. Hibrit sayısal ağ geometrisi (Çengel & Cimbala, 2006).

Modellenecek geometrinin karmaşıklığına göre cebirsel ağ üretimi, eliptik ve hiperbolik ağ üretimi gibi sıralanabilecek pek çok ağ üretim ve optimizasyon tekniği mevcuttur.

Sayısal çözüm ağının kalitesi, çözümlerin kalitesine de etki eder. Birçok uygulamada elde edilen sonuçlarda sapmanın bir sebebi de oluşturulan sayısal çözüm ağının yetersizliğidir. Bu tez çalışmasında Ansys Meshing 17.0 ağ yazılımı kullanılmıştır. Geometrinin ağ yapısı tetrahedral hücreler olarak oluşturulup, Fluent yazılımında çözümden önce çok yüzlü hücrelere dönüştürülmüştür. Çok yüzlü hücre kullanımıyla, daha iyi bir yakınsama, daha az işlemci kullanımı ve daha hızlı çözüm elde edilmiştir.

6.2.2. Çözücü

Nümerik çözüm tekniklerinde, genellikle spektral metodlar, sonlu farklar metodu, sonlu elemanlar metodu ve sonlu hacimler metodu kullanılır. Bu çerçevede nümerik metodlar aşağıdaki adımlardan oluşur.

I. Bilinmeyen akış denklemlerinin yaklaşımı basit fonksiyonlar şeklinde gerçekleşir.

II. Yaklaşımların ayrıklaştırılmasını korunum akış denklemleri ve daha sonraki matematiksel işlemlerin içine atarak çözüm yoluna gider.

III. Cebirsel denklemlerin çözümü gerçekleşir.

Farklı metodlardan oluşan bu yöntemlerin en önemli farkı akış denklemleri ve ayrıklaştırma (diskritizasyon) proseslerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu tez çalışmasında nümerik çözüm yöntemlerinden sonlu hacimler metodu kullanılmıştır.

6.2.2.1. Akış Denklemlerinin Çözümünde Kullanılan Temel Algoritmalar

Ansys Fluent yazılımı temel denklemlerin çözümünde bütünleşik (coupled) ve ayrık (segregated) çözüm algoritması olmak üzere iki ayrı çözüm algoritması ile çalışılmasına izin verir. Bu iki uygulama arasında bazı yöntem farklılıkları vardır.

Ayrık çözüm algoritmasında, korunum denklemleri sıra ile çözülür. Korunum denklemleri lineer olmadığı için iterasyonlar yakınsama kriteri sağlanıncaya kadar devam ettirilir.

Bütünleşik çözüm algoritmasında ise, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aynı anda, türbülans ve radyasyon gibi skaler büyüklükler ise korunumum denklemlerinden sonra çözülür. Ayrık çözüm algoritmasında olduğu gibi iterasyonlar aşağıdaki sırayla yakınsama sağlanıncaya kadar sürdürülür (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2012). Şekil 6.4.'de bütünleşik çözüm algoritması basit bir şema ile açıklanmıştır.



Şekil 6.4. Bütünleşik çözüm algoritması (Çengel & Cimbala, 2006).

6.2.2.2. Akış Alanının Ansys Fluent ile Çözümü

Ansys Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımıdır. Otomotiv, havacılık, brülör, beyaz eşya, turbo makine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler vb.), kimya ve gıda endüstrisi gibi birbirinden farklı birçok uygulamaya ait hesaplamalı akışkanlar dinamiği problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır.

Fluent ve muadili simülasyon yazılımları, ürün performansını ürün henüz tasarım aşamasındayken ölçer. Performansı düşüren etkenleri detaylı bir şekilde tespit ederek bilgisayar ortamında giderme ve piyasaya iyileştirme işlemleri tamamlanmış son ürünün verilmesi sağlar.

Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modelleri kullanarak, laminer, geçiş ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal reaksiyonları içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üretebilmektedir (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2012).

Fluent akış denklemlerinin ayrıklaştırılmasında 4 farklı yöntem kullanır (ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, 2012).

I. Birinci dereceden akış yönü metodu
II. Üs kanunu yaklaşımı
III. İkinci dereceden akış yönü metodu
IV. QUICK yaklaşımı

Bu tez çalışmasının HAD nümerik hesaplamalarının çözümünde birinci ve ikinci dereceden akış yönü metodu ile çözüm sağlanmıştır.

BÖLÜM 7

BRÜLÖRLER

Tez çalışmasında nümerik hesaplamalarda ve deneylerde ana ekipman olarak brülör kullanıldığı için, bu bölümde brülörler hakkında temel bilgilere yer verilmiştir.

7.1. Brülörlerin Sınıflandırılması

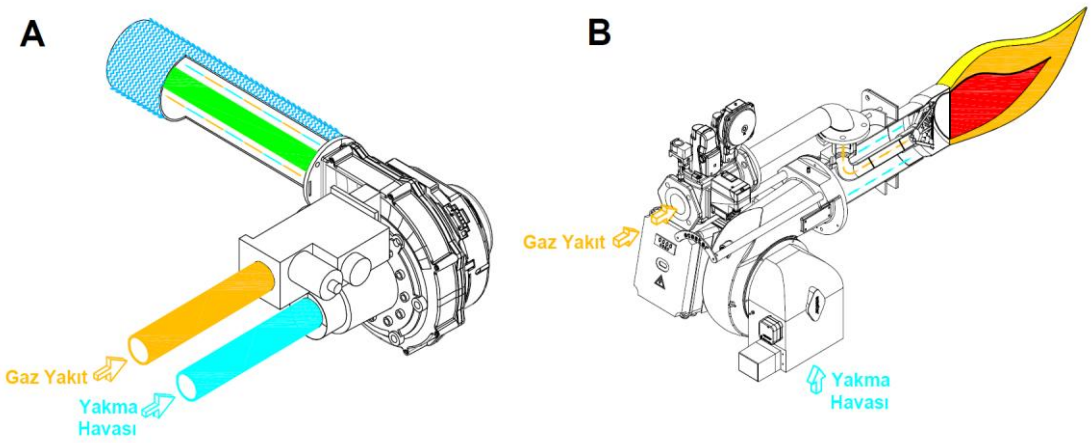
Yakıt ve havanın kontrollü ve emniyetli bir şekilde karıştırılarak, verimli yakılmasını sağlayan cihazlara brülör adı verilir. Brülör, teknikte yakıcı adıyla da bilinir. Brülörler, yanmadan önce yakıt ve havanın kontrollü türbülans bölgesini oluştururlar. Kontrollü bir türbülans bölgesinin oluşması, yakıt ve havanın istenen karışım bölgesine yönlendirilmesi ile sağlanır. Yakıt ve havanın karışımına yön verme ve istenen türbülansının sağlanması türbülatör (difüzör) adı verilen parça ile sağlanır. Bir brülörde türbülatör tasarımı, o brülörün kullanım amacına göre özgündür. Ön karışımlı, ön karışımsız ve kısmi ön karışımlı yanma uygulamaları için türbülatör ve brülör uygulamaları yapılmaktadır. Brülörlerde, yeterli yakıt ve hava türbülansı sağlandıktan sonra bir ısı kaynağına ihtiyaç duyulur. Genellikle düşük ısıl güçteki brülörlerde ateşleme elektrotları kullanılırken, yüksek ısıl güçteki brülörler için pilot brülörler kullanılır. Alev oluştuktan sonra alevin kontrolü ve söndürülmesi genellikle, düşük ısıl güçteki brülörlerde iyonizasyon elektrodu ile sağlanırken, yüksek ısıl güçteki brülörlerde fotosel adı verilen alev sensörleri ile sağlanır. Brülörler, basit, kompakt bir yapıda olabilirken, aynı zamanda bir çok ekipmanın farklı varyasyonlarda işletiminin sağlandığı karmaşık bir yapıda da olabilir. Brülörlerin sınıflandırılması, yakıt tipine, işletim prensibine ve kullanım ihtiyacına göre Çizelge 7.1.'de sınıflandırılmıştır.

Çizelge 7.1. Brülörlerin sınıflandırılması.

Karışım Tipi	**Yakıt Tipi**	**İşletim Tipi**	**Yakma Havası**	**Brülör Gövdesi**
Ön karışımlı	Gaz yakıtlı	Tek kademe	Atmosferik	Monoblok
Ön karışımsız	Sıvı yakıtlı	Çift kademe	Fan destekli	Duoblok
Kısmi ön karışımlı	Katı yakıtlı	Oransal		
	Çoklu kombine yakıtlı			

7.1.1. Karışım Tipine Göre Brülörler

Brülörler, ürettikleri alev tipine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Ön karışımlı brülörler (Şekil 7.1A), düşük iç basınca sahip, yanma odalarında kullanılır. Isıl güçleri düşüktür. Genellikle, kombi, yoğuşmalı kazan, gıda fırınları ve ısıtma gibi alanlarda kullanılır. Ön karışımsız brülörler, yakıt ve havanın nozulda karıştığı brülörlerdir (Şekil 7.1B). Yüksek iç basınca sahip, yanma odalarında kullanılabilirler. Yüksek ısıl güç sağlayabilirler. Endüstride, sıcak su kazanları, endüstriyel fırınlar, kızgın yağ kazanları ve buhar kazanları gibi uygulamalarda kullanılır. Kısmi ön karışımlı brülörde, ön karışımlı ve ön karışımsız yanma birlikte sağlanır. Yanmada kirletici emisyon düşürme hedefleri gereği, düşük ve yüksek alev sıcaklığı bölgeleri istenebilir. Bu durumda yüksek ısıl güçlerde, yüksek yanma verimi ve düşük kirletici emisyonlar sağlanabilir. Kısmi ön karışımlı brülörler de, yanma odası yüksek iç basıncın olduğu ve yüksek ısıl güç talebinin olduğu alanlarda kallanılabilmektedir.



Şekil 7.1. Ön karışımlı brülör (A) ve nozulda karışım brülör (B).

7.1.2. Yakıt Tipine Göre Brülörler

Endüstride yaygın olarak, yakıt tipine göre: gaz yakıtlı, sıvı yakıtlı yakıtlı, katı yakıtlı, çoklu yakıtlı kombine, farklı tipte yakıtları karıştırarak aynı anda yakabilen simültane tip brülörler kullanılmaktadır. Yakıt özelliklerinin akredite bir kuruluştan alınarak, yanabilirlik durumunun kontrol edilmesi, uygun brülör seçiminin yapılması, doğru işletim koşullarının sağlanması için önemlidir.

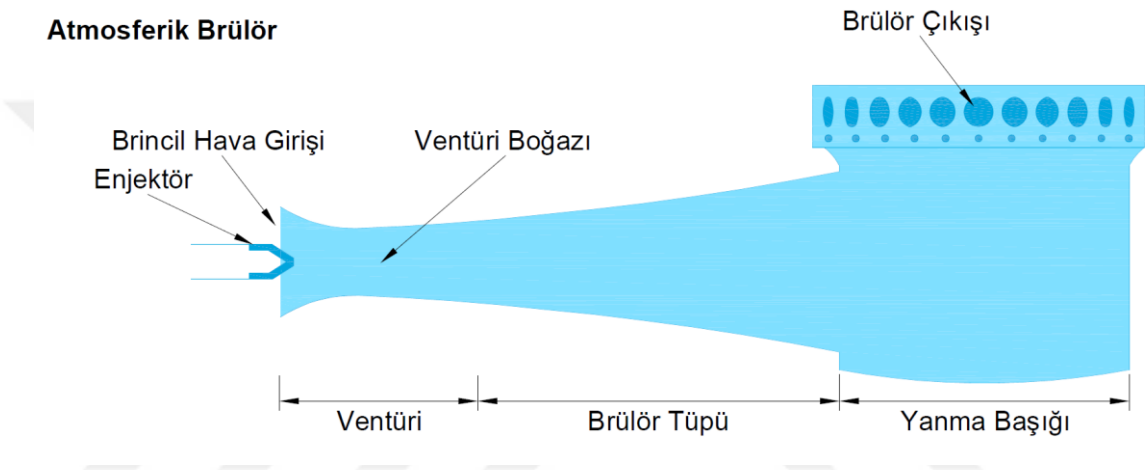
7.1.3. İşletim Tipine Göre Brülörler

Brülörlerde, tek kademe, çift kademe ve oransal işletim sağlanabilmektedir. Tek kademe brülörler aynı zamanda aç - kapa brülör olarak da bilinir. Isıl güç girdisi tektir. Brülör açıldığında bu ısıl güç girdisi tamamen sağlanır. Brülör kapandığında ise ısıl güç girdisi sıfırlanır. Çift kademe brülörlerde, brülör belirli bir ısıl güçte devreye girer. Toplam ısıl gücün geri kalanı ise kullanıcı tarafından talep edildiğinde kullanılır. Oransal brülörlerde işletim tamamen işletmenin anlık talep ettiği ısıl güce göre sağlanır. Ek sistemlerle yakıt ve yanma verimliliği arttırılabilir. Oransal brülörlerin, mekanik, pnömatik ve elektronik (mikro işlemcili) oransallığı sağlayan tipleri endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır.

7.1.4. Yakma Havası Sağlanmasına Göre Brülörler

7.1.4.1. Atmosferik Brülörler

Atmosferik tip brülörler, genellikle gaz yakıt ile çalışırlar. Bu tip brülörlerde, yakma havası harici veya dahili bir fan ile sağlanmaz. Brülörün gaz yolu hattından geçen gaz yakıtın momentumu yakma bölgesinde bir negatif basınç oluşturur. Bu negatif basıncın etkisiyle gerekli yakma havası debisi brülör hava kanalından emiş ile sağlanır (Şekil 7.2). Atmosferik brülörler sabit ısıl güç gerektiren uygulamalar için uygundur.

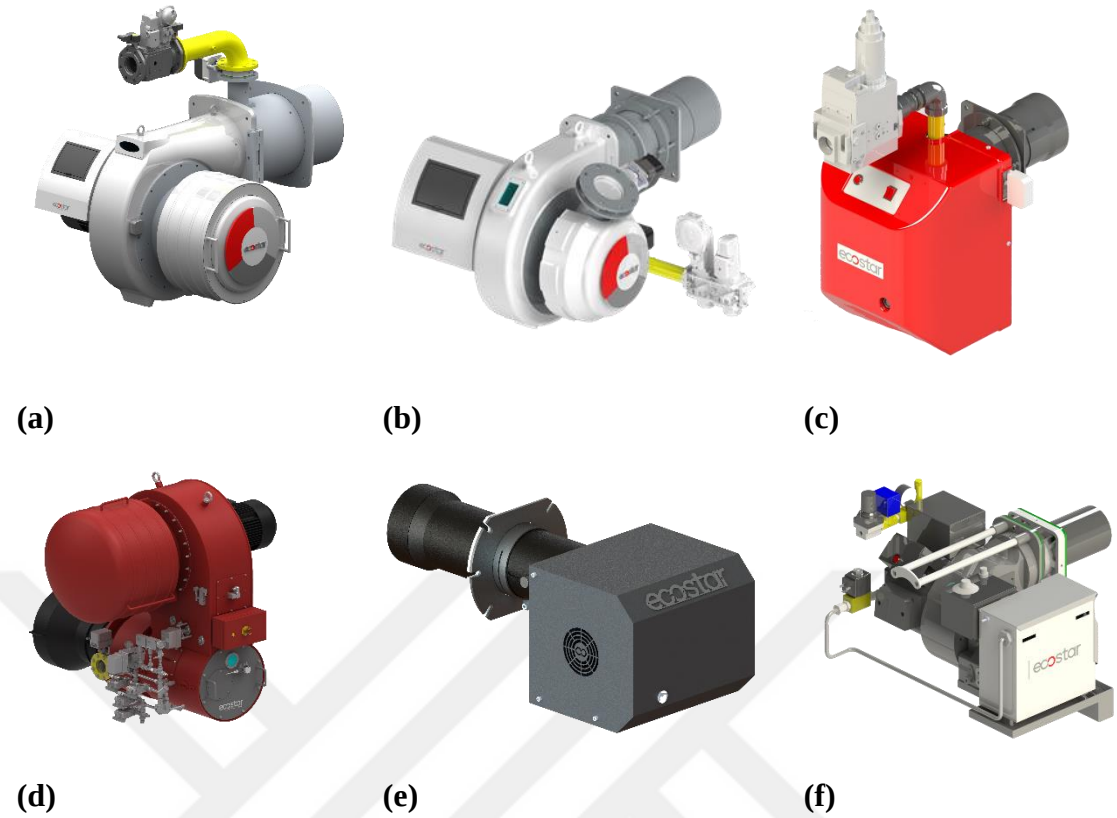


Şekil 7.2. Atmosferik brülör.

7.1.4.2. Fan Destekli Brülörler

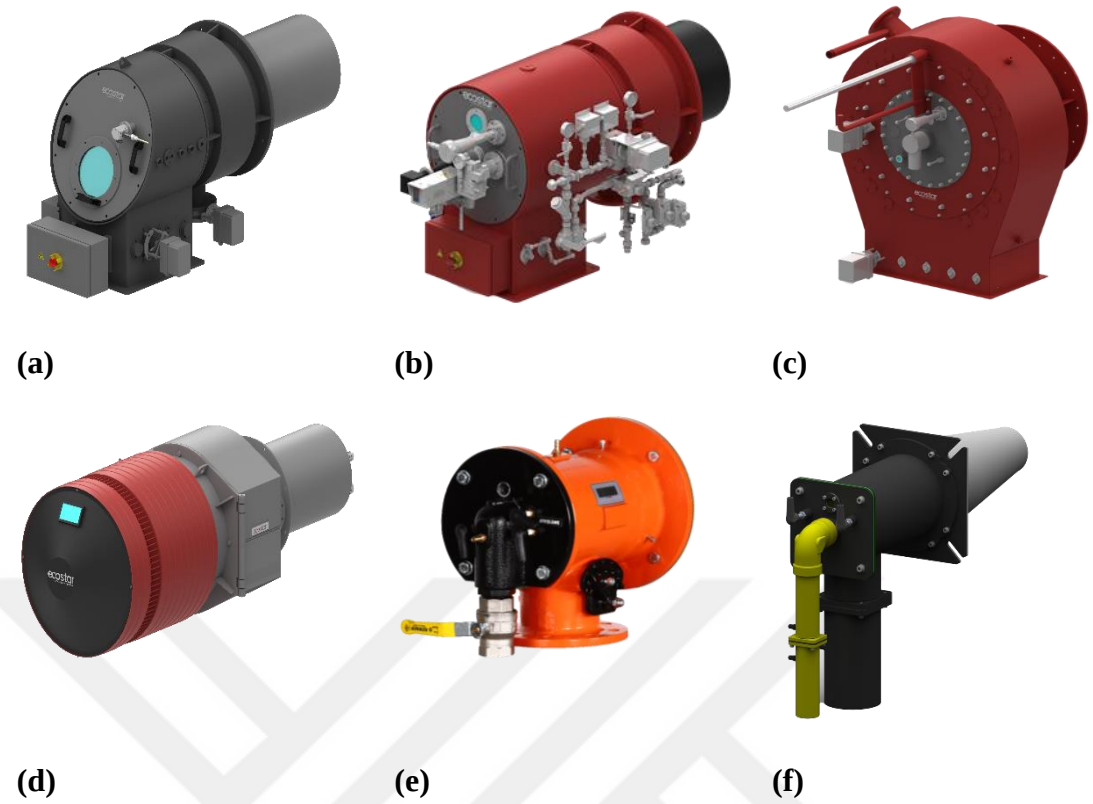
Brülör için gerekli yakma havası, gövdeye dahili montajlı bir fan ile veya pozitif toplam basınçlı bir hava kanalı ile sağlanır. Bu tip brülörlerde, talep edilen farklı ısıl güçlerde ve farklı hava fazlalık katsayılarında işletim sağlanır. Özellikle yanma odası iç basıncına ve ısıl güce bağlı olarak fan gereksinimi karşılanır. Fan destekli brülörler, kullanım alanına bağlı olarak, genellikle monoblok ve duoblok brülörlerden oluşur.

Monoblok brülörler, gövde üzerine fan akuple olarak montajlı kompakt yapıdadır (Şekil 7.3). Genellikle sık kanat veya ters kanat fan tipleri ile kullanılır. Fan kapasitesi, brülör kapasitesini doğrudan etkilediği için monoblok brülörlerde maksimum ısıl güç sınırlandırılmıştır. Bu tip brülörler karşı basınçlı kazan uygulamalarında kullanılır. Kazan karşı basıncı arttıkça, brülörün ürettiği ısıl güç düşer. Kompakt yapıları ile farklı tip yanma odalarına uygundurlar.



Şekil 7.3. Monoblok brülör tipleri (a) ECO NG, (b) ECO LNX FGR,(c) ECO Kare, (d) MIB, (e) ECO HP ve ECO WO (Monoblok Brülörler – Ecostar,2023).

Duoblok brülörler, doğrudan fan bağlantısı olmayan, fakat prosesin ihtiyaç duyduğu hava debisinin bir hava kanalı ile sağlanabildiği brülörlerdir. Monoblok brülörlerin sağlayamadığı yüksek ısıl güçleri sağlayabilirler. Harici fan kullanımı, bu brülörlerin negatif veya pozitif yanma odası karşı basınçlarında çalışmalarına imkan sağlar. Ayrıca, yüksek rakımlı işletmelerde, havanın daha az O_2 içeriği sebebiyle oluşan yüksek yanma odası karşı basıncı ve talep edilen yüksek güç için aynı brülör gövdesini kullanarak, harici fan entegrasyonuyla çözüm sağlanır. Bu brülörler, endüstrinin farklı alanlarında kullanılmaktadır. Duoblok brülörler, termik enerji santralleri, sıcak su kazanları, buhar kazanları, kızgın yağ kazanları, asfalt plentleri, sıcak hava üreteçleri, endüstriyel fırın uygulamaları, çimento tesisleri, kağıt fabrikaları, şeker fabrikaları, ısıl işlem fırınları, ergitme potaları, seramik sektörü pişirme prosesleri, tekstil ve ağaç sanayi gibi uygulamalarda ısı gücü üretmek amacıyla kullanılır (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. Duoblok brülör tipleri (a) ECO, (b) DIB, (c) DSE, (d) CIB, (e)FPB ve (f) FUSE (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023).

Monoblok ve duoblok brülörlerde, ateşleme ve iyonizasyon işlevi, elektrotlar ile sağlanabildiği gibi pilot brülör ve iyonizasyon sensörleriyle de sağlanabilir. Kontrol ünitesi brülör üzerinde montajlı veya harici bir pano üzerinde olabilir. Baca gazında O_2 ve CO_2 kontrolü ile oransal çalışabilirler. Bu sayede belirli emisyon kriterine bağlı olarak işletim sağlanır. Yakıt verimliliği artar. Son yıllarda artan çevre düzenlemeleri ve standartlar ile birlikte monoblok ve duoblok brülörlerde kirletici emisyon düşürme çalışmaları yapılmış, düşük NO_x ve ultra düşük NO_x brülörlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan FPB 200 proses brülörü, duoblok gövde yapısındadır ve yakma havası harici bir hava hattı ile sağlanmıştır. FPB 200 endüstride, kurutma, ısıtma, eritme ve kimyasal işlemler gibi prosesler için ısı gücü sağlamak için kullanılmaktadır.

BÖLÜM 8

DENEYSEL VE NÜMERİK ÇALIŞMALAR

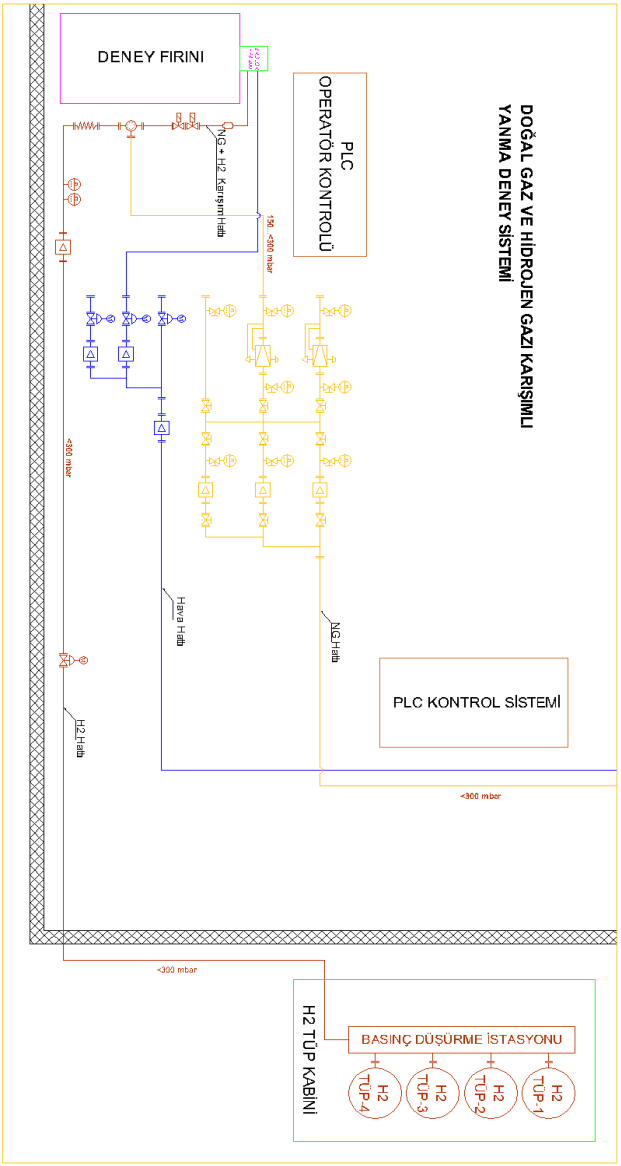
Bu bölümde, tez çalışmasında FPB 200 brülörünün, SAB (standart alev borulu mevcut türbülatör) kullanılarak, deney sisteminde, doğal gaz ve farklı hacimsel oranlarda H_2 yanma performansı incelenmiştir. Performans deneylerinde elde edilen bulgular ile nümerik hesaplamalar yapılmıştır. Deneysel ölçüm verileri ile nümerik hesaplama değerleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda oluşan veriler ile H_2, doğal gaz ve havanın daha fazla ön karışımının sağlanması gerektiği, dekarbonizasyonun arttırıldığı bir türbülatör tasarım ihtiyacı doğmuştur. Bu tasarımın oluşması için Solidworks tasarım yazılımı ve Ansys Fluent simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Tasarım geliştirildikten sonra, brülör parçalarının üretimi sağlanıp, deneysel çalışmalar için uygun hale getirilmiştir. Deneysel ve nümerik çalışmalarda, FPB 200 brülörü, NT (prototip türbülatör) türbülatörü ile tasarım optimizasyonu sağlanarak, aynı deney ve sınır koşulları ile yapılmıştır. NT türbülatörünün deney ölçüm değerleri ve HAD analizleri hesaplama değerleri ile karşılaştırılmıştır. SAB ve NT türbülatörünün deneysel ve nümerik verileri, konturlar, hesaplama ve ölçüm değerleri kullanılarak, görseller, grafikler ve tablolar üzerinden karşılaştırılarak, yorumlanmıştır.

8.1. Deneysel Çalışmalar

8.1.1. Deney Sisteminin Açıklanması

Tez çalışmasının deneysel çalışmaları, Tekirdağ'ın Çorlu ilçesinde, Türkgücü O.S.B.'de bulunan, Termo Isı Sistemleri San. Ve Tic. A.Ş.'nin tasarım merkezi laboratuvarında kurulu, doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney sisteminde yapılmıştır.

Doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney sistemi, doğal gaz, H_2, karışım gaz ve hava hatlarına sahiptir. Yakıt ve hava hatları, emniyet tertibatları ile donatılmış bir deney fırını üzerine montajlı bulunan FPB 200 brülör gövdesine yanma için gerekli olan yakıt ve hava debilerini sağlamaktadır. Bu deney sistemi, (PLC) programlanabilir mantıksal denetleyici ile kontrol edilmekte ve sistemin ölçtüğü veriler dijital ekran üzerinden okunmaktadır (Şekil 8.1).



Şekil 8.1. Doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney sistemi.

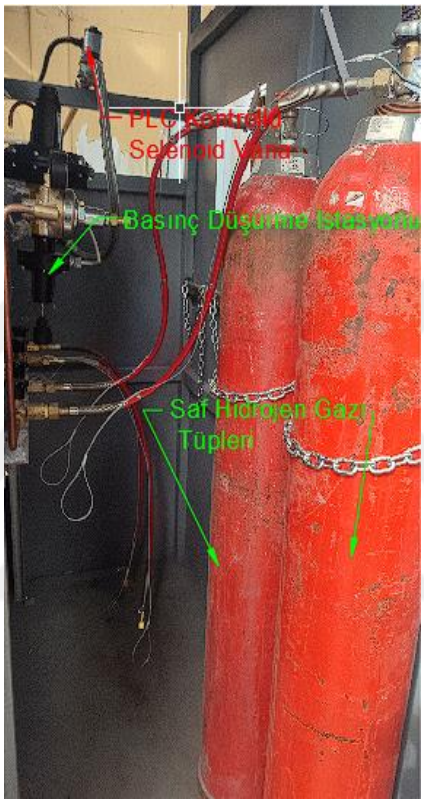
Doğal gaz hatları, farklı debilerde hassas ölçümler sağlayabilmektedir. Bu tez çalışmasında 0 - 45 Nm^3/h aralığında debili ölçümler için belirlenen hat kullanılmıştır. Doğal gazın hatta giriş basıncı 300 mbar'dır. Doğal gaz işletim basıncı, deneylerde kullanılan hat üzerindeki regülatörden 150 mbar – 200 mbar değerlerinde ayarlarlanarak brülörde yakma sağlanmıştır (Şekil 8.2). Doğal gazın hacimsel debisi, hat üzerinde bulunan doğal gaz debimetresi tarafından Nm^3/h biriminde ölçülüp, PLC sistemine anlık veri aktarımı ve okuması sağlanmıştır.



Şekil 8.2. Doğal gaz hattı ve PLC panosu.

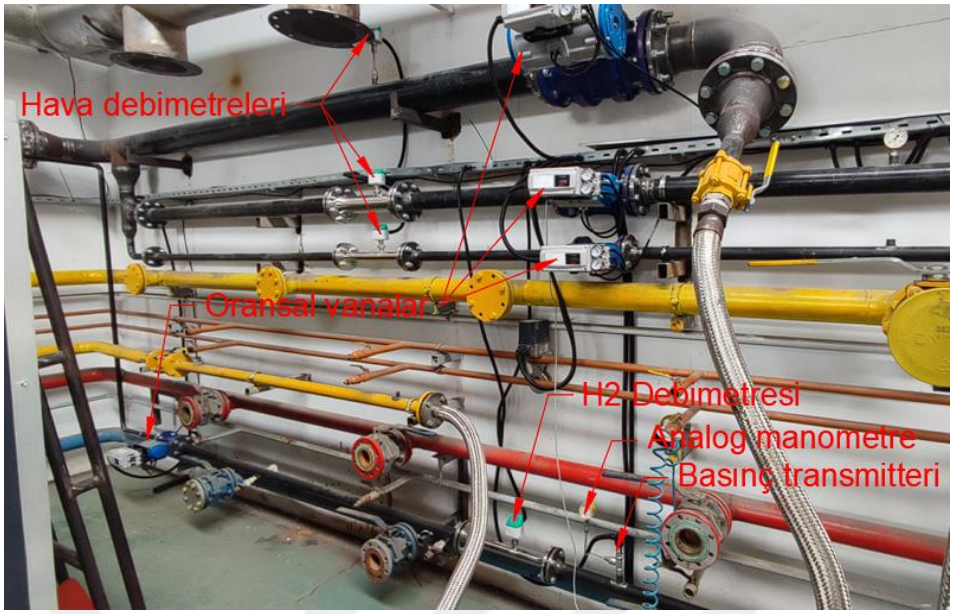
H_2 hattı, yüksek basınç hattı (Şekil 8.3) ve düşük basınç hattından (Şekil 8.4) oluşmaktadır. Yüksek basınç hattı, atmosfere açık bir alanda konumlandırılmış, kapalı bir kabin içerisinde, hava menfezli olarak, içinde H_2 tüpleri, tesisat ekipmanları ve PLC kontrollü selenoid açma vanasına kadar olan hattı kapsamaktadır. 230 Bar kafa basıncına sahip H_2 gazı tüplerinden yüksek basınçlı H_2, kollektör üzerinden basınç düşürme istasyonuna gönderilerek, basıncı 300 mbar'a kadar düşürülmektedir. Deney operatörü tarafından PLC kontrollü selenoid vana açma komutu verilerek, H_2'nin düşük basınç hattına geçişi sağlanır. Düşük basınç hattının bir bölümü fabrika dışında atmosfere açık, bir bölümü ise fabrika içinde tasarım merkezi laboratuvarına bağlıdır. Düşük basınç hattı, pnömatik oransal vana, H_2 debimetresi ve basınç ölçüm ekipmanlarından oluşmaktadır. Deneyler için gerekli H_2 debisi, PLC kontrol ekranından deney operatörü tarafından kademeli olarak ayarlanabilmektedir. H_2 debimetresi, hacimsel debiyi Nm^3/h biriminde

okumasını sağlayarak, PLC sistemine anlık veri aktarımı sağlamaktadır. Basınç ölçüm ekipmanları ise dijital basınç transmitteri ve paralel ölçüm sağlayabilen analog kadranlı manometreden oluşmaktadır. Debi okuması ve veri aktarımı sağlandıktan sonra deney için gerekli basınçta H_2'nin sağlanması için dijital basınç transmitterinin okuduğu anlık basınç verisi PLC kontrol ekranına aktarılmıştır. Bu veri, eş zamanlı olarak, analog manometre göstergesi üzerinden kontrol edilmiştir.



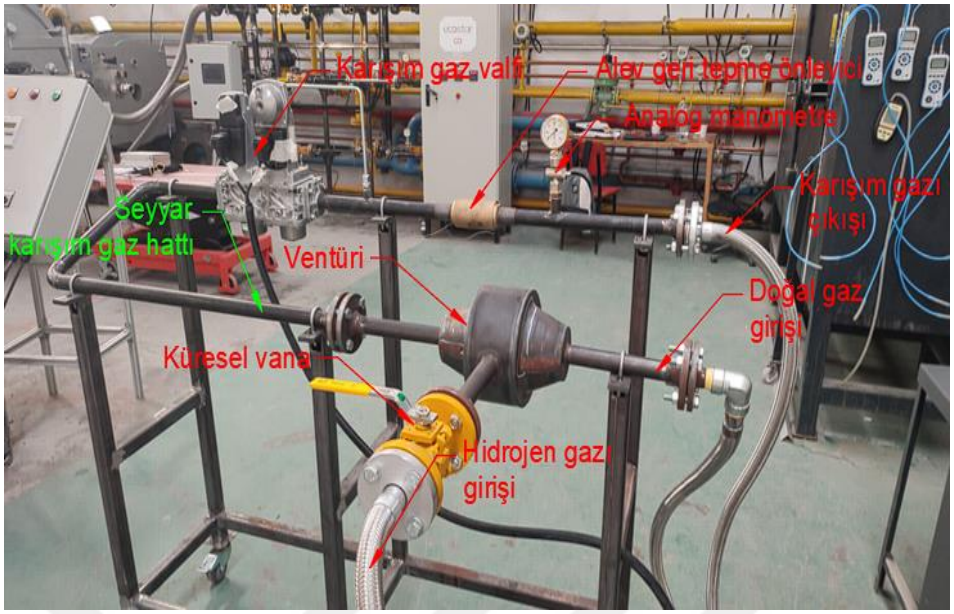
Şekil 8.3. H_2 gazı yüksek basınç hattı.

Yanma deneyleri için gerekli yakma havası, hava hattı ile sağlanmıştır. Hava hattı, daha hassas debi ölçümleri sağlayabilmesi için 3 ayrı hat olarak işletilmektedir. Ana hattaki hava debisi ve basıncına göre deney çalışmaları için uygun hat (50 – 250 Nm^3/h) kullanılmıştır. Yanma deneyleri sırasında farklı hava fazlalık katsayıları için gereken hava debisi, oransal vanalar ile PLC sistemi üzerinden ayarlanmıştır(Şekil 8.4). Hava hatlarının üzerinde bulunan hava debimetreleri ile havanın hacimsel debisini Nm^3/h biriminde okuyarak, PLC sistemine anlık veri aktarımı sağlanmıştır. Havanın anlık debi verisi PLC kontrol ekranı üzerinden okuması sağlanmıştır.



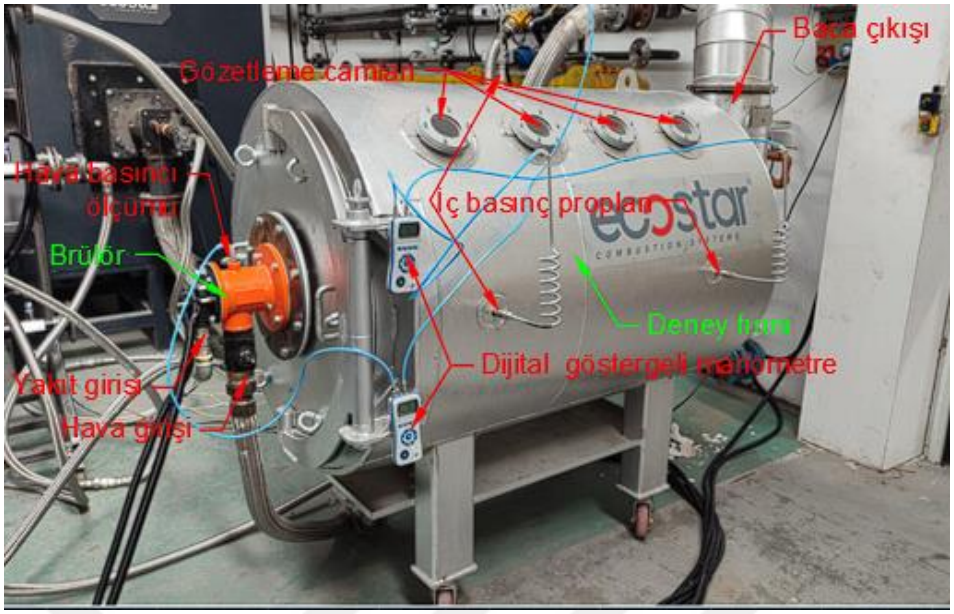
Şekil 8.4. H_2 gazı düşük basınç ve hava hatları.

Doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney ünitesinde farklı hacimsel oranlarda gaz yakıt karışımı, seyyar karışım gaz hattı ile sağlanmıştır. Seyyar karışım gaz hattına doğal gaz girişinden ve H_2 girişinden gaz yakıtlar verilmektedir. Doğal gaz ve H_2'nin karıştırma işlemi ventüri tarafından sağlanmaktadır. Homojen olarak karıştırılan gaz yakıtın, karışım gaz valfi olan multibloğun önce selenoid tip emniyet valfinden, sonra ise selenoid tip işletim valfinden geçişi sağlanmaktadır. Emniyet valfi, yanma için gerekli gaz debisinin varlığını sağlarken, işletim valfi brülörün istenen ısıl güçlerde yanabilmesi için gereken gaz debisinin geçişini sağlamaktadır. İşletim valfinden gereken karışım gaz debisi geçtikten sonra, alev geri tepme önleyici emniyet ekipmanı üzerinden karışım gazının geçişi sağlanmaktadır. Son adım olarak, analog manometre üzerinden basınç kontrolü yapılarak, karışım gazı çıkışı üzerinden brülöre karışım yakıt gazı sağlanmıştır (Şekil 8.5).

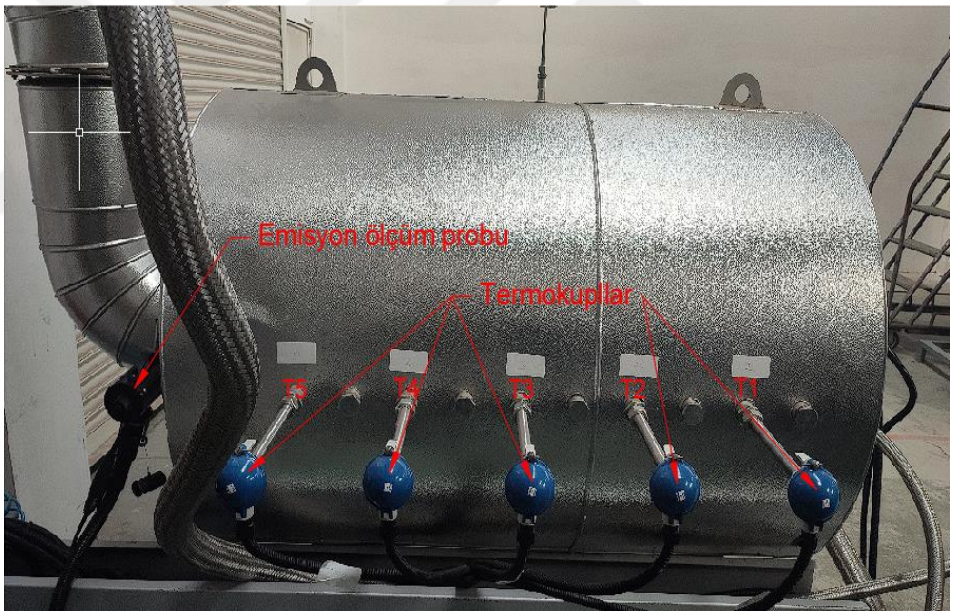


Şekil 8.5. Seyyar karışım gaz hattı ve ekipmanları.

Yanma deneylerinin gerçekleştirildiği deney fırını ve üzerine montajlı olan FPB 200 brülörü Şekil 8.6'da gösterilmiştir. Brülörün yakıt ve hava girişleri ayrı kanallardan sağlanmakta ve brülör yanma başlığında nozulda karışım sağlanmaktadır. Deney fırını üzerinde bulunan 3 farklı problar üzerinden iç basınç ölçümü yapılmıştır. Deney fırını iç bölgesindeki basınç değişimleri, iç basınç problarına bağlanan dijital göstergeli manometreler ile ölçülmüştür (Şekil 8.7). Fırın üzerinde farklı noktalardan sıcaklık ölçümlerini sağlamak için 5 adet fırın iç sıcaklık ölçüm termokuplları kullanılmıştır (Şekil 8.7). Baca gazı emisyon ölçümleri için baca çıkış kesitine montajlanan emisyon ölçüm probu ile sağlanmıştır (Şekil 8.7). Fırın gövdesi üzerinde, alev değişimlerini gözlemlemek için yüksek sıcaklığa dayanıklı 4 adet gözetleme camı bulunmaktadır. Brülör yandıktan sonra oluşan yanma gazları, baca çıkışı üzerinden negatif basınçlı bir baca emiş hattı ile atmosfere salınmıştır (Şekil 8.6). Yanma deneyleri, tüm emniyet tedbirleri alınarak, kontrollü bir şekilde yapılmıştır.



Şekil 8.6. Deney fırını ve üzerine montajlı FPB 200 brülörü.



Şekil 8.7. Deney fırını üzerinde emisyon ölçüm probu ve termokupların montajı.

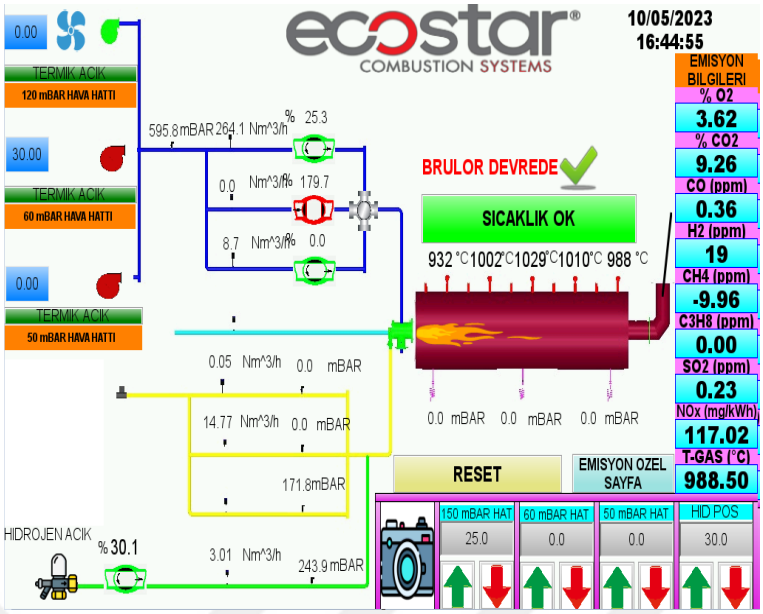
Deneylerde yanma sonucu oluşan baca gazı emisyonlarının ölçümü için "MRU MGA Prime Air Fair" baca analiz cihazı kullanılmıştır. Deneyler için cihaz, ana işletim ekranı üzerinden dokunmatik olarak deney koşullarına göre konfigüre edilmiştir. Deneyler başlamadan önce cihaz sıfırlanıp, deneyler için hazır hale getirilmiştir (Şekil 8.8). Deneyler sırasında yüzdesel (%) olarak, O_2 ve CO_2 , ppm (milyonda bir partikül

miktarı) olarak NO, CO, CH_4, H_2 emisyonları ve °C olarak baca sıcaklığı anlık ölçülmüştür.



Şekil 8.8. Emisyon ölçüm cihazı ve emisyon probu (paslanmaz metal).

Deneylerde kullanılan PLC sisteminin ölçtüğü anlık veriler dijital ekran üzerinde okunarak Şekil 8.9'da gösterilmiştir. Deneylerde yakma havası 120 mbar toplam basıncına sahip fan sistemi ile sağlanmıştır. Deney fırını iç sıcaklık ve basınç ölçümleri, oransal vanalar ve direkt aç kapa vanalarının kontrolü, anlık emisyon ölçüm değerleri, hava, doğal gaz, H_2 hatlarının işletimi, dijital dokunmatik ekran ile şematik olarak gösterilmiştir. Dijital ekran üzerinden deneyler sırasında anlık ekran görüntüsü alınmıştır. Brülörün devreye alınması, işletimi ve hata görüntülemesi, deneyler sırasında anlık ekran görüntüsü alınarak veri kaydı sağlanması yapılmıştır. Risk görüldüğü durumlarda, deney sistemine doğrudan müdahale edilebilmiş ve sistem emniyetli bir şekilde durdurulabilmiştir.



Şekil 8.9. PLC dijital ekranı üzerinde verilerin okunması ve kaydının sağlanması.

Deneylerde kullanılan ölçüm ve kontrol cihazlarının, marka ve modeli, çalışma aralığı ve hassasiyet değerleri Çizelge 8.1.'de belirtilmiştir.

Çizelge 8.1. Deney cihazlarının çalışma ve hassasiyet bilgileri.

No	Cihaz	Marka ve Model	Parametre	Çalışma Aralığı	Hassasiyet
1	Baca gazı emisyon cihazı	MRU MGA Prime	O2	0...%25	% 0,2
			CO2	0...%40	± % 0,2 veya % 1 okuma
			CO	0...200/10.000 ppm	± 2 ppm veya % 1 okuma
			CH4	0...500/10.000 ppm	± 2 ppm veya % 1 okuma
			C3H8	0...200/10.000 ppm	± 2 ppm veya % 1 okuma
			NO	0...200/4.000 ppm	± 2 ppm veya % 1 okuma
			NO2	0...100/1.000 ppm	± 2 ppm veya % 1 okuma
			SO2	0...200/4.000 ppm	± 2 ppm veya % 1 okuma
			N2O	0...200/1.000 ppm	± 2 ppm veya % 1 okuma
			°C	0°C ....1200°C	± 1°C veya % 2 okuma
2	Hava debimetresi	CS Instruments - VA520	Nm³/h	12,96 Nm³/h ... 307,75 Nm³/h	% 1,5
3	Doğal gaz debimetresi	CS Instruments - VA520	Nm³/h	1,650 Nm³/h ... 65,600 Nm³/h	% 1,5
4	Hidrojen gazı debimetresi	CS Instruments - VA520	Nm³/h	0,6 Nm³/h ... 56,301 Nm³/h	% 1,5
5	Basınç transmitterleri	ATEK - BCT 22	mbar	0....400 mbar	±%0,5 T.S veya ±%0,3 T.S @25° C
6	Sıcaklık transmitterleri	ELIMKO - TC02	°C	0....2000 °C	-+0.3+0,005T
7	Hat Pozisyonerleri	ROTORK - YT3300	°		± 0,2 % F.S.
8	Hat Aktüatörleri	TORK - RA	°	0°...90°	±5° Her iki yönde

8.1.2. Deney Brülörü Özellikleri

Bu tezin deneysel ve nümerik çalışmalarında, ECOSTAR FPB 200 proses gaz brülörü kullanılmıştır (Şekil 8.10). FPB 200, karışım bakımından ön karışımsız yanma, duoblok gövde, tek-çift-oransal işletim, doğal gaz ve LPG yakıt türlerinde yanabilme özelliklerine sahiptir. FPB 200 proses gaz brülörüne ait ısıl kapasite, yakıt tüketimi ve verimli yanma için gerekli yakma havası fan bilgileri Çizelge 8.2'de belirtilmiştir.



Şekil 8.10. FPB 200 proses gaz brülörü (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023).

Çizelge 8.2. FPB 200 Kapasite ve yakıt tüketim bilgileri (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023).

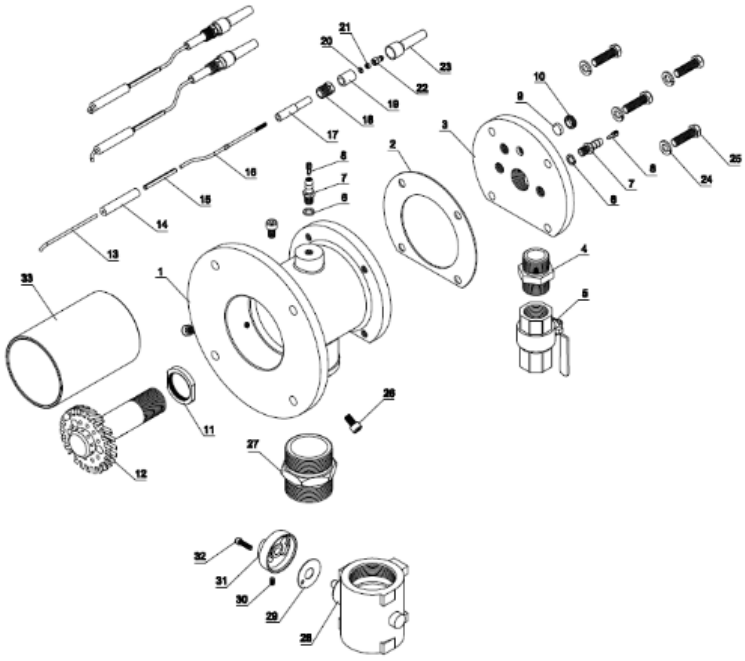
	KAPASİTE		KAPASİTE		Doğalgaz Tüketimi		LPG Tüketimi		FAN
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	DEBİ
	Kcal/h		kW		Nm³/h		Nm³/h		Nm³/h
FPB 200	40.000	200.000	46,5	232,6	4,8	24,2	1,8	8,9	350

Deney çalışmalarında kullanılan FPB 200 brülörü çift kademe işletime sahiptir. Genellikle kullanıma bağlı olarak birinci kademe, düşük ısıl güç taleplerinde ve devreye girme anında gereklidir. İkinci kademe ise talep edilen maksimum ısıl güce göre ayarlanır. Brülörün ısıl güç ayarı, sağlanan yakma havası debisi ve basıncı, hava klapesi tarafından, sağlanan gaz yakıt debisi ve basıncı, gaz valfinin ve klapesinin yanmanın işletimine göre ayarlanması ile sağlanmaktadır. Brülörün ateşleme ve alev kontrolü, yüksek sıcaklılara dayanıklı elektrotlar ile sağlanmaktadır (Çizelge 8.3). Deneysel

çalışmalarda maksimum ısıl güç 150 kW olarak ayarlanmıştır. Brülöre ait alt parçalar Şekil 8.11.'de açıklanmıştır.

Çizelge 8.3. Deney brülörü genel özellikleri (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023).

Yakıt Tipi	Doğal gaz ve LPG
İşletim Tipi	Çit Kademe
Ateşleme	Direk Ateşleme Elektrodu
Alev Kontrolü	İyonizasyon Elektrodu

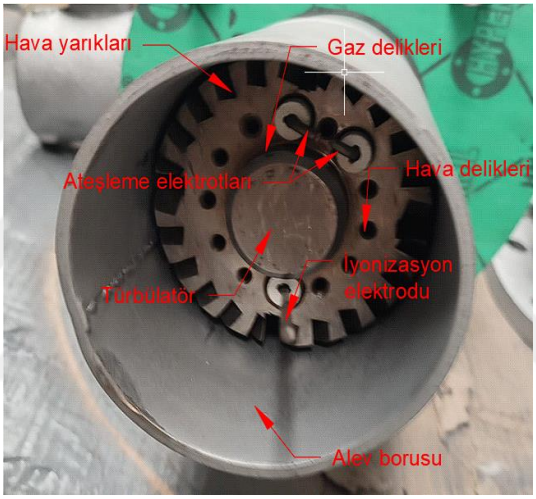


Montaj No	Parça Adı	Montaj No	Parça Adı
1	Gövde	18	Buji redüksiyonu
2	Conta	19	Buji porseleni
3	Gaz giriş flanşı	20	Pul
4	Nipel	21	Somun
5	Küresel vana	22	Buji başlığı
6	Pul	23	Ateşleme ionizasyon başlığı
7	Purjör	24	Pul
8	Purjör iğnesi	25	Cıvata
9	Gözetleme camı	26	Cıvata
10	Gözetleme camı yuvası	27	Nipel
11	Türbülatör ayar somunu	28	Klape komple
12	Türbülatör	29	Klape etiketi
13	ionizasyon elektrot teli	30	Setskur
14	Porselen	31	Klape göstergesi
15	Pim	32	Cıvata
16	Elektrot teli	33	Alev borusu
17	Buji porseleni		

Şekil 8.11. Deney brülörü alt parçaları (Endüstriyel Brülörler – Ecostar, 2023).

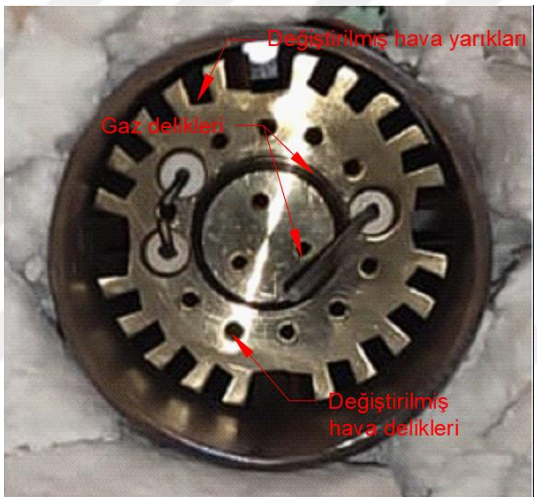
FPB 200 Doğal gaz brülörü, endüstriyel kullanımda genellikle, SAB (standart alev borusu) türbülatörü ile işletilmektedir. Bu türbülatör üzerinde ateşleme ve iyonizasyon elektrotları konumlandırılarak, işletim sağlanmaktadır (Şekil 8.12).

SAB türbülatörü, ön karışımsız yanma prensibine dayalı hava ve gaz yakıt karıştırma özelliğine sahiptir. Hava çevresel yarıklardan geçerek dönme etkisi oluşturur. Dönme etkisi brülörde alev sınırlarının belirlenmesi ve alev stabilizasyonun sağlanması için önemlidir. Türbülatörün hava geçiş delikleri ise gaz deliklerinden çıkan gaz yakıt ile alevin ön karışımının sağlanmasında etkilidir.



Şekil 8.12. FPB 200 üzerinde alev borusu, SAB türbülatörü, ateşleme ve iyonizasyon elektrodu montajı.

Tez çalışmasında brülörün yanma performanslarını kıyaslamak için farklı prototip türbülatör tasarımı kullanılmıştır. Bu tasarım tez çalışmasında NT türbülatörü (Şekil 8.13) olarak adlandırılmıştır. Türbülatörün çevresel yarıklarından geçen havanın hızı arttırılarak alev sınırlarını ve stabilizasyonu arttırmak amaçlanmıştır. Çünkü doğal gaza H_2 katkısıyla alev sınırlarının düşürülmesi öngörülmüştür. Hava deliklerinin akış yönü ve çapı değiştirilerek daha yoğun hava ve gaz karışımının sağlanması amaçlanmıştır. Yakma havasının hızları arttırılarak alev önü türbülans yoğunluğu artması sağlanıp, değiştirilmiştir. Türbülatörün gaz çıkış yönleri ve gaz çıkış delik çapları değiştirilerek alev formasyonunda değişim öngörülmüştür.



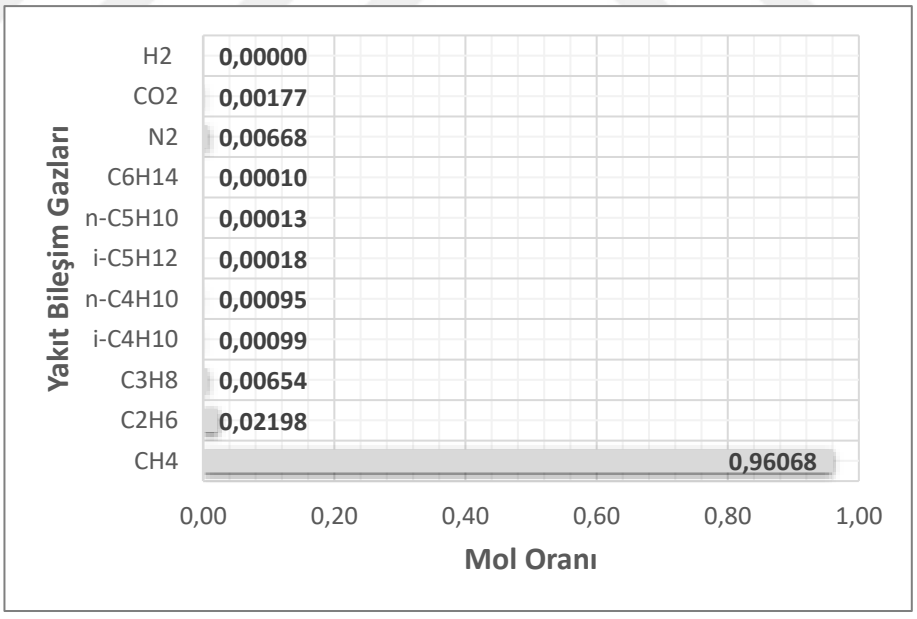
Şekil 8.13. FPB 200 üzerinde NT türbülatör montajı.

8.1.3. Yakıt Bileşim Özelliklerinin Belirlenmesi

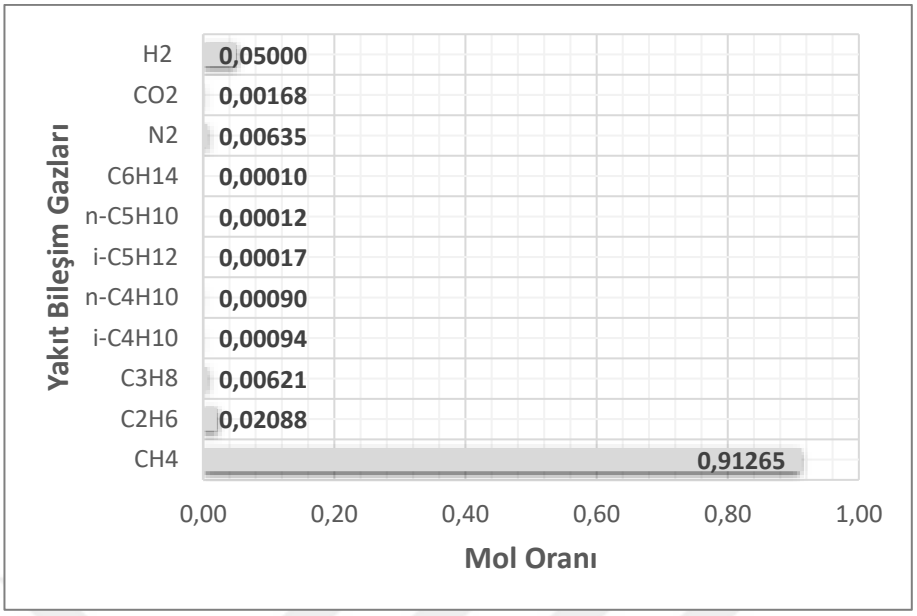
Deneysel ve nümerik çalışmalarda, yakıt olarak doğal gaz ve hidrojen gazı kullanılmıştır. Doğal gaz yakıtın bileşim değerleri, 01.04.2023 tarihinde Çordaş Çorlu Doğalgaz Dağıtım A.Ş. tarafından paylaşılan ölçüm değerlerinin ortalaması alınarak sağlanmıştır. H_2 ise Yavuz Metal Demir Çelik Ürünleri – Endüstriyel Gazlar ve Yapı Malzemeleri San. Tic. Ltd. Şti. tarafından 40 L ve 50 L kapasiteli, % 99,99 saflıkta sanayi tüpleri olarak temin edilmiştir.

Deneysel ve nümerik çalışmalarda 5 farklı yakıt bileşimi kullanılmıştır. Bu yakıt bileşimleri sırasıyla: % 100 DG, % 95 DG - % 5 H_2, % 90 DG - % 10 H_2, % 85 DG - % 15 H_2 ve % 80 DG - % 20 H_2 gazıdır.

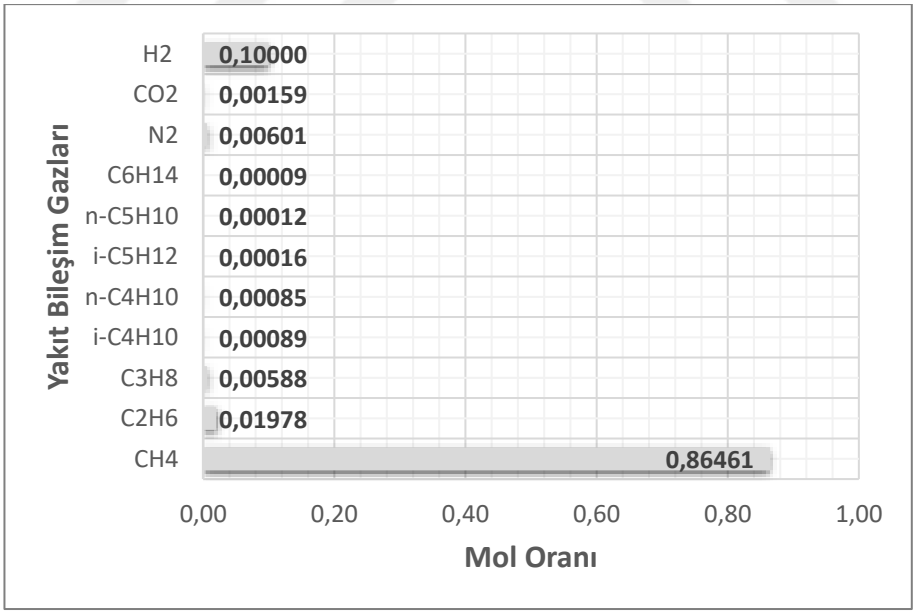
Şekil 8.14.'de görüldüğü üzere doğal gazın yakıt bileşiminin büyük bir oranı CH_4'den oluşmaktadır. Sonrasında hacimce en yüksek yanabilir, C_2H_6, C_3H_8, C_4H_{10}, pentan C_5H_{12}, C_6H_{14} gelmektedir. Şekil 8.15, Şekil 8.16, Şekil 8.17, ve Şekil 8.18'de ise hacimce H_2 kademeli olarak sırasıyla % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında doğal gaz ile karıştırılarak yanma için hazır hale getirilmiştir.



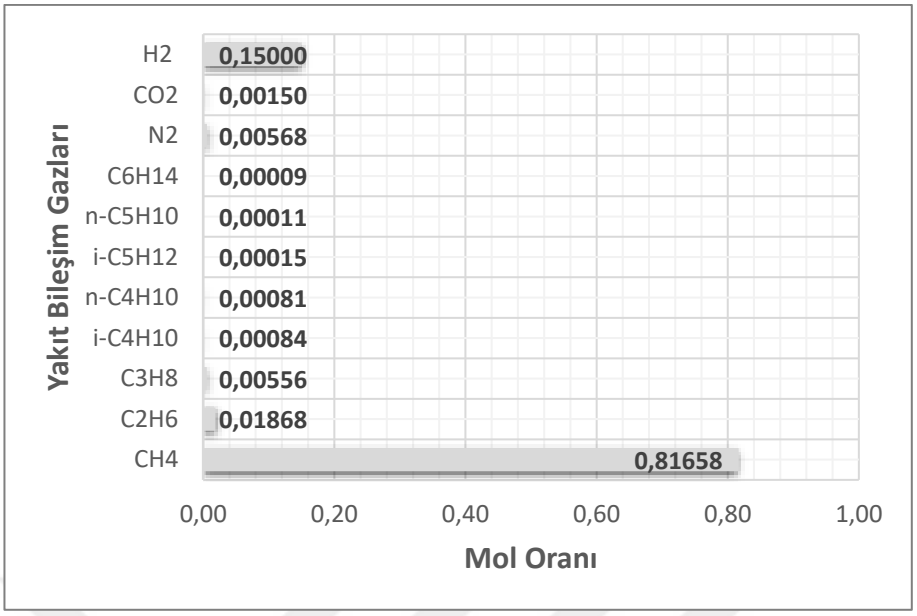
Şekil 8.14. Doğal gaz yakıtın bileşim değerleri.



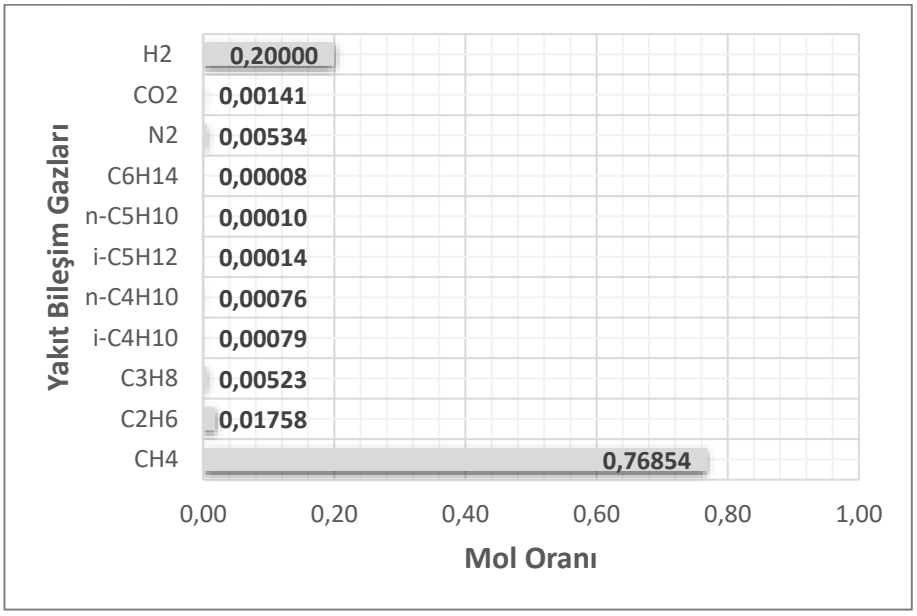
Şekil 8.15. Hacimce % 5 H_2 ve % 95 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri.



Şekil 8.16. Hacimce % 10 H_2 ve % 90 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri.



Şekil 8.17. Hacimce % 15 H_2 ve % 85 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri.



Şekil 8.18. Hacimce % 20 H_2 ve % 80 doğal gaz yakıtın bileşim değerleri.

8.1.4. Deney Koşullarının Belirlenmesi

Doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney sisteminde montajlı FPB 200 proses gaz brülöründe SAB türbülatörü ve NT türbülatörü kullanılarak, 5 farklı gaz yakıt türünde, λ=1,2, λ=1,3 ve λ=1,4 hava fazlalık katsayılarında gerçekleşen yanmanın incelenmesi için toplam 30 farklı deney yapılmıştır. Deneyler için Çizelge 8.4.'deki koşullar sağlanmıştır.

Çizelge 8.4. FPB 200 SAB ve NT türbülatörü için kullanılan deney koşulları.

Hacimce Gaz Karışım Oranı	Isıl Kapasite (kW)	LHV (kcal/Nm³)	Q_Toplam (Nm³/h)	Q_NG (Nm³/h)	Q_H2 (Nm³/h)	H/Y, λ=1.2	H/Y, λ=1.3	H/Y, λ=1.4
%100 NG	150	8066	16	16	0	11,3	12,2	13,2
% 95 NG + % 5 H2	150	7798,2	16,5	15,7	0,8	10,9	11,8	12,7
% 90 NG + % 10 H2	150	7518,2	17,2	15,4	1,8	10,5	11,3	12,2
% 85 NG + % 15 H2	150	7246,1	17,8	15,1	2,7	10,1	10,9	11,7
% 80 NG + % 20 H2	150	6969,9	18,5	14,8	3,7	9,7	10,5	11,3

8.1.5. Deneysel Sonuçlar

Deneysel çalışmalarda belirlenen ısıl güç ve hava fazlalık katsayılarında, brülör yakıt gaz işletim basıncı, yakma havası işletim basıncı, deney fırını iç basıncı ve iç sıcaklık değişimleri, baca gazındaki emisyonların kontrolü sağlanmıştır.

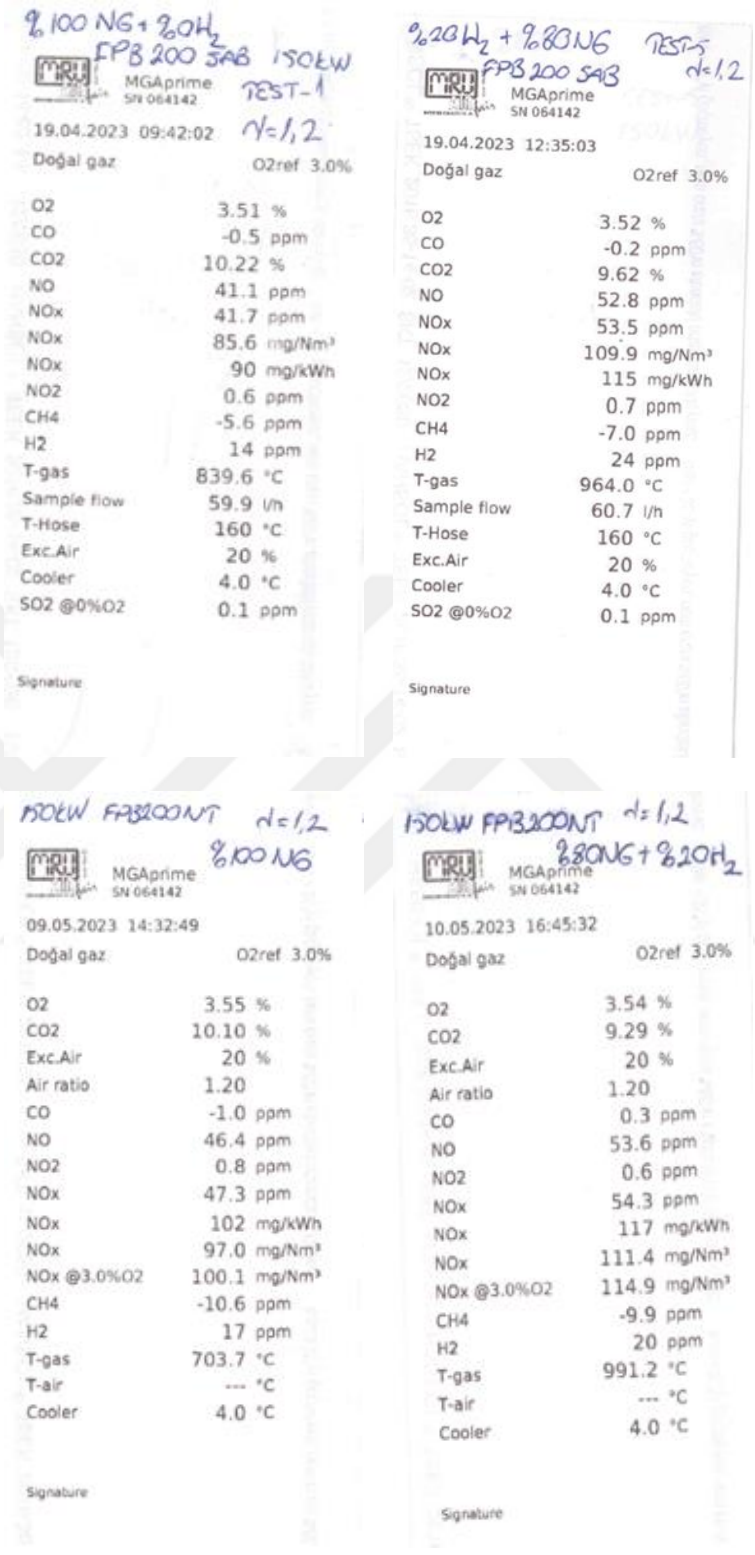
Yanma deneyleri sırasında alevin oluşturduğu sıcaklık değişimlerini ölçmek için fırın yatay kesitinde brülörün alev borusundan itibaren fırın baca çıkışına kadar eşit aralıklarla sıcaklık ölçüm termokuplları konumlandırılmıştır. FPB 200 SAB türbülatörü ile ölçülen fırın cidarı sıcaklık değerleri, λ=1.2 katsayılı deneyler için Şekil 8.20' de, λ=1.3 katsayılı deneyler için Şekil 8.21'de ve λ=1.4 katsayılı deneyler için Şekil 8.22,'de gösterilmiştir.FPB 200 NT türbülatörü ile ölçülen fırın cidarı sıcaklık değerleri, λ=1.2 katsayılı deneyler için Şekil 8.23'de, λ=1.3 katsayılı deneyler için Şekil 8.24'de ve λ=1.4 katsayılı deneyler için Şekil 8.25,'de gösterilmiştir. Ölçülen tüm deneylerde doğal gaz içeriğindeki H_2 oranı artışı, alevin yanma bölgesine doğru gelerek, bu bölgelerde sıcaklıkların artmasına sebep olmuştur.

Yanma reaksiyonu tamamlandıktan sonra baca gazı emisyonları oluşmaktadır. Yanma sonucu oluşan emisyon değerleri (Şekil 8.19). sabitlendikten sonra ölçüm değerlerinin okuması sağlanmıştır Çizelge 8.5, Çizelge 8.6 ve Çizelge 8.7'da sırasıyla λ =1.2, λ =1.3 ve λ =1.4 hava fazlalıklarında doğal gaza hacimce % 20 oranında hidrojen gazı karıştırılmasının emisyonlara etkisi gösterilmektedir. Aynı λ katsayısında için SAB ve NT türbülatörünün O_2 emisyonlarında önemli bir fark görülmeyip, sadece küçük değişimler görülmüştür. Çizelge 8.5'te verilen sonuçlarda, λ =1.2 katsayısı için SAB türbülatörünün CO_2 emisyonlarında % 5,8 düşüş ve NO_x emisyonlarında % 22 artış görülürken, NT türbülatörünün CO_2 emisyonlarında % 8,2 düşüş ve NOx emisyonlarında % 12,9 artış görülmüştür. Çizelge 8.6'da verilen sonuçlarda, λ =1.3 katsayısı için SAB türbülatörünün CO_2 emisyonlarında % 5,85 düşüş ve NO_x emisyonlarında % 28,3 artış görülürken, NT türbülatörünün CO_2 emisyonlarında % 7 düşüş ve NOx emisyonlarında % 12,94 artış görülmüştür. Çizelge 8.7'da verilen sonuçlarda, λ =1.4 katsayısı için SAB türbülatörünün CO_2 emisyonlarında % 5,86 düşüş ve NO_x emisyonlarında % 21,7 artış görülürken, NT türbülatörünün CO_2 emisyonlarında % 7,2 düşüş ve NOx emisyonlarında % 18,4 artış görülmüştür.

Emisyon ölçüm cihazından ölçülen O_2 emisyonları Şekil 8.26'da karşılaştırılmış olup aynı λ katsayılarında O_2 emisyonlarının küçük değişimlerle sabit olduğunu göstermiştir. CO_2 emisyonları Şekil 8.27'de karşılaştırılmış olup farklı λ katsayılarında CO_2 emisyonlarının düşüş eğiliminde ve Şekil 8.28'de farklı λ katsayılarında NO_x emisyonları artış eğilimindedir.

Şekil 8.29'da gösterilen atmosfer koşulunda yapılan yanmada doğal gaza H_2 katılmasıyla alev hacminin küçülerek brülöre doğru yaklaştığı, doğal gaz alevinde eksik yanmanın oluşturduğu sarı bölgenin, H_2 katılmasıyla mavi renge döndüğü gözlenmiştir.

Deneylerin tamamında yanma odası iç basıncı ölçülmüş olup, tüm alev durumları için ± 0,1 mbar iç basınç ölçülmüştür. Bu durum, her iki türbülatörün yanmasında basınç artışı veya düşüşü oluşmadığını göstermiştir.



Şekil 8.19. Deneylerde kullanılan baca gazı emisyon fişleri.

Çizelge 8.5. FPB 200 SAB ve NT emisyonlarındaki değişim; 150 kW, λ =1.2.

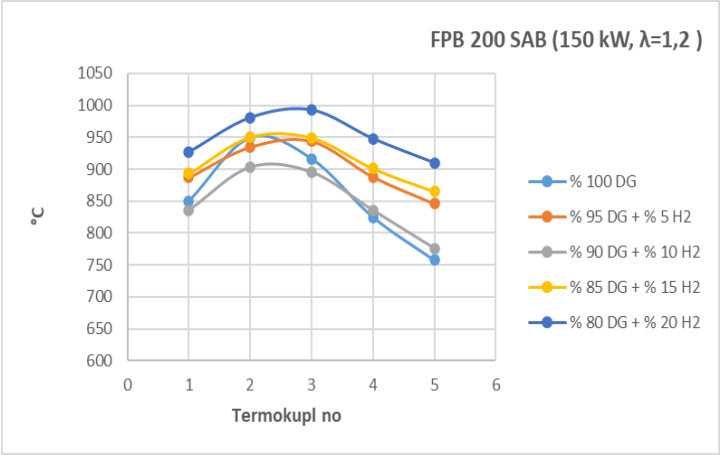
150 kW, λ =1.2	H_2 (%)	DG (%)	O_2 (%)	CO_2 (%)	NO_x (ppm)
FPB 200, SAB	0	100	3,51	10,22	41,7
FPB 200, SAB	20	80	3,52	9,62	53,5
FPB 200, NT	0	100	3,55	10,1	47,3
FPB 200, NT	20	80	3,54	9,29	54,3

Çizelge 8.6. FPB 200 SAB ve NT emisyonlarındaki değişim; 150 kW, λ =1.3.

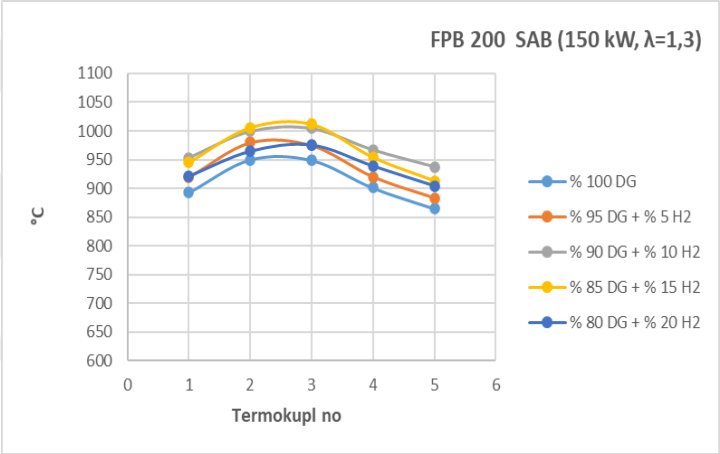
150 kW, λ =1.3	H_2 (%)	DG (%)	O_2 (%)	CO_2 (%)	NO_x (ppm)
FPB 200, SAB	0	100	4,86	9,23	36,4
FPB 200, SAB	20	80	4,71	8,69	50,8
FPB 200, NT	0	100	4,87	9,34	42,4
FPB 200, NT	20	80	4,89	8,69	48,7

Çizelge 8.7. FPB 200 SAB ve NT emisyonlarındaki değişim; 150 kW, λ =1.4.

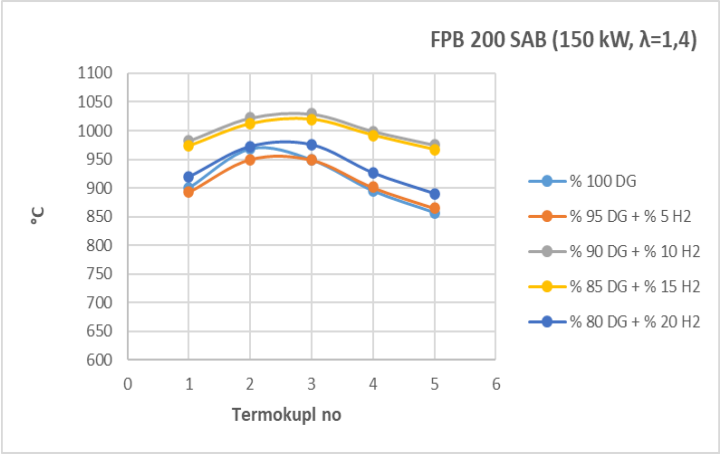
150 kW, λ =1.4	H_2 (%)	DG (%)	O_2 (%)	CO_2 (%)	NO_x (ppm)
FPB 200, SAB	0	100	5,94	8,87	30,3
FPB 200, SAB	20	80	5,98	8,35	38,7
FPB 200, NT	0	100	6,01	8,71	35,6
FPB 200, NT	20	80	5,95	8,09	43,6



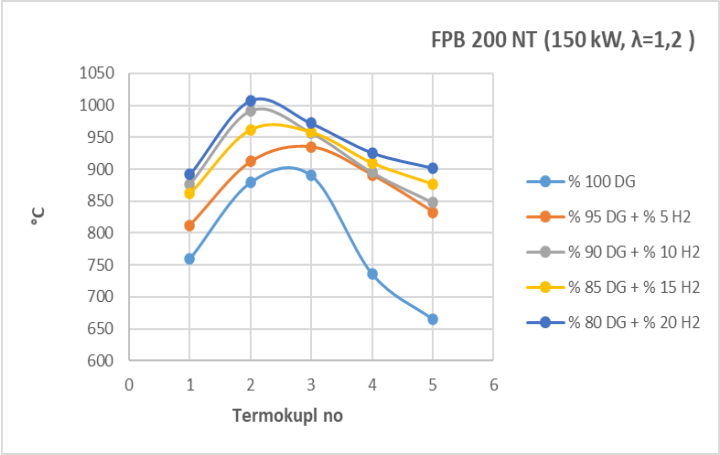
Şekil 8.20. Fırın içi sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 SAB, 150 kW, λ = 1.2.



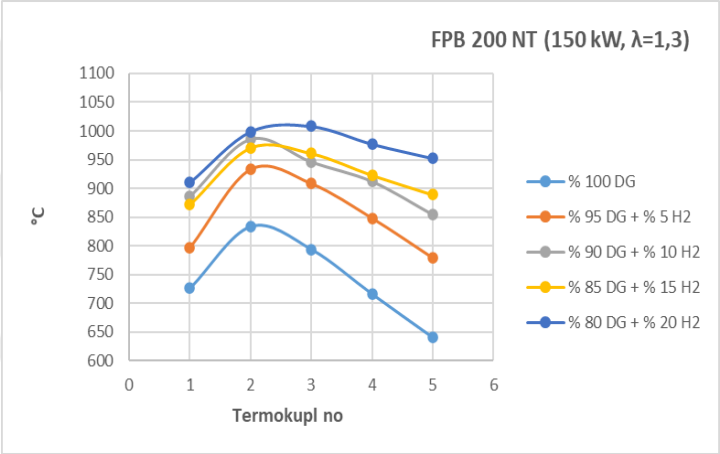
Şekil 8.21. Fırın içi sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 SAB, 150 kW, λ = 1.3.



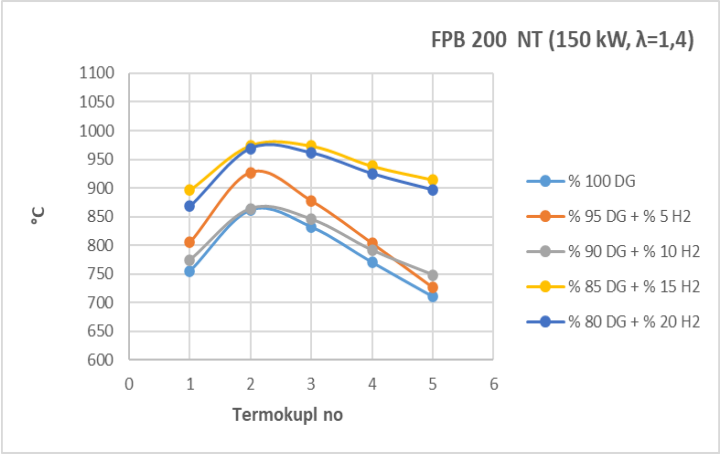
Şekil 8.22. Fırın içi sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 SAB, 150 kW, λ = 1.4.



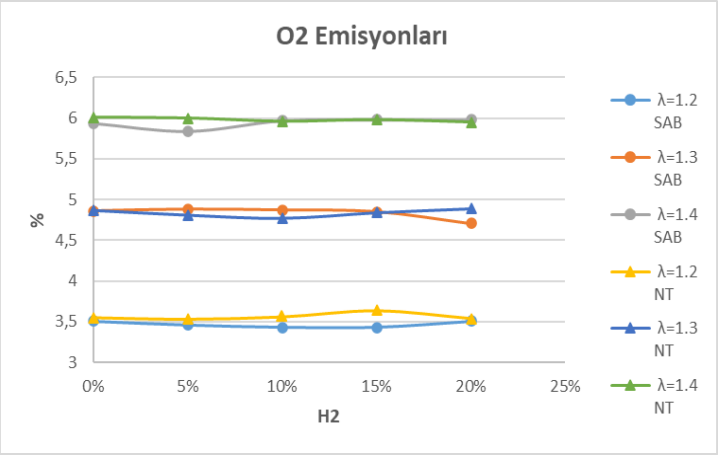
Şekil 8.23. Fırın iç sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 NT, 150 kW, λ = 1.2.



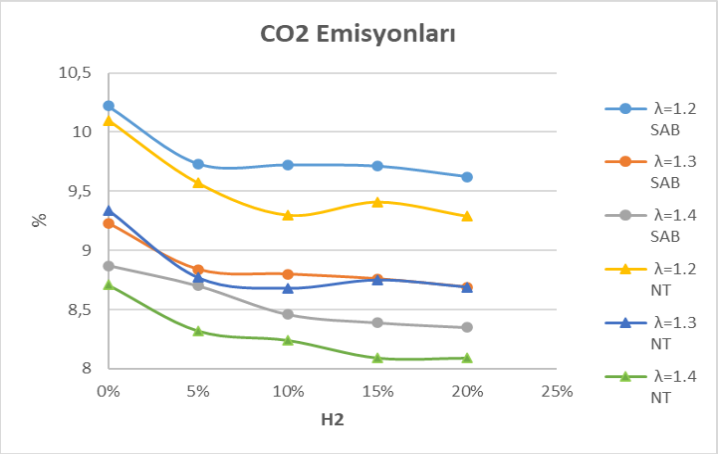
Şekil 8.24. Fırın iç sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 NT, 150 kW, λ = 1.3.



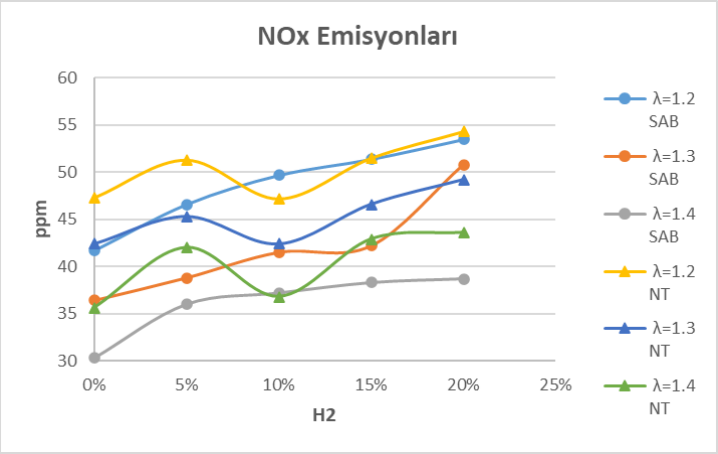
Şekil 8.25. Fırın iç sıcaklık (°C) ölçüm değerleri; FPB 200 NT, 150 kW, λ = 1.4.



Şekil 8.26. O_2 (%); 150 kW, FPB 200 SAB ve NT, λ = 1.2, λ = 1.3 ve λ = 1.4.



Şekil 8.27. CO_2 (%); 150 kW, FPB 200 SAB ve NT, λ = 1.2, λ = 1.3 ve λ = 1.4.



Şekil 8.28. NO_x (ppm); 150 kW, FPB 200 SAB ve NT, λ = 1.2, λ = 1.3 ve λ = 1.4.



Şekil 8.29. % 100 DG (Solda) ve % 80 DG ,+ % 20 H_2 (Sağda) yakıt ile atmosferde yanma deneyi görsel sonucu; FPB 200 NT, 150 kW, λ=1.2.

8.2. Nümerik Çalışmalar

Tez çalışmasına yapılan nümerik çalışmalar, ANSYS Fluent 17.0 HAD simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nümerik analizler için 3 boyutlu modelleme çalışmaları Solidworks 2019 tasarım yazılımında hazırlanmıştır. Nümerik çalışmalarda bir HAD analizi için aşağıda sırayla belirtilen adımlar gerçekleştirilmiştir:

I. **Solidworks** tasarım yazılımında 3 boyutlu geometri modelinin hazırlanması,

II. **ANSYS Design Modeler** yazılımında geometri modelinin düzenlenmesi ve akış hacminin oluşturulması,

III. **ANSYS Meshing** yazılımında akış hacminin ağ çalışmalarının yapılması,

IV. **ANSYS Fluent** yazılımında ağın okutulma ve düzenleme işlemlerinin yapılması, problemin çözümü için fiziksel koşulların belirlenmesi, sınır şartlarının girilmesi, çözücü seçimi ve sonuçların son işlemci üzerinden alınması yapılmıştır.

8.2.1. Teorik Yakma Havası ve Yanma Ürünlerinin Hesaplamaları

Nümerik çalışmalarda sınır koşullarının oluşturulması için gerekli olan yakıt gazlarının fiziksel özellikleri Çizelge 8.8'de ve teorik H/Y oranı Çizelge 8.9'de, Çizelge 8.10'de, Çizelge 8.11'de, Çizelge 8.12'de, ve Çizelge 8.13'de hesaplanmıştır.

Çizelge 8.8. Hacimce karışım oranlarına göre yakıt fiziksel özelliklerinin belirlenmesi (Çengel & Cimbala, 2006).

Hacimce Karışım Oranı	Yoğunluk (kg/m^3)	Dinamik Vizkozite (kg/m.s)	Kinematik Vizkozite (m^2/s)	Molar Ağırlık (g/mol)
%100 DG	0,6893	1,08E-05	1,60E-05	16
% 95 DG + % 5 H2	0,6595	1,02E-05	1,52E-05	15,3
% 90 DG + % 10 H2	0,6293	9,69E-06	1,44E-05	14,6
% 85 DG + % 15 H2	0,5994	9,15E-06	1,36E-05	13,9
% 80 DG + % 20 H2	0,5986	8,62E-06	1,28E-05	13,2

Çizelge 8.9. Hacimce % 100 DG için teorik hava oranının hesaplanması.

Temel Yanma Denklemleri	Hacimsel Yüzde %
1 CH4 + 2 (1 O2 + 3,76 N2) = 1 CO2 + 2 H2O + 7,52 N2	96,068
1 C2H6 + 3,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 2 CO2 + 3 H2O + 13,16 N2	2,198
1 C3H8 + 5 (1 O2 + 3,76 N2) = 3 CO2 + 4 H2O + 18,8 N2	0,654
1 C4H10 + 6,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 4 CO2 + 5 H2O + 24,44 N2	0,194
1 C5H12 + 8 (1 O2 + 3,76 N2) = 5 CO2 + 6 H2O + 30,08 N2	0,031
1 C6H14 + 9,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 6 CO2 + 7 H2O + 35,72 N2	0,01
1 H2 + 0,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 0 CO2 + 1 H2O + 1,88 N2	0

Toplam Teorik Hava	9,74	m³/m³
Yanma Ürünleri		%
CO2	1,03	9,61
H2O	2,03	18,83
N2	7,70	71,55
Toplam	10,76	

λ=1.2	11,69 m³/m³
λ=1.3	12,67 m³/m³
λ=1.4	13,64 m³/m³

Çizelge 8.10. Hacimce % 95 DG ve % 5 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması.

Temel Yanma Denklemleri	Hacimsel Yüzde %
1 CH4 + 2 (1 O2 + 3,76 N2) = 1 CO2 + 2 H2O + 7,52 N2	91,265
1 C2H6 + 3,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 2 CO2 + 3 H2O + 13,16 N2	2,088
1 C3H8 + 5 (1 O2 + 3,76 N2) = 3 CO2 + 4 H2O + 18,8 N2	0,621
1 C4H10 + 6,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 4 CO2 + 5 H2O + 24,44 N2	0,184
1 C5H12 + 8 (1 O2 + 3,76 N2) = 5 CO2 + 6 H2O + 30,08 N2	0,029
1 C6H14 + 9,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 6 CO2 + 7 H2O + 35,72 N2	0,01
1 H2 + 0,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 0 CO2 + 1 H2O + 1,88 N2	5

Toplam Teorik Hava	9,38	m³/m³
Yanma Ürünleri		%
CO2	0,98	9,48
H2O	1,97	19,05
N2	7,41	71,47
Toplam	10,36	

λ=1.2	11,25 m³/m³
λ=1.3	12,19 m³/m³
λ=1.4	13,13 m³/m³

Çizelge 8.11. Hacimce % 90 DG ve % 10 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması.

Temel Yanma Denklemleri	Hacimsel Yüzde %
1 CH4 + 2 (1 O2 + 3,76 N2) = 1 CO2 + 2 H2O + 7,52 N2	86,461
1 C2H6 + 3,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 2 CO2 + 3 H2O + 13,16 N2	1,978
1 C3H8 + 5 (1 O2 + 3,76 N2) = 3 CO2 + 4 H2O + 18,8 N2	0,588
1 C4H10 + 6,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 4 CO2 + 5 H2O + 24,44 N2	0,174
1 C5H12 + 8 (1 O2 + 3,76 N2) = 5 CO2 + 6 H2O + 30,08 N2	0,028
1 C6H14 + 9,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 6 CO2 + 7 H2O + 35,72 N2	0,009
1 H2 + 0,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 0 CO2 + 1 H2O + 1,88 N2	10

Toplam Teorik Hava	9,01	m³/m³
Yanma Ürünleri		%
CO2	0,93	9,34
H2O	1,92	19,29
N2	7,11	71,37
Toplam	9,97	

λ=1.2	10,81 m³/m³
λ=1.3	11,71 m³/m³
λ=1.4	12,61 m³/m³

Çizelge 8.12. Hacimce % 85 DG ve % 15 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması.

Temel Yanma Denklemleri	Hacimsel Yüzde %
1 CH4 + 2 (1 O2 + 3,76 N2) = 1 CO2 + 2 H2O + 7,52 N2	81,658
1 C2H6 + 3,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 2 CO2 + 3 H2O + 13,16 N2	1,868
1 C3H8 + 5 (1 O2 + 3,76 N2) = 3 CO2 + 4 H2O + 18,8 N2	0,556
1 C4H10 + 6,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 4 CO2 + 5 H2O + 24,44 N2	0,165
1 C5H12 + 8 (1 O2 + 3,76 N2) = 5 CO2 + 6 H2O + 30,08 N2	0,028
1 C6H14 + 9,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 6 CO2 + 7 H2O + 35,72 N2	0,009
1 H2 + 0,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 0 CO2 + 1 H2O + 1,88 N2	15

Toplam Teorik Hava	8,64	m³/m³
Yanma Ürünleri		%
CO2	0,88	9,18
H2O	1,87	19,55
N2	6,83	71,27
Toplam	9,58	

λ=1.2	10,37 m³/m³
λ=1.3	11,23 m³/m³
λ=1.4	12,10 m³/m³

Çizelge 8.13. Hacimce % 80 DG ve % 20 H_2 için teorik hava oranının hesaplanması.

Temel Yanma Denklemleri	Hacimsel Yüzde %
1 CH4 + 2 (1 O2 + 3,76 N2) = 1 CO2 + 2 H2O + 7,52 N2	76,854
1 C2H6 + 3,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 2 CO2 + 3 H2O + 13,16 N2	1,758
1 C3H8 + 5 (1 O2 + 3,76 N2) = 3 CO2 + 4 H2O + 18,8 N2	0,523
1 C4H10 + 6,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 4 CO2 + 5 H2O + 24,44 N2	0,155
1 C5H12 + 8 (1 O2 + 3,76 N2) = 5 CO2 + 6 H2O + 30,08 N2	0,024
1 C6H14 + 9,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 6 CO2 + 7 H2O + 35,72 N2	0,008
1 H2 + 0,5 (1 O2 + 3,76 N2) = 0 CO2 + 1 H2O + 1,88 N2	20

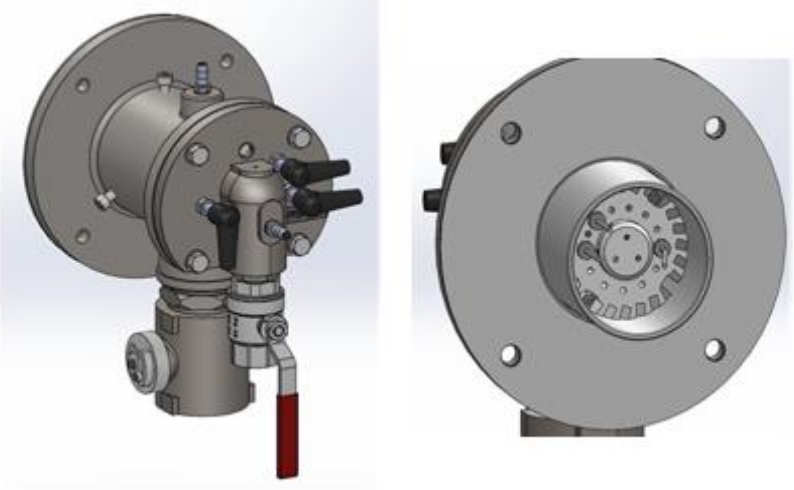
Toplam Teorik Hava	8,27	m³/m³
Yanma Ürünleri		%
CO2	0,83	9,01
H2O	1,82	19,83
N2	6,53	71,16
Toplam	9,18	

λ=1.2	9,92 m³/m³
λ=1.3	10,75 m³/m³
λ=1.4	11,58 m³/m³

8.2.2. Geometri ve Ağ Ayarlarının Yapılması

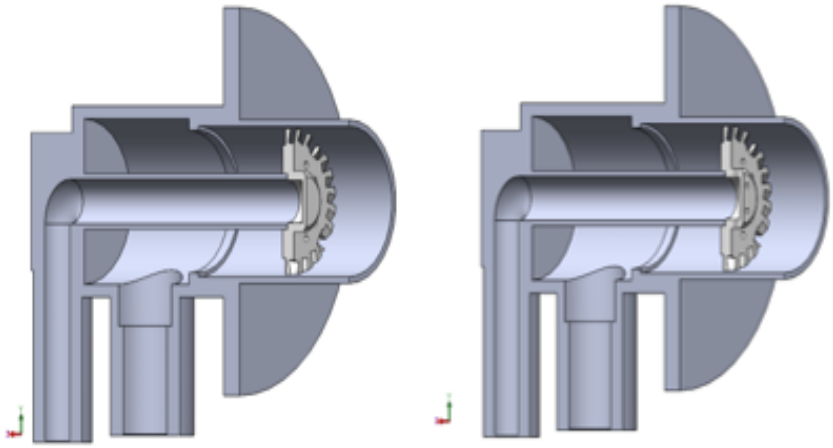
Nümerik analizler için kullanılan HAD geometri modelleri Solidworks 2017 tasarım yazılımında ve ANSYS Design Modeler 17.0 yazılımında tasarlanmıştır. HAD analizlerinde, akışı ve reaksiyon mekanizmasını doğrudan etkilemeyen, model tasarımında bazı basitleştirmeler sağlanmıştır. HAD analiz geometri modelinde basite indirgeme yöntemleri, kaliteli bir ağ yapısının oluşturulması için gereklidir. Bu tez çalışmasında geometri modelleri üzerinde yapılan basitleştirmeler başlıca:

1. Ateşleme elektrodu ve iyonizasyon elektrodu modellenmemiştir.
2. Ateşleme elektrodu ve iyonizasyon elektrodu montaj parçaları modellenmemiştir.
3. Civatalar ve bağlantı delikleri modellenmemiştir.
4. Brülör üzerinde bulunan bazı yardımcı ekipmanlar modellenmemiştir.
5. Türbülatör kanatları üzerinde geometrik basitleştirmeler yapılmıştır.



Şekil 8.30. FPB 200 proses gaz brülörü 3 boyutlu katı modeli.

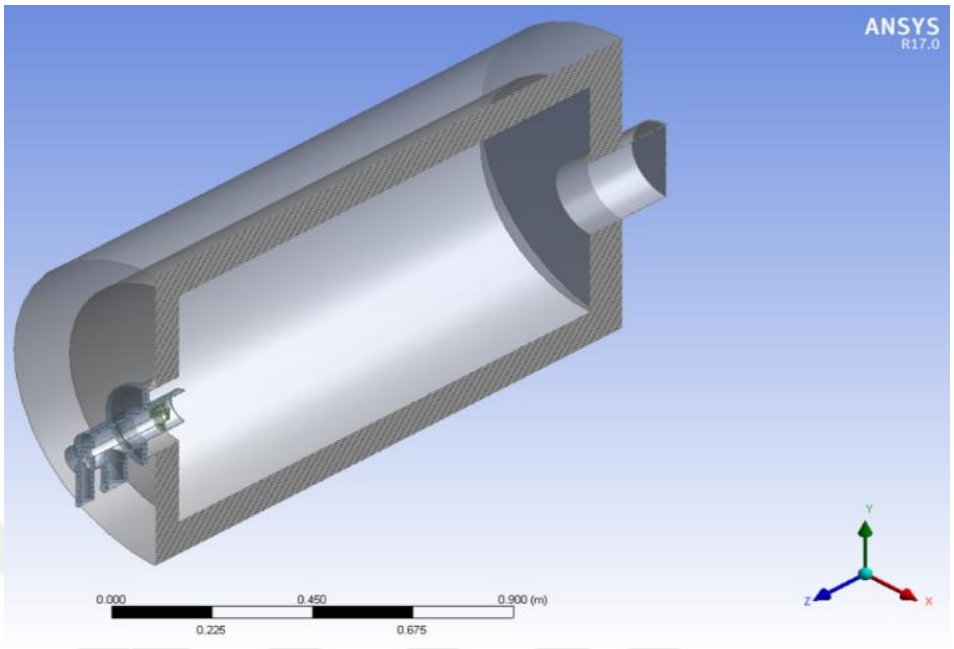
Şekil 8.30'da FPB 200 proses gaz brülörünün tüm ekipmanları üzerinde 3 boyutlu katı modeli bulunmaktadır. Bu haliyle geometrinin HAD analizlerinde kullanılması ağ atılamayacağından dolayı oldukça zordur. Bu sebeple, Şekil 8.31'de FPB 200 brülörünün SAB ve NT türbülatörleri ile oluşturulan basitleştirilmiş brülör geometri modelleri hazırlanmıştır.



Şekil 8.31. FPB 200 proses gaz brülörünün SAB türbülatörü (solda) ve NT türbülatörü (sağda) ile hazırlanmış HAD analiz geometrileri.

Tez çalışmasının deneysel çalışmaları ile nümerik çalışmaların karşılaştırılması için deney fırını (yanma odası) brülör üzerinde montajlı olarak modellenmelidir. Deneysel ölçüm değerleri ile nümerik hesaplama değerlerinin karşılaştırılması için fiziksel koşulların ölçüm değerleri baz alınarak, HAD simülasyon kodlarının

oluşturulması gerekmektedir. Şekil 8.32'de brülör geometrisi, deney fırını analiz geometrisi üzerinde birlikte montajlanarak nümerik hesaplamalar için hazırlanmıştır.



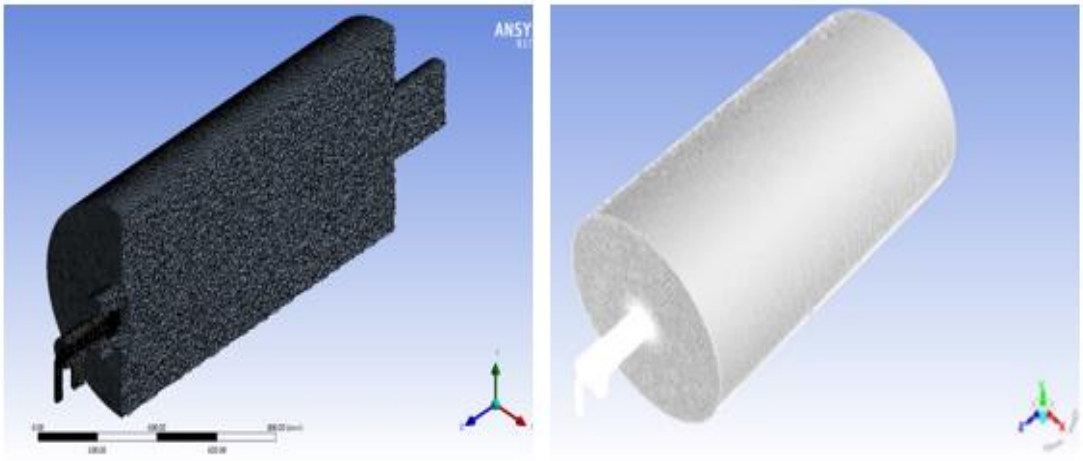
Şekil 8.32. Brülör ve fırın sisteminin HAD analiz geometri modeli.

Tasarımların nümerik analiz modeli için katı model çalışmaları tamamlandıktan sonra ANSYS Design Modeler 17.0 yazılımında akış hacmi oluşturulmuştur. Buradan aynı çalışma alanı içerisinde ANSYS Meshing 17.0 yazılımına transferi sağlanmıştır.

Brülör ve deney fırının nümerik analizler için hazırlanan ağ yapısı, yapısal olmayan tetrahedral hücrelerden oluşmaktadır (Şekil 8.33). Nümerik çalışmalarda kullanılan ağ yapısının sayısal değerleri Çizelge 8.14'de verilmiştir. Tetrahedral hücrelerle oluşturulan ağ yapısı, Ansys Fluent yazılımına transfer edilip, daha iyi bir yakınsama ve çözümleme zamanı sağlayabilek için ön işlemcide tetrahedral hücre tipinden çok yüzlü hücre tipine dönüştürülmüştür (Şekil 8.33).

Çizelge 8.14. Nümerik çalışmalarda kullanılan ağ yapısının sayısal değerleri

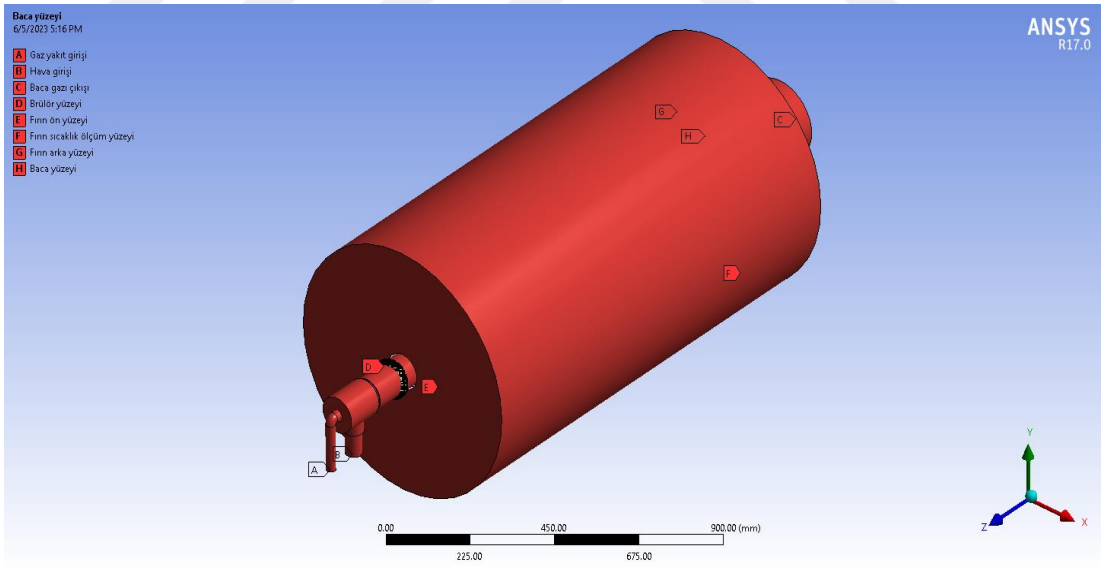
Ağ Adı	Ağ Sayısı	Düğüm Sayısı	Maksimum Çarpıklık Oranı (Skewness < 1)
FPB 200 SAB	2896126	505174	0,864
FPB 200 NT	2927716	516910	0,859



Şekil 8.33. Brülör ve fırın sisteminin akış hacmi üzerine oluşturulan ağ yapısı, tetrahedral hücre yapısı (solda), çok yüzlü hücre yapısı (sağda).

8.2.3. Analiz Sınır Koşullarının Belirlenmesi

Nümerik çalışmalarda, brülöre hava ve yakıt giriş sınır koşulu için kütlesel debi kullanılmıştır. Fırın baca çıkışı için ise atmosfer çıkışı belirlenmiştir. Fırın duvarları için sıcaklık sınır koşulu belirlenmiştir. Sınır koşulları Şekil 8.34'de belirtilmiştir.



Şekil 8.34. Analiz sınır koşullarının geometri modeli üzerinde gösterimi.

Çizelge 8.15.'de HAD analizleri için belirlenen sınır koşulları hesaplanmıştır. Brülörün ısıl gücü 150 kW olarak belirlenmiştir. Yakıt debisi yakıtın bileşimine göre yoğunluk farkının etkisiyle kütlesel debi olarak hesaplanmıştır. Havanın debisi ise hava fazlalık katsayısına ve yoğunluğa göre hesaplanmıştır. Havanın sıcaklığı, ortalama 25°C,

gazın sıcaklığı ise ortalama 20 °C olarak alınmıştır (Çizelge 8.16.). Gaz yakıt girişi ve yakma havası girişi dairesel kesit olduğu için hidrolik çap, boru iç çapı olarak alınmıştır. Hidrolik çap üzerinden önce iç akış Re sayısı hesaplanarak tüm koşullar için akışın türbülanslı karakterde olduğu belirlenmiştir. Hava ve yakıt girişleri için *I* yüzdeleri hesaplanıp, akışkan giriş sınır koşulları belirlenmiştir.

Çizelge 8.15. Nümerik hesaplamalar için analiz sınır koşullarının hesaplanması.

Yakıt	Isıl Güç (kW)	Isıl Güç (kcal/h)	λ	Gaz Yakıt Kütlesel Debisi (kg/s)	Hava Kütlesel Debisi (kg/s)	Gaz Yakıt Hidrolik Çapı (m)	Hava Hidrolik Çapı (m)	Baca Gazı Hidrolik Çapı (m)	Re (Yakıt)	Re (Hava)	Yakıt Giriş Türbülans Yoğunluğu (%I)	Hava Giriş Türbülans Yoğunluğu (%I)
% 100 DG	150	129000	1.2	0.00306	0.06151	0.0272	0.047	0.0272	12600	85100	4.92	3.87
% 100 DG	150	129000	1.3	0.00306	0.06664	0.0272	0.047	0.0272	12600	92200	4.92	3.83
% 100 DG	150	129000	1.4	0.00306	0.07177	0.0272	0.047	0.0272	12600	99300	4.92	3.80
% 95 DG + % 5 H2	150	129000	1.2	0.00303	0.06131	0.0272	0.047	0.0272	13000	84800	4.89	3.87
% 95 DG + % 5 H2	150	129000	1.3	0.00303	0.06642	0.0272	0.047	0.0272	13000	91900	4.89	3.83
% 95 DG + % 5 H2	150	129000	1.4	0.00303	0.07153	0.0272	0.047	0.0272	13000	98900	4.89	3.80
% 90 DG + % 10 H2	150	129000	1.2	0.003	0.06115	0.0272	0.047	0.0272	13500	84600	4.87	3.87
% 90 DG + % 10 H2	150	129000	1.3	0.003	0.06625	0.0272	0.047	0.0272	13500	91600	4.87	3.84
% 90 DG + % 10 H2	150	129000	1.4	0.003	0.07134	0.0272	0.047	0.0272	13500	98700	4.87	3.80
% 85 DG + % 15 H2	150	129000	1.2	0.002964	0.06093	0.0272	0.047	0.0272	14000	84300	4.85	3.88
% 85 DG + % 15 H2	150	129000	1.3	0.002964	0.06601	0.0272	0.047	0.0272	14000	91300	4.85	3.84
% 85 DG + % 15 H2	150	129000	1.4	0.002964	0.07109	0.0272	0.047	0.0272	14000	98300	4.85	3.80
% 80 DG + % 20 H2	150	129000	1.2	0.002916	0.05994	0.0272	0.047	0.0272	14600	82900	4.83	3.88
% 80 DG + % 20 H2	150	129000	1.3	0.002916	0.06494	0.0272	0.047	0.0272	14600	89800	4.83	3.85
% 80 DG + % 20 H2	150	129000	1.4	0.002916	0.06993	0.0272	0.047	0.0272	14600	96700	4.83	3.81

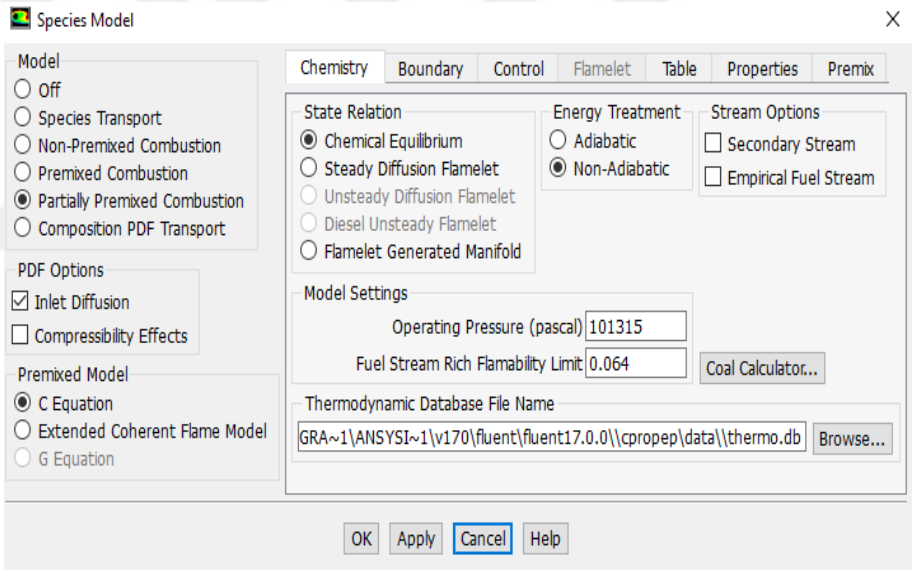
Çizelge 8.16. Yakıt ve havanın fiziksel değerleri (Çengel & Cimbala, 2006).

Yakıt Tipi	LHV (kcal/Nm³)	Yakıt Yoğunluğu (kg/m³)	Hava Yoğunluğu (kg/m³)	Yakıt Sıcaklığı (°C)	Hava Sıcaklığı (°C)
% 100 DG	8066	0.6893	1.184	20	25
% 95 DG + % 5 H2	7798	0.6599	1.184	20	25
% 90 DG + % 10 H2	7518	0.6293	1.184	20	25
% 85 DG + % 15 H2	7246	0.5994	1.184	20	25
% 80 DG + % 20 H2	6970	0.5693	1.184	20	25

Deney fırının modellenmesinde fırın cidarı için duvar sıcaklık sınır şartı belirlenip, deneylerde ölçülen 5 farklı değerinin ortalaması alınarak hesaplanan ortalama sıcaklık değeri kullanılmıştır. Fırın iç yüzeyi şamot tuğladır. Radyasyon sınır şartı için emisivite (ε) değeri ortalama 1000 K (726 °C) için 0,33 alınmıştır (Bergman vd., 2011). Brülörün ve fırının diğer duvarları adyabadik olarak kabul edilmiştir. Baca çıkışı ise atmosfer sınır şartı verilmiştir.

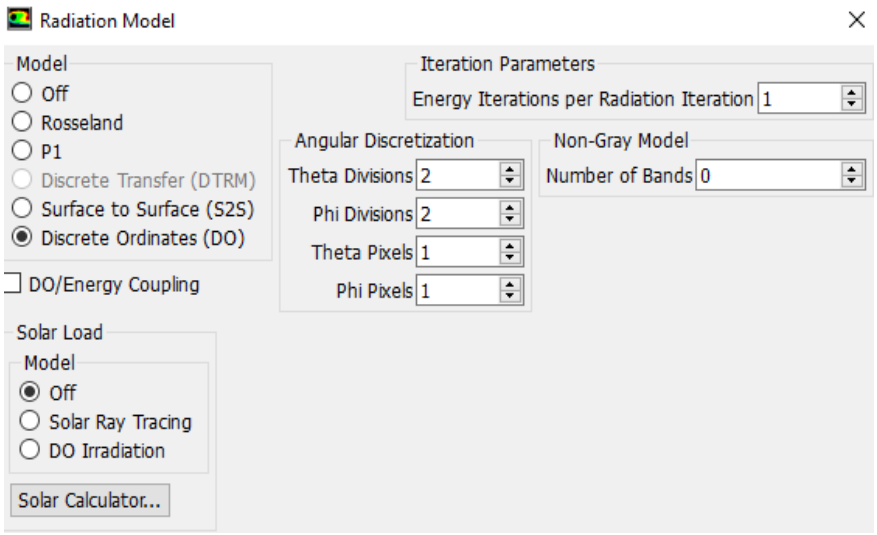
8.2.4. Yanma Analizlerinde Kullanılan Nümerik Yöntemler

Yanma analizleri, aynı fırın geometri modeli kullanılarak 2 farklı brülör geometrisi ile yapılmıştır. Çok yüzlü ağ yapısı kullanılarak ağ kontrolleri sağlanmıştır. Tüm sınır koşullarında akış karakteristiği türbülanslı olduğu için k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Türbülans modelinin sınır tabaka denklemleri hesaplamaları için standard duvar fonksiyonu kullanılmıştır. Yanma uygulaması bir difüzyon tipi yanmaya uygun olduğu için kısmi ön karışımlı yanma modeli (Partially premixed combustion model) kullanılmıştır (Şekil 8.34.). Bu model PDF (olasılık yoğunluk fonksiyonu) yöntemi ile çözümleme yapmaktadır. Ayrıca bu yanma modeli içerisinde ön karışımlı yanmanın da çözümü yapıldığından, bu tezin nümerik çalışmalarında ön karışım yanma denklemi kapatılarak çözümleme sağlanmıştır. Bu durumda özellikle kirletici emisyon olan NO_x hesaplamaları için daha uygun bir yanma modeline dönüştürülmüştür.



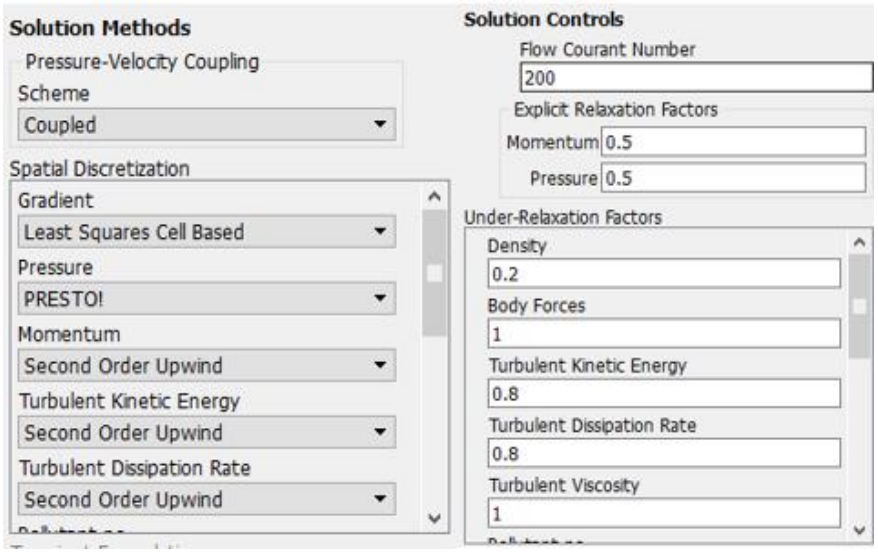
Şekil 8.35. Kısmi ön karşımlı yanma modeli.

Yanma analizlerinde alev radyasyonunu hesaplamak için radrasyon modelleri kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasının radyasyon modellemesinde ayrık ordinatlar (Discrete ordinates) modeli kullanılmıştır (Şekil 8.36).



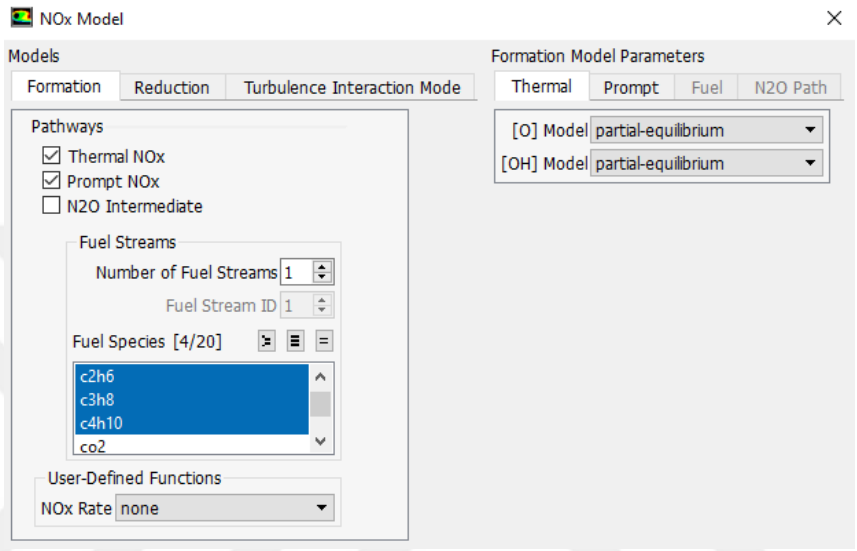
Şekil 8.36. Isıl radyasyon yanma modeli.

Yanma reaksiyonlarının sayısal çözümlemesi için x, y ve z koordinatlarına ait momentum, türbülans, enerji, tür ve radyasyon denklemlerinin iteratif çözümü yapılmıştır. İterasyonların çözümü için bütünleşik çözüm algoritması ve en küçük kareler çözüm metodu kullanılmıştır. Çözümleme kontrol kriterlerinde, çözümün yavaş ve kesinliği arttırılmış olarak çözümlenebilmesi için, yoğunluk kriteri 0.2, diğer kriterler ise Fluent yazılımında mevcut değerler kullanılmıştır (Şekil 8.38). İterasyonların çözümünde başlangıçta, birincil derece ayrıklaştırması, sonrasında ikincil derece ayrıklaştırması yöntemi kullanılarak yeterli yakınsama sağlanmıştır.



Şekil 8.37. İterasyon çözüm metotları ve kontrol ayarları.

Yanma reaksiyonları hızlı kimya modeli, kirletici emisyon NO_x hesaplamaları ise yavaş kimya modeli kategorisine girmektedir. Bu sebeple, yanma denklemlerinin çözümü sağlandıktan sonra, NO_x çözümü için yanma tür, akış, türbülans, radyasyon ve enerji denklemleri kapatılarak, mevcut çözüm üzerinden sadece sıcaklık değişkenleri ve kirletici NO denklemleri ile NO_x emisyonları hesaplatılarak (Şekil 8.38), yanma analizlerinin çözümü tamamlanmıştır.



Şekil 8.38. NO_x modeli.

Nümerik analizlerin çözümü tamamlandıktaktan sonra görsel ve sayısal sonuçlar son işlemci üzerinden hesaplatılarak alınmıştır.

8.2.5. Nümerik Analizlerin Sonuçları

Bu tez çalışmasında yapılan nümerik çalışmaların sonuçları, sayısal sonuçlar ve görsel sonuçlar üzerinden incelenmiştir. Sayısal sonuçlarda, brülör işletimi ve yanma ürünlerinin performansı araştırılırken, görsel sonuçlarda alevin yapısal farklılıkları araştırılmıştır.

8.2.5.1. Sayısal Sonuçlar

Nümerik analizlerin tamamlanmasıyla hesaplanan sayısal sonuçlar, yakıt ve λ katsayısına göre SAB türbülatörü için Çizelge 8.17.'de, NT türbülatörü için Çizelge 8.18.'de verilmiştir. Gaz ve hava işletim basınçları, brülör hava ve gaz girişinde

hesaplanan toplam basınç değerlerinden alınmıştır. Bu veriler brülör için gerekli fan ve gaz valfi seçiminde ön görü sağlamaktadır.

Yanma reaksiyonları tamamlandıktan sonra O_2 (%), CO_2 (%), NO (ppm) ve CO (kütle fraksiyonu) emisyonları incelenmiştir. O_2 (%) ve CO_2 (%) yanmanın durumunu belirlerken, CO (kütle fraksiyonu) kirletici emisyonu ile türbülatörün karışım performansını belirlemiştir. NO (ppm) kirletici emisyonu ise deney sonuçlarıyla analiz sonuçlarının karşılaştırılması için kullanılan bir belirleyici olarak kullanılmıştır.

Fluent tarafından hesaplanan CO_2 (%) emisyonu nem ihtiva eder. Deneylerde kullanılan emisyon ölçüm cihazı ise CO_2 (%) emisyonunu içindeki nemi alarak ölçer. CO_2 (%) emisyonunu nümerik analiz sonuçlarında kuru hale getirmek için (8.1) denklemi kullanılmıştır.

$$CO_{2,\text{kuru}} = \frac{CO_{2,\text{ıslak}}}{1 - H_2O} \tag{8.1.}$$

Tez çalışmasında kullanılan Fluent yazılımı NO_x'un, birincil emisyonu olan NO emisyonunu denklemleri doğrudan hesaplamaktadır. NO ise ppm cinsinden hesaplatabilmek için (8.2) denklemi kullanılmıştır.

$$NO_{\text{kuru}} = \frac{NO_{\text{mol fraksiyonu}} \text{x } 10^6}{1 - H_2O_{\text{mol fraksiyonu}}} \tag{8.2.}$$

Çizelge 8.17. FPB 200 SAB nümerik hesaplama sayısal sonuçları.

Yakıt Tipi	λ	Gaz işletim Basıncı (mbar)	Hava İşletim Basıncı (mbar)	O2 (%)	CO2 (%)	H2O (%)	NO (ppm)	Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	CO (Kütle fraksiyonu)
%100 DG	1.2	14,74	16,1	3,6	9,72	0,156	43,71	887,12	1,25E-07
	1.3	14,62	17,92	4,5	9,23	0,148	35,9	932,6	6,12E-06
	1.4	14,46	20,67	5,6	8,77	0,161	35,33	905	5,42E-06
%95 DG + %5 H_2	1.2	15,59	15,57	3,21	9,6	0,161	47,82	889,33	2,46E-08
	1.3	15,01	18,09	4,5	8,74	0,150	38,2	943,15	2,52E-06
	1.4	15,01	19,59	5,55	8,52	0,150	38,16	917	6,95E-06
%90 DG + %10 H_2	1.2	15,69	15,31	3,21	9,45	0,163	48,12	891,59	2,41E-06
	1.3	15,49	17,76	4,48	8,66	0,152	41	957,1	2,30E-06
	1.4	15,32	20,42	5,57	8,26	0,141	42,17	926,12	2,46E-06
%85 DG + %15 H_2	1.2	16,42	15,00	3,24	9,3	0,165	50	951,11	1,06E-06
	1.3	15,87	17,79	4,51	8,52	0,153	41,7	992,2	6,58E-07
	1.4	16,07	20,12	5,62	8,17	0,143	44,26	940	3,25E-06
%80 DG + %20 H_2	1.2	16,35	18,37	3,25	9,22	0,152	54,1	976,88	2,52E-08
	1.3	16,15	21,36	4,52	8,47	0,141	49,6	1027	7,06E-07
	1.4	15,96	24,63	5,51	8,09	0,132	47,51	975,51	2,11E-06

Çizelge 8.18. FPB 200 NT nümerik hesaplama sayısal sonuçları.

Yakıt Tipi	λ	Gaz işletim Basıncı	Hava İşletim Basıncı	O_2 (%)	CO_2 (%)	H_2O (%)	NO (ppm)	Baca Gazı Sıcaklığı (°C)	CO (Kütle fraksiyonu)
%100 DG	1.2	15,14	15,05	3,24	9,62	0,165	51,2	865	2,17E-07
	1.3	14,94	17,72	4,26	8,8	0,154	46,71	870	4,47E-06
	1.4	14,79	20,5	5,37	8,18	0,143	35,92	794,2	6,28E-06
%95 DG + %5 H_2	1.2	15,54	15,13	3,2	9,58	0,161	50,3	869	2,36E-06
	1.3	15,40	17,67	4,42	8,81	0,150	47,18	878	1,07E-06
	1.4	15,31	20,44	5,57	8,1	0,139	42,02	813,7	4,75E-08
%90 DG + %10 H_2	1.2	16,01	15,05	3,21	9,46	0,162	51,7	882	1,10E-06
	1.3	15,93	17,60	4,47	8,67	0,151	48,4	885	1,25E-08
	1.4	15,88	20,44	5,56	5,96	0,142	36,18	826,4	4,96E-10
%85 DG + %15 H_2	1.2	15,00	16,42	3,23	9,31	0,165	54,55	932	5,68E-06
	1.3	16,24	17,45	4,51	8,52	0,153	49	903	1,97E-06
	1.4	16,07	20,12	5,57	7,9	0,143	42,15	846,5	6,73E-08
%80 DG + %20 H_2	1.2	14,56	16,89	3,1	9,28	0,169	53,6	1036	4,71E-06
	1.3	16,73	16,92	4,43	8,49	0,157	51,55	967	5,83E-06
	1.4	16,72	16,93	5,57	7,8	0,157	49,17	898,17	5,77E-06

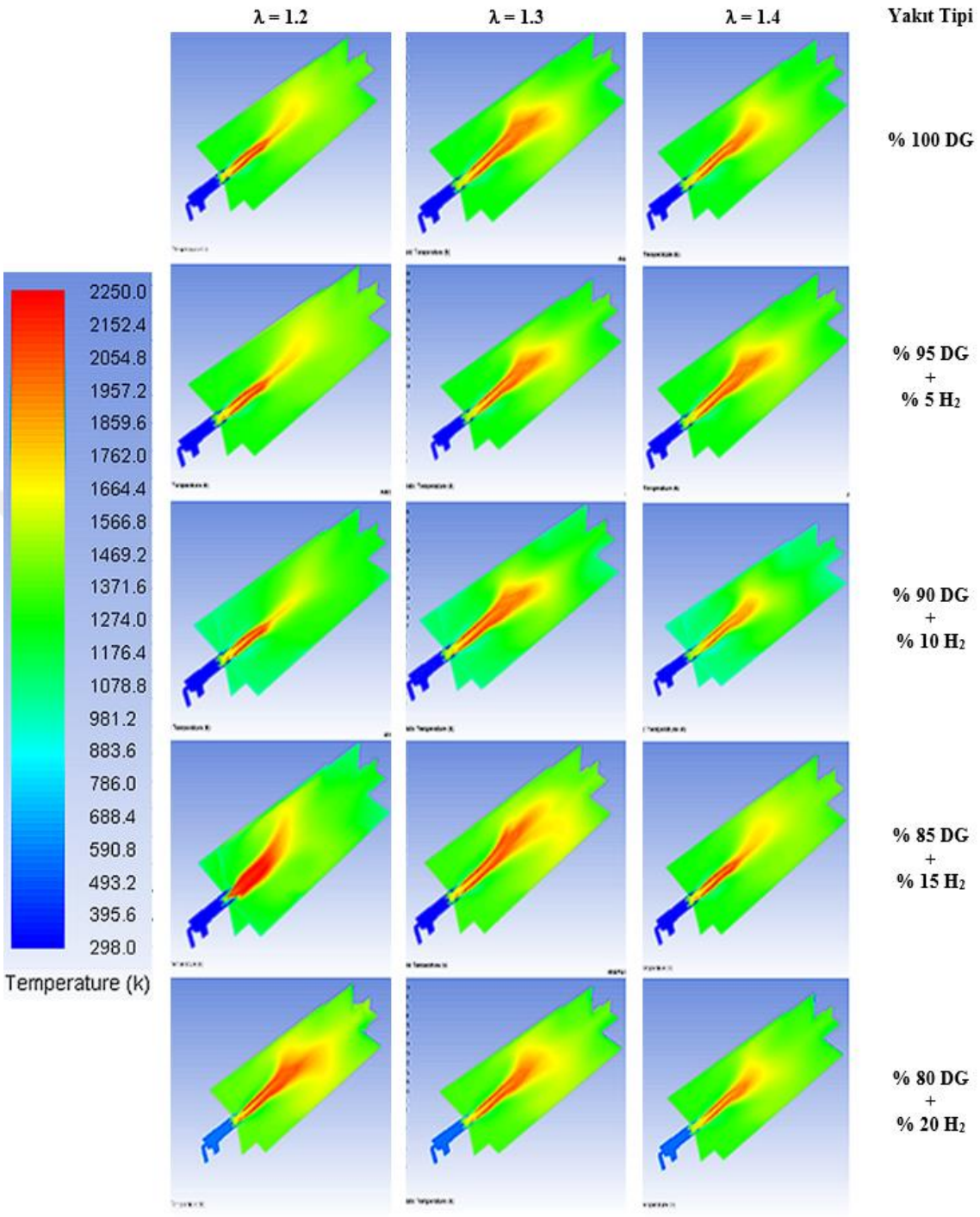
8.2.5.2. Görsel Sonuçlar

Görsel sonuçlar, yanma sonucu oluşan alev karakteristiğinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Sıcaklık konturlarından alevin yanma odası içerisinde dağılımı belirlenmektedir. Yüksek ve düşük sıcaklık bölgelerinini belirlenmesinde ve malzeme seçiminde etkilidir. Yüksek sıcaklık bölgesi yanma reaksiyonun yoğunlaştığı bölgeler için bilgi vermektedir. Örneğin, uygulamada brülörün ateşleme ve iyonizasyon bölgesinin belirlenmesinde etkilidir. Hız konturları, brülörün türbülans ve karışım bölgelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bir brülör için yakıt ve hava için hız ön görüsü bulunmaktadır. Yanma analizleri sonucunda hız konturları kontrol edilerek, hesaplama öncesi ön görülen hızlara ulaşılıp, ulaşılmadığı kontrol edilir. Yoğunluk konturları ise yakıt ve hava karışımı ve yanma bölgesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Yanma reaksiyonları sonucu oluşan baca gazlarının yoğunlukları, hava ve yakıt yoğunluklarından düşüktür. Yanma sonucu oluşan bu yoğunluk farkı yanma bölgesinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. CO_2 konturları, hidrokarbonların yanması sonucu oluşan ana üründür. H_2O konturları da CO_2 konturları gibi yanma sonucu oluşan ana ürünlerdendir. Yanma bölgesinin belirlenmesinde bu iki kontur türü sıklıkla kullanılmaktadır. NO konturları, yanma üzerinde yüksek sıcaklık bölgelerinin kontrol edilmesinde ve kirletici bir emisyon türü olan bu emisyonun düşürülmesi çalışmalarında kullanılmaktadır.

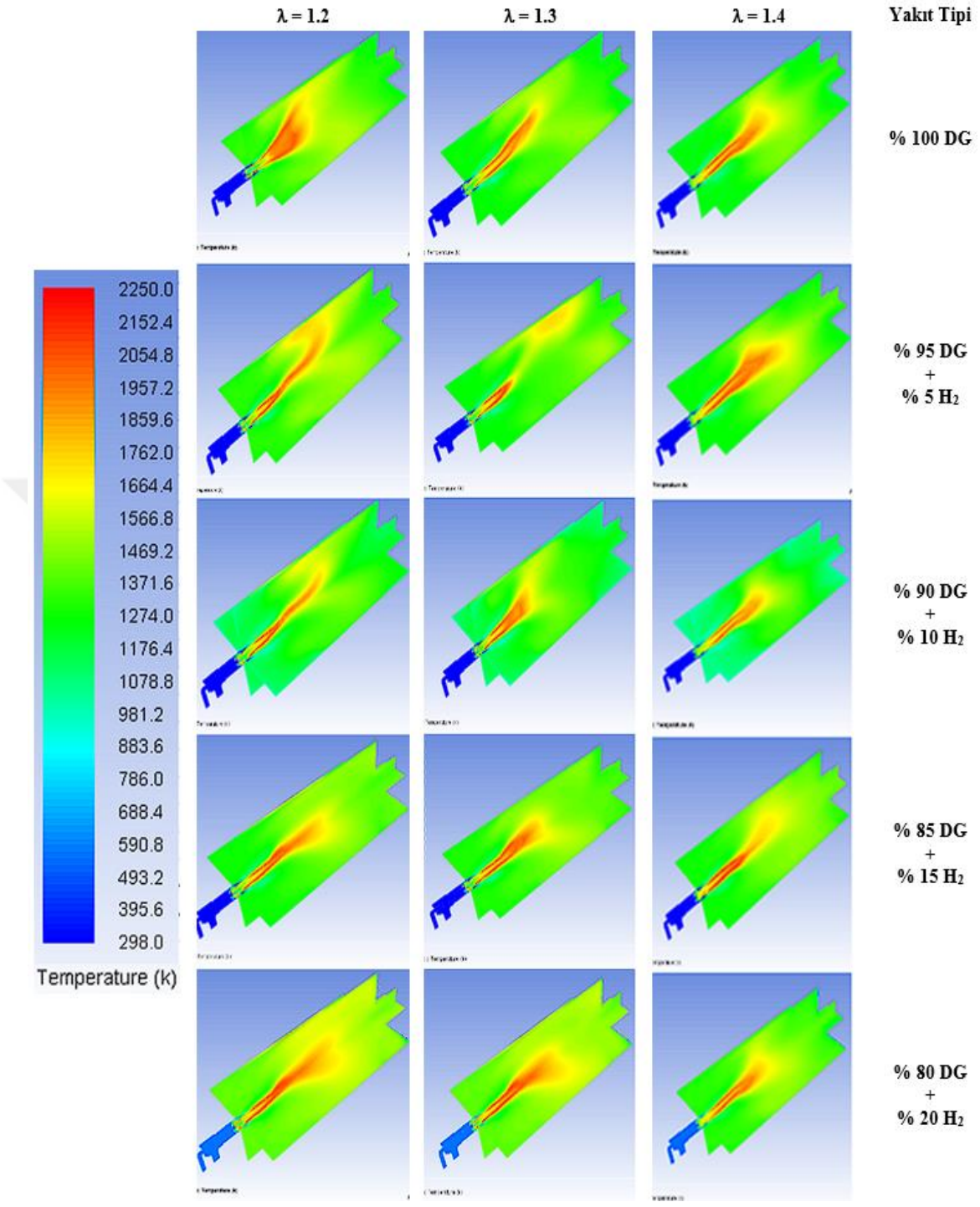
Yanma analizleri görsel sonuçları, 150 kW ısıl güçte, λ=1.2, λ=1.3 ve λ=1.4 hava fazlalıklarında her iki türbülatör tipi için hazırlanmıştır.

SAB türbülatörü için sıcaklık (K) konturları Şekil 8.39'da, hız (m/s) konturları Şekil 8.41'de, yoğunluk (kg/m³) konturları Şekil 8.43'de, CO_2 (%) konturları Şekil 8.45'de ve NO (ppm) konturları Şekil 8.47'da belirtilmiştir.

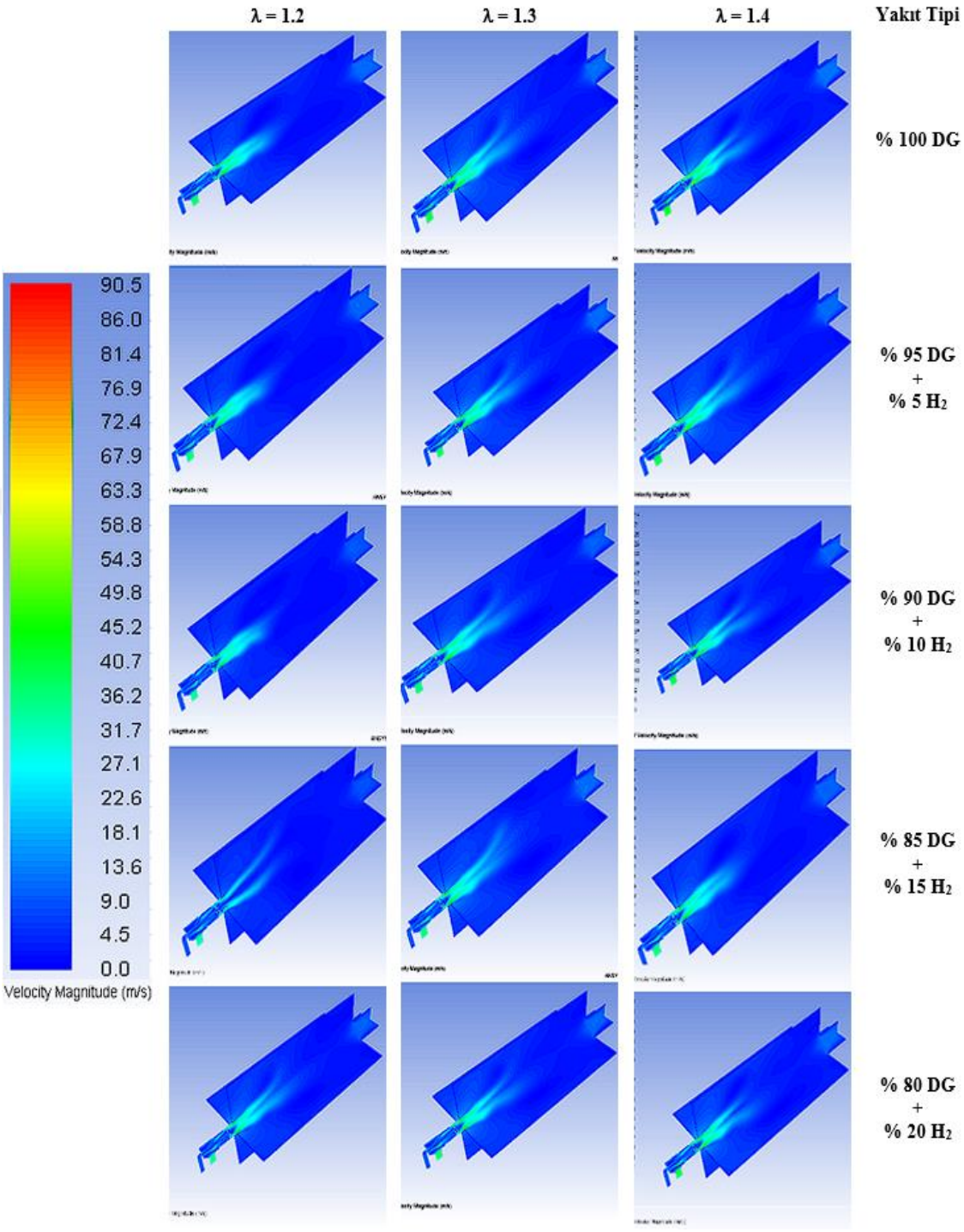
NT türbülatörü için sıcaklık (K) konturları Şekil 8.40'da, hız (m/s) konturları Şekil 8.42'de, yoğunluk (kg/m³) konturları Şekil 8.44' de, CO_2 (%) konturları Şekil 8.46'da ve NO (ppm) konturları Şekil 8.48'de belirtilmiştir.



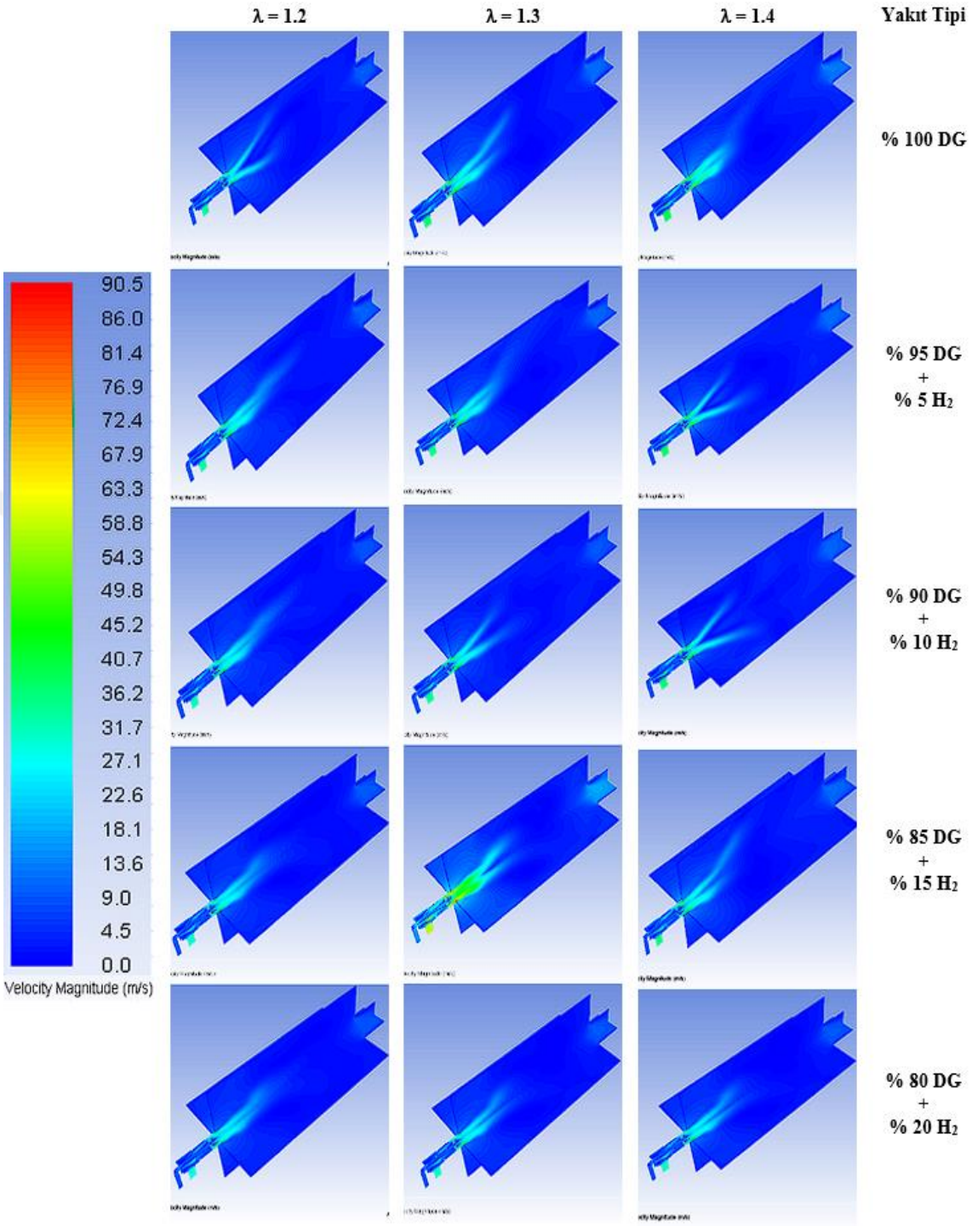
Şekil 8.39. Sıcaklık (K) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, λ = 1.2, λ =1.3 ve λ =1.4.



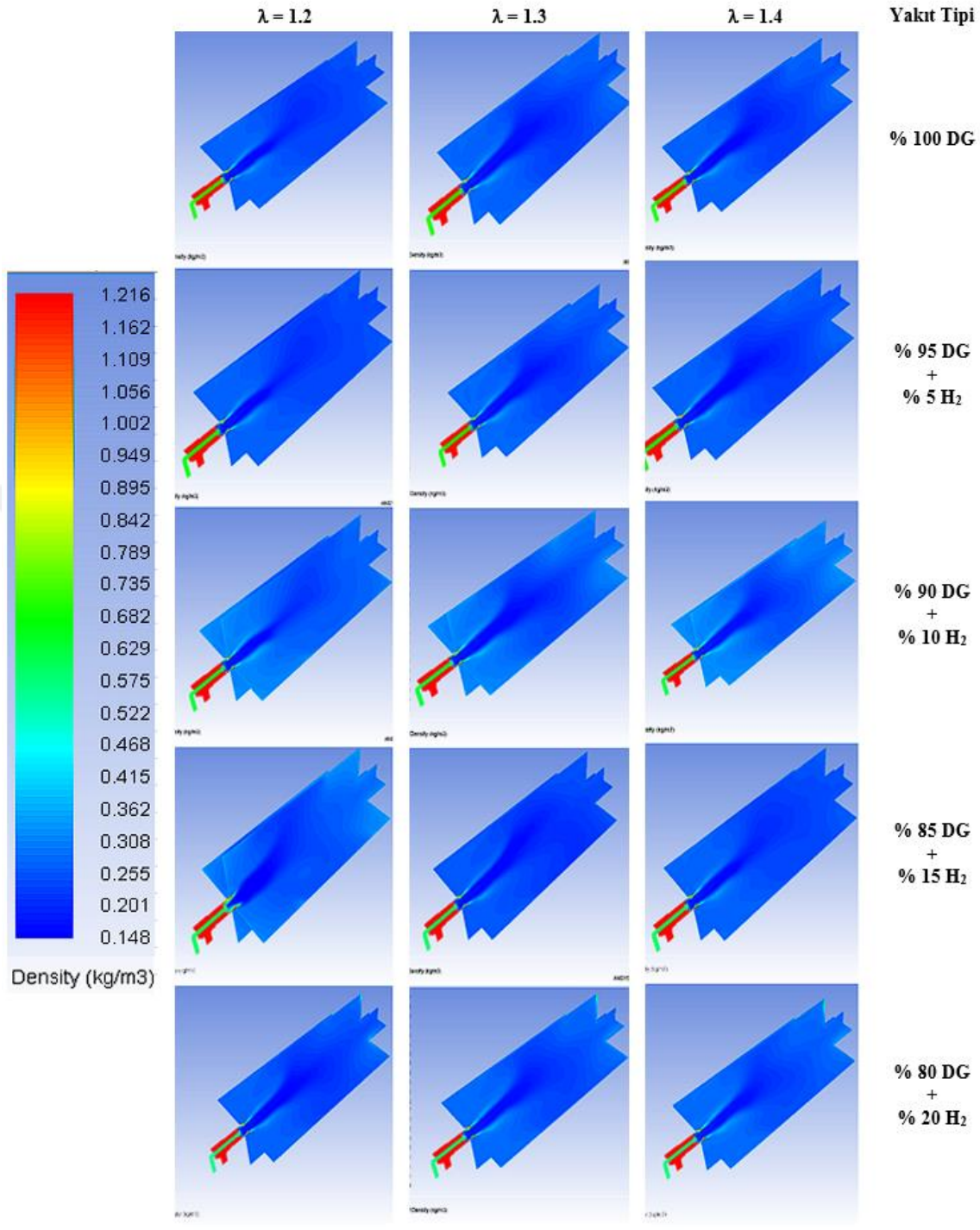
Şekil 8.40. Sıcaklık (K) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, λ = 1.2, λ =1.3 ve λ =1.4.



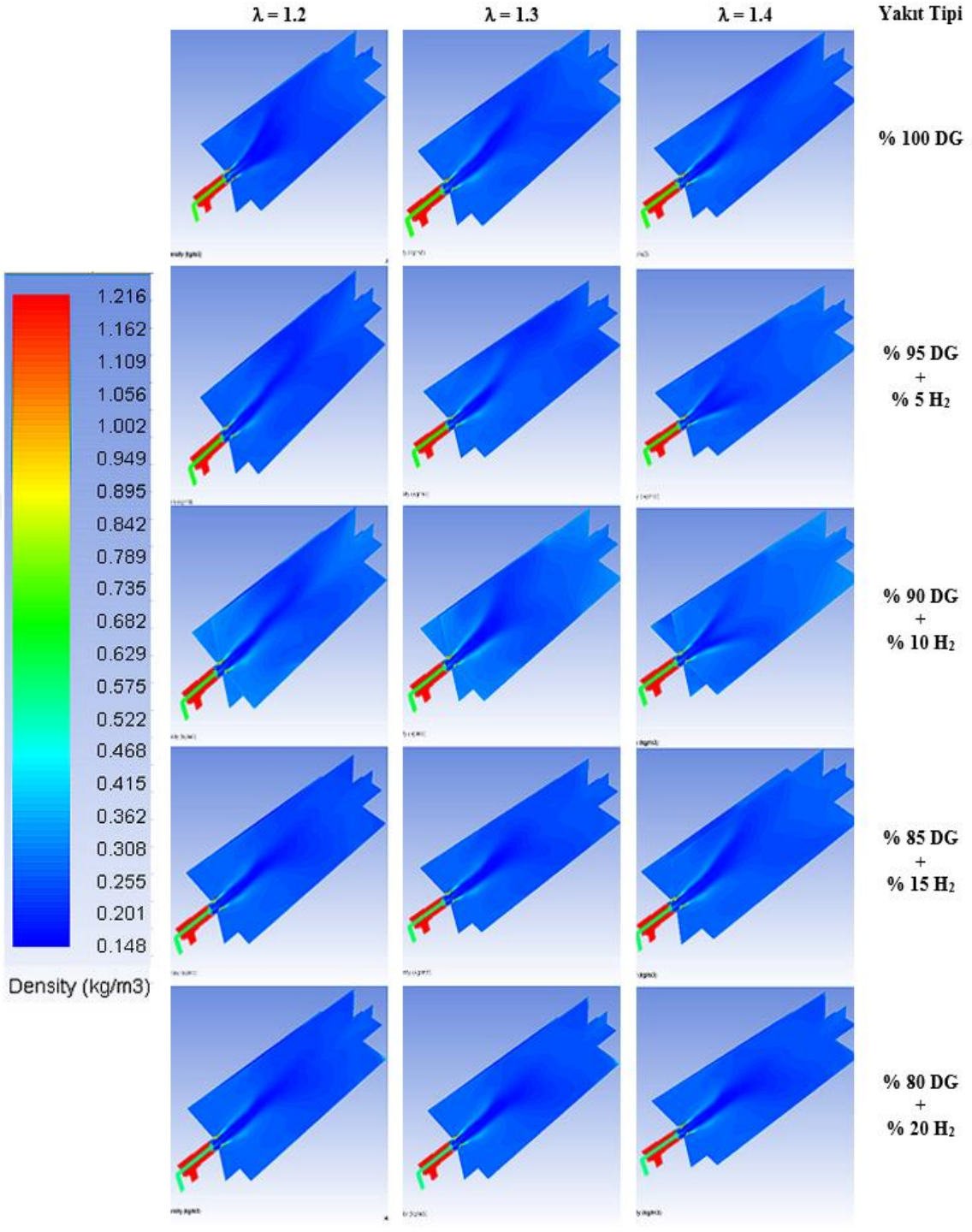
Şekil 8.41. Hız (m/s) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, λ = 1.2, λ = 1.3 ve λ = 1.4.



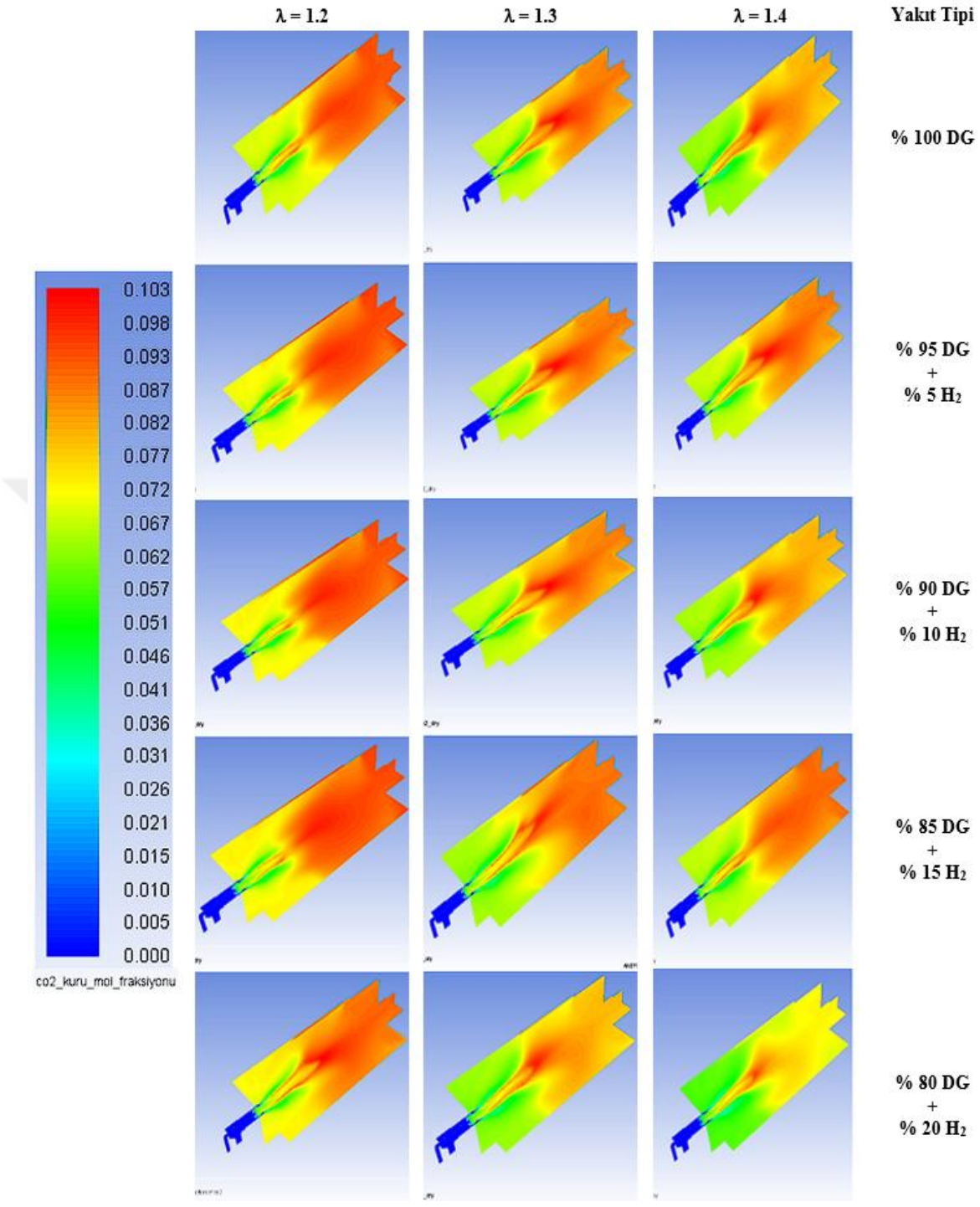
Şekil 8.42. Hız (m/s) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, λ = 1.2, λ = 1.3 ve λ = 1.4.



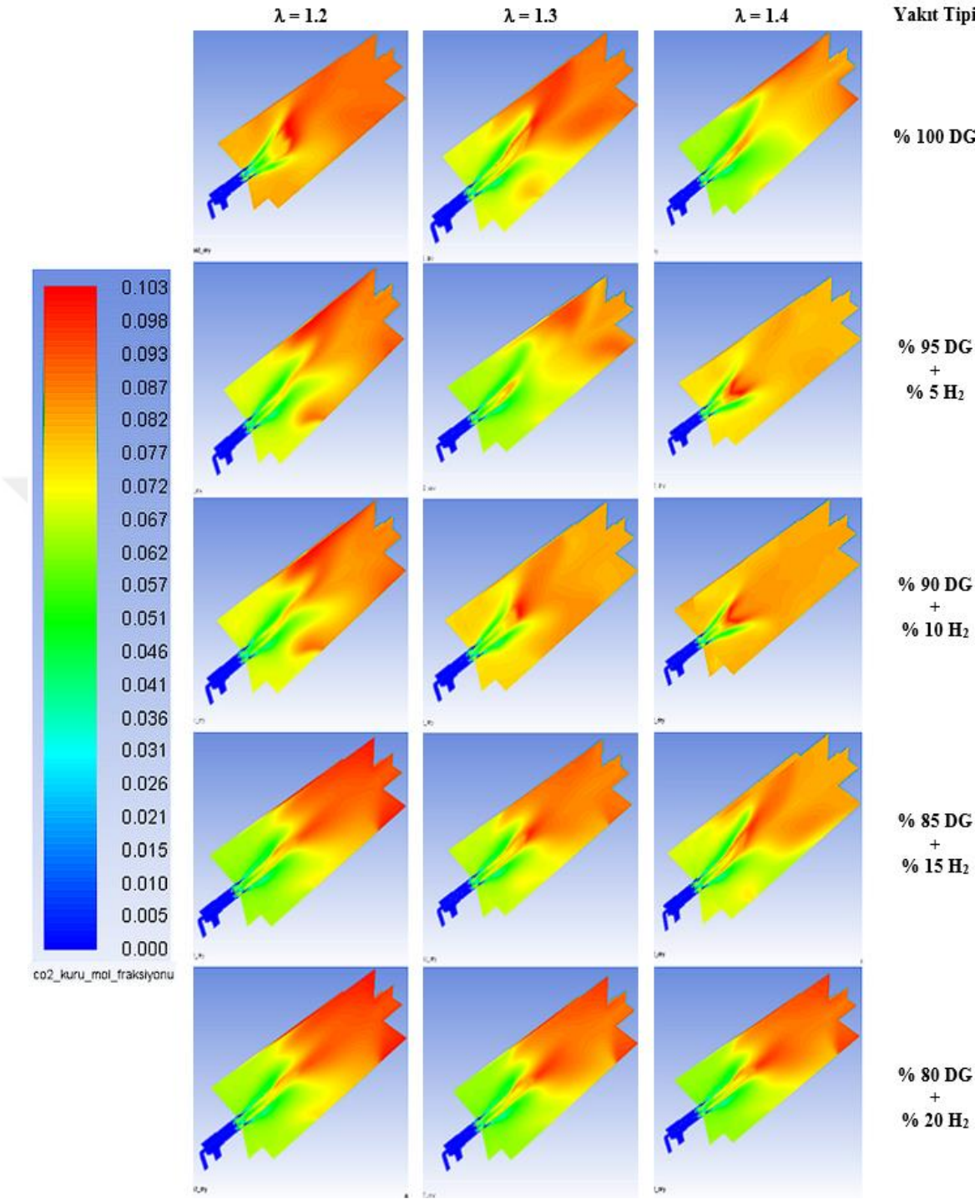
Şekil 8.43. Yoğunluk konturları (kg/m³) ; FPB 200 SAB, 150 kW, λ = 1.2, λ = 1.3 ve λ = 1.4.



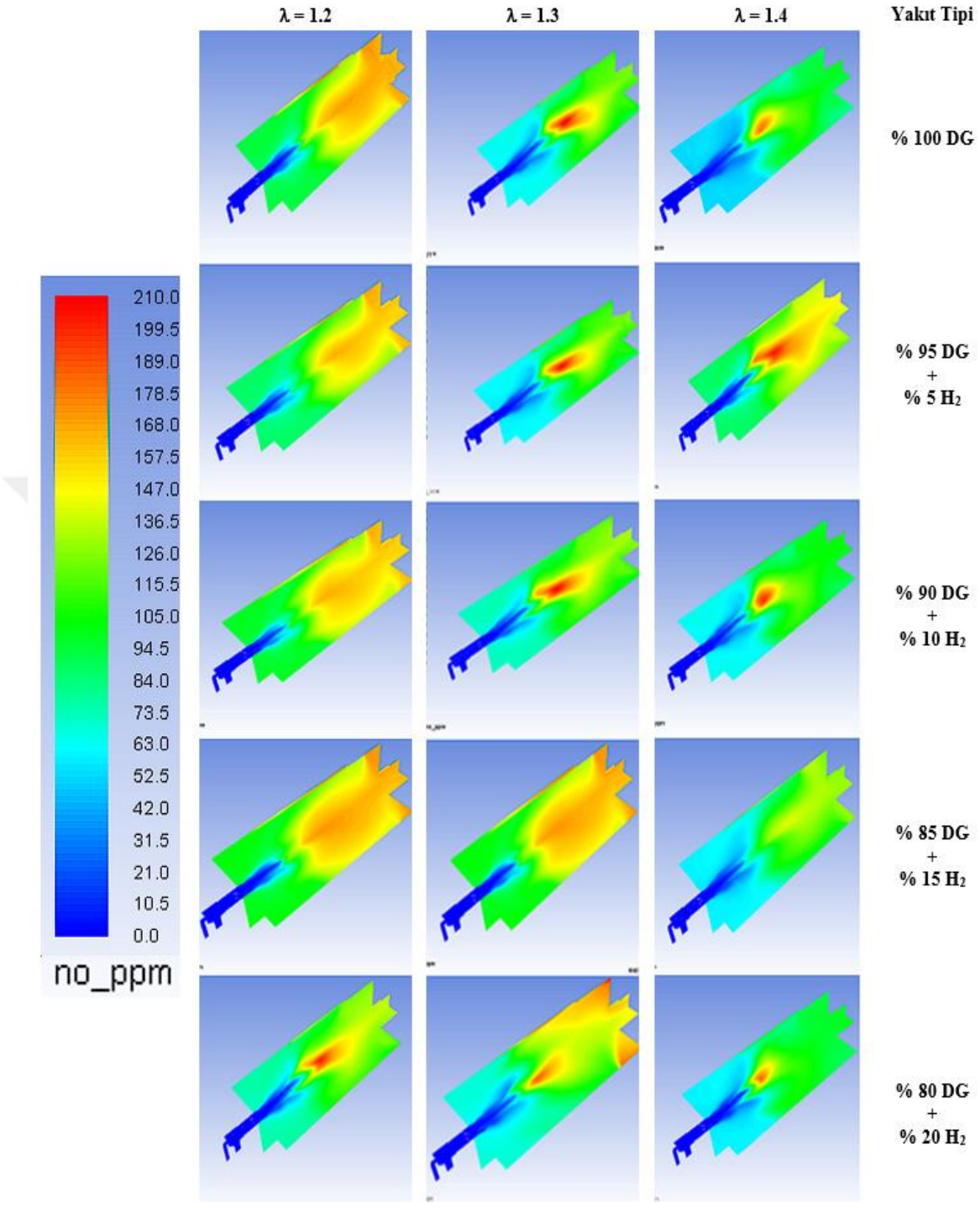
Şekil 8.44. Yoğunluk konturları (kg/m³) ; FPB 200 NT, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ=1.4.



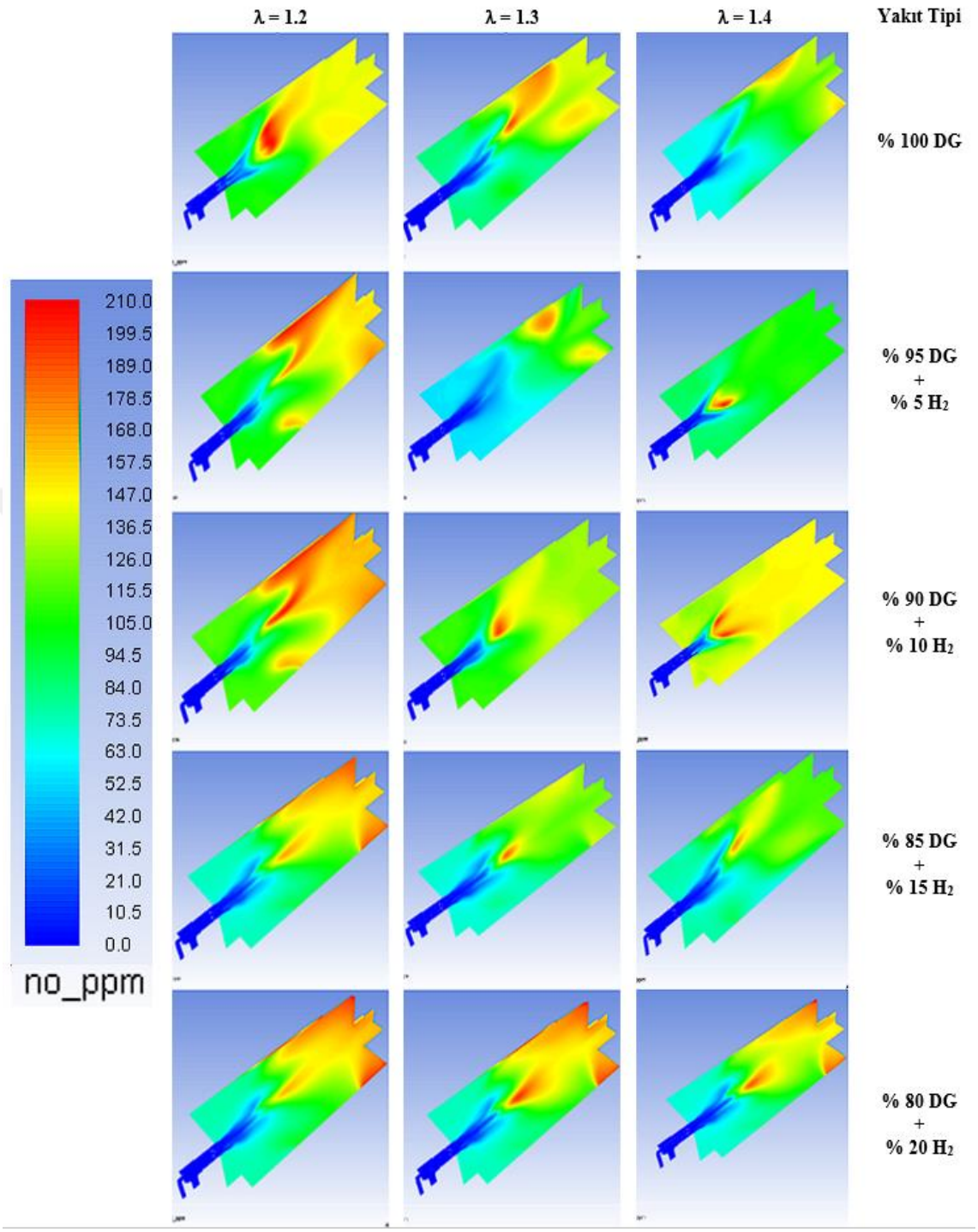
Şekil 8.45. CO_2 (%) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ =1.4.



Şekil 8.46. CO_2 (%) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, λ = 1.2, λ =1.3 ve λ =1.4.



Şekil 8.47. NO (ppm) konturları; FPB 200 SAB, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ =1.4.

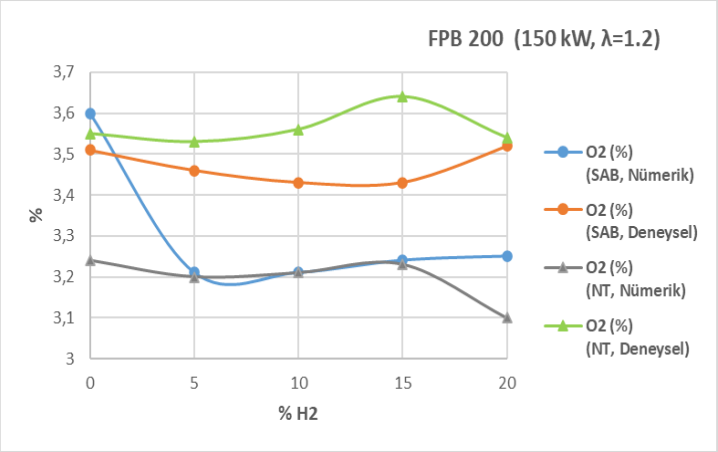


Şekil 8.48. NO (ppm) konturları; FPB 200 NT, 150 kW, λ =1.2, λ =1.3 ve λ =1.4.

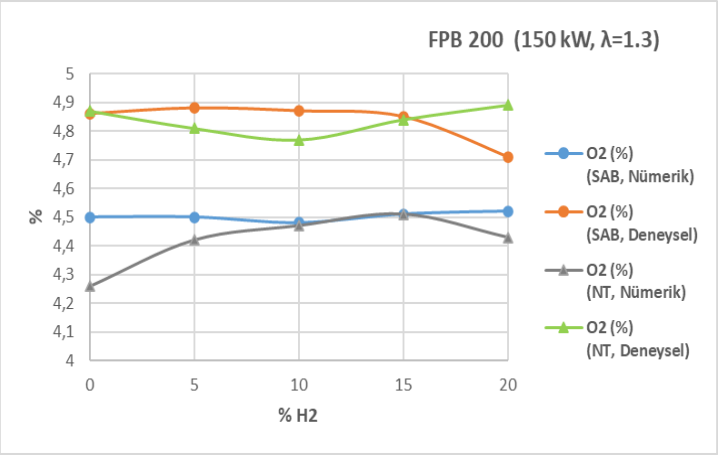
8.3. Deneysel ve Nümerik Çalışmaların Karşılaştırılması

Tez çalışmasının deneysel çalışmaları tamamlandıktan sonra edinilen deney bulguları, nümerik hesaplama çalışmaları için hazırlanan sınır şartları ve analiz koşullarının temelini oluşturmuştur. Nümerik çalışmaların çıktıları, deneysel çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılıp, değerler arasındaki benzerlikler ve farklar incelenmiştir.

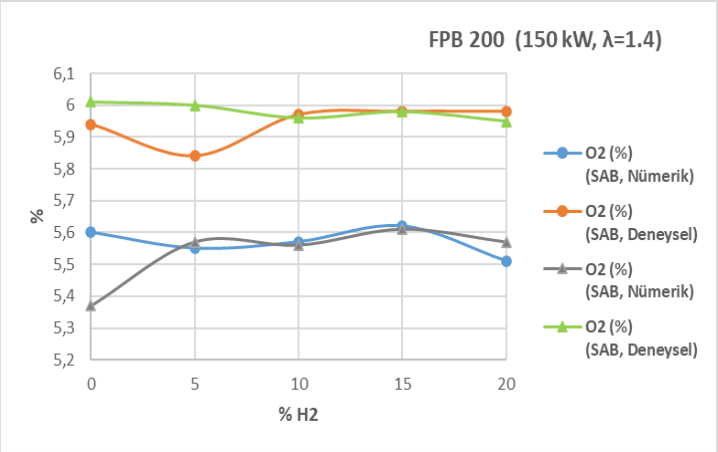
Baca gazı bileşimindeki O_2 (%) değerlerinin, deneysel ölçülen değerler ve nümerik hesaplama değerleri, $\lambda = 1.2$ için Şekil 8.49'de, $\lambda = 1.3$ için Şekil 8.50'de ve $\lambda = 1.4$ için Şekil 8.51'de, verilmiştir. Eşit λ katsayısında doğal gaz içeriğinde hacimce H_2 (%) oranı arttıkça O_2 (%) oranı değerlerde hafif dalgalanmalar göstererek sabit kaldığı görülmüştür. Aynı deney ve analiz sınır koşullarında yapılan çalışmalarda, farklı türbülatör kullanımında O_2 (%) oranının farklı eğri izlediği sonucuna varılmıştır (Şekil 8.49), (Şekil 8.50) ve (Şekil 8.51).



Şekil 8.49. O_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, $\lambda = 1.2$.

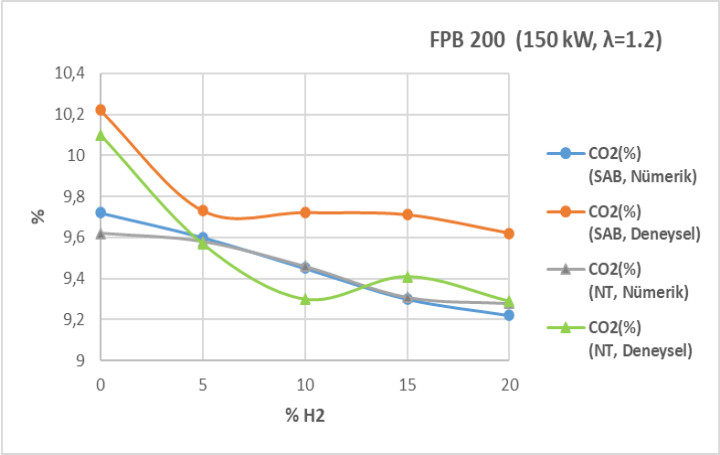


Şekil 8.50. O_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.3.

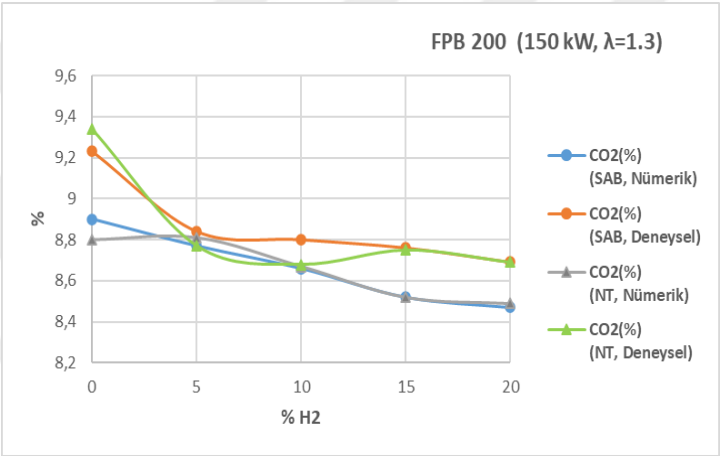


Şekil 8.51. O_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.4.

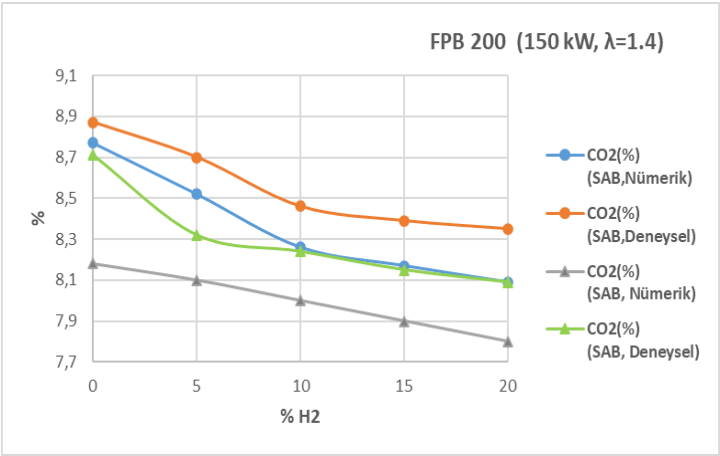
Bu tez çalışmasının ana amacı olan doğal gaz yakıtın içeriğine hacimce H_2 (%) katılması sonucunda CO_2 ve CO emisyonlarının düşüşün sağlanması, nümerik ve deneysel değerlerde görülmüştür. Baca gazı bileşimindeki CO_2 (%) değerlerinin, deneysel ve nümerik hesaplama sonuçları, λ = 1.2 için Şekil 8.52'de, λ = 1.3 için Şekil 8.53'de ve λ = 1.4 için Şekil 8.54'de verilmiştir. Farklı λ katsayılarında hacimce H_2 (%) oranı arttıkça CO_2 (%) oranında düşüş sağlandığı görülmüştür.



Şekil 8.52. CO_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.2.

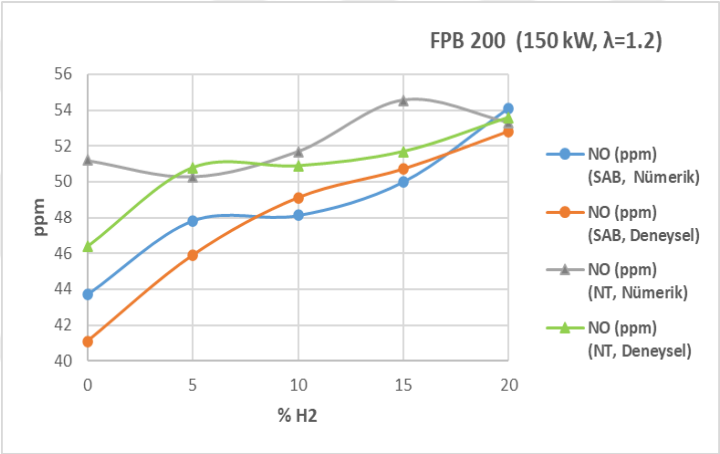


Şekil 8.53. CO_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.3.

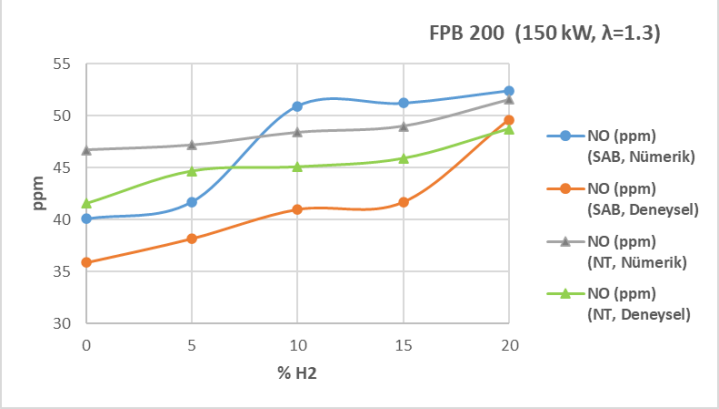


Şekil 8.54. CO_2 (%) emisyonları; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.4.

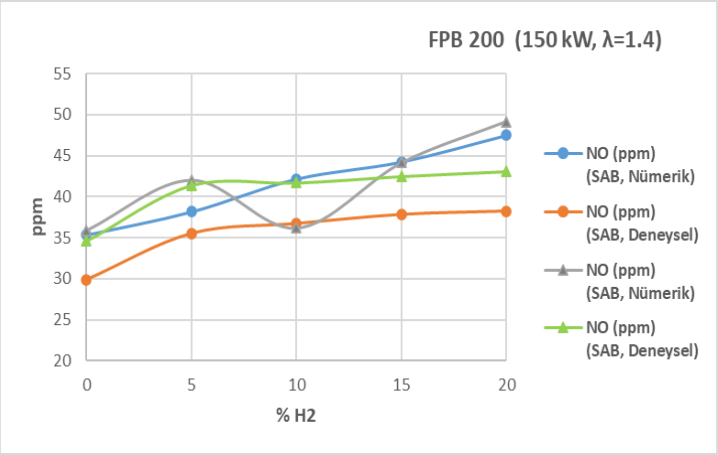
Doğal gazın yanması sonucu kirletici NO_x emisyonları oluşur. Doğal gaza H_2 katılması durumunda NO_x emisyonlarının oluşumu devam eder. Bu durum H_2 yanmasının olumsuz sonuçlarından biri olarak kabul edilir. Fakat NO_x düşürme teknikleri ile NO_x emisyonlarının belirli bir seviyede tutulması sağlanabilir. Baca gazı bileşimindeki yüksek oranda oluşan NO (ppm) değerlerinin, deneysel ve nümerik hesaplama sonuçları, $\lambda = 1.2$ için Şekil 8.55'de, $\lambda = 1.3$ için Şekil 8.56'da ve $\lambda = 1.4$ için Şekil 8.57'de verilmiştir. Eşit λ katsayısında hacimce H_2 (%) oranı arttıkça NO (ppm) oranında artış görülmüştür. Bu durum, $\lambda = 1.2$ için Şekil 8.58'de, $\lambda = 1.3$ için Şekil 8.59'da ve $\lambda = 1.4$ için Şekil 8.60'da verilen baca gazı sıcaklıklarının, doğal gaz yakıt katkısındaki H_2 (%) oranının artmasıyla artan alev pik sıcaklığı ve baca gazı sıcaklıkları doğrudan ilişkili olmasıyla açıklanabilir.



Şekil 8.55. NO (ppm) emisyonları ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, $\lambda = 1.2$.



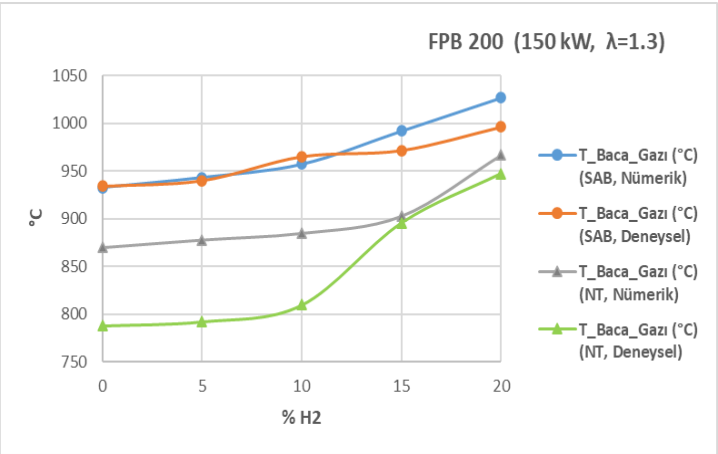
Şekil 8.56. NO (ppm) emisyonları ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, $\lambda = 1.3$.



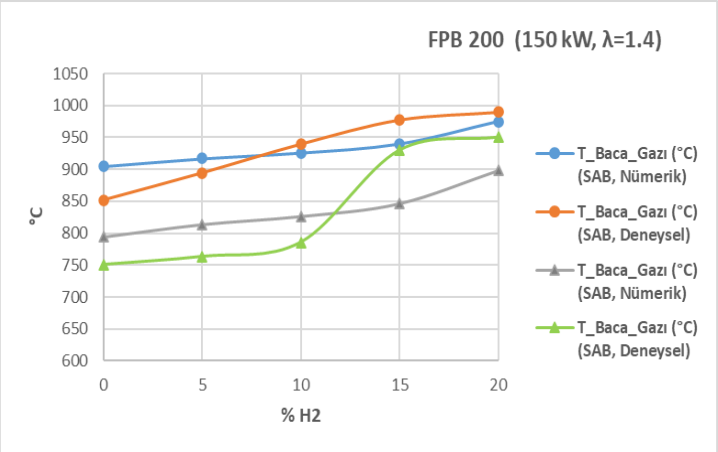
Şekil 8.57. NO (ppm) emisyonları ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.4.



Şekil 8.58. Baca gazı sıcaklık (°C) değerleri ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.2.



Şekil 8.59. Baca gazı sıcaklık (°C) değerleri ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.3.



Şekil 8.60. Baca gazı sıcaklık (°C) değerleri ; FPB 200 SAB/ NT, 150 kW, λ = 1.4.

BÖLÜM 9

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, endüstride mevcut koşullarda kullanılan, doğal gaz yakıtlı Ecostar FPB 200 proses gaz brülörünün, mevcut standart ekipmanları ve türbülatörü kullanılarak, doğal gaz yakıta sırasıyla hacimce % 5, % 10, % 15 ve % 20 oranında H_2 katkısıyla sağlanan karışım gaz yakıtın, $\lambda = 1.2$, $\lambda = 1.3$, ve $\lambda = 1.4$ katsayılı, 150 kW ısıl güçte yanması sonucu gerçekleşen deneysel ve nümerik hesaplama sonuçları araştırılmıştır. Çalışmada 30 farklı deneysel çalışma ve 30 farklı nümerik çalışma yapılmıştır. Deneysel bulgular sağlandıktan sonra, HAD analizlerinin ön işlemci ayarlarında kullanılabilecek veriler hazırlanmıştır. HAD analizleri çözümlemesi tamamlandıktan sonra hesaplama değerleri ile deneysel ölçüm değerleri karşılaştırılarak, bu bölümde yorumlanmıştır. Deneysel çalışmalar PLC kontrollü doğal gaz ve H_2 karışımlı yanma deney sisteminde, nümerik çalışmalar ise Ansys Fluent 17.0 HAD yazılımında, kısmi ön karışımlı yanma modeli kullanılarak, ön karışım yanma denklemi ihmal edilerek, difüzyon tipi yanma denklemlerinin çözümü ile yapılmıştır. SAB türbülatörü ile yapılan çalışmalar sonucunda, doğal gaz içeriğindeki H_2'nin yanma reaksiyonuna girerek eksik yanmayı düşürmek için NT türbülatörü ile deneysel ve nümerik çalışmaları yapılmış ve her iki türbülatörün yanmaya etkileri karşılaştırılmış olup, sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

FPB 200 proses gaz brülöründe, SAB ve NT türbülatör konfigürasyonu ile yapılan yanma deneylerinin tamamında, brülörün devreye girmesi, belirlenen tüm deney koşullarında çalışması, yanma stabilizasyonu ve devreden çıkmasında bir problem oluşmamıştır.

SAB ve NT türbülatörleri ile deney fırınında tüm deney koşullarda yapılan deneylerde, iç basınç değişimi görülmeyip, sabit değerde kalmıştır.

Difüzyon alev tipinin modellenmesinde çalışılan, kısmi ön karışımlı yanma modelinin sadece difüzyon alev tipi için denklemlerinin ayarlanarak çözüm sağlanması, yanma probleminin çözümünde etkili olmuştur. Kullanılan bu nümerik yöntem, fırın yanma uygulamaları için deneysel ölçüm değerlerine yakın sonuçlar hesaplayabilmiştir. Baca gazı emisyonları ve özellikle kirletici emisyon olan NO ve CO çözümünde gerçeğe yakın ön görü verileri sağlayarak tasarım geliştirme çalışmaları için faydalı bir yöntem olduğu sayısal sonuçlar ile anlaşılmıştır. CO kirletici emisyon oluşumu, deneylerde ve analiz çalışmalarında çok düşük ve sıfıra yakın değerlerde ölçülmüş ve hesaplanmıştır Analiz sınır koşulları, gerçek deney koşullarına uygun olarak belirlendiğinde hesaplanan kirletici NO emisyonu, deneysel ölçülen NO değerine yakındır. Bu nümerik yöntemdeki en büyük problem ise baca gazı emisyonlarını deney koşullarına göre daha yüksek değerlerde hesaplayabilmesidir. Fakat bu durum varsayım ile hareket edilir, gerçekteki fark ortalama olarak ihmal edilirse, deney koşullarında ölçülen baca gazı sıcaklığına yakın bir sıcaklık değeri hesaplanabilir.

Eşit ısıl güçte ve hava fazlalık katsayısında doğal gaza H_2 katılarak sağlanan yanmada, H_2 oranı arttıkça, yakma havası debisi, hidrojen gazının hacimsel alt ısıl değerinin, doğal gazın hacimsel alt ısıl değerine göre yaklaşık 3 kat daha düşük olmasından kaynaklı olarak düşmektedir. Bu durumda bir doğal gaz yakıtlı brülörde H_2 oranının arttırılarak sağlanan yanmada daha düşük debili yakma fanı kullanılabilecektir. Bu durum yüksek ısıl kapasiteli endüstriyel brülörler için yakma havası fan gereksinimini düşürebilmektedir.

Belirli ısıl güçte ve hava fazlalık katsayısında doğal gaza H_2 eklenerek sağlanan yanmada, H_2 oranı arttıkça yanmada ölçülen O_2 emisyonu hafif dalgalanmalar ile sabit kalmıştır.

Eşit deney ve analiz sınır koşullarında yapılan çalışmalarda, NT türbülatörünün kullanımında CO_2 emisyonunda düşüş eğilimi, SAB türbülatörüne göre daha fazladır. Bu durum, yanma olayında yakıt tipi ve hava karışım oranının türbülatör uygulaması ile doğrudan ilişkili olmasıyla açıklanabilir. Örneğin, bir sıvı yakıt türbülatörü ile doğal gaz türbülatörünün tasarımları ve yanma performansları birbirinden farklıdır. H_2 katkılı doğal

gaz yakıt kullanımında, türbülatörün yakıt ve hava karışım performansı, doğal gaz ve hava için eksik yanma oluşturmayacak kadar yeterli olsa da yakıt bileşimindeki H_2 ve hava karışımı için yeterli olmayabilir. Aynı ısıl güç talebi için fazlaca H_2 brülöre farkedilmeden verilebilir. Yanma sisteminde baca gazlarından yanmamış hidrokarbonlar gibi, H_2 salınımını ölçebilecek bir cihaz bulunmaması durumunda ciddi H_2 yakıt sarfiyatı ile karşılaşılabilir. Bu sebeple, H_2 katkılı doğal gaz yanma uygulamalarında brülörün türbülatör karışım performansı ölçülmeli ve analiz edilmeli, sonrasında saha testleri ile endüstride kullanıma hazır hale getirilmelidir.

Kirletici emisyon olan NO_x oluşumunun büyük bir oranı alev sıcaklıklarının artışı ile oluşmaktadır. H_2 yanması sonucu oluşan maksimum adyabadik alev sıcaklığının yüksek olması, yanma hücresinden eşit ısı yükü çekişi koşullarında baca gazı sıcaklıklarını doğrudan arttırır. Deneysel ve nümerik çalışmalarda bu durum gerçekleşmiştir. NT türbülatörü ile sağlanan yanmada, H_2'nin yanma bölgesindeki reaksiyona girme oranının SAB türbülatörü ile sağlanan yanmaya göre daha fazla olarak, alev sıcaklıklarını ve baca sıcaklıklarını arttırarak, NO_x oluşumunu arttırmıştır. Fakat yanmada H_2 oranı artışında NO_x oluşma oranındaki artış NT türbülatöründe SAB türbülatörüne göre daha düşüktür. Yanmadaki hava fazlalılığı artışına bağlı olarak NO_x emisyonları düşürülmüştür. Ayrıca literatürde ve saha uygulamalarından edinilen bilgiler ile konvansiyonel brülör sistemlerinde, doğal gaza katılan H_2 oranı arttıkça NO_x oluşumu artmaktadır. Ultra düşük NO_x brülörlerinde uygulanan, NO_x düşürme teknikleri ile baca gazındaki NO_x oranı düşürülebilmektedir.

Eşit ısıl kapasitede ve λ katsayısı ile doğal gaz yakıtın içeriğindeki hacimce H_2 katkı oranı artarak sağlanan yanmada ana alev formasyonu toplanarak, alev ön karışımının artışı görsel ve sayısal olarak görülmüştür. Doğal gazın içeriğindeki H_2 katkı oranı arttıkça yanma reaksiyon yüksek sıcaklıklığının brülöre doğru hareketi ölçülmüştür.

NT türbülatörünün tüm test koşullarında hacimce % 20 oranlarında hidrojen gazı karıştırılarak sağlanan doğal gaz yanması için SAB türbülatörüne göre daha uygun olduğu görülmüştür. SAB türbülatöründe CO_2 yıkım oranı yaklaşık % 5,8 hesaplanırken ,bu oran NT türbülatör ile % 8 oranında gerçekleşmiştir. Dekarbonizasyon çalışmalarında, türbülatör değişimi ile % 28 oranında daha fazla CO_2 yıkım oranı sağlanmıştır.

BÖLÜM 10

ÖNERİLER VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında, endüstride mevcut kullanılan bir proses gaz brülörünün hacimce % 20 oranına kadar H_2 ve % 80 oranına kadar doğal gaz oranında yakıt ile yakılmasında bir risk görülmemiştir. Yapılan çalışmalar ile CO_2 emisyonlarında % 8,2 oranına kadar düşüş sağlanmıştır. Bu durum mevcut brülör üzerinde türbülatör tasarımının değişimi ile sağlanmıştır. Türbülatör tasarımının değişimi ile CO_2 emisyonlarında düşüş oranı arttırılabilir.

Yanmada H_2 oranının artması ile yanma için gerekli olan yakma hava debisi düşmektedir. Brülörde, doğal gaz yakıtla sağlanan hedef ısıl gücün, H_2 kullanımı ile sağlanması durumunda daha düşük fan gereksinimini olacaktır. Bu durum, brülörde daha düşük elektrik tüketimini sağlayarak, işletme enerji verimliliğine katkı sağlayabilir.

Gaz yakıtlı brülörde yakıta düşük oranlarda H_2 katılması CO kirletici emisyonlarını düşürerek, sıfırlamıştır. Proseslerde eksik yanma problemini gidermek için gaz yakıta düşük oranlarda H_2 katılarak yanma verimi arttırılabilir. Bu sebeple proseslerde H_2'nin kontrollü kullanımı yanma verimliliği açısından faydalı bir uygulamadır.

Geri tepme olayı, H_2 katkılı ve saf H_2 gaz yakıt yakma uygulamalarının en önemli riskidir. Difüzyon yanmasına sahip olan gaz yakıtlı brülörlerde, düşük oranlarda H_2 katkılı gaz yakıt kullanılmasında geri tepme riski çok düşüktür. Bu sebeple brülörde gerekli kontroller sağlandıktan sonra işletime alınıp, H_2 yakıt katkısı olarak kullanılabilir.

Konvansiyonel brülör sistemlerinde, kirletici emisyon olan NO_x , yakıt içeriğinde H_2 artmasıyla artmaktadır. NO_x oranını düşürmek için NO_x düşürme teknikleri uygulabilir. Brülörün işletimi çevre dostu hale getirilebilir.

Bu tez çalışmasında sadece proses gaz brülörü kullanılmıştır. Farklı brülör tiplerinde de yakıta H_2 katılarak, karışımlı yanmanın performansı incelenebilir.

Yanmada H_2 katkısının artması ile karbon emisyonları düşmekte, saf H_2 yanmasında sıfırlanmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılan Ecostar FPB 200 proses gaz brülörde hacimce % 20 üzeri H_2 katkılı yakıt ile yanma sağlanabilir. Karbon emisyonlarının düşüş oranı arttırılabilir. Karbon emisyonları, tasarım optimizasyonu ve risk önlemleri ile saf H_2 yanmasının uygulanması durumunda sıfırlanabilir. Endüstriyel proseslerde sıfır karbon emisyonlu yanma uygulanabilir hale gelebilir.

KAYNAKLAR

Akyıldız, A. R. (2008). Doğal gaz işleme.

ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide. (2012, January 05). Erişim tarihi 17 Mart 2023, https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm

Baukal, C. E., Jr. (2012). The John Zink Hamworthy Combustion Handbook: Volume 1 - Fundamentals. CRC Press.

Baukal, C. E., Jr. (2012). The John Zink Hamworthy Combustion Handbook, Second Edition: Volume 1 - Fundamentals. CRC Press.

Baukal, C. E., Jr. (2013). Oxygen-Enhanced Combustion, Second Edition. CRC Press.

Baukal, C. E., Jr. (2013b). The John Zink Hamworthy Combustion Handbook, Second Edition: Three-Volume Set. CRC Press.

Baukal, C., Johnson, B., Haag, M., Theis, G., Henneke, M., Varner, V., & Wendel, K. (2021). High Hydrogen Fuels in Fired Heaters. In American Flame Research Committee Symposium, Houston, Texas. https://www.afrc.net/papers/2021/16%20-%20High%20Hydrogen%20Fuels%20in%20Fired%20Heaters%20.pdf

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2011). Introduction to Heat Transfer. John Wiley & Sons.

BMWK - Federal Ministry for Economics Affairs and Climate Action. (2022, January 5). The National Hydrogen Strategy. Erişim tarihi 22 Eylül 2022, https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.html

Büyükakın, M. K., & Öztuna, S. (2020). Numerical investigation on hydrogen-enriched methane combustion in a domestic back-pressure boiler and non-premixed burner system from flame structure and pollutants aspect. International Journal of Hydrogen Energy, 45(60), 35246–35256. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.117

Caillat, S. (2022). Decarbonising steel heat treatment furnaces and annealing lines. Paper presented at the 13th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Algarve, Portugal, 19-22 April. Fives Stein.

Cellek, M. S., & Pınarbaşı, A. S. (2018). Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels. International Journal of Hydrogen Energy, 43(2), 1194–1207. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.107

Ceyhan, B. M. T. S. Y. a. T. Y. İ. (2023, March 13.). Yeni Ulusal Enerji Planı ve Türkiye Hidrojen Teknolojileri Stratejisi ve Yol Haritası. Erişim tarihi 17 Mart 2023, https://www.dogalgaz.com.tr/yayin/1120/yeni-ulusal-enerji-plani-ve-turkiye-hidrojen-teknolojileri-stratejisi-ve-yol-haritasi_31545.html

CLEAN GAS CENTER. (2021, February 12.). Erişim tarihi 24 Eylül 2022, http://cleangascenter.com/Default#proje-ozeti

Çağrı Ö. (2022). Otomotiv endüstrisinde alüminyum ısıl işlem fırınlarında atık ısının geri kazanım uygulaması, (Tez No. 720355) [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.

Çengel, Y. A., Boles, & Boles, M. A. (2014). Thermodynamics: An Engineering Approach. McGraw-Hill Education Limited.

De Soete, G. G. (1975). Overall reaction rates of NO and N2 formation from fuel nitrogen. In Symposium (international) on combustion (Vol. 15, No. 1, pp. 1093-1102). Elsevier.

Dincer, I., Eroğlu, İ., & Öztürk, M. (2021). Türkiye için hidrojen teknolojileri yol haritası. Hidrojen Teknolojileri Derneği Yayınları. ISBN: 978-605-66381-9-0, https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Turkiye_icin_Hidrojen_Teknolojileri_Yol_Haritasi_Raporu_2021.pdf

Endüstriyel Brülörler - Ecostar. (2023, April 17.). Erişim tarihi 02 Mayıs 2023, https://www.ecostar.com.tr/urunler/endustriyel-brulorler

Energy. (2023, June 29). Energy. Erişim tarihi 21 Eylül 2022, https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf

Euronews. (2021, July 21). Japan's 'hydrogen economy' to power the Tokyo Olympic Games. Euronews. Erişim tarihi 21 Eylül 2022, https://www.euronews.com/green/2021/07/21/japan-hydrogen-economy-to-power-the-tokyo-olympic-games

GAZBİR - Çalışmalar. (2023, March 01). Erişim tarihi 25 Eylül 2022, https://www.gazbir.org.tr/calismalar/151

GAZMER. (2020,January 14). Erişim tarihi 23 Eylül 2022, https://www.gazmer.com.tr/dokuman-d/17/68/hidrojene-gecis-yol-haritasi

Gersen, S., Van Essen, M., Dnv, & Heating, B. (2020). DEMONSTRATION OF HIGH PERFORMANCE (LOW NO x) DOMESTIC HYDROGEN BOILERS. ResearchGate. Erişim tarihi 03 Mayıs 2023 https://www.researchgate.net/publication/347445110_DEMONSTRATION_OF_HIGH_PERFORMANCE_LOW_NO_x_DOMESTIC_HYDROGEN_BOILERS

Glassman, I., Yetter, R. A., & Glumac, N. G. (2014). Combustion. Academic Press.

H2.LIVE: Hydrogen Stations in Germany & Europe. (2022, July 19). H2.LIVE. Erişim tarihi 22 Eylül 2022,https://www.h2.live/en/

H2IT Italia. (2022,August 10.). Erişim tarihi 23 Eylül 2022, https://www.h2it.it/

Halter, F., Chauveau, C., & Gökalp, I. (2007). Characterization of the effects of hydrogen addition in premixed methane/air flames. International Journal of Hydrogen Energy, 32(13), 2585–2592. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.033

Heat treatment. (2023, February 14). Fives Group. Erişim tarihi 12 Mart 2023, https://www.fivesgroup.com/ru/steel/reheating/heat-treatment

Horizon Europe. (2023, March 14.. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. Erişim tarihi 22 Eylül 2022 https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/hydrogen/funding-guide/eu-programmes-funds/horizon-europe_en

Hydrogen – Analysis - IEA. (2021, January 17). IEA. Erişim tarihi 21 Eylül 2022, https://www.iea.org/reports/hydrogen

Hydrogen | What we do | Home. (2022, March 12). Bp Global. Erişim tarihi 21 Eylül 2022, https://www.bp.com/en/global/corporate/what-we-do/gas-and-low-carbon energy/hydrogen.html

Hydrogen Europe. (2023, June 16). Home - European Hydrogen Week. European Hydrogen Week. Erişim tarihi 22 Eylül 2022, https://euhydrogenweek.eu/

Hydrogen Europe. (2023a, June 16). Home - European Hydrogen Week. European Hydrogen Week. Erişim tarihi 23 Eylül 2022, https://euhydrogenweek.eu/

Hydrogen. (2020, April 19). Shell. Erişim tarihi 21 Eylül 2022, https://www.shell.co.uk/a-cleaner-energy-future/hydrogen.html

Ilbas, M. (2005). The effect of thermal radiation and radiation models on hydrogen–hydrocarbon combustion modelling. International Journal of Hydrogen Energy, 30(10), 1113–1126. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.009

Ilbas, M., & Sahin, M. (2017). Effects of turbulator angle and hydrogen addition on a biogas turbulent diffusion flame. International Journal of Hydrogen Energy, 42(40), 25735–25743. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.111

Ilbas, M., & Yılmaz, İ. (2011). Experimental analysis of the effects of hydrogen addition on methane combustion. International Journal of Energy Research, 36(5), 643–647. https://doi.org/10.1002/er.1822

Ilbas, M., Crayford, A. P., Yilmaz, I., Bowen, P. J., & Syred, N. (2006). Laminar-burning velocities of hydrogen–air and hydrogen–methane–air mixtures: An experimental study. International Journal of Hydrogen Energy, 31(12), 1768–1779. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.007

Ilbas, M., Karyeyen, S., & Özdemir, İ. (2015). Investigation of premixed hydrogen flames in confined/unconfined combustors: A numerical study. International Journal of Hydrogen Energy, 40(34), 11189–11194. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.12.096

Ilbas, M., Yılmaz, İ., & Kaplan, Y. (2005). Investigations of hydrogen and hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and emission characteristics in a model combustor. International Journal of Hydrogen Energy, 30(10), 1139–1147. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.016

İZAYDAŞ (2020, March 17.) İZAYDAŞ Akademi Tehlikeli atık bertaraf yöntemleri ve İZAYDAŞ yakma tesisi eğitim sunumu, İZAYDAŞ, Erişim tarihi 12 Mart 2023, https://www.izaydas.com.tr/144-izmit_atik_ve_artiklari-_aritm_yakma_ve_degerlendirme-icerikDetay-izaydas_akademi.html

Kılıç, B.(2022). Yüksek alev hızlarına sahip endüstriyel yakıcılarda yanma sonucu oluşan emisyonların deneysel ve nümerik olarak incelenmesi (Tez No. 718118) [Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Kuo, K. K. (1986). Principles of Combustion. Wiley-Interscience.

Libretexts. (2020). 3.9 Stoichiometric Calculations: Amounts of Reactants and Products. Chemistry LibreTexts. https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/Map%3A_Chemistry_(Zumdahl_and_Decoste)/03%3A_Stoichiometry/3.09_Stoichiometric_Calculations%3A_Amounts_of_Reactants_and_Products

Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. Waste Management. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010

Merlo, N., Boushaki, T., Chauveau, C., De Persis, S., Pillier, L., Sarh, B., & Gökalp, I. (2014). Combustion characteristics of methane–oxygen enhanced air turbulent non-premixed swirling flames. Experimental Thermal and Fluid Science, 56, 53–60. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2013.11.019

Miller, J. H., & Bowman, C. T. (1989). Mechanism and modeling of nitrogen chemistry in combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 15(4), 287–338. https://doi.org/10.1016/0360-1285(89)90017-8

Monoblok Brülörler - Ecostar. (2023, April 17.). Erişim tarihi 02 Mayıs 2023, https://www.ecostar.com.tr/urunler/monoblok-brulorler

Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. Renewable and sustainable energy reviews, 67, 597-611. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044Get rights and content

Oleinik, J. (2004). Use of vacuum furnaces in heat treatment. Metal science and heat treatment, 46(11-12), 554-558

Riello S.P.A (2001) Forced Draught Burner Handbook, 1st Edition, Riello S.p.A, Legnago.

Speight, J. G. (2018). Natural Gas: A Basic Handbook. Gulf Professional Publishing.

Strehlow, R. A. (1984b). Combustion Fundamentals. McGraw-Hill Companies.

Telli, Z. K. (1998).Yakıtlar ve yanma.

The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2023). Methane | Definition, Properties, Uses, & Facts. Encyclopedia Britannica. https://www.britannica.com/science/methane

Tiwari, M. K., Mukhopadhyay, A., & Sanyal, D. (2005). Process modeling for control of a batch heat treatment furnace with low NOx radiant tube burner. Energy Conversion and Management, 46(13–14), 2093–2113. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.10.017

Trinks, W., Mawhinney, M. H., Shannon, R. A., Reed, R. J., & Garvey, J. R. (2003). Industrial Furnaces. John Wiley & Sons.

TS EN 676: 2020 Brülörler - Otomatik üflemeli - Gaz yakıtlar için (Forced draught burners for gaseous fuels)

Turns, S. R. (1996). Solutions Manual to Accompany an Introduction to Combustion: Concepts and Applications.

Usalan, M.A.S. (2015), Bir endüstriyel fırın otomasyonu, (Tez No. 397035) [Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Uza E.(2017). Numerical and experimental investigation of a domestic natural gas burner and analysis of modifications to achive Low NOx emissions (Tez No. 453697) [Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education.

Warnatz, J., Maas, U., & Dibble, R. W. (2013). Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation. Springer Science & Business Media.

Yılmaz, İ., (2006). Model Bir Yakıcıda Hidrojen-Metan Karışımının Yanmasının Sayısal Ve Deneysel İncelenmesi (Tez No. 196822) [Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi] YÖK Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/

Zhao, K., Cui, D., Xu, T., Zhou, Q., Hui, S., & Hu, H. (2008). Effects of hydrogen addition on methane combustion. Fuel Processing Technology, 89(11), 1142–1147. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.05.005

ÖZGEÇMİŞ

İlk öğretimini Lüleburgaz'da tamamlayan Onur Salcı, lise eğitimini yine Lüleburgaz Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesinde tamamlamıştır. 2008 yılında lise eğitimini tamamlayarak Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği lisans eğitimine başlamıştır. Lisans eğitimini 2013 yılında tamamlamıştır. 2021 yılında Trakya Üniversitesi'nde Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Yabancı dili İngilizcedir.

Profesyonel kariyerine 2014 yılında HMY Teknogon Teşhir Elemanları San. Ve Tic. A.Ş. teknik ofis elemanı olarak başlamıştır. 2015 yılında Elkon Beton Santralleri Tic. A.Ş. inovasyon mühendisi olarak çalışmıştır. 2016 yılında ürün geliştirme mühendisi olarak başladığı Termo Isı Sistemleri San. Ve Tic. A.Ş.'de kıdemli Ar-Ge mühendisi olarak çalışmaktadır.

Onur Salcı, evli ve bir çocuk babasıdır.